



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL

FACULTAD DE INGENIERIA
CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Tesis previa a la obtención del título de:
INGENIERO ELÉCTRICO

TEMA:

**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ONDAS VIAJERAS GENERADAS POR
DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN
DESARROLLADO EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-
SEDE GUAYAQUIL.**

AUTORES:

LUIS GASTÓN PÁEZ CEDEÑO
FRANKLIN RICARDO VILLÓN QUEZADA

TUTOR:

ING. HOLGER SANTILLAN CARRANZA, MBA

GUAYAQUIL, MAYO DEL 2016

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Se certifica que los conceptos desarrollados, análisis realizados y conclusiones del presente trabajo, son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Luis Gastón Páez Cedeño

C.I. 0926216961

Franklin Ricardo Villón Quezada

C.I. 0940997463

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, FRANKLIN RICARDO VILLÓN QUEZADA con documento de identificación N° 0940997463 y LUIS GASTÓN PÁEZ CEDEÑO con documento de identificación N° 0926216961, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de grado intitulado: MODELACIÓN MATEMÁTICA DE ONDAS VIAJERAS GENERADAS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN DESARROLLADO EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UPS-SEDE GUAYAQUIL, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: INGENIERO ELÉCTRICO, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Nombre: Franklin Ricardo Villón Quezada

Cédula: 0940997463

Fecha: Mayo del 2016

Nombre: Luis Gastón Páez Cedeño

Cédula: 0926216961

Fecha: Mayo del 2016

DIRECCIÓN DEL TRABAJO

Yo, Ing. Holger Santillán Carranza, certifico que el presente trabajo de titulación, previo a la obtención del título de Ingeniero Eléctrico, fue realizado por los señores Franklin Ricardo Villón Quezada y Luis Gastón Páez Cedeño; bajo mi dirección y supervisión.

Guayaquil, Mayo del 2016

Ing. Holger Santillán Carranza, MBA.

TUTOR

UPS-SEDE GUAYAQUIL

DEDICATORIA

La presente tesis la dedico a:

A mi padre por incentivarme al estudio continuo y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mi madre muy especialmente porque ha sido un pilar fundamental en mi formación como profesional, por brindarme la confianza y siempre alentarme en los momentos difíciles de la carrera.

A mis hermanas Lorena, Gabriela y Cristina por su apoyo y compañía a lo largo de toda mi carrera.

A mis sobrinos Paula, Farid y Eduardo por todas sus muestras de cariño, las mismas que me sirvieron de estímulo para concluir mi carrera.

Luis Gastón Páez Cedeño

Este trabajo está dedicado a Dios, por haberme dado la bendición de vivir junto a las personas que más admiro y quiero en esta vida, mi familia.

A mi padre, por haberme incentivado en escoger esta carrera.

A mi madre, que siempre estuvo y sé que estará a mi lado brindándome su apoyo y sus consejos para ser mejor persona.

A mis hermanas, la mejor compañía que he podido tener y espero poder llegar a ser ejemplo para ellas.

A mis tíos y mis abuelos, ya que gracias a su apoyo pude cumplir esta meta que es muy importante para mí y a pesar de las dificultades que se presentaron en el camino siempre estuvieron conmigo ayudándome en todo lo que necesitaba.

No me queda más que agradecerles infinitamente y decirles que este logro es de todos ustedes.

Franklin Ricardo Villón Quezada

AGRADECIMIENTO

Quisiéramos empezar agradeciendo a DIOS por darnos fortaleza para concluir nuestra carrera.

A la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, a todos los profesores que nos brindaron sus enseñanzas durante el transcurso de la carrera universitaria por su esfuerzo y dedicación.

Agradecemos de manera especial a nuestro tutor el Ing. Holger Santillán, por hacer posible que se lleve a cabo este trabajo de titulación y muy particularmente a los docentes; Dr. Pedro González, Ing. Ervin Solano e Ing. Teddy Negrete, por sus conocimientos, orientaciones y guía en el desarrollo de nuestro proyecto y así ver cristalizada nuestra meta. Además por habernos inculcado el sentido de responsabilidad, empeño, rigor académico y organización para realizar un trabajo de calidad los cuales nos sirvieron para obtener una formación profesional completa.

También sin olvidarnos de nuestros familiares y amigos que nos brindaron su apoyo durante la época estudiantil.

MUCHAS GRACIAS A TODOS...

Luis Gastón Páez Cedeño

Franklin Ricardo Villón Quezada

RESUMEN

El presente trabajo tuvo como objetivo elaborar un modelo matemático sobre ondas viajeras, que permita observar los efectos de reflexión y refracción que ocurren cuando una descarga atmosférica impacta en las líneas de distribución eléctrica, tomando en consideración los distintos puntos de transición o derivaciones que existen en la red.

Debido a la complejidad que tiene el estudio sobre ondas viajeras, se ha empleado diferentes técnicas y métodos de investigación para poder implementar los circuitos de manera experimental en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, así como representarlos matemáticamente.

Se utilizó como herramienta de simulación el programa Matlab que permitió resolver las ecuaciones y los circuitos planteados, debido a su alto grado de sofisticación. Además, proporcionar los fundamentos teóricos y experimentales que faciliten la comprensión de toda la comunidad sobre este fenómeno eléctrico, y fortalezca la investigación científica en las distintas áreas de estudio de la Ingeniería Eléctrica; generando conocimiento, ciencia y tecnología, como se plantea en el “Plan Nacional para el Buen Vivir” y en el cambio de “La Matriz Energética” del país.

Palabras claves: ondas viajeras, Matlab, descarga atmosférica, modelación matemática, sistemas de distribución.

ABSTRACT

The goal of this study was to develop a mathematical model of traveling waves, for observing the effects of reflection and refraction that occur when a lightning impacts the electrical distribution lines, taking into account the different transition points or derivations that exist in network.

Due to the complexity that the study on traveling waves has, different techniques and research methods were applied to implement experimentally circuits in the high voltage laboratory of the Universidad Politécnica Salesiana - Guayaquil and also to represent them mathematically.

It was use as simulation tool the program Matlab which allowed to solve the equations and the given circuits, due to its high degree of sophistication. In addition, to provide theoretical and experimental in order to facilitate the understanding of the whole community on this electrical phenomenon, and strengthen scientific research in various areas of study Electrical Engineering; generating knowledge, science and technology, as outlined in the "Plan Nacional para el buen Vivir" and the change of "La Matriz Energética" of the country.

Keywords: traveling waves, Matlab, lightning, mathematical modeling, and distribution systems.

INDICE GENERAL

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
DIRECCIÓN DEL TRABAJO	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN.....	vii
ABSTRACT.....	viii
INDICE GENERAL.....	ix
INDICE DE ILUSTRACIONES.....	xiii
INDICE DE TABLAS	xvi
INDICE DE ECUACIONES	xvii
INDICE DE ANEXOS.....	xviii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I.....	2
DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA	2
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. IMPORTANCIA Y ALCANCES	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4. OBJETIVOS.....	3
1.4.1. OBJETIVO GENERAL.....	3
1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	4
1.5. DELIMITACIÓN	4
CAPÍTULO II	5
FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA.....	5
2.1 CONCEPTOS BÁSICOS	5

2.1.1	Modelación Matemática.....	5
2.1.2	Sistemas Eléctricos de Distribución.....	5
2.1.3	Descarga atmosférica	6
2.1.4	Pararrayo (Surge arrester)	7
2.1.5	Capacitor (Condensador)	7
2.1.6	Transformador de potencial	7
2.1.7	Osciloscopio.....	8
2.1.8	Matlab®	8
2.2	SOBRETENSIONES TRANSITORIAS	12
2.2.1	Voltaje de Impulso	13
2.3	TEORÍA DE ONDAS VIAJERAS	15
2.3.1	Formas de ondas tipo rayo	16
2.3.2	Ondas reflejadas (e') y refractadas (e'').....	17
2.4	TIPOS DE PUNTOS DE TRANSICIÓN O DERIVACIONES	19
2.4.1	Derivación en Resistencia	26
2.4.2	Derivación en Capacitancia	27
2.4.3	Derivación en Pararrayos (surge arrester).....	30
CAPÍTULO III.....		34
MARCO METODOLÓGICO		34
3.1	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN	34
3.2	TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN	35
3.3	MODELACIÓN MATEMÁTICA	35
3.3.1	CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO.....	35
3.3.2	CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN RESISTENCIA.....	36
3.3.3	CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN CAPACITOR	38
3.3.4	CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN PARARRAYOS	41
3.4	DESARROLLO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN.....	44

3.4.1	GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO	44
3.4.2	DERIVACIÓN EN RESISTENCIA	48
3.4.3	DERIVACIÓN EN CAPACITOR.....	51
3.4.4	DERIVACIÓN EN PARARRAYO.....	54
CAPÍTULO IV.....		58
ANÁLISIS DE RESULTADOS		58
4.1.	PLANTEAMIENTO Y RESOLUCIÓN DE CIRCUITOS POR CADA CASO DE ESTUDIO.....	58
4.1.1.	Circuito generador de impulsos tipo rayo.	58
4.1.2.	Circuitos con diferentes tipos de derivaciones.....	59
4.2.	SIMULACIÓN Y PRUEBA DE LOS CASOS DE ESTUDIO	59
4.2.1.	Voltaje de Impulsos tipo rayo.	60
4.2.2.	Ondas viajeras con derivación en resistencia.....	61
4.2.3.	Ondas viajeras con derivación en capacitor.	63
4.2.4.	Ondas viajeras con derivación en pararrayos.....	66
CAPÍTULO V		69
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		69
5.1	Conclusiones	69
5.2	Recomendaciones.....	70
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		71
ANEXOS		73
ANEXO A. LINEAS DE TRANSMISIÓN		74
ANEXO B. BOLETIN CLIMATOLÓGICO ANUAL 2013		77
ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN TERCO		78
ANEXO D. ESPECIFICACIONES DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (PT).....		84

ANEXO F. ESPECIFICACIONES DEL OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U	89
ANEXO G. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN	90
ANEXO H. DATOS TABULADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO	96
ANEXO I. IMÁGENES	101

INDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Ubicación de sistemas de distribución dentro de un sistema de potencia	6
Ilustración 2. Generación de un rayo	6
Ilustración 3. Condensador simple	7
Ilustración 4. Osciloscopio Digital.....	8
Ilustración 5. Diagrama de bloques para sistemas de adquisición de datos.....	9
Ilustración 6. Gráfico de contorno de superficie utilizando la función trazado de Matlab	10
Ilustración 7. Ejemplo de Algoritmos en Matlab	10
Ilustración 8. Simulación de señales en Simulink.....	11
Ilustración 9. Forma de onda de Tensión de impulso estándar	14
Ilustración 10. Circuito básico del Generador de Impulsos de una etapa	14
Ilustración 11. Circuito equivalente de una red general.....	15
Ilustración 12. Formas de ondas dadas por la ecuación 1	16
Ilustración 13. Especificaciones de una onda tipo rayo típica	17
Ilustración 14. Efecto de refracción y reflexión de una onda viajera.....	18
Ilustración 15. Derivaciones en Impedancias.....	20
Ilustración 16. Unión entre circuitos	23
Ilustración 17. Unión entre circuitos	25
Ilustración 18. Circuito equivalente en derivación con resistencia.....	26
Ilustración 19. Comportamiento de la onda en derivación con resistencia.....	27
Ilustración 20. Circuito equivalente en derivación con capacitancia.....	27
Ilustración 21. Comportamiento de la onda viajera en terminación capacitiva	28
Ilustración 22. Comportamiento de la onda en derivación con capacitancia.....	29
Ilustración 23. Modelo IEEE de un Pararrayo	30
Ilustración 24. Características de V-I para resistencias no lineales	31
Ilustración 25. Ejemplo de funcionamiento de un pararrayo	33
Ilustración 26. Circuito Generador de Impulsos tipo rayo.....	35
Ilustración 27. Circuito equivalente para una derivación resistiva	36
Ilustración 28. Modelo matemático de la onda reflejada y refractada en una derivación resistiva en Simulink	37
Ilustración 29. Circuito equivalente para una derivación en capacitancia.....	38

Ilustración 30. Modelo matemático de la onda reflejada y refractada en derivación capacitiva en Simulink	39
Ilustración 31. Circuito equivalente para una derivación en pararrayos	41
Ilustración 32. Modelo matemático del circuito con derivación en pararrayos	43
Ilustración 33. Circuito de impulso simulado en Simulink/Matlab	44
Ilustración 34. Forma de onda del impulso en Simulink/Matlab	45
Ilustración 35. Circuito de Impulso implementado en el Laboratorio	46
Ilustración 36. Voltaje de impulso obtenido del osciloscopio	47
Ilustración 37. Circuito con derivación resistiva en Simulink	48
Ilustración 38. Formas de onda en derivación resistiva simulados en MATLAB	49
Ilustración 39. Circuito con derivación resistiva montado en el laboratorio	50
Ilustración 40. Onda reflejada en derivación resistiva vista desde el osciloscopio ...	50
Ilustración 41. Circuito con derivación capacitiva en Simulink	51
Ilustración 42. Formas de onda en derivación capacitiva en Simulink	52
Ilustración 43. Circuito con derivación capacitiva montado en el laboratorio	53
Ilustración 44. Onda reflejada en terminación capacitiva vista desde el osciloscopio	53
Ilustración 45. Circuito con derivación en pararrayos en Simulink	54
Ilustración 46. Formas de onda en derivación con pararrayo en Simulink	55
Ilustración 47. Forma de onda en el pararrayo obtenido en Simulink	55
Ilustración 48. Circuito con derivación en pararrayo montado en el laboratorio	56
Ilustración 49. Onda reflejada en derivación con pararrayo obtenida desde el osciloscopio	57
Ilustración 50. Forma de onda en el pararrayo obtenida desde el osciloscopio	57
Ilustración 51. Comparación de gráficas teórica y experimental del circuito generador de impulsos	60
Ilustración 52. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación resistiva	62
Ilustración 53. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación resistiva	62
Ilustración 54. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación resistiva	63
Ilustración 55. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación capacitiva	64

Ilustración 56. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación capacitiva.....	65
Ilustración 57. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación capacitiva.....	65
Ilustración 58. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación con pararrayos	67
Ilustración 59. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación con pararrayos	67
Ilustración 60. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación con pararrayos	68

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tipos y formas de sobretensiones transitorias	13
Tabla 2. Ecuaciones de los circuitos de la ilustración 15.....	22
Tabla 3. Circuitos de la ilustración 16	24
Tabla 4. Circuitos de la ilustración 17	25
Tabla 5. Valores para resistencias no lineales (A0-A1).....	31
Tabla 6. Valores teóricos obtenidos del circuito generador de impulsos en Simulink	45
Tabla 7. Generación de Voltajes de impulsos a vacío	46
Tabla 8. Valores experimentales obtenidos del circuito generador de impulsos en el laboratorio	47
Tabla 9. Valores obtenidos de la derivación en resistencia simulada en Simulink ...	48
Tabla 10. Datos experimentales en derivación resistiva	51
Tabla 11. Valores obtenidos de la derivación en capacitancia simulada en Simulink	52
Tabla 12. Datos experimentales en derivación capacitiva	54
Tabla 13. Valores obtenidos de la derivación en pararrayo simulado en Simulink...	56
Tabla 14. Datos experimentales en derivación con pararrayo	57
Tabla 15. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito generador de impulsos.....	60
Tabla 16. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación resistiva.....	61
Tabla 17. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación capacitiva.....	63
Tabla 18. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación en pararrayos	66

INDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Onda tipo rayo	16
Ecuación 2. Operador de reflexión.....	18
Ecuación 3. Operador de refracción.....	18
Ecuación 4. Onda reflejada para exponenciales.....	19
Ecuación 5. Onda reflejada para más de una exponencial.....	19
Ecuación 6. Voltaje total del circuito.....	20
Ecuación 7. Onda refractada del circuito.....	20
Ecuación 8. Operador de refracción cuando la derivación es infinita.....	23
Ecuación 9. Onda refractada cuando la derivación es infinita.....	23
Ecuación 10. Onda reflejada en una derivación resistiva.....	26
Ecuación 11. Onda reflejada en derivación capacitiva.....	28
Ecuación 12. Modelo matemático del pararrayo.....	30
Ecuación 13. Modelo matemático del generador de impulsos.....	36
Ecuación 14. Corriente total del circuito.....	36
Ecuación 15. Voltaje en la línea con derivación resistiva.....	37
Ecuación 16. Ley de voltaje sobre el circuito en derivación capacitiva.....	38
Ecuación 17. Corriente total del circuito en derivación capacitiva.....	38
Ecuación 18. EDO lineal no homogénea de primer orden.....	39
Ecuación 19. Solución general de una EDO lineal no homogénea.....	39
Ecuación 20. Solución Homogénea.....	40
Ecuación 21. Solución particular o no homogénea.....	40
Ecuación 22. Solución analítica de un circuito con derivación capacitiva.....	41
Ecuación 23. Ley de voltaje en circuito con derivación con pararrayo.....	42
Ecuación 24. Pararrayo en función de la corriente.....	42
Ecuación 25. Pararrayo en función del voltaje.....	42
Ecuación 26. Corriente total del circuito con derivación en pararrayos.....	42

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Lineas De Transmisión.....	74
Anexo B. Boletín Climatológico Anual 2013	77
Anexo C. Especificaciones De Los Equipos Del Laboratorio De Alta Tensión Terco	78
Anexo D. Especificaciones Del Transformador De Potencial (Pt)	84
Anexo E. Especificaciones Del Surge Arrester (Pararrayo)	86
Anexo F. Especificaciones Del Osciloscopio Gw Instek Gds-1102a-U	89
Anexo G. Datos Experimentales Obtenidos En El Laboratorio De Alta Tensión	90
Anexo H. Datos Tabulados De Los Casos De Estudio	96
Anexo I. Imágenes	101

INTRODUCCIÓN

La región litoral o costa ecuatoriana, según el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), es una zona de convergencia intertropical donde se forman enormes nubes cargadas con gran cantidad de energía y que en temporada de invierno trae consigo tormentas eléctricas y fuertes precipitaciones.

Entonces, surge la necesidad de estudiar las sobretensiones de origen externo como las descargas atmosféricas, que provocan altas frecuencias electromagnéticas denominadas “ondas viajeras” y se propagan a lo largo de las líneas de una red de distribución eléctrica provocando daños en equipos o instalaciones eléctricas valorados en miles de dólares. Además, lo anterior se encuentra vinculado directamente al “Plan Nacional para el Buen Vivir”.

A efectos de garantizar la distribución y transporte de la energía eléctrica, se exige el uso de equipos y materiales adecuados que protejan o eviten este tipo de sobretensión, todo esto se debe realizar en base al comportamiento de reflexión y refracción que tienen las ondas viajeras ocasionadas por descargas atmosféricas. Lo cual nos permitirá mejorar nuestro sistema eléctrico de distribución; reduciendo las tasas de fallas, mejorando la confiabilidad y seguridad de toda la red de distribución.

El modelo matemático que se elaboró facilitará la comprensión del efecto de reflexión y refracción en ondas viajeras generadas por descargas atmosféricas, determinado su magnitud de voltaje y forma de onda; dada la gran cantidad de aspectos que intervienen en el fenómeno las soluciones establecidas son de carácter aproximado.

CAPÍTULO I

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES

Cuando se produce una falla en una línea de distribución y su causa es de origen externo a la red de distribución eléctrica, se la conoce como descarga atmosférica o sobretensión de frente rápido, la tensión en el punto de falla se reduce repentinamente a un valor bajo. Este cambio repentino produce una alta frecuencia electromagnética de impulso llamada “onda viajera”, estas se propagan lejos del punto de falla en ambas direcciones (efecto de reflexión y refracción) a velocidades cercanas a la de la luz.

Los equipos o instalaciones de la red que sean expuestos a este tipo de sobretensión pueden ver afectado su aislamiento y provocar averías, por lo tanto, al detectar este fenómeno eléctrico se propone un modelo matemático que facilite la comprensión del mismo para poder limitar y prevenir este tipo de sobretensión.

1.2. IMPORTANCIA Y ALCANCES

La razón principal por la cual se desarrolló este trabajo, fue que en el diseño de los sistemas de distribución es de gran importancia la determinación del aislamiento adecuado de cada uno de sus equipos, ya que no es posible diseñar al voltaje normal de operación porque hay que tener en cuenta el sobrevoltaje que ocasiona una descarga atmosférica, debido a que este fenómeno da lugar a que el voltaje alcance niveles muchos mayores a lo normal.

Además, que puede ocurrir en diferentes zonas de la región costa, debido al temporal que trae consigo fuertes precipitaciones y tormentas eléctricas, según los boletines o informes meteorológicos presentados por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología; lo cual representan un gran problema para la red de distribución de energía eléctrica.

Este problema nos revela que el suministro de energía puede ver afectada su eficiencia, confiabilidad y seguridad, por ello, la utilidad de este modelo matemático radica en ayudar a estudiar y comprender como se comportan las ondas viajeras generadas por descargas atmosféricas en base a su efecto de reflexión y refracción, ya que no pueden verse con facilidad y nos servimos de una herramienta como Matlab para poder satisfacer esta necesidad, gracias a su función de graficar y parametrizar todo tipo de variables. Además, generar conocimiento y ciencia como lo plantea el “Plan Nacional para el Buen Vivir” y según los campos de la ciencia y tecnología de la UNESCO (3306.09) con respecto a “Transmisión y Distribución”.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Debido a lo complejo que puede resultar observar con facilidad como una descarga atmosférica impacta una línea de distribución, provocando ondas viajeras con efectos de reflexión y refracción, surge la necesidad de elaborar un modelado matemático sobre ondas viajeras que permita comprender y entender su comportamiento, usando herramientas de simulación como Matlab.

1.4. OBJETIVOS

1.4.1. OBJETIVO GENERAL

Elaborar un modelo matemático de ondas viajeras generadas por descargas atmosféricas utilizando el software Matlab.

1.4.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS

- Plantear circuitos por cada caso de estudio e implementarlos en el laboratorio de Alta Tensión de la universidad.
- Demostrar los efectos de reflexión y refracción en los casos de estudio dentro de los sistemas de distribución.
- Plantear ecuaciones por cada caso de estudio y desarrollarlas con el software Matlab.
- Comparar resultados teóricos y experimentales para determinar los porcentajes de error.

1.5. DELIMITACIÓN

Existen diferentes puntos de transición o derivaciones en las redes de distribución eléctrica, este trabajo se enfocará en tres casos que son comunes, como lo son: una unión entre líneas con distinta impedancia (derivación en resistencia), banco de capacitores (derivación en capacitor) y supresores de voltaje (Surge Arrester/Pararrayos).

El tema se centrará en elaborar un modelo matemático sobre ondas viajeras provocadas por sobretensiones de origen externo o conocidas como descargas atmosféricas, utilizando el software Matlab y desarrollarlo experimentalmente en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil con los equipos y elementos que este posee, el mismo que se encuentra ubicado en el bloque B.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA

2.1 CONCEPTOS BÁSICOS

En esta sección se explicará la definición de algunos términos y el funcionamiento de algunos equipos que fueron utilizados en el desarrollo práctico de este trabajo.

2.1.1 Modelación Matemática

La técnica de representar nuestro “mundo real” en términos matemáticos se ha convertido en una herramienta invaluable. Este proceso de simulación de la realidad mediante el lenguaje de las matemáticas se conoce como “modelación matemática”. La formulación y resolución de problemas en términos matemáticos tiene varios beneficios como establecer con claridad nuestras premisas, ya que los problemas en el mundo real son complejos. (R. Kent Nagle, Saff, & Snider, 2005, pág. 87)

2.1.2 Sistemas Eléctricos de Distribución

Un sistema eléctrico de potencia incluye tres etapas: generación, transmisión y distribución; cuya función primordial es la de llevar la energía desde los centros de generación hasta los usuarios en forma segura y con los niveles de calidad exigidos.

Aproximadamente dos tercios de la inversión total de un sistema de potencia están dedicados a la parte de distribución, lo que requiere un trabajo cuidadoso en el planeamiento, diseño y construcción del sistema.

Nótese que en esta parte es donde se producen los porcentajes más grandes de pérdidas de energía en todas sus manifestaciones debido al gran volumen de elementos que lo conforman. (Ramirez Castaño, 2004, pág. 2)

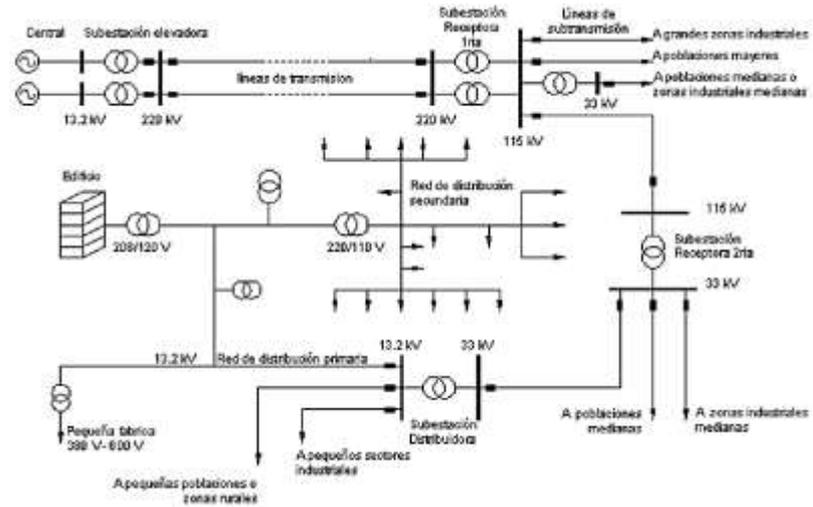


Ilustración 1. Ubicación de sistemas de distribución dentro de un sistema de potencia
 Fuente: (Ramírez Castaño, 2004)

2.1.3 Descarga atmosférica

Se denomina rayo o descarga atmosférica, lo que se produce entre nube y nube o entre nube y tierra. Se caracteriza por generar elevadas tensiones y corriente en muy corta duración. El origen de la descarga no está bien definido debido a la rapidez de este fenómeno, sin embargo, se justifica la aparición entre la parte inferior de la nubes de tormenta centros importantes de concentración de cargas imponiendo las características de campo eléctrico nube tierra y produciendo cargas de signo opuesto en la superficie de la tierra. (Torresi, 2004, pág. 20)

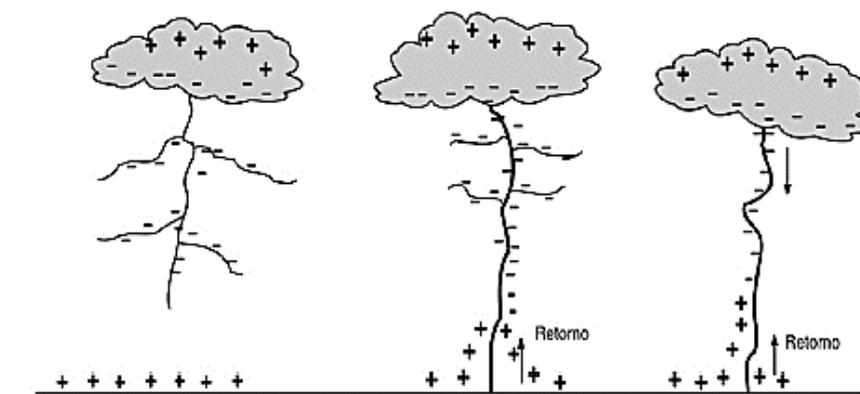


Ilustración 2. Generación de un rayo
 Fuente: (Torresi, 2004)

2.1.4 Pararrayo (Surge arrester)

Los pararrayos están conectados a través de un dispositivo que le proporciona una baja resistencia, la cual permitirá que fluyan corrientes elevadas, y evitar todo tipo de transitorios de voltaje, dependiendo del nivel de aislamiento de los equipos. (Martinez-Velasco, 2010, pág. 352)

2.1.5 Capacitor (Condensador)

La facultad de almacenar energía en forma de carga eléctrica se llama capacidad. Un dispositivo físico designado para poseer capacidad recibe el nombre de condensador. En su forma más simple un condensador no es más que dos conductores separados por un aislante. (Fowler, 1994, pág. 257)

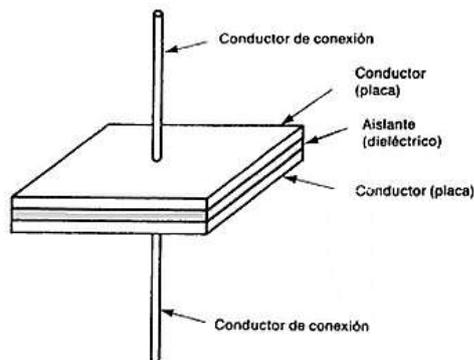


Ilustración 3. Condensador simple
Fuente: (Fowler, 1994)

En un circuito de corriente continua, un capacitor actúa como un circuito abierto después de su carga inicial. En cambio, con circuitos de corriente alterna, los capacitores periódicamente almacenan y retoman energía. En otras palabras, se cargan y descargan en distintos intervalos de tiempo, al variar el voltaje de la fuente de corriente alterna. (Fowler, 1994, pág. 257)

2.1.6 Transformador de potencial

Los transformadores de potencial o medida son equipos que sirven para transformar tensiones altas o intensidades fuertes en valores normalizados para que puedan ser medibles sin ningún peligro y con poco consumo.

