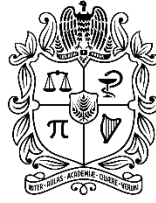


UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollo teórico para implementación de un sistema automático de correlación entre fallas en líneas de distribución eléctrica y descargas atmosféricas.

Vladimir Henao Céspedes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2017



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Theoretical development for the implementation of an automatic correlation system between faults in electrical distribution lines and atmospheric discharges.

Vladimir Henao Céspedes

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2017

Desarrollo teórico para implementación de un sistema automático de correlación entre fallas en líneas de distribución eléctrica y descargas atmosféricas.

Vladimir Henao Céspedes

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:
Doctor en Ingeniería – Línea Automática

Director:

Dr. Ing. Luis Fernando Díaz Cadavid

Codirector:

Dr. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata

Línea de Investigación:

Compatibilidad Electromagnética

Grupos de Investigación:

GTT & GREdYP

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura, Departamento de Ingeniería Eléctrica,
Electrónica y Computación
Manizales, Colombia
2017

Dedicatoria

A mi esposa Johanna y mi hijo Mathías, que son mi fuente de inspiración, me dan fuerza y aliento, y que tuvieron que soportar momentos de ausencia y de estrés durante el desarrollo de esta tesis.

A mis padres y hermanos, que siempre han estado ahí, en todos mis procesos y me han orientado con sus sabias palabras.

Agradecimientos

A mis directores de tesis, al profesor Dr. Ing. Luis Fernando Díaz Cadavid y al Dr. Ing. Eduardo Antonio Cano Plata, por su constante apoyo para lograr con éxito la culminación de esta investigación.

A todos los integrantes de los grupos de investigación GTT & GREdYP.

A la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales, especialmente al Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y Computación.

A la Universidad Católica de Manizales.

A la Universidad de Buenos Aires, especialmente al laboratorio de Radiación Electromagnética y al Departamento de Electrónica.

A COLCIENCIAS, en su convocatoria 6172.

Resumen

La presente tesis, presenta un desarrollo teórico para la implementación de un sistema, el cual, permite efectuar una correlación espacio - temporal de manera automática entre fallas en líneas de distribución eléctrica y descargas atmosféricas. La finalidad es establecer en tiempo real y con un grado de certidumbre, la responsabilidad del rayo como causa de iniciación de fallas en líneas de distribución, durante procesos de tormenta. Asimismo, en el desarrollo se presentan tres aportes relevantes a la investigación en este campo: Primero, una expresión matemática para el cálculo de la tensión inducida por el rayo y se definen expresiones para calcular una ventana de tiempo y el corredor espacial, parámetros requeridos para efectuar la correlación; segundo, un método para priorizar la atención de las fallas en la red de distribución, fundamentado en la entropía; y tercero, se modela el acople entre el rayo y la línea de distribución, como un sistema de telecomunicaciones, en donde la línea es asumida como una antena lazo.

Palabras clave: Correlación automática, entropía, fallas, línea de distribución, priorización, rayo.

Abstract

This thesis, presents a theoretical development for the implementation of a system, which allows to make a spatial - temporal correlation automatically between faults in electrical distribution lines and atmospheric discharges. The aim is to establish real-time and with a degree of certainty, the accountability of lightning as the initiation cause of failure in distribution lines during thunderstorm processes. Also, in the development three important contributions to research in this field are presented: First, a mathematical expression for the calculation of the voltage induced by the lightning and expressions are defined to calculate a time window and the spatial corridor, parameters required to perform the correlation; second, a method to prioritize attention to faults in the distribution network, based on entropy; and third, the coupling between the lightning and the distribution line is modeled, as a telecommunications system, where the line is assumed as a loop antenna.

Keywords: Automatic correlation, entropy, faults, distribution line, prioritization, lightning.

CONTENIDO

| | |
|---|----|
| LISTA DE FIGURAS | 17 |
| LISTA DE TABLAS..... | 19 |
| LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS..... | 21 |
| 1 Introducción | 25 |
| 1.1 Justificación..... | 26 |
| 1.2 Formulación del problema..... | 27 |
| 1.3 Hipótesis de solución | 28 |
| 1.4 Objetivo general..... | 29 |
| 1.4.1 Objetivos específicos | 29 |
| 1.5 Estructura del documento | 29 |
| 2 Antecedentes y estado del arte | 31 |
| 2.1 Del rayo modelado como antena | 31 |
| 2.2 Del rayo como causa de fallas en líneas de distribución | 32 |
| 2.3 De la tensión inducida por el rayo sobre líneas de distribución | 33 |
| 2.4 De la correlación espacio - temporal entre el rayo y fallas..... | 39 |
| 2.5 De la entropía en la toma de decisiones | 41 |
| 3 Módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo | 45 |
| 3.1 Problemas en la implementación de la técnica para la correlación - espacio temporal. | 46 |
| 3.2 Desarrollo de una expresión analítica para el cálculo de la tensión inducida. | 48 |
| 3.2.1 Modelado del rayo como una fuente de inducción multifrecuencial..... | 49 |
| 3.2.2 Modelado de la línea de distribución como una antena lazo..... | 54 |
| 3.2.3 Marco comparativo para la validación de la expresión desarrollada para calcular la tensión inducida por el rayo sobre la línea de distribución. | 60 |
| 3.2.4 Resultados..... | 63 |
| 3.3 Técnica de correlación espacial..... | 71 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 3.4 | Correlación temporal | 75 |
| 3.5 | Diagrama de flujo del sistema de correlación espacio - temporal..... | 77 |
| 3.6 | Resultados de la aplicación del módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo. | 78 |
| 4 | Módulo de priorización de atención de fallas..... | 89 |
| 4.1 | Problema para la asignación de prioridades en la atención de las fallas. | 89 |
| 4.2 | Metodología no subjetiva para la priorización entrópica..... | 90 |
| 4.2.1 | Asignación del valor de estado a las posibles causas. | 91 |
| 4.3 | Resultados de la metodología de priorización entrópica. | 95 |
| 5 | Conclusiones, aportes y trabajos futuros. | 99 |
| 5.1 | Conclusiones generales de la tesis. | 100 |
| 5.2 | Aportes. | 101 |
| 5.3 | Trabajos futuros. | 102 |
| | Apéndice A: Descargas atmosféricas (rayo) | 105 |
| | Apéndice B: Proyectos y producción académica relacionada..... | 107 |
| | Bibliografía | 109 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Fig. 1: Proceso de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica..... | 26 |
| Fig. 2: Diagrama de bloques del sistema automático de correlación espacio-temporal y de priorización. | 28 |
| Fig. 3: Áreas de estudio de la tensión inducida | 33 |
| Fig. 4: Modelo de evento del rayo de la formulación de Rusck | 35 |
| Fig. 5: Línea de test usada por Jankov | 36 |
| Fig. 6: Tensiones inducidas por un rayo de 11kA sobre la línea de test en los diferentes puntos de medición. | 36 |
| Fig. 7: Tensiones inducidas (U) obtenidas con el ERM para un rayo de 50kA con una longitud de canal de 3km y una distancia de impacto equidistante al punto medio de la línea de 60m. | 37 |
| Fig. 8: Tensión inducida por un rayo de 35kA de polaridad positiva y con una distancia de impacto de 100m..... | 38 |
| Fig. 9: Tensión inducida por un rayo negativo de 33.1kA y con una distancia de impacto de 100m | 38 |
| Fig. 10: Diagrama esquemático del estudio de la correlación espacio temporal | 39 |
| Fig. 11: Desarrollo teórico de la priorización fundamentada en la Entropía | 41 |
| Fig. 12: Rayo como emisor multifrecuencial | 49 |
| Fig. 13: Sistema de emisor multifrecuencial sobre una superficie plana conductora | 50 |
| Fig. 14: Geometría del rayo (dipolo) y punto de inducción sobre la línea | 51 |
| Fig. 15: El campo magnético de densidad B corta el área A en un ángulo θ | 55 |
| Fig. 16: Circuito eléctrico equivalente. | 55 |
| Fig. 17: Modelo de antena lazo para una línea de distribución | 56 |
| Fig. 18: Geometría para definir la tensión inducida en un punto a una distancia ρ_l | 56 |
| Fig. 19: Regiones de radiación del rayo | 57 |
| Fig. 20: Geometría modificada del rayo (dipolo) y punto de inducción sobre la línea (lazo) | 62 |
| Fig. 21: Forma temporal de la onda de corriente de un rayo 5,63/77,5 (std IEEE -1410)..... | 64 |
| Fig. 22: Espectro de frecuencias del rayo (Escala Logarítmica)..... | 64 |
| Fig. 23: Variación de la tensión inducida por el rayo con la distancia..... | 65 |
| Fig. 24: Espectro de la tensión inducida por el rayo | 66 |
| Fig. 25: Forma temporal de la onda de corriente rayo procesado por LEMPSA - 1 | 66 |
| Fig. 26: Espectro de frecuencias entregado por LEMPSA - 1 (Escala Logarítmica)..... | 67 |
| Fig. 27: Variación de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPSA - 1 Vs la distancia. 67 | |
| Fig. 28: Espectro de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPSA - I | 68 |
| Fig. 29: Variación de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPSA - I con la distancia al incluir la longitud de la línea. | 69 |
| Fig. 30: Espectro de la tensión inducida por el rayo procesado de por LEMPSA - 1 para una línea de 50 m..... | 70 |
| Fig. 31: Definición del corredor espacial de la línea..... | 71 |
| Fig. 32: Corredor espacial para línea Bifilar del escenario virtual y frontera entre zonas | 72 |
| Fig. 33: Ubicación espacial de la línea..... | 72 |
| Fig. 34: Proyección ortogonal..... | 73 |

| | |
|---|----|
| Fig. 35: Proyección por fuera del punto (x_{f2}, y_{f2}) | 74 |
| Fig. 36: Proyección ortogonal por fuera del punto (x_i, y_i) | 74 |
| Fig. 37: Distancias de propagación de la señal LEMP..... | 75 |
| Fig. 38: Diagrama de Flujo de SACET..... | 78 |
| Fig. 39: Red de distribución de prueba con sus respectivos relés..... | 79 |
| Fig. 40: Corredores espaciales para cada uno de los rayo registrados en el proceso de tormenta | 82 |
| Fig. 41: Localizaciones de los impactos de los rayos. | 83 |
| Fig. 42: Métodos de normalización sintetizados | 93 |
| Fig. 43: Red de prueba | 95 |

LISTA DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1: Red de distribución de prueba con sus respectivos relés | 79 |
| Tabla 2: Información de rayos detectados | 79 |
| Tabla 3: Valor de los corredores espaciales en función de cada rayo | 80 |
| Tabla 4: Coordenadas (x,y) de rayos detectados | 82 |
| Tabla 5: Fallas reportadas durante el proceso de tormenta..... | 83 |
| Tabla 6: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 4..... | 84 |
| Tabla 7: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 7..... | 85 |
| Tabla 8: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 1 | 86 |
| Tabla 9: Causas de fallas y su probabilidad de generar fallas (valores de estado) | 91 |
| Tabla 10: Valores de Entropía..... | 97 |
| Tabla 11: Pesos entrópicos - ordenación de posibles causas de iniciación de las fallas | 98 |

LISTA DE SIMBOLOS Y ABREVIATURAS

Símbolos con letras latinas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|---------------------|--|-----------|------------------------|
| A | Área encerrada por el lazo | m | Ecuación (28) |
| \overline{A}_z | Componente z del Potencial vectorial | | Ecuación (11) |
| c | la velocidad de la luz, velocidad de la luz | m/s | 3×10^8 m/s |
| d | Distancia entre el punto de impacto del rayo y la línea de distribución | m | |
| fn | n -ésima frecuencia | Hz | Sección 3.1 |
| h | altura promedio entre tierra y el conductor de la línea | m | |
| $heff$ | Altura efectiva | m | Ecuación (4) |
| H | Entropía | | Ecuación (8) |
| $I(0)$ | corriente en la base del canal | A | |
| I_{n-max} | amplitud de corriente máxima de n -ésima componente espectral del rayo | A | |
| I_n | Corriente en función de la frecuencia almacenada por LEMPSA - I | A | |
| I_0 | Corriente máxima de la descarga de retorno | A | |
| k | Valor asociado a la unidad de medida de H | | |
| k' | Constante de Boltzman | J/K | 1.38×10^{-23} |
| L | Altura del canal de descarga | m | |
| P_k | Probabilidad de ocurrencia de un estado k | | Ecuación (7) |
| V_{ind-n} | Tensión inducida por la n -ésima componente espectral | V | Ecuación (39) |
| $V_{ind-total-max}$ | Tensión inducida total por el rayo | V | Ecuación (48) |
| v | Velocidad de la descarga de retorno | m/s | |
| z_l | Altura promedio de la línea entre suelo y la tierra | m | Fig. 17 |
| ZS | Zona segura de la línea de distribución | m | Fig. 31 |

Símbolos con letras griegas

| Símbolo | Término | Unidad SI | Definición |
|--------------|---|-----------|---------------|
| H_{ϕ_n} | n -ésima componente acimutal de campo magnético | | Ecuación (22) |
| τ_1 | Tiempo de frente del rayo | us | |
| τ_2 | Tiempo de cola del rayo | us | |

| | | | |
|----------------|--|-----|-------------------|
| θ_{ind} | Angulo de inducción de respecto a la normal de la línea de distribución | rad | Sección 3.3.2 |
| β | Relación entre la velocidad del stroke y la velocidad de la luz | | v/c |
| λ | Longitud de onda | m | c/f |
| ρ_l | Distancia horizontal entre el punto de impacto del rayo y la línea de distribución | m | Ecuación (45) |
| ω | Frecuencia angular | rad | $\omega = 2\pi f$ |

Abreviaturas

| Abreviatura | Término |
|--|---|
| BIL | Basic Insulation Level |
| CE | Corredor Espacial |
| CEM | Campos Electromagnéticos |
| CFO | Critical Flashover |
| DMD | Decisión MultiDiscreta |
| EFIE Electric Field Integral Equation | Electric Field Integral Equation |
| EM | Electromagnético |
| ERM | Extended Rusck Model |
| FFT | Fast Fourier Transform |
| GREdyP (Grupo de Redes de Distribución y Potencia) | Grupo de Redes de Distribución y Potencia |
| GTT (Grupo de investigación en Telemática y Telecomunicaciones) | Grupo de investigación en Telemática y Telecomunicaciones |
| LEMP | Lightning Electromagnetic Pulse |
| LEMPSA | Lightning Electromagnetic Pulse Spectrum Analyzer |
| MADM | MultiAttribute Decision Making |
| MoM | Método de los momentos |
| NC | Nivel Cerámico |
| RF | Radio Frecuencia |
| SACET | Sistema de Correlación Espacio Temporal |
| ZCI | Zona de Convergencia Intertropical |

1 Introducción

La presente tesis presenta un desarrollo teórico para implementación de un sistema que permita efectuar de manera automática una correlación espacio – temporal entre dos subsistemas de información ya existentes: uno de descargas atmosféricas y otro de fallas en la red de distribución eléctrica, con el fin de especificar en tiempo real y con un grado de certidumbre, la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de fallas y/o salidas del servicio en líneas de distribución eléctrica, durante los procesos de tormenta. Asimismo, como un aporte adicional y utilizando como insumo la información brindada por dicho sistema, se presenta una técnica de priorización de atención de fallas, la cual fue implementada mediante un método entrópico. Es de anotar que durante el desarrollo del objetivo principal de la tesis, surgieron tres aportes: primero, una expresión matemática para el cálculo de la tensión inducida por el rayo sobre la línea de distribución desde un enfoque de las telecomunicaciones y sistemas radiantes; segundo, un modelado de la línea de distribución de energía como una antena lazo y del canal vertical de descarga del rayo como una estación emisora multifrecuencial (fuente de inducción EM); tercero, una formalización matemática de un corredor espacial y de una ventana de tiempo, parámetros necesarios para establecer la correlación mencionada.

Esta tesis es de carácter investigativo y fue realizada de manera conjunta entre dos grupos de investigación de la Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales: **GTT** (Grupo de investigación en Telemática y Telecomunicaciones) y **GREdyP** (Grupo de Redes de Distribución y Potencia), estos grupos han tenido como foco de investigación en los últimos años las descargas atmosféricas desde el punto de vista del análisis espectral del **LEMP** (pulso electromagnético radiado por el rayo).

El desarrollo de esta tesis contó con el apoyo de las siguientes instituciones: Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales en la cual es desarrollada la investigación; Colciencias que efectuó la financiación a través de la convocatoria de becas doctorales **6172** y la Universidad Católica de Manizales la cual brindó apoyo financiero y logístico.

1.1 Justificación

La energía eléctrica es un insumo importante para un mundo globalizado e industrializado, sin ella, la humanidad no podría desarrollar infinidad de actividades. La electricidad posterior al proceso de generación, es transportada a través de líneas de transmisión a las subestaciones, y desde allí llega al usuario final por medio de líneas de distribución. (Ver Fig. 1).

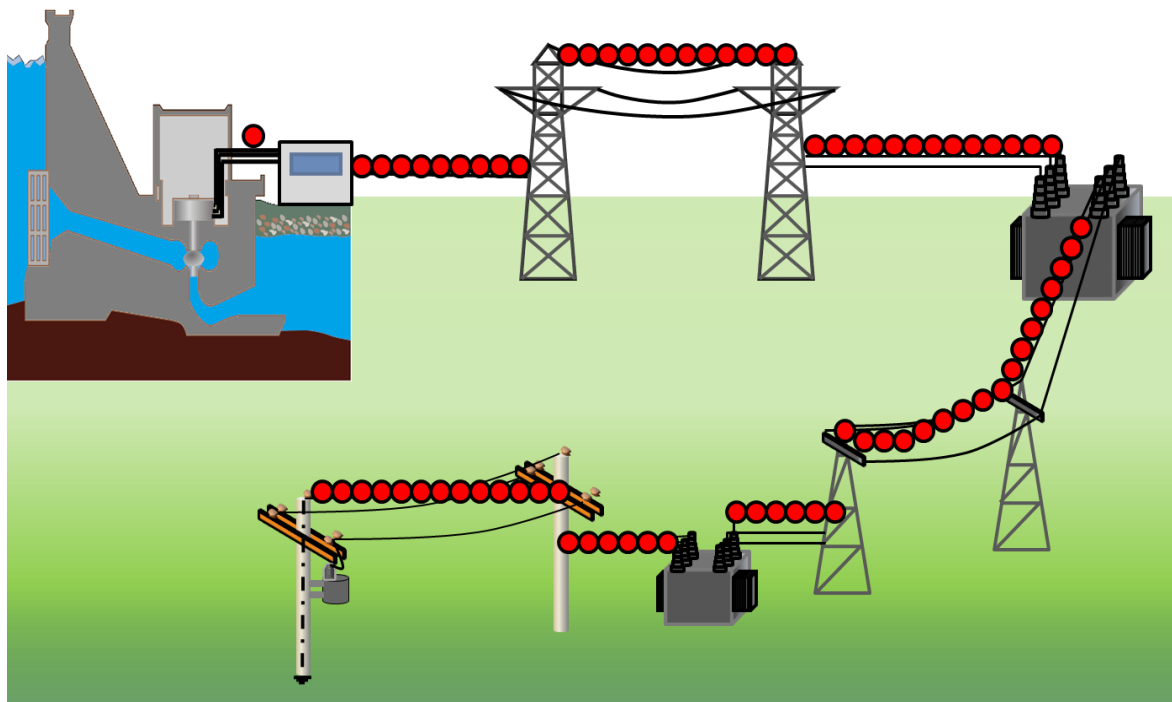


Fig. 1: Proceso de generación, transmisión y distribución de la energía eléctrica.

Los usuarios esperan contar con una óptima calidad en la prestación del servicio de energía eléctrica, y es por ello, que es de vital importancia reducir en tanto sea posible los tiempos de interrupción del suministro eléctrico. La tarea entonces del operador, cuando se presentan apagones durante procesos de tormenta, es minimizar las repercusiones de estos en la calidad del servicio prestado.

En un país como Colombia se presentan dos situaciones que repercuten en la calidad del servicio prestado: la primera, por su ubicación geográfica en la zona de convergencia intertropical (**ZCI**) se encuentran regiones al centro del país con Nivel Cerámico (**NC**) de 140 días tormentosos por año [1], es decir, cuenta con regiones de altos NC [2], niveles que en un

futuro se verán incrementados por los cambios climáticos a final del siglo, considerando que, la actividad atmosférica se incrementará en un 50% gracias al calentamiento global [3]; la segunda, porque las redes de distribución eléctrica son en su mayoría de carácter aéreo (red expuesta a la intemperie). Ambas situaciones conducen a que, durante los procesos de tormenta, el rayo es el principal causante de las fallas en las líneas de distribución, y por tanto, se presenta como el principal responsable de las salidas de servicio, e inclusive cuando no lo es, se le culpa injustamente, desconociendo que, durante una tormenta eléctrica surgen otros eventos atmosféricos distintos que pueden afectar el normal funcionamiento de las líneas aéreas como lo son: viento, temperaturas extremas, nieve, hielo, tormentas, lluvia y la humedad [4], los cuales pueden llegar a ser responsables de las fallas y/o salidas del servicio y tener un valor dentro de la probabilidad de responsabilidad de las fallas atribuidas erróneamente al rayo.

El responsabilizar al rayo de forma errónea de la falla ocurrida, afecta la calidad del servicio prestado, al indicar equivocadamente al operador eléctrico que una falla y/o salida del servicio fue ocasionada por un rayo, lo cual implica que por desconocimiento se tardará un mayor tiempo en realizar la reparación y por tanto en restaurar el suministro eléctrico.

Lo anterior justifica la necesidad de definir de una forma certera la responsabilidad del rayo en la generación de la falla, de tal manera que, si el operador eléctrico puede establecer que efectivamente la falla fue ocasionada por un rayo, se le facilita definir con qué tipo de equipos debe contar la brigada de reparación enviada al sitio del impacto del rayo y disminuir los tiempos de interrupción, mejorando así la calidad del servicio prestado.

1.2 Formulación del problema

Para establecer de forma certera la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de la falla del sistema de distribución eléctrica durante los procesos de tormenta, y atender la salida del servicio de manera inequívoca, se plantean dos preguntas orientadoras, así:

- *¿Cómo especificar la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de fallas en el sistema de distribución eléctrica?*
- *¿Cómo priorizar la atención de fallas durante un proceso de tormenta?*

1.3 Hipótesis de solución

Se propone el desarrollo de un sistema automático de correlación espacio-temporal entre datos de impactos de descargas atmosféricas (rayos) y datos de fallas en líneas de distribución. Este sistema permitirá posteriormente realizar la identificación certera del rayo como generador de las fallas.

Consecuentemente se propone elaborar un método de priorización de atención de fallas en líneas de distribución ocurridas en momentos de tormenta, método que se basará en dos técnicas existentes: **MADM** y el método entrópico.

Como resultado final se espera obtener un sistema que permita: por un lado, definir cuando el rayo es el verdadero causante de fallas en líneas de distribución en momentos de tormenta, y por el otro, que priorice la atención de las fallas en las líneas de distribución, dando así respuesta a requerimientos de la industria energética de la nación.

En el siguiente diagrama se esboza un modelo esquemático del sistema propuesto:

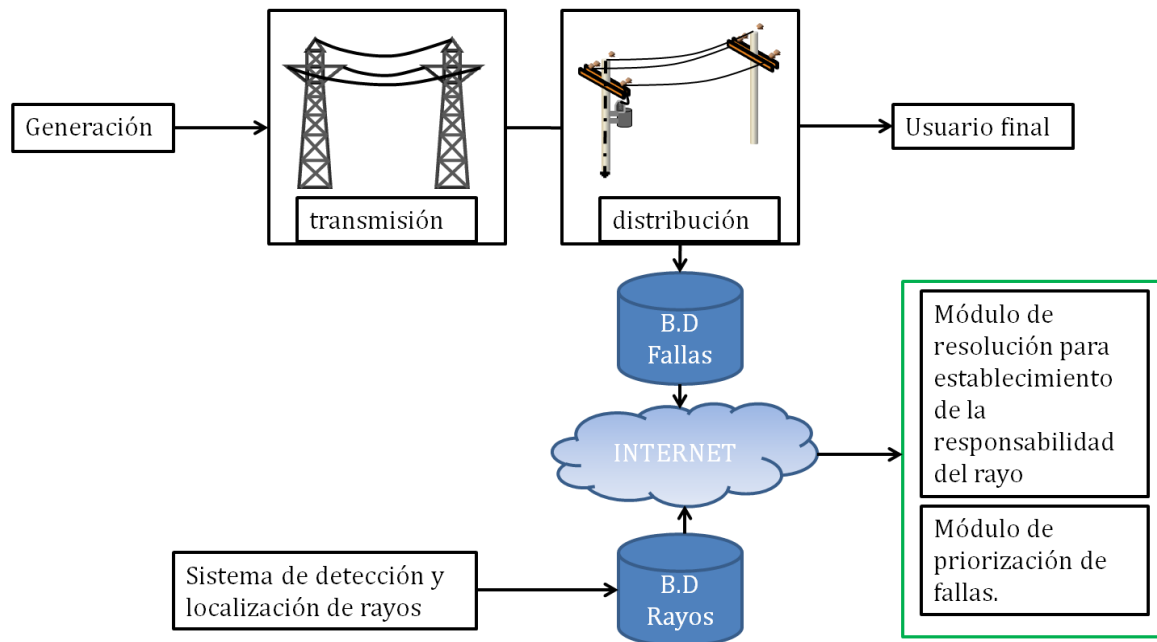


Fig. 2: Diagrama de bloques del sistema automático de correlación espacio-temporal y de priorización.

El sistema propuesto estaría compuesto por dos (2) módulos:

- Módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo.
- Módulo de priorización de fallas.

La implementación de cada módulo se daría en dos fases:

- Fase 1: Implementación teórico-matemática: incluye modelado y definición de variables.
- Fase 2: Implementación hardware-software: instalación de equipos, desarrollo de la aplicación software, pruebas experimentales, etc.

Ahora bien, considerando que el desarrollo de dicho sistema para un solo trabajo de tesis es demasiado ambicioso, la presente tesis acometerá solamente la fase 1.

1.4 Objetivo general

Realizar el desarrollo teórico-matemático de un sistema que mediante una correlación espacio - temporal realice de manera automática una identificación certera de la descarga atmosférica (rayo) como causa de iniciación de fallas en líneas de distribución de energía eléctrica durante procesos de tormenta, y que a su vez efectúe una priorización de atención de fallas en función de los pesos de las causas de iniciación mediante un método entrópico.

1.4.1 Objetivos específicos

- Desarrollar una metodología que mediante técnicas de correlación espacio-temporal permita identificar en qué momento y de qué manera, la ocurrencia de un rayo es la verdadera causante de fallas en las líneas de distribución eléctrica.
- Implementar mediante un método entrópico, un módulo funcional para la priorización de atención de fallas en líneas de distribución eléctrica, ocurridas durante un proceso de tormenta y en función de las causas de su iniciación.

1.5 Estructura del documento

La presente tesis está organizada de la siguiente manera:

En el capítulo 2, se presenta la revisión de los antecedentes, así como el estado del arte hallado hasta el momento de la elaboración de la tesis.

El capítulo 3, presenta el módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo conformante del sistema automático de correlación espacio-temporal (SACET). En este capítulo se desarrolla y se propone una expresión matemática para calcular la tensión

inducida ($V_{ind-total-max}$) por el rayo en líneas de distribución, en la cual se considera el contenido espectral del rayo y se modela la línea de distribución como una antena lazo. Dicha expresión matemática, se convierte a su vez en el pilar fundamental requerido para el cumplimiento del objetivo general propuesto, ya que, gracias a esta, se hace posible establecer con un grado de certidumbre confiable, la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de las fallas y/o salidas de servicio. Asimismo, se formulan como parte integral de la presente tesis las expresiones matemáticas para la ventana de tiempo y el corredor espacial, parámetros necesarios para la correlación espacio-temporal y que son obtenidos una vez es definida la tensión inducida.

