



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
SEDE GUAYAQUIL

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**CARRERA:**

Ingeniería Eléctrica

**PROYECTO DE TITULACIÓN**

Previa a la obtención del título de:

**INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:**

“Modelación matemática de la supresión de impulsos tipo atmosféricos de pararrayos de media tensión en sistemas de distribución para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil”

**AUTORES:**

Josué Alfredo Quimiz Herrera

Nathalie Lorena Guerra Salvador

**DIRECTOR: Ing. Kléver Carrión**

MARZO 2017

GUAYAQUIL – ECUADOR

## **CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

Nosotros, Josué Quimiz Herrera y Nathalie Guerra Salvador autorizamos a la **Universidad Politécnica Salesiana** la publicación total o parcial de este trabajo de titulación y su reproducción sin fines de lucro.

Además, declaramos que los conceptos, análisis desarrollados y las conclusiones del presente trabajo son de exclusiva responsabilidad de los autores.

Guayaquil, Marzo, 3, 2017

f) \_\_\_\_\_

Autor: Josué Quimiz Herrera

Cédula: 0927071324

f) \_\_\_\_\_

Autor: Nathalie Guerra Salvador

Cédula: 0919666842

## **CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS**

Nosotros, **JOSUÉ ALFREDO QUIMIZ HERRERA** y **NATHALIE LORENA GUERRA SALVADOR**, con documentos de identificación N° **0927071324** y N° **0919666842**, 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 titulado “**MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA SUPRESIÓN DE IMPULSOS TIPO ATMOSFÉRICOS DE PARARRAYOS DE MEDIA TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA 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 antes cedidos.

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, suscrito este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, Marzo, 3, 2017

f) \_\_\_\_\_

Autor: Josué Quimiz Herrera

Cédula: 0927071324

f) \_\_\_\_\_

Autor: Nathalie Guerra Salvador

Cédula: 0919666842

## **CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR**

Yo, **KLÉVER CARRIÓN**, director del proyecto de Titulación denominado **“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA SUPRESIÓN DE IMPULSOS TIPO ATMOSFÉRICOS DE PARARRAYOS DE MEDIA TENSIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN PARA EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN DE LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE GUAYAQUIL”** realizado por los estudiantes, **NATHALIE GUERRA SALVADOR** y **JOSUÉ QUIMIZ HERRERA**, certifico que ha sido orientado y revisado durante su desarrollo, por cuanto se aprueba la presentación del mismo ante las autoridades pertinentes.

Guayaquil, Marzo, 3, 2017

f).....

Ing. Kléver Carrión

## **DEDICATORIA**

Dedico este proyecto a mi mamá Margarita Herrera quien me ayudo siempre, aun cuando pasaba por momentos difíciles no solo de mi vida académica sino en todo mi vida dándome muchos consejos y a que no me desanime por situaciones que pasa en la vida cotidiana a luchar y ser feliz con lo que he tenido.

A mi papa José Quimiz que como padre me ha enseñado mucho con su ejemplo de hombre de trabajo, de padre, siempre responsable y que tengamos lo necesario formándome con buenas enseñanzas y costumbres.

También a mi hermana Berenice Quimiz que siempre estuvo presta ayudarme cuando necesitaba de algún conocimiento que yo carecía, a mi hermano José que también quiero que sea una persona profesional y una persona de bien que ayude a los demás que siempre estaré dispuesto ayudarlo.

Dedico también este proyecto a mis amigos que fueron parte importante en mi vida académica y ahora en mi vida y los aprecio mucho como son Nathalie, Francis, Ángelo, Katherine, Eddy, Eduardo ya que con ellos he pasado la mayor parte del tiempo en la universidad y me ayudaron mucho.

A todos ellos les agradezco por formar parte de mi vida y estar en este gran logro.

**Josué Quimiz**

Dedico este trabajo a mis padres Lorena salvador y Xavier Guerra, aunque mi padre no esté presente físicamente, siempre estará conmigo, a ellos por darme la vida y las ganas de salir adelante, a mi tío Gino Salvador, quien me apoyó siempre con mi carrera para seguir adelante, a mi hermana Pamela y su familia, por estar siempre presentes.

Dedico en especial este trabajo a mi esposo Francis Alvarado y mis hijos Xavier y Maite, ellos son mi mayor fuente de inspiración y motivación para salir siempre adelante, a no rendirme, a luchar, a ser perseverante, por más difícil que sea, siempre apoyándome incondicionalmente en mi vida profesional. Sin ellos quizás mis ideales hubieran sido diferentes, pero gracias a ellos es que logre lo que me propuse desde un principio, ser una gran profesional con principios éticos y morales.

A mis amigos, con quienes siempre comparto mis logros, ahora son mis colegas, gracias a ellos que con su ejemplo de seguir adelante y ser también profesionales, gracias a ellos y su apoyo incondicional, por demostrarme que si se puede, me motivaron a lograrlo también.

A mis abuelitos, que están en un mejor lugar, siempre quisieron verme como profesional, espero estén orgullosos de mí, aunque no se encuentren físicamente conmigo.

A mis suegros Ruth y Francis, por ayudarme en el cuidado de mis hijos para yo poder estudiar.

A mamá Marlene, por brindarme su ayuda, siempre presente en mi vida y motivando para seguir con la meta.

A todos ellos y muchos más que insistieron y fueron perseverantes para que yo finalice y logre mi meta con mucho esfuerzo y dedicación.

**Nathalie Guerra**

## **AGRADECIMIENTOS**

Al terminar el presente proyecto deseamos dejar expresado en estas letras nuestros profundos agradecimientos a:

- A DIOS, siempre estuvo presente en nuestras vidas, en especial en nuestro inicio y final del proyecto, quien nos ha brindado toda la sabiduría necesaria para poder culminar el presente proyecto de grado.
- A los docentes de la Universidad Politécnica Salesiana de la sede Guayaquil por habernos transmitido sus conocimientos durante el tiempo que duró nuestra carrera.
- Al Ing. Teddy Negrete, quien nos brindó su incondicional ayuda para realizar desde el principio de nuestro proyecto de grado, nos guió para hacerlo de una eficaz manera, siempre apoyando y motivando a lograrlo.
- Al Ing. Kléver Carrión, tutor de nuestra tesis, por habernos guiado con sus conocimientos durante el inicio y conclusión del presente proyecto.
- Al Ing. Ervin Solano, por su ayuda al realizar las prácticas en el laboratorio correspondientes al tema.
- A todas las personas que de una u otra manera nos brindaron su ayuda y contribuyeron que este proceso de graduación se llevó con total éxito.

**JOSUÉ QUIMIZ**

**NATHALIE GUERRA**

## **RESUMEN**

El presente proyecto de grado se relaciona con el estudio del comportamiento de la supresión de impulsos tipo atmosféricos en el pararrayos, el cual se comporta como una resistencia no lineal, se realizó la comparación de valores y curvas, tanto en el sistema Matlab – Simulink, utilizando el circuito equivalente del Modelo dependiente de la frecuencia de la IEEE, como en el laboratorio que se realizaron las pruebas para la generación de impulsos mediante elementos pasivos, empleándose un espinterómetro, capacitores, resistencias.

Este modelado matemático servirá de guía para que se realicen pruebas en el laboratorio con los conocimientos adquiridos en el aula, así se podrá realizar otros análisis y prácticas, como de tipo maniobra y pruebas de corrientes.

**Palabras clave: MODELADO, ÓXIDO DE ZINC (ZnO), PARARRAYOS, TRANSITORIO, VARISTOR.**

## **ABSTRACT**

The present project of degree is related to the study of the behavior of the suppression of atmospheric impulses in the lightning rod, which behaves as a nonlinear resistance, the comparison of values and curves was made in both the Matlab system - Simulink, using the equivalent circuit of the IEEE Frequency Dependent Model, and in the laboratory that tests were performed for the generation of pulses using passive elements, using a spectrophotometer, capacitors, resistors.

This mathematical modeling will serve as a guide to test the laboratory with the knowledge acquired in the classroom, as well as other tests and practices, such as maneuvering and testing of currents.

**Keywords: MODELING, SURGE ARRESTERS, TRANSIENT, VARISTOR, ZINC OXIDE (ZnO).**

# TABLA DE CONTENIDO

## CONTENIDO

<b>CERTIFICADOS DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....</b>	<b>II</b>
<b>CERTIFICADO DE SESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UPS.....</b>	<b>III</b>
<b>CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN SUSCRITO POR EL TUTOR.....</b>	<b>IV</b>
<b>DEDICATORIA.....</b>	<b>V</b>
<b>AGRADECIMIENTOS.....</b>	<b>VII</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>VIII</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>IX</b>
<b>TABLA DE CONTENIDO.....</b>	<b>X</b>
<b>ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....</b>	<b>XII</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>XV</b>
<b>TABLA DE ECUACIONES.....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABREVIATURAS.....</b>	<b>XVIII</b>
<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO I.....</b>	<b>3</b>
<b>1. EL PROBLEMA.....</b>	<b>3</b>
1.1. Descripción del Problema.....	3
1.2. Antecedentes.....	3
1.3. Importancia y Alcances.....	4
1.4. Delimitación.....	4
1.5. Objetivos.....	5
1.5.1. Objetivo General.....	5
1.5.2. Objetivos Específicos.....	5
1.6. Marco Metodológico.....	6
1.6.1. Investigación científica.....	6
1.6.2 Método experimental de investigación.....	6
<b>CAPÍTULO II.....</b>	<b>7</b>
<b>MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>7</b>
2.1 INTRODUCCIÓN.....	7
2.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES.....	9
2.2.1 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO:.....	9
2.2.2 SOBRETENSIONES.....	12
2.2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN.....	15

2.2.4 DESCARGAS TIPO ATMOSFÉRICAS (RAYOS) .....	16
2.2.5 PARARRAYOS.....	19
2.2.6 PARARRAYOS PDV100-OPTIMA .....	30
2.2.7 HILO DE GUARDA.....	34
2.2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPRESORES.....	35
2.2.9 ESQUEMA ELÉCTRICO .....	38
<b>CAPITULO III.....</b>	<b>41</b>
<b>3. MATERIALES Y MÉTODOS.....</b>	<b>41</b>
3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN	
41	
<b>CAPÍTULO IV .....</b>	<b>49</b>
<b>4. ANÁLISIS MATEMÁTICO.....</b>	<b>49</b>
4.1. DESCRIPCIÓN .....	49
<b>CAPITULO V.....</b>	<b>57</b>
<b>5. MODELADO Y SIMULACIÓN .....</b>	<b>57</b>
5.1 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE IMPULSO DE	
CORRIENTE TIPO RAYO .....	57
5.1.1 Ecuaciones matemáticas: .....	58
5.2 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE IMPULSO DE VOLTAJE	
TIPO RAYO .....	65
5.3 PORCENTAJES DE ERROR .....	90
<b>CAPITULO VI.....</b>	<b>91</b>
<b>6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....</b>	<b>91</b>
6.1 CONCLUSIONES.....	91
6.2 RECOMENDACIONES.....	93
6.3 ANEXOS .....	94
6.4 BIBLIOGRAFÍA .....	113

## ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

	Pág.
<b>ILUSTRACIÓN 1: Inicio del mecanismo de electrificación .....</b>	<b>8</b>
<b>ILUSTRACIÓN 2: Coordinación de aislamiento .....</b>	<b>11</b>
<b>ILUSTRACIÓN 3: Sobretensiones atmosféricas .....</b>	<b>14</b>
<b>ILUSTRACIÓN 4: Sistema de suministro eléctrico .....</b>	<b>15</b>
<b>ILUSTRACIÓN 5: Descargas atmosféricas .....</b>	<b>18</b>
<b>ILUSTRACIÓN 6: Esquema de pararrayos con explosor y varistor .....</b>	<b>21</b>
<b>ILUSTRACIÓN 7: Corte de un pararrayos de óxido de zinc 8 (con envolvente de porcelana) .....</b>	<b>25</b>
<b>ILUSTRACIÓN 8: Característica tensión-intensidad de los pararrayos de ZnO y SiC .....</b>	<b>26</b>
<b>ILUSTRACIÓN 9: Onda normalizada de 1.2 x 50 <math>\mu</math>s .....</b>	<b>28</b>
<b>ILUSTRACIÓN 10: Pararrayos PDV100-Optima .....</b>	<b>30</b>
<b>ILUSTRACIÓN 11: Partes del pararrayos PDV-100 óptima .....</b>	<b>31</b>
<b>ILUSTRACIÓN 12: Inducción por acople de cable de guarda a conductores en línea de distribución.....</b>	<b>34</b>
<b>ILUSTRACIÓN 13: Modelo dependiente de la frecuencia.....</b>	<b>40</b>
<b>ILUSTRACIÓN 14: Relación tensión-intensidad del modelo .....</b>	<b>40</b>
<b>ILUSTRACIÓN 15: Forma de onda normalizada 1.2/50<math>\mu</math>s.....</b>	<b>42</b>
<b>ILUSTRACIÓN 16: Circuito generador de impulso de tensión.....</b>	<b>44</b>
<b>ILUSTRACIÓN 17: Circuito generador de impulso.....</b>	<b>48</b>
<b>ILUSTRACIÓN 18: Voltaje de impulso visto desde osciloscopio .....</b>	<b>48</b>
<b>ILUSTRACIÓN 19: Circuito básico para un generador de impulsos .....</b>	<b>49</b>
<b>ILUSTRACIÓN 20: Circuito equivalente en dominio de la frecuencia .....</b>	<b>50</b>
<b>ILUSTRACIÓN 21: Circuito de frente de onda .....</b>	<b>55</b>
<b>ILUSTRACIÓN 22: Circuito de cola de onda.....</b>	<b>55</b>
<b>ILUSTRACIÓN 23: Análisis de corrientes de Kirchhoff del modelo de la IEEE ...</b>	<b>57</b>
<b>ILUSTRACIÓN 24: Impulso de corriente tipo rayo 8/20 <math>\mu</math>s. ....</b>	<b>59</b>
<b>ILUSTRACIÓN 25: Forma de onda normalizada 8/20 <math>\mu</math>s.....</b>	<b>59</b>

<b>ILUSTRACIÓN 26: Tiempo de frente de onda de 8 <math>\mu</math>s .....</b>	<b>60</b>
<b>ILUSTRACIÓN 27: Tiempo de cola de onda de 20 <math>\mu</math>s.....</b>	<b>60</b>
<b>ILUSTRACIÓN 28: Puertos del subsistema Inport and Outport.....</b>	<b>61</b>
<b>ILUSTRACIÓN 29: Subsistema con puerto .....</b>	<b>62</b>
<b>ILUSTRACIÓN 30: Fuente de corriente controlada .....</b>	<b>62</b>
<b>ILUSTRACIÓN 31: Circuito de impulso de corriente de 8/20 <math>\mu</math>s en Simulink .....</b>	<b>64</b>
<b>ILUSTRACIÓN 32: Circuito impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50 <math>\mu</math>s. ....</b>	<b>66</b>
<b>ILUSTRACIÓN 33: Circuito impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50 <math>\mu</math>s .....</b>	<b>67</b>
<b>ILUSTRACIÓN 34: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s.....</b>	<b>68</b>
<b>ILUSTRACIÓN 35: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 32,6 kV (sin pararrayos).....</b>	<b>70</b>
<b>ILUSTRACIÓN 36: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 32 kV (con pararrayos).....</b>	<b>70</b>
<b>ILUSTRACIÓN 37: Comparación de datos del Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 32,6 kV.....</b>	<b>71</b>
<b>ILUSTRACIÓN 38: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 45,12 kV (sin pararrayos).....</b>	<b>72</b>
<b>ILUSTRACIÓN 39: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 39,68 kV (con pararrayos).....</b>	<b>72</b>
<b>ILUSTRACIÓN 40: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 45,12 kV.....</b>	<b>73</b>
<b>ILUSTRACIÓN 41: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 55,04 kV (sin pararrayos).....</b>	<b>74</b>
<b>ILUSTRACIÓN 42: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 42,56 kV (con pararrayos).....</b>	<b>74</b>
<b>ILUSTRACIÓN 43: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 55,04 kV.....</b>	<b>75</b>
<b>ILUSTRACIÓN 44: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 60,48 kV (sin pararrayos).....</b>	<b>76</b>
<b>ILUSTRACIÓN 45: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 42,56 kV (con pararrayos).....</b>	<b>76</b>
<b>ILUSTRACIÓN 46: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 60,48 kV.....</b>	<b>77</b>
<b>ILUSTRACIÓN 47: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 72,32 kV (sin pararrayos).....</b>	<b>78</b>
<b>ILUSTRACIÓN 48: Impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 42,56 kV (con pararrayos).....</b>	<b>78</b>
<b>ILUSTRACIÓN 49: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50 <math>\mu</math>s 72,32 kV.....</b>	<b>79</b>
<b>ILUSTRACIÓN 50: El circuito de impulso de voltaje de 1.2/50 <math>\mu</math>s. ....</b>	<b>80</b>
<b>ILUSTRACIÓN 51: Descargador PDV-100 optima .....</b>	<b>83</b>
<b>ILUSTRACIÓN 52: El circuito equivalente eléctrico del pararrayos propuesto por el IEEE W.G.3.4.11 .....</b>	<b>86</b>
<b>ILUSTRACIÓN 53: Los bloques A0 y A1 de resistencia no lineal .....</b>	<b>87</b>