2.1.7 Osciloscopio

El osciloscopio es un dispositivo de visualización gráfica que muestra señales eléctricas variables en el tiempo. Los osciloscopios pueden ser analógicos o digitales. Los primeros trabajan con señales periódicas, es decir, señales que varían siempre de la misma forma; mientras que los digitales se utilizan cuando se desea visualizar señales aperiódicas o que se producen aleatoriamente. (San Miguel, 2016, pág. 145)



Ilustración 4. Osciloscopio Digital
Fuente: (San Miguel, 2016)

2.1.8 Matlab®

MATLAB® es el software más sencillo y productivo para ingenieros y científicos. Ya tenga que analizar datos, desarrollar algoritmos o crear modelos, MATLAB® ofrece un entorno que invita a la exploración y el descubrimiento. Combina un lenguaje de alto nivel con un entorno de escritorio adaptado a los flujos de trabajo iterativos de la ingeniería y la ciencia. (MathWorks®, 2016)

2.1.8.1. Características Principales

Las principales características de este programa son las siguientes:

- Lenguaje de alto nivel para cálculos de ingeniería y científicos.
- Entorno de escritorio afinado para la exploración, el diseño y la solución de problemas de manera iterativa.
- Gráficos para visualizar datos y herramientas para crear gráficos personalizados.

- Apps para ajustar curvas, clasificar datos, analizar señales y muchas otras tareas relacionadas con dominios concretos.
- Toolboxes complementarias para una amplia variedad de aplicaciones de ingeniería y científicas.
- Herramientas para crear aplicaciones con interfaces de usuario personalizadas.
- Interfaces para C/C++, Java®, .NET, Python®, SQL, Hadoop® y Microsoft® Excel®.
- Opciones de despliegue sin coste en concepto de derechos de licencia para compartir programas de MATLAB® con los usuarios finales.

2.1.8.2. Adquisición de datos

La adquisición de datos de la caja de herramientas software incluye funciones para el control de la entrada analógica, salida analógica, contador / temporizador, y E / S digitales subsistemas de un dispositivo de adquisición de datos. Puede acceder a las funciones específicas del dispositivo y sincronizar los datos adquiridos desde múltiples dispositivos. (MathWorks®, 2016)

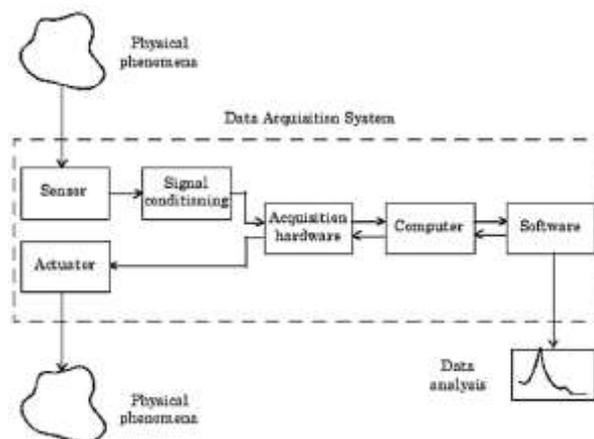


Ilustración 5. Diagrama de bloques para sistemas de adquisición de datos
Fuente: (MathWorks®, 2016)

2.1.8.3. Visualización de datos

Proporciona funciones de trazado 2D y 3D, las cuales le permiten visualizar y comprender sus datos, además de comunicar los resultados. (MathWorks®, 2016)

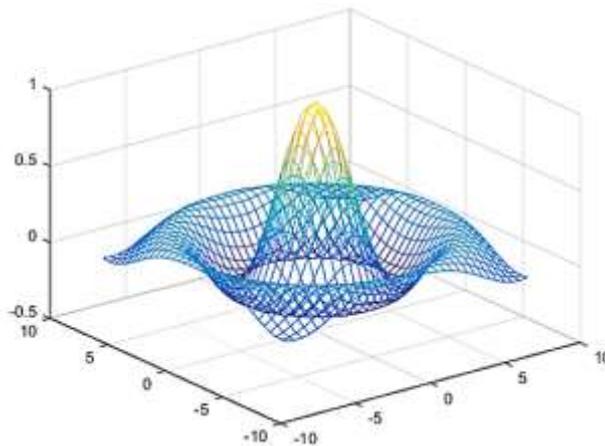


Ilustración 6. Gráfico de contorno de superficie utilizando la función trazado de Matlab
Fuente: (MathWorks®, 2016)

2.1.8.4. Programación y desarrollo de algoritmos

Garantiza que su código se ejecute con rapidez. Las operaciones matemáticas se distribuyen en varios núcleos en su ordenador, las llamadas a las librerías están altamente optimizadas, y todo el código se compila con la técnica JIT (just-in-time). Puede ejecutar sus algoritmos en paralelo bien cambiando los bucles por bucles paralelos o bien cambiando los arrays estándar por arrays GPU o distribuidos. Ejecute algoritmos paralelos en nubes públicas o privadas sin límite de escalabilidad y sin necesidad de modificar el código. (MathWorks®, 2016)

```
Load handel y Fs

L = length(y);
nFFT = 2*nextpow2(L);

Y = fft(y, nFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,nFFT/2 + 1);
```

Ilustración 7. Ejemplo de Algoritmos en Matlab
Fuente: (MathWorks®, 2016)

2.1.9 Simulink®

Simulink® es un entorno de diagramas de bloque para la simulación multidominio y el diseño basado en modelos. Ofrece un editor gráfico, bibliotecas de bloques personalizables y SOLVERS para modelar y simular sistemas dinámicos.

Se integra con MATLAB®, lo que permite incorporar algoritmos de MATLAB en los modelos y exportar los resultados de la simulación a MATLAB para llevar a cabo más análisis. (MathWorks®, 2016)

2.1.9.1 Características principales

Las principales características de esta herramienta son las siguientes:

- Editor gráfico para crear y gestionar diagramas de bloques jerárquicos.
- Bibliotecas de bloques predefinidos para modelar sistemas continuos y discretos.
- Motor de simulación con solvers de ecuaciones diferenciales ordinarias de paso fijo y paso variable.
- Scopes y data displays para ver los resultados de la simulación.

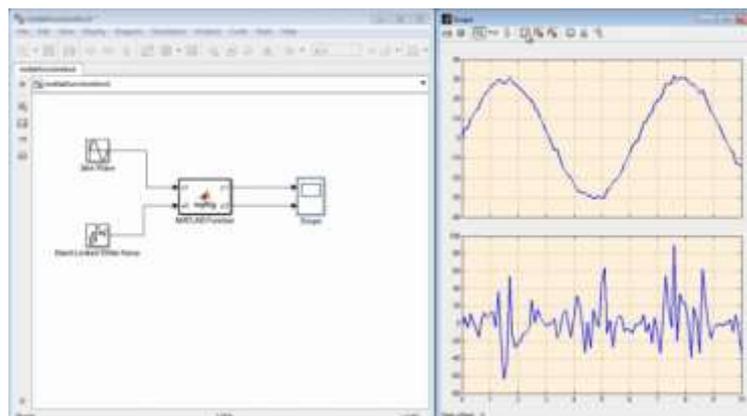


Ilustración 8. Simulación de señales en Simulink
Fuente: (MathWorks®, 2016)

2.2 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS

Un fenómeno transiente es una función aperiódica de tiempo que tiene corta duración. Ejemplos de estos fenómenos transitorios pueden ser sobretensiones y sobrecorrientes. Este tipo de sobretensiones pueden ser causados por rayos, maniobras o fallas, etc. (Gönen, 2007, pág. 473)

Este tipo de sobretensión es de corta duración (milisegundos), oscilatoria o unidireccional, y generalmente muy amortiguada. Una sobretensión transitoria puede estar seguida por una sobretensión temporal; en tal caso ambas sobretensiones se analizan como sucesos separados. (Martínez, 2013, pág. 6)

Según Martínez (2013) se dividen en:

- **SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO:** generalmente oscilatoria, con un tiempo de subida hasta el valor de cresta T_p , comprendido entre 20 y 5000 μs , y con un tiempo de cola T_2 , igual o inferior a 20 ms. (Ver tabla 1).
- **SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO:** generalmente unidireccional, con un tiempo de subida hasta el valor de cresta T_1 , comprendido entre 0,1 y 20 μs , y con un tiempo de cola T_2 , igual o inferior a 300 μs . (Ver tabla 1).
- **SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO:** generalmente oscilatoria, con un tiempo de subida hasta el valor de cresta T_f , inferior a 0,1 μs , una duración total inferior a 3 ms, y con oscilaciones superpuestas de frecuencias comprendidas entre 30 KHz y 100 MHz.

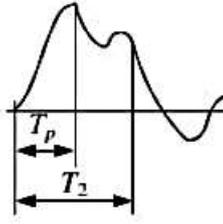
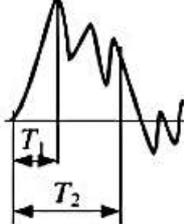
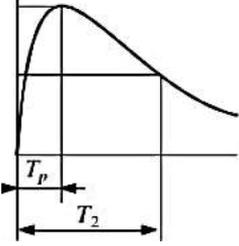
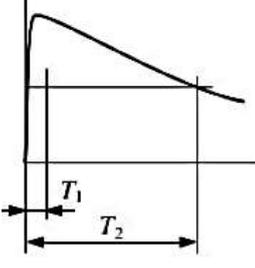
TIPO	TRANSITORIO	
	Frente lento	Frente rápido
Formas de onda de tensiones y sobretensiones		
	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5.000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$
Formas de onda de tensión normalizada		
	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2.500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$
Ensayo de tensión soportado normalizado	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo

Tabla 1. Tipos y formas de sobretensiones transitorias
Fuente: (Martínez, 2013)

2.2.1 Voltaje de Impulso

Según Gönen (2007) “los estudios de perturbaciones transitorias en sistemas de potencia han demostrado que las descargas atmosférica y las operaciones de maniobra son seguidas de *ondas viajeras* con un frente de onda escarpado.”

La tensión de impulso es una tensión unidireccional la cual crece rápidamente hasta su valor máximo y luego decae lentamente hasta el valor de cero. La forma de onda (ver ilustración 9) se define en función de los tiempos T_1 x T_2 , valores dados en microsegundos, donde T_1 es el tiempo que transcurre entre el inicio y el pico de la onda; y T_2 el tiempo total desde el inicio hasta el momento en que la tensión ha caído el 50% de su valor máximo. (Gönen, 2007, pág. 473)

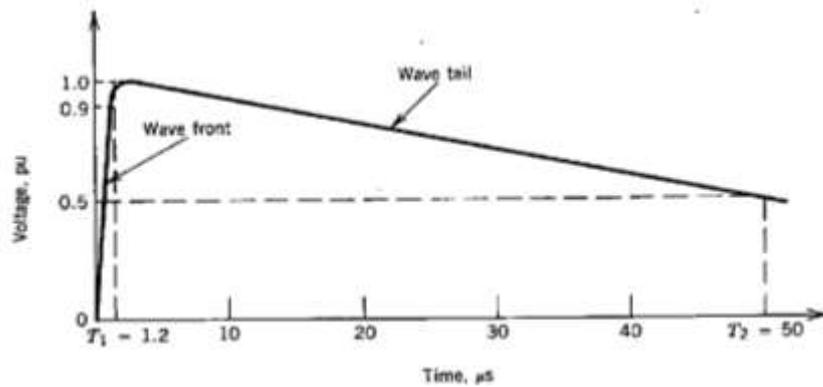


Ilustración 9. Forma de onda de Tensión de impulso estándar
Fuente: (Gönen, 2007)

Cuando ocurren tormentas eléctricas se generan impulsos con diferentes magnitudes, tiempo de frente y de cola de onda, pero la forma de onda no varía; por esta razón la Comisión Electrotécnica Internacional ha especificado que el aislamiento de las líneas de transmisión y equipos de Alta Tensión deben soportar impulsos de voltaje tipo rayo estándar con una forma de onda **1.2/50μs**.

Los generadores de impulsos (ver ilustración 10) son circuitos formados por una resistencia de frente y cola (R_e , R_d), un capacitor de impulso y carga (C_s , C_b) y dos esferas o explosores (SG) que generan el impulso de onda tipo rayo; este circuito es energizado con una fuente DC (V_o), el cual permite realizar pruebas de aislamiento eléctrico a elementos y equipos de alta tensión como: aisladores, pararrayos, transformadores, etc. Sus elementos son dimensionados de acuerdo a la magnitud y tiempos de la onda. (Sheeba, Jayaraju, & Nediyazhikam Shanavas, 2012, pág. 304)

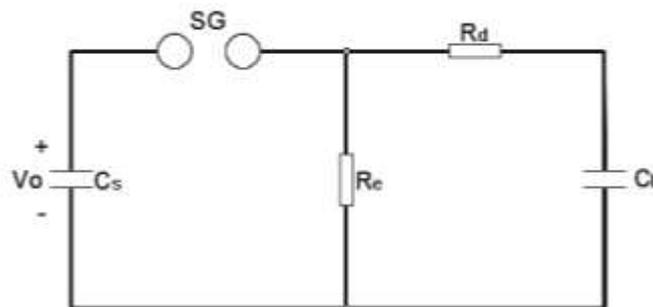


Ilustración 10. Circuito básico del Generador de Impulsos de una etapa
Fuente: (Aguirre Alonso & Villavicencio Vera, 2015)

2.3 TEORÍA DE ONDAS VIAJERAS

Cuando un descargar atmosférica (*rayo*) cae sobre un conductor de fase o cable blindado, la corriente del rayo tiende a dividirse en ambas direcciones del conductor. La corriente del rayo verá la impedancia del conductor de tal manera que se generara una tensión. La tensión y la corriente generadas por el rayo viajarán a lo largo del conductor como *ondas viajeras*. (Gönen, 2007, pág. 473).

Esta teoría está basada sobre un circuito de un solo conductor (ilustración 11) y supone que la línea de transmisión será ideal. Es decir, la línea puede ser representada como una impedancia característica pura $Z_c = (L/C)^{1/2}$, donde L y C serán determinados en el supuesto de que la tierra es una verdadera superficie de potencial cero. (Rorden, 1932, pág. 824)

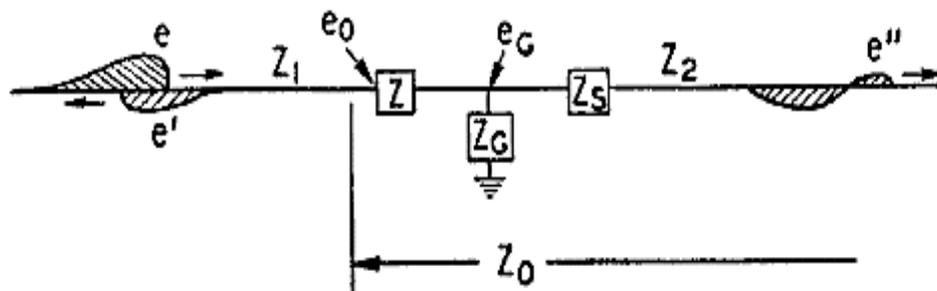


Ilustración 11. Circuito equivalente de una red general
Fuente: (Rorden, 1932)

- Donde
- e : Onda incidente
 - e' : Onda reflejada
 - e'' : Onda refractada
 - Z : Impedancia característica de la línea 1
 - Z_G : Punto de transición o derivación
 - Z_S : Impedancia característica de la línea 2
 - Z_0 : Impedancia equivalente del circuito

2.3.1 Formas de ondas tipo rayo

Los transitorios de tipo onda rayo pueden ser aproximadamente representados por la diferencia de dos exponenciales (ver ecuación 1); simplemente por un ajuste apropiado de los parámetros. (Rorden, 1932, pág. 824)

$$e(t) = E[\exp^{-at} - \exp^{-bt}]$$

Ecuación 1. Onda tipo rayo
Fuente: (Rorden, 1932)

Donde E es la magnitud de la fuente en voltios, a es el tiempo de frente y b representa el tiempo de cola respectivamente.

A continuación, en la ilustración 12, se muestra las diferentes formas de ondas que se pueden generar, mediante el ajuste de los parámetros a y b.

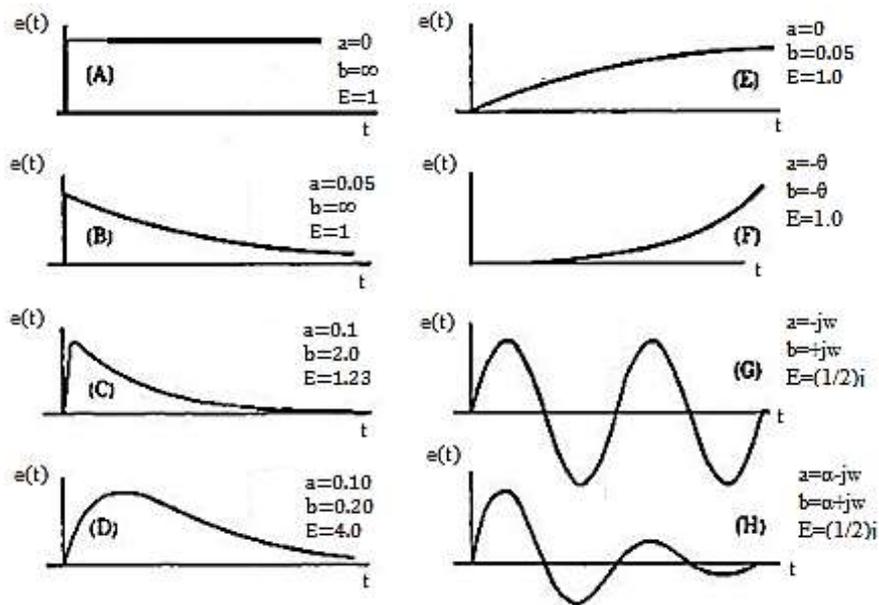


Ilustración 12. Formas de ondas dadas por la ecuación 1
Fuente: (Bewley, 1933)

Probablemente las ondas tipo rayo más comunes de la ilustración 12 son la (C) y (D), donde a y b son reales y positivos, por lo tanto, son sencillos de replicar. Con los parámetros E (voltaje fuente), a (frente de onda) y b (cola de onda) son suficientes para poder determinar la cresta, distancia y tiempos de frente o cola de la onda y pueden ser ajustados usando la ilustración 13.

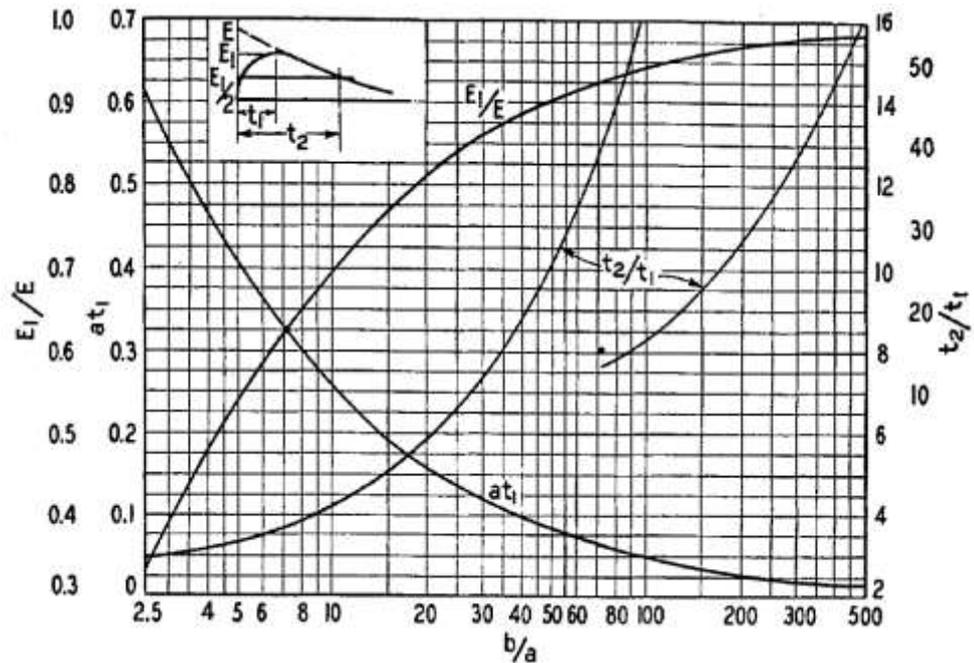


Ilustración 13. Especificaciones de una onda tipo rayo típica
Fuente: (Rorden, 1932)

Por ejemplo, se tiene una onda tipo rayo con un tiempo de frente y cola de $3/21 \mu s$, respectivamente. Entonces $T_2/T_1=7$, y en la figura 13 hallamos $b/a=28.5$. Para este valor b/a , se encontrará $a \cdot T_1=0.122$ y $E_1/E=0.852$.

Resolviendo: $a = 0.041, b = 1.15$

La onda será definida como $e(t) = E[\exp^{-0.041t} - \exp^{-1.15t}]$, de la ecuación 1

Donde la cresta de voltaje alcanzará un 85.2 por ciento de E (voltaje fuente), y t esta medido en microsegundos. (Rorden, 1932, pág. 825)

2.3.2 Ondas reflejadas (e') y refractadas (e'')

Cuando una onda incidente (descarga atmosférica) llega a una discontinuidad, donde cambia la impedancia característica de la línea, debe ocurrir algún tipo de ajuste a fin de que dicha proporcionalidad no sea violada. Este ajuste se manifiesta por la aparición de dos nuevos pares de ondas, la onda reflejada de voltaje que viaja de regreso, hacía atrás, y las ondas refractadas penetran en la discontinuidad y continúan su viaje hacia adelante en la línea como se muestra en la ilustración 14. (Rodríguez Chiwa, 1983, pág. 39)

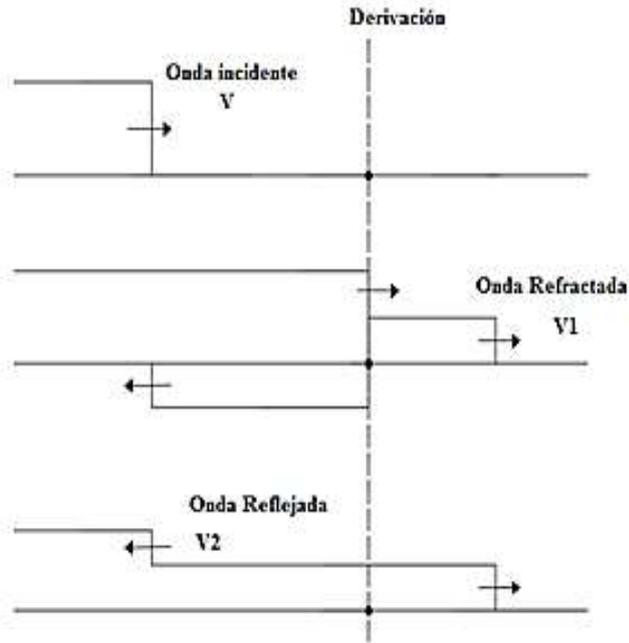


Ilustración 14. Efecto de refracción y reflexión de una onda viajera
Fuente: Los autores

La determinación de voltajes y ondas resultantes a partir de una onda viajera, pueden ser efectuados en términos de unos operadores de reflexión (ecuación 2) y refracción (ecuación 3), considerando las impedancias de las líneas como constantes, los cuales se obtuvieron con la simbología de la ilustración 11 y su resolución puede ser revisada en los anexos (ver Anexo A). (Rorden, 1932, pág. 825)

$$\rho = \frac{e(t)'}{e(t)} = \frac{Z_0 - Z_1}{Z_0 + Z_1}$$

Ecuación 2. Operador de reflexión
Fuente: (Rorden, 1932)

$$\tau = \left(\frac{Z_G}{Z_G + Z_S + Z_2} \right) \left(\frac{2Z_2}{Z_0 + Z_1} \right)$$

Ecuación 3. Operador de refracción
Fuente: (Rorden, 1932)

2.4 TIPOS DE PUNTOS DE TRANSICIÓN O DERIVACIONES

En esta parte se muestra los tipos de puntos de transición o derivaciones que se pueden generar en los sistemas de distribución, pero este trabajo se basará en tres tipos de derivaciones que son muy comunes, como lo son las uniones entre líneas de distinto calibre o empalmes eléctricos (Derivación Resistiva), banco de capacitores (Derivación capacitiva) y supresores de voltaje (Derivación en pararrayos).

Existen varios tipos de puntos de transición o derivaciones, los cuales se pueden observar en las ilustraciones 15, 16 y 17; para cada una de estas derivaciones la onda incidente es la misma, pero dependiendo de la terminación (ya sea capacitiva, inductiva, etc.) las formas de ondas refractadas y reflejadas serán diferentes, así como sus ecuaciones y constantes de tiempo.

Para resolver los circuitos de las ilustraciones 15, 16 y 17 se podrán utilizar las siguientes ecuaciones, para una onda incidente de forma $e(t) = E[exp^{-at}]$ se puede utilizar la ecuación 4 y para una onda incidente con más exponenciales de la forma $e(t) = E[exp^{-at} - exp^{-bt}]$ se podrá utilizar la ecuación 5.

$$e(t)' = AE \left[\frac{a + \alpha}{a - \beta} exp^{-at} - \frac{\alpha + \beta}{a - \beta} exp^{-\beta t} \right]$$

Ecuación 4. Onda reflejada para exponenciales
Fuente: (Rorden, 1932)

$$e(t)' = AE \left[\frac{a + \alpha}{a - \beta} exp^{-at} - \frac{b + \alpha}{b - \beta} exp^{-at} + \frac{(\alpha + \beta)(a - b)}{(a - \beta)(b - \beta)} exp^{-\beta t} \right]$$

Ecuación 5. Onda reflejada para más de una exponencial
Fuente: (Rorden, 1932)

Donde a, β son las constantes de tiempo y A es el factor de amplitud. (Rorden, 1932, pág. 826)

En los circuitos de la ilustración 15, la impedancia de la línea dos (Z_2) de la ilustración 11 tiende al infinito, por eso no existe onda refractada o transmitida; por lo tanto, la relación sería que el voltaje total $e_o(t)$ en el punto de transición o derivación es igual a la suma de la onda incidente $e(t)$ y la onda reflejada $e(t)'$ (ver ecuación 6); la onda refractada $e(t)''$ será igual al voltaje total (ver ecuación 7) que circula después de la derivación. (Rorden, 1932, pág. 826)

$$e_o(t) = e(t) + e(t)'$$

Ecuación 6. Voltaje total del circuito
Fuente: (Rorden, 1932)

$$e(t)'' = e_o(t)$$

Ecuación 7. Onda refractada del circuito
Fuente: (Rorden, 1932)

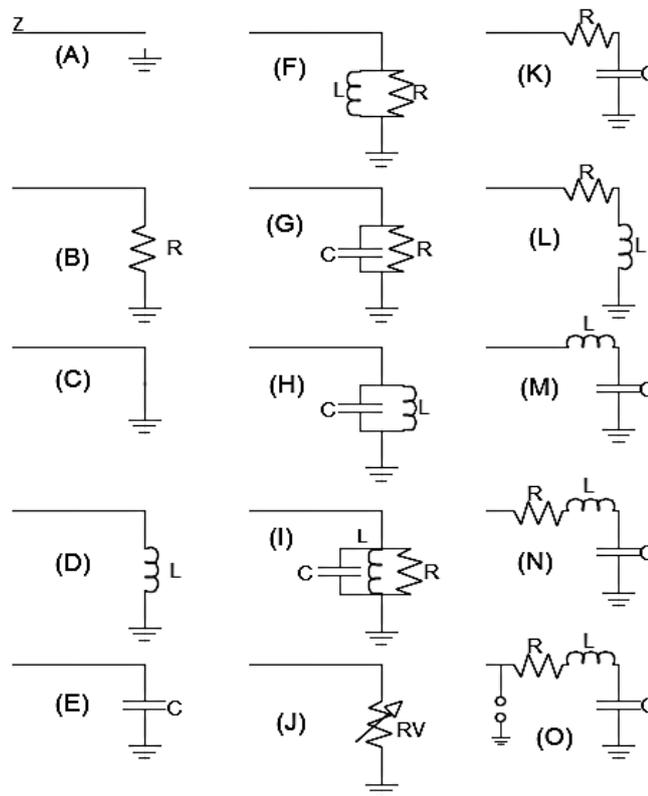


Ilustración 15. Derivaciones en Impedancias
Fuente: (Rorden, 1932)

A continuación se explicarán algunos casos que se muestran en la ilustración 15:

- **Ilustración (15A). Derivación en circuito abierto.**

Cuando una línea se encuentra abierta, por el método de superposición, el voltaje total $e_o(t) = 2e(t)$, entonces, la onda reflejada será igual a la onda incidente $e(t)' = e(t)$. (Rorden, 1932, pág. 830)

- **Ilustración (15C). Derivación en corto circuito.**

Cuando una línea se encuentra en corto circuito, la onda reflejada será negativa $e(t)' = -e(t)$, lo cual provocará que el voltaje total $e_o(t) = 0$, pero las magnitudes de corrientes se duplicarán. (Rorden, 1932, pág. 830)

- **Ilustración (15D). Derivación en inductancia (L).**

Se aplica una onda incidente en la línea y su onda reflejada será positiva debido al comportamiento del inductor, porque cuando arriba la onda viajera se comporta como un circuito abierto. (Rorden, 1932, pág. 830)

En la tabla 2 se muestra los valores de los parámetros y la ecuación para hallar la onda reflejada en los circuitos de la ilustración 15.