El capítulo 4, se encuentra desarrollado en torno al módulo de priorización de fallas de SACET. Dicho módulo hace uso de la técnica de priorización entrópica de atención de fallas. La técnica en mención, hace uso de las variables que son obtenidas gracias al módulo de correlación espacio temporal presentado en el capítulo 3, módulo con el cual se logra reducir la incertidumbre relacionada al rayo como causa de iniciación, y ejecutar una priorización automática de atención de fallas.

Finalmente, el capítulo 5 está dedicado a las conclusiones generales asociadas al desarrollo de los diferentes capítulos del documento, a los aportes de la presente tesis y a los trabajos futuros.

2 Antecedentes y estado del arte

2.1 Del rayo modelado como antena

En esta tesis para determinar la tensión inducida, se modela el proceso de acople entre el rayo y la línea de distribución como un sistema de telecomunicaciones, en el cual, tal como lo expresa Díaz [5] en el 2014, el proceso de radiación EM del pulso generado por el rayo atmosférico (**LEMP**) es modelado como un Sistema de Transmisión RF multibanda, el cual estará compuesto por un Generador de Señal tipo rayo conectado a una Antena monopolo vertical de hilo delgado, donde como Antena actuará el canal de descarga del rayo en su "Descarga de retorno". El rayo es entonces el elemento de transmisión y como elemento de recepción se propone a la línea de distribución como una antena magnética tipo lazo polarizada horizontalmente, sobre la cual según la teoría electromagnética incide el campo magnético radiado por el rayo.

Existen varios modelos para la descarga de retorno que pueden ser agrupados en modelos: de dinámica de gases, electromagnéticos, circuitos distribuidos y de ingeniería. Los anteriores modelos se encuentran ampliamente documentados por [6]. El modelo que es usado en esta tesis es el electromagnético, ya que como se ha mencionado en líneas anteriores se pretende obtener un modelo de un sistema de telecomunicaciones entre el rayo y la línea de distribución, y como es bien sabido las telecomunicaciones son regidas por la teoría electromagnética.

Los modelos electromagnéticos se fundamentan usualmente en que asumen el canal de descarga como una antena de hilo delgada con pérdidas. El modelo electromagnético de la descarga de retorno como una antena fue propuesto inicialmente en 1987 por Podgorski y Landt [7] y en 1997 Moini y otros [8], [9] continúan con este modelo, en 2001 Baba e Ishii [10] representan el canal como un conductor vertical con una resistencia y una inductancia para simular una velocidad de propagación lenta de la onda de corriente al interior de un canal con pérdida. Los modelos mencionados, emplean ecuaciones integrales de campo eléctrico (EFIE Electric Field Integral Equation) fundamentadas en las ecuaciones de Maxwell que describen el comportamiento electromagnético de la antena y son solucionadas con el

método de los momentos (MoM) para describir la distribución espacio - temporal de la corriente a lo largo del canal de descarga.

Más recientemente, en el 2014, el modelo de antena fue utilizado por Díaz [5], para calcular los CEM radiados por el rayo y modelándolo como un Sistema Emisor Multibanda de Ondas RF. Sobre este fundamento, se realiza parte del desarrollo teórico de la presente tesis, ya que se desea establecer una relación del contenido espectral del rayo con la tensión inducida por este sobre una línea de distribución.

Nota: Como fundamentación y contextualización en el apéndice A se hace una breve descripción del proceso de las descargas eléctricas atmosféricas (rayos).

2.2 Del rayo como causa de fallas en líneas de distribución

Operadores de distribución de energía como la Empresa de Energía Eléctrica de Bogotá han realizado análisis de fallas, concluyendo que un alto porcentaje de estas se debe indiscutiblemente a Descargas Eléctricas Atmosféricas [11]. Lo anterior confirma que, aproximadamente el 75% de las fallas en los sistemas de energía son del tipo Falla monofásica a tierra y son el producto del “*flameo*” (*Flashover*) durante las tormentas eléctricas [12]. Se debe tener sumo cuidado en responsabilizar al rayo de las fallas dado que, las interrupciones causadas por el viento, los árboles y fallas del equipo mismo, se asumen a veces como causadas por el rayo, lo que puede hacer que el porcentaje de fallas generadas por el rayo sea erróneo [13].

La forma mediante la cual una descarga atmosférica puede generar fallas en la red, se presenta bajo dos modalidades [14]:

- *Descargas directas (Impacto directo).*
- *Voltajes inducidos de descargas cercanas (Impacto indirecto).*

Los daños causados por descargas atmosféricas en líneas de distribución, pueden ser debidos a descargas directas sobre los conductores de fase, sobre los neutros o sobre los cables de guarda, en caso de existir, o debidos a descargas indirectas que no impactan directamente la línea pero que si alteran el campo electromagnético a su alrededor, induciendo sobretensiones en la misma [15]. Sin embargo, es difícil diferenciar si la falla en una línea de distribución es generada por un impacto directo o por el efecto de un impacto indirecto, debido a que los daños causados en las instalaciones por impactos directos, producen efectos similares a los generados por los indirectos [16], aspecto que dificulta el análisis de causalidad de la falla.

Considerando lo anterior, queda claro que un sistema que defina la responsabilidad del rayo en el origen de la falla en líneas de distribución, será una herramienta muy útil para evaluar el desempeño, frente al rayo, de las líneas aéreas de distribución. Es necesario anotar que, al existir estructuras más altas en las inmediaciones de las líneas de distribución, la mayor probabilidad de generar una falla la tienen las descargas indirectas.

2.3 De la tensión inducida por el rayo sobre líneas de distribución

Los campos electromagnéticos radiados por el rayo son la causa de la tensión inducida sobre las líneas aéreas de distribución. Por ello, para calcular la tensión inducida por el rayo, se parte del conocimiento de los CEM radiados por el rayo y de la forma en cómo estos se acoplan (modelo de acople) con la línea, cuando se da solución al modelo de acople y se obtienen resultados confiables de la tensión inducida, es posible obtener una expresión analítica para el cálculo de tensiones inducidas. Las diferentes áreas de estudio de la tensión inducida y los diversos autores que han realizado aportes relevantes, se pueden observar en la Fig. 3, y en las siguientes líneas se describen un poco los aportes realizados por dichos autores.

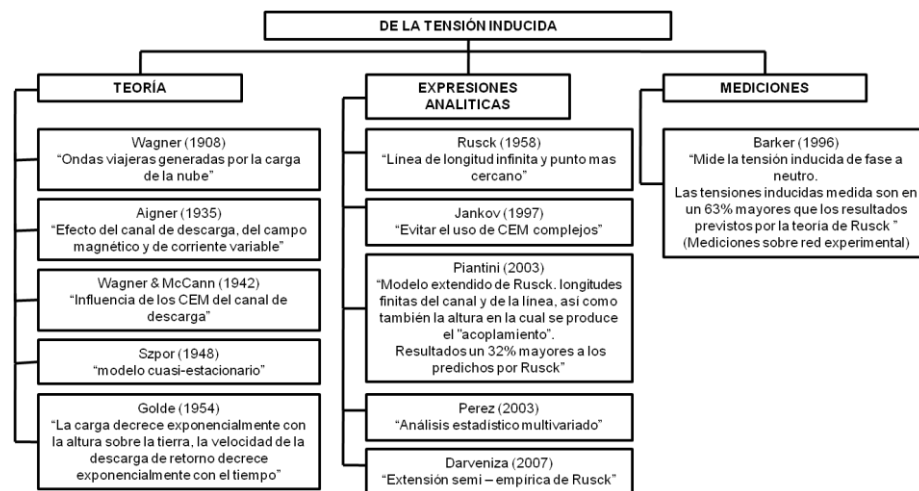


Fig. 3: Áreas de estudio de la tensión inducida

La primera investigación teórica de tensiones inducidas la realizó en 1908 Wagner [17], el asumía que la carga de una nube de tormenta situada sobre una línea de transmisión podría inducir cargas de polaridad opuesta en la línea, y que cuando la nube era descargada por el efecto del rayo, se producían ondas viajeras a través de la línea, generándose de esta forma la tensión inducida sobre la línea.

En 1935 Aigner, por primera vez y como lo explica Rusck [18] tiene en cuenta el efecto del canal vertical de un rayo que impacta en tierra, considerando el campo magnético y una corriente variante sinusoidal en el tiempo. En este mismo sentido, en 1942, Wagner y McCann indican que las tensiones inducidas son producto de la influencia de los CEM producidos por el canal de descarga del rayo.

Szpor en 1948, como lo indican Master and Uman [19], calcula la tensión inducida para impactos cercanos a la línea, dada la característica cuasi - estacionaria de la solución, los resultados solo son aplicables para impactos en la vecindad inmediata del rayo.

Golde en 1954, como lo indican [18], [19], asume que la carga decrece exponencialmente con la altura sobre la tierra, la velocidad de la descarga de retorno decrece exponencialmente con el tiempo.

Cuatro años más tarde, en 1958, Rusck [18] publica una teoría para calcular la tensión inducida por impactos indirectos, considerando tanto el potencial vectorial como el escalar. Gracias a su teoría, logra el desarrollo de quizás la principal ecuación para calcular la tensión inducida y con mayor uso a nivel mundial al encontrarse sugerida por la norma IEEE - 1410 [14]. La siguiente es la fórmula propuesta por Rusck:

$$V_{\max} = \frac{Z_0 I_0 h}{d} \left(1 + \left(\frac{1}{\sqrt{2}} \frac{v}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{1}{2} \left(\frac{v}{c} \right)^2}} \right) \right) \quad (1)$$

Donde:

$Z_0=30\Omega$,

c = la velocidad de la luz,

v =la velocidad de la descarga de retorno

h = la altura promedio entre tierra y el conductor de la línea

d =distancia entre la línea y el punto de impacto del rayo

I_0 =Corriente máxima de la descarga de retorno

Rusck [18], modela la línea de distribución como un solo conductor sin pérdidas de longitud infinita sobre un suelo perfectamente conductor (Fig. 4) y calcula la tensión inducida en el punto más cercano sobre la línea de distribución al sitio del impacto del rayo a partir del conocimiento del potencial escalar.

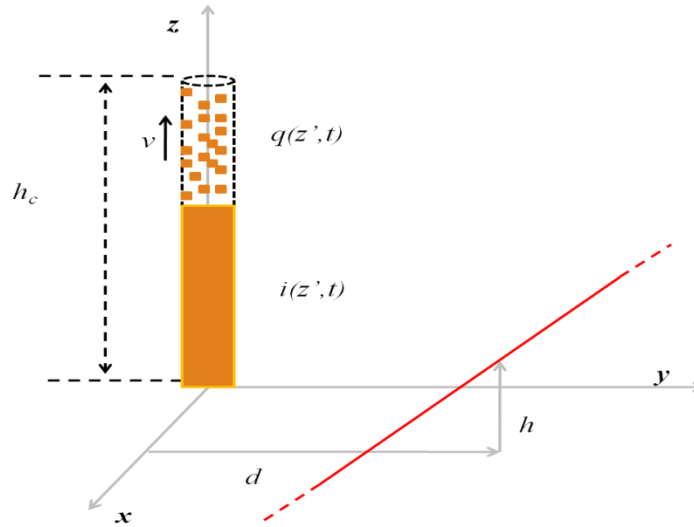


Fig. 4: Modelo de evento del rayo de la formulación de Rusck

Barker [20] en 1996, realiza un estudio donde miden la tensión inducida de fase a neutro en una línea de distribución experimental expuesta al impacto indirecto de rayos disparados, y posteriormente los valores medidos son analizados respecto la teoría propuesta por Rusck [18]. Como conclusión de las mediciones, Barker indica que las tensiones inducidas son en un 63% mayores que los resultados previstos por la teoría de Rusck, pero son unos resultados muy concordantes con la teoría de acoplamiento usando campos eléctricos y magnéticos como entradas del modelo de acople.

Posteriormente, en 1997, Jankov propone la siguiente ecuación que permite calcular la tensión inducida máxima evitando el uso de los de los complejos cálculos asociados a los CEM.

$$V_{\max}(y) = k_u I_0 \exp(k_0 + k_1 \ln y + k_5 \ln^5 y) \quad (2)$$

Donde:

I_0 = Corriente máxima de la descarga de retorno,

y = Distancia entre el punto de impacto y la línea,

$$k_u = \frac{h}{100} \left[1.0 - 0.1875(T - 0.8) - 3.333 \times 10^4 \frac{4.0}{h^{0.6}} \tau \right],$$

$$k_0 = 2.25 + 3.25 \exp\left(-\frac{|T - 0.1|^{1.45}}{0.55}\right),$$

$$k_1 = -\frac{k_0 - \sqrt{k_0}}{3.45},$$

$$k_s = \frac{\left(0.7 \exp\left(-\frac{|T-0.19|^{1.4}}{0.19} \right) + 0.18 \left(1 - 0.667 \frac{\tau - 28.885}{28.85} \right) - 1.15 \right)}{10^4}, \quad T > 0.1 \mu s'$$

$$k_s = \frac{(-0.9 + 7.5(T - 0.02))}{10^4}, \quad 0 < T \leq 0.1 \mu s'$$

Algunos de los resultados que obtiene Jankov de tensiones inducidas por un rayo sobre una línea de test (ver Fig. 5) se pueden observar en la gráfica de la Fig. 6.

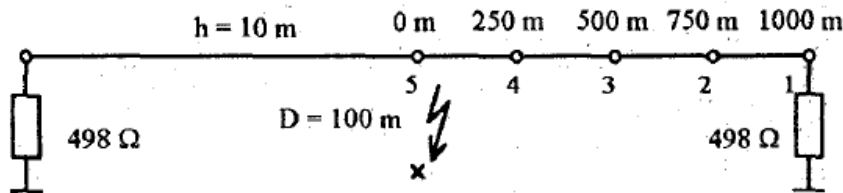


Fig. 5: Línea de test usada por Jankov
Fuente:[21]

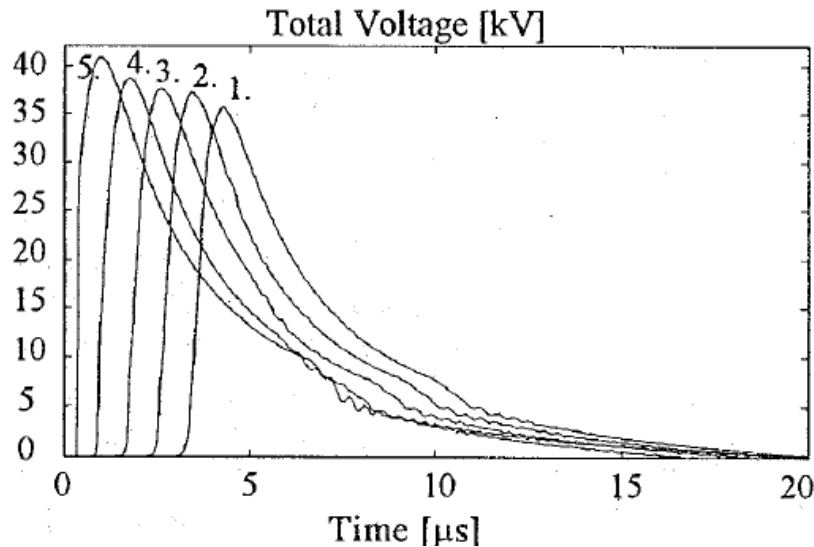


Fig. 6: Tensiones inducidas por un rayo de 11kA sobre la línea de test en los diferentes puntos de medición.
Fuente: [21]

Piantini [22]–[25], propone en 2003, el modelo extendido de Rusck (ERM, Extended Rusck Model). Argumenta que el modelo de Rusck asume la línea de longitud infinita al igual que el canal de descarga, lo cual no es consistente con situaciones reales, y por ello modifica el modelo de Rusck para considerar las longitudes finitas del canal y de la línea, así como también la altura en la cual se produce el "acoplamiento" y observar la incidencia que tienen estos parámetros en la tensión inducida (ver Fig. 7). Los resultados obtenidos de acuerdo con

ERM presentan amplitudes mayores en un 32% respecto a los resultados predichos por la expresión de Rusck.

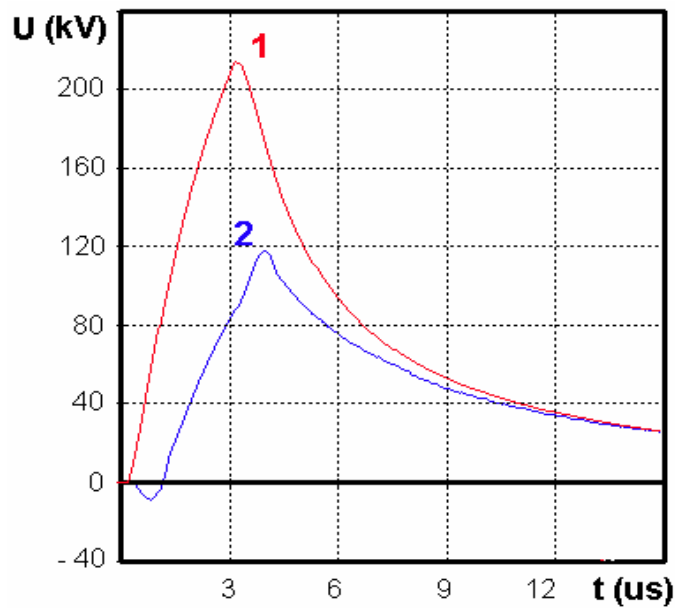


Fig. 7: Tensiones inducidas (U) obtenidas con el ERM para un rayo de 50kA con una longitud de canal de 3km y una distancia de impacto equidistante al punto medio de la línea de 60m.
Fuente: [22]

En Colombia, ese mismo año, Pérez [26], desarrolla la expresión matemática (3) la cual es comparada con la propuesta por Rusck y Jankov, la ecuación de Pérez considera la conductividad del terreno, con esta consideración se produjo que los errores de la ecuación de Rusck se mantuvieran en un 20% y de la Jankov aumentara al 30%.

$$V_{\max} = 5.08 \frac{h^{0.755} I(0)^{0.98} v^{0.4}}{\alpha^{0.89} \sigma^{0.1} y^{0.885} t_f^{0.18}} \quad (3)$$

Donde:

h=altura de la línea,

y=distancia entre el punto de impacto y la línea,

α =ángulo de incidencia,

σ =conductividad del terreno,

I(0)=corriente pico en la base del canal,

t_f =tiempo de frente de la onda de corriente de la descarga de retorno,

v=velocidad de la descarga de retorno,

En el año 2007, Darveniza [27], plantea una extensión semi - empírica de la ecuación de Rusck, para explicar el efecto de la resistividad del terreno (ρ), y esto implica que la altura de la línea de la expresión de Rusck, es reemplazada por una altura efectiva (h_{eff}):

$$h_{eff} = h + 0.15\sqrt{\rho} \quad (4)$$

Finalmente y más recientemente, en el año 2017, Napolitano [28] presenta un estudio sobre el desempeño de una línea de distribución ante los efectos de una descarga indirecta. En dicho estudio, como resultados de tensiones inducidas calculadas sobre una línea de un único conductor sin protección e incidida por un rayo de 35kA de polaridad positiva y con una distancia de impacto de 100m para el punto central de la línea, obtuvo lo consignado en la gráfica de la Fig. 8. Para un rayo negativo de 33.1kA con la misma distancia de impacto, obtuvo los resultados de la gráfica de la Fig. 9.

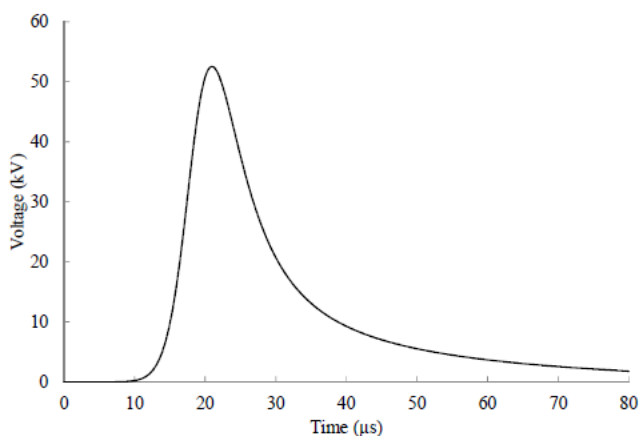


Fig. 8: Tensión inducida por un rayo de 35kA de polaridad positiva y con una distancia de impacto de 100m
Fuente:[28]

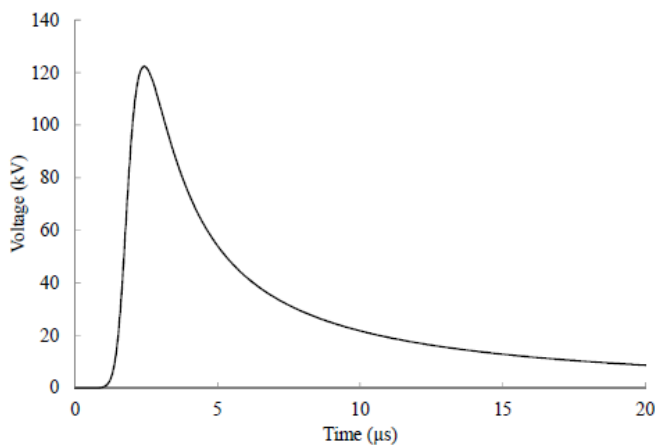


Fig. 9: Tensión inducida por un rayo negativo de 33.1kA y con una distancia de impacto de 100m
Fuente:[28]

Con base en los antecedentes expuestos, es posible concluir que, el estado del arte se encuentra en el punto, de considerar el efecto de los CEM radiados por el rayo y del canal de descarga, sobre las líneas. Asimismo, durante la revisión de antecedentes, no se encontraron investigaciones que consideren el efecto del contenido espectral del rayo sobre las líneas y que obtengan la tensión inducida con base en un análisis de carácter frecuencial, en el cual se considere el rayo como un emisor multifrecuencial y a la línea de distribución como una antena receptora del tipo lazo. Por tanto, se encuentra un nicho de investigación en relación con el cálculo de la tensión inducida por el rayo, visto desde la perspectiva de la teoría de la radiopropagación y los elementos radiantes.

2.4 De la correlación espacio - temporal entre el rayo y fallas.

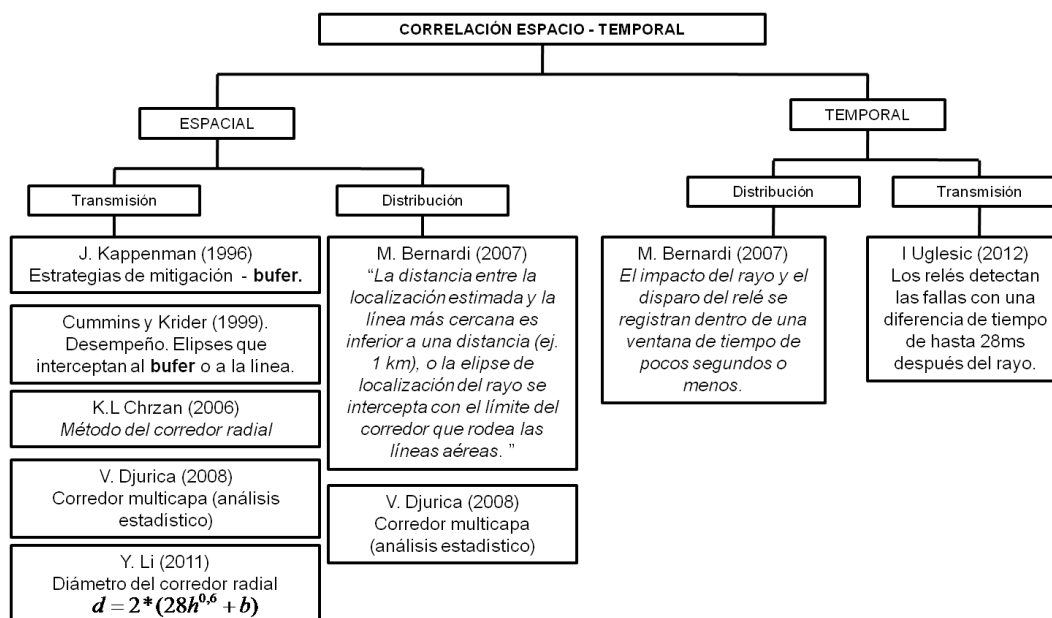


Fig. 10: Diagrama esquemático del estudio de la correlación espacio temporal

Se comenzará por relatar los antecedentes relacionados a la correlación en su dominio espacial. Diversos son los autores que han trabajado en la correlación espacial entre rayos y fallas: en 1996 J. Kappenman [29] indica que para elaborar estrategias de mitigación se debe evaluar el desempeño de las líneas de transmisión a partir del conocimiento del entorno de exposición de dicha línea y del seguimiento de la cantidad de rayos que impactan al interior de un búfer (término planteado por primera vez) especificado alrededor de la línea. En 1998, Cummins y Krider [30], evalúan el desempeño de las líneas de transmisión frente al rayo a partir de analizar el número de elipses de localización de rayos que interceptan al búfer de la línea. En el 2006 K.L Chrzan

[31] plantea el “*Método del corredor radial*”, muy similar al búfer mencionado por Kappenman, con la diferencia que el búfer se convierte en un cilindro que envuelve a la línea. M. Bernardi en el 2007 [32] afirma que la correlación espacial es positiva si “... *la distancia entre la localización estimada y la línea más cercana es inferior a una distancia (ej. 1 km), o la elipse de error relacionada con la incertidumbre de la localización del rayo del sistema de detección y localización, se intercepta con el límite del corredor que rodea las líneas aéreas*”. En el 2008 V. Djurica [33] deduce que si la elipse de error asociada a la localización del rayo se intercepta con la *línea de transmisión* o con el corredor radial, el rayo podría ser responsable de la falla ocurrida en la *línea de transmisión*. Más adelante el valor del radio del corredor, lo define en el 2011 Yongfu Li [34] quien sugiere extender la *línea de transmisión* hacia los lados con una longitud de valor igual a $d/2$ donde d es mencionado en el 2009 por S.Q. Gu [35]:

$$d > (28h^{0.6} + b) \quad (5)$$

Donde:

d : es el valor del ancho del corredor.

h : es la altura de la torre o poste.

b : es la distancia de la línea de transmisión a la superficie terrestre.

Ahora bien, en cuanto a la correlación en su dominio temporal, se tiene como primer antecedente en el 2007, el artículo de M. Bernardi [32], quien afirma que para considerar al rayo como posible causante de las fallas sobre líneas de distribución el impacto del rayo y el disparo del relé se registran dentro de una ventana de tiempo de pocos segundos o menos. Es importante resaltar que Bernardi no establece con precisión el valor de la ventana de tiempo.

Posteriormente, en el 2012 I. Uglesic [36], [37], indica que la diferencia de tiempo establecida como criterio para la correlación temporal es de 1ms (el relé de protección muestra el momento de su operación en 1ms), asimismo, encontró que los relés detectan las fallas en líneas de transmisión generalmente con una diferencia de tiempo de hasta 28 ms después del rayo.

Con base en los hallazgos resultantes de la revisión bibliográfica asociada a la correlación espacio - temporal, se concluye que existe un vacío de información ya que la mayoría de los autores trabajan enfocados en líneas de transmisión, y los pocos que trabajan enfocados a líneas de distribución no han desarrollado una expresión matemática que permita definir con exactitud la ventana de tiempo y el corredor espacial (búfer) que puede existir entre el rayo y la línea de distribución.