<b>ILUSTRACIÓN 54: Voltaje residual al impulso de corriente de 10KA en un tiempo de 8/20 <math>\mu</math>s .....</b>	<b>88</b>
<b>ILUSTRACIÓN 55: Curva característica de un descargador de sobretensión del bloque surge arrester .....</b>	<b>97</b>
<b>ILUSTRACIÓN 56: Valores solicitados por el bloque.....</b>	<b>98</b>
<b>ILUSTRACIÓN 57: .....</b>	<b>108</b>
<b>ILUSTRACIÓN 58: .....</b>	<b>108</b>
<b>ILUSTRACIÓN 59: .....</b>	<b>109</b>
<b>ILUSTRACIÓN 60: .....</b>	<b>109</b>
<b>ILUSTRACIÓN 61: .....</b>	<b>110</b>
<b>ILUSTRACIÓN 62: .....</b>	<b>110</b>
<b>ILUSTRACIÓN 63: .....</b>	<b>111</b>
<b>ILUSTRACIÓN 64: .....</b>	<b>111</b>
<b>ILUSTRACIÓN 65: .....</b>	<b>112</b>
<b>ILUSTRACIÓN 66 .....</b>	<b>112</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
<b>TABLA 1: Comparación entre los pararrayos de ZnO y SiC .....</b>	<b>20</b>
<b>TABLA 2: Tensiones nominales para las clases de pararrayos .....</b>	<b>21</b>
<b>TABLA 3: Tabla de las características eléctricas del pararrayos .....</b>	<b>32</b>
<b>TABLA 4: Tabla de las características físicas del pararrayos.....</b>	<b>33</b>
<b>TABLA 5: Tabla de los recursos utilizados .....</b>	<b>46</b>
<b>TABLA 6: Registro de resultados.....</b>	<b>47</b>
<b>TABLA 7. Tabla experimental valores obtenidos.....</b>	<b>69</b>
<b>TABLA 8: Resistencias no lineal Ao y A1.....</b>	<b>85</b>
<b>TABLA 9: Tabla de errores con 32.32 kV .....</b>	<b>101</b>
<b>TABLA 10: Tabla de errores con 45.12 kV .....</b>	<b>102</b>
<b>TABLA 11: Tabla de errores con 55.04 kV .....</b>	<b>104</b>
<b>TABLA 12: Tabla de errores con 60.48 kV .....</b>	<b>105</b>
<b>TABLA 13: Tabla de errores con 72.32 kV .....</b>	<b>107</b>

## TABLA DE ECUACIONES

Ecuación 1 .....	10
Ecuación 2 .....	25
Ecuación 3 .....	27
Ecuación 4 .....	29
Ecuación 5 .....	36
Ecuación 6 .....	51
Ecuación 7 .....	51
Ecuación 8 .....	51
Ecuación 9 .....	51
Ecuación 10 .....	51
Ecuación 11 .....	51
Ecuación 12 .....	51
Ecuación 13 .....	51
Ecuación 14 .....	52
Ecuación 15 .....	52
Ecuación 16 .....	53
Ecuación 17 .....	53
Ecuación 18 .....	54
Ecuación 19 .....	55
Ecuación 20 .....	55
Ecuación 21 .....	56
Ecuación 22 .....	56
Ecuación 23 .....	58
Ecuación 24 .....	58
Ecuación 25 .....	58
Ecuación 26 .....	81
Ecuación 27 .....	81

<b>Ecuación 28</b> .....	<b>82</b>
<b>Ecuación 29</b> .....	<b>82</b>
<b>Ecuación 30</b> .....	<b>82</b>
<b>Ecuación 31</b> .....	<b>82</b>
<b>Ecuación 32</b> .....	<b>82</b>
<b>Ecuación 33</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 34</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 35</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 36</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 37</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 38</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 39</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 40</b> .....	<b>84</b>
<b>Ecuación 41</b> .....	<b>87</b>
<b>Ecuación 42</b> .....	<b>90</b>

## ABREVIATURAS

mA	mili amperios
°C	Grados Centígrados
ZnO	óxido de zinc
SiC	carburo de silicio
Fig	Figura
kV	kilo voltios
Gr	Gramos
Bi	bismuto
Sb	estaño
Mn	manganeso
Co	cobalto
Etc.	Etcétera
I	Intensidad
Kg	Kilogramo
U	tensión
Ures	tensión residual
Ur	tensión nominal o asignada
Uc	tensión de funcionamiento continuo
In	corriente nominal de descarga
Máx	Máximo
A	amperios
Min	Mínimo
min	Minuto
mm	Milímetro
Ref	Referencia
Seg.	Segundo
μs	micro segundos
Temp.	Temperatura
kA	kilo amperios

# INTRODUCCIÓN

En la actualidad es más frecuente encontrarnos con problemas relacionados a las descargas tipo atmosféricas que se producen en los sistemas de distribución.

Estas descargas transitorias son generadas por las cargas de un campo eléctrico que se ha creado entre una nube y la tierra o, entre nubes, los cuales ocasionan problemas que afectan el continuo servicio de energía.

El desarrollo de este proyecto de grado se enfocó en los siguientes parámetros:

- Se inicia el presente trabajo abordando la importancia del riesgo que se produce por la sobretensión en los sistemas de energía que puede causar serios daños al aislamiento de los equipos. El rayo puede causar un aumento de sobretensión de dos formas en un sistema de energía:  
La primera mediante una descarga directa a la fase, y el segundo por una descarga cercana a la tierra que se traduce en un aumento inducido en el sistema.
- El pararrayos protege a los sistemas de energía, tanto de la descarga directa e indirecta del rayo, desviando la descarga y la energía a tierra.
- Este pararrayos reduce a un nivel de voltaje adecuado generado por la corriente que fluye por la red para no dañar el equipo.
- Este trabajo describe un modelo matemático del pararrayos de varistor de óxido metálico.
- En este modelo matemático se realiza la comparación de resultados simulados y obtenidos mediante el programa de Matlab / Simulink.

- **Capítulo I:** Se describe el problema y los objetivos que se proponen para resolverlo, mediante el programa Matlab – Simulink.
- **Capítulo II:** Breves conceptos de lo que emplea en el proyecto de grado que deben ser expresados para su entendimiento.
- **Capítulo III:** Desarrollo experimental que se realizan en el laboratorio para análisis del tema propuesto.
- **Capítulo IV:** Análisis matemático que se realizan en el programa *Matlab* – *Simulink* para la comprobación de datos.
- **Capítulo V:** Modelado y simulación
- **Capítulo VI:** Conclusiones y recomendaciones.

Bibliografías

Anexos

# **CAPÍTULO I**

## **1. EL PROBLEMA**

### **1.1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA**

Las sobretensiones de tipo atmosféricas que existen en un sistema de distribución de media tensión pueden ser de amplitudes grandes y perjudiciales para el aislamiento del equipo, por ello se demuestra en el laboratorio de alta tensión el correcto funcionamiento de la protección del pararrayo de media tensión.

Por ello, estas demostraciones se efectuarán en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, así como también por medio de ecuaciones diferenciales modeladas matemáticamente utilizando el software Matlab – Simulink para la resolución de las ecuaciones.

### **1.2. ANTECEDENTES**

Se han realizados varias investigaciones de estudio para los pararrayos valvulares de óxido de zinc, con el fin de comprender el funcionamiento del mismo, y sus características no lineales que son mejores que las del pararrayos de óxido de silicio; su característica tensión – corriente es más cercana al ideal que la de los pararrayos de SiC, por ello han sido sustituidos en su mayoría.

Estos pararrayos se encargan de controlar y receptor la descarga que se pueden generar en su lugar de protección. Estos pararrayos aprovechan la energía de las tormentas para transformarla en impulsos repetidos. Se utilizan los pararrayos valvulares por su óptimo funcionamiento, su eficacia y su fácil proceso de instalación en comparación con la jaula de Faraday, además son de precio accesible al usuario.

### **1.3. IMPORTANCIA Y ALCANCES**

El presente trabajo de titulación tiene como finalidad entender el funcionamiento de la protección del pararrayo de media tensión llevado desde la parte teórica a la parte práctica, permitiendo el aprendizaje de los alumnos de Ingeniería Eléctrica.

Obteniendo provecho de los equipos ya existentes en el laboratorio se verifican y comparan datos analizados en la teoría, simulación y práctica. Proporcionando de esta manera resultados cualitativos y cuantitativos.

### **1.4. DELIMITACIÓN**

El modelado matemático que queremos demostrar es del funcionamiento de un pararrayo de 10000 voltios, simulando en el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana de Guayaquil el suministro de media tensión.

La característica principal del modelado matemático es poder ver mediante ecuaciones que vamos a encontrar e ingresarlas en el programa para crear la curva característica de la función de pararrayo.

La búsqueda de la información para poder realizar el modelado matemático para la Carrera de Ingeniería Eléctrica, van a ser de muchas fuentes como, la biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana Centenario, el repositorios digital de la misma, información de característica técnicas sacados del internet.

Para poder llevar a cabo la investigación haremos uso del laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana Guayaquil del bloque B, donde realizaremos las pruebas con el panel de pruebas marca TERCO del laboratorio.

La herramienta que se van a utilizar para poder realizar el modelado matemático es el Software de Matlab - Simulink.

## **1.5. OBJETIVOS**

### **1.5.1. Objetivo General**

Realizar un modelo matemático simulado en el programa Matlab - Simulink para comparar la supresión transiente real de un pararrayo de distribución de un impulso tipo atmosférico recreado en el laboratorio de alta tensión.

### **1.5.2. Objetivos Específicos**

- Realizar el análisis del equivalente eléctrico de un pararrayo de distribución.
- Planteamiento de ecuaciones y modelación de las mismas en Matlab para determinación de resultados teóricos.
- Plantear el circuito generador de impulso atmosférico para analizar experimentalmente el efecto supresor de los pararrayos de distribución.
- Realizar la comparación de los resultados obtenidos en los ensayos de impulsos tipo atmosféricos en Matlab y verificar los porcentajes de error.

## **1.6. MARCO METODOLÓGICO**

### **1.6.1. Investigación científica**

Para profundizar la investigación del tema mencionado, tomar como referencia la información de libros, manuales, catálogos, información de internet y ayuda de docentes que tienen conocimiento del tema; también basándonos en experimentos similares de descargas de tipo atmosféricas, llegamos a la conclusión de desarrollar en un software la supresión de impulsos tipo atmosférico de pararrayos de media tensión en sistemas de distribución.

### **1.6.2 Método experimental de investigación**

Según (Gutiérrez, 1992), la experimentación es el método del laboratorio científico, donde los elementos manipulados y los efectos observados pueden controlarse. Nos indica que podemos realizar las prácticas desde otro punto de vista, modificando conexiones e ingreso de valores para obtener diferentes resultados.

## **CAPÍTULO II**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **2.1 INTRODUCCIÓN**

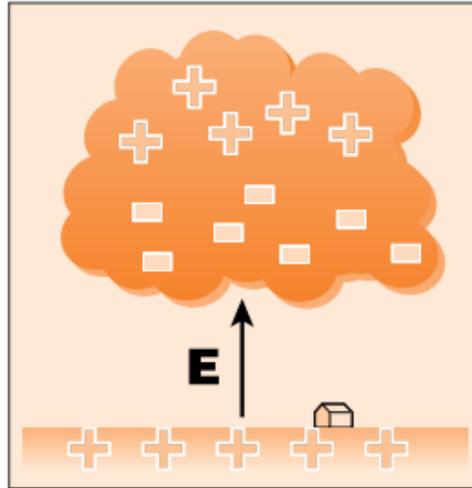
Las descargas atmosféricas son uno de los fenómenos naturales más espectaculares y comunes. En los dos siglos transcurridos desde que Benjamín Franklin demostró en 1752 que el rayo era una descarga eléctrica gigantesca, relámpagos, rayos y tormentas han sido objeto de numerosas investigaciones científicas.

Sin embargo, pese a la avalancha de nuevos equipos, los orígenes de las descargas atmosféricas y del mecanismo mediante el cual se electrifican las nubes continúan mostrándose esquivos.

La dificultad reside en la propia física de la descarga y de las tormentas, que abarca una escala de 15 órdenes de magnitud. Desde Franklin, se ha aceptado que el relámpago es el paso de carga eléctrica positiva o negativa, de una región de la nube a otra, y el rayo es el tránsito equivalente de la nube a tierra.

Se estima que en nuestro planeta existen simultáneamente unas 2.000 tormentas y que cerca de 100 rayos descargan sobre la tierra cada segundo. En total, esto representa unas 4.000 tormentas diarias y unos 9 millones de descargas atmosféricas cada día.

La caída de rayos, también conocida como las sobretensiones transitorias de origen atmosférico, representa un serio problema que se debe tener en cuenta.



**ILUSTRACIÓN 1:** Inicio del mecanismo de electrificación  
([https://www.schneiderelectric.es/html/.../docs/guia.../capitulo\\_03.pdf](https://www.schneiderelectric.es/html/.../docs/guia.../capitulo_03.pdf)).

## **2.2 DEFINICIONES Y CONCEPTOS GENERALES**

### **2.2.1 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO:**

#### **2.2.1.1 Objetivos**

Como confirma (Morón, 2009), los equipos e instalaciones eléctricas son sometidos a sobretensiones que pueden afectar su aislamiento y provocar un fallo o una avería. Una sobretensión es una sollicitación variable en el tiempo cuyo valor máximo es superior al valor de cresta de la tensión nominal del sistema en el que se origina. Las sobretensiones en una red eléctrica se originan como consecuencia de una falta, una maniobra o una descarga atmosférica.

Su estudio es fundamental para determinar tanto el nivel de aislamiento que se debe seleccionar para los distintos componentes de un sistema, como los medios o dispositivos de protección que es necesario instalar. Todo esto se debe realizar conociendo el comportamiento de los distintos aislamientos frente a todo tipo de sobretensiones. Y por razones similares, la selección y ubicación de los distintos medios de protección sólo se podrá realizar de forma adecuada si se conoce su comportamiento frente a las distintas sobretensiones.

Existen varias formas de definir este concepto. Una primera aproximación definiría la Coordinación de Aislamiento como la selección de la tensión soportada de los distintos equipos. Puesto que el comportamiento de cualquier aislamiento depende del tipo de sollicitación al que es sometido, la definición se puede completar tal como aconseja la norma UNE-EN 60071-1 [10]: la Coordinación de Aislamiento es la selección de la rigidez dieléctrica de los equipos en relación con las tensiones que pueden aparecer en el sistema en el cual se han instalados, teniendo en cuenta las condiciones ambientales de servicio y las características de los dispositivos de protección disponibles.

La primera selección de la tensión soportada se puede basar en la siguiente regla:

Ecuación 1                      Tensión soportada = Máxima sobretensión

En la práctica es necesario tener en cuenta otros aspectos y no es aconsejable seleccionar el nivel de aislamiento a partir de esta igualdad. El valor más elevado o desfavorable de un determinado tipo de sobretensión, se presentará generalmente con una frecuencia muy baja, por lo que el coste del aislamiento seleccionado de esta forma podría ser excesivo. Es, por tanto, impensable seleccionar el nivel de aislamiento de un equipo de forma que pueda soportar cualquier sobretensión que se pueda presentar; la selección se debe realizar teniendo en cuenta los medios de protección que se pueden utilizar y aceptando una probabilidad de fallo. Además conviene tener en cuenta que el objetivo de la coordinación de aislamiento no es proteger sólo a los equipos eléctricos sino también impedir que se averíen los dispositivos de protección. Es decir, la selección de los dispositivos de protección se deberá realizar considerando las solicitaciones a las que estos se verán sometidos.

Una práctica muy común en cualquier campo de la ingeniería es aceptar una cierta probabilidad o riesgo de fallo. Esta probabilidad se debería escoger después de un estudio de optimización de costes, de forma que los costes totales que resulten de sumar los costes de inversión y los costes derivados de una avería sean óptimos. Algunas sobretensiones, fundamentalmente aquellas que servirán para seleccionar el aislamiento, se pueden caracterizar de forma estadística mediante una función de densidad de probabilidad. Asimismo, la rigidez dieléctrica de un aislamiento no tiene un comportamiento único, sino un comportamiento estadístico, y además depende de la forma de onda de tensión aplicada.

Considerando estos aspectos, se puede definir la Coordinación de Aislamiento como la selección de la tensión soportada normalizada de los equipos teniendo en cuenta las sobretensiones que pueden aparecer, así como los medios de protección que se pueden

instalar y las condiciones ambientales de la zona, para obtener un riesgo de fallo aceptable.

Se deduce que una selección óptima de los aislamientos y de los dispositivos de protección contra sobretensiones requiere un conocimiento riguroso de la siguiente información:

- Origen y distribución estadística de las sobretensiones que se pueden originar.
- Caracterización de los distintos tipos de aislamientos.
- Dispositivos de protección que es posible seleccionar o instalar.
- Coste de las distintas opciones o estrategias.