Circuito	$e'(t)$ [V]	α [us]	β [us]	A
A	e	—	—	—
B	$\frac{R-Z}{R+Z}e$	—	—	—
C	$-e$	—	—	—
D	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z}{L}$	$\frac{Z}{L}$	1
E	Ecuación 4 y 5	$\frac{1}{CZ}$	$\frac{1}{CZ}$	-1
F	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z.R}{L(R-Z)}$	$\frac{Z.R}{L(R+Z)}$	β/α
G	Ecuación 4 y 5	$\frac{R-Z}{Z.R.C}$	$\frac{R+Z}{Z.R.C}$	-1
K	Ecuación 4 y 5	$\frac{1}{C(Z-R)}$	$\frac{1}{C(Z+R)}$	$-\beta/\alpha$
L	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z-R}{L}$	$\frac{Z+R}{L}$	1

Tabla 2. Ecuaciones de los circuitos de la ilustración 15
Fuente: (Rorden, 1932)

De la ilustración 16 donde Z_G , que es el punto de transición o derivación, tiende al infinito, por ello dichos circuitos tiene un operador de refracción (ecuación 8) y una onda refractada (ecuación 9) diferente al voltaje total e_o .

$$\tau = \frac{2Z_2}{Z_0 + Z_1}$$

Ecuación 8. Operador de refracción cuando la derivación es infinita
Fuente: (Rorden, 1932)

$$e(t)'' = \frac{Z_2}{Z_1} [e(t) - e(t)']$$

Ecuación 9. Onda refractada cuando la derivación es infinita
Fuente: (Rorden, 1932)

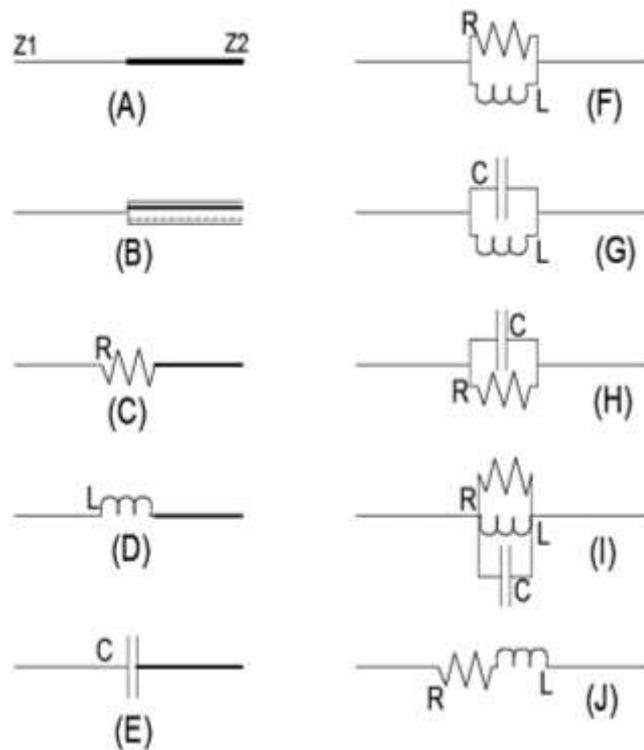


Ilustración 16. Unión entre circuitos
Fuente: (Rorden, 1932)

En la tabla 3 se muestra los valores de los parámetros y la ecuación para hallar la onda reflejada en los circuitos de la ilustración 16.

Circuito	$e'(t)$ [V]	α [us]	β [us]	A
A	$\frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1} e$	—	—	—
B	$\frac{Zt - Z1}{Zt + Z1} e$	—	—	—
C	$\frac{Z2 - Z1 + R}{Z2 + Z1 + R} e$	—	—	—
D	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z1 - Z2}{L}$	$\frac{Z1 + Z2}{L}$	1
E	Ecuación 4 y 5	$\frac{1}{C(Z1 - Z2)}$	$\frac{1}{C(Z1 + Z2)}$	β/α
F	Ecuación 4 y 5	$\frac{R(Z1 - Z2)}{L(R - Z1 - Z2)}$	$\frac{R(Z1 + Z2)}{L(R + Z1 + Z2)}$	$\frac{R - Z1 + Z2}{R + Z1 + Z2}$
H	Ecuación 4 y 5	$\frac{R - Z1 + Z2}{R \cdot C(Z1 - Z2)}$	$\frac{R + Z1 + Z2}{R \cdot C(Z1 + Z2)}$	$\frac{Z2 - Z1}{Z2 + Z1}$
J	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z1 - Z2 + R}{L}$	$\frac{Z1 + Z2 + R}{L}$	1

Tabla 3. Circuitos de la ilustración 16

Fuente: (Rorden, 1932)

En los circuitos de la ilustración 17, las impedancias Z_1 y Z_2 de la gráfica tienden a cero; por lo tanto se utilizan las ecuaciones 6 y 7, que se mencionaron anteriormente.

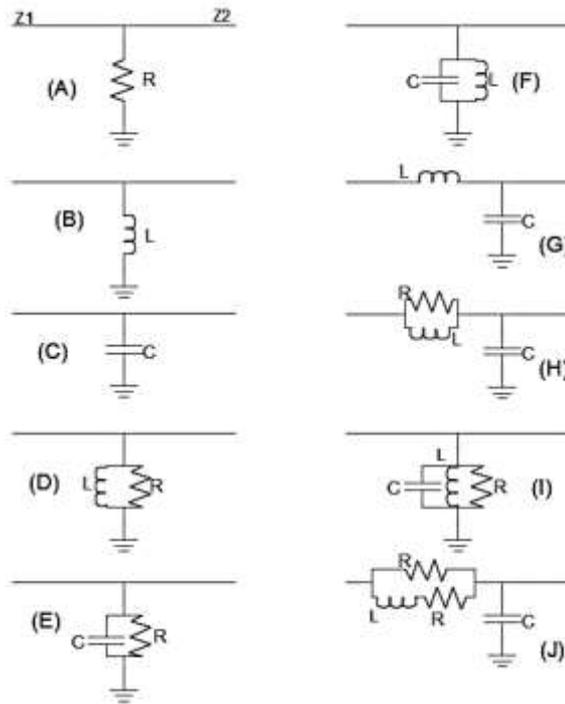


Ilustración 17. Unión entre circuitos
Fuente: (Rorden, 1932)

En la tabla 4 se muestra los valores de los parámetros y la ecuación para hallar la onda reflejada en los circuitos de la ilustración 17.

Circuito	$e(t)'$ [V]	α [us]	β [us]	A
A	$\frac{Z_2 \cdot R - Z_1 \cdot R - Z_1 \cdot Z_2}{Z_2 \cdot R + Z_1 \cdot R + Z_1 \cdot Z_2} e$	—	—	—
B	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z_1 \cdot Z_2}{L(Z_2 - Z_1)}$	$\frac{Z_1 \cdot Z_2}{L(Z_2 + Z_1)}$	β/α
C	Ecuación 4 y 5	$\frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot C}$	$\frac{Z_2 + Z_1}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot C}$	-1
D	Ecuación 4 y 5	$\frac{R \cdot Z_1 \cdot Z_2}{L(R \cdot Z_2 - R \cdot Z_1 - Z_1 \cdot Z_2)}$	$\frac{R \cdot Z_1 \cdot Z_2}{L(R \cdot Z_2 + R \cdot Z_1 + Z_1 \cdot Z_2)}$	β/α
E	Ecuación 4 y 5	$\frac{RZ_2 - RZ_1 - Z_1Z_2}{Z_1Z_2RC}$	$\frac{RZ_2 + RZ_1 + Z_1Z_2}{Z_1Z_2RC}$	-1

Tabla 4. Circuitos de la ilustración 17
Fuente: (Rorden, 1932)

2.4.1 Derivación en Resistencia

Con una resistencia (R) menor que la impedancia característica de la línea (Z), la onda reflejada es negativa y si R es mucho más grande que Z , entonces la onda reflejada es positiva. (Rorden, 1932, pág. 830)

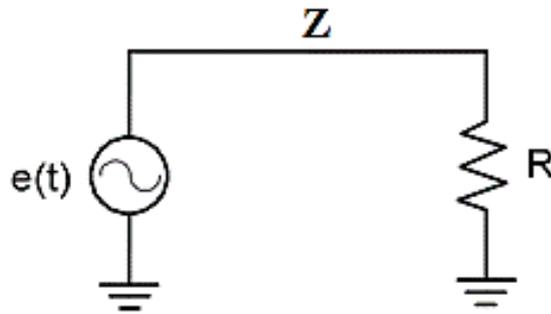


Ilustración 18. Circuito equivalente en derivación con resistencia
Fuente: (Rorden, 1932)

Como ejemplo se simuló el caso B de la ilustración 15 y se usaron las ecuaciones de la tabla 2, en el que se tiene una onda incidente $e = 1500[\exp^{-0.04t} - \exp^{-1.1t}]$ y con el siguiente valor de impedancia $Z=510 \text{ ohm}$, se demostrará el efecto de reflexión con $R=400 \text{ ohm}$ (negativa) y $R=1000 \text{ ohm}$ (positiva) como se observa en la ilustración 19.

$$e(t)' = \frac{R - Z}{R + Z} e(t)$$

Ecuación 10. Onda reflejada en una derivación resistiva
Fuente: (Rorden, 1932)

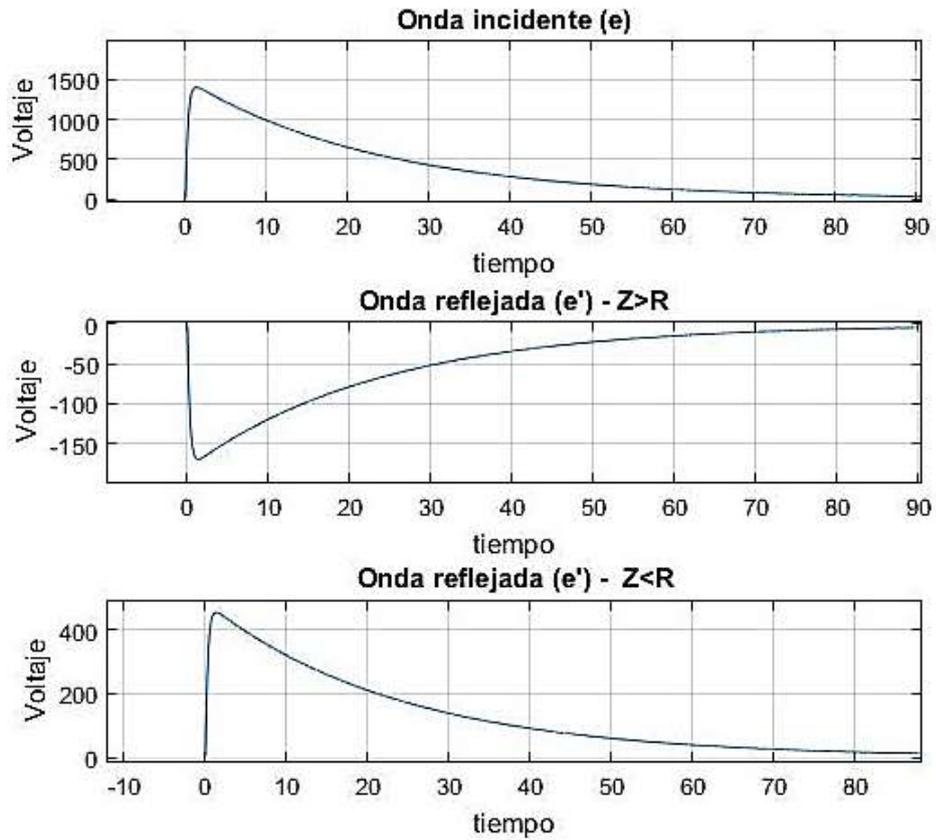


Ilustración 19. Comportamiento de la onda en derivación con resistencia
Fuente: Los autores

2.4.2 Derivación en Capacitancia

El capacitor en principio, actúa como un corto circuito en el primer instante de tiempo, y luego se comporta como un circuito abierto. A medida que la capacitancia se incrementa la onda reflejada, que es negativa, empieza aumentar. (Rorden, 1932, pág. 830)

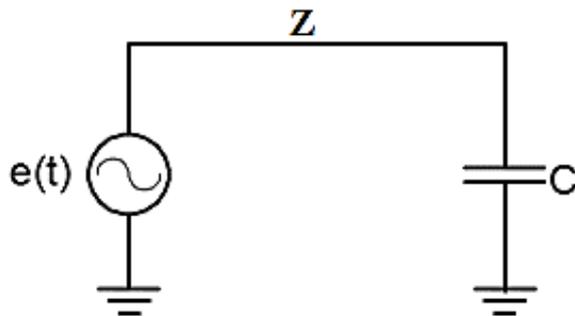


Ilustración 20. Circuito equivalente en derivación con capacitancia
Fuente: (Rorden, 1932)

En la ilustración 21 se puede observar una onda incidente antes de llegar a la terminación, como se refleja una onda negativa en el momento que llega a la derivación y como la onda refractada es el doble de la onda incidente.

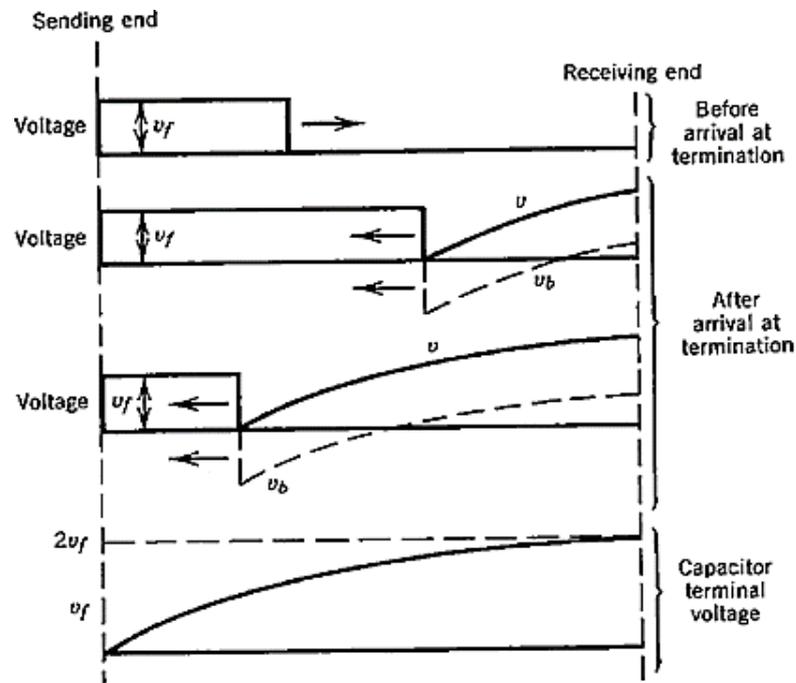


Ilustración 21. Comportamiento de la onda viajera en terminación capacitiva
Fuente: (Gönen, 2007)

$$e(t)' = AE \left[\frac{a+\alpha}{a-\beta} \exp^{-at} - \frac{b+\alpha}{b-\beta} \exp^{-at} + \frac{(\alpha+\beta)(a-b)}{(a-\beta)(b-\beta)} \exp^{-\beta t} \right]$$

Ecuación 11. Onda reflejada en derivación capacitiva
Fuente: (Rorden, 1932)

Donde: $A = -1$

$$\alpha = \beta = \frac{1}{ZC}$$

a = tiempo frente de onda

b = tiempo cola de onda

Se muestra como ejemplo el caso E de la ilustración 15 en el que se usaron las ecuaciones de la tabla 2, se simula una onda incidente de forma similar a lo que se estudió en la teoría; $e = 1000[\exp^{-0.04t} - \exp^{-1.1t}]$ que impacta en una impedancia de línea $Z=510 \text{ ohm}$, en la ilustración 22 se mostrará la onda reflejada y como varia a medida que aumenta la capacitancia con los valores de $C=0.0015$ y $C=0.003$ micro Faradios.

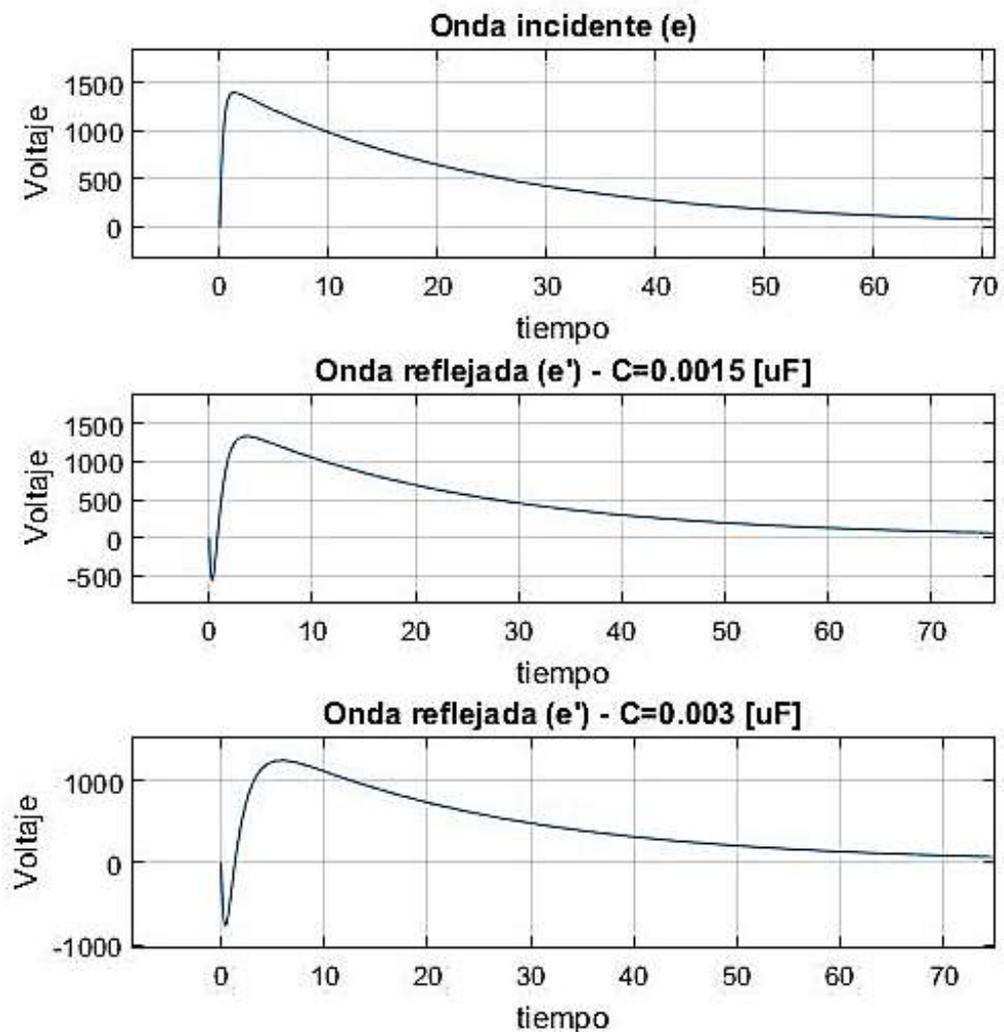


Ilustración 22. Comportamiento de la onda en derivación con capacitancia
Fuente: Los autores

2.4.3 Derivación en Pararrayos (surge arrester)

Existen varios circuitos equivalentes del mismo los cuales cumplen con la misma función de protección, entre ellos está el modelo IEEE (ver ilustración 23). Las funciones de un pararrayo son la de tener una muy alta resistencia durante el funcionamiento normal del sistema y una relativamente baja resistencia durante las sobretensiones transitorias. (Martinez & Durbak, 2005, pág. 2073)

Por ello, debe tener una relación no lineal (resistencia no lineal) entre voltaje y corriente (V-I).

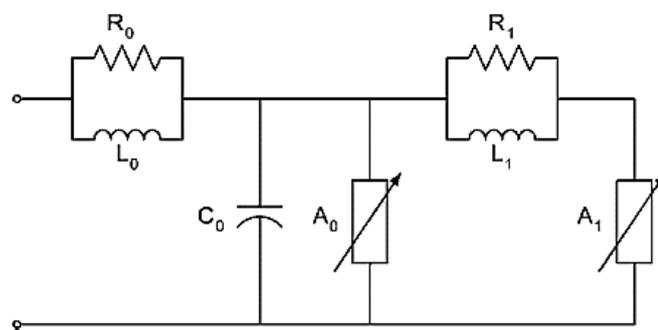


Ilustración 23. Modelo IEEE de un Pararrayo
Fuente: (Martinez & Durbak, 2005)

Estos valores no lineales (A_0 , A_1) deben ser simulados como segmentos exponenciales utilizando la ecuación 12 (ver ilustración 25), la tabla 5 muestra los valores de voltaje y corriente (V-I) que deben tener estas resistencias no lineales, estos valores varían dependiendo de la capacidad del pararrayo. (Martinez & Durbak, 2005, pág. 2074)

$$i = p \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^q$$

Ecuación 12. Modelo matemático del pararrayo
Fuente: (Martinez & Durbak, 2005)

Donde; p : multiplicador por cada segmento

q : el exponente

V_{ref} : voltaje referencia o base

V : variación del voltaje.

El parámetro “ q ”, el cual describe las características no lineales, depende del material del pararrayo. Para un tipo carburo de silicio (SiC), “ q ” es típicamente 5 y para uno de óxido de zinc (ZnO), “ q ” es más grande que 30. (Martinez-Velasco, 2010, pág. 363)

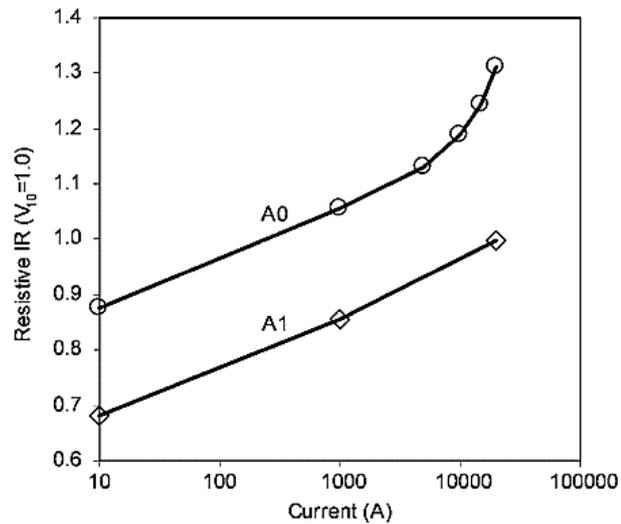


Ilustración 24. Características de V-I para resistencias no lineales
Fuente: (Martinez & Durbak, 2005)

Corriente (KA)	Voltaje (p.u.)	
	A0	A1
0,01	0,963	0,769
1	1,05	0,85
2	1,088	0,894
4	1,125	0,925
5	1,138	0,938
7	1,169	0,956
10	1,188	0,969
12	1,206	0,975
14	1,231	0,988
16	1,25	0,994
18	1,281	1
20	1,313	1,006

Tabla 5. Valores para resistencias no lineales (A0-A1)
Fuente: (ALI, 2013)

Los parámetros lineales del circuito equivalente (ver ilustración 22) son hallados con las siguientes ecuaciones:

$$L1 = \frac{15d}{n} [\text{uH}] \ ; \ L0 = \frac{0.2d}{n} [\text{uH}]$$

$$R1 = \frac{65d}{n} [\Omega] \ ; \ R0 = \frac{100d}{n} [\Omega]$$

$$C = \frac{100n}{d} [\text{pF}]$$

Donde d es la altura aproximada (metros) del pararrayo y n es el numero de discos o columnas de MO. (ALI, 2013, pág. 436)

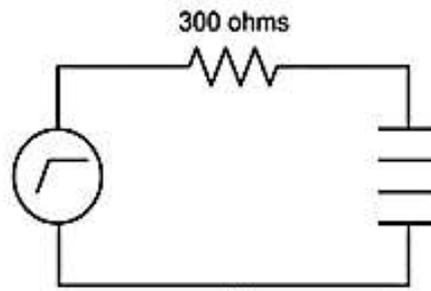
Martinez & Durbak (2005) plantean como ejemplo el circuito de la ilustración 25(a) en donde se muestra la función de un pararrayo. Se genera como fuente una onda triangular de voltaje de 100 [KV]. La resistencia de 300 [Ω] representa la impedancia de la linea.

En la ilustración 25(b) se observa las características de V-I del pararrayo, el cual ha sido generado para 34.5 [KV] con un voltaje referencia de 67.7 [KV].

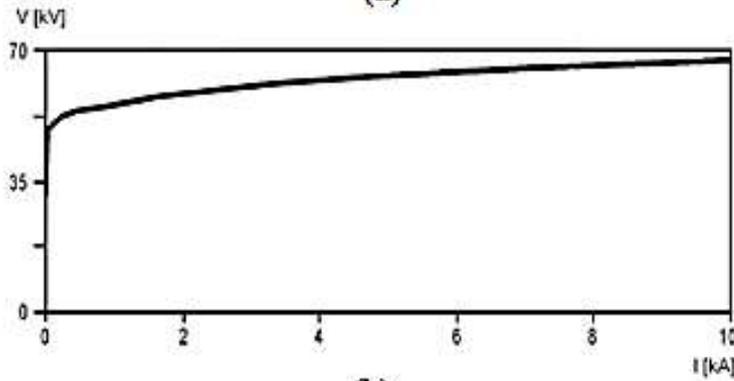
El pararrayo drena poca corriente hasta unos 45 [KV]. Hasta ese instante, el voltaje del pararrayo casi igual a la fuente, porque el voltaje en la linea es cercano a cero. Cuando el pararrayo drena una corriente mucho mas grande, el voltaje de la linea aumenta, resultando un voltaje mas bajo en el pararrayo. (Martinez & Durbak, 2005, pág. 2075)

En 5 us, la corriente es 162.3 [A] lo que genera un voltaje en la linea de $0.1623 \cdot 300 = 48.7$ [KV] y un voltaje en el pararrayo de $100 - 48.7 = 51.3$ [KV].

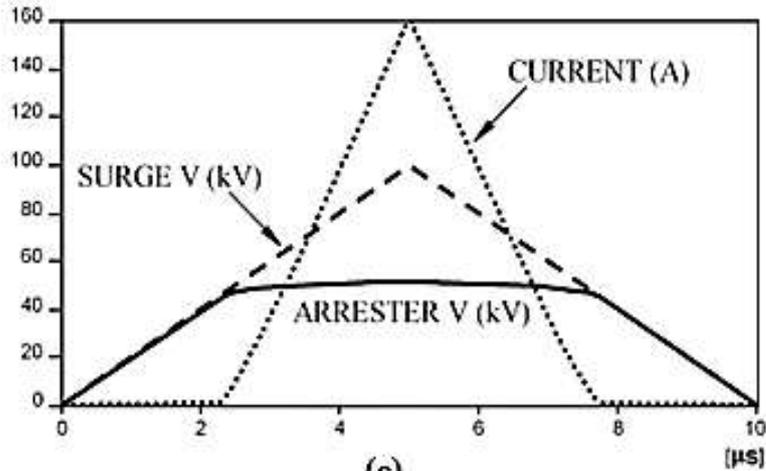
En la ilustración 25(c) se puede observar la onda de voltaje fuente, con su respectiva onda de corriente; ademas de apreciarse el voltaje drenado por el pararrayo.



(a)



(b)



(c)

Ilustración 25. Ejemplo de funcionamiento de un pararrayo
Fuente: (Martinez & Durbak, 2005)

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

Para elaborar la modelación matemática e implementar de manera experimental el efecto de reflexión y refracción que tienen las ondas viajeras provocadas por descargas atmosféricas, se empleó algunos métodos y técnicas de investigación como se menciona a continuación:

3.1 MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN

- **Análisis y síntesis:** permite estudiar la información obtenida sobre ondas viajeras con sus efectos de reflexión y refracción en distintas derivaciones dentro de los sistemas de distribución, para luego relacionarla con los casos de estudio.
- **Experimentación:** posibilita comparar variables en los casos de estudios planteados para obtener datos, que permitan probar la validez del fenómeno de reflexión y refracción ocasionadas por descargas atmosféricas en el laboratorio de Alta Tensión de la universidad.
- **Modelación:** facilita la elaboración de un modelo matemático para explicar y entender cómo se comporta una onda viajera provocada por una descarga atmosférica en varios puntos de transición o derivación.
- **Matemático:** se representó matemáticamente el fenómeno de reflexión y refracción mediante el uso de fórmulas algebraicas y planteamiento de ecuaciones diferenciales.

3.2 TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

- **Técnica documental:** permite para recopilar información necesaria y poder validar los conceptos sobre ondas viajeras, los mismos que fueron usados en el marco teórico del proyecto.
- **Técnica de campo:** es utilizada en la parte de implementación de los casos a estudiar en el laboratorio de Alta Tensión de la universidad, ya que las pruebas y datos obtenidos fueron realizados con equipos y elementos reales.