2.5 De la entropía en la toma de decisiones

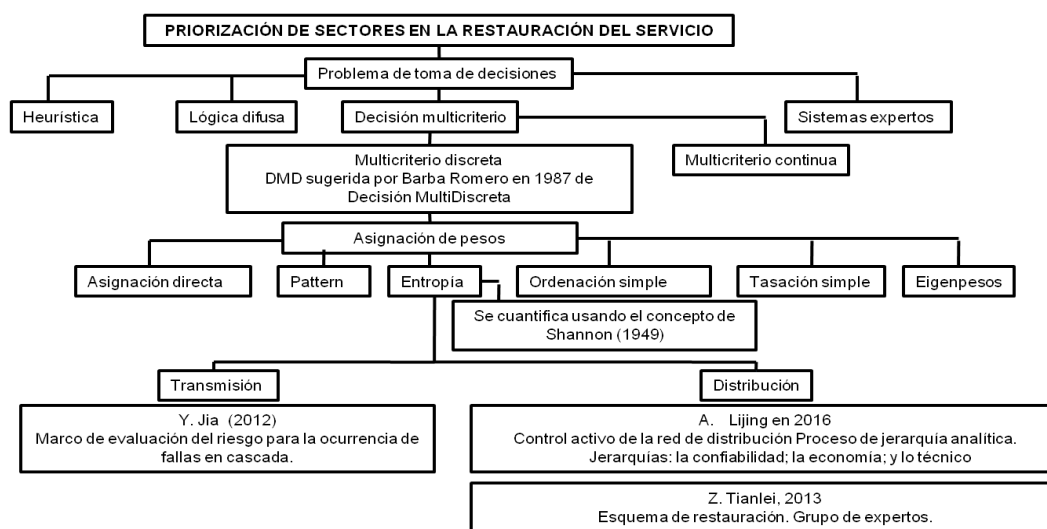


Fig. 11: Desarrollo teórico de la priorización fundamentada en la Entropía

La idea de la entropía fue desarrollada inicialmente en la teoría de la termodinámica clásica, y es representada como:

$$H = -k' \sum_i p_i \ln p_i \quad (6)$$

Donde:

H: es la entropía del sistema

p_i : fracción de partículas en estado energético i

N: número total de partículas en el sistema

N_i : número de partículas en estado energético i

k' : constante de Boltzmann

La entropía como una medida de la información es propuesta por Shannon en 1949 en su tesis titulada "*La teoría matemática de la comunicación*" [38], y es representada por la siguiente ecuación:

$$H = -k \sum_{k=0}^{k-1} P_k \log P_k \quad (7)$$

Donde:

k: se limita a la elección de una unidad de medida de la entropía

P_k : Probabilidad de ocurrencia del estado k

Es sabido que la entropía permite valorar el nivel de incertidumbre de un conjunto de variables, indicando de esta manera que a mayor incertidumbre será mayor la entropía y por ende mayor información, pero caso contrario se presenta cuando se tiene poca incertidumbre y si una alta certidumbre. En este caso particular la menor entropía se verá reflejada en la certeza de que el rayo sea la causa de iniciación de una falla y no lo sea otro factor diferente.

El concepto de entropía ha sido aplicado en la solución de problemas con múltiples decisiones. Un problema de este tipo es la priorización de atención de contingencias (entiéndase falla y/o salida del servicio), para la cual se presentan múltiples opciones finitas de solución. El reto al que se enfrenta el decisor es la selección de la mejor opción entre varias soluciones (alternativas), quedando ante un problema de Decisión Multicriterio. La Decisión Multicriterio, cuenta con una rama, llamada Decisión MultiDiscreta [39] (MADM del término anglosajón MultiAttribute Decision Making o DMD sugerida por Barba Romero en 1987 [40] del término Decisión MultiDiscreta), la cual es aplicada a problemas que presentan un conjunto de soluciones finitas.

En el 2012, Youwei Jia [41], hace uso de la entropía para desarrollar un marco de evaluación del riesgo para la ocurrencia de fallas en cascada. El método desarrollado por Jia para las líneas de transmisión, evalúa el riesgo de que ocurra una falla en cascada posterior a la falla inicial en una línea de transmisión. El riesgo para las diferentes líneas de transmisión es valorado con los siguientes índices de gravedad: sobrecarga de la línea de transmisión; violación de los límites superior e inferior de las tensiones de la barra; violación de potencia activa/reactiva en generadores. En 2013, Zang Tianlei [42], propone un enfoque de toma de decisiones para definir el esquema de restauración del servicio en una red de distribución, contando con un grupo de expertos que sugieren de forma subjetiva el mejor esquema, así como con unos criterios objetivos (índices de evaluación). Utilizando el peso de la entropía para unos criterios objetivos y el eigenvalor del grupo de expertos, define el mejor esquema de restauración. Para el proceso define cinco índices de evaluación para la restauración del servicio: Cantidad de cargas a restaurar; el margen de capacidad de carga; el número de operaciones de conmutación; la cantidad de carga transferida y por último la tasa de equilibrio de carga. En 2016 A. Lijing [43] haciendo frente al problema de la constante inserción de fuentes de generación distribuida, propone la toma de decisiones como una estrategia para asegurar el equilibrio dinámico del sistema y mejorar la calidad de la energía realizando el control activo de la red de distribución basado en el peso de la entropía

combinado con un proceso de jerarquía analítica (AHP del término Analytic Hierarchy Process) el cual se fundamenta en tres jerarquías de índice que valoran la confiabilidad; la economía; y lo técnico. A su vez, estas se subdividen en indicadores que permiten evaluar a cada una de las jerarquías, para finalmente definir el mejor esquema de control activo de la red de distribución.

Los anteriores investigadores han hecho uso de la entropía aplicada a sistemas de potencia, cada uno ha tenido un problema de toma de decisiones diferente para solucionar, con base en lo descrito es posible indicar que: Jia [41] enfoca su trabajo a líneas de transmisión para evaluar el riesgo de ocurrencia una falla en cascada en el sistema de transmisión; Tianlei [42] define esquemas de restauración en líneas de distribución considerando la opinión de un grupo de expertos y variables técnicas de la red de distribución; y por último Lijing [43] selecciona el mejor esquema de control activo de una red de distribución que tiene insertadas fuentes de generación distribuida. En la presente tesis se aplica el método de la entropía para definir la prioridad (orden) de atención de las fallas ocurridas durante un proceso de tormenta, para que de esta manera el operador tenga en consideración la información suministrada y establezca que calificación debe tener el grupo humano que enviará a reparar la falla y con qué equipos deberá contar, y así, se disminuyan los tiempos de suspensión del servicio.

3 Módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo

La técnica de correlación espacio - temporal, se realiza de forma automática, gracias a un algoritmo computacional desarrollado en la presente tesis el cual hemos llamado **SACET** (S=Sistema, A=Automático, C=Correlación, E=Espacial, T=Temporal). En el presente capítulo se presenta el desarrollo teórico del módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo. Asimismo, se presentan resultados de simulación para el módulo en mención de **SACET**, dichas simulaciones fueron efectuadas con la herramienta de Software matemático Matlab®.

SACET, recupera y analiza la información espacio - temporal de los rayos y las fallas. La información de los rayos es obtenida del **LEMPSA - I**¹, y la de las fallas es suministrada por el operador eléctrico. A la información anteriormente nombrada, se le aplicó una técnica de correlación espacio - temporal, cuyo desarrollo teórico - matemático es expuesto en las siguientes líneas.

3.1 Sobretensiones causadas por el rayo.

El rayo puede generar sobretensiones en la red eléctrica cuando golpea, bien sea directamente en las líneas de distribución (impactos directos) o en un punto cercano a la red (impactos indirectos).

3.1.1 Impactos directos.

Según [14], los impactos directos sobre la línea de distribución, en la gran mayoría de los casos producen sobretensiones que se ven reflejadas en flámeos. Por ejemplo, un impacto pequeño de unos 10 kA produce una sobretensión de alrededor de 2000 kV, muy superior a los niveles de aislamiento de una línea aérea de 69 kV.

¹ LEMPSA - I: Lightning Electromagnetic Pulse Spectrum Analyzer (Analizador del espectro del pulso EM generado por el rayo), desarrollado e implementado en GTT.

En procesos de tormenta eléctrica y de alta pluviosidad se disminuye la impedancia línea - tierra, haciendo más sensible los conductores aéreos de energía a los impactos directos. Expertos aseguran que la probabilidad de falla por estos impactos supera el 90% [44].

3.1.2 Impactos indirectos.

Dado que la altura de la línea es normalmente mucho menor que la altura de las estructuras cercanas, los impactos indirectos ocurren con mayor frecuencia, y se deben considerar los CEM radiados por el rayo y la forma de acople de estos con la línea de distribución (modelo de acople), para el cálculo de la tensión inducida.

Es de anotar que, la mayoría de las teorías planteadas para el cálculo de la tensión inducida por las descargas atmosféricas en líneas aéreas de distribución, acogen soluciones de ecuaciones planteadas en el dominio del tiempo y basadas en el modelo de acople TL (Líneas de transmisión), sin embargo es preciso recordar que la presente tesis, desea abordar el cálculo de la tensión inducida, desde la perspectiva de los sistemas radiantes y en el dominio de la frecuencia como un método de análisis bajo una nueva perspectiva, para lo cual se requiere un previo análisis espectral de la señal LEMP, que sirva como insumo para el computo del aporte que cada armónico por separado brinde a la tensión inducida.

Teniendo en cuenta la consideración anterior, en la presente tesis se plantea una nueva tarea: Modelar la línea de distribución como una antena receptora.

3.2 Problemas en la implementación de la técnica para la correlación - espacio temporal.

La correlación, es una técnica que hace parte del método científico y permite evaluar la relación que guardan dos o más variables. En esta tesis, como variables se definen los parámetros espaciales y temporales de los eventos de rayo y falla y/o salida del servicio.

Una forma muy indicada de describir la correlación y su relación con el método científico es dada por Pearson (1900) en [45], donde indica que, el método científico consiste en la cuidadosa y laboriosa clasificación de los hechos, en la comparación de sus relaciones **espaciales y/o temporales** y secuencias, y finalmente en el descubrimiento con la ayuda de la imaginación disciplinada de una breve declaración o fórmula. Tal fórmula se denomina una ley científica, y afirma Croxton (1940) en [46], que cuando la relación **de las variables** es de naturaleza cuantitativa, la herramienta estadística apropiada para descubrir y medir la relación y expresarla en una breve fórmula se conoce como correlación. (*subrayado y negrillas fuera del texto*).

Para evaluar la correlación espacial se definen como variables, los siguientes datos:

- Las coordenadas de localización del punto de impacto del rayo
- Las coordenadas de localización de la línea de distribución.

Se puede pensar inicialmente que, desde el punto de vista estricto de la correlación, se debe evaluar la semejanza entre las coordenadas, y definir de esta manera un caso de correlación positiva perfecta, si las variables son idénticas. El suceso en mención, se da únicamente en el momento que el rayo impacta directamente sobre la línea, pero no ocurre cuando el impacto es indirecto puesto que las coordenadas no son iguales.

Con base en lo anterior, para definir una correlación positiva perfecta entre los eventos, no es condición necesaria, pero si suficiente, que las coordenadas sean idénticas (impacto directo), y si es condición necesaria y suficiente, que la línea de distribución se encuentre al interior de un espacio de acción del rayo, que será definido como el corredor espacial (**CE**) de la línea.

En cuanto al tipo de correlación espacial, **SACET** tiene la capacidad de definirla como positiva perfecta, es decir, logra reconocer si el impacto es directo, al coincidir las coordenadas de ubicación del sitio de impacto y de la línea. De esta manera, **SACET**, otorga la responsabilidad de la falla al rayo, al menos en cuanto a las ubicaciones. Por otro lado, en caso de impacto indirecto, **SACET**, hace uso de los datos espaciales para calcular la tensión inducida por el rayo sobre la línea, para establecer la correlación espacial positiva cuando dicha tensión supera el nivel de protección de la línea.

En consecuencia, **el problema para implementar la correlación espacial en el sistema**, radica principalmente en el cómputo del **CE**. Para definir matemáticamente el **CE**, es necesario conocer la tensión que el rayo induce sobre la línea, esto con la finalidad de establecer si la distancia de separación entre el rayo y la línea es suficiente para que se produzca una falla. Dado lo anterior, surge un segundo problema y es **como calcular la tensión inducida por el rayo sobre la línea de distribución**.

Por otro lado, para la correlación temporal, se establecen como variables, los siguientes datos:

- Los momentos temporales de registro de la falla y del rayo.
- Los tiempos de propagación del LEMP desde el punto de impacto del rayo hasta la línea.
- El tiempo de propagación del reporte de la falla al centro de operaciones.

La relación entre los momentos de registro de los eventos no será exacta, a raíz de los tiempos adicionales de propagación de la señal LEMP, y de viaje del reporte de falla al centro de operaciones. Es decir, entre los momentos de registro del rayo y de la falla, transcurre un

lapso temporal que es obtenido con los tiempos adicionales mencionados, y que es llamado Ventana de tiempo (V_t).

Dado lo anterior, **el problema para implementar la correlación temporal**, consiste en definir matemáticamente la V_t . La condición necesaria y suficiente para una correlación temporal positiva y perfecta, es que los momentos temporales de registro de los eventos, se encuentren comprendidos en V_t .

Se propone entonces como solución, el cálculo de la tensión total máxima inducida ($V_{ind-total-max}$) por el rayo sobre la línea de distribución, como un insumo para determinar las variables: Ventana de tiempo y corredor espacial.

$V_{ind-total-max}$ será calculada a partir del desarrollo de una expresión analítica propuesta en la presente tesis y planteada desde una nueva perspectiva, que tendrá en consideración el contenido espectral del rayo y a la línea modelada como una antena tipo lazo.

3.3 Desarrollo de una expresión analítica para el cálculo de la tensión inducida.

Tal vez la propuesta más osada de la presente tesis está representada en el planteamiento de una “nueva” expresión matemática para el cálculo de la tensión inducida ($V_{ind-total-max}$) por el rayo sobre una línea de distribución de energía. En esta sección se presenta el desarrollo de dicha expresión, considerando que ($V_{ind-total-max}$) es un parámetro de suma importancia para determinar la responsabilidad del rayo en la generación de fallas durante procesos de tormenta.

Por otro lado, es importante recordar que las líneas aéreas al ser hilos metálicos largos actúan como antenas receptoras de ondas electromagnéticas y por ende del impulso electromagnético radiado por el rayo (**LEMP**), es así que en los procesos de tormenta al ser las líneas aéreas inducidas por el **LEMP** se genera en ellas una tensión $V_{ind-total-max}$, la cual, si supera los niveles de protección puede ocasionar una falla [14], en este caso el rayo se convierte en causa de iniciación de la falla, de tal manera que si se hace posible concluir que efectivamente este $V_{ind-total-max}$ es su causante real, entonces se pueden descartar las demás variables, logrando disminuir la incertidumbre en el reconocimiento de la causa de iniciación.

Para obtener la expresión mencionada, el rayo se modela como una fuente de inducción multifrecuencial, y se asume el canal de descarga del rayo como una antena monopolo corto excitada en su base por un emisor multifrecuencial y la línea de distribución es modelada como una antena lazo en recepción.

3.3.1 Modelado del rayo como una fuente de inducción multifrecuencial.

Tal como se consignó en trabajos previos [5] realizados en el grupo de investigación **GTT** por L. F Díaz, el rayo puede ser modelado como un emisor multifrecuencial (ver Fig. 12), que emite cada componente espectral f_n con una amplitud de corriente máxima I_{n-max} . Lo cual indica que $V_{ind-total-max}$ se encuentra conformada por el aporte de cada una de las componentes espectrales.

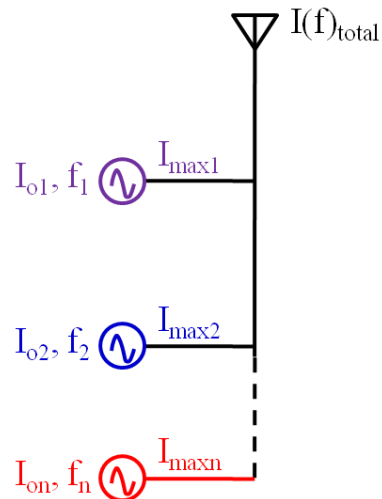


Fig. 12: Rayo como emisor multifrecuencial

El emisor multifrecuencial de la Fig. 12 se compone entonces de una antena monopolo excitada en su base por un generador multifrecuencial, y con longitud L igual a la distancia nube - tierra del sitio de impacto, tal como se visualiza en la Fig. 13:

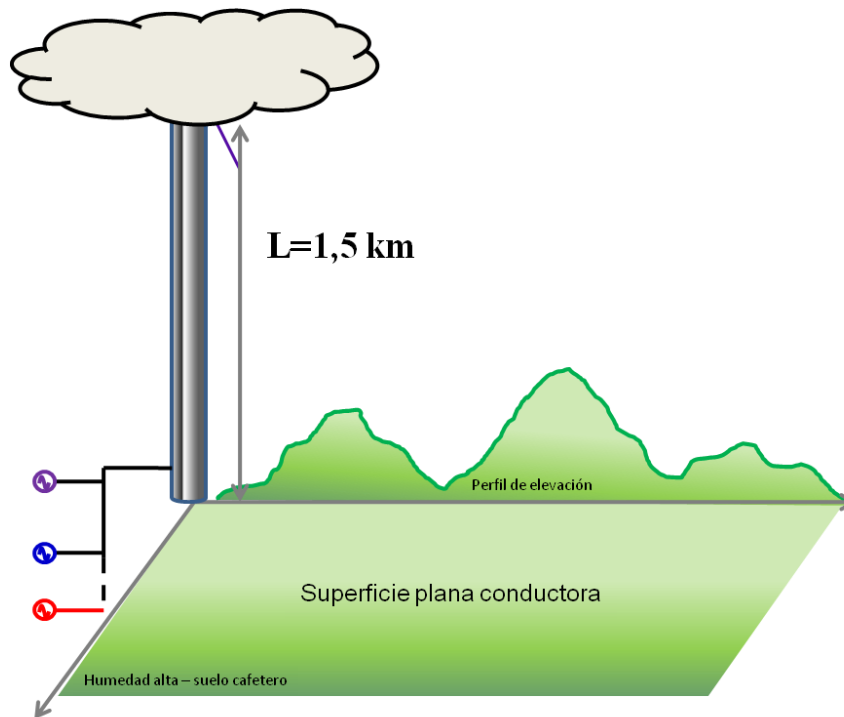


Fig. 13: Sistema de emisor multifrecuencial sobre una superficie plana conductora

Asimismo, se ha demostrado que el rayo contiene la mayor energía espectral cerca a la frecuencia de 10 kHz [5], y recordando que λ es:

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad (8)$$

Lo que indica que la longitud de onda de la señal **LEMP** emitida por el rayo para esta frecuencia se estima como:

$$\lambda_{lightning} = 30 \text{ km} \quad (9)$$

Considerando que la altura promedio del rayo es 1,5 km [5], y que una antena se define pequeña (corta) si su dimensión más grande, no excede un octavo de la longitud de onda de la frecuencia en la cual está operando [47], el rayo es asumido como un monopolo corto [5],[48].

Ahora bien, gracias a la longitud de onda asociada a la frecuencia que contiene la mayor energía espectral en 10 khz y a la altura promedio del rayo, es posible despreciar el efecto del perfil de elevación del terreno (ver Fig. 13). Como es sabido en el dominio de las telecomunicaciones, lo anterior hace posible la propagación por onda de superficie, modelo

propuesto inicialmente por Sommerfeld en 1909 como lo dice Wait en [49], dicho modelo asumía una tierra lisa y de características eléctricas uniformes [50], lo que implica una longitud de onda mucho mayor que el perfil de elevación. Siendo así, la superficie sobre la que se ubica el monopolo es plana y considerando una buena conductividad para el suelo (caso suelo del Eje Cafetero en Colombia), es posible según la teoría de imágenes eléctricas atribuida a Sir. W Thomson en 1848 y explicada por J. C Maxwell en su Tratado de electromagnetismo [51] y por Schelkunoff en [47], tratar el monopolo como un dipolo orientado en el eje z para efectos de cálculo, como se puede apreciar en la Fig. 14.

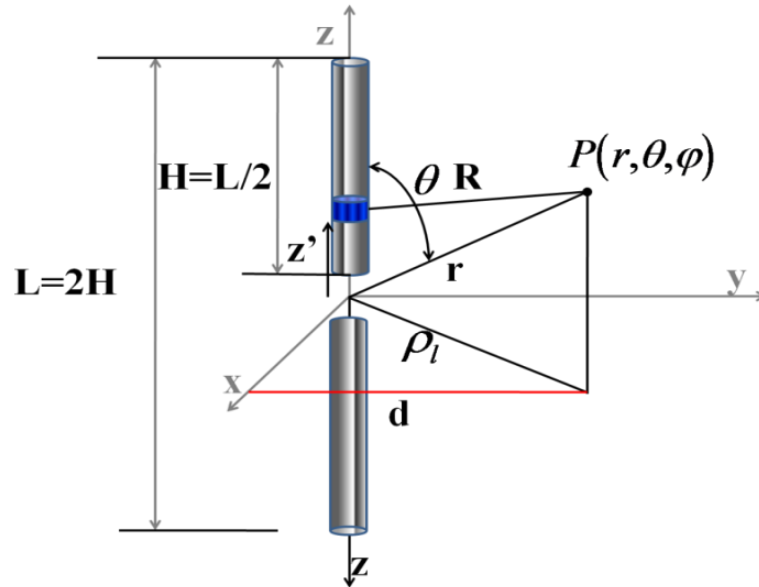


Fig. 14: Geometría del rayo (dipolo) y punto de inducción sobre la línea

Las ecuaciones para los CEM radiados por el monopolo corto son adaptadas a partir de un análisis espectral de los CEM radiados (H_{ϕ_n} campo magnético, E_{r_n} y E_{θ_n} campo eléctrico, asociados a cada n - ésima componente espectral), para las coordenadas esféricas del punto de observación sobre la línea de distribución (r, θ, ϕ) y asociados con la n - ésima componente espectral del rayo (ver Fig. 14).

La distribución de corriente en el canal se supone es del tipo senoidal, de la siguiente forma:

$$I(z) = \begin{cases} I_{\max} \sin(\beta(H-z)) & z > 0 \\ I_{\max} \sin(\beta(H+z)) & z < 0 \end{cases} \quad (10)$$

Por la condición cilíndrica de la geometría de la Fig. 14, el potencial vectorial \vec{A} sobre la línea de distribución es:

$$A_z = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} I(z') \frac{e^{j(\omega t - \beta r)}}{R} dz' \quad (11)$$

Donde:

$$R = \sqrt{(z - z')^2 + \rho_l^2} \quad (12)$$

La distribución de corriente en la base del canal se asume de carácter sinusoidal:

$$I(0) = I_{\max} \sin(\beta H) = I_{\max} \sin\left(\beta \frac{L}{2}\right) \quad (13)$$

Gracias a la condición de dipolo corto, es posible linealizar la distribución de corriente de la siguiente forma:

$$\sin(\beta H) \cong \beta H \quad (14)$$

$$\sin \beta(H - |z|) \cong \beta(H - |z|) \quad (15)$$

Para finalmente obtener que la distribución de corriente linealizada es:

$$I(z) = \frac{2I(0)}{L} \left(\frac{L}{2} - |z|\right) \quad -\frac{L}{2} \leq z \leq \frac{L}{2} \quad (16)$$

Reemplazando (16) en (11) y resolviendo la expresión resultante se obtiene que el potencial vectorial es:

$$A_z = \frac{\mu_0 I(0) e^{j(\omega t - \beta r)} L^2}{2\pi r L} \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \left(\frac{\mu_0 I(0) L e^{j(\omega t - \beta r)}}{4\pi r} \right) \quad (17)$$

Resolviendo el rotacional del potencial vectorial, se obtiene el campo magnético incidente en la línea de distribución:

$$H = \frac{1}{\mu_0} \nabla \times A \quad (18)$$

Debido a la geometría cilíndrica (ver Fig. 14), la operación rotor del campo H solo tendrá la componente acimutal ϕ de H, obteniéndose el campo magnético acimutal radiado por el rayo, así:

$$H_{\phi} = -\frac{1}{\mu_0} \sin \theta \frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (19)$$

Reemplazando (17) en (19) y desarrollando la derivada, se obtiene:

$$H_{\phi} = \frac{1}{2} \left(\frac{I(0) L \sin \theta e^{j(\omega t - \beta(\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2}))}}{4\pi} \right) \left(\frac{j\beta}{\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2}} + \frac{1}{(\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2})^2} \right) \quad (20)$$

Donde:

z_l : es la altura promedio de la línea de distribución respecto al punto de impacto del rayo.

ρ_l : es la distancia horizontal entre el punto de impacto del rayo y la línea de distribución.

L : es la altura del canal de la descarga.

ω es la frecuencia angular $\omega = 2\pi f$.

β : es la relación entre la velocidad del stroke (1.2e8 m/s, aproximadamente 1/3 de la velocidad de la luz [14]) y la velocidad de la luz.

$I(0)$: corriente en la base del canal.

El sistema de detección y análisis espectral de descargas atmosféricas **LEMPSA-I** desarrollado en **GTT** por [5], registra la forma de onda temporal de corriente del rayo, y le efectúa un análisis espectral, obteniendo el valor de la corriente máxima de cada n -ésima componente espectral del rayo y almacenando en una base de datos el valor de la corriente en función de la frecuencia como (I_n):

$$I_n = I(0) e^{j\omega_n t} \quad (21)$$

Reemplazando (21) en (20), y considerando que cada componente espectral del rayo tiene una amplitud de corriente diferente que corresponde a una fracción de la corriente total del rayo, se tiene que:

$$H_{\phi_n} = \frac{1}{2} \left(\frac{I_n L \sin \theta e^{-j(\beta(\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2}))}}{4\pi} \right) \left(\frac{j\beta}{\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2}} + \frac{1}{(\sqrt{\rho_l^2 + z_l^2})^2} \right) \quad (22)$$

Obteniéndose finalmente la expresión para la componente acimutal de campo magnético del dipolo corto (H_{ϕ_n}) asociada a cada n - ésima componente espectral del rayo.

3.3.2 Modelado de la línea de distribución como una antena lazo

Para el modelado de la línea de distribución como una antena lazo se tuvieron en cuenta las siguientes premisas:

- El enfoque de esta tesis es desde las telecomunicaciones y los elementos radiantes, se parte desde el análisis espectral del LEMP y se estudia desde un punto de vista de la radio-propagación cual puede ser el aporte de cada componente espectral (armónico) en el cálculo total de la tensión inducida por el rayo en la línea de distribución.
- Dado que la señal LEMP contiene componentes espectrales de alta frecuencia (mayores a 10 Mhz), podemos afirmar que cuando la línea supere los 30 metros de longitud deberá ser tratada como **eléctricamente larga**, lo cual es el caso que nos atañe considerando que la mínima separación entre postes con puestas a tierra del cable de guarda es de 50 metros, siendo esta longitud la que nos interesa como sección de observación para el estudio de la tensión inducida por el rayo.
- A medida que la frecuencia del campo electromagnético se incrementa y la longitud de onda λ se hace comparable con las dimensiones eléctricas de la línea (víctima de la inducción), los modelos EMC basados en aproximaciones cuasiestáticas (ejemplo los TL) son inapropiados[52].
- Poljak en [53], indica que el modelo TL, aunque es una aproximación suficiente si se consideran líneas largas con secciones transversales eléctricamente pequeñas, falla si se trata de líneas de longitud finita y con excitaciones de alta frecuencia, además resalta que cuando no se cumplen las condiciones para ser modelada como TL, la línea actúa como una antena lazo.
- La antena lazo como receptora de ondas EM, se modela como una espira abierta y conforme la ley de Faraday se asume como antena magnética pues solo se considera el campo magnético H para el cálculo de la tensión que es inducida en ella.
- Varios autores [54], ratifican que cuando la fuente de perturbación es un dipolo eléctrico polarizado verticalmente, en campo lejano el componente magnético H es predominante y los componentes eléctricos son débiles. Se recuerda que en nuestro

caso el canal vertical de descarga del rayo se modela como una antena monopolo (dipolo eléctrico $\lambda/2$).

- Henry Ott en [55], nos muestra que en el caso de acople inductivo de un ruido (perturbación) con una línea de transmisión, la tensión inducida V_N (ruido) depende del área A encerrada bajo el circuito perturbado (ver Fig. 15) y la línea puede ser modelada como un circuito cerrado conformante de un transformador y acoplado magnéticamente a la fuente de inducción (canal de descarga del rayo) como se puede apreciar en la Fig. 16.

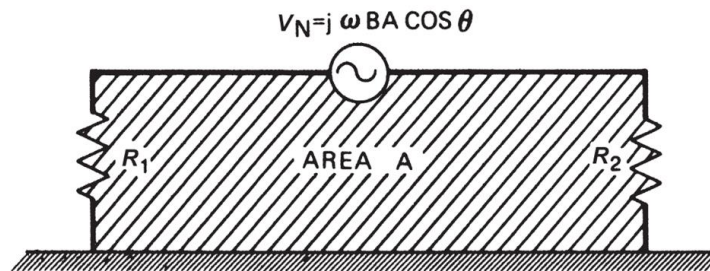


Fig. 15: El campo magnético de densidad B corta el área A en un ángulo θ .