**ILUSTRACIÓN 2: Coordinación de aislamiento**  
(<http://asturiasverde.blogspot.com>, 2008\_11\_01\_)

## **2.2.2 SOBRETENSIONES**

### **2.2.2.1 Introducción**

El transporte de la energía eléctrica exige medios adecuados para el tránsito de esa energía, lo cual hace necesario el empleo de materiales que se caracterizan, unos por su elevada conductividad eléctrica y otros por su alta rigidez dieléctrica.

El dimensionamiento de la aislación de un sistema de transmisión, se integra con trabajos de investigación experimental y con métodos de cálculo.

Para ello es necesario:

- 1.** El conocimiento de las sollicitaciones a las cuales estará expuesta la aislación.
- 2.** El conocimiento de las características de la aislación o resistencia a las diferentes clases de sollicitaciones por parte de los diversos aislantes que integran la aislación.
- 3.** Los cálculos matemáticos para determinar los riesgos de falla de las diversas aislaciones concretamente involucradas en la construcción del sistema.

### **2.2.2.2 Conceptos Generales**

Las sobretensiones pueden, además de producir descargas que destruyan o averíen severamente el material, ser la causa de otras sobretensiones. Los peligros de sobretensión no se deben solamente a su magnitud sino también a la forma de onda. Si a pesar de todas las previsiones y precauciones que se pueden tomar en una instalación, se producen sobretensiones, deben procurarse que descarguen a tierra lo más pronto posible por medio de los correspondientes dispositivos de protección llamados descargadores de sobretensión.

Las sobretensiones se producen tanto en las instalaciones de baja tensión como en las de alta tensión. Generalmente en las instalaciones de baja tensión tiene menos importancia que en las de alta tensión debido a que en estas últimas, las propias condiciones de funcionamiento provocan la aparición de sobretensiones.

### 2.2.2.3 Clasificación de las sobretensiones

Existen dos clases de sobretensiones:

- A. **Sobretensiones de origen externo:** Son las sobretensiones que se deben exclusivamente al contacto eléctrico accidental de alguna parte del sistema, se considera con una fuente de tensión externa al mismo, comprende sobre todo las sobretensiones de origen atmosférico como los rayos y cargas estáticas sobre las líneas. Se las denomina también sobretensiones atmosféricas.
  
- B. **Sobretensiones de origen interno:** Son las que se producen al variar las propias condiciones del servicio del sistema. A este grupo pertenecen las oscilaciones de la intensidad de corriente, las variaciones de carga, las descargas a tierra etc. En todos los procesos, la energía acumulada en los elementos inductivos y capacitivos que componen los circuitos de una instalación, pueden llegar a descargar de tal modo que originan aumentos de tensión perjudiciales. Esta clase de sobretensiones comprende las sobretensiones temporarias y las sobretensiones de maniobra.
  
- **Sobretensiones Temporarias:** Comprende los estados estacionarios que se presentan durante la puesta en servicio o fuera de servicio de una carga sobre todo cuando la red comprende líneas de gran longitud. Se incluyen también en este grupo las sobretensiones permanentes provocadas por defectos a tierra. Las sobretensiones temporarias se caracterizan por su

naturaleza oscilatoria, duración relativamente larga y forma de onda poco amortiguada. Su frecuencia puede ser igual, mayor o menor que de la red.

- **Sobretensiones de Maniobra:** Son fenómenos transitorios provocados por los bruscos cambios de estado de una red, por ejemplo maniobras de interruptores, descarga a tierra etc. Las sobretensiones de maniobra se caracterizan por su forma impulsiva, con clavadores de frente y hasta el valor medio, mayores a la de origen atmosférico. (Torresini, 2000).



**ILUSTRACIÓN 3: Sobretensiones atmosféricas**  
(<https://www.zenithelectricidad.com>, 2002)

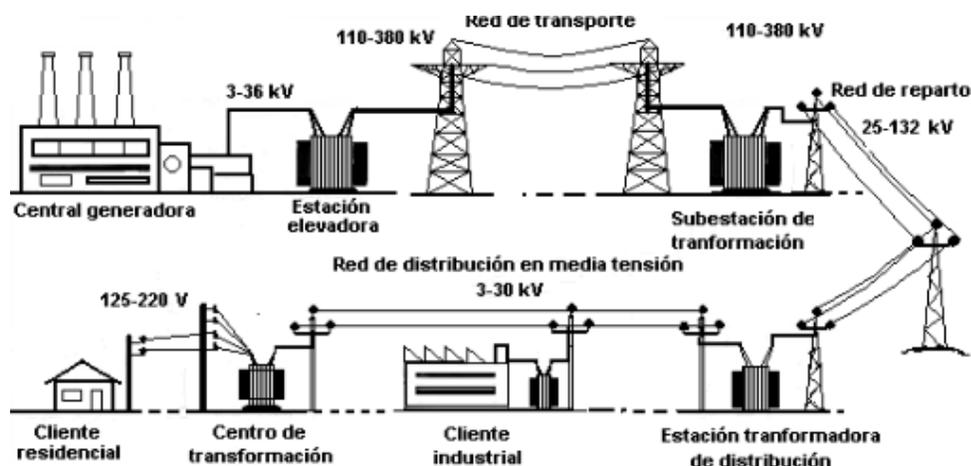
### 2.2.3 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Según refiere (Morón, 2009), un sistema de distribución de energía eléctrica es el conjunto de elementos encargados de conducir la energía desde una subestación de potencia hasta el usuario. Básicamente la distribución, las líneas secundarias de distribución y las acometidas y medidores.

#### 2.2.3.1 Objetivo de la distribución de energía eléctrica

La distribución de energía eléctrica debe realizarse de tal manera que el cliente reciba un servicio continuo sin interrupciones, con un valor de tensión adecuado que le permita operar sus aparatos eficientemente, y que la forma de onda senoidal sea pura, es decir que esté libre de armónicas. La distribución de energía eléctrica debe llevarse a cabo con redes bien diseñadas que soporten el crecimiento propio de la carga, y que además sus componentes sean de la mejor calidad para que resistan el efecto del campo eléctrico y los efectos de la intemperie a que se verán sometidas durante su vida útil.

Las redes eléctricas deben ser proyectadas y construidas de manera que tengan la flexibilidad suficiente para ampliarse progresivamente con cambios mínimos en las construcciones existentes, y así asegurar un servicio adecuado y continuo para la carga presente y futura al mínimo costo de operación. (Morón, 2009).



**ILUSTRACIÓN 4: Sistema de suministro eléctrico**  
([https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_suministro\\_eléctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_eléctrico))

## **2.2.4 DESCARGAS TIPO ATMOSFÉRICAS (RAYOS)**

### **2.2.4.1 Origen y características**

Según (Morón, 2009), las descargas atmosféricas se originan de nubes cargadas eléctricamente, las que generalmente contienen cargas positivas en la parte superior y cargas negativas en la parte inferior. Como resultado de estas cargas, se generan campos eléctricos dentro de las nubes, entre nubes y entre éstas y tierra.

El mecanismo de las descargas atmosféricas ha sido estudiado con equipos especiales, lo que ha arrojado resultados confiables. De estos estudios se ha encontrado que la descarga se inicia normalmente en un lugar de mayor esfuerzo eléctrico, y en la mayoría de los casos, una carga negativa es la que inicialmente se descarga hacia la tierra. Esta descarga se le conoce como “Descarga Líder”. Cuando una descarga se aproxima hacia la tierra, un alto esfuerzo eléctrico se desarrolla sobre la superficie de la tierra, induciéndose una carga positiva. Cuando ésta encuentra a la “Descarga Líder”, una trayectoria conductora se establece entre la nube y la tierra, produciéndose una fuerte descarga.

### **2.2.4.2 Concepto de rayo**

La descarga eléctrica atmosférica o rayo (*lightning discharge*), es la transferencia violenta de carga positiva o negativa de un campo eléctrico que se ha creado dentro de una nube, de nube a nube, de nube a tierra o bien de tierra a nube. La cual se produce a consecuencia del rompimiento de la rigidez dieléctrica del aire y de la conductividad propia de la atmósfera.

### **2.2.4.3 Formación de la carga en la atmósfera**

La formación de la carga en la atmósfera se genera en la capa llamada tropósfera (capa de aire que está en contacto con la superficie de la tierra y que alcanza los 10 Km de altura), en ella también se producen las nubes, las lluvias, las tormentas, los vientos, etc.

Esta carga se produce por los cambios meteorológicos predominantes que hacen variar constantemente el equilibrio eléctrico en el aire, ésta depende de las siguientes teorías:

- Presencia de iones en el aire
- Conductividad eléctrica en la atmósfera
- Condensación de gotas de lluvia en el aire
- Cambio de temperatura en la nube

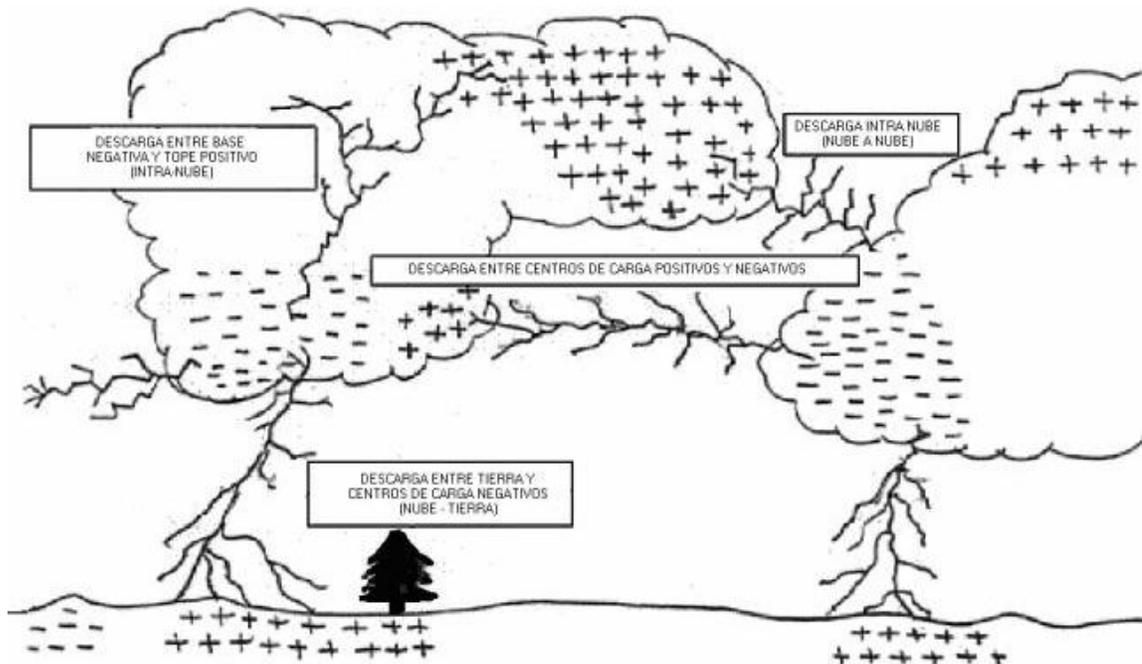
#### **2.2.4.4 Efecto de las descargas atmosféricas en los sistemas aéreos de distribución**

Cuando las descargas inciden en los circuitos aéreos, bien sean conductores, hilos de guarda o postes, se pueden producir tensiones transitorias excesivas en el sistema. Las descargas que inciden cerca de un poste pueden inducir tensiones excesivas en la línea, las que finalmente causan flameos. Las tensiones transitorias pueden viajar a lo largo de la línea y causar fallas de aislamiento del equipo conectado a ella, esto si no se han protegido adecuadamente los equipos.

Según indica (Morón, 2009), cuando la punta de una descarga hace contacto con la línea aérea de distribución, el flujo de carga negativa fluye de la descarga de la línea. Esta carga fluye primero de las porciones más bajas y después de las porciones más altas de la columna de descarga. El efecto es el mismo que si la carga positiva fluyera hacia la descarga y neutralizara la carga negativa de la descarga. La región en la que se efectúa la neutralización se mueve hacia arriba a una velocidad de aproximadamente un tercio de la luz. Como se mencionó antes, a esta descarga se le conoce como la descarga de regreso y alcanza valores cresta de 1000 a 150000 amperes y el valor cresta en tiempos que fluctúan en menos de un microsegundo a más de 10 microsegundos.

### 2.2.4.5 Protección de líneas de transmisión contra las descargas atmosféricas (rayo)

Los diseños de protección de líneas y subestaciones eléctricas contra las descargas atmosféricas tienen como objetivo limitar la incidencia directa de rayos sobre las mismas. Estos diseños son evaluados a partir de la información que reportan los mapas de niveles isocerámicos. Sin embargo, se considera que la información cerámica no constituye la mejor estimación de la intensidad electro atmosférico. En la actualidad, se ha adoptado la densidad de rayos a tierra como el parámetro más representativo para el diseño de la protección de los sistemas eléctricos.



**ILUSTRACIÓN 5: Descargas atmosféricas**  
(<https://www.cibernautica.com/rayosycentellas/index.htm>)

## **2.2.5 PARARRAYOS**

### **2.2.5.1 Introducción**

Según refiere (Velasco, 2013), una red segura exige una protección extensiva del equipo eléctrico contra sobretensiones. Las protecciones contra sobretensiones pueden conseguirse básicamente de dos formas distintas:

- Evitando la sollicitación producida por las descargas eléctricas de los rayos en el punto de origen, mediante la instalación de cables de guarda.
- Limitando la sollicitación de tensión cerca del equipo eléctrico, mediante la instalación de pararrayos próximos a los equipos a proteger.

Los pararrayos son dispositivos cuya misión es limitar las sobretensiones en los sistemas en los que están instalados, protegiendo al resto de los equipos. Durante la explotación normal del sistema, a través de los pararrayos sólo circula una pequeña corriente de fuga (del orden de unos pocos mA). Sin embargo, cuando aparece una sobretensión en el sistema, los pararrayos derivan a tierra la sobre intensidad asociada, limitando la tensión a valores que pueda soportar los equipos.

La correcta selección de pararrayos es fundamental para limitar la tensión en los equipos que deben proteger. Existen diversos tipos de pararrayos instalados en las diferentes redes eléctricas, pero actualmente los más comúnmente utilizados son los pararrayos sin explosores de óxido de zinc (ZnO).

### 2.2.5.2 Tablas de pararrayos

En la **Tabla 1** se resumen las principales características de los pararrayos de ZnO comparados con los de SiC. En forma general pueden resumirse a continuación las ventajas que estos dispositivos tienen con respecto a los del tipo auto valvular (Espinosa, 2005).

- Mejoran los márgenes de protección.
- Mayor capacidad térmica.
- Construcción más sencilla al no tener entrehierros.
- Tamaño y peso reducido.
- Mejor comportamiento en zonas contaminadas.

**TABLA 1: Comparación entre los pararrayos de ZnO y SiC**

Carburo de Silicio	Óxido de Zinc
Requiere entrehierros	No requiere entrehierros
Debe llegar a una tensión de chispeo para descargar la energía debida a una sobretensión.	Al no tener entrehierros conduce la corriente de descarga de forma inmediata después que se presenta una sobretensión.
Bajo condiciones normales de operación es insensible al medio ambiente.	Es relativamente insensible al medio ambiente; sin embargo, es muy sensible a la temperatura, siendo ésta por tanto una variable muy importante en su diseño.

(Espinosa, 2005) (Morón, 2009)

Existen tres clases de pararrayos: Distribución, Intermedio y Estación. Para la mayoría, las principales diferencias de estos tipos de pararrayos es el tamaño del bloque. Un bloque más grande reduce la tensión de descarga IR e incrementa bastante la capacidad de energía y su confiabilidad. Las 3 clases de pararrayos están disponibles para las redes de distribución como se muestra en la **Tabla 1.2**. Los pararrayos del tipo distribución son usados en los alimentadores mientras que el intermedio y el tipo estación son usados en las subestaciones eléctricas.

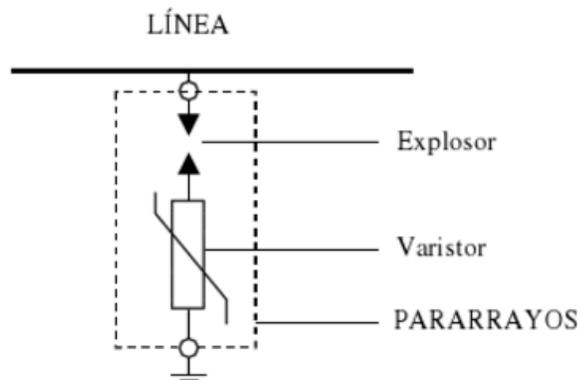
**TABLA 2: Tensiones nominales para las clases de pararrayos**

Voltajes nominales en kV																	
Distribución	1	3	6	9	10	12	15	18	21	25	27	30					
Intermedios Estación	3	6	9	12	15	21	24	30	36	39	48	60	72	90	96	108	120

(Rojas, 2012)

### 2.2.5.3 Pararrayos de carburo de silicio (sic) con explosores

Según afirma (Velasco, 2013). Hasta los años ochenta, los dispositivos más comúnmente utilizados para proteger los equipos contra sobretensiones eran los descargadores o pararrayos con explosores. Consisten en la asociación en serie de explosores y resistencias variables (varistores), como muestra la Figura. En condiciones normales de operación, los varistores están aislados del circuito por el explosor, siendo introducidos cuando se produce el cebado del explosor como consecuencia de una sobretensión.