3.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

3.3.1 CIRCUITO GENERADOR DE IMPULSOS TIPO RAYO

- **Planteamiento del circuito**

El capacitor de impulso (C_s) es cargado por la fuente de voltaje continuo, cuando dicho capacitor ha alcanzado la tensión V_o , pasa a ser la fuente de tensión del circuito. El nivel de tensión de descarga V_o es controlado por la separación de los electrodos (SG) en el cual se crea un arco eléctrico que causa que la corriente fluya por la resistencia de frente de onda (R_d), en ese mismo instante se carga el capacitor C_b ; cuando ambos capacitores (C_s , C_b) alcanzan el mismo nivel de energía, estos se descargan a través de la resistencia de cola (R_e), la cual según su valor óhmico (mucho mayor que R_d) permite que se descargue en un mayor tiempo que el de frente de onda, siendo la principal responsable del tiempo de cola de la onda de impulso. (Aguirre Alonso & Villavicencio Vera, 2015, pág. 119)

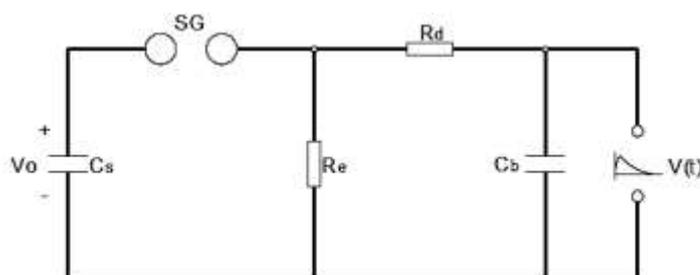


Ilustración 26. Circuito Generador de Impulsos tipo rayo
Fuente: (Aguirre Alonso & Villavicencio Vera, 2015)

- **Resolución de ecuaciones**

La resolución del circuito fue hallada por medio de las leyes de Kirchhoff y usando la transformada de Laplace; podemos observar que la ecuación obtenida (ver ecuación 13) es similar a la ecuación 1 que se explicó en la fundamentación teórica; que indicaba que la onda de impulso puede ser obtenida mediante la diferencia de dos exponenciales.

$$V(t) = \frac{V_0}{Rd.Cb} \cdot \frac{1}{(\alpha - \beta)} \cdot [exp^{-\beta t} - exp^{-\alpha t}]$$

Ecuación 13. Modelo matemático del generador de impulsos
Fuente: (Aguirre Alonso & Villavicencio Vera, 2015)

3.3.2 CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN RESISTENCIA

- **Planteamiento del circuito**

Se utilizó como fuente $V(t)$ la onda de impulso tipo rayo (ver ecuación 13) que simula una descarga atmosférica; la cual impacta sobre una línea de distribución (Z_c) y viaja a lo largo de la misma, hasta que se encuentra con una derivación resistiva (R).

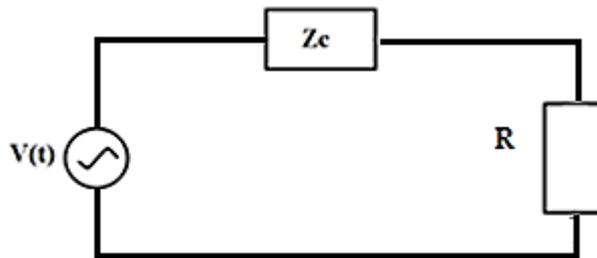


Ilustración 27. Circuito equivalente para una derivación resistiva
Fuente: Los autores

- **Resolución de ecuaciones**

Para resolver este circuito, se utilizó la ley de ohm ya que es un simple circuito resistivo, primero se halló la corriente total $i(t)$ que circula en el circuito;

$$i(t) = \frac{V(t)}{Z_c + R}$$

Ecuación 14. Corriente total del circuito
Fuente: Los autores

Para así poder hallar el voltaje en la impedancia de la línea (Z_c); el cual representa a la onda reflejada y la onda refractada que resulta de la suma entre la onda incidente, que representa la onda de impulso tipo rayo $V(t)$, y la onda reflejada que se obtuvo.

$$V_{Z_c}(t) = i(t) * Z_c$$

Ecuación 15. Voltaje en la línea con derivación resistiva
Fuente: Los autores

Estas ecuaciones fueron simuladas con la herramienta Simulink; la ecuación del voltaje de impulso se la simula y se la importa del workspace, para luego usar las ecuaciones 14 y 15 (ver ilustración 28).

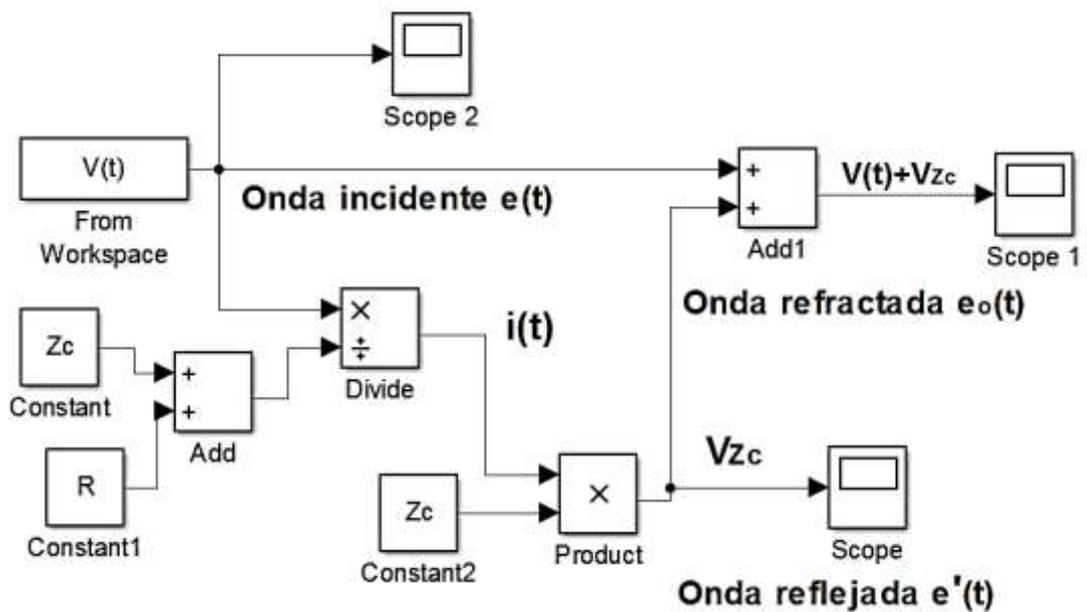


Ilustración 28. Modelo matemático de la onda reflejada y refractada en una derivación resistiva en Simulink
Fuente: Los autores

3.3.3 CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN CAPACITOR

- **Planteamiento del circuito**

De igual manera que en la derivación resistiva, se usó como fuente $V(t)$ la ecuación de impulso tipo rayo; la cual impacta sobre una línea de distribución (Z_c) y viaja a lo largo de la misma, hasta que se topa con una derivación capacitiva (C).

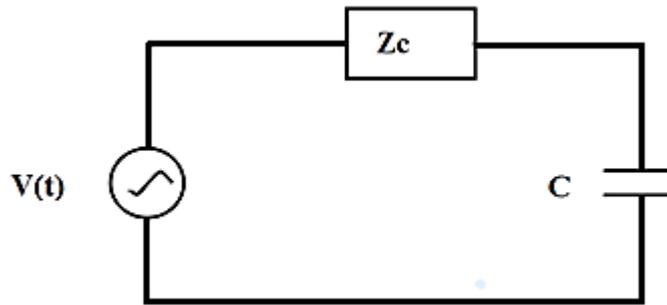


Ilustración 29. Circuito equivalente para una derivación en capacitancia
Fuente: Los autores

- **Resolución de ecuaciones**

Primero se realizó una ley de voltaje de Kirchhoff (ecuación 16), a dicha ecuación encontrada se la derivó para poder eliminar la integral que aparece por la fórmula del capacitor, luego se la dividió para Z_c y de esa manera se pueda obtener la corriente $i(t)$ que se necesita para hallar el voltaje en la línea (Z_c) que representa la onda reflejada.

$$-V(t) + i(t) * Z_c + \int \frac{1}{C} * i(t) dt = 0$$

Ecuación 16. Ley de voltaje sobre el circuito en derivación capacitiva
Fuente: Los autores

Al final quedó una EDO lineal no homogénea (ecuación 17) que para poder ser resuelta en Simulink (Ver ilustración 30), se expresó de la siguiente manera:

$$\frac{di(t)}{dt} = \frac{1}{Z_c} * \frac{dV(t)}{dt} - \frac{1}{Z_c * C} * i(t)$$

Ecuación 17. Corriente total del circuito en derivación capacitiva
Fuente: Los autores

La onda refractada es la suma entre la onda incidente, que es la onda de impulso tipo rayo $V(t)$ y la onda reflejada que se obtuvo hallando el voltaje en la línea Z_c .

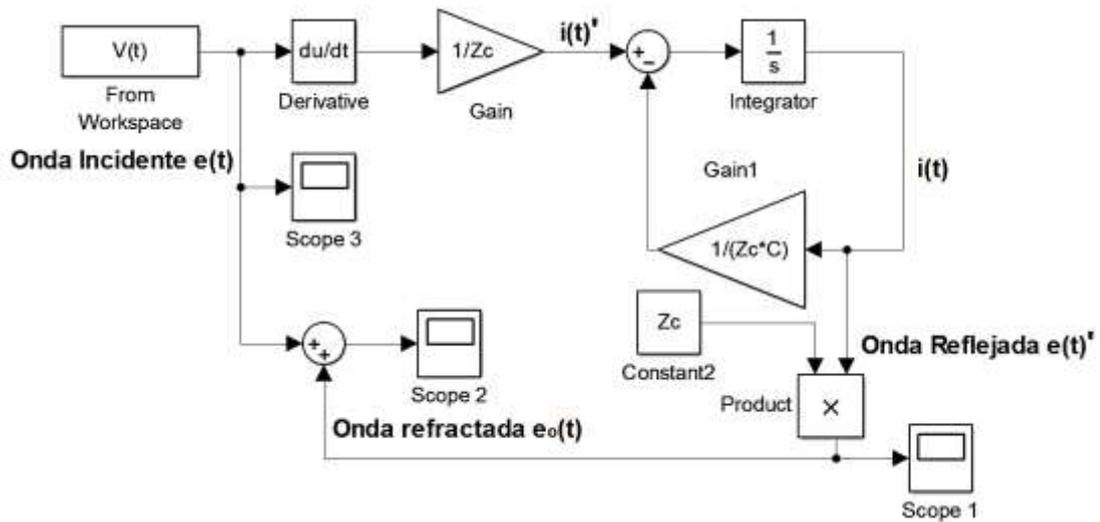


Ilustración 30. Modelo matemático de la onda reflejada y refractada en derivación capacitiva en Simulink
Fuente: Los autores

También se desarrolló de manera analítica la EDO lineal no homogénea de primer orden, a la que se expresó de la siguiente manera:

$$i(t)' + \frac{1}{Z_c * C} i(t) = \frac{1}{Z_c} * \frac{dV(t)}{dt}$$

Ecuación 18. EDO lineal no homogénea de primer orden
Fuente: Los autores

Donde la solución general de una EDO lineal no homogénea (ecuación 19) es igual a la suma entre la solución homogénea, que corresponde a $i(t)_H$, y la solución no homogénea o particular $i(t)_{NH}$

$$i(t) = i(t)_H + i(t)_{NH}$$

Ecuación 19. Solución general de una EDO lineal no homogénea
Fuente: Los autores

Solución Homogénea: Suponiendo que la solución tiene la forma $i(t) = e^{\lambda t}$, donde λ es un valor por determinar, dicha solución se derivó y se obtuvo $i(t)' = \lambda * e^{\lambda t}$, las mismas que se reemplazaron en la ecuación 18.

Factorizando se obtuvo $\lambda + \frac{1}{Z_c * C} = 0$ para así poder determinar $\lambda = -\frac{1}{Z_c * C}$

Como nuestra ecuación planteada (ecuación 18) es de primer orden la solución homogénea se expresa de la siguiente forma:

$$i(t)_H = e^{-\frac{1}{Zc * C}t} = K * e^{-\frac{1}{Zc * C}t}$$

Ecuación 20. Solución Homogénea
Fuente: Los autores

Solución no Homogénea: La solución homogénea correspondiente a la ecuación original (ecuación 18) es de coeficientes constantes, por lo tanto se usó el método de coeficientes indeterminados, y de acuerdo a la función se conoce que se debe hacer para obtener la solución particular de la no homogénea, en este caso es tipo exponencial; $i(t)_{NH} = C_1 e^{-\beta t} + C_2 e^{-\alpha t}$ por la forma de la función $V(t)$ (ver ecuación 13).

Así mismo, se derivó la solución particular de acuerdo al orden de la ecuación, en este caso primer orden y se obtuvo $i(t)'_{NH} = -\beta C_1 e^{-\beta t} - \alpha C_2 e^{-\alpha t}$; luego reemplazamos en la ecuación original (ecuación 18) y queda expresada de esta manera:

$$(-\beta C_1 e^{-\beta t} - \alpha C_2 e^{-\alpha t}) + \left(\frac{1}{Zc * C} * C_1 e^{-\beta t} + C_2 e^{-\alpha t} \right) = \frac{1}{Zc} \left(\frac{Vo}{Rd * Cb} * \frac{1}{(\alpha - \beta)} \right) (e^{-\beta t} - e^{-\alpha t})$$

Se agrupan términos semejantes para poder hallar los valores **C1** y **C2**:

$$C_1 = \frac{Vo * C}{(1 - \beta * Zc * C) * Rd * Cb * (\alpha - \beta)}$$

$$C_2 = \frac{Vo * C}{(1 - \alpha * Zc * C) * Rd * Cb * (\alpha - \beta)}$$

Se reemplaza los mismos en la solución particular $i(t)_{NH} = C_1 e^{-\beta t} + C_2 e^{-\alpha t}$:

$$i(t)_{NH} = \frac{Vo * C}{Rd * Cb * (\alpha - \beta)} * \left(\frac{e^{-\beta t}}{1 - \beta * Zc * C} + \frac{e^{-\alpha t}}{1 - \alpha * Zc * C} \right)$$

Ecuación 21. Solución particular o no homogénea
Fuente: Los autores

Ahora obtenida la solución homogénea y particular, reemplazamos en la solución general (ecuación 19) de una EDO lineal no homogénea:

$$i(t) = K * e^{-\frac{1}{Zc * C}t} + \frac{Vo * C}{Rd.Cb * (\alpha - \beta)} * \left(\frac{e^{-\beta t}}{1 - \beta * Zc * C} + \frac{e^{-\alpha t}}{1 - \alpha * Zc * C} \right)$$

Ecuación 22. Solución analítica de un circuito con derivación capacitiva
Fuente: Los autores

Donde:
$$K = i(0) = \frac{Vo * C * (\alpha * Zc * C + \beta * Zc * C - 2)}{Rd.Cb * (\alpha - \beta) * (1 - \beta * Zc * C) * (1 - \alpha * Zc * C)}$$

3.3.4 CIRCUITO CON DERIVACIÓN EN PARARRAYOS

- **Planteamiento del circuito**

Como fuente de voltaje se utilizó el voltaje de impulso tipo rayo, el mismo que impacta una línea de distribución representada con una resistencia Zc , la cual tiene una derivación en pararrayos, que es una resistencia no lineal y es representado por su modelo matemático como se indicó en la teoría (ver ecuación 12).

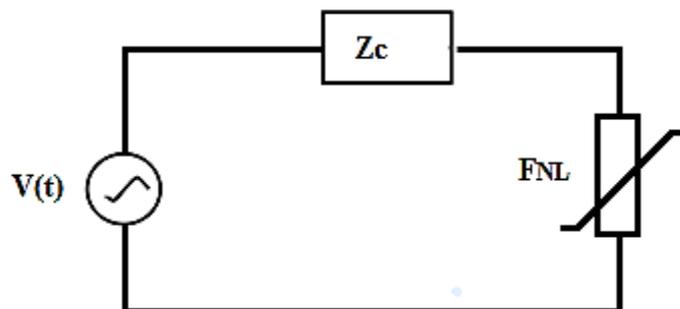


Ilustración 31. Circuito equivalente para una derivación en pararrayos
Fuente: Los autores

3.3.5 Resolución de ecuaciones

Para empezar se planteó una ley de voltaje de Kirchoff la cual permitió despejar la corriente del circuito, pero ya que el pararrayo está en función de la corriente (ecuación 24) se debió hallar la inversa de esta función no lineal, para así obtenerla en función del voltaje del pararrayo (ecuación 25).

$$-V(t) + Z_C * i(t) + F_{NL}(t)^{-1} = 0$$

Ecuación 23. Ley de voltaje en circuito con derivación con pararrayo
Fuente: Los autores

$$F_{NL}(t) = i(t) = \left(\frac{V}{V_0}\right)^\alpha * i_0$$

Ecuación 24. Pararrayo en función de la corriente
Fuente: Los autores

$$F_{NL}(t)^{-1} = V(t) = \left(\frac{i}{i_0}\right)^{\frac{1}{\alpha}} * V_0$$

Ecuación 25. Pararrayo en función del voltaje
Fuente: Los autores

Luego se procedió a despejar la corriente total del circuito, reemplazado la ecuación. 25 en la ley de voltaje (ecuación 23):

$$V(t) = Z_C * i(t) + i(t)^{\frac{1}{\alpha}} \left(\frac{V_0}{i_0^{\frac{1}{\alpha}}}\right)$$

De esa manera se halló la corriente y además se simula la misma con la herramienta Simulink (ver ilustración 32).

$$i(t) = \frac{V(t)}{Z_C} - \left(\frac{V_0}{Z_C * i_0^{\frac{1}{\alpha}}}\right) * i(t)^{\frac{1}{\alpha}}$$

Ecuación 26. Corriente total del circuito con derivación en pararrayos
Fuente: Los autores

De igual manera, se halló la onda reflejada que se obtiene hallando el voltaje en la línea Z_c y la onda refractada es la suma de la onda reflejada y la onda incidente, que representa la onda de impulso tipo rayo $V(t)$.

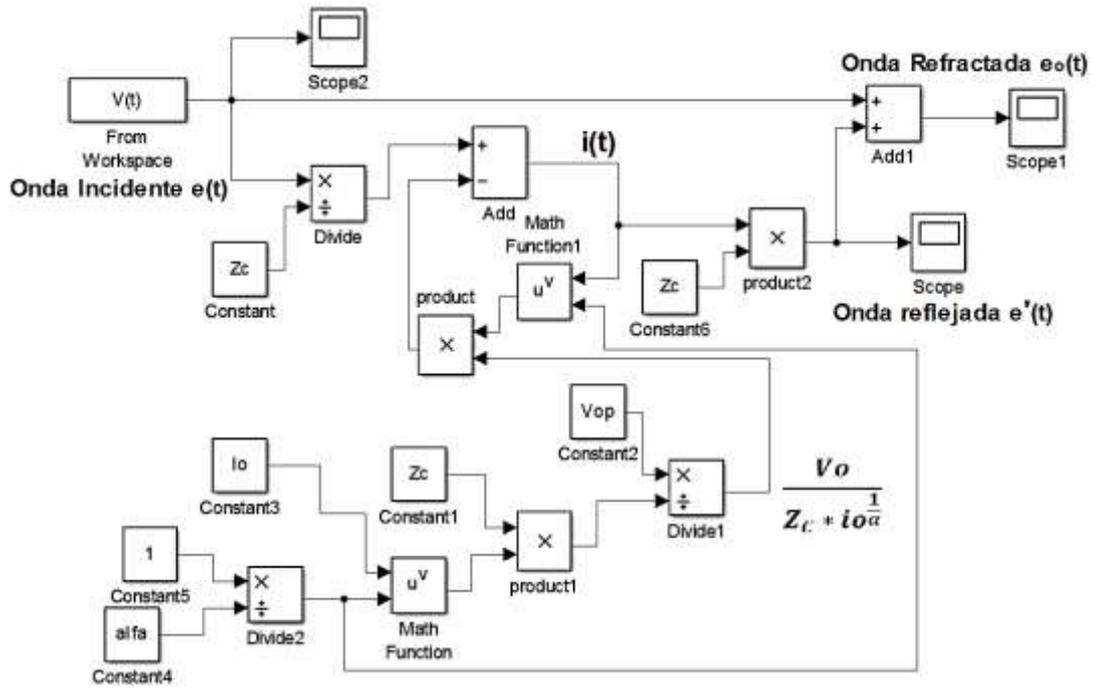


Ilustración 32. Modelo matemático del circuito con derivación en pararrayos
Fuente: Los autores

3.4 DESARROLLO EXPERIMENTAL Y SIMULACIÓN

3.4.1 GENERADOR DE IMPULSO TIPO RAYO

- **Simulación en MATLAB**

Para realizar la simulación del circuito de impulso (ver ilustración 33), se utilizó la herramienta Simulink, en la cual se ingresaron los valores de resistencia y capacitancia, para verificar que se cumpla los tiempos de frente y cola, magnitud de voltaje y eficiencia.

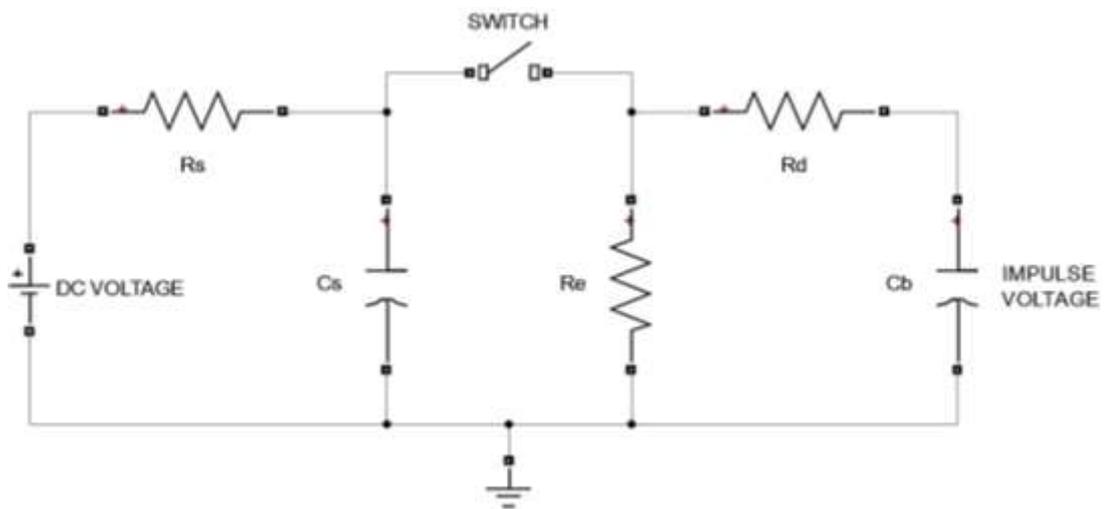


Ilustración 33. Circuito de impulso simulado en Simulink/Matlab
Fuente: Los autores

Este circuito genera un impulso de onda tipo rayo, que tiene una forma de onda $1.2/50\mu s$, donde $1.2\mu s$ es el tiempo de frente (T_1) que está definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo T entre el momento que el impulso va desde el 30 al 90% del valor cresta ; y $50\mu s$ (T_2) es el tiempo medio, el cual se define como el intervalo de tiempo entre el 30% del tiempo frente y el tiempo de cola en el cual la tensión ha descendido hasta el 50% del valor de cresta. (Bravo Carrasco, 2005, pág. 21)

Para probar el circuito se aplicó varios valores de voltaje DC (fuente) para poder observar la forma de onda del impulso (Ver ilustración 34), en la cual se verificó, que se cumplan los periodos de tiempo de frente y cola de la onda que son $1.2/50\mu s$ y la eficiencia (ver tabla 6).

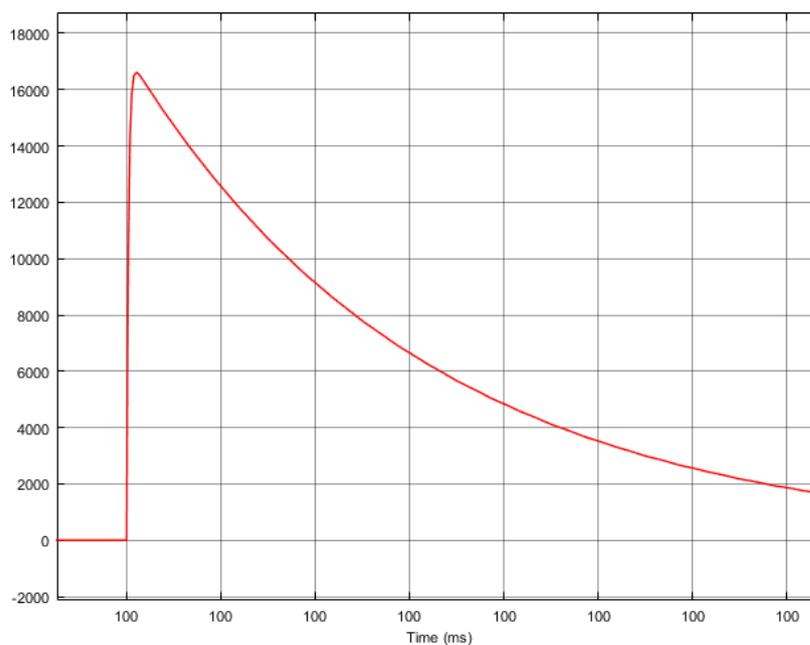


Ilustración 34. Forma de onda del impulso en Simulink/Matlab
Fuente: Los autores

En la tabla 6 se registraron algunos datos teóricos como el tiempo de frente y cola, eficiencia, voltaje de impulso, etc.

VOLTAJE DC (KV)	VOLTAJE DE IMPULSO (KV)	T1 (us)	T2 (us)	η
5	4,617	1,303	50,463	0,9234
8,5	7,84	1,248	51,084	0,9224
10	9,234	1,452	49,685	0,9234
15	13,851	1,521	50,123	0,9234
20	18,467	1,331	49,586	0,9234
25	23,084	1,298	50,981	0,9234
30	27,701	1,257	50,556	0,9234
PROMEDIO		1,3603	50,232	0,9234

Tabla 6. Valores teóricos obtenidos del circuito generador de impulsos en Simulink
Fuente: Los autores

▪ **Implementación del circuito en el Laboratorio**

El circuito de impulso (ver ilustración 35) se lo implementó en el laboratorio, tomando en cuenta las normas de seguridad del laboratorio y se procedió a tomar valores de voltajes, corriente, eficiencia, etc.



Ilustración 35. Circuito de Impulso implementado en el Laboratorio
Fuente: Los autores

En la tabla 7 se muestran valores obtenidos durante las pruebas, vemos que a medida que aumenta la distancia de las esferas, la magnitud del impulso aumenta y viceversa.

s (mm)	V_{BT} (V)	I_{BT} (A)	VDC_{AT}	$VPULSE_{AT}$	η
5	33	0.4	18.95	11.65	0.61477573
	33	0.4	18.95	11.62	0.61319261
	33	0.4	18.99	11.62	0.611901
PROMEDIO	33	0.4	18.96	11.63	0.61
10	60	0.8	33.16	29.03	0.87545235
	60	0.8	33.22	31.87	0.95936183
	60	0.8	33.15	31.81	0.95957768
PROMEDIO	60	0.8	33.18	30.90	0.93
15	87	1.1	47.49	40.06	0.84354601
	88	1.1	47.65	40.63	0.85267576
	88	1.1	47.8	40.49	0.84707113
PROMEDIO	87.67	1.1	47.65	40.39	0.85
20	113	1.5	59.93	58.1	0.96946438
	114	1.5	59.57	58	0.97364445
	114	1.5	59.69	57.9	0.97001173
PROMEDIO	113.67	1.5	59.73	58	0.97

Tabla 7. Generación de Voltajes de impulsos a vacío
Fuente: (Aguirre Alonso & Villavicencio Vera, 2015)

La forma de onda del impulso, en la práctica, también se cumple al igual que en la simulación; respetando los tiempos de frente y cola ($T1 \times T2$) 1.2/50 us respectivamente (ver ilustración 36).

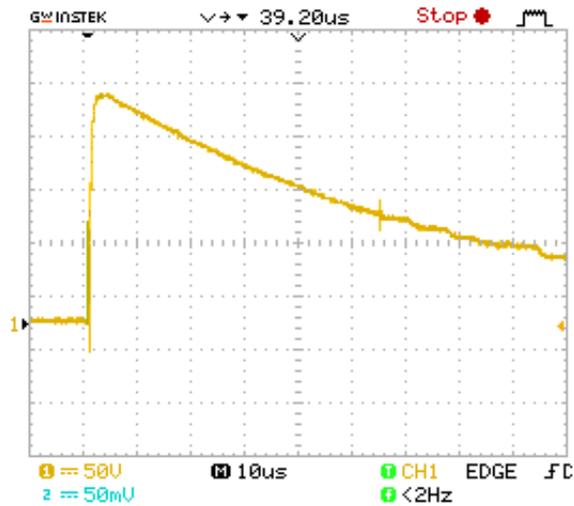


Ilustración 36. Voltaje de impulso obtenido del osciloscopio
Fuente: Los autores

En la tabla 8 se muestra los valores obtenidos de forma experimental, con una separación de las esferas de 2.5 milímetros para poder generar un impulso de aproximadamente de 8 KV y también se tomaron los valores de tiempo.

s (mm)	Fuente DC (KV)	Voltaje de Impulso (KV)	T1 (us)	T2 (us)	η
2.5	10,48	7,49	1,233	50,25	0,715
	11,24	7,51	1,564	50,01	0,668
	10,29	7,84	1,412	49,68	0,762
	10,47	7,25	1,335	50,34	0,692
PROMEDIO	10,62	7,52	1,39	50,07	0,71

Tabla 8. Valores experimentales obtenidos del circuito generador de impulsos en el laboratorio
Fuente: Los autores

3.4.2 DERIVACIÓN EN RESISTENCIA

- **Simulación en MATLAB**

Para esta terminación se usa como fuente el circuito generador de impulsos, al cual se le agregó dos elementos, impedancia de la línea (Z) y la terminación resistiva (R).