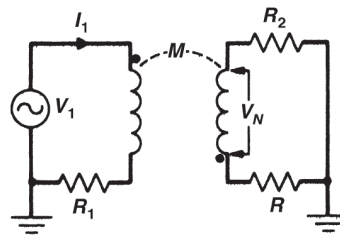


Fig. 16: Circuito eléctrico equivalente.

Conforme lo descrito anteriormente, el campo H_{ϕ_n} radiado por el rayo y expresado matemáticamente por la ecuación (22), induce la línea de distribución, que actúa como una antena receptora tipo lazo polarizado horizontalmente (antena magnética). Teniendo en cuenta la disposición estructural de una línea de distribución con su cable de guarda a tierra que se puede visualizar en la imagen de la derecha de la Fig. 17, y realizando un corte vertical a la línea desde una vista lateral es posible visualizar un lazo en la imagen izquierda de la Fig. 17 que concatena el flujo magnético emitido por el rayo, las fases dada la vista propuesta serán asumidas como un único elemento, las cuales ayudan a concatenar flujo al igual que el cable de guarda, gracias a su disposición estructural (ver Fig. 15 y Fig. 16). Por otro lado, el rayo se comporta como una antena transmisora monopolo corto polarizada verticalmente, conformando así un sistema de telecomunicación (Ver Fig. 18), en el cual solo se tiene en cuenta el flujo magnético Φ generado por el campo H_{ϕ_n} como señal en recepción.

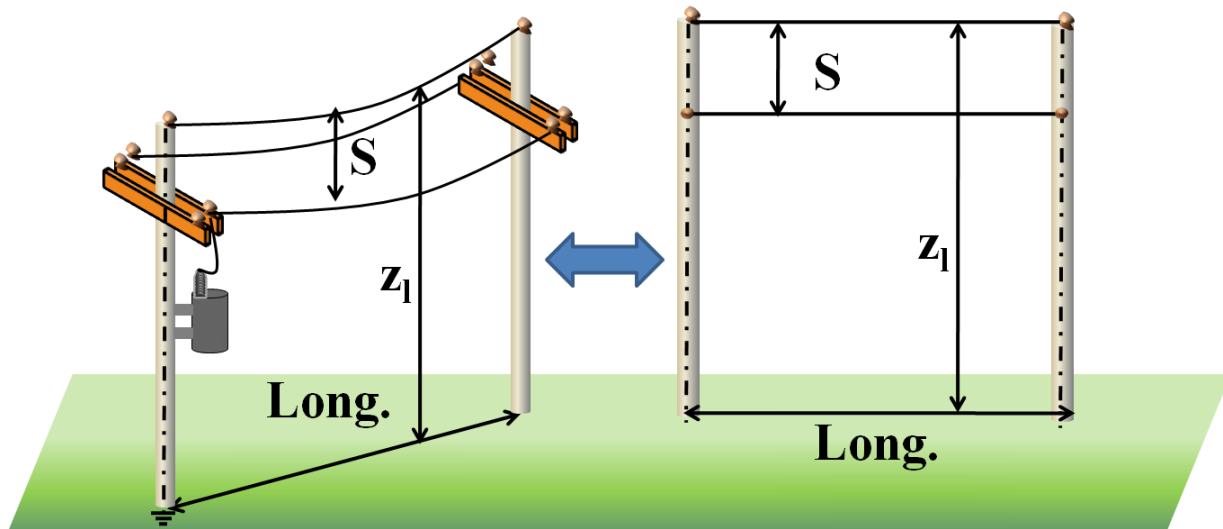
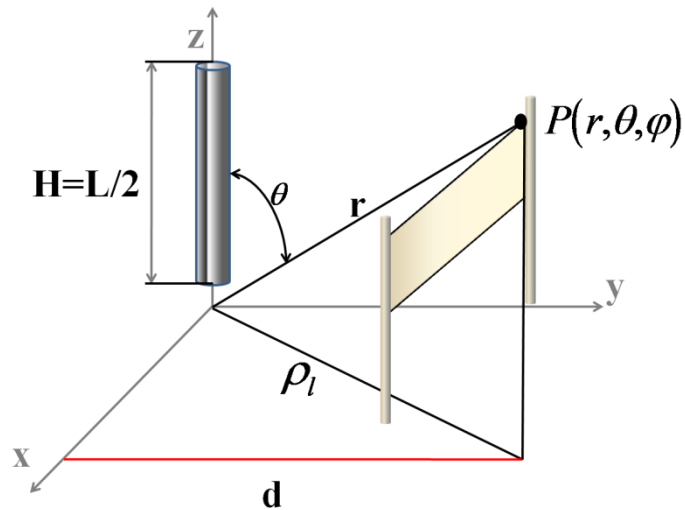


Fig. 17: Modelo de antena lazo para una línea de distribución

Fig. 18: Geometría para definir la tensión inducida en un punto a una distancia ρ_l .

Para el modelado de la línea, es de interés conocer los límites de las regiones de campo asociadas al rayo, para definir la región en la cual se encontrará inmersa la línea de distribución. En ese sentido, las limitaciones en distancia de las regiones de campo asociadas a un elemento radiante son:

Para campo cercano reactivo:

$$0 < r \leq 0,62L\sqrt{\frac{L}{\lambda}} \quad (23)$$

Para campo cercano radiante:

$$0,62L\sqrt{\frac{L}{\lambda}} \leq r \leq \frac{2L^2}{\lambda} \quad (24)$$

Para campo lejano radiante:

$$\frac{2L^2}{\lambda} \leq r < \infty \quad (25)$$

Debido que la longitud del rayo no se encuentra en el orden de media longitud de onda o más, sino que por el contrario es mucho menor de media longitud de onda, se debe aplicar entonces el siguiente criterio [19]: *La distancia r debe ser siempre superior a la media longitud de onda*, es decir $r \geq \lambda/2$. Con base en lo anterior, el campo cercano del rayo finaliza a una distancia de 15 km del punto de impacto. Según esto, la línea de distribución se encuentra inmersa en campo cercano (Ver Fig. 19), lo que permite asumir las respectivas consideraciones de análisis en campo cercano para los CEM radiados.

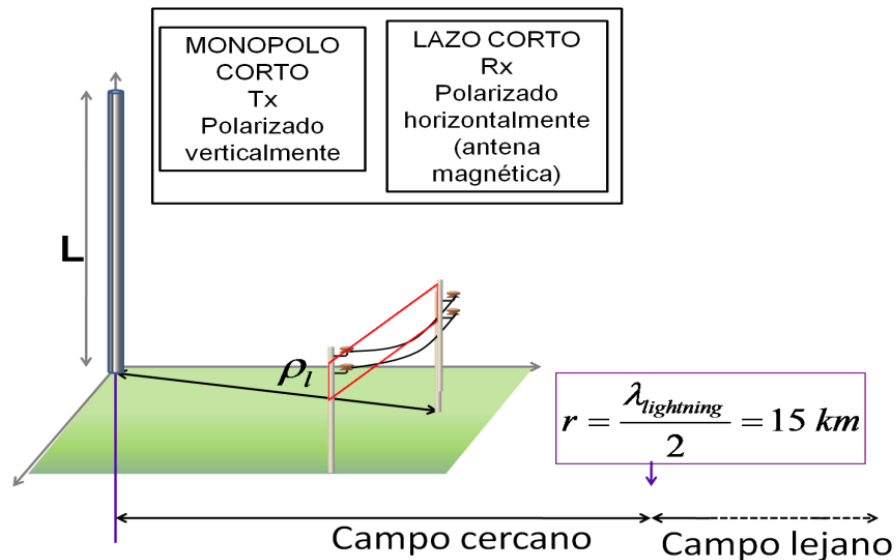


Fig. 19: Regiones de radiación del rayo

En consecuencia y considerando el sistema de telecomunicación de la Fig. 18, se calcula la tensión inducida en la línea de distribución, aplicando la ley de Faraday para el caso conocido en la física electromagnética como inducción transformadora, en donde solo existe variación del flujo magnético B_n [56] en la superficie encerrada por la línea de distribución, se obtiene que V_{ind-n} para la n -ésima componente espectral es:

$$V_{ind-n} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (26)$$

Teniendo que la densidad de flujo Φ se obtiene como:

$$\phi_n = \vec{B}_n \bullet \vec{A} = B_n A \cos \theta_{ind} \quad (27)$$

Donde A es el área del lazo formado por la línea y se obtiene como:

$$A = Long \bullet S \quad (28)$$

Donde Long es la longitud de la línea y S es la separación entre los cables de la línea de distribución

El ángulo de inducción θ_{ind} de H_{ϕ_n} respecto a la normal de la superficie, se asume invariante en el tiempo y de 0° para garantizar la máxima inducción. Por tanto, la V_{ind-n} generada por la n-ésima componente espectral del rayo se puede calcular como:

$$V_{ind-n} = -N \frac{dB_n}{dt} A \quad (29)$$

B_n se relaciona con H_{ϕ_n} mediante la permeabilidad magnética del medio de inducción μ [57]:

$$B_n = \mu H_{\phi_n} \quad (30)$$

Derivando B_n respecto al tiempo, el flujo magnético se puede expresar como:

$$\frac{dB_n}{dt} = \mu \frac{dH_{\phi_n}}{dt} \quad (31)$$

Reemplazando (31) en (29) y considerando que el lazo tiene una única espira, se tiene:

$$V_{ind-n} = -\mu A \frac{dH_{\phi_n}}{dt} \quad (32)$$

Luego reemplazando (22) en (32) y haciendo $r = \sqrt{\rho_l^2 + z_l^2}$, se tiene que:

$$V_{ind-n} = -\mu A \frac{d}{dt} \left(\frac{I_n L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \right) \quad (33)$$

En la expresión (33) se observa que el valor que varía en el tiempo es I_n por tanto:

$$V_{ind-n} = -\mu A \frac{L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \frac{dI_n}{dt} \quad (34)$$

De esta manera, modelando la corriente para la n -ésima componente espectral como una onda sinusoidal se tiene:

$$I_n = I_{o_n} \sin(\omega_n t) \quad (35)$$

Ahora bien, realizando la respectiva derivada:

$$\frac{dI_n}{dt} = I_{o_n} \omega_n \cos(\omega_n t) \quad (36)$$

Por otro lado y considerando la expresión (21), donde se tiene en cuenta que posterior al registro de la señal LEMP mediante Análisis de Fourier vía DSP², el sistema entrega el valor de amplitud máxima de cada componente espectral, hacemos:

$$I_{o_n} \omega_n = I_{n_{\max}} (\omega_n) \quad (37)$$

Quedando la expresión (36) de la siguiente forma:

$$\frac{dI_n}{dt} = I_{n_{\max}} \cos(\omega_n t) \quad (38)$$

Reemplazando (38) en (34) se obtiene:

² Si bien la señal que se genera en la fuente (canal de descarga del rayo) es I_o para cada componente armónico \mathbf{W}_n , para el cálculo de la corriente medida en el analizador de espectro esa I_o ya fue multiplicada por \mathbf{W}_n . De esta manera el análisis de Fourier vía DSP nos indica que lo que hemos medido en el punto de medición del rayo es la corriente máxima de esa componente armónica.

$$V_{ind-n} = -\mu A \frac{I_{n_{max}} L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \cos(\omega_n t) \quad (39)$$

El sistema **LEMPSA-I** registra los valores de corriente con un paso temporal Δt asociado a la velocidad de muestreo del sistema. La forma de onda de corriente que se obtiene es proporcional a la variación temporal de la corriente (dI/dt), de tal manera que aplicando la Transformada Rápida de Fourier **FFT** con la herramienta computacional Matlab® a la forma de onda registrada se consigue el valor máximo de corriente para cada componente espectral. En consecuencia, es posible considerar $I_{n_{max}} \approx dI_n/dt$ en la expresión (34), así:

$$V_{ind-n}(f_n) = -\mu A \frac{I_{n_{max}} L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (40)$$

Ahora bien, se propone que la tensión total inducida en la línea es el aporte de todas las componentes espectrales del rayo, es decir, la sumatoria de las n -ésimas V_{ind-n} , obteniéndose:

$$V_{ind-total_{max}}(f) = -\sum_{n=1}^i \mu A \frac{I_{n_{max}} L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (41)$$

Finalmente, la expresión (41), es la ecuación que se propone en esta tesis para calcular la tensión inducida por el rayo sobre una línea de distribución modelada como una antena lazo. Como limitante de la expresión (41), se debe tener en cuenta que para obtener una mejor aproximación al valor real de la tensión inducida es preciso contar con un mayor número de muestras espectrales del rayo, lo cual implica contar con un equipo de análisis que tenga una mayor velocidad de muestreo.

3.3.3 Marco comparativo para la validación de la expresión desarrollada para calcular la tensión inducida por el rayo sobre la línea de distribución.

Para realizar la validación de la expresión (41), se planteó un escenario virtual que permitió mediante una simulación computacional establecer un marco comparativo entre los

resultados de la aplicación de dicha expresión y los que se obtienen de aplicar a ese mismo escenario una expresión conocida para el cálculo de la tensión inducida.

La expresión (1) es la sugerida por la norma IEEE 1410 [14] y desarrollada por S. Rusck [18] para calcular la tensión inducida en el punto más cercano sobre la línea de distribución al sitio del impacto del rayo a partir del conocimiento del potencial escalar. Esta expresión al estar sugerida en una norma IEEE permite contar con un referente estandarizado y de uso internacional para la validación. La expresión (1) fue presentada en la sección 2.3 del presente documento.

En la expresión (1) Rusck [18], [58], para calcular la tensión inducida por el rayo utiliza la distancia más cercana al punto de impacto del rayo haciendo ($x=0$) y obtiene la tensión en un único punto sobre la línea. Por tanto a raíz de esta última consideración, se hace que el área de la expresión (40) tienda a un valor infinitesimal de longitud comparable con un único punto sobre la línea, con lo cual se obtiene que:

$$V_{ind_n}(f_n) = -\mu S \frac{I_{n_{max}} L \sin \theta e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (42)$$

Asimismo, atendiendo a Rusck [58] y con el fin de simplificar los cálculos se asume que: el campo eléctrico, el potencial vectorial y el potencial escalar son constantes e iguales entre la altura de la línea y el suelo. Por otro lado y conforme lo estipulado por autores como Thottappillil [48] si se consideran los campos electromagnéticos a nivel del suelo entonces al ángulo θ se le asigna un valor igual a 90° , con lo cual V_{ind} quedaría como:

$$V_{ind_n}(f_n) = -\mu SL \frac{I_{n_{max}} e^{j(-\beta r)}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{r} + \frac{1}{r^2} \right) \quad (43)$$

De tal forma que teniendo en cuenta estas consideraciones la geometría mostrada en la Fig. 18, es adaptada para hacerla comparable con la propuesta por Rusck, obteniendo de esta manera la geometría consignada en la Fig. 20 y con base en la cual se realizó la validación de la expresión (41).

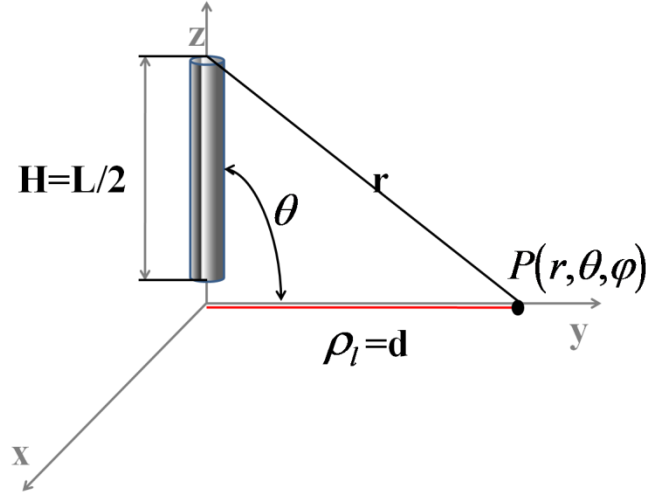


Fig. 20: Geometría modificada del rayo (dipolo) y punto de inducción sobre la línea (lazo)

Analizando la geometría plasmada en la Fig. 4, se tiene que:

$$r^2 = z^2 + d^2 \quad (44)$$

$$\rho_l^2 = x^2 + d^2 \quad (45)$$

Luego se hace $x=0$ (punto más cercano), teniendo que:

$$r^2 = z^2 + \rho_l^2 = z^2 + d^2 \quad (46)$$

Reemplazando (46) en (43), se tiene que la expresión de validación para el cálculo de V_{ind} para la n - ésima componente espectral es:

$$V_{ind_n}(f_n) = -\mu SL \frac{I_{n_{max}} e^{j(-\beta(\sqrt{z^2+d^2}))}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{(\sqrt{z^2+d^2})} + \frac{1}{(\sqrt{z^2+d^2})^2} \right) \quad (47)$$

Finalmente, la expresión para obtener la tensión total inducida durante el proceso de validación es:

$$V_{ind-total_{max}}(f_n) = -\mu SL \sum_{n=1}^i \frac{I_{n_{max}} e^{j(-\beta(\sqrt{z^2+d^2}))}}{8\pi} \left(\frac{j\beta}{(\sqrt{z^2+d^2})} + \frac{1}{(\sqrt{z^2+d^2})^2} \right) \quad (48)$$

3.3.4 Resultados

Para el modelado del escenario virtual se simuló una línea de distribución con disposición vertical en poste (con esta disposición se garantiza que $\theta_{ind} = 0$, lo que origina una máxima inducción sobre el lazo), se asumió esta de 13,2 kV de media tensión (MT) y se tuvo en cuenta que un equipo para una tensión de dicho valor cuenta con un BIL de 95 kV [59] lo que permite calcular un CFO de 98793,67 V para dicha línea. Asimismo la altura promedio de la línea es simulada de 10 m con relación a la superficie del terreno, asignándosele una longitud de 50m y como material constructivo el aluminio, considerando que si bien uno de los materiales usualmente utilizados para las líneas de distribución es el cobre ($\mu=0,9999$), bajo condiciones especiales de instalaciones, caso particular de la región bajo estudio, se utiliza el aluminio ($\mu=1,000023$) [60].

Por otro lado, teniendo en cuenta que para una misma estructura de apoyo, como distancia horizontal mínima de seguridad entre conductores se recomienda para líneas de 13,2 kV una distancia **mínima** de 30 cm más 1 cm por kV sobre 8,7 kV [61], en el presente escenario se ha asumido una separación entre conductores de 1,3 m, siendo este el valor usado por el operador eléctrico de la región [62] en la cual se desarrolló este estudio.

Una vez establecido el escenario, se simuló mediante un método computacional el impacto de un rayo generado a partir de una función temporal de la corriente del rayo del tipo Heidler [63]:

$$i = \frac{\hat{I}}{h} \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}}{1 + \left(\frac{t}{\tau_1}\right)^{10}} e^{\left(\frac{-t}{\tau_2}\right)} \quad (49)$$

Donde \hat{I} es la corriente pico del rayo que se asumió de 42 kA que es un valor promedio medido para Colombia y Brasil [2], t es el tiempo, h es el factor de corrección de la corriente, τ_1 y τ_2 son los tiempo de frente y de cola del rayo, respectivamente. Los valores de h , τ_1 y τ_2 son 0,930 y 5,63 μ s y 77,5 μ s respectivamente tomados de [14], obteniendo la forma de onda que se visualiza en la gráfica de la Fig. 21:

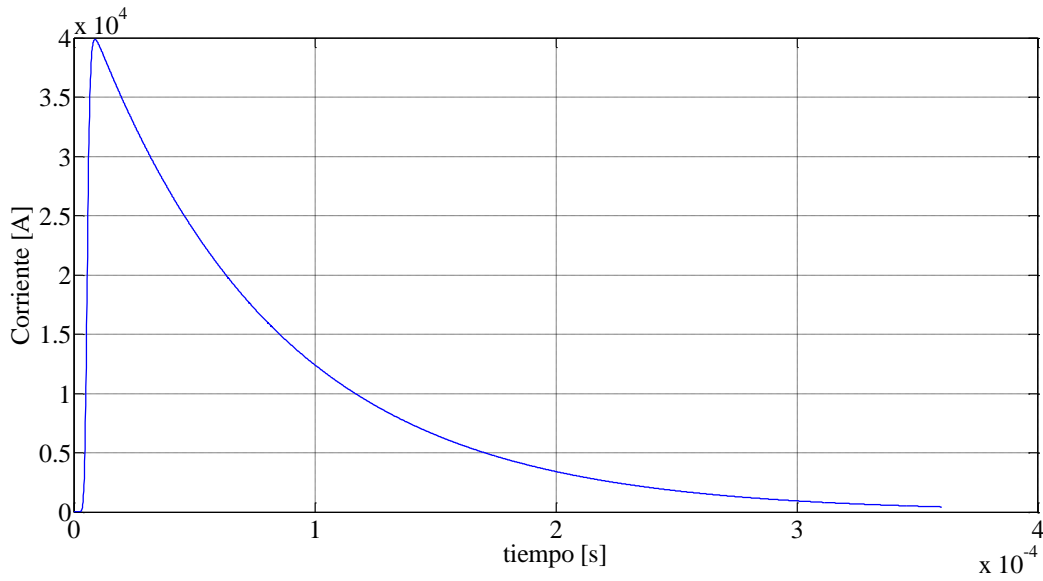


Fig. 21: Forma temporal de la onda de corriente de un rayo 5,63/77,5 (std IEEE -1410)

El respectivo espectro de frecuencias para el rayo de la Fig. 21, es obtenido mediante la aplicación de la FFT que permite visualizar los resultados en la gráfica de la Fig. 22:

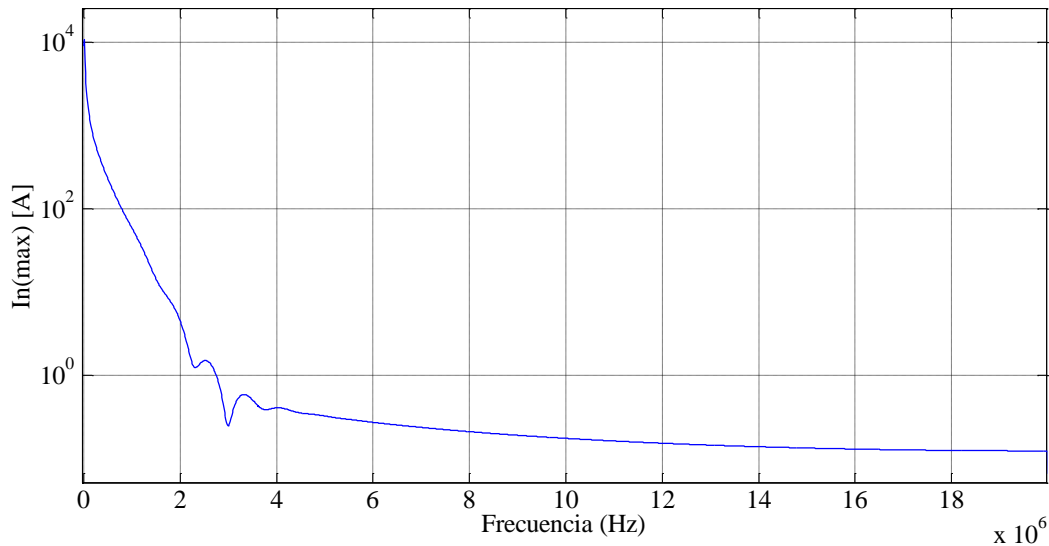


Fig. 22: Espectro de frecuencias del rayo (Escala Logarítmica)

Una vez ha sido obtenido el contenido espectral del rayo, se hace uso de la expresión propuesta de validación (48) y de la expresión del marco comparativo (1). Los resultados obtenidos para la tensión inducida en función de la variación de la distancia de impacto (se asume la más cercana para la validación) son graficados en la Fig. 23:

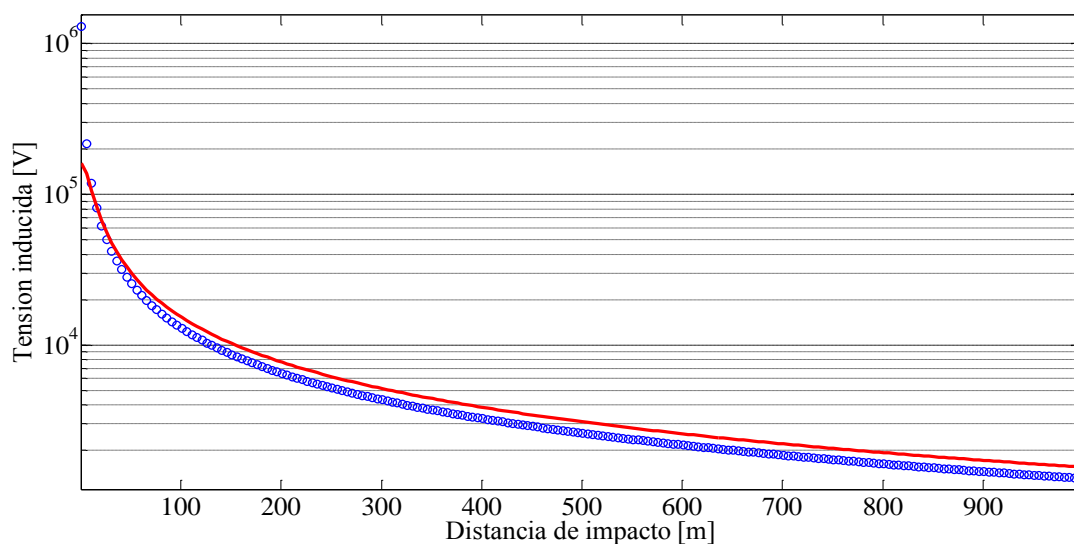


Fig. 23: Variación de la tensión inducida por el rayo con la distancia. En rojo la tensión obtenida con (48) y en azul con (1).

La gráfica de la Fig. 23 permitió determinar que la expresión propuesta sigue la misma tendencia hiperbólica de la expresión (1) desarrollada por Rusck, asimismo, las tensiones inducidas obtenidas con la expresión propuesta y con la expresión (1) son muy cercanas en magnitud, tal como se observa, teniendo una diferencia porcentual del 19%. De esta manera la expresión propuesta es validada. La expresión propuesta para el cálculo de $V_{ind-total-max}$ difiere de la expresión del marco comparativo, ya que considera:

- El campo magnético acimutal de cada n - componente espectral del rayo H_{ϕ_n} .
- El aporte de todas las componentes espectrales del rayo.
- Al rayo como una fuente de inducción multifrecuencial.
- Al ángulo de elevación desde el punto de impacto del rayo a la línea de distribución.
- La separación entre los conductores que conforman el lazo .
- La longitud total de la línea que para la obtención de los resultados plasmados en la Fig. 23 fue reducida a un valor infinitesimal para poder realizar la respectiva validación frente a la expresión desarrollada por Rusck y sugerida por la IEEE.