**ILUSTRACIÓN 6: Esquema de pararrayos con explosor y varistor**

Por tanto, el elemento resistente es, diseñado desde el punto de vista de disipación de energía y limitación de tensión bajo estas condiciones, sin considerar el estado de no disparo del explosor (entonces la resistencia está aislada). El material más utilizado tradicionalmente como varistor ha sido el carburo de silicio (SiC). La tensión de cebado (sparkover voltage) es aquella que causa el cebado de los electrodos del pararrayos (formación del arco en los explosores).

La magnitud de esta tensión de cebado depende de la forma de onda de la sobretensión. Así, según el tipo de onda considerado se definen diferentes tensiones de cebado: tensiones de cebado al frente de onda, tensión de cebado al 100 por 100 de la onda de choque, tensión de cebado al 50 por 100 de la onda de choque, tensión máxima de cebado en la onda de choque por maniobra, tensión alterna de cebado, etc. Si el varistor de SiC estuviera permanentemente en paralelo con el resto del sistema (es decir, sin explosores), la corriente residual que circularía a través suyo por estar conectado a la red, sería tan elevada que lo destruiría.

Por tanto, los explosores tienen una doble función: Aislar la resistencia variable de la tensión del sistema, de forma que por el pararrayos no circule ninguna corriente residual en condiciones normales de explotación. En caso de producirse una sobretensión en el sistema, el explosor debe reaccionar dejando el varistor en paralelo con la red, derivando la sobre intensidad a tierra por medio del arco y de las resistencias variables, y extinguir la corriente residual originada por la tensión de servicio después del proceso de derivación. Todos los explosores de extinción están compuestos por uno o más grupos de electrodos conectados en serie. El número de electrodos depende de la tensión y de la capacidad de extinción exigidas. Cada grupo contiene dos electrodos, cuya forma y separación determina la tensión de cebado.

El principal problema asociado a los pararrayos de SiC radica en la extinción del arco una vez finalizada la sobretensión, en caso de no producirse conllevaría la destrucción de las resistencias variables debido a la gran exigencia energética. Según el nivel de tensión y de las condiciones de humedad y contaminación de la zona, se distinguen varios tipos de explosores:

**Explosores planos (utilizados para baja y media tensión):** Los explosores tienen abombamientos estampados para el cebado. El abombamiento excéntrico y la abertura de apagado situada en el lado opuesto al anillo distanciador, permiten una rápida disminución del arco.

- **Explosores planos para baja tensión:** Suelen estar compuestos por dos electrodos con puntos de reacción concéntricos en forma de anillo, para garantizar una distribución homogénea del campo eléctrico.
- **Explosores planos para media tensión:** Los electrodos son redondos, de diámetro grande, ordenados uno tras otro a pequeñas distancias, ofreciendo así mayor capacidad para el control durante el cebado. La pre-ionización, obtenida por la forma característica del electrodo, da como resultado tensiones de cebado bajas incluso con ondas de choque de frente rápido. Explosores con soplado magnético para alta tensión (o explosores activos).

Tras producirse un cebado a través de los explosores, la corriente residual circula por una bobina de soplado, produciendo un campo magnético cuyo efecto es llevar el arco de los puntos de cebado hacia una cámara donde es alargado considerablemente. Cuando la tensión del arco alcanza el valor de la tensión máxima de servicio, se extingue la corriente residual. Esto ocurre mucho antes del siguiente paso por cero (no requieren el paso de corriente por cero). El elemento de extinción de estos explosores está formado por cámaras cerámicas permeables a los gases, y por una bobina de soplado.

El soplado magnético facilita la extinción del arco una vez ha concluido la sobretensión. Puesto que este tipo de explosores absorbe una gran cantidad de la energía transformada en la extinción, se les denomina explosores activos. Estas modificaciones permitieron emplear resistencias de SiC de menor valor, reduciendo la tensión residual a un nivel aceptablemente similar a la tensión de cebado, y con una corriente residual mucho mayor.

- Las necesidades de descargar mayor energía provienen de la aparición de sobretensiones de maniobra peligrosas con tensiones de red de 245 kV y superiores. El efecto del soplado magnético es tan eficaz que el arco original se alarga de 50 a 100 veces con este sistema. La necesidad de distribuir uniformemente la tensión de cebado entre los explosores de la columna de un módulo y mantenerla dentro de los límites, condujo a introducir elementos

reguladores en los pararrayos de mayor responsabilidad (especialmente para tensiones a partir de 245 kV), basados en resistencias de compensación no lineales, de impedancia mucho más elevada que la de los bloques de SiC principales, y que forman el control óhmico del pararrayos. Un segundo control es el relacionado con el apantallamiento contra influencias externas.

Los explosores en pararrayos no controlados se encuentran a un potencial libre, el cual se regula según las capacidades parciales. Variaciones del campo eléctrico en los alrededores del pararrayos llevan consigo cambios incontrolables de la distribución de tensión en los explosores. Para evitar en lo posible el efecto de estas capacidades de acople en la distribución de tensión a lo largo de los explosores, se rodean con resistencias y condensadores cilíndricos, reduciendo significativamente el acoplamiento capacitivo directo de los campos perturbadores externos mediante un apantallamiento activo.

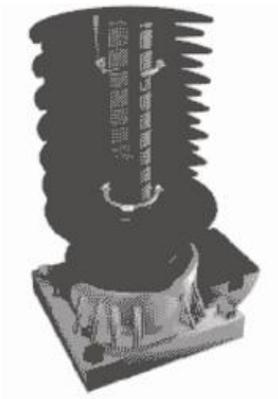
La complejidad de fabricación y funcionamiento de los pararrayos de SiC debido a la presencia de explosores (con la consiguiente necesidad de extinción del arco generado) y las peores características del SiC hacen que actualmente las empresas eléctricas ya no instalen este tipo de pararrayos (actualmente se utilizan pararrayos de ZnO sin explosores), aunque todavía permanece instalada una gran cantidad de ellos en el actual parque eléctrico.

#### **2.2.5.4 Pararrayos de óxido de zinc (ZNO) sin explosores**

A mediados de los años ochenta aparecen por primera vez en el mercado nuevos materiales para una amplia gama de aplicaciones eléctricas y electrónicas. Dentro de este grupo de materiales destacan los varistores de óxido de zinc (ZnO), semiconductores cuya propiedad más relevante es la fuerte no-linealidad de su curva característica (tensión-intensidad), que los hace muy útiles en la tecnología de los pararrayos. Estos compuestos son fabricados a partir de la mezcla de polvo de ZnO con óxidos de metales de transición (Bi, Sb, Mn, Co, etc.). Su procesamiento en líneas generales es: mezcla,

compactación y sintetización. Las propiedades eléctricas que desarrollan dependen de la composición de partida, la calidad de los polvos (tamaño de las partículas y pureza de los mismos), así como de las condiciones de fabricación. En la Figura se presenta el esquema general de un pararrayos de ZnO, así como una vista de su corte.

La propiedad eléctrica más importante del ZnO es la posibilidad de soportar corrientes de muy distintas magnitudes en un estrecho rango de tensiones; por ejemplo, para variaciones de tensión de un factor  $10^3$ , la intensidad puede variar un factor de  $10^{11}$ .



**ILUSTRACIÓN 7: Corte de un pararrayos de óxido de zinc 8 (con envoltorio de porcelana)**

La característica tensión-intensidad de la zona no lineal para un varistor de resistencia variable viene expresada en general según la siguiente ecuación:

Ecuación 2 
$$I = \beta \cdot U^\alpha$$

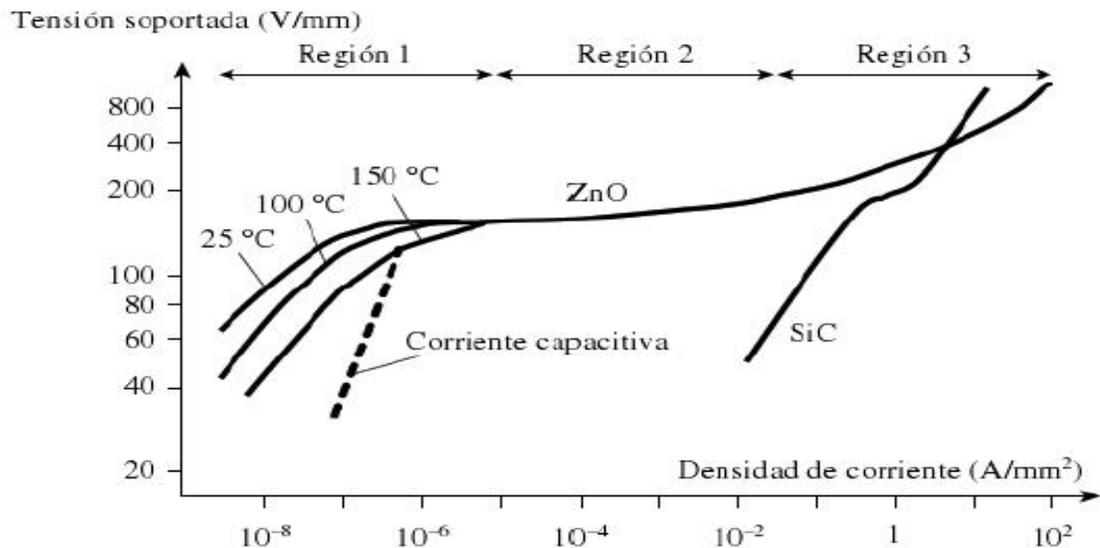
Donde el factor  $\beta$  depende del material y del proceso de fabricación, y es controlado por la geometría del elemento, siendo directamente proporcional a la sección del elemento e inversamente proporcional a la longitud del mismo. Una medida de la no-linealidad entre corriente y tensión es el exponente  $\alpha$  (coeficiente de no-linealidad), cuyo valor depende de las características del material. Para el SiC, este factor  $\alpha$  está comprendido entre 2 y 6, mientras que para el ZnO puede alcanzar valores comprendidos entre 20 y 50. Por tanto, el ZnO presenta mayor no-linealidad que el SiC.

En la característica de la figura se distinguen tres regiones de operación:

**a) Región 1: Pre descarga, pre-ruptura o lineal**

A menudo se denomina también zona óhmica, de fugas o de baja corriente. Es la zona de trabajo del pararrayos correspondiente a las condiciones normales de operación de la red (en ausencia de sobretensiones). La corriente que circula a través del pararrayos en esta zona de operación se denomina corriente de fuga, y es proporcional a la tensión. La resistividad del material en esta región presenta una dependencia con coeficiente negativo respecto a la temperatura (a mayor temperatura menor resistencia y, por tanto, mayor corriente de fugas), por lo que la curva característica tensión-intensidad varía en función de la temperatura. Trabajar a temperaturas elevadas implica un aumento de la energía a disipar, incrementándose aún más la temperatura y, por tanto, el riesgo de la ruptura térmica, que supone la destrucción del elemento.

Lo mismo sucede trabajando con tensiones muy elevadas. Por ello, cada pararrayos tiene un valor máximo eficaz de tensión de funcionamiento continuo por encima del cual no está garantizado su correcto funcionamiento. En esta zona la corriente de fuga es inferior a  $10^{-5}$  A/mm<sup>2</sup>.



**ILUSTRACIÓN 8: Característica tensión-intensidad de los pararrayos de ZnO y SiC**  
(Velasco, 2013)

La elevada no-linealidad de los varistores de ZnO permite poder prescindir de explosores, debiendo el pararrayos ser capaz de soportar la tensión más elevada de la red (Us) durante tiempo indefinido.

### **b) Región 2: Región de descarga, ruptura o no lineal**

En este segundo tramo de la curva tensión-intensidad no existe dependencia respecto a la temperatura, y su expresión es:

Ecuación 3 
$$\frac{I_1}{I_2} = \left[ \frac{U^1}{U^2} \right]^\alpha$$

Donde  $\alpha$  es el coeficiente de no-linealidad, que varía entre 30 y 50, I es la corriente de descarga ( $I > 10^{-5}$  A/mm<sup>2</sup> en esta región) y U es la tensión residual del pararrayos. En esta región, grandes aumentos de la corriente de descarga producen pequeños incrementos en la tensión residual. Por tanto, a mayor coeficiente de no-linealidad, mayor será la protección (menor incremento de tensión para cada valor de corriente de descarga). Esta es la zona de funcionamiento del pararrayos cuando se produce una sobretensión significativa en el sistema.

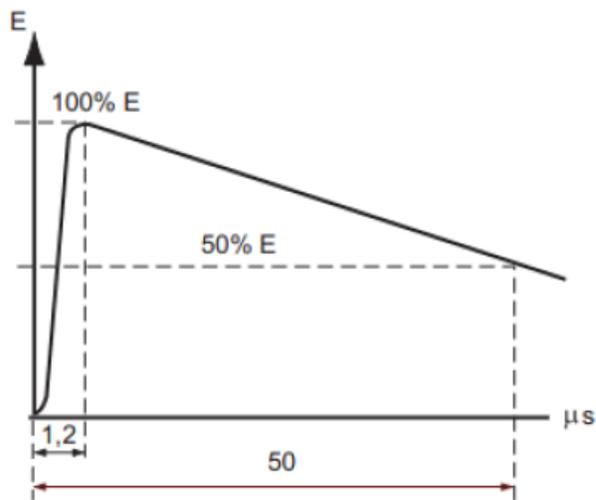
### **c) Región 3: Alta descarga o alta corriente («upturn»)**

En esta zona la corriente crece muy rápidamente, a partir de 0,2 a 0,5 A/mm<sup>2</sup>. La curva característica tensión-intensidad es de nuevo lineal, de forma similar a la de baja corriente.

#### **2.2.5.5 Normas existentes para normalizar la onda de tensión**

Con el objetivo de verificar en laboratorios el comportamiento de los aislantes frente a los diferentes tipos de sobretensiones, se han establecido las formas de ondas normalizadas por ejemplo la norma UNE-EN 60071-1 (Mockey, 2002); (Hasse, 2002); (Ramírez, 2009), aplicada a sistemas en donde las características fundamentales son:

- **Impulso de tensión tipo maniobra normalizado:** Es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 250  $\mu\text{s}$  y un tiempo de cola de 2,500  $\mu\text{s}$ .
- **Tensión normalizada de corta duración a frecuencia industrial:** Es una tensión sinusoidal, de frecuencia comprendida entre 48 y 62 Hz, y una duración igual a 60 segundos.
- **Impulso de tensión tipo rayo normalizado:** Es un impulso de tensión con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2  $\mu\text{s}$  y un tiempo de cola de 50  $\mu\text{s}$  (forma de onda que se utilizó para crea el modelo de la descarga eléctrica, ver Ilustración 9).



**ILUSTRACIÓN 9: Onda normalizada de 1.2 x 50  $\mu\text{s}$**   
(Norma UNE-EN 60071-1)

- **Impulso de tensión tipo maniobra combinado normalizado:** Es un impulso de tensión combinado que tiene dos componentes del mismo valor de cresta y polaridad opuesta, la componente positiva es un impulso de maniobra normalizado, mientras que la componente negativa es un impulso de maniobra cuyos tiempos de subida y de cola no deberían ser inferiores a los del impulso positivo. Ambos impulsos deberían alcanzar el valor de cresta en el mismo

instante. El valor de cresta de la tensión combinada es, por tanto, la suma de los valores de cresta de los componentes.

Es importante mencionar que en Cuba se utiliza la NC-960209 de 1987 (NC., 1987), Protección contra descargas eléctricas atmosféricas.

Para establecer una relación entre las sobretensiones reales y las formas de onda normalizadas se definen sobretensiones representativas. Por ejemplo para sobretensiones que se supone producen el mismo efecto sobre el aislamiento que las sobretensiones de una determinada clase que aparecen en servicio, tienen la forma de onda normalizada de la clase correspondiente y pueden estar definidas por un valor, un conjunto de valores o una distribución estadística de valores. (Ramírez, 2009).

La incidencia de rayos sobre un conductor de fase puede darse por ausencia o deficiencia en el blindaje de la línea. Si el rayo cae sobre un conductor de fase se originan dos ondas de corriente que viajan en dirección opuesta y de valor igual a la mitad de la corriente del rayo ( $I/2$ ), esta corriente produce dos ondas de tensión cuya amplitud es función de la impedancia característica de la línea y se calcula por la ecuación (1.3).

Ecuación 4 
$$V_{cond} = \frac{1}{2} * Z_c \quad (1.3)$$

**Donde:**

**$V_{cond}$ :** Amplitud de la onda de tensión en las líneas en Voltios

**$Z_c$ :** impedancia característica de la línea en ohmios

## 2.2.6 PARARRAYOS PDV100-OPTIMA



**ILUSTRACIÓN 10: Pararrayos PDV100-Optima**  
(Incorporated, July, 2010)

### 2.2.6.1 Introducción

El descargador PDV100 fue introducido en 1986 EE.UU. como el primer descargador no cerámico de alta resistencia aplicaciones.

Estos nuevos descargadores de Óptima se unen a una impresionante lista de avances que Ohio Brass ha traído al descargador de la tecnología, ya que comenzó a hacer descargadores en 1950.