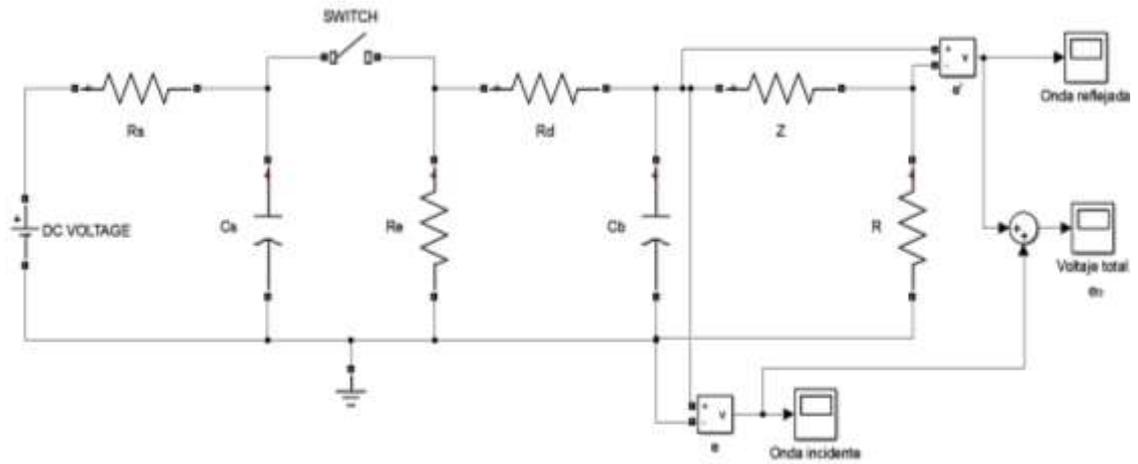


Ilustración 37. Circuito con derivación resistiva en Simulink
Fuente: Los autores

Se midió la onda incidente (e) y la onda refleja (e'), para luego observar el voltaje total (e_o), el cual se halla sumando las dos anteriores como se mencionó anteriormente en la ecuación 6, que en este caso sería la onda refractada o voltaje total (ver ilustración 37). Se generaron varios impulsos de voltajes de impulso y se registraron valores en la tabla 9. Podemos observar en la ilustración 38 el comportamiento que tiene la onda incidente y reflejada.

VOLTAGE DC (KV)	Onda Incidente - e (KV)	Onda reflejada - e' (KV)	Onda Refractada - e_o (KV)
5	4,617	0.1591	4.776
8.5	7.840	0.2703	8.111
10	9,234	0.3184	9.552
15	13,851	0.4776	14.328
20	18,467	0.6368	19.104

Tabla 9. Valores obtenidos de la derivación en resistencia simulada en Simulink
Fuente: Los autores

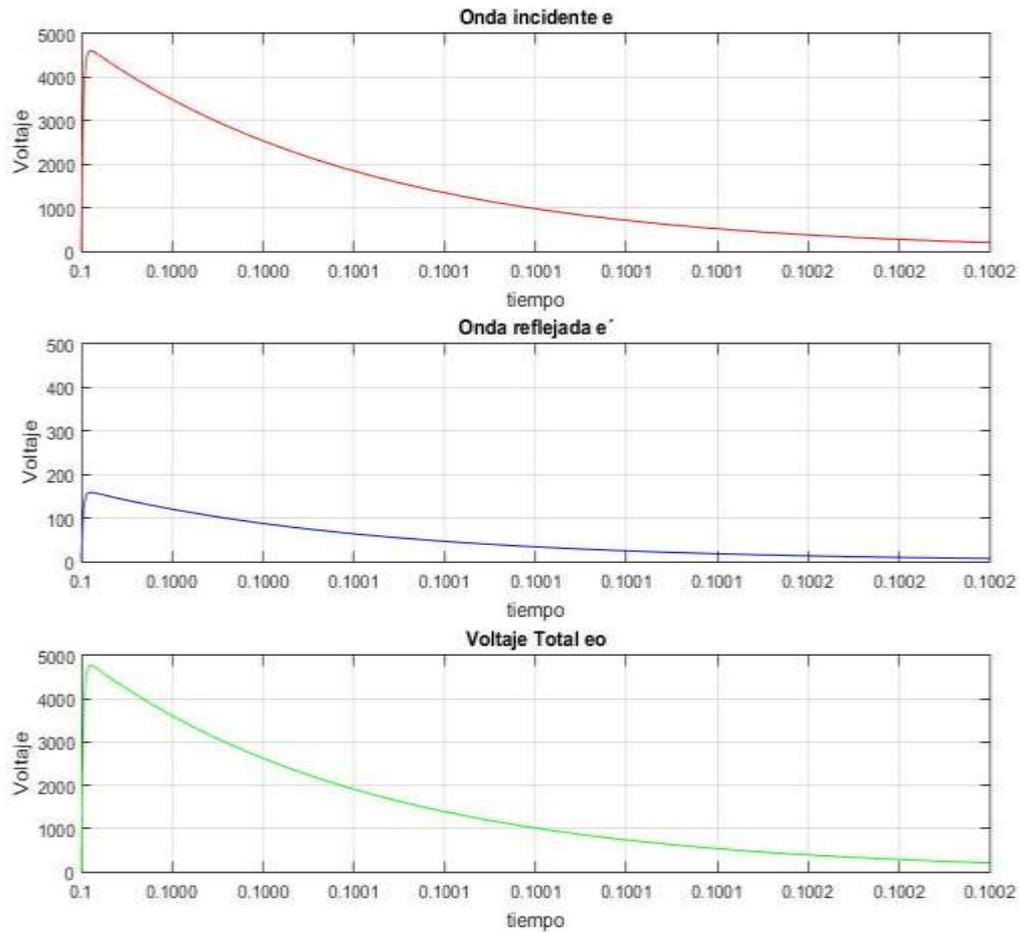


Ilustración 38. Formas de onda en derivación resistiva simulados en MATLAB
Fuente: Los autores

- **Implementación del circuito en el laboratorio**

Como se explicó en la teoría, para poder implementar el circuito equivalente de la derivación resistiva (ver ilustración 39), se utilizó como fuente el voltaje de impulso tipo rayo, la impedancia de la línea se la reemplazó con una resistencia de $10\text{ M}\Omega$, y la terminación resistiva con una resistencia de $280\text{ M}\Omega$.



Ilustración 39. Circuito con derivación resistiva montado en el laboratorio
Fuente: Los autores

Al igual que en la simulación en Matlab/Simulink, se observa que la forma de onda reflejada (ver ilustración 40) es positiva, ya que según la teoría, si usamos el factor de reflexión (ver ecuación 2); y reemplazamos los valores, obtendremos una onda positiva o negativa, según sea el caso, además el voltaje de impulso fue de aproximadamente 8 KV.

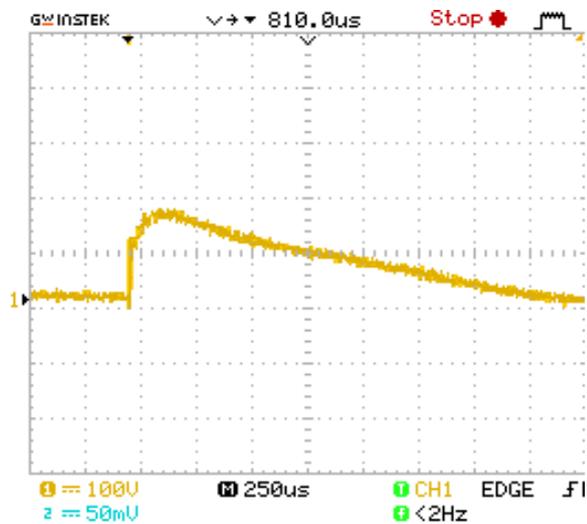


Ilustración 40. Onda reflejada en derivación resistiva vista desde el osciloscopio
Fuente: Los autores

La onda incidente y reflejada se las midió usando un PT (transformador de potencial) y un osciloscopio, luego se registraron algunos datos tabulados obtenidos del osciloscopio los cuales se pueden observar en la tabla 10.

PARAMETRO	VALOR EXPERIMENTAL (KV)
Onda Incidente - e	7.52
Onda reflejada - e'	0.27747
Voltaje Total - e_o	7.7975

Tabla 10. Datos experimentales en derivación resistiva
Fuente: los autores

3.4.3 DERIVACIÓN EN CAPACITOR

- **Simulación en MATLAB**

El desarrollo es similar que la terminación resistiva, solamente se cambia el punto de transición o derivación por capacitor (C), de ahí se mantiene la fuente que es el circuito generador de impulsos y la impedancia de la línea (Z). (Ver ilustración 41).

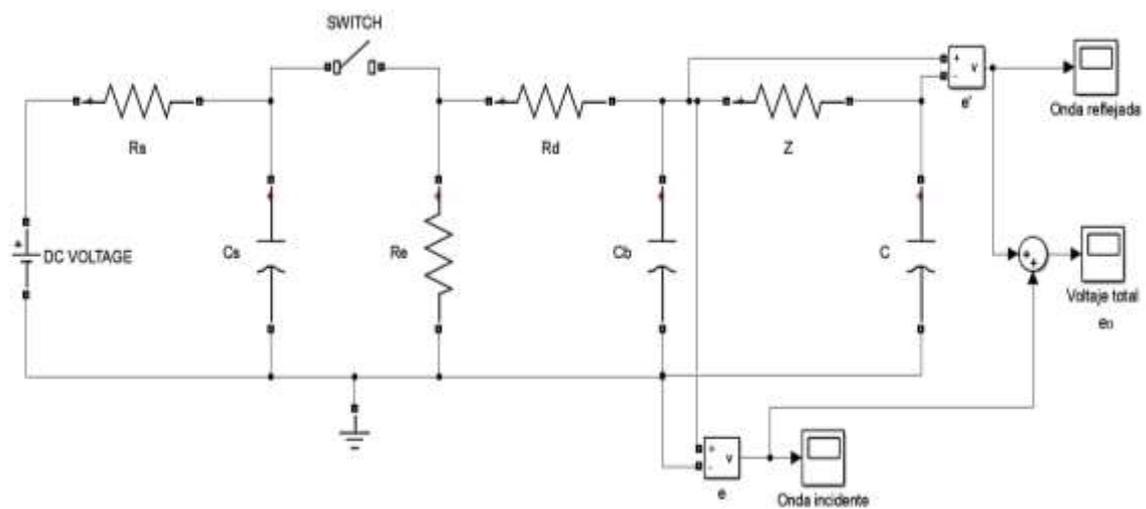


Ilustración 41. Circuito con derivación capacitiva en Simulink
Fuente: Los autores

Al simularlo se pudo observar la onda incidente (e) y onda reflejada (e'), para poder hallar el voltaje total (e_o), que sería la onda refractada. Como se mencionaba en la parte teórica, podemos observar una onda reflejada negativa y la onda refracta sería aproximadamente el doble de la onda incidente (Ver ilustración 42).

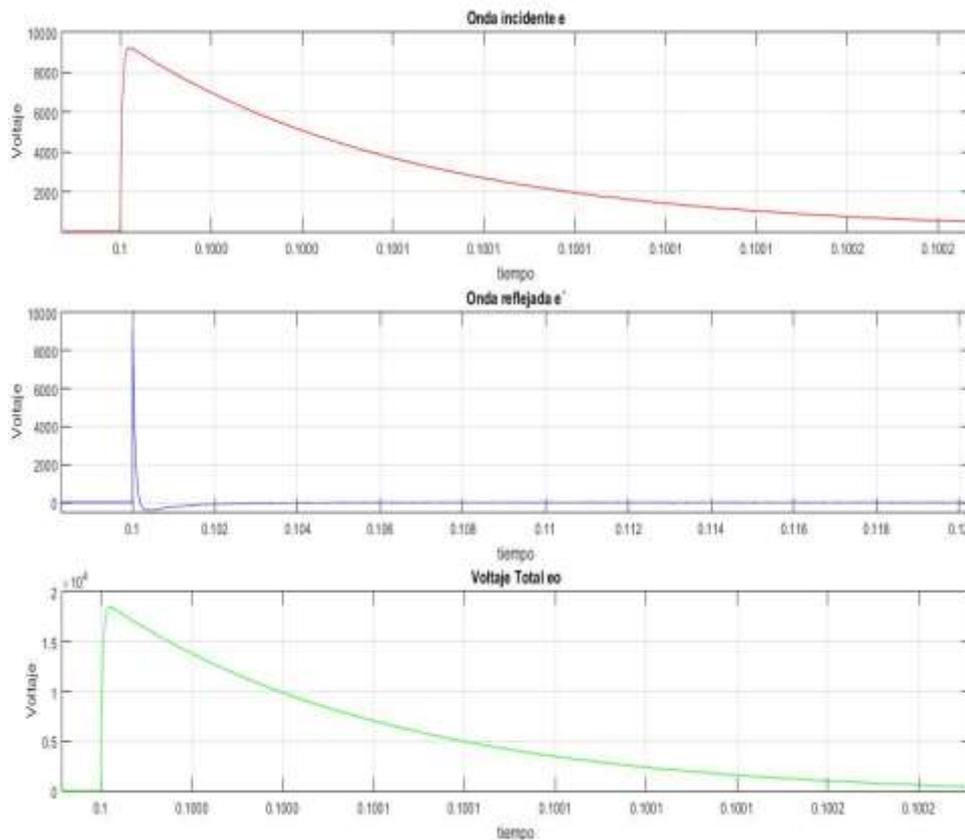


Ilustración 42. Formas de onda en derivación capacitiva en Simulink
Fuente: Los autores

Así mismo, se generaron varios voltajes de impulsos y se procedió a tomar algunos datos teóricos como la onda reflejada e incidente.

VOLTAGE DC (KV)	Onda Incidente - e (KV)	Onda reflejada - e' (KV)		Voltaje Total - e_o (KV)
		Max.	Min.	
5	4,61	4,601	-0.21069	9.211
8.5	7.837	7,822	-0.35817	15.659
10	9,22	9,203	-0.42186	18.422
15	13,83	13,804	-0.63207	27.634
20	18,441	18,405	-0.84277	36.845

Tabla 11. Valores obtenidos de la derivación en capacitancia simulada en Simulink
Fuente: Los autores

- **Implementación del circuito en el laboratorio**

Para la implementación del circuito con derivación capacitiva se usó la misma impedancia de línea de $10\text{ M}\Omega$, y el valor de capacitor que se usó fue de 100 pF , de igual forma se usó el osciloscopio y el PT para poder medir y observar las ondas.



Ilustración 43. Circuito con derivación capacitiva montado en el laboratorio
Fuente: Los autores

De la misma manera que en la simulación, se obtuvo una onda reflejada negativa (ver ilustración 44), la cual se midió en la impedancia de la línea. Se generó un voltaje de impulso de aproximadamente 8 KV y se tomaron algunos valores que fueron promediados. (Ver tabla 12).

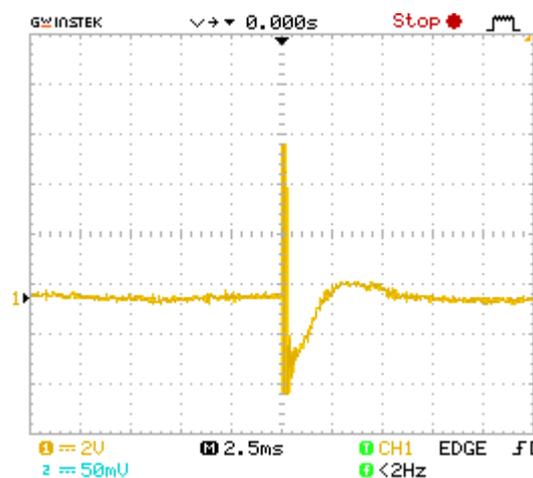


Ilustración 44. Onda reflejada en terminación capacitiva vista desde el osciloscopio
Fuente: Los autores

PARAMETRO	VALOR EXPERIMENTAL (KV)
Onda Incidente - e	7.58
Onda reflejada - e'	
Voltaje Max.	8.007
Voltaje Min.	0.31079
Voltaje Total - e_o	15.527

Tabla 12. Datos experimentales en derivación capacitiva
Fuente: Los autores

3.4.4 DERIVACIÓN EN PARARRAYO

- Simulación en MATLAB

Para simular un pararrayo, o resistencia no lineal, vamos a utilizar un elemento ya desarrollado por el software de Matlab (ver ilustración 45). De igual forma vamos a utilizar como fuente el voltaje de impulso, como impedancia de la línea la resistencia de 10 M Ω y en la derivación o terminación el elemento no lineal.

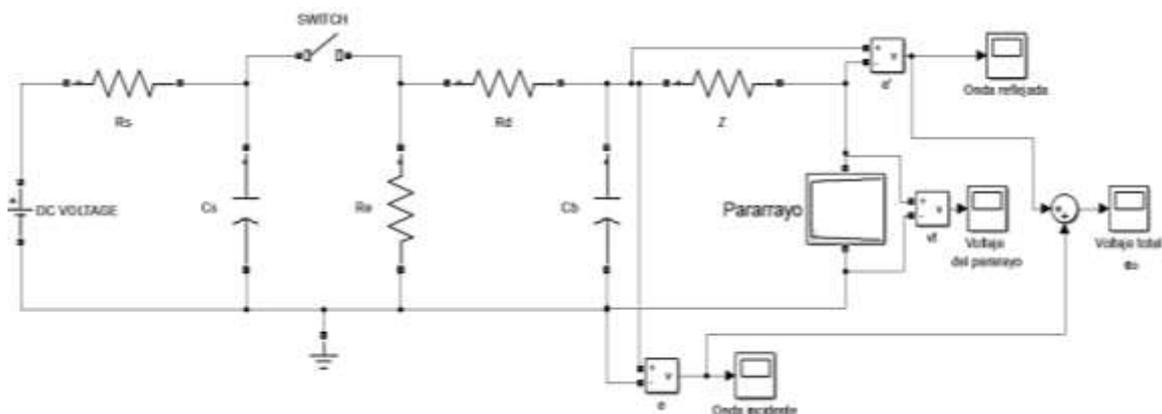


Ilustración 45. Circuito con derivación en pararrayos en Simulink
Fuente: Los autores

La simulación del circuito consiste en generar un impulso de voltaje en una línea de distribución, y poder observar la onda refractada que sería el voltaje drenado por el pararrayo el cual se refleja por la línea y así mismo hallar la onda refractada. El pararrayo tiene un voltaje nominal de 10 KV y un voltaje de operación de 8.4 KV, por lo tanto se generaron algunos voltajes para poder observar las formas de onda (ver ilustración 46).

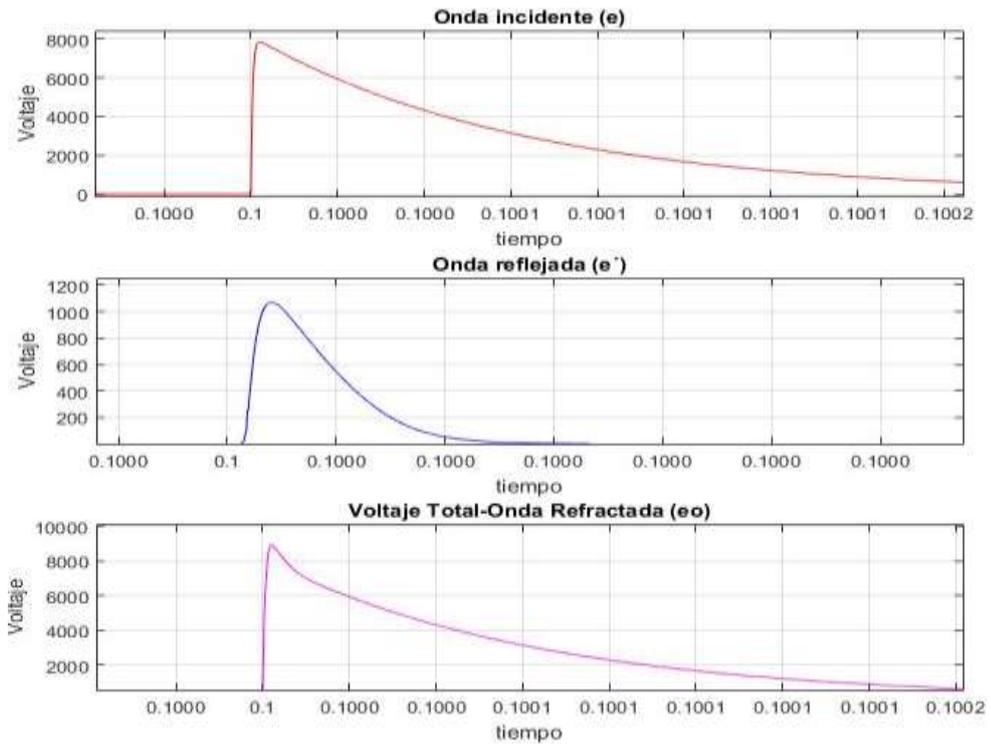


Ilustración 46. Formas de onda en derivación con pararrayo en Simulink
Fuente: Los autores

Cuando se genera un voltaje por encima del límite de protección del pararrayo, este drena esa sobretensión y la forma de onda que se genera en el pararrayo la podemos observar en la gráfica 47. En la tabla 13 se generaron algunos voltajes de impulso y se registraron algunos datos teóricos.

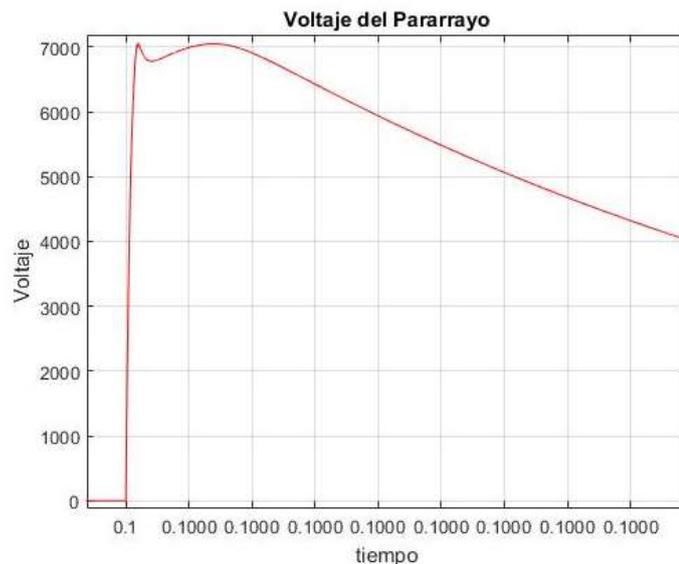


Ilustración 47. Forma de onda en el pararrayo obtenido en Simulink
Fuente: Los autores

VOLTAGE DC (KV)	Onda Incidente - e (KV)	Onda reflejada - e' (KV)	Voltaje Total - e_o (KV)	Voltaje del Pararrayo (KV)
7.5	6.926	0.050487	6.975	6.885
8	7.388	0.34852	7.736	7.048
8.5	7.849	1.069	8.918	7.060
9	8.311	1.967	10.278	7.068

Tabla 13. Valores obtenidos de la derivación en pararrayo simulado en Simulink
Fuente: Los autores

▪ Implementación del circuito en el laboratorio

De igual forma que los anteriores escenarios, para la implementación del circuito con derivación en pararrayos se usó la misma impedancia de línea de $10\text{ M}\Omega$, y se agregó el pararrayo que tiene sus propias características de fábrica, de igual forma se usó el osciloscopio y el PT para poder medir y observar las ondas (ver ilustración 48).

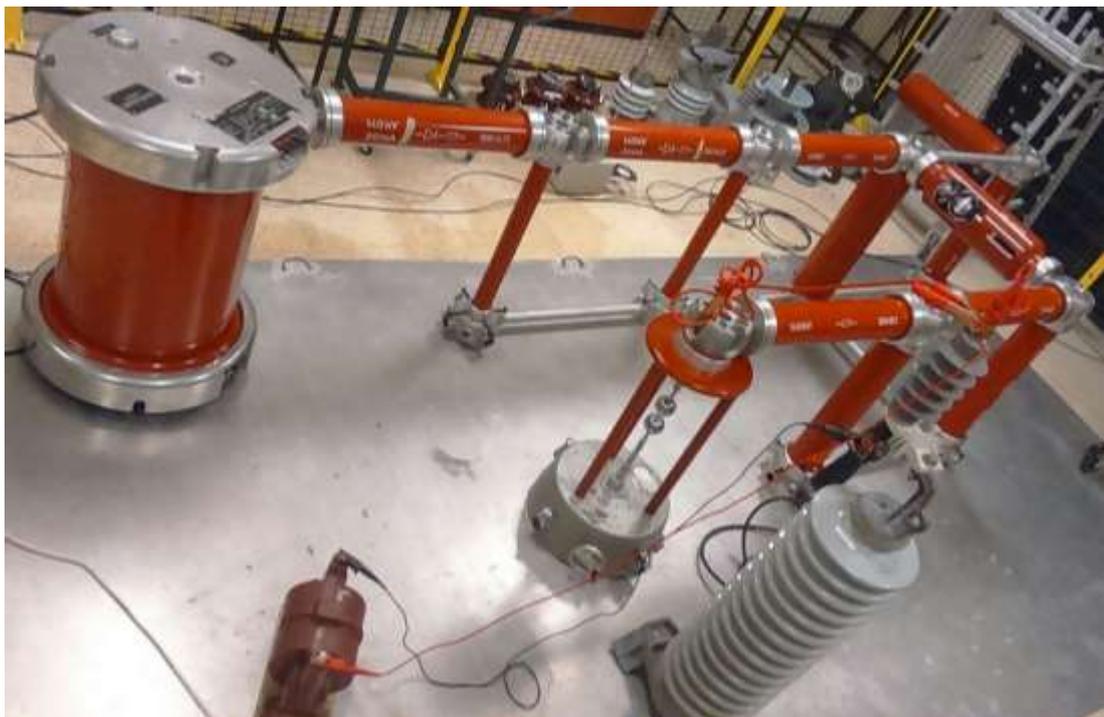


Ilustración 48. Circuito con derivación en pararrayo montado en el laboratorio
Fuente: Los autores

Se generó un voltaje de impulso de aproximadamente 8 KV , que es nuestra onda incidente, y se midió la onda reflejada, que en este caso, es el voltaje drenado por el pararrayo (ver ilustración 49); también se puede observar la forma de onda que se generó en el pararrayo (ver ilustración 50).

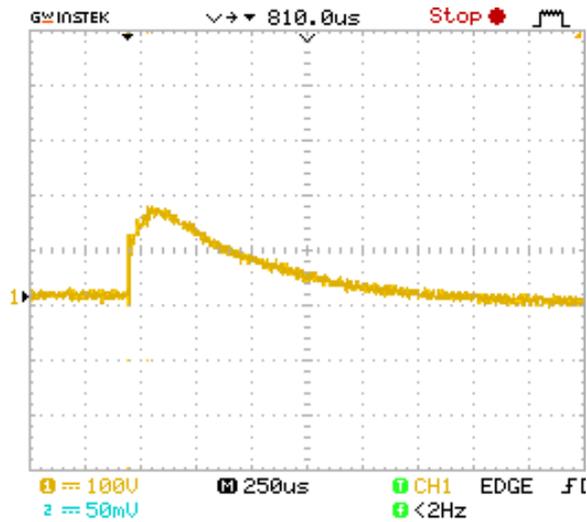


Ilustración 49. Onda reflejada en derivación con pararrayo obtenida desde el osciloscopio
Fuente: Los autores

En la tabla 14 se registraron algunos datos experimentales que fueron tabulados como son la onda incidente, la onda reflejada y la onda refractada, que lo hemos denominado voltaje total.

PARAMETRO	VALOR EXPERIMENTAL (KV)
Onda Incidente - e	7.64
Onda reflejada - e'	1.1195
Voltaje Total - e_o	8.760
Voltaje del Pararrayo	6.8507

Tabla 14. Datos experimentales en derivación con pararrayo
Fuente: Los autores

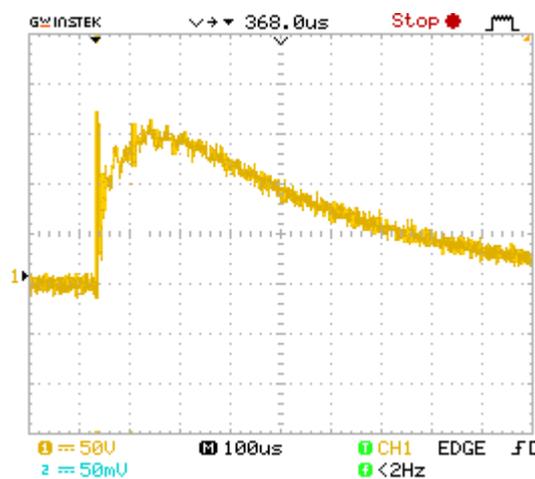


Ilustración 50. Forma de onda en el pararrayo obtenida desde el osciloscopio
Fuente: Los autores

CAPÍTULO IV

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Las redes de distribución o equipos eléctricos están expuestos a sobretensiones que se originan por fallas, maniobras o descargas atmosféricas que pueden afectar su aislamiento y pueden provocar fallas en el sistema. El estudio de sobretensiones y selección de equipos de protección o aislamiento se denomina “coordinación de aislamiento”. (Martínez, 2013, pág. 1)

Este trabajo de titulación se basó en analizar y modelar matemáticamente como una descarga atmosférica impacta sobre una línea de la red de distribución, la cual genera sobretensiones, denominadas ondas viajeras, las cuales se propagan en ambos sentidos de la línea (efecto de refracción y reflexión) y de esta manera los distintos medios de protección puedan ser seleccionados y ubicados de manera correcta y cumplan con su función.

4.1. PLANTEAMIENTO Y RESOLUCIÓN DE CIRCUITOS POR CADA CASO DE ESTUDIO.

En esta sección se menciona de qué manera se plantearon los circuitos y como fueron resueltos para poder obtener los diferentes tipos de onda.