Otro de los aportes de la expresión propuesta es la visualización del espectro de la tensión inducida por el rayo sobre la línea, y observar cómo se propaga en el espacio, tal como se observa en la Fig. 24:

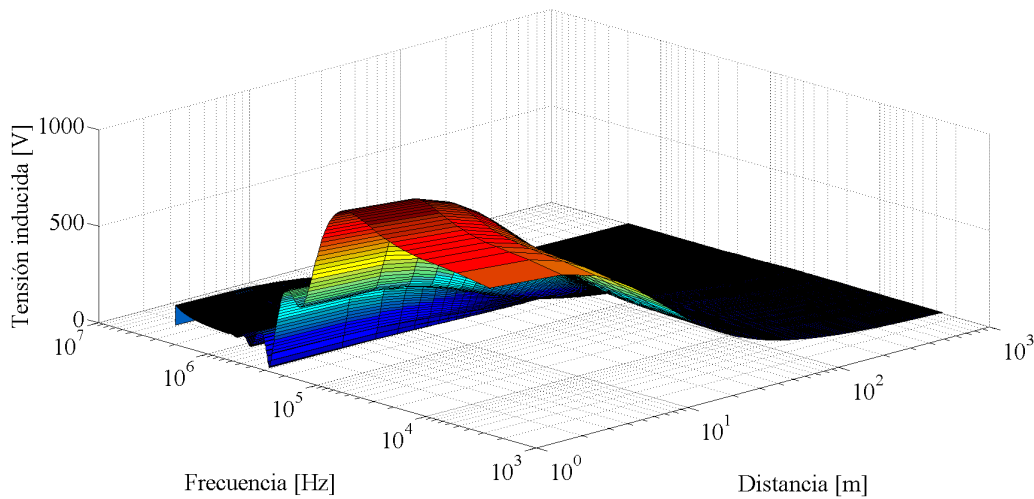


Fig. 24: Espectro de la tensión inducida por el rayo

Una vez validada la expresión propuesta, se utilizó un rayo que fue registrado y analizado espectralmente por el sistema **LEMPSA -1**, dicho rayo presentó un amplitud máxima de 42 kA, y su forma de onda temporal de corriente se puede ver en la gráfica de la Fig. 25:

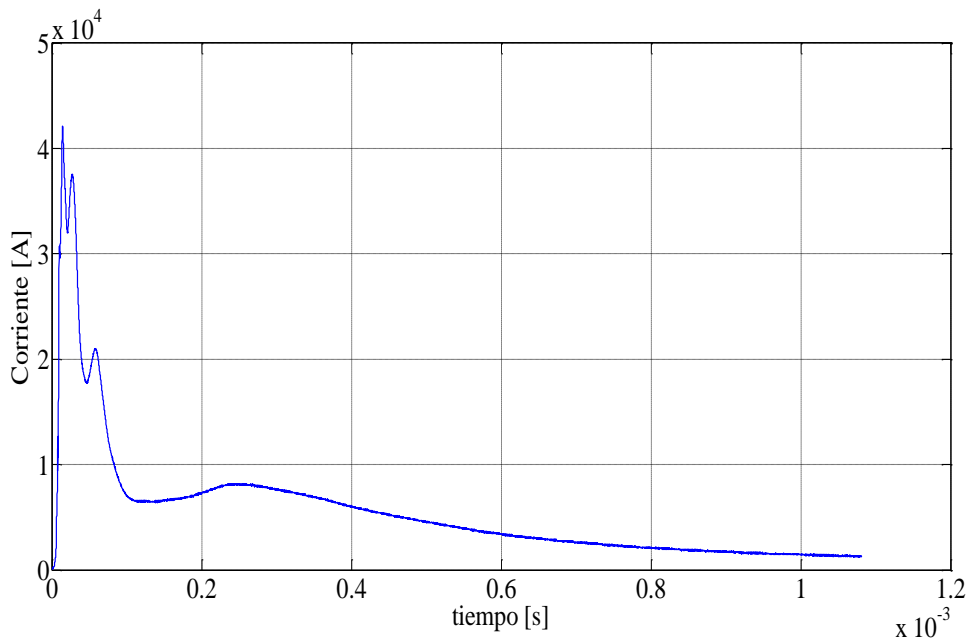


Fig. 25: Forma temporal de la onda de corriente rayo procesado por LEMPSA - 1

El espectro de frecuencias del rayo de la Fig. 25, que fue procesado por **LEMPSA - 1** se puede visualizar en la Fig. 26:

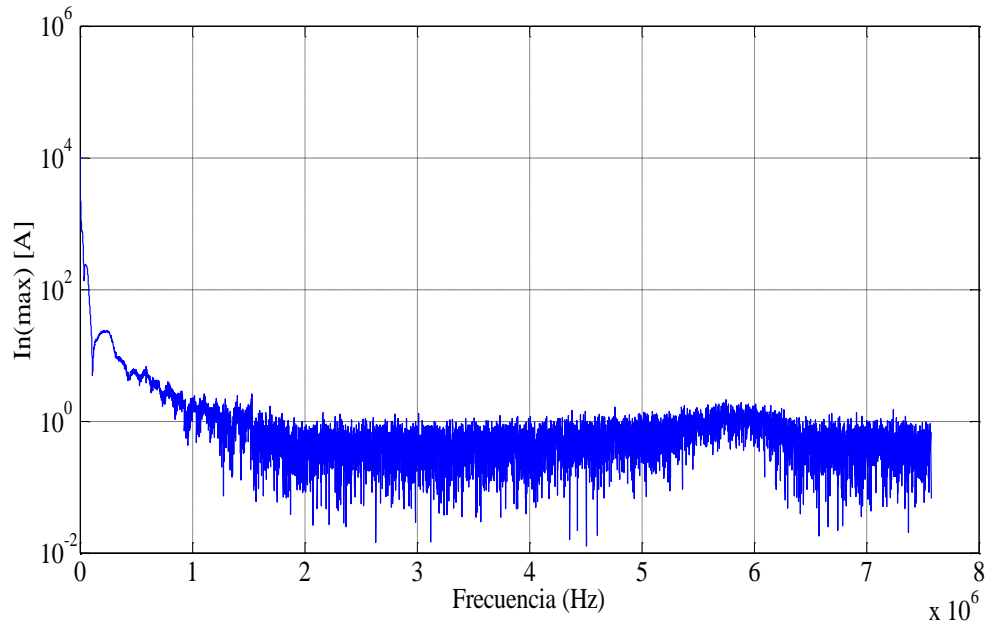


Fig. 26: Espectro de frecuencias entregado por LEMPSA - 1 (Escala Logarítmica)

Dado que la expresión para el cálculo de la tensión inducida propuesta ya fue validada, fue posible obtener resultados de la tensión inducida por el rayo de la Fig. 25 aplicando la expresión (41) con el insumo de las corrientes máximas de cada componente espectral registradas en la Fig. 26, obteniendo los siguientes resultados para la $V_{\text{ind-total-max}}$ que se visualizan en la Fig. 27:

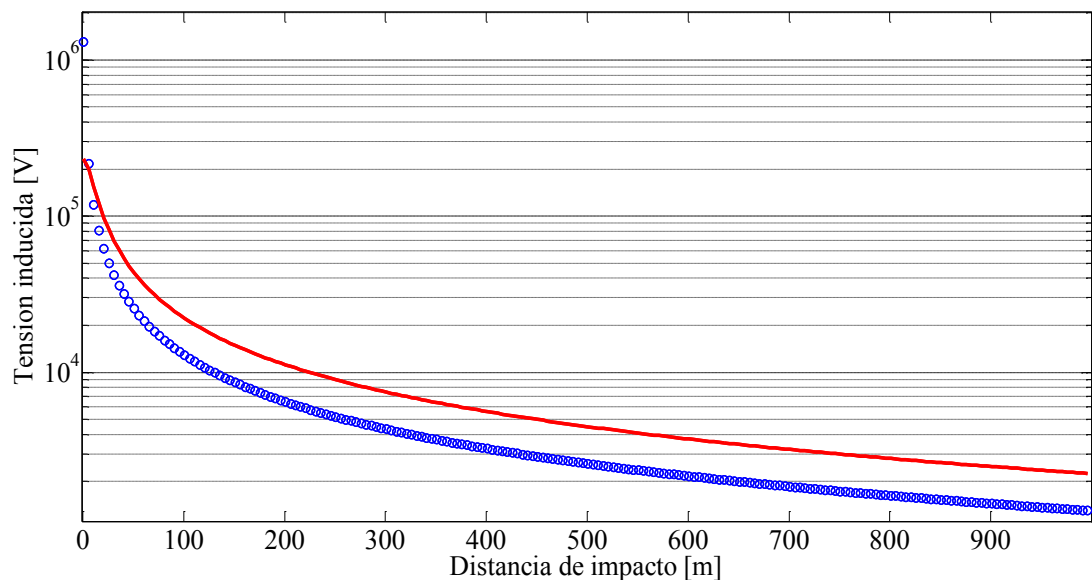


Fig. 27: Variación de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPSA - 1 Vs la distancia. En rojo (línea continua) la tensión obtenida con (48) y en azul (círculos) con (1).

Es posible observar una diferencia en magnitud más marcada entre la expresión propuesta (41) y la desarrollada por Rusck, ya que, a diferencia del proceso de validación, para obtener los resultados que se observan en la Fig. 27 se consideró adicionalmente el ángulo de elevación lo cual provoca un incremento. Dado esto, los resultados obtenidos son un 47% mayores a los predichos por la expresión de Rusck, es de anotar que otros autores han llegado a resultados superiores a los de Rusck con sus modelos propuestos, tal es el caso de Piantini [22] quien llegó a resultados con su modelo Extendido de Rusck un 32% mayores y otro autor es Barker [20] quien midió tensiones un 63% mayores a lo que predice Rusck.

En cuanto al espectro de la tensión inducida es posible visualizarlo en la gráfica de la Fig. 28

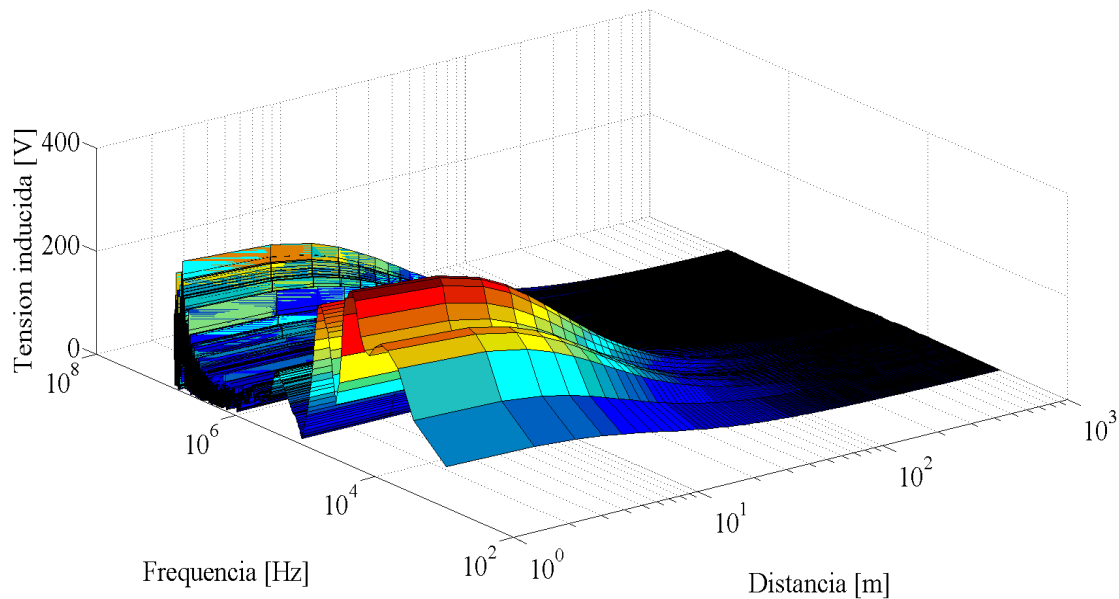


Fig. 28: Espectro de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPSA - I

Ahora bien, cuando se ingresó adicionalmente la variable longitud de línea a la expresión propuesta, se obtuvieron los siguientes resultados (ver Fig. 29) para una línea de 50m con las mismas características de la línea bifilar inicialmente simulada en el escenario de simulación:

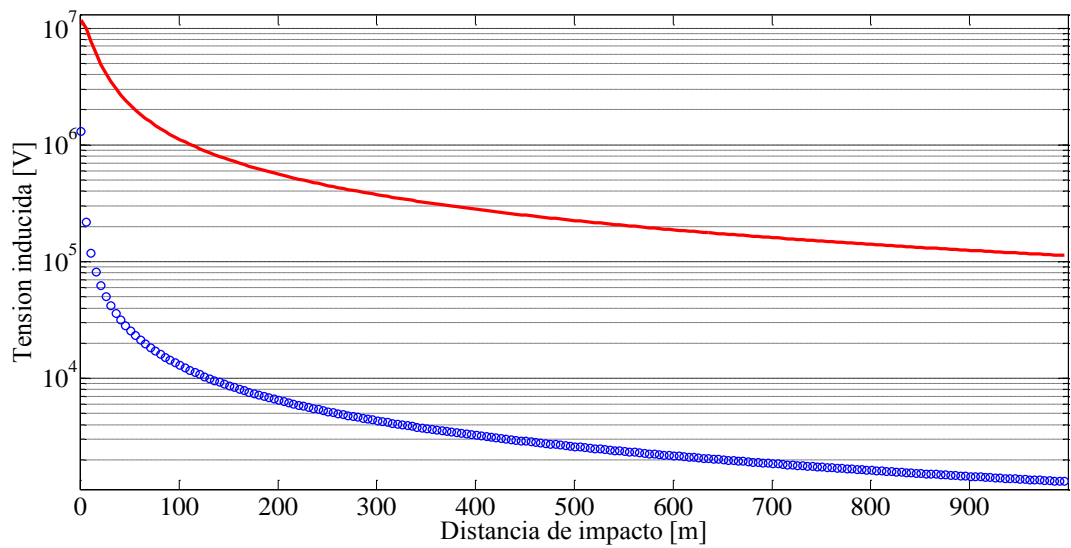


Fig. 29: Variación de la tensión inducida por el rayo procesado por LEMPISA - I con la distancia al incluir la longitud de la línea. En rojo (línea continua) la tensión obtenida con (48) y en azul (círculos) con (1).

En los resultados obtenidos y visualizados en la Fig. 29, se observó una diferencia en magnitud mucho más marcada entre las dos expresiones, dado que los valores obtenidos con la expresión propuesta se han incrementado proporcionalmente al área encerrada por el lazo que conforma la línea de distribución de 50m. Esto es otro aporte relevante de la presente expresión desarrollada para calcular la tensión inducida, ya que adicionalmente al aporte total de las componentes espectrales del rayo, se debe considerar también la longitud de la línea de distribución, ya que desde la física electromagnética la inducción se incrementa conforme se incrementa el área que logra encerrar más líneas de flujo magnético. El espectro de tensión inducida de igual forma se incrementa y es posible verlo en la Fig. 30:

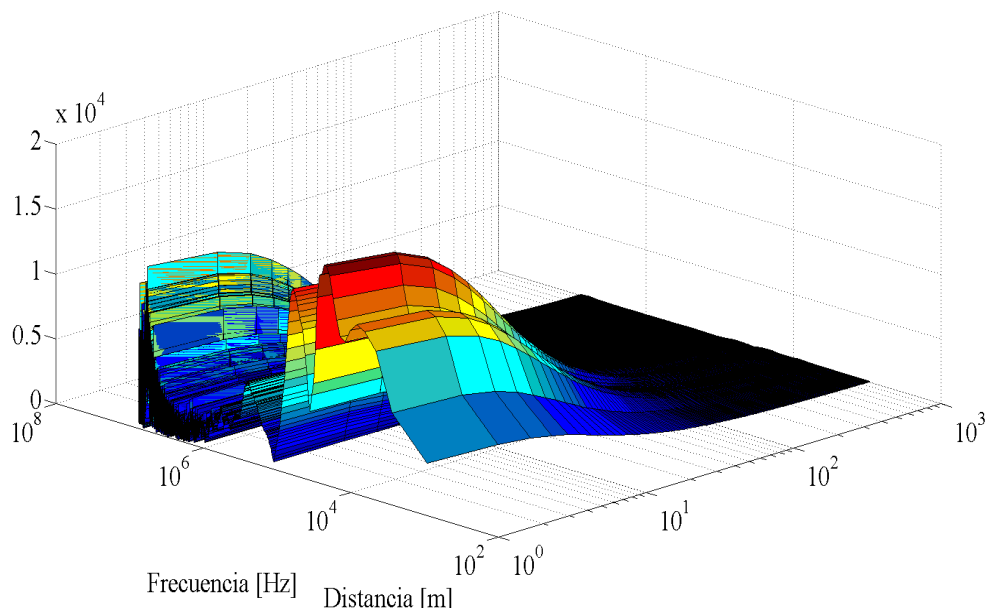


Fig. 30: Espectro de la tensión inducida por el rayo procesado de por LEMPSA - 1 para una línea de 50 m

Finalmente, es posible concluir que se modelaron las emisiones electromagnéticas ocasionadas por la descarga de un rayo, considerando al rayo como una antena monopolo corto sobre un plano de tierra perfectamente conductor. La expresión propuesta para el cálculo de la tensión inducida por el rayo en líneas de distribución ha sido validada confrontándola con la expresión planteada por Rusck [18]. Dicha expresión a diferencia de los habituales modelos eléctricos, utiliza la teoría de los sistemas radiantes basándose en un análisis de la propagación de los CEM asociados al LEMP y a su contenido espectral. Además, son considerados parámetros adicionales de la línea de distribución tales como: la permeabilidad magnética μ del material de la línea, la longitud total entre elementos de protección, la separación entre conductores, así como también se considera al rayo como una fuente de inducción multifrecuencial. De igual forma, la expresión propuesta muestra un futuro promisorio como una herramienta válida en el cálculo de la tensión inducida desde la perspectiva de la teoría de la radio propagación y de los sistemas radiantes.

En un trabajo futuro, se espera a partir de la aplicación del método de elementos finitos, calcular en cada elemento finito de línea la $V_{ind-total-max}$ en función de la distancia entre el punto de impacto del rayo y el elemento bajo análisis.

3.4 Técnica de correlación espacial

La técnica de correlación espacial, establece un proceso de comparación entre la $V_{ind-total-max}$ y la tensión crítica de flameo (**CFO**) de la línea. Lo anterior, permite definir si en las coordenadas de la línea se obtiene un valor $V_{ind-total-max}$, tal que $V_{ind-total-max} \geq CFO$.

De cumplirse la relación de tensiones anteriormente mencionada, se establece la condición necesaria para que ocurra una falla, ya que según S. Rusck [18], si la tensión inducida es mayor que el nivel de aislamiento de la línea (que se supone es igual en toda la línea), un flameo puede ocurrir, lo cual se vería reflejado como una falla en el suministro eléctrico.

La condición $V_{ind-total-max} \geq CFO$, permitió definir el Corredor Espacial (**CE**) y una zona segura Z_s (ubicada fuera del **CE**). El límite del **CE**, se localiza justo en el punto donde se da la condición de $V_{ind-total-max} = CFO$ (ver Fig. 31), siendo esta una condición mínima y necesaria para que se produzca una falla.

Si la distancia de impacto del rayo (ρ_l) supera el límite del **CE**, es decir, el punto de impacto se encuentra fuera del **CE**, los CEM radiados por el rayo llegan a la línea atenuados, originándose una $V_{ind-total-max} < CFO$. Esto indica, que el rayo impactó en Z_s , y no es causa de falla.

Pero por el contrario si ρ_l no supera el límite del **CE**, es decir, el punto de impacto está al interior de **CE**, se genera una $V_{ind-total-max} > CFO$ condición suficiente de falla, obteniendo de esta manera, una correlación espacial positiva.

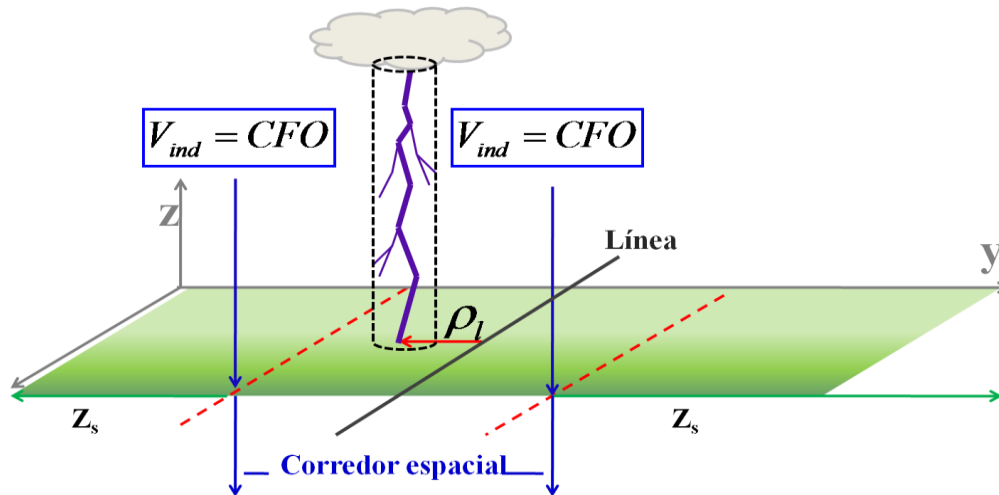


Fig. 31: Definición del corredor espacial de la línea

La correlación espacial será positiva, si ρ_l se encuentra entre el límite de **CE** y la línea, tal como lo expresa la siguiente definición matemática propuesta para el "corredor espacial":

$$\rho_l \in [localización_{línea}, límite CE] \quad (50)$$

En el capítulo 3.3 fue definido un escenario virtual para la validación de la expresión (41). Como ejemplo ilustrativo, el límite del **CE** para la línea de dicho escenario, se muestra en la Fig. 32:

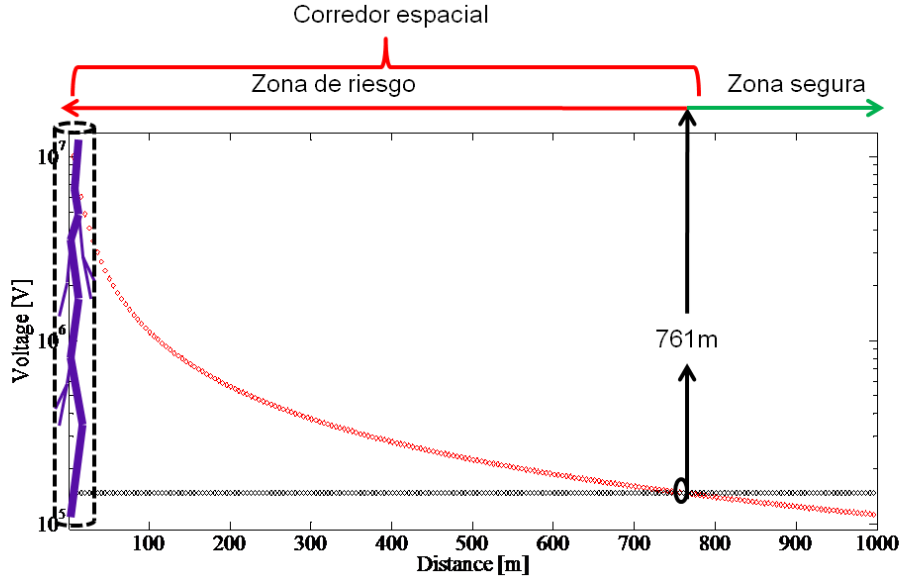


Fig. 32: Corredor espacial para línea Bifilar del escenario virtual y frontera entre zonas

En la gráfica de la Fig. 32, se observa que el punto donde se cumple la condición $V_{ind-total-max} = CFO$ se encuentra a una distancia de 761 m del punto de impacto del rayo. Esto indica que la línea de distribución del escenario virtual tiene un corredor espacial a ambos lados de 761 m.

Para establecer el CE con SACET, se calcula ρ_i , la cual se toma como la distancia mínima entre el punto de impacto del rayo y la línea. Para obtener ρ_i se proyecta el punto de impacto del rayo, en coordenadas planas (x_r, y_r) , sobre la línea de distribución. El punto de la intersección, de la proyección de (x_r, y_r) con la línea, es la coordenada de un punto de máxima inducción (x_{ind}, y_{ind}) por ser el más cercano a (x_r, y_r) .

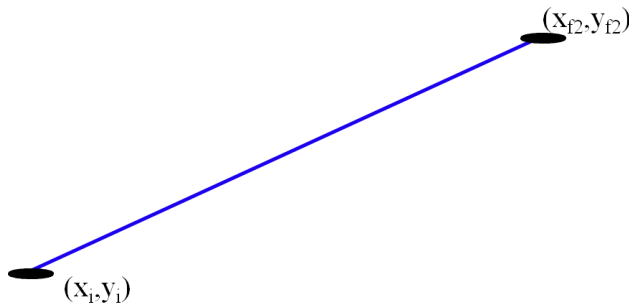


Fig. 33: Ubicación espacial de la línea

La línea fue definida espacialmente, entre un punto inicial (x_1, y_1) y un punto final (x_{f2}, y_{f2}) , como se observa en la Fig. 33. Esto permitió, describirla espacialmente mediante la siguiente ecuación:

$$x(y_{f2} - y_1) + y(x_1 - x_{f2}) + (x_{f2}y_1 - x_1y_{f2}) = 0 \quad (51)$$

Donde:

$$x_{f2}y_1 - x_1y_{f2} = \psi_1 \quad (52)$$

Con base en la expresión (51), fue posible obtener el punto (x_{ind}, y_{ind}) , considerando los siguientes tres casos de ubicación del punto de intersección:

1. El punto de intersección sobre la línea, ver Fig. 34:

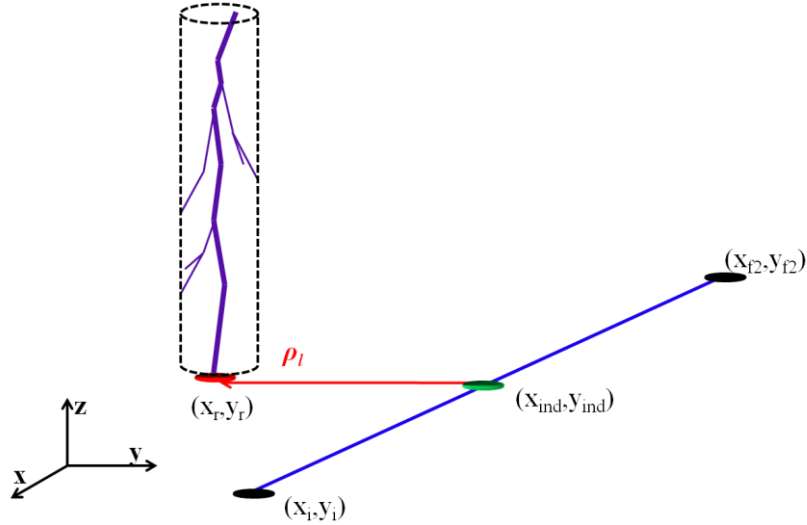


Fig. 34: Proyección ortogonal.

Las coordenadas del punto de máxima inducción y la distancia de impacto son:

$$x_{ind} = \frac{(x_1 - x_{f2})((x_1 - x_{f2})x_r - (y_{f2} - y_1)y_r) - (y_{f2} - y_1)\psi_1}{(y_{f2} - y_1)^2 + (x_1 - x_{f2})^2} \quad (53)$$

$$y_{ind} = \frac{(y_{f2} - y_1)(-(x_1 - x_{f2})x_r + (y_{f2} - y_1)y_r) - (x_1 - x_{f2})\psi_1}{(y_{f2} - y_1)^2 + (x_1 - x_{f2})^2} \quad (54)$$

$$\rho_l = \sqrt{(x_{ind} - x_r)^2 + (y_{ind} - y_r)^2} \quad (55)$$

2. El punto de intersección fuera de la línea, por el lado del punto (x_{f2}, y_{f2}) , ver Fig. 35:

Para este caso, se propuso que las coordenadas del punto de máxima inducción, fueran iguales a las del punto final de la línea (x_{f2}, y_{f2}) .

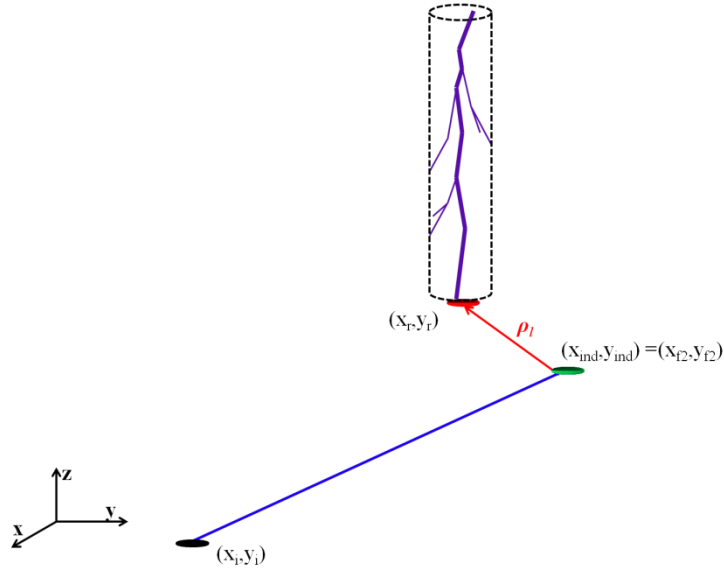


Fig. 35: Proyección por fuera del punto (x_{f2}, y_{f2})

La distancia de impacto se calcula como:

$$\rho_l = \sqrt{(x_{f2} - x_r)^2 + (y_{f2} + y_r)^2} \quad (56)$$

3. El punto de intersección está fuera de la línea, por el lado del punto (x_i, y_i) , ver Fig. 36.

Las coordenadas del punto de máxima inducción, se hicieron iguales a las del punto inicial de la línea (x_i, y_i) .