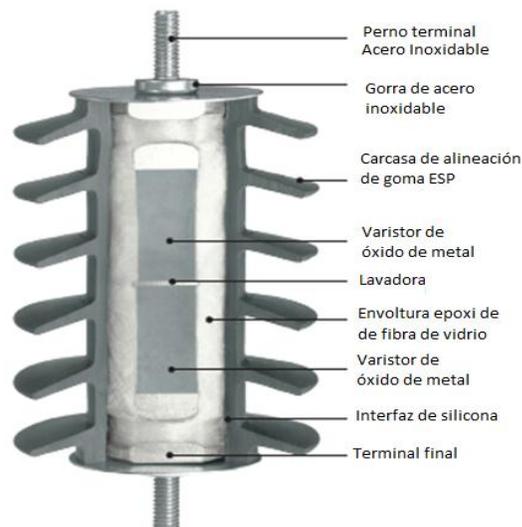
Las mejoras en el diseño, como el Óptima han aumentado los márgenes de protección y durabilidad, en términos de dólares y la fiabilidad del servicio, Ohio Brass descargadores han generado un ahorro sustancial para los servicios públicos.

### 2.2.6.2 La construcción básica

En descargadores de Óptima, los varistores están bloqueados en su lugar con capas bien bobinada de filamento de fibra de vidrio impregnada con resina epoxi. El alojamiento de descargador está hecho de nuestra mezcla patentada de aleación de silicona ESP. Además de un rendimiento excepcional del ESP como un material aislante, las propiedades del ESP se han confirmado en una serie de pruebas de rendimiento que

incluyen la resistencia de seguimiento, la contaminación, el envejecimiento, y el diseño del sello.

Los descargadores de Óptima se pueden utilizar con todos los brazos de montaje estándar y soportes. Vienen con todos los elementos de fijación necesarios, aisladores y accesorios terminales. Un soporte especialmente diseñado con fibra de vidrio de poliéster aislante, con seccionador integrado, junto con los soportes de montaje opcionales, tales como el brazo transversal o el soporte del transformador, permiten el montaje del descargador de una manera que mejor se adapte a cada cliente individual. A continuación se muestra una vista en sección transversal típica de uno de nuestros pararrayos tipo de distribución.



**ILUSTRACIÓN 11: Partes del pararrayos PDV-100 óptima**

### 2.2.6.3 Tablas del pararrayos

Características Eléctricas										
Trabajo Pesado PDV100-Optima										
Voltaje Nominal KV	MCOV kV	Número de catálogo de unidad	0,5 $\mu$ sec 10 kA máximo IR-kV <sup>(1)</sup>	500 A Máximo de sobretensión de conmutación IR-kV <sup>(2)</sup>	8/20 Descarga máxima de voltaje - kV					
					1,5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2,55	213703	10,6	7,6	8	8,5	9	9,9	11,1	13,2
6	5,1	213705	21,3	15,3	15,9	17	18	19,8	22,3	26,5
9	7,65	213708	31,2	22,4	23,3	24,9	26,4	29	32,6	38,8
10	8,4	213709	34	24,4	25,4	27,1	28,8	31,6	35,6	42,3
12	10,2	213710	40,4	29	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
18	15,3	213715	60,6	43,5	45,4	48,4	51,3	56,4	63,5	75,5
21	17	213717	68,3	49	51,1	54,5	57,8	63,5	71,4	85
24	19,5	213720	81,9	58,8	61,3	65,5	69,3	76,2	85,7	102
27	22	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	105,8	125,8
36	29	213729	121,4	87	97,9	97	102,7	112,9	127	151,1

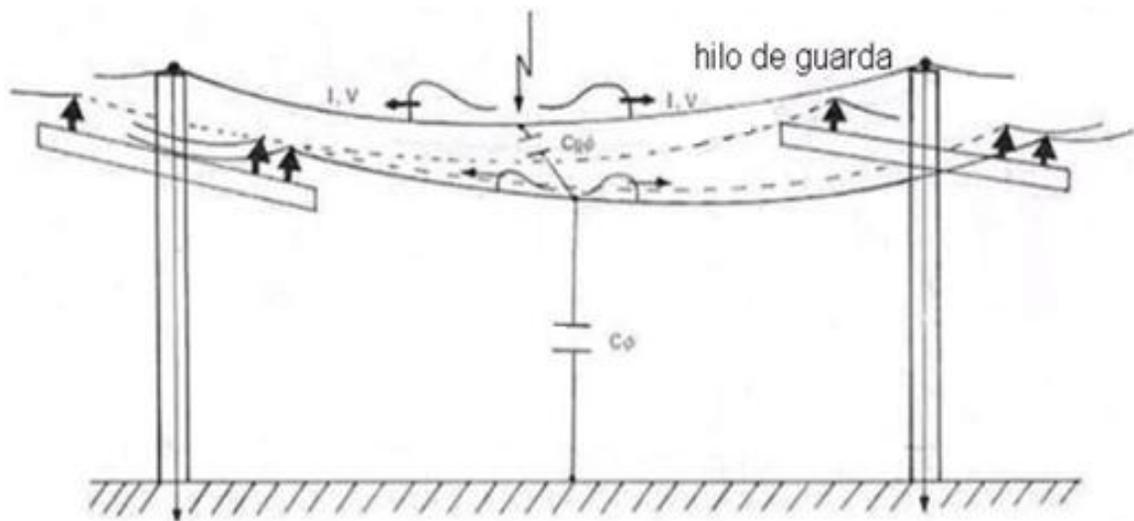
**TABLA 3: Tabla de las características eléctricas del pararrayos**  
(Incorporated, July, 2010)

Características Físicas									
Trabajo Pesado PDV100-Optima		Número de catálogo de unidad	Altura con soporte de base aislante	Distancia de fuga terminal a base	Limpieza de montaje		Pesos netos aproximados		
Voltaje Nominal	MCOV				Unidad	Unidad con soporte de base aislante	Unidad con soporte de base aislante y soporte NEMA	Línea central a línea central	Línea central a tierra
								pulgadas	pulgadas
kV	kV		pulgadas	pulgadas	pulgadas	pulgadas	libra	libra	libra
3	2,55	213703	6,8	8,5	5	3	1,9	2,9	5,4
6	5,1	213705	7,6	11,3	5,4	3,4	2,3	3,3	5,8
9	7,65	213708	8,7	14,4	6	4	2,8	3,8	6,3
10	8,4	213709	8,7	14,4	6,2	4,2	2,8	3,8	6,3
12	10,2	213710	9,3	17	7,5	5,5	3,3	4,3	6,8
15	12,7	213713	11,6	25,2	8,5	6,5	4,6	5,6	8,1
18	15,3	213715	11,6	25,2	9,5	7,5	4,6	5,6	8,1
21	17	213717	12,4	28,1	10	8	5,2	6,2	8,7
24	19,5	213720	14,8	36,5	12	10	7	8,3	10,8
27	22	213722	16,4	39,6	13	11	7,4	8,7	11,3
30	24,4	213724	16,9	42,2	14	12	7,9	9,2	11,7
36	29	213729	19,3	50,4	16,5	14	9	10,3	12,8

**TABLA 4: Tabla de las características físicas del pararrayos**  
(Incorporated, July, 2010)

### 2.2.7 HILO DE GUARDA

Como nos indica (Morón, 2009), la protección con hilo de guarda fue muy empleada en líneas aéreas para protegerlas contra sobretensiones, actualmente sólo se usa en líneas de transmisión, ya que en líneas de distribución no se recomienda por ser más eficiente emplear pararrayos como medio de protección.



**ILUSTRACIÓN 12: Inducción por acople de cable de guarda a conductores en línea de distribución**

(<https://www.lecmex.com>, 2005), (Rojas, 2012)

## 2.2.8 CARACTERÍSTICAS DE LOS SUPRESORES

### 2.2.8.1 Introducción

Todos los supresores protegen a los equipos mediante la limitación de la tensión en los terminales del equipo, en presencia de una sobretensión en el sistema. Esta característica de limitación de voltaje es el rasgo principal de un supresor en la mayoría de los casos es la razón de su existencia. Esta característica tiene varios nombres e incluso ha cambiado a lo largo de los años. El voltaje de la descarga término se usa comúnmente en el mercado de EE.UU., mientras el voltaje residual se utiliza en la mayoría de otros lugares del mundo. Un término algo obsoleto que describe esta característica en términos eléctricos es Caída de IR, que se refiere al voltaje a través del supresor cuando una corriente  $I$  pasa a través de la resistencia  $R$  del supresor. Tanto en las aplicaciones IEC e IEEE, el término nivel de protección se utiliza a menudo en lugar de Voltaje de Descarga. El término Voltaje de Retención es otro que se usa en ocasiones, aunque se utiliza más a menudo para describir la característica de bajo voltaje de los SPD.

### 2.2.8.2 Definiciones

La definición de Voltaje de Descarga que se publica en la sección 3 de IEEE C62.11 es:

- **3.25 Voltaje de Descarga:** La tensión que aparece a través de las terminales de un supresor durante el paso de la corriente de descarga.
- **3.23 Corriente de Descarga:** La corriente de sobretensión que fluye a través de un descargador.

La definición IEC también en el apartado 3 de la norma IEC 60099-4 es:

- **3.36 Voltaje Residual de un supresor de Pico Ures:** Valor de la tensión que aparece entre las terminales de un supresor durante el paso de la corriente de descarga.

- **3.29 Corriente de Descarga de un Supresor:** impulso de corriente que fluye a través del descargador.

De las definiciones anteriores, se puede observar que el voltaje a través de un supresor en un evento de sobretensiones constituye un voltaje de descarga. Durante el funcionamiento en estado estacionario de un descargador, hay una corriente de fuga que pasa a través del supresor sin embargo, no es corriente de sobretensión, el voltaje en estado estacionario no es voltaje de la descarga. Durante una sobretensión de conmutación o de relámpago y eventos de corriente TOV altos, la tensión que aparece a través del descargador se puede considerar un voltaje de la descarga.

### 2.2.8.3 Prediciendo el Pico de Voltaje de Descarga

Predecir el voltaje de descarga a diferentes corrientes de las ofrecidas en los datos a la mano es a menudo necesario.

Para esta tarea, la ecuación es un modelo simple y eficaz para el cálculo del voltaje de descarga si se conocen otros pares de corriente/voltaje.

Ecuación 5 
$$e = k \cdot I^n$$

**Donde:**

e = Descarga de voltaje.

k = Constante.

I = Corriente de descarga.

n = Exponente no lineal

### 2.2.8.4 Referencia de Voltaje (Vref) (Uref)

El valor de pico más bajo independiente de la polaridad de la tensión a frecuencia, dividida por la raíz cuadrada de 2, necesario para producir un componente resistivo de corriente igual a la corriente de referencia del supresor o del elemento supresor.

El voltaje de referencia de un supresor de unidades múltiples es la suma del voltaje de referencia de las unidades de la serie. El nivel de voltaje será especificado por el fabricante.

#### **2.2.8.5 Referencia de Corriente ( $I_{ref}$ )**

Es el valor de pico del componente resistivo de una corriente de potencia-frecuencia, lo suficientemente alta para hacer rechazables los efectos de la pérdida de capacitancia del supresor. Este nivel de corriente será especificado por el fabricante.

**NOTA:** Dependiendo del diseño, la corriente de referencia esta típicamente en el intervalo de 0,05 mA a 1,0 mA por cm. cuadrado de área de disco.

##### **a) Corriente Resistiva AC**

La corriente que fluye a través de un varistor que está en fase con el voltaje.

##### **b) Corriente Capacitiva AC**

La corriente que fluye a través del varistor con una amplitud de pico de 90 grados del voltaje del pico. (Woodworth, Junio 2011).

## 2.2.9 ESQUEMA ELÉCTRICO

### 2.2.9.1 Modelo de la IEEE: Modelo dependiente de la frecuencia

Cuando se especifica un modelo de pararrayos de óxido de metal para un estudio, la exactitud de la simulación se mejora cuando se elige la característica de sobretensiones para ser coherente con la frecuencia o el tiempo de cresta de la tensión y la corriente esperada durante las perturbaciones del sistema. Este concepto es clave para el modelado porque los descargadores de óxido metálico son dispositivos dependientes de la frecuencia, es decir, la tensión en el descargador es una función de la tasa de aumento y de la magnitud de la corriente conducida por el descargador.

Con el fin de obtener las características de pararrayos de óxido metálico para una amplia gama de formas de onda (el rayo a sobretensiones temporales), se han utilizado un número de diferentes formas de onda de ensayo actuales. Varias oleadas de prueba han sido definidos por la norma ANSI C62.11 mientras que otros no tienen. El uso de una simple característica no lineal V-I que se deriva de los datos de prueba con los momentos apropiados a cresta, sería adecuada en ausencia de un modelo dependiente de la frecuencia.

En la búsqueda de un modelo dependiente de la frecuencia, se puede observar la variación de la tensión con respecto al tiempo en la cresta de la onda, también se observa la corriente mediante la adición de una inductancia en serie con una característica no lineal. Este enfoque tiene cierto mérito porque el voltaje a través de la inductancia aumenta a medida que el tiempo para la cresta de la corriente disminuye a través del descargador de sobretensiones. Una variación de este modelo incluye la adición de una capacidad en paralelo a la resistencia no lineal. Sin embargo, la capacitancia en derivación tenía un efecto insignificante sobre los resultados del modelo. Este tipo de modelo tuvo cierto éxito en la adecuación de un resultado en particular. Por ejemplo, una inductancia podría ser elegida para el modelo de tal manera que dio una razonable

coincidencia de la magnitud de voltaje y forma de onda de una corriente de descarga de sobretensiones que alcanzó su cresta en 8  $\mu$ s.

Cuando la misma inductancia y otros parámetros del modelo se utilizaron para un descargador de corriente de descarga que alcanzó su cima en 2  $\mu$ s, la magnitud de la tensión estaba en un error en una cantidad significativa. Diferentes parámetros podrían elegirse para el modelo, de tal manera que se pueden obtener buenos resultados para la tensión correspondiente a una corriente de sobretensiones de alcanzar su cresta en 2  $\mu$ s.

Sin embargo, si el tiempo para la cresta de la corriente difería mucho de 2  $\mu$ s, el voltaje resultante estaba en error.

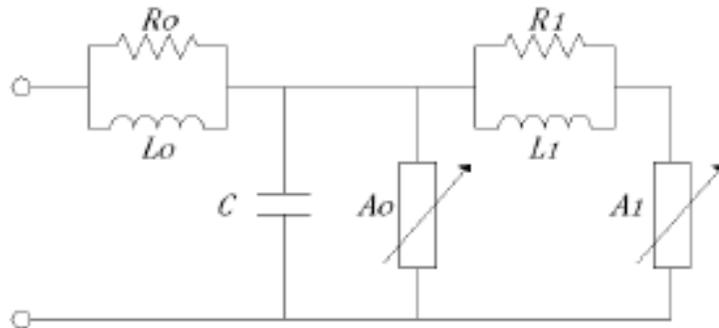
Por lo tanto, se hizo evidente que sería necesario un modelo más sofisticado si fuera a utilizarse para representar la respuesta de un descargador de corrientes con una amplia gama de tiempos a la cresta.

El siguiente modelo considerado por el grupo de trabajo, se conoce como el modelo dependiente de la frecuencia. Para este modelo, la característica no lineal V-I de un descargador está representada con dos secciones de una resistencia no lineal designada, y A1 como se muestra en la ilustración 13.

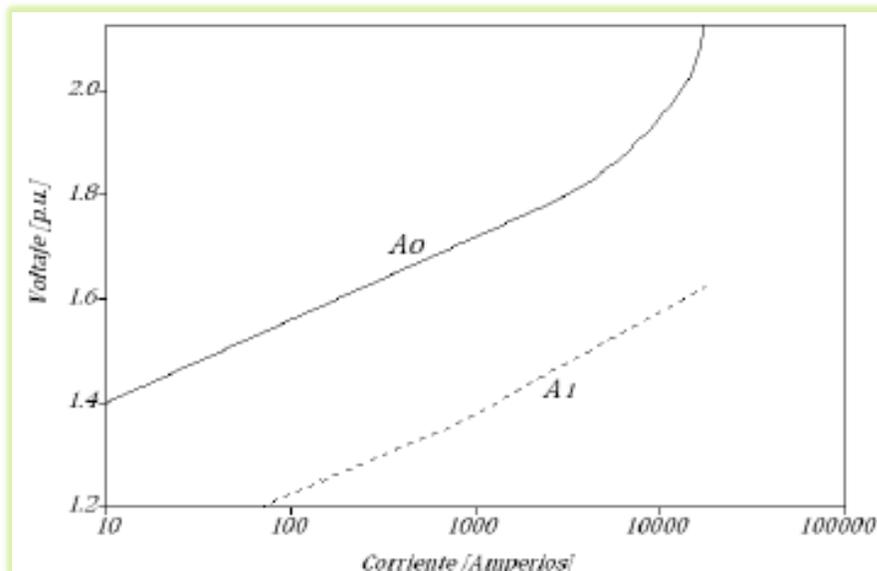
Las dos secciones están separadas por un filtro de R-L. Para descargas de frente lenta, este filtro R-L tiene muy poca impedancia y las dos secciones no lineales del modelo son esencialmente en paralelo. Para descargas de frente rápida del filtro R-L la impedancia se hace más significativa.