4.1.1. Circuito generador de impulsos tipo rayo.

El circuito generador de impulso, está representado por un arreglo de elementos eléctricos, los cuales generan un voltaje de impulso tipo rayo. Los tiempos de frente y cola de la onda se logran mediante la manipulación de los parámetros a y b que se mencionaron en la teoría, que son funciones exponenciales de carga y descarga.

Se verificó que el modelo matemático del circuito generador de impulsos resultó ser igual a una diferencia de exponenciales como se mencionaba en el marco teórico, el circuito fue resuelto mediante leyes de Kirchhoff y Ohm, además de usar la transformada de Laplace, la cual fue obtenida por Aguirre Alonso & Villavicencio Vera (2015).

4.1.2. Circuitos con diferentes tipos de derivaciones.

En el desarrollo de este trabajo se plantearon tres escenarios de prueba, una con derivación resistiva, capacitiva y en pararrayos; los cuales son muy similares ya que usan la misma fuente, que representa una onda tipo rayo o voltaje de impulso, una línea de transmisión en el cual el rayo o descarga atmosférica se impacta, la cual fue representada por una resistencia y por último, el elemento a prueba o derivación que son representados por la resistencia, el capacitor y el pararrayo.

En la derivación con resistencia, se planteó un circuito R y se lo resolvió de usando la ley de ohm, que permitió hallar la corriente total del mismo y así poder calcular el voltaje en la línea Z_c , que representa la onda reflejada, además de obtener la onda refractada.

En la derivación con capacitor, se planteó un circuito RC y se procedió a resolver mediante las leyes de voltaje de Kirchhoff, se obtuvo una EDO lineal no homogénea de primer orden, la que permitió hallar la corriente total y así mismo poder calcular el voltaje en la línea Z_c , que representa la onda reflejada, y de igual forma la onda refractada.

Y por último, la derivación en pararrayos se planteó un circuito que se resolvió de manera algebraica, ya que el pararrayo es una resistencia no lineal que tiene su propio modelo matemático y viene dado por varios valores definidos, de la misma manera que los otros escenarios se halló el voltaje en la línea Z_c (onda reflejada) y la onda refractada.

4.2. SIMULACIÓN Y PRUEBA DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Todos los escenarios que a continuación se muestran, fueron modelados con la herramienta Simulink del software Matlab para probar de manera teórica los casos de estudio, además se registraron valores experimentales y teóricos para poder calcular el porcentaje de error se usó la fórmula del error relativo.

$$Error\ Relativo = \left| \frac{Valor\ teórico - Valor\ experimental}{Valor\ teórico} \right| * 100$$

Para medir las ondas se utilizó PT con una relación de transformación de 115 y un osciloscopio para poder visualizar las ondas.

4.2.1. Voltaje de Impulsos tipo rayo.

En la tabla 15 se muestran los porcentajes de error que fueron comparados con los valores teóricos y experimentales, se obtuvo un porcentaje alto en el uso de la fuente DC, ya que en la práctica la magnitud se regula mediante la separación de los explosores o esferas.

PARAMETRO	VALOR TEORICO (KV)	VALOR EXPERIMENTAL (KV)	ERROR (%)
Fuente DC	8,50	10,62	24,94
Voltaje de Impulso	7,84	7,52	4,081
Frente de onda (T1)	1,36	1,39	2,205
Cola de onda (T2)	50,23	50,07	0,31

Tabla 15. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito generador de impulsos
Fuente: Los autores

En la ilustración 51 se puede observar la onda incidente o voltaje de impulso, denominada onda tipo rayo normalizado, en la que se compara la onda obtenida experimental que es la onda de color negro y en la parte teóricamente, la onda de color rojo; para contrastar el error obtenido durante las tabulaciones con los datos obtenidos.

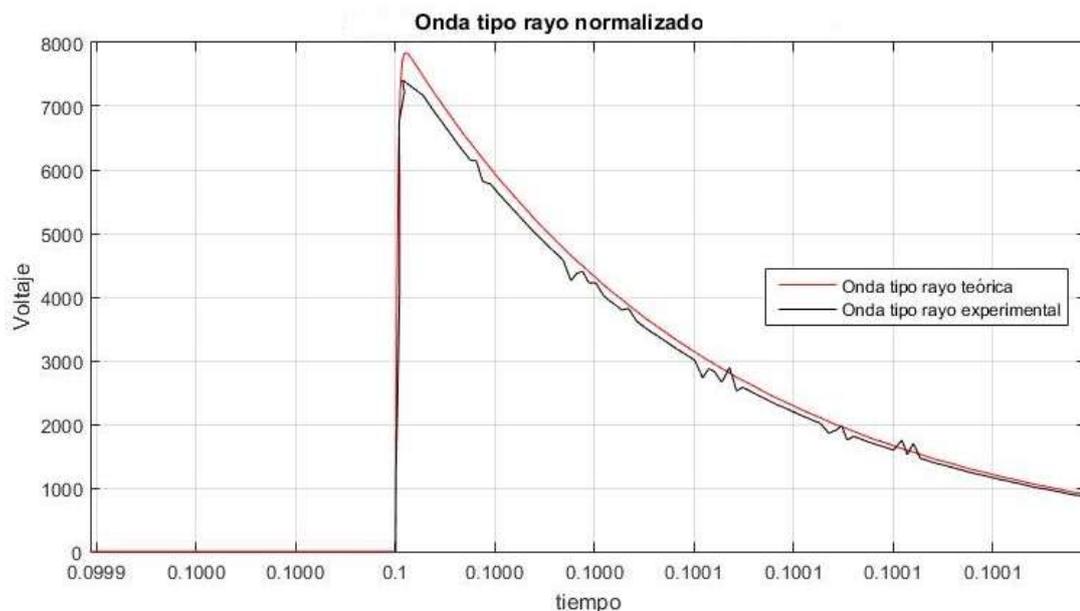


Ilustración 51. Comparación de gráficas teórica y experimental del circuito generador de impulsos
Fuente: Los autores

4.2.2. Ondas viajeras con derivación en resistencia

En la tabla 16 se muestran los porcentajes de error que fueron comparados con los valores teóricos y experimentales.

PARAMETRO	VALOR TEÓRICO (KV)	VALOR EXPERIMENTAL (KV)	ERROR (%)
Onda Incidente	7,849	7,52	4,1916
Onda reflejada	0,27066	0,27747	2,5161
Onda refractada (Voltaje Total)	8,120	7,7975	3,9717

Tabla 16. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación resistiva
Fuente: Los autores

Se aplicó una onda tipo rayo (onda incidente) de 7.52 KV en una línea de distribución de 10 MΩ, se obtuvo una onda reflejada de 277.47 V y una onda refractada de 7.79 KV, los cuales se asemejan a los datos experimentales.

Se demuestra como dependiendo del valor de impedancia de las líneas la magnitud de la onda reflejada varía; es decir, a medida que aumenta la impedancia de la línea, la onda reflejada aumenta, lo cual descarta el uso del factor de reflexión. El porcentaje de error promedio obtenido entre los valores experimentales con los teóricos fue de aproximadamente 3.55%.

En las ilustraciones 52, 53 y 54 se muestran las formas de onda obtenidas con datos teóricos de la onda incidente (color rojo), onda reflejada (color azul) y onda refractada (color magenta); las cuales se comparan con las ondas obtenidas con valores experimentales y están de color negro.

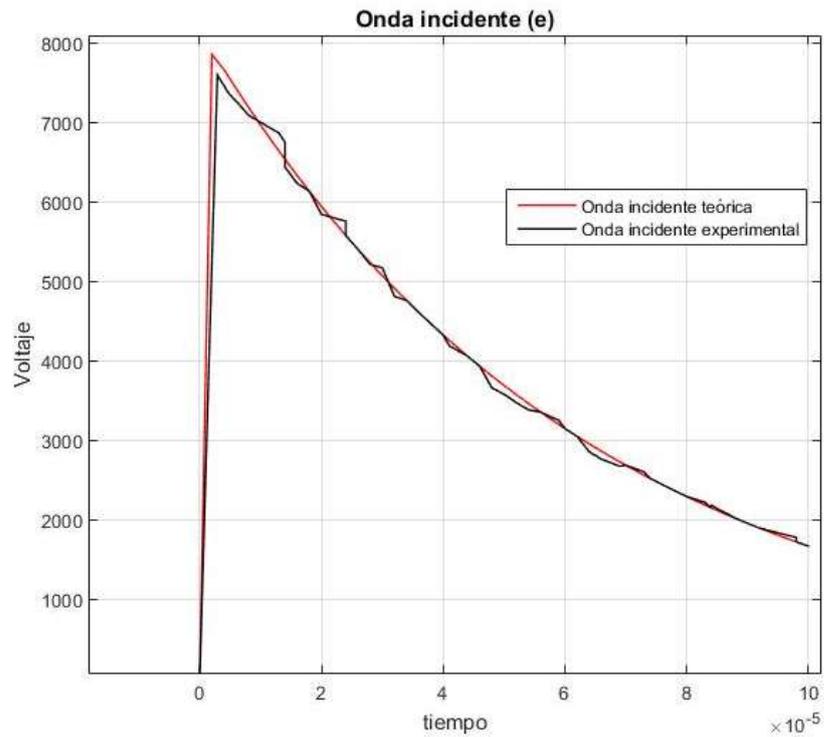


Ilustración 52. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación resistiva
 Fuente: Los autores

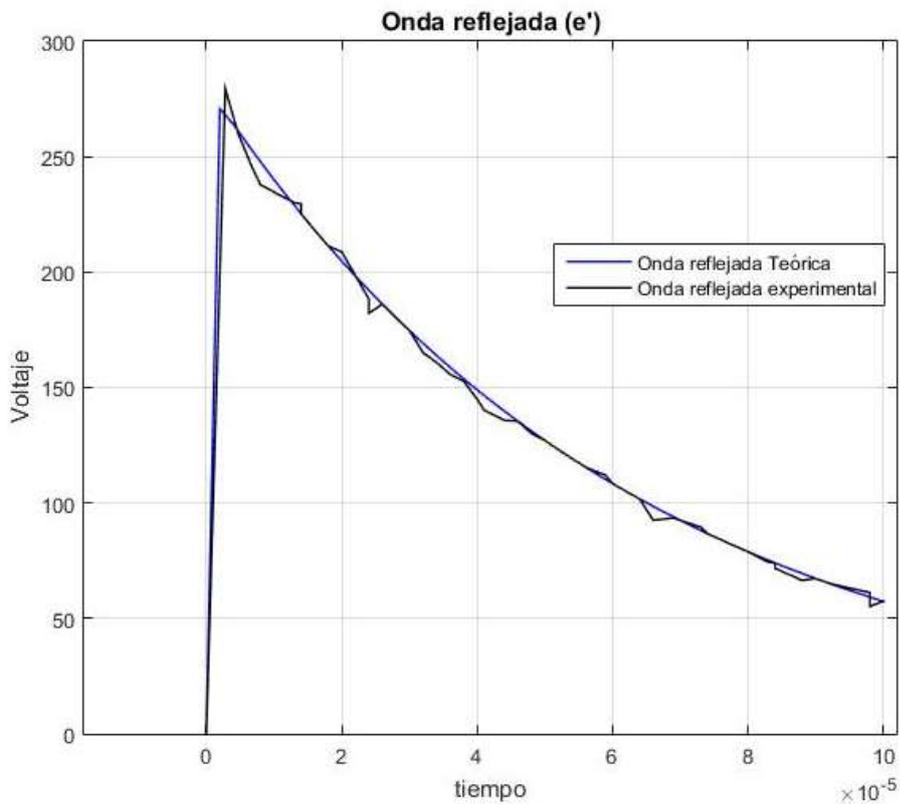


Ilustración 53. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación resistiva
 Fuente: Los autores

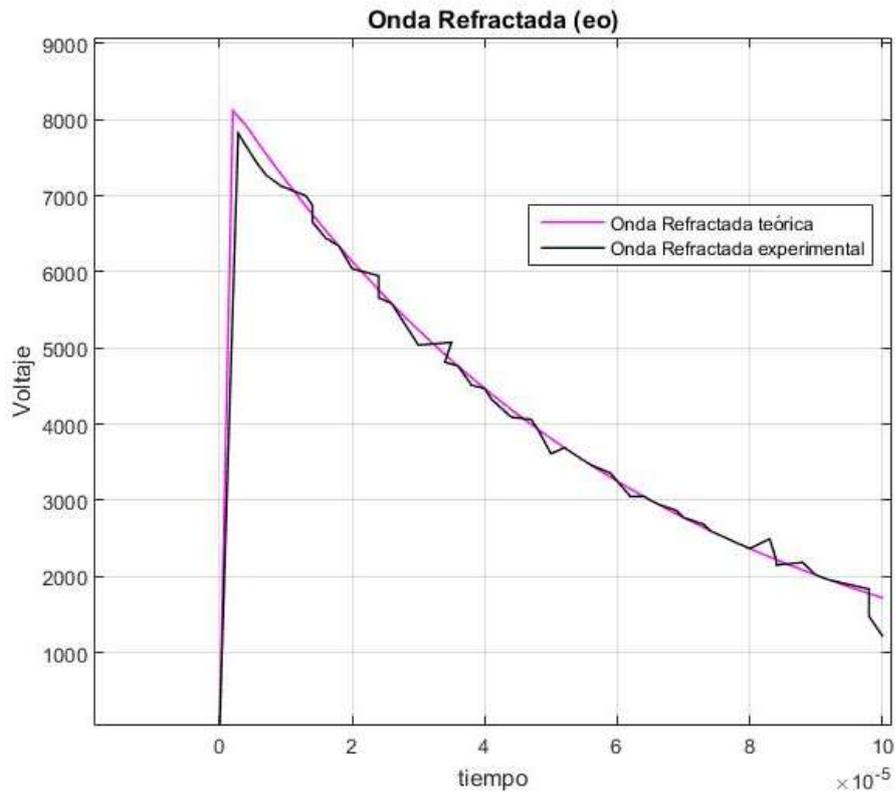


Ilustración 54. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación resistiva

Fuente: Los autores

4.2.3. Ondas viajeras con derivación en capacitor.

En la tabla 17 se muestran los porcentajes de error que fueron comparados con los valores teóricos y experimentales.

PARAMETRO	VALOR TEÓRICO (KV)	VALOR EXPERIMENTAL (KV)	ERROR (%)
Onda Incidente	7,838	7,58	3,292
Onda reflejada			
Voltaje Max.	7,822	8,007	2,365
Voltaje Min.	0,29326	0,31079	5,978
Onda refractada (Voltaje Total)	15,812	15,527	1,802

Tabla 17. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación capacitiva

Fuente: los autores

Se aplicó una onda incidente de 7.58 KV, la cual generó una onda reflejada de 310.79 V y una onda refractada de casi el doble que la incidente de 15.52 KV, los cuales se asemejan a los valores teóricos.

Se verificó que debido al funcionamiento de un capacitor su onda reflejada es negativa, la cual aumenta si se disminuye la capacitancia, y viene acompañada de la onda incidente; y la onda refractada o transmitida es el doble de la onda incidente. El porcentaje de error promediado con los valores experimentales y teóricos fue de aproximadamente 3.36%.

De igual manera, en las ilustraciones 55, 56 y 57 se muestran las ondas incidente (color rojo), reflejada (color azul) y refractada (color magenta) que son generadas con los datos teóricos y las cuales fueron comparadas con sus valores experimentales que se visualizan de color negro.

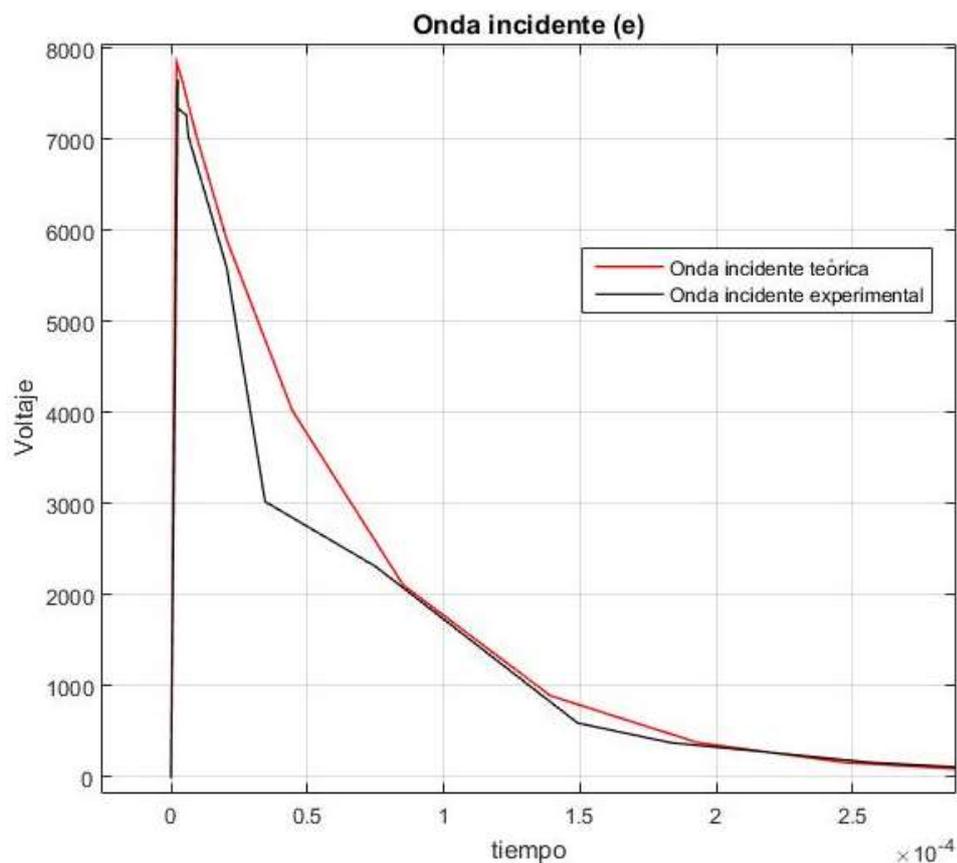


Ilustración 55. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación capacitiva

Fuente: los autores

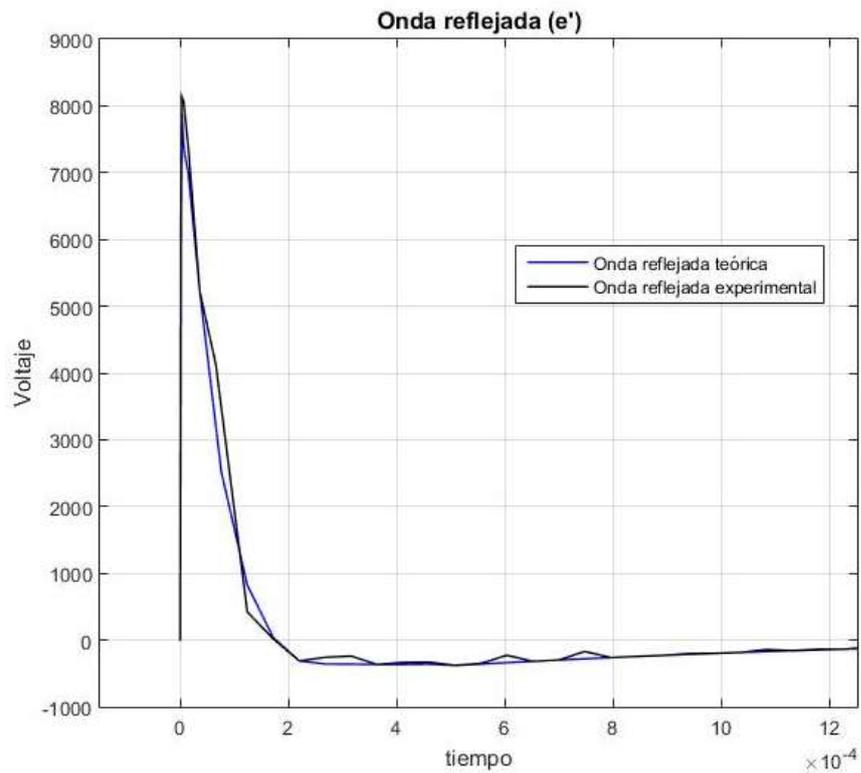


Ilustración 56. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación capacitiva
Fuente: los autores

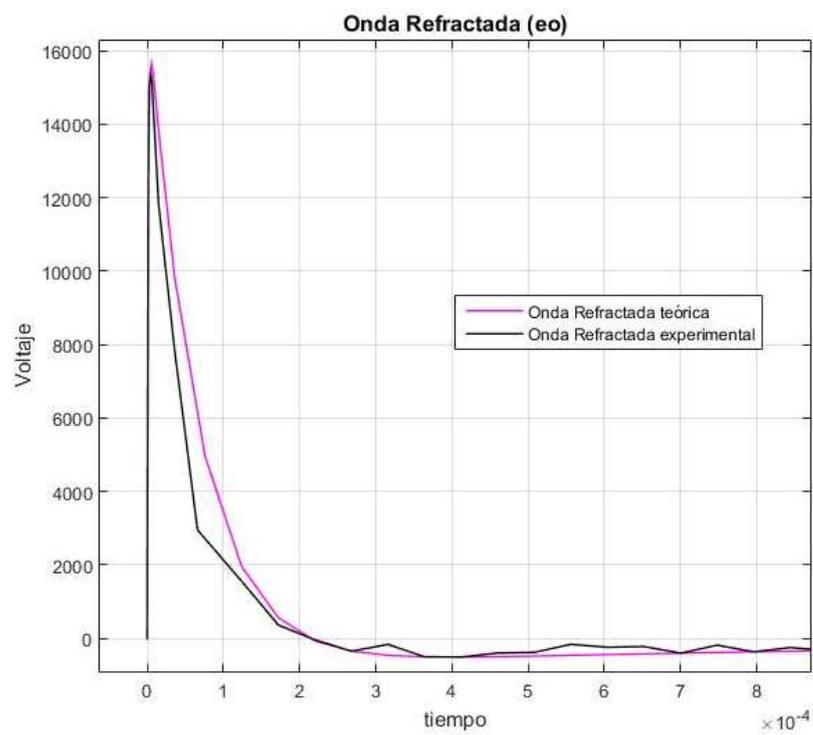


Ilustración 57. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación capacitiva
Fuente: los autores

4.2.4. Ondas viajeras con derivación en pararrayos.

En la tabla 18 se muestran los porcentajes de error que fueron comparados con los valores teóricos y experimentales.

PARAMETRO	VALOR TEÓRICO (KV)	VALOR EXPERIMENTAL (KV)	ERROR (%)
Onda Incidente	7,848	7,6404	2,645
Onda reflejada	1,042	1,1195	7,438
Onda refractada (Voltaje Total)	8,891	8,7600	1,473

Tabla 18. Comparación de datos teóricos y experimentales tabulados del circuito con derivación en pararrayos
Fuente: Los autores

Se aplicó un voltaje de impulso tipo rayo (onda incidente) de 7.64 KV que generó una onda reflejada de 1.11 KV, voltaje drenado ya que el voltaje en el pararrayo fue de 6.8 KV, y una onda refractada 8.76 KV; estos valores experimentales obtenidos son similares a los teóricos.

Los pararrayos (resistencia no lineal) que son utilizados como elementos de protección, ya que suprimen o drenan sobretensiones superiores a su voltaje de operación, se obtuvo que el voltaje drenado o suprimido es el que se refleja en la línea. Para este caso el porcentaje promedio de error entre los valores experimentales con los teóricos fue de aproximadamente 3.85%

Como se realizó en los anteriores casos, las ilustraciones 58, 59 y 60 de color negro son generadas con los valores experimentales de cada onda, y las que están con colores como rojo, azul, magenta son generadas con los datos teóricos.

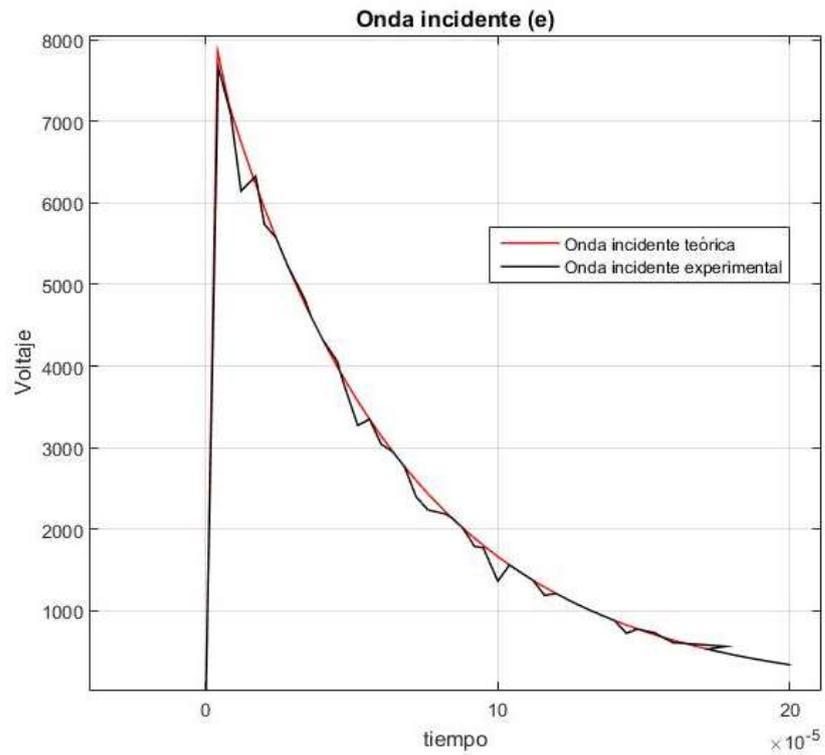


Ilustración 58. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda incidente en derivación con pararrayos
Fuente: Los autores

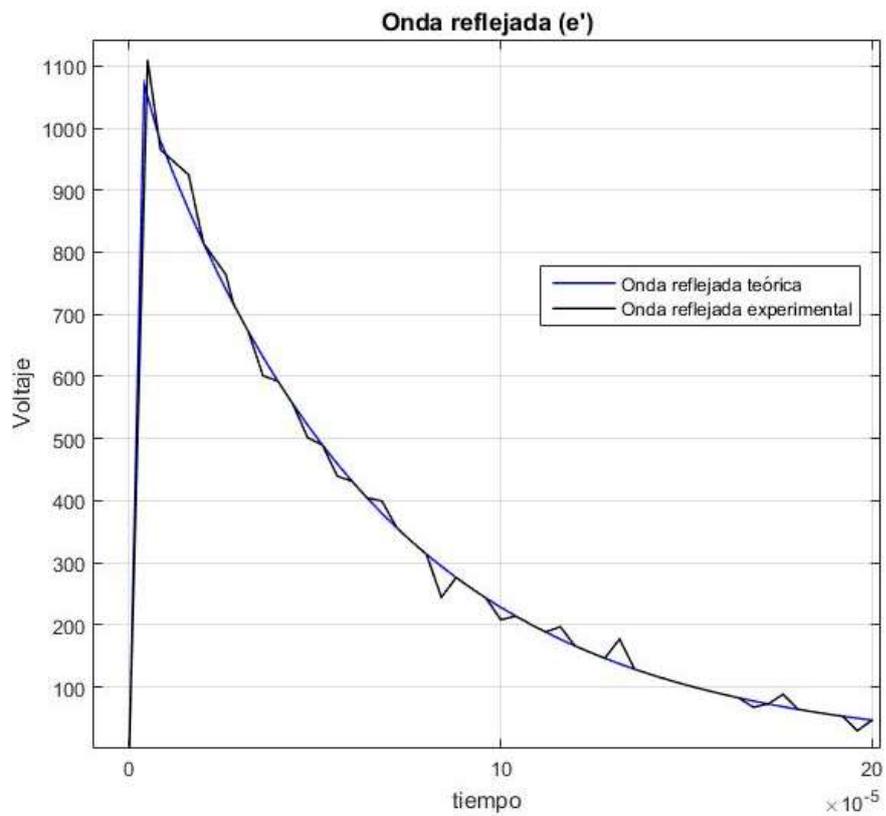


Ilustración 59. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda reflejada en derivación con pararrayos
Fuente: Los autores

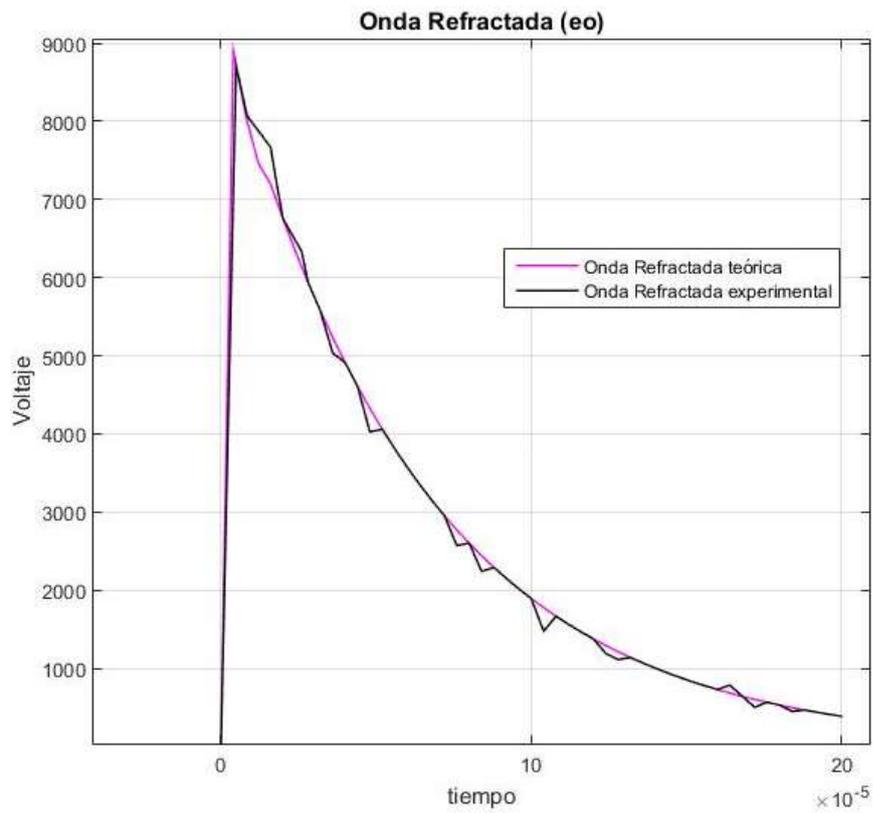


Ilustración 60. Comparación de gráficas teóricas y experimentales de la onda refractada en derivación con pararrayos
Fuente: Los autores