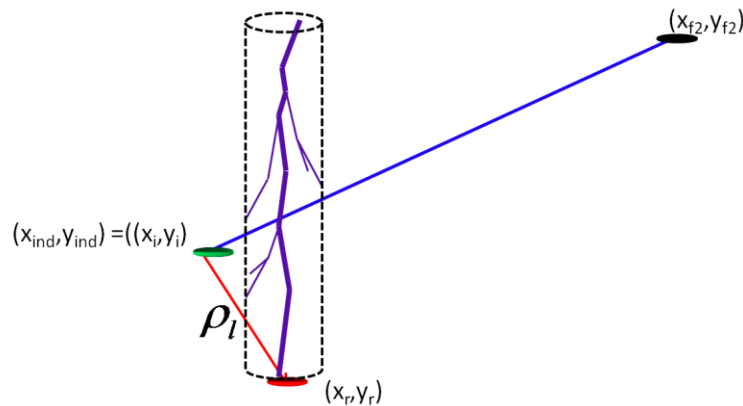


Fig. 36: Proyección ortogonal por fuera del punto (x_i, y_i)

La distancia de impacto se obtiene con la expresión:

$$\rho_l = \sqrt{(x_i - x_r)^2 + (y_i + y_r)^2} \quad (57)$$

Una vez definida ρ_l con las expresiones (55), (56) y (57), según sea el caso de ubicación del punto de intersección, es posible calcular el valor de $V_{ind-total-max}$ con la expresión (41) en función de la ρ_l obtenida. De la anterior manera y estimada $V_{ind-total-max}$, se verifica con SACET, si la condición matemática del corredor espacial (50) es cumplida, para establecer si la correlación espacial es positiva o negativa.

3.5 Correlación temporal

Para la correlación temporal, se consideran los datos temporales asociados al rayo, a la falla y a la propagación de las señales desde el punto de impacto del rayo hasta la llegada del reporte al centro de operaciones, ver Fig. 37. Dichos datos son:

- ***momento_{impacto}***: instante temporal en el cual el sistema LEMPSA - I registra el impacto del rayo.
- ***momento_{falla}***: instante temporal de registro la falla, por parte del centro de operaciones.
- ***t_{impacto}***: tiempo que tarda la señal LEMP en recorrer la distancia ρ_l .
- ***t_{relé}***: lapso temporal, que tarda la propagación de la $V_{ind-total-max}$ al interior de la línea, desde (x_{ind}, y_{ind}) hasta la ubicación del relé.
- ***t_{reporte}***: tiempo que toma el reporte emitido por el relé, en propagarse hasta el centro de operaciones, ubicado en las coordenadas (x_{op}, y_{op}) .

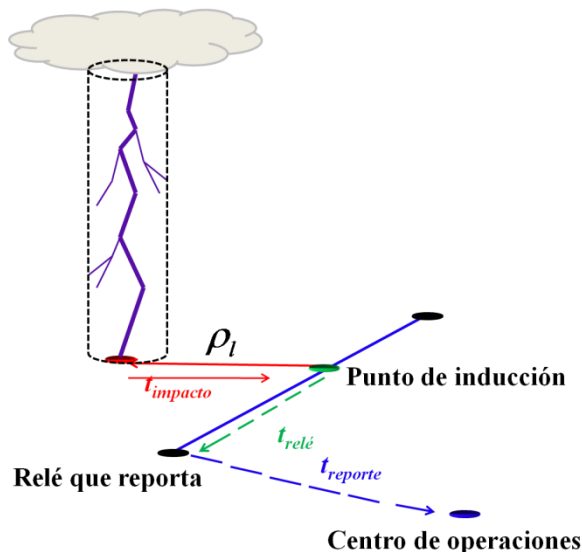


Fig. 37: Distancias de propagación de la señal LEMP

La condición matemática propuesta, llamada "ventana de tiempo", para la correlación temporal, es la siguiente:

$$momento_{falla} \in \left[momento_{impacto}, momento_{impacto} + t_{impacto} + t_{relé} + t_{reporte} \right] \quad (58)$$

En la expresión (58), se define que el momento de registro de la falla, debe estar al interior de un intervalo temporal, que se define entre los momentos de impacto del rayo y de recepción del reporte en el centro de operaciones, para conseguir una correlación temporal positiva.

Para obtener t_{impacto} , se consideró que la señal **LEMP** en el espacio libre se propaga a la velocidad de la luz (c), por tanto, se tiene que:

$$t_{\text{impacto}} = \frac{\rho_l}{c} \quad (59)$$

De igual forma, t_{reporte} se obtuvo como la relación entre la distancia que debe recorrer el reporte (d_{reporte}) y la velocidad de la luz:

$$t_{\text{reporte}} = \frac{d_{\text{reporte}}}{c} \quad (60)$$

Al tiempo de reporte, se le adicionaron unos tiempos inherentes al sistema de procesamiento de datos y de comunicación, quedando expresado así:

$$t_{\text{reporte}} = \frac{d_{\text{reporte}}}{c} + t_{\text{procesamiento}} + t_{\text{retardo}} \quad (61)$$

Donde:

$t_{\text{procesamiento}}$: Es el tiempo asociado a la velocidad de procesamiento de la tecnología usada en el relé.

t_{retardo} : Es un tiempo asociado al sistema de comunicación, y que incluye los retardos del sistema para establecer la comunicación con el centro de operaciones.

Los tiempos $t_{\text{procesamiento}}$ y t_{retardo} , se han asumido como un tiempo total de 15 ms, con base en los datos experimentales obtenidos por Uglesic en [37].

Por otro lado, $t_{\text{relé}}$ se calculó teniendo en cuenta los parámetros distribuidos de la línea, tales como la Inductancia (L , [H/m]) y la Capacitancia (C , [F/m]), que matemáticamente se pueden expresar como:

$$C = \frac{\pi \epsilon_0}{\ln \frac{S}{r}} \quad (62)$$

$$L = \frac{\mu_0}{\pi} \left(\ln \left(\frac{S}{r} \right) + \frac{1}{4} \right) \quad (63)$$

Donde:

S: es la separación entre conductores que conforman el lazo

r: es el radio de los conductores

De tal manera, que la velocidad de propagación es:

$$v_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (64)$$

Y por tanto, $t_{relé}$ es:

$$t_{relé} = \frac{d_{relé}}{v_p} \quad (65)$$

Obtenidos los tiempos asociados a la propagación del **LEMP**, se puede particularizar la ventana de tiempo, considerando los tres casos de ubicación de la intersección planteados en la sección 4.1, así:

1. Para el primer y segundo caso, la ventana de tiempo es:

$$\begin{aligned} & \text{momento}_{falla} \in \\ & \left[\text{momento}_{\text{impacto}}, \text{momento}_{\text{impacto}} + t_{\text{impacto}} \left((x_r, y_r) \rightarrow (x_{ind}, y_{ind}) \right) + \dots \right. \\ & \left. \dots + t_{relé} \left((x_{ind}, y_{ind}) \rightarrow (x_1, y_1) \right) + t_{bandera} \left((x_1, y_1) \rightarrow (x_{op}, y_{op}) \right) \right] \end{aligned} \quad (66)$$

2. Para el tercer caso se suprime el tiempo $t_{relé}$, teniendo que la ventana de tiempo es:

$$\begin{aligned} & \text{momento}_{falla} \in \\ & \left[\text{momento}_{\text{impacto}}, \text{momento}_{\text{impacto}} + \dots \right. \\ & \left. \dots + t_{\text{impacto}} \left((x_r, y_r) \rightarrow (x_{ind}, y_{ind}) \right) + t_{bandera} \left((x_1, y_1) \rightarrow (x_{op}, y_{op}) \right) \right] \end{aligned} \quad (67)$$

Establecida y particularizada matemáticamente la ventana de tiempo, se puede verificar con SACET, si el momento de registro de la falla cumple con la ventana de tiempo, obteniéndose de ser afirmativa la verificación, una correlación temporal positiva entre el rayo y la falla.

3.6 Diagrama de flujo del sistema de correlación espacio - temporal.

Las expresiones del **CE** (50), de **Vt** (66), (67) y de la $V_{ind-total-max}$ (41), brindan el sustento teórico - matemático para la técnica de correlación espacio - temporal.

La aplicación de dichas expresiones, se estableció en la rutina de SACET para discernir la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de la falla y/o salida de servicio, la cual se puede observar en el siguiente diagrama de flujo de la Fig. 38:

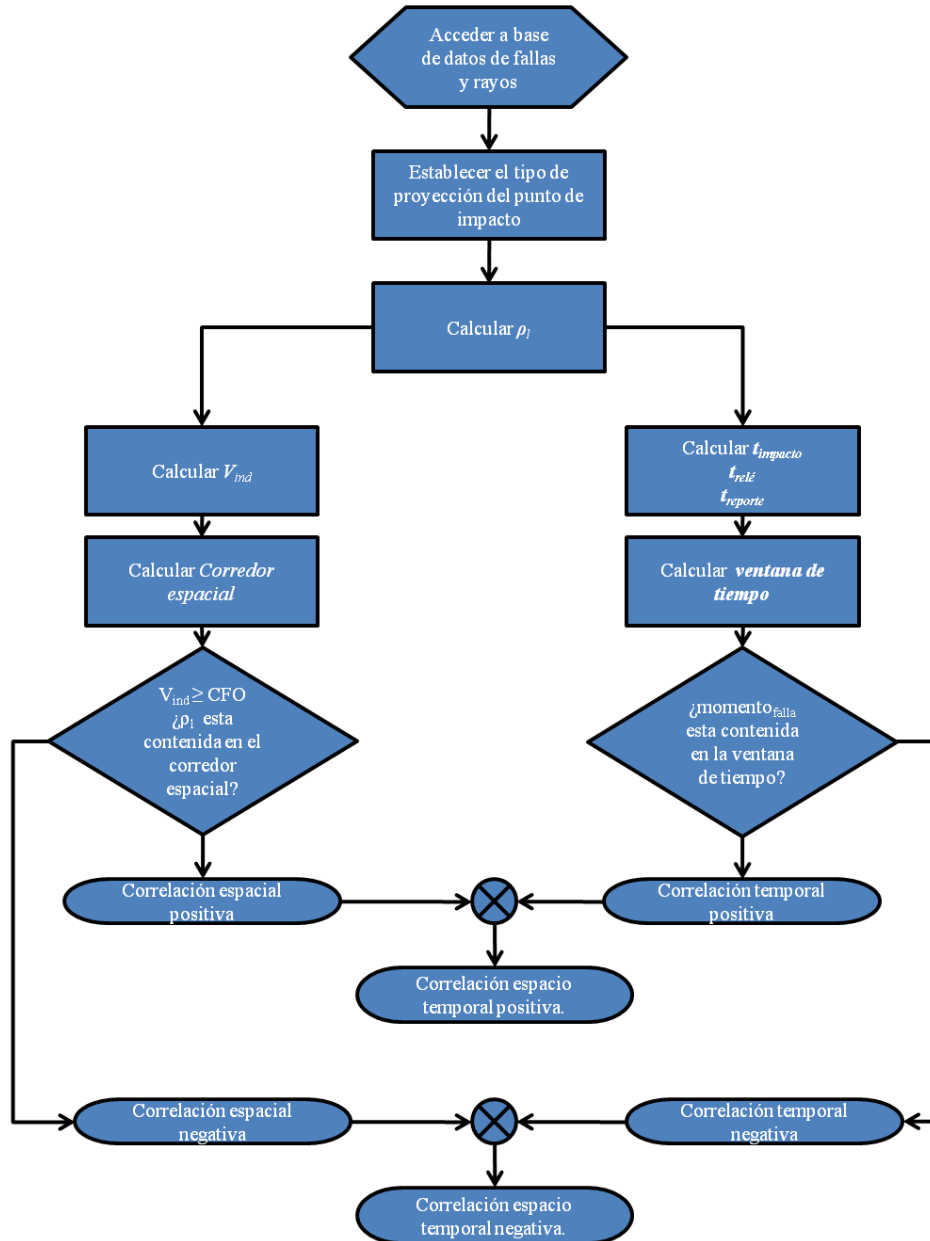


Fig. 38: Diagrama de Flujo de SACET

3.7 Resultados de la aplicación del módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo.

Como escenario de prueba para aplicar la técnica de correlación espacio - temporal y el SACET, se contó con la red de distribución eléctrica ubicada en el barrio la Enea de la Ciudad de Manizales, vista en la Fig. 39:

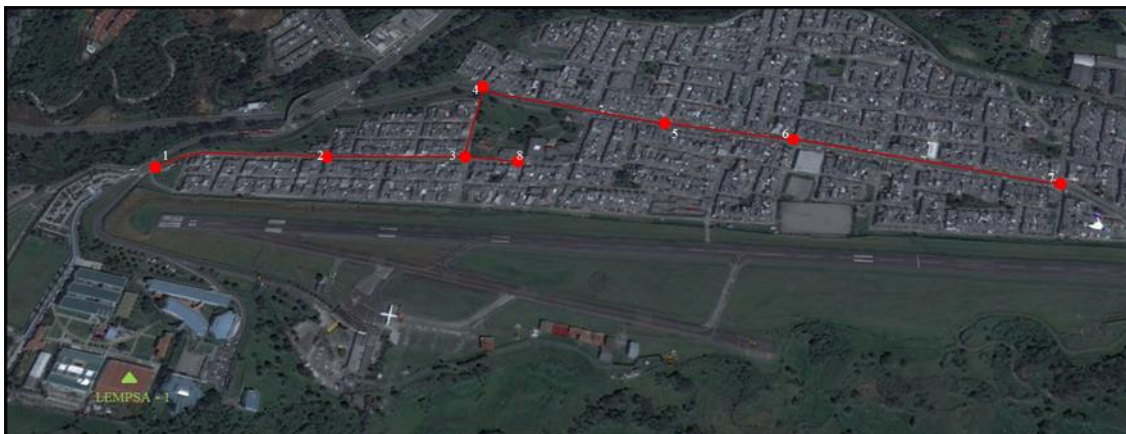


Fig. 39: Red de distribución de prueba con sus respectivos relés

La red de distribución de prueba, tiene un CFO de 98793.67 V que se asume constante sobre toda el área de cobertura. La geolocalización de los relés, se visualiza en la Tabla 1:

Tabla 1: Red de distribución de prueba con sus respectivos relés

| Object ID | latitud | longitud | x | y |
|-----------------------|----------|------------|-------------|------------|
| 1 | 5.03134 | -75.472068 | 1047980 | 845453 |
| 2 | 5.0315 | -75.469836 | 1047980 | 845693 |
| 3 | 5.031338 | -75.46803 | 1047974 | 845876 |
| 4 | 5.032599 | -75.467921 | 1048164 | 845888 |
| 5 | 5.031979 | -75.465499 | 1048040 | 846143 |
| 6 | 5.031493 | -75.463562 | 1047980 | 846405 |
| 7 | 5.030857 | -75.460901 | 1047920 | 846705 |
| 8 | 5.031285 | -75.467086 | 1047968 | 845978 |
| CENTRO DE OPERACIONES | 5.019786 | -75.457034 | 1046726.888 | 847115.328 |

Como evento de tormenta eléctrica, el sistema LEMPSA - 1 registró durante las 15:10,549 y las 16:20,823 horas, de la fecha 11/02/2016, los siguientes rayos ocurridos en inmediaciones de la red de distribución de prueba:

Tabla 2: Información de rayos detectados

| ID Rayo | LOCALIZACIÓN | | I(kA) | HORA DE REGISTRO | | | |
|---------|--------------|------------|-------|------------------|----|----|-----|
| | latitud | longitud | | HH | MM | SS | mmm |
| R1 | 5,032459 | -75,471039 | 31 | 15 | 13 | 32 | 81 |

| | | | | | | | |
|-----|----------|------------|----|----|----|----|-----|
| R2 | 5,034096 | -75,467703 | 40 | 15 | 45 | 31 | 942 |
| R3 | 5,031338 | -75,46803 | 15 | 15 | 55 | 37 | 630 |
| R4 | 5,038524 | -75,480049 | 30 | 15 | 47 | 39 | 798 |
| R5 | 5,031345 | -75,472013 | 42 | 16 | 15 | 43 | 25 |
| R6 | 5,842563 | -75,354622 | 5 | 15 | 24 | 56 | 57 |
| R7 | 5,00246 | -75,443726 | 20 | 15 | 29 | 54 | 548 |
| R8 | 5,000463 | -75,437111 | 13 | 15 | 42 | 55 | 184 |
| R9 | 5,005854 | -75,452145 | 38 | 15 | 41 | 7 | 871 |
| R10 | 5,000089 | -75,406039 | 16 | 15 | 36 | 50 | 738 |

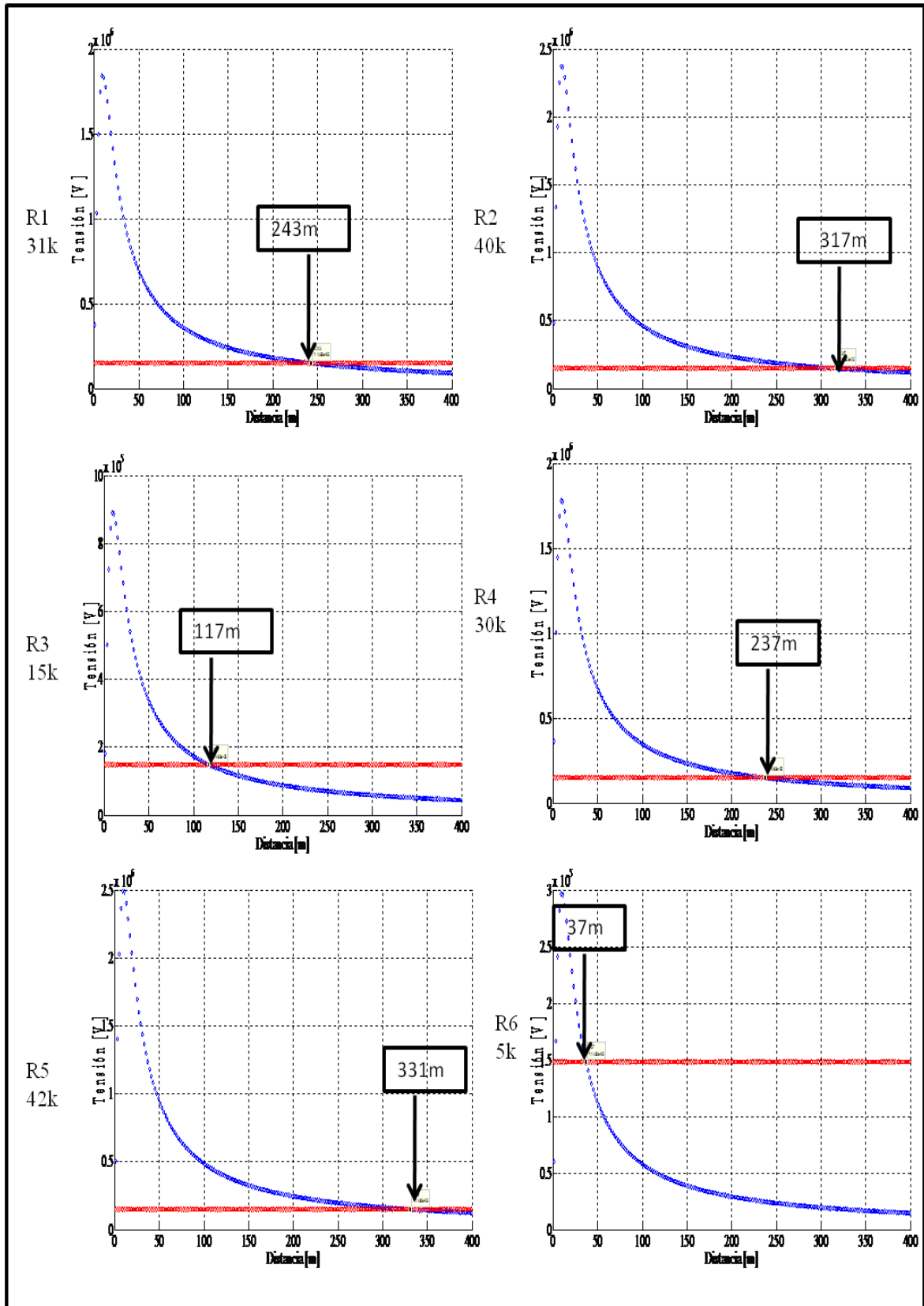
La localización de los puntos de impacto de cada rayo, está dada en coordenadas geográficas decimales. A través de un algoritmo computacional, se convirtieron a coordenadas planas (x,y), para su utilización en SACET, ver la Tabla 4.

Haciendo uso de la ecuación (41) desarrollada para calcular $V_{ind-total-max}$, se estimaron los diferentes corredores espaciales para la línea de prueba, asociados a cada uno de los rayos almacenados en la Tabla 2.

Dichos corredores, se pueden visualizar en la gráfica de la Fig. 40 y sus valores en la Tabla 3:

Tabla 3: Valor de los corredores espaciales en función de cada rayo

| ID rayo | Corredor espacial [m] |
|---------|-----------------------|
| R1 | 243 |
| R2 | 317 |
| R3 | 117 |
| R4 | 237 |
| R5 | 332 |
| R6 | 37 |
| R7 | 157 |
| R8 | 101 |
| R9 | 301 |
| R10 | 125 |



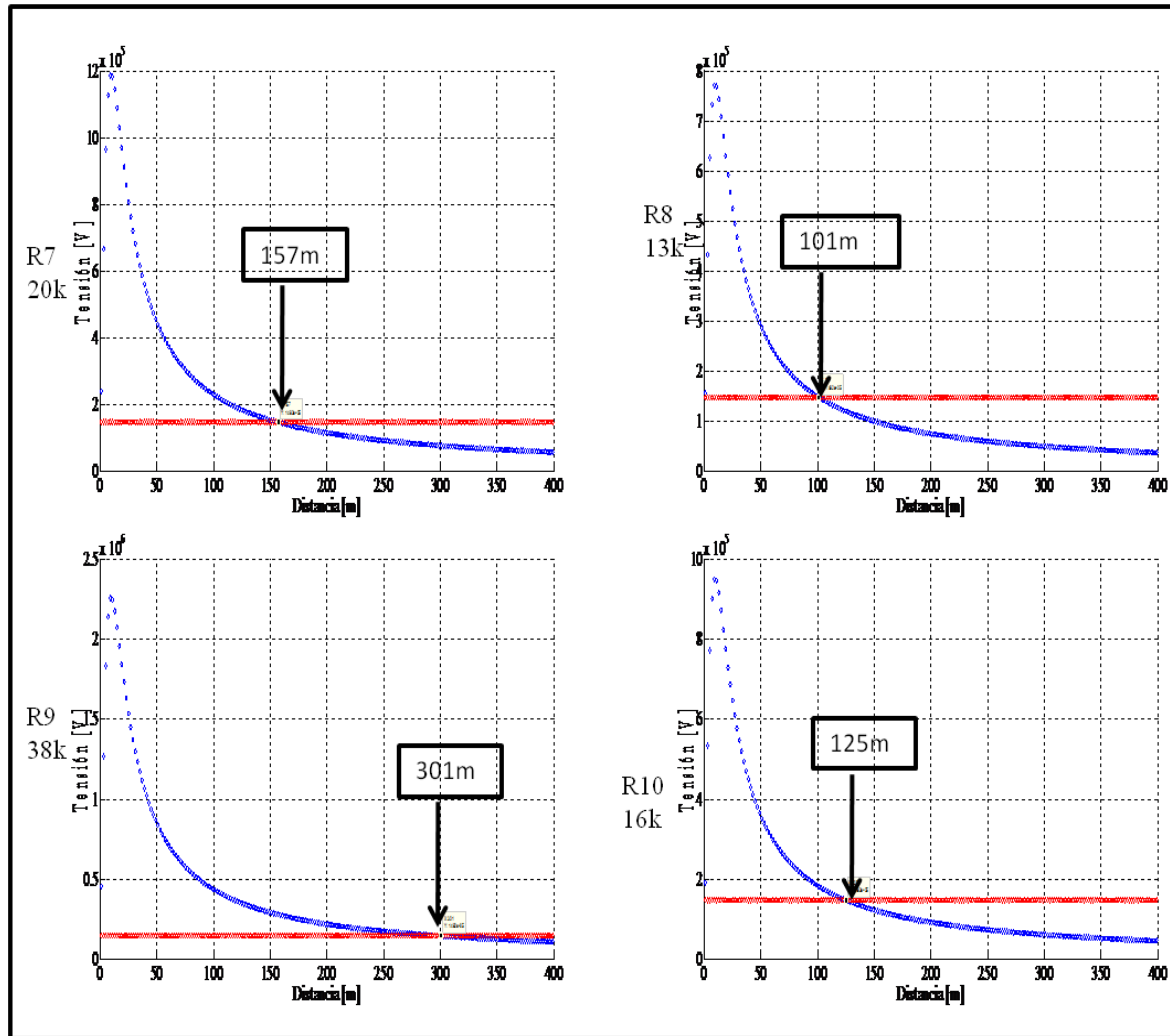


Tabla 4: Coordenadas (x,y) de rayos detectados

| ID Rayo | LOCALIZACIÓN | |
|---------|--------------|------------|
| | X | Y |
| R1 | 1048095.572 | 845550.788 |
| R2 | 1048324.368 | 845911.076 |
| R3 | 1047974.504 | 845875.760 |
| R4 | 1048802.592 | 844577.708 |
| R5 | 1047975.26 | 845445.59 |
| R6 | 1138125.804 | 858487.824 |
| R7 | 1044803.68 | 848604.59 |
| R8 | 1044588 | 849319 |
| R9 | 1045170.23 | 847643.34 |
| R10 | 1044547.61 | 852778.78 |

Las localizaciones de los impactos registrados por LEMPSA - I, pueden ser visualizadas en la Fig. 41:



Fig. 41: Localizaciones de los impactos de los rayos.

Durante el desarrollo de la tormenta registrada por LEMPSA - 1, el operador eléctrico registró la siguiente información de fallas y/o salidas de servicio ocurridas en la red de distribución de prueba, ver Tabla 5.

Tabla 5: Fallas reportadas durante el proceso de tormenta

| Object Id | nombre del tramo | hora de registro | | | | fecha |
|-----------|------------------|------------------|----|----|-----|--------|
| | | HH | MM | SS | mmm | |
| 4 | 11640 | 15 | 45 | 31 | 951 | 110216 |
| 7 | 11650 | 15 | 23 | 50 | 330 | 110216 |
| 1 | 11610 | 15 | 13 | 32 | 91 | 110216 |
| 1 | 11610 | 16 | 15 | 43 | 28 | 110216 |

Al ingresar a SACET los datos almacenados en las tablas Tabla 4 y Tabla 5, fue posible definir unas tablas de correlación espacio - temporal, para cada uno de los relés que reportaron falla y/o salida de servicio. En dichas tablas, se observa el tipo de correlación que existe entre el rayo y la falla (cumplimiento de la condición de corredor espacial y de la ventana de tiempo), el valor de la tensión inducida, la distancia de impacto y el tipo de proyección. Asimismo, es posible observar los tiempos de propagación, así como el tiempo total que tardó en el recorrido la señal. De igual forma, se detalla el valor que tiene la ventana de tiempo con una resolución de milésimas de segundo.