Esto da como resultado que en la sección no lineal designada A0 exista más corriente que en la sección designada A1. Dado que la característica A0 tiene una tensión más alto para una corriente dada en A1, el resultado es que el modelo descargador genera un voltaje más alto. Desde que los descargadores de óxido metálico tienen un voltaje de descarga más alta para una subida de tensión rápida, el modelo coincide con el

comportamiento general de un pararrayos de óxido metálico. Las versiones más sofisticadas de este modelo se pueden hacer mediante la adición de más secciones de resistencia no lineal separados por filtros R-L. Sin embargo, sólo el modelo de dos secciones, fue investigado, ya que dio una buena correlación con los datos de pruebas de laboratorio. La principal dificultad con este tipo de modelo se encuentra en la elección de los parámetros del modelo.



**ILUSTRACIÓN 13: Modelo dependiente de la frecuencia**  
(IEEE, Jan 1992)



**ILUSTRACIÓN 14: Relación tensión-intensidad del modelo**  
(IEEE, Jan 1992)

## **CAPITULO III**

### **3. MATERIALES Y MÉTODOS**

#### **3.1 PRUEBAS EXPERIMENTALES EN EL LABORATORIO DE ALTA TENSIÓN**

##### **3.1.1 Generación y medición de voltajes de impulso I**

###### **3.1.1.1 Objetivo general**

- Conocer el funcionamiento de los circuitos generados de impulso tipo rayo de una etapa para ser medidos sin carga.

###### **3.1.1.2 Objetivos específicos**

- Conocer los diferentes circuitos generados de impulso tipo rayo y explicar su funcionamiento.
- Estudiar las características de la onda de voltaje de impulso tipo rayo.

###### **3.1.1.3 Marco teórico**

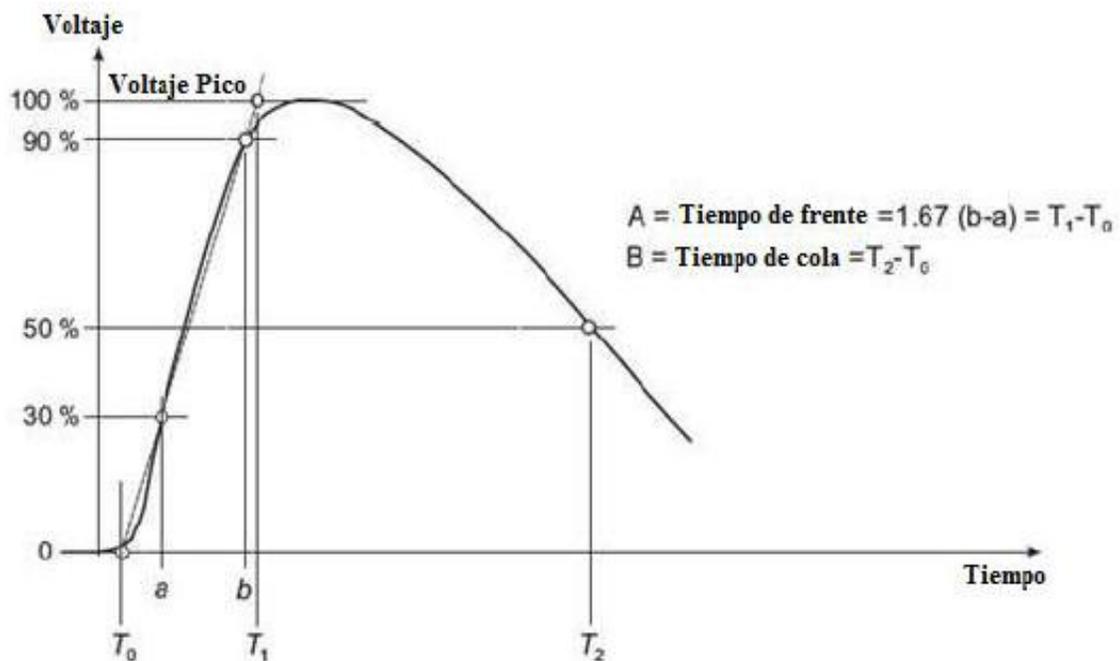
En esta práctica estudiamos los diferentes tipos de circuitos generadores de impulso, para esto debemos conocer de antemano que es un impulso.

**Impulso:** Un impulso se define como un transitorio aperiódico de tensión o corriente aplicado, el cual usualmente tiene rápidos levantamientos a tensión máxima para luego caer a cero en forma más lenta. Dentro de los impulsos se diferencian los impulsos tipo rayo y tipo maniobra los cuales difieren especialmente por los tiempos de duración.

En este apartado solo se estudiara el impulso tipo rayo debido a que la universidad no cuenta con los elementos para realizar las pruebas de impulso tipo maniobra.

**Impulso tipo rayo normalizado:** De acuerdo con la práctica realizada en el laboratorio de alta tensión, es importante resaltar lo que refiere el autor:

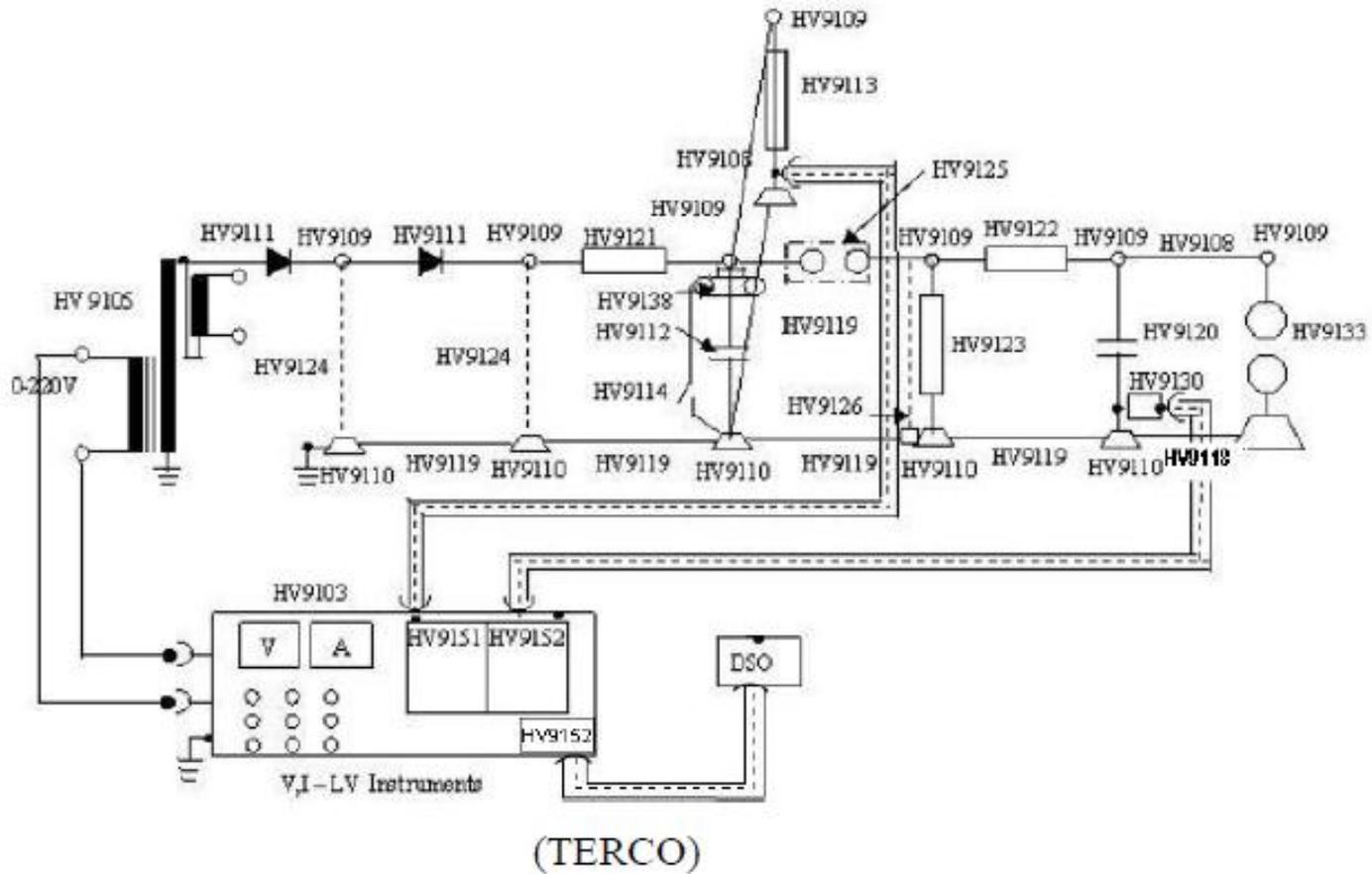
(Aguirre Alonso, 2015), este impulso es aquel transitorio que reproduce el impulso generado por las descargas atmosféricas y que tiene una forma de onda  $1,2/50\mu s$ , donde  $1,2\mu s$  es el tiempo virtual de frente ( $T_1$ ) que está definido como 1.67 veces el intervalo de tiempo  $T$  entre el momento que el impulso va desde el 30 al 90% del valor cresta y  $50\mu s$  es el tiempo virtual de medio valor que se define como el intervalo de tiempo entre el 30% del tiempo virtual de frente y el tiempo en el cual la tensión ha descendido hasta el 50% del valor de cresta.



**ILUSTRACIÓN 15: Forma de onda normalizada 1.2/50µs**  
(Aguirre Alonso, 2015)

### 3.1.1.4 Marco procedimental

- a) Recordar las normas de seguridad planeadas en la práctica número 1.
- b) Comprobar que el escritorio de control este apagado.
- c) Abrir la jaula y armar el circuito de la figura.
- d) Verificar que el circuito se haya armado correctamente.
- e) Conectar el medidor de voltaje directo HV9151 con la resistencia para medición HV9113 y realizar la conexión del medidor de voltaje de impulso HV9152 con el capacitor de carga.
- f) Proceder a encender el módulo de control. En el cual verificaremos que todos los controles necesarios estén encendidos.
- g) Variamos la distancia de separación entre las esferas del espinterómetro ya sea de forma manual o remota desde el tablero de control para valores de  $s = 5, 7.5, 10, 12, 14$  mm.
- h) Encendemos el primario y el secundario del transformador y aumentamos la tensión hasta que se produzca el primer impulso para cada distancia antes ajustada.
- i) Tomamos los datos de voltaje en baja tensión ( $V_{BT}$ ), corriente en baja tensión ( $I_{BT}$ ), voltaje dc en alta tensión ( $V_{dc_{AT}}$ ), voltaje de impulso ( $V_{pulse}$ ).
- j) Para valores de 5, 7.5 y 10 mm se puede visualizar en el osciloscopio, la onda completa.
- k) Apagar el secundario y luego el primario del transformador, descargar y cambiar a otro valor de distancia.
- l) Calcular la eficiencia del circuito.



**ILUSTRACIÓN 16: Circuito generador de impulso de tensión**  
(Aguirre Alonso, 2015)

### 3.1.1.5 Recursos utilizados

Nombre / Código	Imagen	Observación
Escritorio de control HV-9103	 (Los autores)	Se usa la conexión del HV-9150 y al HV9151, para el Medidor de voltaje alterno y directo respectivamente.
Transformador de prueba HV-9105	 (Los autores)	Rel. de Transf.: 220V/100KV Capacidad: 5KVA
Capacitor de impulso HV-9112	 (Los autores)	Capacitancia: 25000pF
Resistencia para medición HV-9113	 (Los autores)	R=280 MΩ Con esta resistencia se hará la conexión por cable hasta el Medidor de Voltaje directo.
Espinterómetro HV 9125	 (Los autores)	Distancia de separación max. entre esferas: 80mm

<p>Timonel del espinterómetro HV 9126</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Se conecta al escritorio de control para que el espinterómetro sea manejado de forma remota.</p>
<p>Rectificador de Silicio HV-9111</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Voltaje máx.: 140KV Resistencia de protección: 100KΩ</p>
<p>Resistencia de carga HV9121</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Resistencia: 10 MΩ</p>
<p>Resistencia de frente de onda HV 9122</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Rd= 350 Ω</p>
<p>Resistencia de cola de onda HV 9123</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Re= 2400 Ω</p>
<p>Capacitor de carga HV9120</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Cb= 1.2 nF</p>
<p>Barra aislante HV-9124</p>	 <p>(Los autores)</p>	<p>Voltaje AC nom : 100KV Voltajes DC y voltajes de impulso nom.: 140 KV</p>

**TABLA 5: Tabla de los recursos utilizados**  
(Aguirre Alonso, 2015)

### 3.1.1.6 Registro de resultados

Impulsos de tensión generados

mm	Sin Pararrayos	
	VpDC V osciloscopio	VpDC kV calculado *4000
5	8,16	32640
7,5	11,28	45120
10	13,76	55040
12	15,12	60480
14	18,08	72320

**TABLA 6: Registro de resultados**  
Los autores

### 3.1.1.7 Conclusiones

- Se realizó la medición de voltajes de impulso sin carga.
- Para corrientes a partir de 0,2 existe conducción de corriente en el pararrayos.

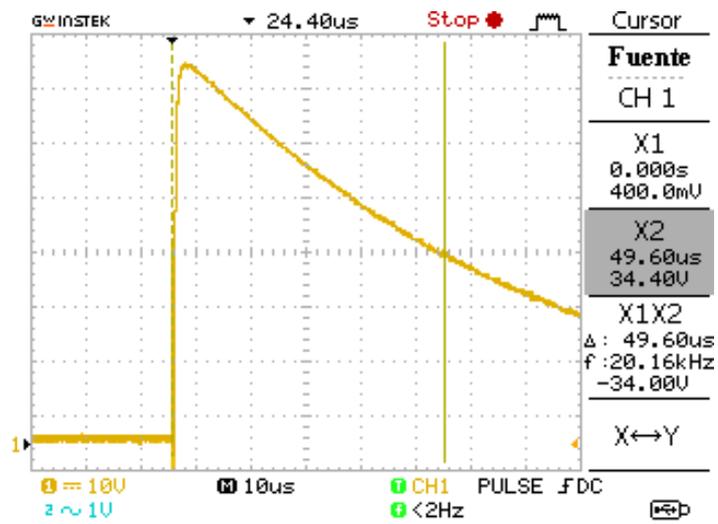
### 3.1.1.8 Recomendaciones

- Se debe realizar la descarga de los elementos en cada prueba, ya sea al empezar o finalizar la misma.
- Realizar varias pruebas con diferentes medidas para obtener un promedio con los valores calculados, porque existe variación en los valores.
- Es muy importante leer e informarse del manual de las prácticas del laboratorio y seguir los pasos indicados para evitar posibles errores o dificultad al realizar las prácticas.
- Verificar que todos los elementos estén conectados como se indica en la práctica o manual, en especial el capacitor de carga.

### 3.1.1.9 Anexos



**ILUSTRACIÓN 17: Circuito generador de impulso**  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 18: Voltaje de impulso visto desde osciloscopio**  
Los autores

## CAPÍTULO IV

### 4. ANÁLISIS MATEMÁTICO

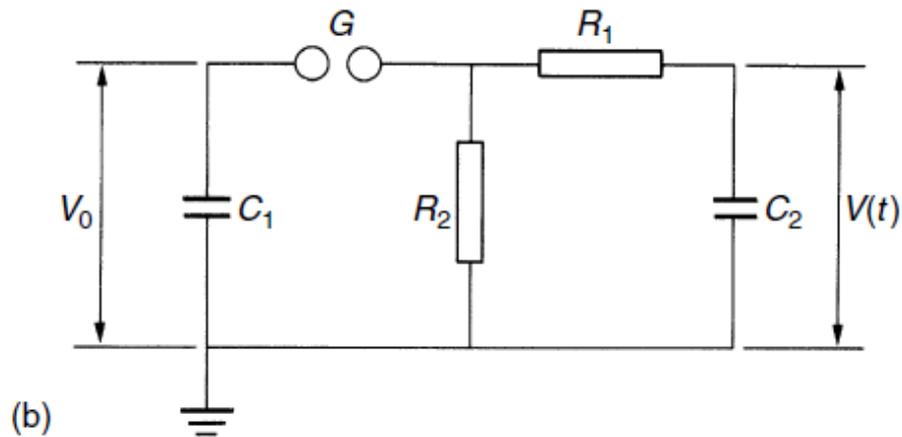
#### 4.1. DESCRIPCIÓN

Para realizar el modelo matemático se utiliza la herramienta de Matlab – Simulink, donde se va a simular la supresión de impulsos tipo atmosféricos en un pararrayo de media tensión de 10 kV.