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 Conclusiones

- Este modelo matemático muestra como las ondas reflejadas viajan hacia atrás de una derivación, y las ondas refractadas se transmiten hacia delante de la misma; entonces, los equipos que se encuentren ubicados antes y después de cualquier tipo de derivación deben estar en condiciones de prevenir estas sobretensiones para evitar daños que generen pérdidas económicas o peor, vidas humanas.
- Se desarrolló experimentalmente los circuitos por cada escenario de estudio en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, los cuales permitieron obtener datos para verificar la validez de las simulaciones.
- Se elaboró las ecuaciones matemáticas por cada escenario de estudio planteado, las cuales fueron resueltas de manera analítica y también desarrolladas con el software Matlab.
- Los porcentajes de error que se obtuvieron entre los datos teóricos y experimentales fue de aproximadamente 3.6 %, lo que indica que este modelo matemático brinda resultados válidos que ayudan a comprender las características de este fenómeno eléctrico, ya que no puede ser observado con facilidad y será de mucha ayuda en estudios o pruebas en distintos ámbitos del sector eléctrico

5.2 Recomendaciones

- Existen fenómenos eléctricos que debido a su complejidad no son sencillos de entender o visualizar, se debe hacer énfasis en la elaboración de modelos matemáticos que permitan su entendimiento y mejoren el conocimiento de la comunidad, para así conseguir mejoras que fortalezcan el estudio de la Ingeniería Eléctrica.
- En los sistemas de distribución existe un alto porcentaje de fallas provocadas por medios externos como descargas atmosféricas, pero también hay problemas de origen interno como fallas por maniobras, rechazo de carga, desgaste de equipos, etc. Para mejorar estas deficiencias se debe seguir estudiando y comprendiendo este tipo de problemas, con el fin de evitar que ocurran y mejoren la calidad del servicio de energía eléctrica del país.
- El uso de herramientas de simulación como Matlab facilitará el desarrollo de estudios complejos, debido a su alta capacidad para graficar, desarrollar funciones matemáticas y parametrizar variables que son complicadas de realizar en otros programas. Lo cual ha quedado demostrado en este trabajo, ya que se ha podido observar el efecto de reflexión y refracción en ondas viajeras, que son provocadas por el impacto de una descarga atmosférica en una línea de distribución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Aguirre Alonso, A. A., & Villavicencio Vera, J. J. (2015). *Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil*. Guayaquil, Guayas, Ecuador: UPS.
2. ALI, S. A. (2013). *Design of Lightning Arresters for Electrical Power System Protection*. Sheikh Othman, Yemen: POWER ENGINEERING AND ELECTRICAL ENGINEERING, VOLUME 11, NUMBER 6.
3. Barnett, P., & Hons, B. (1974). *The analysis of Travelling Waves on Power Systems Transmission Lines*. Christchurch, New Zealand: University of Canterbury.
4. Bewley, L. (1933). *Traveling Waves on Transmission systems*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
5. Bravo Carrasco, J. L. (2005). *Generación de impulsos de Alta Tensión para diversas aplicaciones*. Chile: Universidad Católica de Valparaíso.
6. Fowler, R. J. (1994). *Electricidad: Principios y aplicaciones*. Barcelona: Reverté S.A.
7. Gönen, T. (2007). *Electrical Power Transmission System Engineering Ed. 2*. USA: CRC PRESS.
8. Greenwood, A. (1991). *Electrical Transients in Power Systems*. United States: John Wiley & Sons, Inc.
9. Hileman, A. R. (1999). *Insulation Coordination for Power Systems*. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
10. Martínez, J. (2013). *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de Alta tensión*. España: McGraw-Hill.
11. Martinez, J. A., & Durbak, D. W. (2005). *Parameter Determination for Modeling Systems transients-Parte V: Surge arrester*. IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY, VOL. 20, NO. 3.

12. Martinez-Velasco, J. A. (2010). *Power system transient: Parameter determination*. New York: CRC press.
13. MathWorks®. (2016). *MathWorks, Inc.* Obtenido de <http://www.es.mathworks.com>
14. R. kent Nagle, Saff, E. B., & Snider, A. D. (2005). *Ecuaciones Diferenciales y problemas con valores en la frontera, cuarta edición*. Mexico: Pearson Education.
15. Ramirez Castaño, S. (2004). *Redes de Distribución de Energía, 3° edición*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia.
16. Rodriguez Chiwa, E. (1983). *Calculo de sobretensiones en sistemas de potencia*. Guayaquil, Ecuador: ESPOL.
17. Rorden, H. L. (1932). *Solution of Circuits subjected to traveling waves*. AIEE.
18. San Miguel, P. A. (2016). *Electrónica Aplicada*. Madrid: Paraninfo, SA.
19. Sheeba, R., Jayaraju, M., & Nediyazhikam Shanavas, T. K. (2012). *Simulation of Impulse Voltage Generator and Impulse Testing of Insulator*. *World Journal of Modelling and Simulation*, 1-8.
20. Shenkman, A. L. (2005). *Transient Analysis of Electric Power Circuits Handbook*. Netherlands: Springer.
21. Torresi, A. (2004). *Sobretensiones: Coordinación de aislamiento, 4° edición*. Universitas-Editorial Científica Universitaria.

ANEXOS

ANEXO A. LINEAS DE TRANSMISIÓN

A.1. Unión de líneas con diferentes impedancias características

Si una segunda línea se conecta a la terminación de la primera, el voltaje de la onda reflejada en la unión dependerá de la magnitud de Z_{c1} y Z_{c2} .

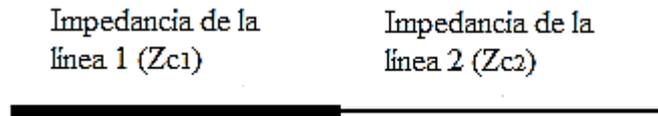


Ilustración 61. Esquema de unión entre líneas con distinta impedancia
Fuente: Los autores

Con $Z_{c2} = \infty$ tenemos el caso de la línea de circuito abierto. Con $Z_{c2} = 0$, el caso de la línea de circuito corto. Si $Z_{c2} = Z_{c1}$, la segunda línea puede ser considerado como una continuación natural de la primera y las ondas de corriente y tensión pasar a Z_{c2} sin ningún cambio. Para cualquier valor de Z_{c2} diferente de los casos especiales anteriores, habrá reflexión parcial de las ondas de corriente y tensión.

$$\frac{e(t)}{i(t)} = Z_{c1}$$

Ecuación 27. Relación entre ondas de corriente y voltaje incidentes
Fuente: Los autores

Dado que la reflexión se acompaña de un cambio en la señal de voltaje o corriente, pero no ambos:

$$\frac{e(t)'}{i(t)'} = -Z_{c1}$$

Ecuación 28. Relación entre ondas de corriente y voltaje reflejados
Fuente: Los autores

La tensión de entrar en la segunda línea en cualquier instante será la suma algebraica de los voltajes incidente y reflejado en la primera línea.

$$e(t)'' = e(t) + e(t)'$$

Ecuación 29. Relación entre ondas de corriente y voltaje reflejados
Fuente: Los autores

De tal manera el voltaje refractado se expresa:

$$\frac{e(t)''}{i(t)''} = -Z_{c2}$$

Ecuación 30. Relación entre ondas de corriente y voltaje refractados
Fuente: Los autores

Luego se reemplaza la onda incidente y reflejada en la ecuación 29:

$$\begin{aligned} i(t)'' * Z_{c2} = e(t)'' &= e(t) + e(t)' = i(t) * Z_{c1} - i(t)' * Z_{c2} \\ &= i(t) * Z_{c1} - Z_{c1}[i(t)'' - i(t)] \end{aligned}$$

Expresando la corriente refractada se obtiene:

$$i(t)'' = \frac{2 * i(t) * Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}} = \frac{2 * e(t)}{Z_{c1} + Z_{c2}}$$

Así mismo se reemplazan las corrientes:

$$i(t)' = i(t)'' - i(t) = \frac{2 * i(t) * Z_{c1}}{Z_{c1} + Z_{c2}} - i(t) = \frac{e(t)}{Z_{c1}} * \frac{Z_{c1} - Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}$$

Entonces la onda refractada queda expresada:

$$e(t)'' = i(t)'' * Z_{c2} = \frac{2 * e(t) * Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}$$

Y la onda reflejada de esta forma:

$$e(t)' = -i(t)' * Z_{c1} = -e(t) \frac{Z_{c1} - Z_{c2}}{Z_{c1} + Z_{c2}}$$

A.2. Derivación en Capacitor

Cuando una línea sin pérdidas es terminada por una impedancia que contiene elementos inductivos o capacitivos, los voltajes resultantes se pueden obtener por transformación de Laplace. En casos sencillos, de decir una sola capacitancia o inductancia, la impedancia de estos elementos se puede escribir como $1 / Cs$ y Ls , respectivamente (s es el operador de Laplace) y el voltaje y la corriente puede variar de manera exponencial.

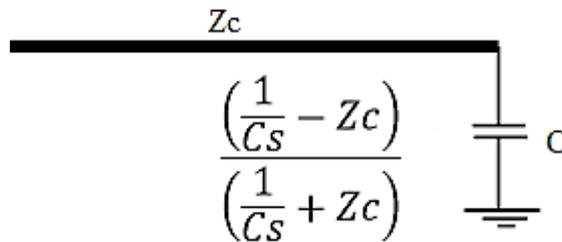


Ilustración 62. Esquema de líneas con banco de capacitores
Fuente: Los autores

El voltaje Reflejado será expresado de la siguiente manera:

$$\frac{(\frac{1}{Cs} - Z_c)}{(\frac{1}{Cs} + Z_c)} \frac{V(t)}{s} = \rho(s) * \frac{V(t)}{s} = \left[\frac{1 - Z_c * Cs}{1 + Z_c * Cs} \right] * \frac{V(t)}{s}$$

$$\frac{(1 - Z_c * C)}{(\frac{1}{Z_c * C} + s)} \frac{V(t)}{Z_c * C} = \frac{V(t)}{Z_c * C} * \left[\frac{A}{s} + \frac{B}{\frac{1}{Z_c * C} + s} \right]$$

Donde los valores de A y B son:

$$A = Z_c * C$$

$$B = -2 * Z_c * C$$

Se reemplaza los valores constantes y queda expresado:

$$\frac{V(t)}{Z_c * C} \left[\frac{Z_c * C}{s} + \frac{-2 * Z_c * C}{\frac{1}{Z_c * C} + s} \right] = e(t)' = V(t) \left(1 - 2e^{-\frac{t}{Z_c * C}} \right)$$

ANEXO B. BOLETIN CLIMATOLÓGICO ANUAL 2013

El presente “Boletín Climatológico Anual 2013”, analiza las condiciones climatológicas observadas en el Ecuador durante los meses de enero a diciembre, mediante la evaluación de anomalías anuales que han presentado la precipitación, temperatura media del aire, temperatura Máxima media, temperatura Mínima media, temperatura Máxima absoluta y temperatura Mínima absoluta en relación a la normal climatológica 1971-2000.

El estudio utiliza la información reportada por las estaciones de monitoreo climático del INAMHI distribuidas a nivel nacional y la información obtenida de la red Aeronáutica de la Aviación Civil.

Durante el año 2013 el comportamiento de la precipitación acumulada a nivel nacional presentó una tendencia a decrementos pluviométricos en las cuatro regiones del Ecuador en relación a sus normales anuales acumuladas.

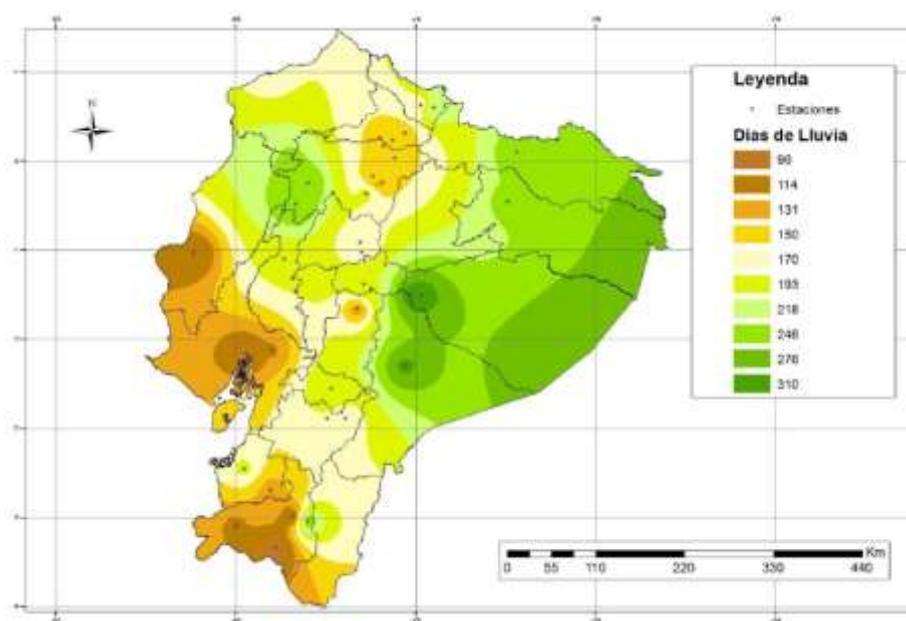


Ilustración 63. Total días con precipitación. Año 2013
Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI)

ANEXO C. ESPECIFICACIONES DE LOS EQUIPOS DEL LABORATORIO
DE ALTA TENSIÓN TERCO



HV 9000
High Voltage
Modular Training Set



HV 9103 Control Desk



Technical data

Supply Voltage:	220 - 230 V 50/60 Hz single phase/25 A
Regulating Transformer:	5kVA Continuous rating driven by 24 V DC geared motor drive.
Regulating Voltage:	0-220 V AC
Output:	5kVA Continuous 10 kVA (short time duty 2 min.)
Dimensions:	1220x105x800mm (h,w,d)
Weight:	275 kg

The Control Desk is used to control and operate high voltage AC/DC/Impulse test equipment. The desk contains operating and signal elements for the control circuit of the test equipment for warning and safety. The control desk is made to house the measuring instruments (Peak, Impulse and DC Voltmeters) and also the Trigger Device. The HV 9103 is fabricated of steel and stands on four wheels.

The above picture of the Control Desk, HV 9103, includes the Measuring Instruments HV 9150, HV 9151 and HV 9152 as well as the Trigger Device HV 9131.

HV 9105 Test Transformer



Technical data

Ratio:	2x220V/100kV/220V
Rated cont. Current:	2x11,4A/50mA/15.2A Continuous.
Output:	5 kVA, 10kVA for 60 min. outputs for AC.
Impedance Voltage:	4% approx.
Frequency:	50Hz or 60 Hz
Partial Discharge Level:	at 100 kV < 3pC.
Height:	770 mm
Diameter:	550 mm
Weight:	215 kg

Application.

Test transformer with coupling winding for cascade connection to produce AC high voltage. The transformer consists of three windings with insulating shell and top and bottom corona free aluminium shielding electrodes. The insulation cylinder is made of epoxy resin with glass fibre reinforcement and coated with anti tracking varnish. The (primary) exciter winding is a double winding: 2x220V for connecting to approx. 220V (parallel connection) or 220 + 220V for connecting to approx. 440V (series connection) The series connection will require 50% of the parallel connection current. Winding No.2 is the HV winding of 100 kV connected in series. The third winding, known as the "Coupler Winding" is provided for cascade connections of transformers. The coil is vacuum impregnated and insulated with high quality grade transformer oil.

MEASURING & CONTROL EQUIPMENT

Measuring Instruments can be supplied as stand-alone modules or as modules to slot into the Control Desk HV9103 which is normal standard. Special covers are available for stand-alone modules (not included)



HV 9150 Peak Voltmeter (Digital Display)

Technical data
 Supply voltage: 220 V 50 Hz
 Measuring Range: 100-1000 \dot{U} / $\sqrt{2}$ kV
 Dimensions: 142x 173 x 245 (W x H x D)
 Weight: 3.4 kg

Application
 Measurement of AC Voltage Peak. For connection to the Measuring Capacitor, the Compressed Gas Capacitor or the Coupling Capacitor.



HV 9151 DC Voltmeter (Digital Display)

Technical data
 Supply voltage: 220 V 50 Hz
 Measuring Range: 140kV/280kV/400kV
 Dimensions: 142x 173 x 245 (W x H x D)
 Weight: 3.0 kg

Application
 Measurement of the DC Voltage. For connection to the Measuring Resistor.



HV 9152 Impulse Voltmeter (Digital Display)

Technical data
 Supply voltage: 220 V 50 Hz
 Measuring Range: 100-1000kV
 Dimensions: 142x 173 x 245 (W x H x D)
 Weight: 3.4 kg

Application
 Measurement of the Impulse Voltage Peak. For connection to the load capacitor.



HV 9131 Trigger Device

Technical data
 Supply voltage: 220 V 50 Hz
 Dimensions: 142x 173 x 245 (W x H x D)
 Weight: 3.7 kg

Application
 For triggering the impulse voltage generator, impulse voltage oscilloscope and chopping spark gap. The trigger impulse is transferred to the high voltage sphere by means of a fiberoptic cable. The impulse is amplified in the electronic trigger sphere.



HV 9130 Low Voltage Divider

Technical data
 Measuring Range 150 kV

Optional 450 kV
 300 kV
 75 kV
 37.5 kV

Weight: 0.4 kg

Application
 Incorporates the Low Voltage Capacitors and the 50 ohm cable adapter. It is plugged in to the UHF socket of the load capacitor and connects the Impulse Voltage Meter by means of co-axial cable.



HV 9132 Electronic trigger sphere

Technical data
 Supply voltage: 220 V 50 Hz
 Measuring Range: 100-1000 \dot{U} / $\sqrt{2}$ kV
 Dimensions: 142x 173 x 245 (W x H x D)
 Weight: 1 kg

Application
 For controlled stimulation of breakdown conditions. To be used with the impulse equipment.

BASIC ELEMENTS FOR AC/DC/IMPULSE SET-UPS

Capacitors



HV 9112
Impulse Capacitor
Technical data
 DC and Impulse voltages: 140 kV
 Capacitance: 25nF
 Length/Height: 665 mm
 Weight: 20 kg

Application
 Impulse capacitor for generation of impulse voltages. It can also be used as smoothing capacitor in DC voltage generation.



HV 9112-50
Impulse Capacitor
Technical data
 DC and Impulse voltages: 140 kV
 Capacitance: 50nF
 Length/Height: 665 mm
 Weight: 42 kg

Application
 Impulse capacitor for generation of impulse voltages. It can also be used as smoothing capacitor in DC voltage generation.



HV 9112-100
Impulse Capacitor
Technical data
 DC and Impulse voltages: 140 kV
 Capacitance: 100nF
 Length/Height: 665 mm
 Weight: 50 kg

Application
 Impulse capacitor for generation of impulse voltages. It can also be used as smoothing capacitor in DC voltage generation.



HV 9120
Load Capacitor
Technical data
 DC and Impulse voltages: 140 kV
 Capacitance: 1.2nF
 Length/Height: 665 mm
 Weight: 9 kg

Application
 Load capacitor and high voltage divider capacitor for measurement of impulse voltages.

The picture shows HV9130 mounted on HV9120.



HV 9141
Measuring Capacitor
Technical data
 AC voltages: 100 kV
 Capacitance: 100 pF
 Length/Height: 665 mm
 Weight: 9 kg

Application
 High voltage divider capacitor for measurement of AC voltages.



HV 9140
Electrode 300
Technical data
 Diameter: 800 mm
 Height: 300 mm
 Weight: 12 kg

Application
 Top electrode to be placed on the top transformer in 3-stage AC-Set-up. Manufactured in polished aluminium.

BASIC ELEMENTS FOR AC/DC/IMPULSE SET-UPS

	HV 9124 Technical data AC voltage: 100 kV DC and impulse voltage: 140 kV Length/ Height: 665 mm Weight: 1.5 kg	Insulating Rod	Application Insulating component
	HV 9111 Technical data Inverse Peak voltage: 140 kV Rated current: 20 mA Protective Resistor: 100 k Ω Length/ Height: 665 mm Weight: 8 kg	Silicon Rectifier	Application Rectifier for use in impulse voltage and DC voltage generation.
	HV 9121 Technical data Impulse voltage: 140 kV Resistance: 10 M Ω Length/ Height: 665 mm Weight: 5 kg	Charging Resistor	Application Charging resistor for multistage impulse voltage test equipment and current limiting resistor in DC voltage generation.
	HV 9122 Technical data Impulse voltage: 140 kV Resistance: 350 Ω Length/ Height: 665 mm Weight: 5 kg	Wave Front Resistor	Application For generation of impulse voltages. The resistors determine the rise time of the impulse voltage in lightning and switching impulse voltage generation.
	HV 9123 Technical data Impulse voltage: 140 kV Resistance: 2400 Ω Length/ Height: 665 mm Weight: 5 kg	Wave Tail Resistor	Application For generation of impulse voltages. The resistors determine the time to half value of the impulse voltage in lightning and switching impulse voltage generation.
	HV 9125 Technical data Impulse voltage: 140 kV Sphere Diameter: 100 mm Max. gap settings: 80 mm With gap settings indicator Length/ Height: 665 mm Weight: 7 kg	Sphere Gap	Application For impulse voltage generation, for pre-settings of Impulse voltage peak.
	HV 9126 Technical data Input: 220 V Frequency: 50/60 Hz Dimensions: 200x125x140 mm Weight: 5 kg	Drive for Sphere Gap	Application Remote control of Sphere Gap size. Mounted underneath the Sphere Gap and connected by drive shaft.
	HV 9113 Technical data DC voltage: 140 kV Resistance: 280 M Ω Rated continuous current: 0.5 mA Length/ Height: 665 mm Weight: 5 kg	Measuring Resistor	Application High voltage series resistor for measurement of DC voltages.


HV 9106
Length:

HV Connection
approx 1.5 m

HV 9106-3
Length:

HV Connection
approx 2 m

Application

Flexible metal connection with connector for the test transformer and connecting cup. For connection of multi-stage AC voltage test equipment with the test transformer.


HV 9114
Earthing Switch, Electrically Operated
Technical data

 Impulse voltage: 140 kV
DC voltage: 140 kV
Service voltage: 24 V, 50/60 Hz
Dimensions: 230 x 115 x 160 mm
(excl. earthing rod)

Weight:

8 kg

Application

For automatic safety earthing of the high voltage construction kit when de-energized.


HV 9138
Electrode
Technical data

 Diameter: 300 mm
Weight: 1 kg

Application

Serves as termination in conjunction with grounding switch for safety grounding. Also serves as corona free electrode.


HV 9107
Discharge Rod
Technical data

 Discharge Resistance: 100 Ω
Length: 2.5 m
Weight: 2.5 kg

Application

For manual discharging of HV components.


HV 9109
Connecting Cup, Aluminium
Technical data

 Dimension: \varnothing 150 x h 85 mm
Weight: 2.2 kg

Application

Conductive Element: Four elements can be inserted in horizontal position and two in vertical position.


HV 9110
Floor Pedestal, Aluminium
Technical data

 Dimension: 200 x 200 x 80 mm
Weight: 2 kg

Application

Conductive Element: For mounting up to four spacer bars horizontally and supporting one component vertically.


HV 9108
Connecting Rod, Aluminium
Technical data

 Length: 665 mm
Weight: 1 kg

Application

Conductive connection element.


HV 9119
Spacer Tube, Aluminium
Technical data

 Length: 665 mm
Weight: 1 kg

Application

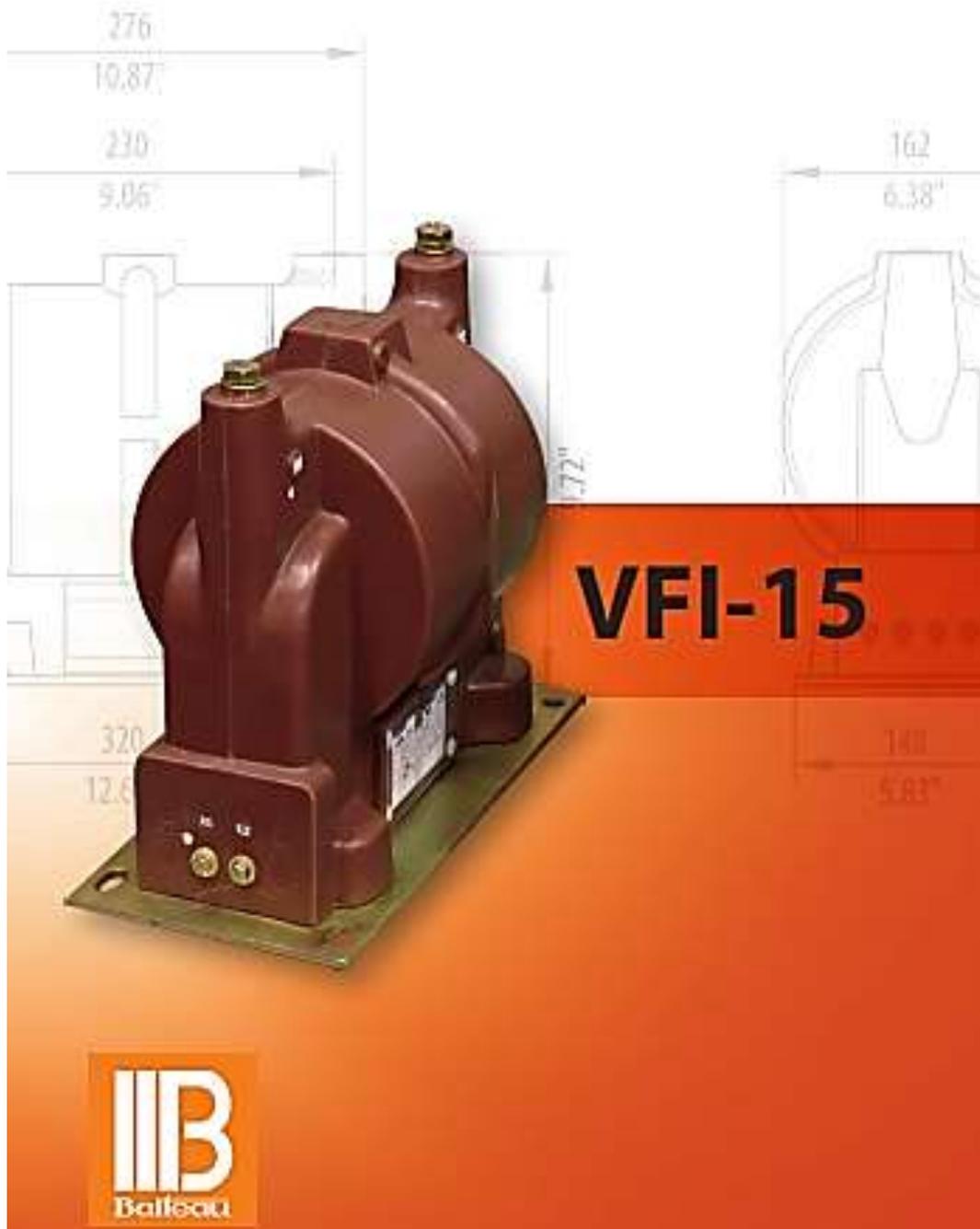
Mechanical and electrical connection on ground level when inserted into floor pedestal.