Para el elemento identificado como 4, las tablas de correlación espacio - temporal son las siguientes:

Tabla 6: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 4

| Correlación espacial | | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|----------|----------------------------|
| Object ID | 4 | | | |
| Rayo Id | Correlación | $V_{ind-total-max}$ | dimp | Proyección |
| R1 | negativa | 1,24E+05 | 3,44E+02 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R2 | positiva | 3,38E+10 | 1,62E+02 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R3 | negativa | 1,42E+04 | 1,46E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R4 | negativa | 2,83E+04 | 1,46E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R5 | negativa | 1,20E+05 | 4,81E+02 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R6 | negativa | 7,57E+01 | 9,08E+04 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R7 | negativa | 6,77E+03 | 4,07E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R8 | negativa | 3,81E+03 | 4,69E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R9 | negativa | 6,37E+03 | 3,24E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R10 | negativa | 2,94E+03 | 7,50E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |

| correlación temporal | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|--------|-------------------------|----|----|-----|-------------|----|----|-----|----|------------|
| Object ID | tiempos | | | | Hora rayo (Vt inferior) | | | | Vt superior | | | | Vt | |
| Rayo Id | trele | treporte | timpacto | total | HH | MM | SS | ms | HH | MM | SS | ms | ms | corelación |
| R1 | 0 | 1,50E-02 | 1,14E-06 | 0,015 | 15 | 13 | 32 | 81 | 15 | 45 | 31 | 96 | 15 | negativa |
| R2 | 0 | 1,50E-02 | 5,40E-07 | 0,015 | 15 | 45 | 31 | 942 | 15 | 45 | 31 | 957 | 15 | positiva |
| R3 | 0 | 1,50E-02 | 4,86E-06 | 0,015 | 15 | 23 | 14 | 672 | 15 | 45 | 31 | 687 | 15 | negativa |
| R4 | 0 | 1,50E-02 | 4,86E-06 | 0,015 | 15 | 32 | 57 | 686 | 15 | 45 | 31 | 701 | 15 | negativa |
| R5 | 0 | 1,50E-02 | 1,60E-06 | 0,015 | 16 | 15 | 43 | 25 | 15 | 45 | 31 | 40 | 15 | negativa |
| R6 | 0 | 1,50E-02 | 3,03E-04 | 0,0153 | 15 | 40 | 21 | 926 | 15 | 45 | 31 | 941 | 15 | negativa |
| R7 | 9,91E-07 | 1,50E-02 | 1,36E-05 | 0,015 | 15 | 26 | 23 | 972 | 15 | 45 | 31 | 987 | 15 | negativa |
| R8 | 9,91E-07 | 1,50E-02 | 1,56E-05 | 0,015 | 15 | 22 | 55 | 303 | 15 | 45 | 31 | 318 | 15 | negativa |
| R9 | 9,91E-07 | 1,50E-02 | 1,08E-05 | 0,015 | 15 | 21 | 20 | 548 | 15 | 45 | 31 | 563 | 15 | negativa |
| R10 | 9,91E-07 | 1,50E-02 | 2,50E-05 | 0,015 | 15 | 44 | 33 | 716 | 15 | 45 | 31 | 731 | 15 | negativa |

De las tablas de correlación espacio - temporal para el elemento 4, se concluye que el rayo identificado con R2 fue el responsable de la falla ocurrida sobre dicho elemento durante el proceso de tormenta.

Para el elemento identificado como 7, las tablas de correlación espacio - temporal son las siguientes:

Tabla 7: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 7

| Correlación espacial | | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|----------|----------------------------|
| Object ID | 7 | | | |
| Rayo Id | Correlación | $V_{ind-total-max}$ | dimp | Proyección |
| R1 | negativa | 5,34E+04 | 8,62E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R2 | negativa | 9,86E+04 | 6,02E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R3 | negativa | 4,21E+04 | 5,29E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R4 | negativa | 2,22E+04 | 2,00E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R5 | negativa | 6,50E+04 | 9,59E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R6 | negativa | 8,16E+01 | 9,10E+04 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R7 | negativa | 8,14E+03 | 3,65E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R8 | negativa | 4,56E+03 | 4,24E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R9 | negativa | 1,94E+04 | 2,91E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R10 | negativa | 3,42E+03 | 6,95E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |

| correlación temporal | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------------|----|----|----|-------------|----|----|----|----|------------|
| Object ID | tiempos | | | | Hora rayo (Vt inferior) | | | | Vt superior | | | | Vt | |
| Rayo Id | trele | treporte | timpacto | total | HH | MM | SS | ms | HH | MM | SS | ms | ms | corelación |
| R1 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 2,87E-06 | 1,50E-02 | 15 | 13 | 32 | 81 | 15 | 13 | 32 | 96 | 15 | negativa |
| R2 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 2,01E-06 | 1,50E-02 | 15 | 45 | 31 | 94 | 15 | 13 | 32 | 95 | 15 | negativa |
| R3 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 1,76E-06 | 1,50E-02 | 15 | 23 | 14 | 67 | 15 | 13 | 32 | 68 | 15 | negativa |
| R4 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 6,68E-06 | 1,50E-02 | 15 | 32 | 57 | 68 | 15 | 13 | 32 | 70 | 15 | negativa |
| R5 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 3,20E-06 | 1,50E-02 | 16 | 15 | 43 | 25 | 15 | 13 | 32 | 40 | 15 | negativa |
| R6 | 1,07E-06 | 1,50E-02 | 3,03E-04 | 0,0153 | 15 | 40 | 21 | 92 | 15 | 13 | 32 | 94 | 15 | negativa |
| R7 | 0 | 1,50E-02 | 1,22E-05 | 1,50E-02 | 15 | 26 | 23 | 97 | 15 | 13 | 32 | 98 | 15 | negativa |
| R8 | 0 | 1,50E-02 | 1,41E-05 | 1,50E-02 | 15 | 22 | 55 | 30 | 15 | 13 | 32 | 31 | 15 | negativa |
| R9 | 0 | 1,50E-02 | 9,68E-06 | 1,50E-02 | 15 | 21 | 20 | 54 | 15 | 13 | 32 | 56 | 15 | negativa |
| R10 | 0 | 1,50E-02 | 2,32E-05 | 1,50E-02 | 15 | 44 | 33 | 71 | 15 | 13 | 32 | 73 | 15 | negativa |

Las tablas de correlación espacio - temporal para el elemento 7, permiten definir que la falla ocurrida y reportada por el elemento 7 si bien ocurrió durante el proceso de tormenta, no hay rayo alguno que sea responsable de la falla.

Para el elemento identificado como 1, las tablas de correlación espacio - temporal son las siguientes:

Tabla 8: Resultados de Correlación espacio - temporal elementos 1

| Correlación espacial | | | | |
|----------------------|-------------|---------------------|----------|----------------------------|
| Object ID | 1 | | | |
| Rayo Id | Correlación | $V_{ind-total-max}$ | dimp | Proyección |
| R1 | positiva | 3,10E+05 | 1,16E+02 | ortogonal |
| R2 | negativa | 1,14E+05 | 4,08E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R3 | negativa | 9,53E+04 | 1,83E+02 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R4 | negativa | 2,91E+04 | 1,20E+03 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R5 | positiva | 2,49E+06 | 8,80E+00 | Fuera por el punto (xi,yi) |
| R6 | negativa | 6,40E+01 | 9,10E+04 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R7 | negativa | 5,41E+03 | 4,31E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R8 | negativa | 3,05E+03 | 4,97E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R9 | negativa | 1,29E+04 | 3,42E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |
| R10 | negativa | 2,37E+03 | 7,87E+03 | Fuera por el punto (x2,y2) |

| correlación temporal | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------------|----------|----------|----------|----------|-------------------------|----|----|-----|-------------|----|----|-----|----|----|------------|
| Object ID | tiempos | | | | Hora rayo (Vt inferior) | | | | Vt superior | | | | Vt | | |
| Rayo Id | trele | treporte | timpacto | total | HH | MM | SS | ms | HH | MM | SS | ms | m | s | corelación |
| R1 | 4,12E-07 | 1,50E-02 | 3,85E-07 | 1,50E-02 | 15 | 13 | 32 | 81 | 15 | 13 | 32 | 96 | 15 | 15 | positiva |
| R2 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 1,36E-06 | 1,50E-02 | 15 | 45 | 31 | 942 | 15 | 13 | 32 | 957 | 15 | 15 | negativa |
| R3 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 6,09E-07 | 1,50E-02 | 15 | 23 | 14 | 672 | 15 | 13 | 32 | 687 | 15 | 15 | negativa |
| R4 | 0 | 1,50E-02 | 4,00E-06 | 1,50E-02 | 15 | 32 | 57 | 686 | 15 | 13 | 32 | 701 | 15 | 15 | negativa |
| R5 | 0 | 1,50E-02 | 2,93E-08 | 1,50E-02 | 16 | 15 | 43 | 25 | 15 | 13 | 32 | 40 | 15 | 15 | positiva |
| R6 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 3,04E-04 | 0,0153 | 15 | 40 | 21 | 926 | 15 | 13 | 32 | 941 | 15 | 15 | negativa |
| R7 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 1,44E-05 | 1,50E-02 | 15 | 26 | 23 | 972 | 15 | 13 | 32 | 987 | 15 | 15 | negativa |
| R8 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 1,66E-05 | 1,50E-02 | 15 | 22 | 55 | 303 | 15 | 13 | 32 | 318 | 15 | 15 | negativa |
| R9 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 1,14E-05 | 1,50E-02 | 15 | 21 | 20 | 548 | 15 | 13 | 32 | 563 | 15 | 15 | negativa |
| R10 | 8,39E-07 | 1,50E-02 | 2,62E-05 | 1,50E-02 | 15 | 44 | 33 | 716 | 15 | 13 | 32 | 731 | 15 | 15 | negativa |

Las tablas de correlación espacio - temporal para el elemento 1, permiten definir que la falla ocurrida a las 15:13:32,81 y reportada por el elemento 1, fue causada por el rayo identificado como R1, y en cuanto a la falla registrada a las 16:15:43,25 se concluye que fue originada por el rayo identificado como R5.

Finalmente, se puede concluir que, se han establecido matemáticamente el corredor espacial y la ventana de tiempo, parámetros necesarios para la correlación espacio - temporal y su aplicación en el discernimiento de la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de fallas/salidas del servicio, a través de un sistema automático llamado SACET. Obteniendo resultados satisfactorios y alentadores para continuar en un futuro con un proceso de mejora del sistema.

4 Módulo de priorización de atención de fallas.

La calidad en la continuidad de la prestación del servicio eléctrico, es impactada directamente por los tiempos que tardan los operarios en solucionar una falla. Debido a la topología de la red de distribución de media tensión, que normalmente es de tipo radial, cuando un alimentador es afectado los usuarios aguas abajo quedan sin el servicio. El restablecimiento de la electricidad a estos usuarios, dependerá en gran medida de la efectividad del operador al atender la falla, por ello es necesario establecer previamente con SACET la responsabilidad del rayo en la ocurrencia de la falla, y definir de esta manera una priorización de atención de las fallas. Lo ideal, es que la prioridad se origine de forma automática, para apoyar al operador de red y que logre tomar una decisión rápida sobre el tipo de reparación que debe realizar, definiendo de esta manera el personal y equipo indicado, para restablecer el servicio de una forma pronta.

4.1 Problema para la asignación de prioridades en la atención de las fallas.

En esta tesis, se propone la priorización de atención de las fallas ocurridas durante un proceso de tormenta, con base en la asignación de pesos a las causas de iniciación de fallas, enfocando de esta manera, la propuesta desde la teoría de la toma de decisiones multicriterio.

El problema para asignar la prioridad de atención, es calcular unos valores de forma no subjetiva, eliminando así el sesgo humano, al momento de indicar que causa de iniciación tiene mayor peso sobre las demás, y en función de ello, indicar al operador que falla se debe atender con mayor prontitud.

Se propone como solución, la implementación de un método entrópico. Dicho método permite la asignación de pesos no subjetivos a las causas de iniciación de fallas, gracias a la reducción de la incertidumbre en la definición del rayo como causa de iniciación, con base en la información brindada por el sistema de correlación espacio - temporal. Obteniendo de esta manera, una técnica que le permite al operador atender de forma más ágil y rápida la restauración del servicio.

4.2 Metodología no subjetiva para la priorización entrópica.

Durante un proceso de tormenta, se pueden presentar fallas en diversos sectores de una ciudad, dichas fallas pueden ser o no, originadas por el impacto de un rayo, situación que es esclarecida por SACET. En esta tesis, se desarrolló una metodología de priorización objetiva, que permite establecer de forma entrópica el peso de las posibles causas de fallas. Esta metodología, le permite al operador eléctrico mejorar el conocimiento sobre la causa de la falla, y de esta manera saber qué grupo técnico y equipos, debe enviar para realizar la reparación en el menor tiempo posible. Asimismo, definir la prioridad de las fallas en función de la complejidad de reparación, según sea la causa.

La metodología se desarrolló planteando la priorización como un problema de toma de decisiones con múltiples atributos (MADM). Para dar solución a un problema MADM, se deben conocer las Alternativas y los Criterios. Teniendo claridad, en que los criterios son los parámetros que permiten reflejar las preferencias del decisor respecto a un atributo. Siendo el siguiente el conjunto de n - criterios:

$$C_n = \{C_1, C_2, \dots, C_n\} \quad (68)$$

Y que las alternativas son las posibles soluciones al problema, entre las cuales el decisor puede elegir, luego de realizar una evaluación de estas, a partir de los criterios. Siendo el grupo de i - alternativas, visualizado de la siguiente manera:

$$A_i = \{A_1, A_2, \dots, A_i\} \quad (69)$$

Los conjuntos $\{A_i\}$ y $\{C_n\}$, son como lo evidencian las expresiones (68) y (69) discretos, y por tanto, el problema MADM se convierte en una toma de decisiones multicriterio discreta.

A partir de los conjuntos (68) y (69) se plantea una matriz de decisión:

| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| | C_1 | C_2 | \dots | C_n |
| A_1 | x_{11} | x_{12} | \dots | x_{1n} |
| A_2 | x_{21} | x_{22} | \dots | x_{2n} |
| \vdots | \vdots | \vdots | \vdots | \vdots |
| A_i | x_{i1} | x_{i2} | \dots | x_{in} |

(70)

En la matriz de decisión (70) aparece un valor x_{in} llamado rating o valor de estado, resultante de la evaluación de la alternativa i respecto al criterio n . Barba-Romero [40], en 1987, sugiere que los valores que puede tomar x_{in} dependen de la escala de medida adoptada (cardinal, nominal, intervalo e incluso probabilística).

En la metodología propuesta en la presente tesis, el conjunto de las posibles causas de falla A_i son las alternativas, y fueron definidas a partir del concepto de causa de iniciación de falla establecido por el estándar IEEE 493-1990 [64] y como lo expone también [65], siendo las causas y sus respectivos valores de estado (probabilidades de causar fallas), las siguientes:

Tabla 9: Causas de fallas y su probabilidad de generar fallas (valores de estado)

| Alternativa | Causa de falla | Probabilidad |
|----------------|---|--------------|
| A ₁ | Alteraciones transitorias de sobretensión (Rayos) | 26% |
| A ₂ | Sobrecalentamiento | 21% |
| A ₃ | Ruptura de aislamiento | 8% |
| A ₄ | Rompimiento mecánico, agrietamiento, aflojamiento, abrasión o deformación de piezas estáticas o estructurales | 7% |
| A ₅ | Daños causados mecánicamente por fuentes externas (excavaciones, accidentes vehiculares, árboles, etc.) | 10% |
| A ₆ | Cortocircuito por herramientas u objetos metálicos | 14% |
| A ₇ | Cortocircuito por aves, serpientes, roedores, etc | 3% |
| A ₈ | Otras (Errores humanos, causas desconocidas, etc.) | 11% |

La Tabla 9, permite definir de la siguiente manera el conjunto de alternativas con sus respectivos valores de estado:

$$A_i = \{A_1 = 26\%, A_2 = 21\%, A_3 = 8\%, A_4 = 7\%, A_5 = 10\%, A_6 = 14\%, A_7 = 3\%, A_8 = 11\%\} \quad (71)$$

El conjunto de criterios, se definió como las n - fallas presentadas durante el proceso de tormenta:

$$C_i = \{f_1, f_2, \dots, f_n\} \quad (72)$$

4.2.1 Asignación del valor de estado a las posibles causas.

Cada posible causa de falla tiene un valor de estado, que es la probabilidad de generación de fallas, y se encuentra consignado en la Tabla 9. A partir de dichos valores, se construyó la siguiente matriz de decisión:

| | $f1$ | $f2$ | \dots | fn |
|-------|-----------|-----------|---------|-----------|
| A_1 | x_{1f1} | x_{1f2} | \dots | x_{1fn} |
| A_2 | x_{2f1} | x_{2f2} | \dots | x_{2fn} |
| A_3 | x_{3f1} | x_{3f2} | \dots | x_{3fn} |
| A_4 | x_{4f1} | x_{4f2} | \dots | x_{4fn} |
| A_5 | x_{5f1} | x_{5f2} | \dots | x_{5fn} |
| A_6 | x_{6f1} | x_{6f2} | \dots | x_{6fn} |
| A_7 | x_{7f1} | x_{7f2} | \dots | x_{7fn} |
| A_8 | x_{8f1} | x_{8f2} | \dots | x_{8fn} |

(73)

Los valores de la matriz de decisión (73), se modifican en función de la información suministrada por SACET. Es decir, cuando SACET confirme al rayo como causa de falla, el valor de estado asociado a A_1 (rayo), pasará del 26% al 100% (máxima certidumbre), y por tanto, las demás causas tendrán un valor de estado del 0%. Asimismo, cuando SACET defina que el rayo no es la causa, el valor de A_1 pasa a un valor de 0%, y el 26% que estaba asociado a esta causa, se reparte proporcionalmente entre las restantes causas de iniciación, de la siguiente forma:

$$x_{ifn}(reparto) = \frac{26(x_{ifn})}{proporción} \quad (74)$$

Donde *proporción* es:

$$proporción = \sum_{i=1}^8 x_{ifn} \quad (75)$$

Seguidamente, se normaliza la información contenida en la matriz de decisión, con la finalidad de unificar las unidades de los valores de estado y que la comparación en el proceso de toma de decisiones sea verídica. Para la normalización, existen varios métodos propuestos que se encuentran en la teoría de toma de decisiones (ver cuadro de la Fig. 42).

| | Procedimiento 1 | Procedimiento 2 | Procedimiento 3 | Procedimiento 4 |
|---|------------------------------|--|------------------------------|---|
| Definición * | $v_i = \frac{V_i}{\max V_i}$ | $v_i = \frac{V_i - \min V_i}{\max V_i - \min V_i}$ | $v_i = \frac{V_i}{\sum V_i}$ | $v_i = \frac{V_i}{(\sum V_i^2)^{1/2}}$ |
| Escala normalizada | $0 < v_i \leq 1$ | $0 \leq v_i \leq 1$ | $0 < v_i < 1$ | $0 < v_i < 1$ |
| Módulo $ v $ | variable | variable | variable | 1 |
| Mantiene proporcionalidad (pre y post-normalizar) | sí | no | sí | sí |
| Interpretación de v_i | % del máximo V_i | % del rango ($\max V_i - \min V_i$) | % del total $\sum V_i$ | componente i -ésima de un vector unitario |

Fig. 42: Métodos de normalización sintetizados
Fuente: [40]

De los métodos de normalización (ver cuadro de la Fig. 42), se utilizó el método de normalización por el valor ideal (ver ecuación (76)), dividiendo cada uno de los valores de estado de las columnas de criterios, por el mayor valor de estado de dicha columna, garantizando que $x_{jm} \in [0,1]$ y que no se presenten sesgos en la ordenación de las causas de falla, teniendo que la normalización es:

$$x_{jm} \text{ normalizado} = \frac{x_{jm}}{\max x_{jm}} \quad (76)$$

Con los resultados obtenidos con la ecuación (76), se calculan los valores de entropía para las posibles causas, de la siguiente manera:

$$H_i = -k \sum_{j=1}^8 x_{jm} \text{ normalizado} \ln(x_{jm} \text{ normalizado}) \quad (77)$$

Donde:

$$j=1,2,3,4, 5, 6, 7, 8$$

$$m=1,2,3,\dots,n$$

$$k = \frac{1}{\ln i}, \text{ } i \text{ es el número de las causas}$$

Y se asume que sí:

$$x_{jm} \text{ normalizado} \ln(x_{jm} \text{ normalizado}) = 0 \text{ si } \frac{x_{jm}}{\max x_{jm}} = 0$$

Finalmente, los pesos entrópicos normalizados se obtienen así:

$$w_i = \frac{D_i}{\sum_{s=1}^n (D_i)} = \frac{1-H_i}{\sum_{s=1}^n (1-H_i)} \quad (78)$$

Reemplazando los pesos entropicos, obtenidos con la expresión (78), en la matriz normalizada, se obtiene una matriz con pesos entrópicos, de la siguiente manera:

| | $f1$ | $f2$ | \dots | fn |
|-------|-----------|-----------|---------|-----------|
| A_1 | w_{1f1} | w_{1f2} | \dots | w_{1fn} |
| A_2 | w_{2f1} | w_{2f2} | \dots | w_{2fn} |
| A_3 | w_{3f1} | w_{3f2} | \dots | w_{3fn} |
| A_4 | w_{4f1} | w_{4f2} | \dots | w_{4fn} |
| A_5 | w_{5f1} | w_{5f2} | \dots | w_{5fn} |
| A_6 | w_{6f1} | w_{6f2} | \dots | w_{6fn} |
| A_7 | w_{7f1} | w_{7f2} | \dots | w_{7fn} |
| A_8 | w_{8f1} | w_{8f2} | \dots | w_{8fn} |

Finalmente, con los pesos normalizados se obtienen una ponderación global de los pesos:

$$w_{ifm}pond = (w_{ifm})x_{ifm}normalizado \quad (80)$$

Con los pesos ponderados globalmente se realiza una disposición de las alternativas, para la respectiva ordenación de las causas de las fallas. Dicha ordenación es posible, si los pesos de cada causa de falla se suman. El orden será descendente en relación con el valor de la suma, esto se ve en la siguiente matriz:

| | $f1$ | $f2$ | \dots | fn | $\sum w_{ifn}$ |
|-------|---------------|---------------|---------|---------------|----------------|
| A_1 | $w_{1f1}pond$ | $w_{1f2}pond$ | \dots | $w_{1fn}pond$ | wt_1 |
| A_2 | $w_{2f1}pond$ | $w_{2f2}pond$ | \dots | $w_{2fn}pond$ | wt_2 |
| A_3 | $w_{3f1}pond$ | $w_{3f2}pond$ | \dots | $w_{3fn}pond$ | wt_3 |
| A_4 | $w_{4f1}pond$ | $w_{4f2}pond$ | \dots | $w_{4fn}pond$ | wt_4 |
| A_5 | $w_{5f1}pond$ | $w_{5f2}pond$ | \dots | $w_{5fn}pond$ | wt_5 |
| A_6 | $w_{6f1}pond$ | $w_{6f2}pond$ | \dots | $w_{6fn}pond$ | wt_6 |
| A_7 | $w_{7f1}pond$ | $w_{7f2}pond$ | \dots | $w_{7fn}pond$ | wt_7 |
| A_8 | $w_{8f1}pond$ | $w_{8f2}pond$ | \dots | $w_{8fn}pond$ | wt_8 |

(81)

Finalmente, la matriz (81) permite establecer qué causa de falla tiene mayor peso entrópico, permitiendo de esta manera que el operador pueda restablecer el servicio en el menor tiempo posible al identificar a tiempo, gracias al método entrópico, los siguientes datos:

- La falla que en función del peso entrópico de la causa de iniciación, requiere atención prioritaria.
- El personal y el equipo que requiere para atender la falla.

Es así, como se ha desarrollado una metodología de priorización de atención de fallas originadas durante procesos de tormenta, haciendo uso de la entropía para eliminar la subjetividad del decisor.

4.3 Resultados de la metodología de priorización entrópica.

A continuación, se relata la aplicación de la metodología de priorización a una red de distribución (ver Fig. 43) en la ciudad de Manizales.

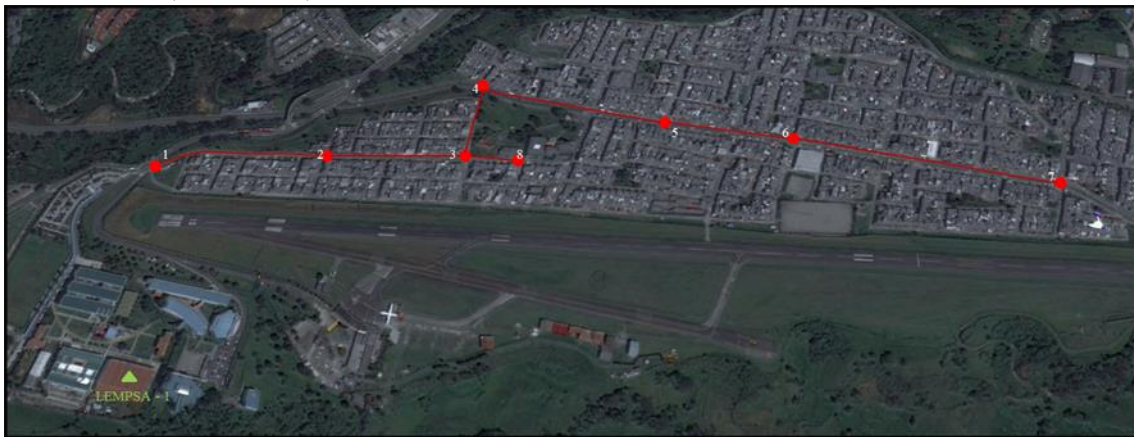


Fig. 43: Red de prueba

La red de distribución de prueba fue planteada en el capítulo 3. Aplicando la matriz (73) a las 4 fallas generadas durante la tormenta y almacenadas en la Tabla 5, y ubicando como valores de estado inicial los definidos por el estándar IEEE 493 - 1990 [64], se obtuvo:

| | $f1(4)$ | $f2(7)$ | $f3(1)$ | $f4(1)$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| A_1 | 26 | 26 | 26 | 26 |
| A_2 | 21 | 21 | 21 | 21 |
| A_3 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| A_4 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| A_5 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| A_6 | 14 | 14 | 14 | 14 |
| A_7 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| A_8 | 11 | 11 | 11 | 11 |

(82)

El sistema SACET confirmó que las fallas: F1(4), F3(1) y F4(1) tienen como causa de iniciación el rayo, mientras que la falla F2(7) no. Gracias a la información suministrada por SACET sobre las fallas, se disminuyó la incertidumbre, al modificarse la matriz de toma de decisiones (82) de la siguiente forma:

| | $f1(4)$ | $f2(7)$ | $f3(1)$ | $f4(1)$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| A_1 | 100 | 0 | 100 | 100 |
| A_2 | 0 | 28,37 | 0 | 0 |
| A_3 | 0 | 10,81 | 0 | 0 |
| A_4 | 0 | 9,45 | 0 | 0 |
| A_5 | 0 | 13,51 | 0 | 0 |
| A_6 | 0 | 18,91 | 0 | 0 |
| A_7 | 0 | 4,05 | 0 | 0 |
| A_8 | 0 | 14,86 | 0 | 0 |

(83)

En la matriz (83), se observa que en las causas asociadas a las fallas que SACET definió como originadas por el rayo, se establece un valor de estado del 100% y en cero los demás. Mientras que, la causa relacionada con la falla que SACET no correlacionó con el rayo, se le asigna un valor del 0%, y el 26% de dicha causa se distribuye proporcionalmente entre las demás causas, teniendo en cuenta las consideraciones del reparto proporcional con las expresiones (74) y (75).

Luego de normalizar los valores de estado de la matriz (83), se obtuvo:

| | $f1(4)$ | $f2(7)$ | $f3(1)$ | $f4(1)$ |
|-------|---------|---------|---------|---------|
| A_1 | 1 | 0 | 1 | 1 |
| A_2 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| A_3 | 0 | 0,38095 | 0 | 0 |
| A_4 | 0 | 0,33333 | 0 | 0 |
| A_5 | 0 | 0,47619 | 0 | 0 |
| A_6 | 0 | 0,66666 | 0 | 0 |
| A_7 | 0 | 0,14285 | 0 | 0 |
| A_8 | 0 | 0,52380 | 0 | 0 |

(84)

Calculando la entropía con la expresión (77) a cada falla de la matriz (84), se obtuvieron los siguientes valores de entropía:

Tabla 10: Valores de Entropía

| | $H_{f1(4)}$ | $H_{f2(7)}$ | $H_{f3(1)}$ | $H_{f4(1)}$ |
|-----|-------------|-------------|-------------|-------------|
| H | 0 | 0,94937 | 0 | 0 |

La Tabla 10, permite visualizar que la incertidumbre asociada a la causa de las fallas F1(4), F3(1) y F4(1) ha sido reducida al mínimo por el sistema SACET. Mientras que F2(7) sigue contando con un gran valor de incertidumbre, ya que, el valor de la entropía es de 0,94937, es decir, aún no es posible descartar las 7 restantes causas.