Se procede a elaborar el impulso tipo rayo por medio de una onda estandarizada por la norma IEC-60060-1

##### Circuito generador de impulso

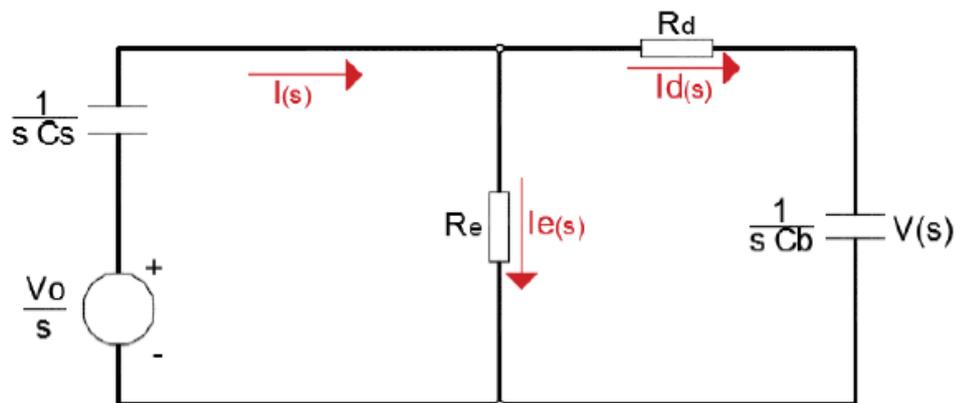
Los generadores de impulsos de voltaje (GIV) se emplean para verificar o investigar el comportamiento de equipos y aislamientos ante sobretensiones. Las ondas de tensión de impulso tipo rayo empleadas en los ensayos son ondas completas, de evolución y duración similar a la del rayo estadístico, las cuales permiten verificar la capacidad de soporte del aislamiento ante dicha condición (BIL). Se muestran los parámetros fundamentales de una onda tipo rayo normalizada. (G., 2009).



**ILUSTRACIÓN 19:** Circuito básico para un generador de impulsos (Kuffel, 2000)

El capacitor de impulso ( $C_s$ ) es cargado por la fuente de voltaje continuo, pasa a ser la fuente de tensión del circuito a su derecha, cuando dicho capacitor ha alcanzado la tensión  $V_0$ . El nivel de tensión de descarga  $V_0$  es controlado por la separación de los electrodos del espinterómetro de esferas en el cual se crea un arco eléctrico que permite que la corriente fluya por la resistencia de frente de onda ( $R_d$ ), que tiene la responsabilidad de controlar el tiempo de frente de onda del impulso, en ese mismo instante se está cargando el capacitor  $C_b$ ; los capacitores ( $C_s$ ,  $C_b$ ) se descargan a través de la resistencia de cola ( $R_e$ ), cuando ambos alcanzan el mismo nivel de energía.

Para analizar el circuito y obtener el voltaje de salida en el capacitor de carga  $C_b$ , aplicaremos la transformada de Laplace. El circuito equivalente en dominio de la frecuencia se muestra a continuación:



**ILUSTRACIÓN 20: Circuito equivalente en dominio de la frecuencia**  
(Aguirre Alonso, 2015)

Donde:

$V_0$ : Voltaje inicial de carga

$C_s$ : Capacitor de impulso

SG: Espinterómetro de cola de onda

$R_e$ : Resistencia de cola de onda

$R_d$ : Resistencia de frente de onda

$C_b$ : Capacitor de carga

$V(t)$ : Voltaje de salida

Aplicamos las leyes de Kirchhoff y Ley de Ohm.

Ecuación 6 
$$\frac{V_o}{s} = i(s) \cdot \frac{1}{s \cdot C_s} + ie(s) \cdot Re$$

Ecuación 7 
$$ie(s) \cdot Re = id(s) \cdot Rd + V(s)$$

Ecuación 8 
$$i(s) = ie(s) + id(s)$$

Ecuación 9 
$$V(s) = id(s) \cdot \frac{1}{s \cdot C_b}$$

Los valores de corrientes no son conocidos, por lo tanto se debe tratar de simplificarlos, remplazándolos o eliminándolos.

Como punto de partida, se despeja la corriente  $id(s)$  de la **Ec. (9)**

Ecuación 10 
$$V(s) \cdot sC_b = id(s)$$

Reemplazamos  $i(s)$  en la **Ec. (6)** por su equivalente en la **Ec. (8)**

Ecuación 11 
$$\frac{V_o}{s} = [ie(s) + id(s)] \cdot \frac{(1)}{(s \cdot C_s)} + ie(s) \cdot Re$$

Reemplazamos  $id(s)$  por su equivalente obtenido anteriormente.

Ecuación 12 
$$\frac{V_o}{s} = [ie(s) + V(s) \cdot s \cdot C_b] \cdot \frac{1}{s \cdot C_s} + ie(s) \cdot Re$$

Simplificamos y despejamos  $ie(s)$

$$\frac{V_o}{s} = \frac{1}{s \cdot C_s} \cdot ie(s) + \frac{s \cdot C_b}{s \cdot C_s} \cdot V(s) + ie(s) \cdot Re$$

$$\frac{V_o}{s} = ie(s) \left[ \frac{1}{s \cdot C_s} + Re \right] + \frac{C_b}{C_s} \cdot V(s)$$

$$ie(s) = \frac{\frac{V_o}{s} - \frac{C_b}{C_s} \cdot V(s)}{\frac{1}{s \cdot C_s} + Re}$$

$$ie(s) = \frac{\frac{C_s \cdot V_o - s \cdot C_b \cdot V(s)}{s \cdot C_s}}{\frac{1 + s \cdot Re \cdot C_s}{s \cdot C_s}}$$

Ecuación 13 
$$ie(s) = \frac{C_s \cdot V_o - s \cdot C_b \cdot V(s)}{1 + s \cdot Re \cdot C_s}$$

En la **Ec. (7)** también se reemplazara  $i_d(s)$  por su semejante obtenido anteriormente.

$$i_e(s) = \frac{sC_b \cdot R_d V(s)}{R_e} + \frac{V(s)}{R_e}$$

Ecuación 14 
$$i_e(s) = \frac{V(s)}{R_e} [s \cdot C_b \cdot R_d + 1]$$

Iguamos las **Ec. (10)** y **Ec. (11)** despejamos el voltaje de salida  $V(s)$

$$\frac{Cs \cdot Vo - s \cdot Cb \cdot V(s)}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} = \frac{V(s)}{Re} [s \cdot Cb \cdot Rd + 1]$$

$$\frac{Cs \cdot Vo}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} - \frac{s \cdot Cb \cdot V(s)}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} = \frac{V(s)}{Re} [s \cdot Cb \cdot Rd + 1]$$

$$\frac{Cs \cdot Vo}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} = \frac{V(s)}{Re} [s \cdot Cb \cdot Rd + 1] + \frac{s \cdot Cb \cdot V(s)}{1 + s \cdot Re \cdot Cs}$$

$$\frac{Cs \cdot Vo}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} = \frac{V(s) [1 + s \cdot Cb \cdot Rd] [1 + s \cdot Re \cdot Cs] + s \cdot Re \cdot Cb}{Re (1 + s \cdot Re \cdot Cs)}$$

$$\frac{Cs \cdot Vo}{1 + s \cdot Re \cdot Cs} = \frac{V(s) \{ [1 + s \cdot Cb \cdot Rd] [1 + s \cdot Re \cdot Cs] + s \cdot Re \cdot Cb \}}{Re (1 + s \cdot Re \cdot Cs)}$$

$$V(s) = \frac{Re (1 + s \cdot Re \cdot Cs) \cdot Cs \cdot Vo}{\{ [1 + s \cdot Cb \cdot Rd] [1 + s \cdot Re \cdot Cs] + s \cdot Re \cdot Cb \} [1 + s \cdot Re \cdot Cs]}$$

$$V(s) = \frac{Re \cdot Cs \cdot Vo}{\{ 1 + s \cdot Cb \cdot Rd + s \cdot Re \cdot Cs + s^2 \cdot Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb + s \cdot Re \cdot Cb \}}$$

$$V(s) = \frac{Re \cdot Cs \cdot Vo}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb \cdot s^2 + (Rd \cdot Cb + Re \cdot Cs + Re \cdot Cb)s + 1}$$

Dividimos el denominador para  $Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb$  para obtener una ecuación de la forma  $s^2 + bs + c$ .

$$V(s) = \frac{\frac{Re \cdot Cs \cdot Vo}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}}{\frac{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb} \cdot s^2 + \frac{(Re \cdot Cb + Re \cdot Cs + Re \cdot Cb)}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb} \cdot s + \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}}$$

Ecuación 15 
$$V(s) = \frac{\frac{Vo}{Rd \cdot Cb}}{s^2 + \left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right) \cdot s + \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}}$$

Este es el voltaje de salida  $V(s)$  sobre el capacitor  $C_b$  expresado en dominio de la frecuencia, ahora se debe aplicar la anti-transformada de Laplace para obtener el resultado en dominio del tiempo, pero antes debemos obtener las raíces de la ecuación cuadrática del denominador.

$$s^2 + \left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right) \cdot s + \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb} = 0$$

Para obtener las raíces utilizaremos la ecuación general.

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}$$

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4c}}{2}$$

$$\alpha, \beta = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 \cdot \left(1 - \frac{4c}{b^2}\right)}}{2}$$

$$\alpha, \beta = -\frac{b}{2} \pm \frac{\sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}}}{2}$$

$$\alpha, \beta = \frac{b}{2} \left( -1 \pm \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

Donde,

$$a = 1$$

$$b = \left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right)$$

$$c = \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}$$

Resolvemos las ecuaciones y encontramos  $\alpha$  y  $\beta$

$$\alpha = \frac{b}{2} \left( -1 + \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

Ecuación 16

$$\alpha = \frac{\left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right)}{2} \cdot \left( -1 + \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}}{\left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right)^2}} \right)$$

$$\beta = \frac{b}{2} \left( -1 - \sqrt{1 - \frac{4c}{b^2}} \right)$$

Ecuación 17

$$\beta = \frac{\left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right)}{2} \cdot \left( -1 - \sqrt{1 - \frac{4 \cdot \frac{1}{Re \cdot Rd \cdot Cs \cdot Cb}}{\left( \frac{1}{Re \cdot Cs} + \frac{1}{Rd \cdot Cb} + \frac{1}{Rd \cdot Cs} \right)^2}} \right)$$

También se puede escribir la **Ec. (11)** de la siguiente manera.

$$V(s) = \frac{V_0}{Rd \cdot Cb} \cdot \frac{1}{(s+\alpha)(s+\beta)}$$

Aplicamos el método de las fracciones parciales para descomponer la expresión.

$$V(s) = \frac{V_0}{Rd \cdot Cb} \cdot \frac{1}{(s + \alpha)(s + \beta)} = \frac{A}{(s + \alpha)} + \frac{B}{(s + \beta)}$$

$$\frac{V_0}{Rd \cdot Cb} = A(s + \beta) + B(s + \alpha)$$

$$A + B = 0$$

$$\beta A + \alpha B = \frac{V_0}{Rd \cdot Cb}$$

$$B = \frac{V_0}{Rd \cdot Cb \cdot (\alpha - \beta)}$$

$$A = -B = -\frac{V_0}{Rd \cdot Cb \cdot (\alpha - \beta)}$$

Teniendo los valores de A y B, reemplazamos.

$$V(s) = \frac{-\frac{V_0}{Rd \cdot Cb \cdot (\alpha - \beta)}}{(s + \alpha)} + \frac{\frac{V_0}{Rd \cdot Cb \cdot (\alpha - \beta)}}{(s + \beta)}$$

La ecuación esta lista para aplicarle la anti-transformada de Laplace.

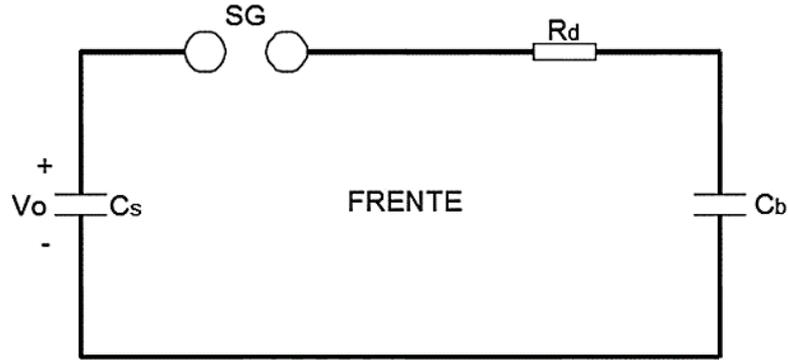
$$V(s) = \frac{V_0}{Rd \cdot Cb \cdot (\alpha - \beta)} \cdot \left[ \frac{1}{(s + \beta)} - \frac{1}{(s + \alpha)} \right]$$

Aplicando la anti-transformada de Laplace, tenemos.

Ecuación 18 
$$V(t) = \frac{V_0}{(Rd \cdot Cb)} \cdot \frac{1}{(\alpha - \beta)} \cdot [e^{-\beta t} - e^{-\alpha t}]$$

Se pueden obtener los valores de  $\alpha$  y  $\beta$  por un método que da una aproximación bastante cercana siempre y cuando los parámetros resistivos y capacitivos del circuito sean constantes, entonces se pueden analizar separadamente en dos circuitos, primero analicemos el circuito de frente.

**ILUSTRACIÓN 21: Circuito de frente de onda**



(Aguirre Alonso, 2015)

Considerando el circuito de frente de onda en el momento en que ocurre la descarga entre las esferas de espinterómetro  $SG$ , el condensador  $C_b$  se carga con la constante de tiempo  $t_1$ :

Ecuación 19 
$$-\frac{1}{\beta} = t_1 = R_d \cdot \left( \frac{C_s \cdot C_b}{C_s + C_b} \right)$$

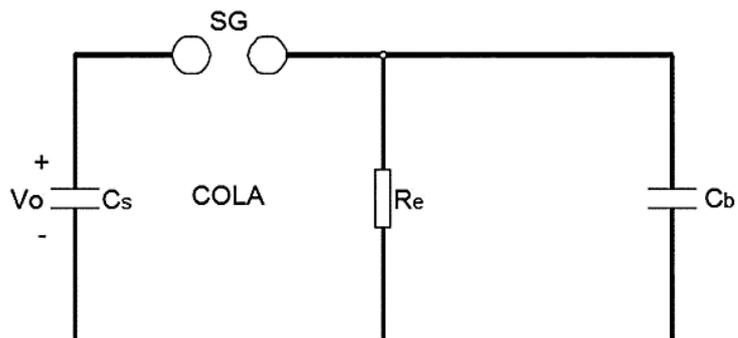
Definida como el producto de la resistencia de frente  $R_d$  con la capacidad equivalente serie de los dos condensadores  $C_s$  y  $C_b$ . Generalmente, se asume que  $C_s \gg C_b$  por lo que la relación se puede simplificar a:

Ecuación 20 
$$t_1 \cong R_d \cdot C_b$$

Que indica que la duración del frente de la onda de tensión en el condensador  $C_b$ , es directamente proporcional a la resistencia de frente  $R_d$ , y a la capacidad del objeto de prueba  $C_b$ .

Haciendo un proceso análogo en el circuito de cola:

**ILUSTRACIÓN 22: Circuito de cola de onda**



(Aguirre Alonso, 2015)

En el instante en el cual la transferencia de la carga de  $C_s$  a  $C_b$  es cero (debido a una redistribución de la carga eléctrica entre ambos), los condensadores se descargan en la resistencia  $R_e$ , con una constante de tiempo  $t_2$  igual a:

Ecuación 21 
$$-\frac{1}{\alpha} = t_2 = R_e \cdot (C_s + C_b)$$

Y simplificando con la suposición  $C_s \gg C_b$ , se tiene: 44

Ecuación 22 
$$t_2 \cong R_e \cdot C_s$$

## CAPITULO V

### 5. MODELADO Y SIMULACIÓN

#### 5.1 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE IMPULSO DE CORRIENTE TIPO RAYO

Para realizar este modelado utilizamos del programa Matlab – Simulink, ya que es el más utilizado en la carrera de ingeniería.