ANEXO D. ESPECIFICACIONES DEL TRANSFORMADOR DE POTENCIAL (PT)

TRANSFORMADOR DE POTENCIAL PARA USO INTERIOR

Voltage transformer for indoor application

Transformador de tensión para uso interior



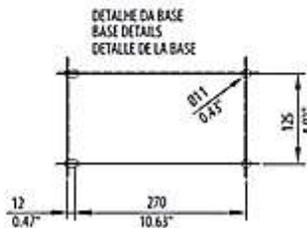
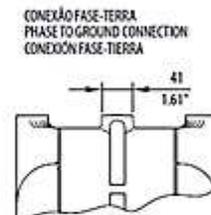
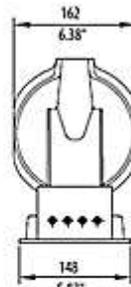
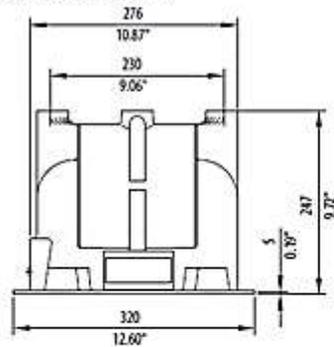
CARACTERÍSTICAS ELÉTRICAS / ELECTRICAL CHARACTERISTICS / CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS

	Unidade Unity Unidad	NBR 6855	IEC 60044.2	ANSI C57.13
Aplicação / Application / Aplicación	-	Interior / Indoor / Interior		
Tensão Máxima / Maximum Voltage / Tensión Máxima	kV	15	17,5	15,5
Frequência / Frequency / Frecuencia	Hz	60	50/60	60
U _p *	V	13800		
		13800±3		
U _s	V	115		
		115±3		
Núm. de Enrolamentos / Number of Windings / Número de Devanados	-	2		
Fst	Cont.	1,75	1,2	1,75
	30s	1,5	1,5	1,5
Pth (Total)	VA	500		
Classe de Temperatura / Temperature Class / Clase de Temperatura	°C	705		
Tensão a Freq. Ind.* / Power Freq. Voltage* / Tensión a Frec. Ind.*	kV	34	38	34
NBI / BI / NBI	kV	110	95	110
Classe de Exatidão / Accuracy Class / Clase de Precisión				

Enrolamentos Windings Devanados	NBR 6855			IEC 60044.2			ANSI C57.13
	Medição Metering Medición	Medição Metering Medición	Proteção Protection Protección	Medição Metering Medición	Medição Metering Medición	Proteção Protection Protección	Medição / Proteção Metering / Relaying Medición / Protección
1	0,3P75	1,2P200	3P200	50VA CL0,5	100VA CL1	200VA 3P	0,3T 1,2Z
2	0,3P25		0,3P25	50VA CL0,5		50VA 3P	0,3X

Dimensões/Dimensions/Dimensiones: (mm)

Peso/Weight/Peso: 18 kg (39.68 pounds)



CONEXÃO FASE-TERRA
PHASE TO GROUND CONNECTION
CONEXIÓN FASE-TIERRA

- Dimensões e peso aproximados.
- Approximate dimensions and weight.
- Dimensiones y peso aproximados.

Opcional / Opcional / Opcional:
- Caixa de bornes secundários
- Secondary Box
- Caja cubreborne

Rua José Fernando Cascardo, 54 - Distrito Industrial
Itajubá (MG) - Brasil - CEP 37504-089
Phone: +55 (35) 3629-5500 - Fax: +55 (35) 3629-5501
balteau@balteau.com.br - www.balteau.com.br

Optima

Distribution Class (PDV) and Riser Pole (PVR) Surge Arresters



HUBBELL
Power Systems, Inc.



NOTE: Because Hubbell has a policy of continuous product improvement, we reserve the right to change design and specifications without notice.
©Copyright 2010 Hubbell Incorporated

OHIO BRASS – AIKEN, SC, USA

Printed in USA

JULY 2010



Electrical Characteristics

Heavy Duty PDV100-Optima

Rated Voltage kV	MCOV kV	Unit Catalog Number	0.5 μ sec 10kA Maximum IR-kV (1)	500 A Switching Surge Maximum IR- kV(2)	8/20 Maximum Discharge Voltage - kV					
					1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2.55	213703	10.6	7.6	8.0	8.5	9.0	9.9	11.1	13.2
6	5.1	213705	21.3	15.3	15.9	17.0	18.0	19.8	22.3	26.5
9	7.65	213708	31.2	22.4	23.3	24.9	26.4	29.0	32.6	38.8
10	8.4	213709	34.0	24.4	25.4	27.1	28.8	31.6	35.6	42.3
12	10.2	213710	40.4	29.0	30.3	32.3	34.2	37.6	42.3	50.3
15	12.7	213713	51.4	36.9	38.5	41.1	43.5	47.8	53.8	64.0
18	15.3	213715	60.6	43.5	45.4	48.4	51.3	56.4	63.5	75.5
21	17.0	213717	68.3	49.0	51.1	54.5	57.8	63.5	71.4	85.0
24	19.5	213720	81.9	58.8	61.3	65.5	69.3	76.2	85.7	102.0
27	22.0	213722	91.9	65.9	68.8	73.4	77.8	85.5	96.2	114.4
30	24.4	213724	101.1	72.5	75.7	80.7	85.5	94.0	105.8	125.8
36	29.0	213729	121.4	87.0	97.9	97.0	102.7	112.9	127.0	151.1

Normal Duty PDV65-Optima

Rated Voltage kV	MCOV kV	Unit Catalog Number	0.5 μ sec 10kA Maximum IR-kV (1)	500 A Switching Surge Maximum IR- kV(2)	8/20 Maximum Discharge Voltage - kV					
					1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2.55	217253	12.5	8.5	9.8	10.3	11.0	12.3	14.3	18.5
6	5.1	217255	25.0	17.0	19.5	20.5	22.0	24.5	28.5	37.0
9	7.65	217258	33.5	23.5	26.0	28.0	30.0	33.0	39.0	50.5
10	8.4	217259	36.0	25.4	27.0	29.5	31.5	36.0	41.5	53.0
12	10.2	217560	42.4	31.3	33.8	36.3	38.5	42.8	49.0	60.9
15	12.7	213263	54.0	39.9	43.1	46.3	49.0	54.4	62.4	78.0
18	15.3	213265	62.8	46.4	50.1	53.8	57.0	63.3	72.6	91.2
21	17.0	213267	68.3	50.5	54.5	58.5	62.0	68.9	79.0	98.3
24	19.5	217570	84.8	62.6	67.6	72.6	77.0	85.6	98.0	121.9
27	22.0	213272	96.4	71.2	76.9	82.6	87.5	97.2	111.4	139.0
30	24.4	213274	104.3	74.5	81.5	88.0	93.5	104.9	120.5	149.1
36	29.0	213279	125.6	92.8	100.2	107.6	114.0	126.7	145.2	176.7

Riser-Pole PVR-Optima

Rated Voltage kV	MCOV kV	Unit Catalog Number	0.5 μ sec 10kA Maximum IR-kV (1)	500 A Switching Surge Maximum IR- kV(2)	8/20 Maximum Discharge Voltage - kV					
					1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2.55	221603	9.9	6.6	7.2	7.8	8.2	9.1	10.4	12.3
6	5.1	221605	20.0	13.3	14.6	15.7	16.6	18.3	21.0	24.8
9	7.65	221608	26.8	17.8	19.5	21.0	22.2	24.5	28.1	33.2
10	8.4	221609	29.5	19.6	21.5	23.1	24.4	27.0	31.0	36.6
12	10.2	221610	35.5	23.6	25.9	27.9	29.4	32.5	37.3	44.0
15	12.7	221613	44.2	29.4	32.2	34.7	36.7	40.5	46.5	54.8
18	15.3	221615	53.4	35.5	38.9	41.9	44.3	48.9	56.1	66.2
21	17.0	221617	60.7	40.3	44.3	47.6	50.3	55.6	63.8	75.3
24	19.5	221620	70.9	47.1	51.7	55.6	58.7	64.9	74.4	87.9
27	22.0	221622	78.6	52.2	57.3	61.7	65.2	72.0	82.6	97.5
30	24.4	221624	88.5	58.7	64.5	69.4	73.3	81.0	92.9	110.0
36	29.0	221629	105.0	69.7	76.5	82.4	87.0	96.1	110.0	130.0

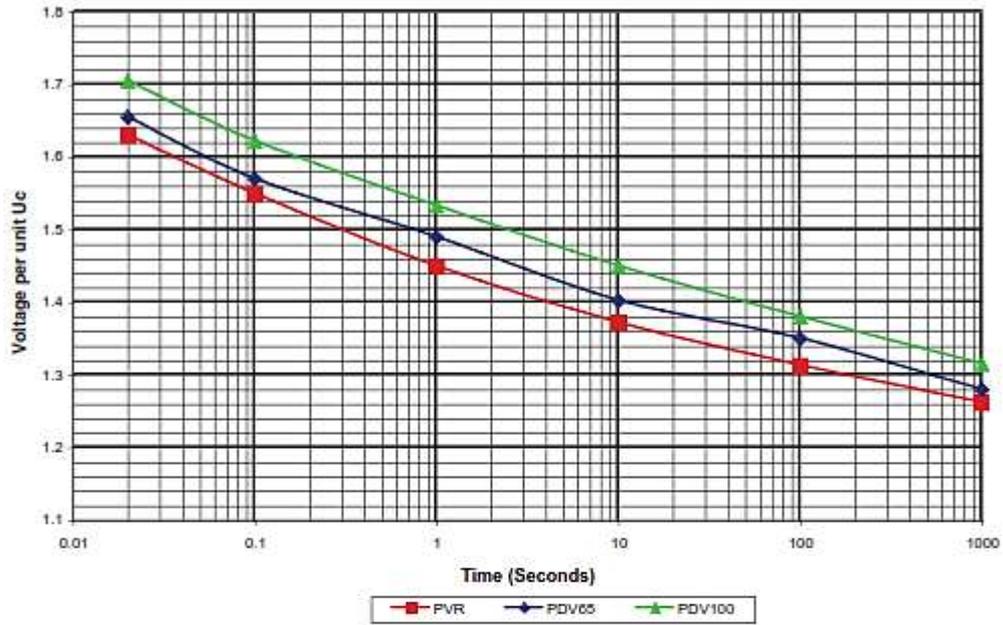
All Ohio Brass Arresters are fully compliant with ANSI/IEEE C62.11 Standard

(1) Maximum discharge voltage for a 10-kA impulse current wave which produces a voltage wave cresting in 0.5 μ s. This can be used for coordination where front-of-wave sparkover was formerly used.

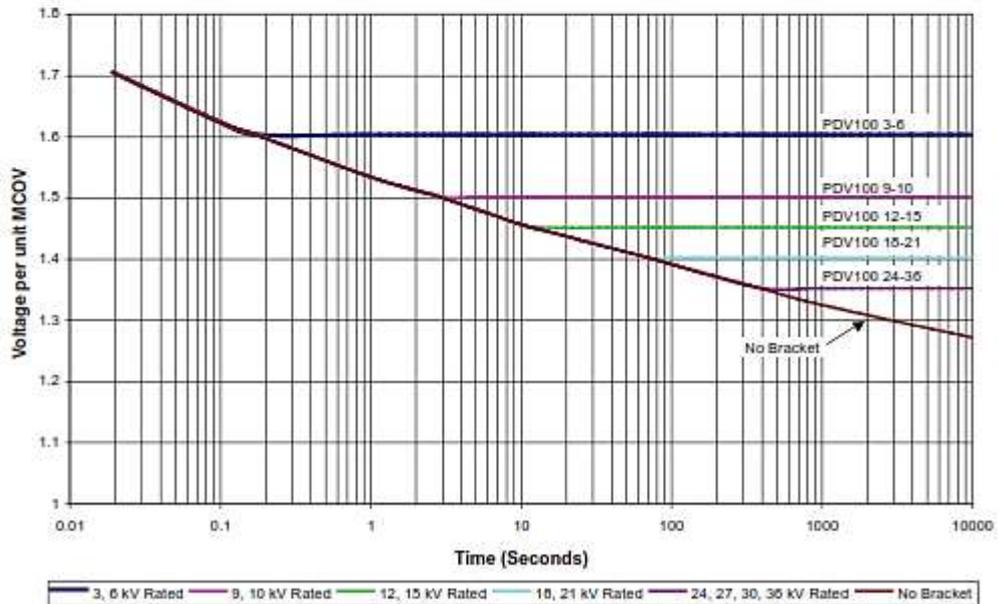
(2) Based on a 500A surge of 45- μ s time to crest.



ANSI No Prior Duty TOV Curves, Distribution Arresters Without Optima Bracket



ANSI No Prior Duty TOV Curves for PDV100-Optima Arresters



ANEXO F. ESPECIFICACIONES DEL OSCILOSCOPIO GW INSTEK GDS-1102A-U

	GDS-1152A-U	GDS-1102A-U	GDS-1072A-U
Waveform Technology	Memory-Prime		
Display	5.7" TFT LCD Color		
Bandwidth (MHz)	150	100	70
Number of Channel	2	2	2
Memory Depth	2M Points		
Sample Rate	1GSa/s (RTS) 25GSa/s (ETS)		
Vertical Resolution	8-bit		
Vertical Sensitivity	2mV/div ~ 10V/div		
Time Base Range	1ns/div ~ 50s/div		
Input Impedance Selection	1MΩ		
Auto Measurement	27		
Waveform Memory	15		
Panel Setup Memory	15		
Auto-Set	V		
Auto/Normal Trigger	V		
ALT Trigger	-		
TV Trigger	V		
Cursor Readout	V		
XY Mode	V		
Zoom	V		
Go/NoGo	V		
Zoom FFT	V		
Counter Function	V		
Function Generator	-		
Logic Analyzer	-		
Data Logger	V		
Digital Storage	V		
Go/NoGo Output	-		
Interface	USB Host/Device		
PictBridge Compatible	V		
LED Indicators	-		
Z-Axis Input	-		
LabView Driver	V		
Power Source	AC 100V ~ 240V		

**ANEXO G. DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS EN EL
LABORATORIO DE ALTA TENSION**

F.1. Onda de impulso tipo rayo

VOLTAJE [V]	VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]
7490	65,130
7510	65,304
7840	68,174
7250	63,043
7469	64,948
7143	62,113
6890	59,913
7520	65,391
7397	64,322
7498,3	65,203
7113	61,852
7978	69,374
7116,8	61,885
7497	65,191
7986	69,443
7778	67,635
7884	68,557
7967	69,278

F.2. Derivación en resistencia

ONDA INCIDENTE [V]	VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]
7560	65,739
7644	66,470
7840	68,174
7250	63,043
7469	64,948
7143	62,113
7210,54	62,700
7520	65,391
7397	64,322
7498,3	65,203
7214	62,730
7978	69,374
7116,8	61,885
7841,3	68,185
7986	69,443
8150,14	70,871
7884	68,557
7967	69,278

ONDA REFLEJADA [V]	VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]
297,41	2,586
280,45	2,439
268	2,330
275,341	2,394
253,4	2,203
279,314	2,429
284,6	2,475
274,169	2,384
254,364	2,212
226,93	1,973
297,678	2,589
264,9	2,303
249,689	2,171
250,49	2,178
341,367	2,968
284,143	2,471
312,354	2,716
327,413	2,847
281,419	2,447
246,1	2,140

F.3. Derivación en capacitor

ONDA INCIDENTE [V]	VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]
7560,68	65,739
7644,79	66,470
7840,85	68,174
7250,48	63,043
7469,59	64,948
7143,37	62,113
7210,42	62,700
7520,66	65,391
7627,74	66,322
7498,30	65,203
7214,26	62,730
7978,47	69,374
7921,80	68,885
7841,30	68,185
7986,47	69,443
8150,14	70,871
7884,31	68,557
7967,25	69,278
7650,22	66,523

VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]		ONDA REFLEJADA [V]	
Max	Min	Max	Min
69,1317	3,6118	7950,15	415,36
66,2109	3,4647	7614,25	398,45
69,2553	3,0475	7964,36	350,47
68,3837	3,2968	7864,12	379,14
74,0431	2,4079	8514,96	276,91
65,2288	2,1757	7501,31	250,21
71,5346	3,3151	8226,48	381,24
70,5588	3,4362	8114,26	395,17
69,0897	2,4663	7945,32	283,63
74,2756	3,9150	8541,69	450,23
68,3607	3,6722	7861,48	422,31
69,1956	2,4358	7957,49	280,119
72,3617	3,5533	8321,59	408,64
69,2288	3,7606	7961,31	432,47
70,5446	4,6766	8112,63	537,81
65,9111	1,9853	7579,78	228,32
67,3231	2,5361	7742,16	291,66
70,2543	3,8249	8079,25	439,87
75,0606	3,6722	8631,97	422,31
66,6027	3,2315	7659,31	371,63

F.4. Derivación en pararrayo (Surge Arrester)

VOLTAJE OSC. [V]	ONDA INCIDENTE [V]	VOLTAJE OSC. [V]	ONDA REFLEJADA [V]
70,122	8064,12	16,0904	1850,4
65,304	7510	10,9061	1254,21
68,173	7840	11,8443	1362,1
63,043	7250	7,51469	864,19
64,947	7469	6,82791	785,21
74,148	8527,12	9,16504	1053,98
59,913	6890	9,84713	1132,42
65,391	7520	8,35886	961,27
64,321	7397	5,49452	631,87
60,706	6981,24	22,2965	2564,1
64,509	7418,6	8,71826	1002,6
69,373	7978	8,18365	941,12
61,885	7116,8	6,04095	694,71
65,191	7497	7,36278	846,72
69,443	7986	8,90965	1024,61
67,634	7778	7,07504	813,63
68,556	7884	7,31504	841,23
69,278	7967	14,22	1635,3
64,463	7413,32	9,98078	1147,79
72,360	8321,46	8,55173	983,45

VOLTAJE OSCILOSCOPIO [V]	VOLTAJE DEL PARARRAYO [V]
59,4887	6841,21
45,3843	5219,20
55,4728	6379,38
63,0434	7250,00
64,9478	7469,00
74,1488	8527,12
59,9130	6890,00
32,0433	3684,98
64,3217	7397,00
60,7064	6981,24
64,5095	7418,60
69,373	7978,00
61,8852	7116,80
43,6375	5018,32
69,4434	7986,00
42,4018	4876,21
54,6054	6279,63
69,2782	7967,00
64,4636	7413,32
72,3605	8321,46

ANEXO H. DATOS TABULADOS DE LOS CASOS DE ESTUDIO

Los siguientes datos fueron obtenidos mediante el método de interpolación lineal, el cual fue desarrollado mediante un código de programación en Matlab, el mismo que fue utilizado con todos los datos obtenidos en los casos de estudio.

```

Command Window
>> % Se genera los vectores de tiempo y voltaje conocidos
x=[0 1e-6 2e-6 0.0001];
y=[0 138.74 277.47 0];
% Se fijan los límites y el paso en que deben ir generando los datos de tiempo
xx=0:2e-5:0.0001;
% Se usa el comando INTERP1 para obtener los valores de voltaje
yy=interp1(x,y,xx,'linear');
% Se procede a graficar
plot(xx,yy,'r')
title('Interpolación de datos experimentales');
fx >>
    
```

G.1. Derivación en resistencia

Onda Incidente		Onda reflejada		Onda Refractada	
Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
2,80E-06	7.590,36	2,80E-06	279,47	1,80E-06	7.820,03
4,70E-06	7.457,01	4,70E-06	260,03	5,70E-06	7.421,05
6,70E-06	7.217,74	6,70E-06	245,78	7,00E-06	7.273,52
8,00E-06	7.085,59	8,00E-06	237,78	9,20E-06	7.133,37
1,30E-05	6.860,70	1,30E-05	230,02	1,30E-05	7.000,73
1,40E-05	6.742,86	1,40E-05	229,51	1,40E-05	6.875,37
1,40E-05	6.531,83	1,40E-05	225,24	1,40E-05	6.657,06
1,60E-05	6.227,40	1,60E-05	218,19	1,60E-05	6.445,59
1,80E-05	6.129,38	1,80E-05	211,36	1,80E-05	6.340,74
2,00E-05	5.837,55	2,00E-05	208,74	2,00E-05	6.042,29
2,40E-05	5.751,72	2,40E-05	188,34	2,40E-05	5.950,06
2,40E-05	5.571,71	2,40E-05	182,13	2,40E-05	5.663,84
2,60E-05	5.397,34	2,60E-05	186,12	2,60E-05	5.583,45
2,80E-05	5.208,42	2,80E-05	180,29	2,80E-05	5.308,71
3,00E-05	5.164,79	3,00E-05	174,65	3,00E-05	5.039,44
3,20E-05	4.806,28	3,20E-05	165,18	3,50E-05	5.075,46
3,40E-05	4.752,73	3,40E-05	160,89	3,40E-05	4.816,61

3,60E-05	4.603,98	3,60E-05	155,76	3,60E-05	4.762,74
3,80E-05	4.459,89	3,80E-05	152,79	3,80E-05	4.513,68
4,00E-05	4.320,31	4,00E-05	144,98	4,00E-05	4.469,29
4,10E-05	4.185,10	4,10E-05	140,31	4,10E-05	4.329,42
4,40E-05	4.054,12	4,40E-05	135,80	4,40E-05	4.093,92
4,60E-05	3.927,24	4,60E-05	135,42	4,70E-05	4.062,67
4,80E-05	3.654,33	4,80E-05	130,18	4,80E-05	3.935,52
5,00E-05	3.575,27	5,00E-05	127,08	5,00E-05	3.612,35
5,20E-05	3.469,93	5,20E-05	123,10	5,20E-05	3.693,04
5,40E-05	3.378,21	5,40E-05	119,25	5,40E-05	3.577,46
5,60E-05	3.349,98	5,60E-05	115,52	5,60E-05	3.465,49
5,90E-05	3.245,13	5,90E-05	111,90	5,90E-05	3.357,04
6,00E-05	3.143,57	6,00E-05	108,40	6,00E-05	3.251,97
6,20E-05	3.045,19	6,20E-05	105,01	6,20E-05	3.050,20
6,40E-05	2.849,89	6,40E-05	101,72	6,40E-05	3.051,61
6,60E-05	2.757,56	6,60E-05	92,54	6,60E-05	2.956,10
6,90E-05	2.668,13	6,90E-05	93,45	6,90E-05	2.863,58
7,00E-05	2.681,50	7,00E-05	92,47	7,00E-05	2.773,96
7,30E-05	2.597,58	7,30E-05	89,57	7,30E-05	2.687,15
7,40E-05	2.516,28	7,40E-05	86,77	7,40E-05	2.603,05
7,60E-05	2.437,53	7,60E-05	84,05	7,60E-05	2.521,58
7,80E-05	2.361,24	7,80E-05	81,42	7,80E-05	2.442,67
8,00E-05	2.287,34	8,00E-05	78,87	8,00E-05	2.366,22
8,30E-05	2.215,76	8,30E-05	74,41	8,30E-05	2.492,16
8,40E-05	2.146,41	8,40E-05	74,01	8,40E-05	2.220,43
8,40E-05	2.179,24	8,40E-05	71,70	8,40E-05	2.150,94
8,80E-05	2.014,16	8,80E-05	66,45	8,80E-05	2.183,62
9,00E-05	1.951,13	9,00E-05	67,28	9,00E-05	2.018,41
9,20E-05	1.890,06	9,20E-05	65,17	9,20E-05	1.955,24
9,50E-05	1.830,91	9,50E-05	63,13	9,50E-05	1.894,05
9,80E-05	1.773,61	9,80E-05	61,16	9,80E-05	1.834,77
9,80E-05	1.718,10	9,80E-05	55,24	9,80E-05	1.477,35
0,0001	1.664,33	0,0001	57,39	0,0001	1.221,72

G.2. Derivación en capacitancia

Onda Incidente		Onda reflejada		Onda Refractada	
Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
2,50E-06	7.659,19	1,18E-06	6.348,26	1,18E-06	11.338,76
2,00E-06	7.356,61	2,56E-06	8.145,37	2,56E-06	15.044,48
5,61E-06	7.264,51	4,63E-06	8.098,77	4,63E-06	15.360,37
6,37E-06	7.031,06	6,15E-06	8.083,02	6,15E-06	15.151,44
2,04E-05	5.596,74	1,49E-05	7.384,93	1,49E-05	11.828,55
3,45E-05	3.024,29	3,62E-05	5.223,83	3,62E-05	7.811,43
7,51E-05	2.309,42	6,60E-05	4.120,38	6,60E-05	2.956,10
0,000149101	593,95	0,000124048	420,96	0,000124048	1.556,51
0,000183101	378,85	0,000172048	17,38	0,000172048	366,78
0,000257101	160,55	0,000220048	-311,75	0,000220048	-34,94
0,000311101	75,04	0,000268048	-258,09	0,000268048	-344,02
0,000355101	28,84	0,000316048	-240,08	0,000316048	-159,43
0,000409101	12,22	0,000364048	-365,23	0,000364048	-499,22
0,000463101	3,18	0,000412048	-335,07	0,000412048	-504,41
0,000517101	1,19	0,000460048	-330,54	0,000460048	-394,10
0,000571101	0,93	0,000508048	-379,69	0,000508048	-377,16
0,000625101	0,39	0,000556048	-348,87	0,000556048	-157,69
0,000679101	0,17	0,000604048	-228,14	0,000604048	-237,59
0,000733101	0,07	0,000652048	-317,97	0,000652048	-217,71
0,000787101	0,03	0,000700048	-298,55	0,000700048	-398,43
0,000841101	0,02	0,000748048	-169,95	0,000748048	-179,89
0,000995101	0,01	0,000796048	-262,18	0,000796048	-362,15
0,000949101	0,00	0,000844048	-245,22	0,000844048	-245,21
0,001003101	0,00	0,000892048	-229,05	0,000892048	-329,05
0,001057101	0,00	0,000940048	-203,63	0,000940048	-313,63
0,001111101	0,00	0,000988048	-198,94	0,000988048	-298,93
0,001165101	0,00	0,001036048	-184,93	0,001036048	-284,93
0,001519101	0,00	0,001084048	-141,57	0,001084048	-71,57
0,001273101	0,00	0,001132048	-158,85	0,001132048	-258,85
0,001327101	0,00	0,001180048	-136,72	0,001180048	-46,72
0,001381101	0,00	0,001228048	-135,15	0,001228048	-235,15
0,001435101	0,00	0,001276048	-104,13	0,001276048	-224,13

G.3. Derivación en pararrayos (Surge Arrester)

Onda Incidente		Onda reflejada		Onda Refractada	
Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)	Tiempo (s)	Voltaje (V)
0	0,00	0	0,00	0	0,00
4,20E-06	7.657,01	4,90E-06	1.109,81	4,90E-06	8.706,82
8,50E-06	7.085,59	8,40E-06	965,17	8,40E-06	8.070,76
1,20E-05	6.142,86	1,60E-05	924,47	1,60E-05	7.667,33
1,70E-05	6.327,40	1,80E-05	867,51	1,80E-05	7.194,92
2,00E-05	5.737,55	2,00E-05	814,06	2,00E-05	6.751,61
2,40E-05	5.571,71	2,60E-05	763,90	2,60E-05	6.335,62
2,80E-05	5.228,42	2,80E-05	716,84	2,80E-05	5.945,26
3,40E-05	4.806,28	3,20E-05	672,67	3,20E-05	5.578,95
3,60E-05	4.603,98	3,60E-05	601,22	3,60E-05	5.035,21
4,00E-05	4.320,31	4,00E-05	592,33	4,00E-05	4.912,65
4,50E-05	4.054,12	4,40E-05	555,84	4,40E-05	4.609,96
4,70E-05	3.804,33	4,80E-05	501,59	4,80E-05	4.025,92
5,20E-05	3.269,93	5,20E-05	489,45	5,20E-05	4.059,39
5,60E-05	3.349,98	5,60E-05	439,29	5,60E-05	3.809,27
6,00E-05	3.043,57	6,00E-05	431,00	6,00E-05	3.574,57
6,40E-05	2.949,89	6,40E-05	404,44	6,40E-05	3.354,33
6,80E-05	2.768,13	6,80E-05	399,52	6,80E-05	3.147,65
7,20E-05	2.397,58	7,20E-05	356,14	7,20E-05	2.953,71
7,60E-05	2.237,53	7,60E-05	334,19	7,60E-05	2.571,72
8,20E-05	2.187,34	8,00E-05	313,60	8,00E-05	2.600,95
8,40E-05	2.146,41	8,40E-05	244,28	8,40E-05	2.240,69
8,80E-05	2.014,16	8,80E-05	276,15	8,80E-05	2.290,31
9,20E-05	1.790,06	9,20E-05	259,14	9,20E-05	2.149,20
9,50E-05	1.773,61	9,60E-05	243,17	9,60E-05	2.016,78
0,0001	1.364,33	0,0001	208,19	0,0001	1.892,52
0,000104	1.561,79	0,000104	214,13	0,000104	1.475,91
0,000108	1.465,56	0,000108	200,93	0,000108	1.666,49
0,000112	1.375,26	0,000112	188,55	0,000112	1.563,81
0,000116	1.190,52	0,000116	196,94	0,000116	1.467,46
0,00012	1.211,01	0,00012	166,03	0,00012	1.377,04
0,000124	1.136,40	0,000124	155,80	0,000124	1.192,20
0,000128	1.066,38	0,000128	146,20	0,000128	1.112,58
0,000132	1.000,67	0,000132	177,20	0,000132	1.137,87
0,000136	939,02	0,000136	128,74	0,000136	1.067,76
0,00014	881,16	0,00014	120,81	0,00014	1.001,97
0,000144	726,87	0,000144	113,37	0,000144	940,24
0,000148	775,92	0,000148	106,38	0,000148	882,31
0,000154	728,12	0,000152	99,83	0,000152	827,94
0,000156	683,25	0,000156	93,68	0,000156	776,93

0,00016	611,16	0,00016	87,91	0,00016	729,06
0,000164	601,65	0,000164	82,49	0,000164	784,14
0,000178	564,58	0,000168	67,41	0,000168	641,99
0,000172	529,80	0,000172	72,64	0,000172	502,43
0,000176	497,15	0,000176	88,16	0,000176	565,32
0,00018	466,52	0,00018	63,96	0,00018	530,48
0,000184	437,78	0,000184	60,02	0,000184	447,80
0,000188	410,80	0,000188	56,32	0,000188	467,13
0,000192	385,49	0,000192	52,85	0,000192	438,35
0,000196	361,74	0,000196	29,60	0,000196	411,34
0,0002	339,45	0,0002	46,54	0,0002	385,99

ANEXO I. IMÁGENES



IMAGEN No. 1



IMAGEN No. 2



IMAGEN No. 3