Definida la Entropía se calcularon los valores de divergencia, y con estos se ponderaron los pesos globalmente, haciendo uso de la expresión (80), obteniendo que:

Tabla 11: Pesos entrópicos - ordenación de posibles causas de iniciación de las fallas

| | $f1(4)$ | $f2(7)$ | $f3(1)$ | $f4(1)$ | $\sum w_{ijn}$ |
|-------|-----------|------------|-----------|-----------|----------------|
| A_1 | 0,3262799 | 0 | 0,3262799 | 0,3262799 | 0,97883971 |
| A_2 | 0 | 0,01659584 | 0 | 0 | 0,01659584 |
| A_3 | 0 | 0,00632222 | 0 | 0 | 0,00632222 |
| A_4 | 0 | 0,00553195 | 0 | 0 | 0,00553195 |
| A_5 | 0 | 0,00790278 | 0 | 0 | 0,00790278 |
| A_6 | 0 | 0,01106389 | 0 | 0 | 0,01106389 |
| A_7 | 0 | 0,00237083 | 0 | 0 | 0,00237083 |
| A_8 | 0 | 0,00869306 | 0 | 0 | 0,00869306 |

En la Tabla 11, se ve el orden de las posibles causas de iniciación de las fallas ocurridas durante el proceso de tormenta. Siendo la causa A_1 (rayo), asociada a las fallas $F1(4)$, $F3(1)$ y $F4(1)$, la que tiene el mayor peso, indicando así al operador de forma no subjetiva, que debe preparar personal y equipos especializados en atender fallas generadas por el rayo, y que $F1(4)$, $F3(1)$ y $F4(1)$ requieren atención prioritaria. En orden, la siguiente causa es A_2 (sobrecalentamiento) asociada a $F2(7)$, por tanto, cuando dispongan un grupo técnico, esta será la siguiente en prioridad.

Estudios futuros, podrán incluir algoritmos computacionales que al igual que el SACET, permitan disminuir la entropía de las otras causas de iniciación para de esta manera aumentar la certeza en la identificación de causas.

5 Conclusiones, aportes y trabajos futuros.

En la presente tesis, se proponía como objetivo general: " *Realizar el desarrollo teórico-matemático de un sistema que mediante una correlación espacio - temporal realice de manera automática una identificación certera de la descarga atmosférica (rayo) como causa de iniciación de fallas en líneas de distribución de energía eléctrica durante procesos de tormenta, y que a su vez efectúe una priorización de atención de fallas en función de los pesos de las causas de iniciación mediante un método entrópico.*", para lograr el alcance de dicho objetivo, se abordaron diferentes temas que lograron conducir el desarrollo de la tesis a un feliz término, siendo estos:

La coordinación de aislamientos: Para establecer en qué momento un rayo cuenta con la capacidad de generar fallas o salidas del servicio de una línea, al superar la tensión inducida por dicho rayo los niveles de aislamiento de la línea.

La radio propagación: Para comprender el fenómeno de propagación de los CEM radiados por el rayo y que conforman la señal **LEMP**. Así como para modelar la línea de distribución como un lazo.

La Teoría electromagnética: Para desarrollar una expresión matemática que permitiera obtener la tensión inducida sobre una línea modelada como un lazo, a partir del modelamiento del rayo como una fuente de inducción multifrecuencial, que bajo la luz de Faraday es capaz de generar tensiones inducidas que pueden representar riesgos para la línea.

La correlación: Para establecer una correlación espacio - temporal, al comparar los valores de la tensión inducida por el rayo sobre una línea y sus niveles de aislamiento, definiendo así un corredor espacial y verificando si el rayo impacta al interior de dicho corredor. De igual manera, comparando los tiempos de propagación de la señal con un intervalo de tiempo, que se denominó ventana de tiempo.

La toma decisiones con múltiple criterio: Para establecer una técnica que estableciera un orden de prioridad entrópico en la atención de fallas.

Es importante anotar que, para dar cumplimiento al objetivo, desde una perspectiva de la teoría de las telecomunicaciones y los sistemas radiantes, fue preciso desarrollar una expresión matemática que permitiera establecer el valor de tensión inducida por el rayo, en función de la distancia y bajo un modelo del rayo como fuente de inducción multifrecuencial así como de la línea de distribución como un lazo. Siendo esta propuesta matemática quizás el mayor aporte del trabajo, al darle una visión diferente a la solución de tensiones inducidas, desde un nuevo enfoque. Con el desarrollo de la expresión matemática de la tensión inducida, fue posible establecer matemáticamente el corredor radial y la ventana de tiempo, siendo estas, las variables necesarias para el cálculo de la correlación espacio-temporal propuesta.

5.1 Conclusiones generales de la tesis.

En el capítulo 2 se estudiaron todos los antecedentes relacionados con las tensiones inducidas por el rayo, así como la técnica de correlación espacio temporal y el modelamiento matemático del rayo. En relación con la responsabilidad del rayo en la generación de fallas en líneas de distribución, se argumentó que un sistema que definiera la responsabilidad del rayo en el origen de la falla en líneas de distribución, sería una herramienta muy útil para evaluar el desempeño, frente al rayo, de las líneas aéreas de distribución. Asimismo se estableció que para la implementación de este sistema, se debía conocer como el rayo lograba inducir las líneas de distribución, sin embargo efectuada una exhaustiva revisión bibliográfica, no encontramos alguna investigación que considerará el efecto del contenido espectral del rayo en el cálculo de la tensión inducida y el canal de descarga del rayo como un emisor multifrecuencial y a la línea de distribución como una antena receptora, es decir, que permitiera obtener el valor de la tensión inducida desde la perspectiva de la teoría de la radiopropagación y los elementos radiantes. Por otro lado, se revisó lo relacionado con la correlación espacio - temporal, encontrando un vacío de información al no existir expresiones analíticas para definir la ventana de tiempo y el corredor espacial, variables que son insumo sustancial en el cálculo de la correlación propuesta y que generaron un nuevo requerimiento a la presente tesis para su formulación matemática. Finalmente revisado el uso de la entropía en sistemas de priorización, se definió que esta técnica no había sido utilizada para definir la prioridad (orden) de atención de las fallas ocurridas durante un proceso de tormenta, con lo cual, se presenta como un nuevo nicho de investigación que la presente tesis aborda, como una aplicación práctica de la correlación espacio - temporal basada en la disminución de la incertidumbre asociada a la responsabilidad del rayo como causante de la falla.

En el capítulo 3 se estableció un módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo y se definieron matemáticamente el corredor espacial y la ventana de tiempo para la aplicación de la técnica de correlación espacio - temporal, técnica que representa la médula espinal del sistema automático que hemos nombrado como SACET. Asimismo, se presentó el desarrollo de una expresión analítica para el cálculo de la tensión inducida y se modelaron las emisiones electromagnéticas ocasionadas por la descarga de un rayo, considerando al rayo como una antena monopolo corto sobre un plano de tierra perfectamente conductor. La expresión desarrollada para el cálculo de la tensión inducida por el rayo en líneas de distribución fue validada confrontándola con la expresión planteada por Rusck [18]. Dicha expresión a diferencia de los habituales modelos eléctricos, utiliza la teoría de los sistemas radiantes basándose en un análisis de la propagación de los CEM asociados al LEMP y a su contenido espectral. Además, se consideraron parámetros adicionales de la línea de distribución tales como: la permeabilidad magnética μ del material de la línea, la longitud total entre elementos de protección, la separación entre conductores, así como también se considera al rayo como una fuente de inducción multifrecuencial. Se espera que la expresión propuesta sirva en un futuro como una herramienta válida en el cálculo de la tensión inducida desde la perspectiva de la teoría de la radio propagación y de los sistemas radiantes.

En el capítulo 4 se propuso el módulo de priorización de atención de fallas, el cual gracias a la técnica de correlación implementada en el sistema SACET, permite realizar el ordenamiento de las causas de iniciación de falla, durante procesos de tormenta, dejando de lado el sesgo del decisor y logrando que el sistema sea completamente autónomo en el momento de dar las respectivas indicaciones sobre la prioridad de atención de fallas en función del peso entrópico de las causas.

5.2 Aportes.

En esta sección se relatan los aportes realizados durante el desarrollo de la tesis.

En el capítulo 3, se desarrolló un módulo de resolución para establecimiento de la responsabilidad del rayo, obteniendo los siguientes aportes:

1. Se modeló el acople entre el rayo y la línea de distribución, como un sistema de telecomunicaciones con fundamentos en la radiopropagación y los elementos radiantes. Dicho sistema de telecomunicación está conformado por el canal de descarga del rayo,

que fue modelado como una antena dipolo corto excitada en su base por un emisor multifrecuencial, es decir, se propuso que el rayo fuese asumido como una fuente de inducción multifrecuencial. De igual manera, el otro elemento conformante del sistema es la línea de distribución, la cual por su disposición estructural se propuso que fuese modelada como una antena lazo. En resumen, se aportó en la comprensión de la interacción entre los CEM radiados por el rayo (propuesto como fuente de inducción multifrecuencial) y la línea de distribución (propuesta como una antena lazo).

2. Definidos los modelos del rayo y la línea de distribución, y modelado el acople electromagnético entre ellos, se desarrolló una expresión matemática para el cálculo de la tensión inducida por el rayo. La expresión propuesta, presenta un nuevo enfoque para el cálculo y análisis de tensiones inducidas proponiendo que se realice en el dominio de la frecuencia, haciendo uso del contenido espectral del rayo y convirtiendo un escenario eléctrico en un escenario de radiopropagación y telecomunicaciones.
3. Se logró definir matemáticamente la ventana de tiempo y el corredor espacial, parámetros necesarios para el desarrollo de la correlación espacio - temporal. Logrando así, subsanar el vacío de información existente en la revisión de antecedentes efectuada.
4. Con las expresiones para la ventana de tiempo y el corredor radial, fue posible implementar un sistema computacional de correlación espacio temporal, el cual permite establecer con una mayor certidumbre la responsabilidad del rayo en la iniciación de una falla.

En el capítulo 4, en el cual se estableció un módulo de priorización de atención de fallas, se logró el siguiente aporte:

1. Un método para priorizar la atención de fallas, fundamentado en la entropía, fue desarrollado. Este método al tener como insumo la correlación espacio - temporal efectuada por el sistema computacional, reduce la incertidumbre al momento de establecer una priorización de la atención de fallas, con base en el peso entrópico de las causas de iniciación.

5.3 Trabajos futuros.

Como todo trabajo de investigación, el presente es susceptible a mejoras, correcciones y deja una ventana abierta a la investigación y a la continuidad del presente trabajo, dejando entonces la posibilidad para efectuar los siguientes trabajos futuros:

1. Utilizar el método de elementos finitos, para segmentar la línea en elementos y calcular en cada elemento finito de línea la $V_{ind-total-max}$ en función de la distancia entre el punto de impacto del rayo y el elemento bajo análisis. De esta manera se podrá

calcular valores diferentes en cada elemento finito y no asumir una uniformidad de tensión inducida sobre la línea.

2. Por cuestiones temporales, las validaciones de la expresión para el cálculo de la tensión inducida solo fueron a nivel computacional, por tanto, queda como trabajo futuro realizar la validación implementando un sistema experimental para mediciones de tensiones inducidas y confrontar los resultados obtenidos.
3. En SACET incluir otras rutinas computacionales, fundamentadas en identificación de fallas para lograr disminuir la entropía de las otras causas de iniciación diferentes al rayo, para de esta manera aumentar la certeza en la identificación de causas.
4. Desarrollar la fase 2 de SACET, la cual incluirá, la implementación hardware-software: instalación de equipos, desarrollo de la aplicación software, pruebas experimentales, etc.

Apéndice A: Descargas atmosféricas (rayo)

El rayo es un proceso meteorológico, siendo de gran importancia el conocimiento que se pueda adquirir sobre dicho proceso, ya que representa un riesgo para los sistemas de distribución de energía eléctrica. Desde el punto de vista de esta tesis, la importancia del rayo se enfoca en cómo este logra generar fallas o salidas del servicio en los sistemas de distribución eléctrica, por tanto, se aclara que no es objeto de esta tesis analizar el rayo en su comportamiento físico.

El proceso del rayo es dividido en los siguientes pasos:

- Rompimiento inicial
- Líder escalonado
- Descarga de retorno
- Corriente de continua
- Componentes M
- Cambios K
- Descargas subsecuentes
- Líder dardo

Para la finalidad de la presente tesis se explicarán los tres primeros pasos.

Usualmente la fuente de un rayo es una nube de tormenta llamada Cumulonimbus, dicha nube, presenta en su parte inferior cargas negativas. Como predecesor a la formación del líder escalonado se presenta un proceso interior en la nube llamado rompimiento inicial, dicho proceso incrementa la intensidad de campo eléctrico al interior de la nube a un valor bastante alto, y de esta forma se da inicio a un canal de plasma descendente llamado líder (leader), el cual realiza su descenso a la tierra con pasos escalonados (discretos) y por ello es llamado "líder escalonado (stepped leader)".

Durante el recorrido de descenso a la tierra del líder escalonado, el campo eléctrico en las estructuras o elementos que sobresalen por encima del terreno cercano a la descarga y que

están conectadas a tierra comienza a aumentar hasta un nivel que excede el valor crítico para el inicio de uno o más líderes conductores ascendentes [6], es decir, las descargas eléctricas se inician a partir de dichas estructuras [66], dando comienzo al proceso de "acoplamiento" entre la tierra y nube, este proceso alcanza su 100% cuando tanto el líder escalonado como los líderes ascendentes hacen contacto logrando una ruptura del dieléctrico del aire. Dicho contacto se da a una distancia de unos cientos de metros (distancia de incidencia), gracias a que el aire cambia de ser un dieléctrico a convertirse en un conductor (ruptura de la rigidez dieléctrica del aire) [67] y generándose así un camino de conexión eléctrica entre la tierra y nube llamado canal ionizado. Gracias a la conexión que establece el canal ionizado, una onda de potencial viaja de la tierra a la nube produciendo lo que es conocido como la descarga de retorno (return stroke), de hecho, la descarga de retorno es el proceso ópticamente más brillante visible fuera de la nube [6]. La velocidad de dicha descarga de retorno se encuentra entre la mitad y una tercera parte de la velocidad de la luz.

Apéndice B: Proyectos y producción académica relacionada

ARTÍCULOS EN REVISTAS ESPECIALIZADAS:

1. Henao-Céspedes, V., Cano-Plata, E.A., & Díaz-Cadavid, L.F. (2015). **Proposal for an automatic system correlation between failures on electrical distribution lines and atmospheric lightning discharges**. Ingeniería e Investigación, 35 (sup 1), 104-109. ISSN: 2357-6618. **Estado de la publicación: Publicado.**
2. Henao-Céspedes, V., Díaz-Cadavid, L.F., Fano, W.G., Cano-Plata, E.A. (2017). **Modelo de la tensión inducida por un rayo sobre líneas de distribución**. Elektron, Vol. 1, No. 2, pp. 97-101. ISSN: 2525-0159. **Estado de la publicación: Publicado.**
3. Henao-Céspedes, V., Díaz-Cadavid, L.F., Cano-Plata, E.A., Fano, W.G. (2017). **A new mathematical approach for the calculation of LEMP-induced voltage in distribution lines and its application in the determination of the responsibility of lightning in service outages**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. **Estado de la publicación: En revisión.**
4. Henao-Céspedes, V., Díaz-Cadavid, L.F., Cano-Plata, E.A. (2017). **A spatio - temporal correlation technique to define the responsibility of the lightning in the occurrence of outages in power distribution lines**. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility. **Estado de la publicación: En revisión.**

PONENCIAS EN EVENTOS INTERNACIONALES:

1. Henao-Céspedes, V., Cano-Plata, E.A., & Díaz-Cadavid, L.F. **Proposal for an automatic system correlation between failures on electrical distribution lines and atmospheric lightning discharges**, 2015 VIII Simposio Internacional sobre Calidad de la Energía Eléctrica, SICEL 2015. Valparaiso, Chile.

108 Desarrollo teórico para implementación de un sistema automático de correlación entre fallas en líneas de distribución eléctrica y descargas atmosféricas.

2. Henao-Céspedes, V., Díaz-Cadavid, L.F., W.G Fano., Cano-Plata, E.A. **Induced voltage approach by lightning in the distribution lines**, 2016 IEEE Global Electromagnetic Compatibility Conference (GEMCCON), Mar del Plata, 2016, pp. 1-5. DOI: 10.1109/GEMCCON.2016.7797313

Bibliografía

- [1] ICONTEC, *NTC - 4552 Protección contra rayos. Principios Generales*. Colombia, 2004.
- [2] C. Younes and O. . Duarte Velasco, *Correlación de parámetros del rayo con características geográficas y metereológicas*. Colombia: Universidad Nacional de Colombia, 2010.
- [3] D. M. Romps, J. T. Seeley, D. Vollaro, and J. Molinari, "Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming," vol. 346, no. 6211, pp. 851–853, 2014.
- [4] K. L. Anaya and M. G. Pollitt, "Does Weather Have an Impact on Electricity Distribution Efficiency? Evidence from South America," 2014.
- [5] L. F. Diaz Cadavid, "Caracterización espectral del pulso electromagnético radiado por el rayo atmosférico (LEMP) mediante un Detector-Receptor de RF tipo SDR (Software-Defined Radio)," Universidad Nacional de Colombia, 2014.
- [6] V. A. Rakov and M. A. Uman, *Lightning Physics and Effects*. United Kingdom, Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [7] A. S. Podgorski and J. A. Landt, "Three dimensional time domain modelling of lightning," *IEEE Trans. Power Deliv.*, no. 3, pp. 931–938, 1987.
- [8] R. Moini, V. A. Rakov, M. A. Uman, and B. Kordi, "AN ANTENNA THEORY MODEL FOR THE AN ANTENNA THEORY MODEL FOR THE LIGHTNING," in *Symp. on Electromagnetic Compatibility*, 1997.
- [9] R. Moini, B. Kordi, G. Z. Rafi, and V. A. Rakov, "A new lightning return stroke model based on antenna theory," *J. Geophys. Res.*, vol. 105, pp. 693–702, 2000.
- [10] Y. Baba and M. Ishii, "Numerical Electromagnetic Field Analysis of Lightning Current in Tall Structures," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 16, no. 2, pp. 324–328, 2001.
- [11] F. Roman Campos, "Análisis de las fallas en transformadores causadas por la operación del pararrayos ante sobretensiones externas," *Rev. Ing. e Investig.*, pp. 34–46.
- [12] E. Mohamed and E. Hawary, *Electrical Power Systems*. John Wiley & Sons, Inc. London. Chapman & Hall, Limited., 1995.
- [13] C. A. Nucci *et al.*, "Lightning-Induced Voltages on Overhead Distribution Lines: Theoretical and Experimental Investigation of related Problems and their Impact on Power Quality," in *CIGRÉ*, 2004.
- [14] *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Electric Power Overhead Distribution Lines*. 2004.
- [15] Corona, "Consideraciones sobre el comportamiento de las líneas de distribución ante descargas atmosféricas," 13.
- [16] T. Miyazaki and S. Okabe, "A detailed field study of lightning stroke effects on distribution lines," *IEEE Trans. Power Deliv.*, 2009.
- [17] K. W. Wagner, *Electromagnetische AusgleishvorgAnge in Freileitungen und Kabeln*. Leipzig Und Berlin, 1908.
- [18] S. Rusck, "Protection of Distribution Lines," in *Lightning Volume 2: Lightning*

- Protection*, R. H. Golde, Ed. London: Academic Press, 1977, pp. 747–771.
- [19] M. A. Uman and S. Member, "Lightning induced voltages on power lines: Theory," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, no. 9, pp. 2502–2518, 1984.
- [20] P. P. Barker, T. A. Short, A. R. Eybert-berard, and J. P. Berlandis, "Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 11, no. 2, pp. 980–995, 1996.
- [21] V. Jankov, "Estimation of the Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 12, no. 1, pp. 315–324, 1997.
- [22] A. Piantini and J. M. Janiszewski, "The extended Rusck model for calculating lightning induced voltages on overhead lines," in *7th Int. Symp. Lightning Protection*, 2003, pp. 151–155.
- [23] A. Piantini, "Extension of the Rusck Model for Calculating Lightning-Induced Voltages on Overhead Lines Considering the Soil Electrical Parameters," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 59, no. 1, pp. 154–162, 2017.
- [24] A. Piantini, S. Member, and J. M. Janiszewski, "An Improved Model for Lightning Induced Voltages Calculations," in *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Latin America*, 2004, pp. 554–559.
- [25] A. Piantini, "Lightning-Induced Overvoltages on Overhead medium-voltage lines," in *2016 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application (ICHVE)*, 2016, pp. 1–7.
- [26] E. Perez, J. Herrera, and H. Torres, "Sensitivity Analysis of Induced Voltages on Distribution Lines," in *IEEE Bologna PowerTech Conference*, 2003.
- [27] M. Darveniza, "A Practical Extension of Rusck ' s Formula for Maximum Lightning-Induced Voltages That Accounts for Ground Resistivity," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. 22, no. 1, pp. 605–612, 2007.
- [28] F. Napolitano, F. Tossani, A. Borghetti, C. A. Nucci, and F. Rachidi, "Lightning Performance of Distribution Lines due to Positive and Negative Indirect Lightning Flashes," in *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEEE Industrial and Commercial Power Systems Europe (EEEIC / I&CPS Europe)*, 2017.
- [29] J. G. Kappenman and D. L. Van House, "Location - Centered Mitigation of Lightning - Caused Disturbances," *IEEE Comput. Appl. Power*, pp. 36–40, 1996.
- [30] K. L. Cummins, E. P. Krider, and M. D. Malone, "The U . S . National Lightning Detection Network TM and Applications of Cloud-to-Ground Lightning Data by Electric Power Utilities," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 40, no. 4, pp. 465–480, 1998.
- [31] K. L. Chrzan, P. Bodzak, and W. Gajda, "International Symposium on Modern Power Systems MEPS, Wroclaw 2006 Application of lightning location systems for fault detection on transmission and distribution lines."
- [32] M. Bernardi *et al.*, "Lightning-Related Faults in Power Distribution Networks," in *2007 IEEE Lausanne Power Tech*, 2007, pp. 585–591.
- [33] V. Djurica, dr Janko Kosma, and G. Milev Elektroinštitut Milan Vidmar, "A MULTIPLE POWER LINE CORRIDOR AND LIGHTNING ERROR-ELLIPSE SPATIAL PROCESSOR FOR REAL-TIME CORRELATOR."
- [34] Y. Li, W. Sima, L. Chen, Q. Yang, T. Yuan, and J. Shi, "Line corridor grid method with lightning parameter maps for lightning parameters statistics of transmission line," in *2011 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning, APL2011*, 2011.
- [35] S. Gu, J. Chen, X. Tong, X. Li, and R. Zhang, "Evaluation of lightning flashover risk of HV overhead transmission lines," in *Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, APPEEC*, 2010.

- [36] I. Uglesi, V. Milardi, B. Franc, and S. Piliski, "Study of Time Correlation Between Lightning Data Recorded by LLS and Relay Protection," in *International Conference on Lightning Protection ICLP*, 2012, pp. 1–5.
- [37] I. Uglešić, V. Milardić, B. Franc, S. Piliškić, and A. Tokić, "Correlation between Lightning Impacts and Outages of Transmission Lines Croatian Transmission System Operator Zagreb Croatia."
- [38] C. Shannon and W. Weaver, "THE MATHEMATICAL THEORY," University of Illinois, 1949.
- [39] R. Venkata Rao, *Decision Making in the Manufacturing Environment Using Graph Theory and Fuzzy Multiple Attribute Decision Making Methods Vol. 2*. London: Springer, 2013.
- [40] S. Barba Romero, "Panorámica actual de la Decisión Multicriterio Discreta," *Investigaciones económicas*, pp. 279–308, 1987.
- [41] Y. Jia, I. S. Member, and Z. Xu, "Risk Assessment Based on Information Entropy of Cascading Failure in Power Systems," 2012.
- [42] Z. Tianlei, H. Zhengyou, and Q. Qingquan, "Distribution Network Service Restoration Multiple Attribute Group Decision- making Using Entropy Weight and Group Eigenvalue," in *Third International Conference on Intelligent System Design and Engineering Applications*, 2013, no. 5.
- [43] A. Z. Lijing, B. M. Hongwei, C. Z. Peng, and C. W. Xia, "Research on Evaluation System of Power Control Architecture of Active Distribution Grid," in *International Conference on Electricity Distribution CIGRE 2016*, 2016, no. Ciced, pp. 10–13.
- [44] A. Piantini, "Lightning Protection of Overhead Power Distribution Lines," in *29 th International Conference on Lightning Protection*, 2008, no. June, pp. 1–29.
- [45] K. Pearson, *Grammar of Science*. London: Adam and Charles Black, 1900.
- [46] F. Croxton and D. Cowden, *Applied General Statistics*. New York: Prentice - Hall, 1940.
- [47] S. A. Schelkunoff and H. T. Friss, *Antennas Theory and Practice*. New York: John Wiley & Sons, Inc. London. Chapman & Hall, Limited, 1952.
- [48] R. Thottappillil, "Computation of electromagnetic fields from lightning discharge," in *The Lightning Flash*, 2nd ed., V. Cooray, Ed. London: The Institution of Engineering and Technology, 2014, pp. 351–403.
- [49] J. R. Wait, "The ancient and modern history of EM ground-wave propagation," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 40, no. 5, pp. 7–24, 1998.
- [50] UIT, *Recomendación UIT - R P. 368 - 7*. 2000.
- [51] J. C. Maxwell, *A treatise on electricity and magnetism*. London: Clarendon Press, 1873.
- [52] F. M. Tesche, M. V Ianoz, and T. Karlsson, *EMC analysis methods and computational models*. New York: John Wiley & Sons, 1997.
- [53] D. Poljak, *Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.
- [54] M. Benedetti *et al.*, *Control de la interferencia electromagnética*. Buenos Aires: Asociación Argentina de Control Automático, 2000.
- [55] H. W. Ott, *Electromagnetic Compatibility Engineering*. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009.
- [56] J. D Kraus, *Electromagnetismo*, 1st ed. New York: McGraw-Hill, 1960.
- [57] W. H. Hayt and J. A. John Buck, *Engineering Electromagnetics*, 6th ed. Mc Graw Hill, 2006.
- [58] F. Mottola, "Methods and techniques for the evaluation of lightning induced overvoltages on power lines. Application to MV distribution systems for improving the quality of power supply," University Federico II of Napoli, 2007.
- [59] S. Ramirez, *Redes de distribución de energía*. Manizales, 2004.

- [60] Centelsa, "Cables y Tecnología - Cables para media tensión," *Media*, pp. 1–36, 2008.
- [61] *Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIÉ)*. Colombia, Colombia, 2013.
- [62] Central Hidroeléctrica de Caldas, *Manual de normas de diseño y construcción*. Colombia, 2016.
- [63] F. Heidler, J. M. Cvetic, and B. V. Stanic, "Calculation of lightning current parameters," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 14, no. 2, pp. 399–404, 1999.
- [64] *IEEE Std 493 - 1990 Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Power Systems*. 1991, pp. 1–416.
- [65] L. M. Tolbert, J. T. Cleveland, and L. J. Degenhardt, "Reliability of lightning resistant overhead power distribution lines," *Proc. 1995 Ind. Commer. Power Syst. Conf.*, vol. 2, 1995.
- [66] V. Cooray, "Mechanism of the lightning flash," in *The Lightning Flash*, Second., V. Cooray, Ed. London, United Kingdom: The Institution of Engineering and Technology, 2014.
- [67] R. Pando, "Aspectos Básicos de las Descargas Atmosféricas," *CET Rev. Ciencias Exactas e Ing.*, pp. 1–8, 2006.