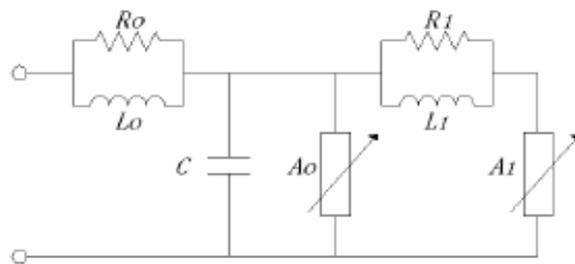


ILUSTRACIÓN 13: Modelo dependiente de la frecuencia  
(IEEE, Jan 1992)

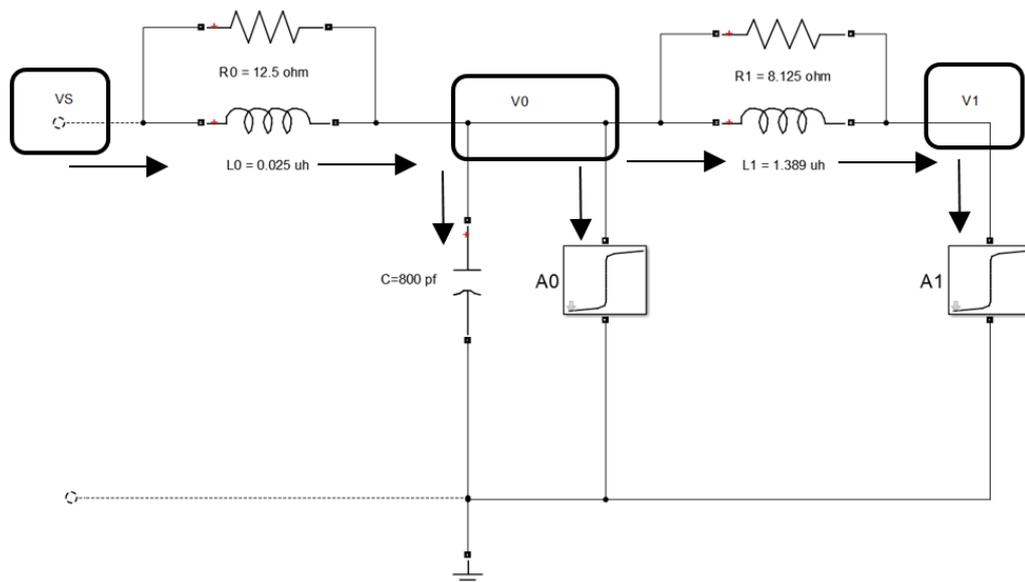


ILUSTRACIÓN 23: Análisis de corrientes de Kirchhoff del modelo de la IEEE  
(IEEE, Jan 1992)

### 5.1.1 Ecuaciones matemáticas:

#### Nodo 1

$$\frac{V_S - V_O}{R_O} + \frac{1}{L_O} \int V_S - V_O dt - I_S = 0$$

$$\frac{1}{R_O} \frac{d(V_S - V_O)}{dt} + \frac{1}{L_O} (V_S - V_O) - \frac{dI_S}{dt} = 0$$

Ecuación 23  $\frac{1}{R_O} \frac{dV_S}{dt} - \frac{1}{R_O} \frac{dV_O}{dt} + \frac{1}{L_O} V_S - \frac{1}{L_O} V_O - \frac{dI_S}{dt} = 0$

#### Nodo 2

$$\frac{V_O - V_1}{R_1} + \frac{1}{L_1} \int_{t_0}^t V_O - V_1 dt = iA_1 = \left(\frac{1}{b_1}\right)^{\frac{1}{m_1}} V_1^{\frac{1}{m_1}}$$

Ecuación 24  $\frac{1}{R_1} \frac{dV_O}{dt} - \frac{1}{R_1} \frac{dV_1}{dt} + \frac{V_O}{L_1} - \frac{V_1}{L_1} = \frac{1}{m_1} \left(\frac{1}{b_1^{\frac{1}{m_1}}}\right) V_1^{\frac{1-m_1}{m_1}} \frac{dV_1}{dt}$

#### Nodo 3

$$I_S = I_C + I_{A_0} + I_{A_1}$$

Ecuación 25  $I_S = C \frac{dV_O}{dt} + \left(\frac{1}{b_0}\right)^{\frac{1}{m_0}} V_O^{m_0} + \left(\frac{1}{b_1}\right)^{\frac{1}{m_1}} V_1^{\frac{1}{m_1}}$

Los dispositivos de protección como los pararrayos realizan pruebas de voltaje AC y DC para entender su funcionamiento:

Primero se realiza el circuito de impulso de corriente tipo rayo 8/20  $\mu$ s de 10 KV.

**ILUSTRACIÓN 24: Impulso de corriente tipo rayo 8/20  $\mu$ s.**

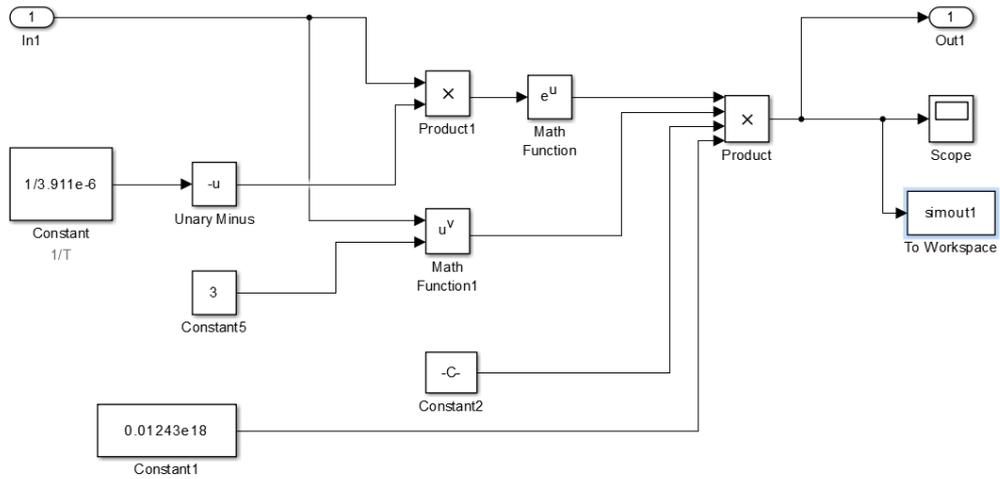
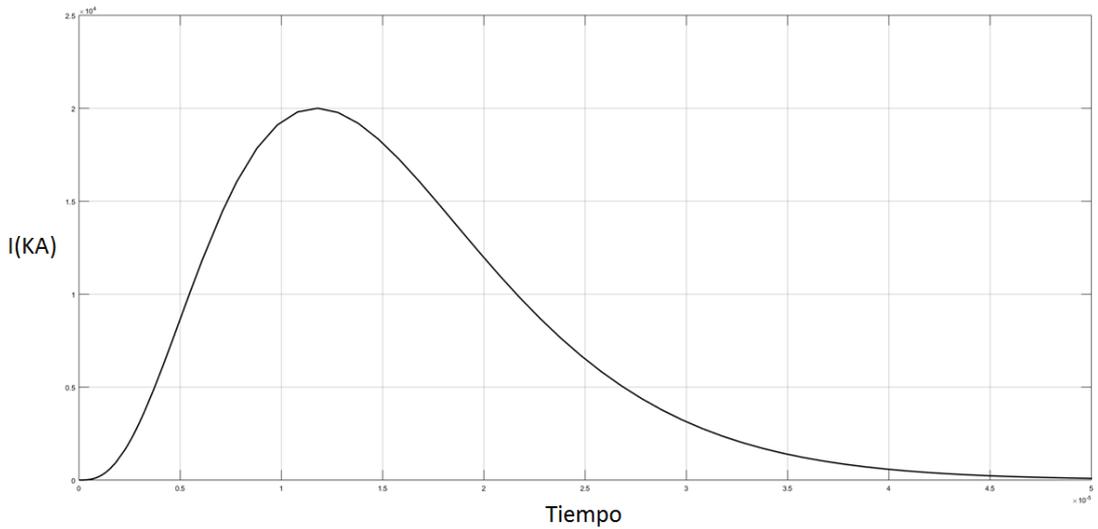


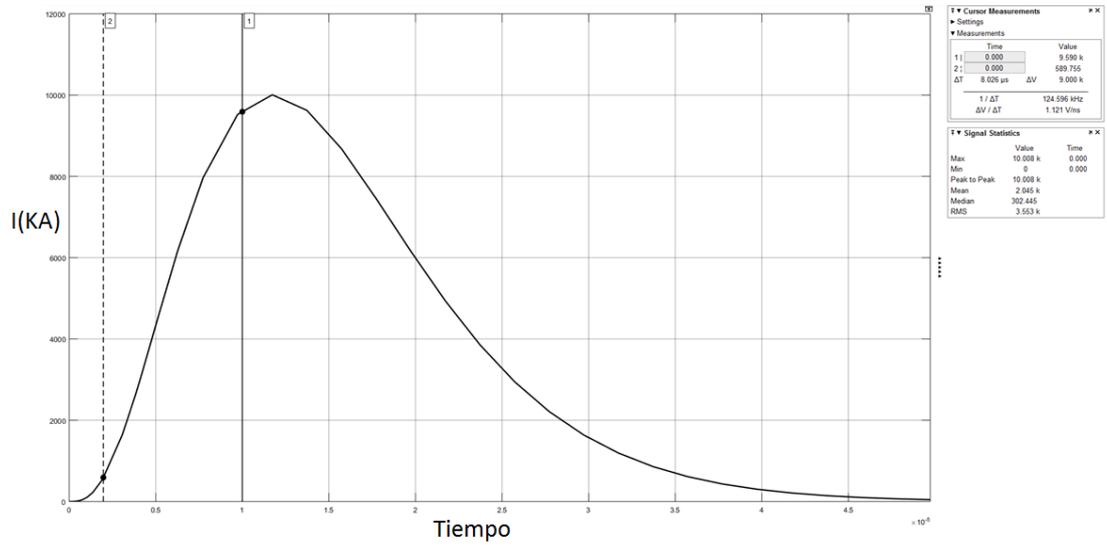
Figura 1: Los autores

**ILUSTRACIÓN 25: Forma de onda normalizada 8/20  $\mu$ s**



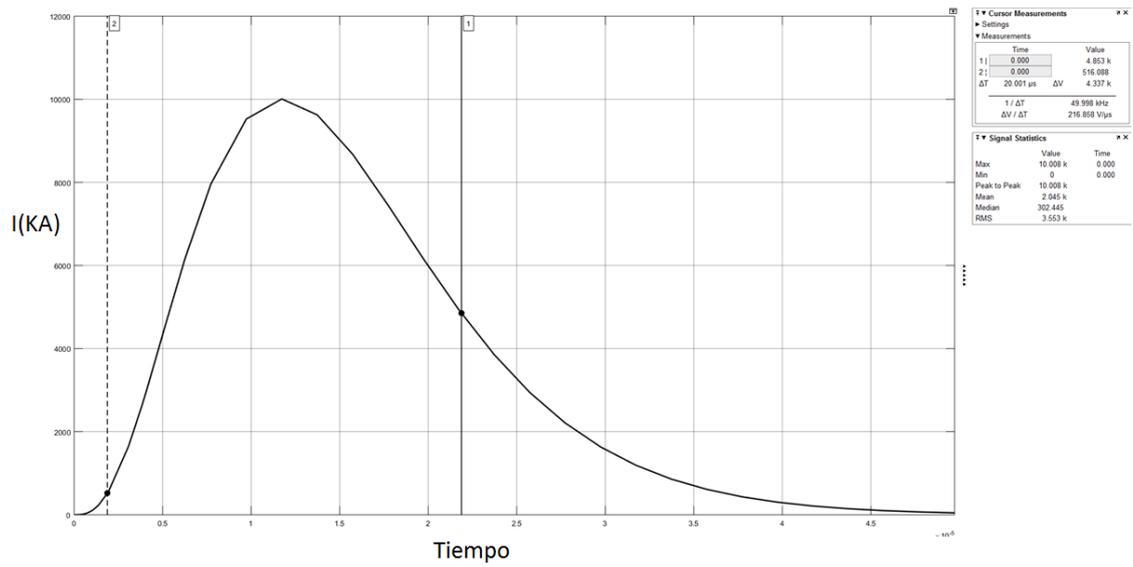
Los autores

## ILUSTRACIÓN 26: Tiempo de frente de onda de 8 $\mu$ s



Los autores

## ILUSTRACIÓN 27: Tiempo de cola de onda de 20 $\mu$ s



Los autores

Para realizar esta simulación se utilizan subsistemas y fuentes de corrientes conectadas.

## SUBSISTEMAS



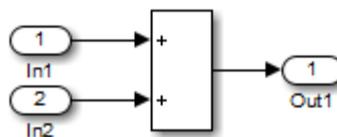
**Símbolo 1:** Subsistema

### Ventajas de subsistemas

Subsistemas le permiten crear un modelo jerárquico que comprende muchas capas. Un subsistema es un conjunto de bloques que se sustituye por un bloque único subsistema. A medida que su modelo aumenta en tamaño y complejidad, se puede simplificar mediante la agrupación de bloques en subsistemas.

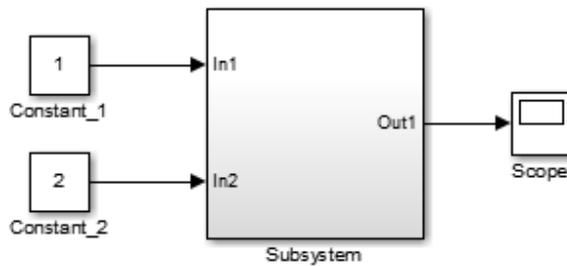
### Crear un subsistema en un bloque subsistema

- Añadir un bloque subsistema (Subsystem) para el modelo, y luego añadir los bloques que conforman el subsistema.
- Copiar el bloque Subsistema de los Puertos y biblioteca de subsistemas en el modelo.
- Abrir el bloque Subsistema haciendo doble clic en él.
- En la ventana subsistema de vacío, crear el contenido del subsistema. Utilice Inport bloques para representar la entrada desde fuera del subsistema y outport bloques para representar la salida externa.
- Por ejemplo, este subsistema incluye un bloque de suma, Inport y Outport bloques para representar de entrada y salida de subsistema.



### ILUSTRACIÓN 28: Puertos del subsistema Inport and Outport

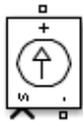
- Al cerrar la ventana subsistema, el bloque subsistema incluye un puerto para cada bloque Inport y Outport.



**ILUSTRACIÓN 29: Subistema con puerto**

- Después de realizar el modelo de impulso de corriente de  $8/20 \mu\text{s}$  que se encuentra en la **figura. 1** copiamos el modelo y lo pegamos en el subsistema.

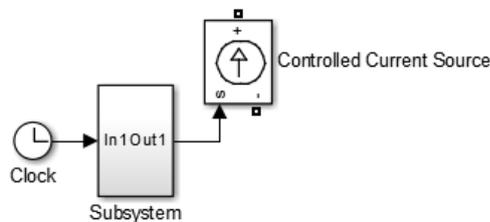
### Fuente de corriente controlada



### Símbolo 2: Fuente de corriente controlada

El bloque de fuente de corriente controlada convierte el Simulink<sup>®</sup> señal de entrada a una fuente de corriente equivalente. La corriente generada es impulsada por la señal de entrada del bloque. La dirección de la corriente positiva es como se muestra por la flecha en el símbolo de bloque.

Puede inicializar el bloque fuente de corriente controlada con una AC específica o corriente continua. Si desea iniciar la simulación en estado estacionario, la entrada del bloque debe estar conectado a una señal de salida como una forma de onda sinusoidal o CC correspondiente a los valores iniciales.



**ILUSTRACIÓN 30: Fuente de corriente controlada**

## Medición de corriente



### Símbolo 3: Medición de corriente

El bloque de medición de corriente se utiliza para medir la corriente instantánea que fluye en cualquier bloque o conexión de la línea eléctrica. El Simulink® de salida proporciona una señal de Simulink que puede ser utilizado por otros bloques de Simulink.

## PowerGUI



### Símbolo 4: PowerGUI

El bloque PowerGUI le permite elegir uno de estos métodos para resolver su circuito continuo, que utiliza un solucionador Ideal conmutación continua de variable de paso de Simulink.

Discretización de la instalación eléctrica de una solución a intervalos de tiempo fijos solución fasor.

El bloque PowerGUI abre también herramientas para el análisis en estado estacionario y resultados de la simulación para el diseño y parámetros avanzados.

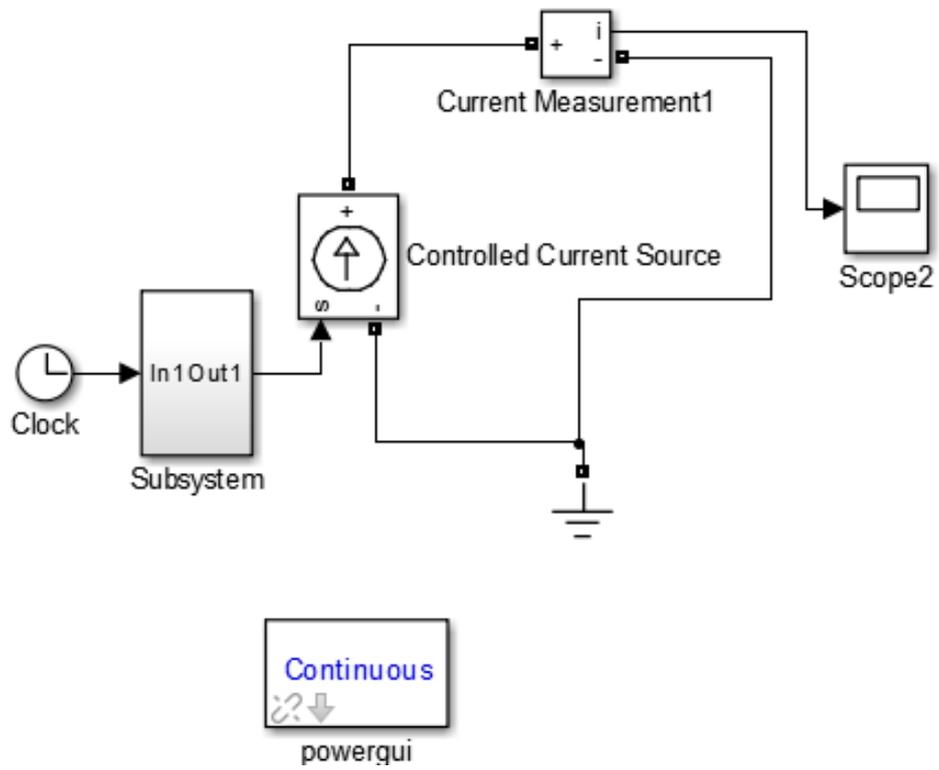
Es necesario el bloque PowerGUI para simular cualquier modelo Simulink que contiene Simscape™ Power Systems™ tecnología especializada bloques. Almacena el circuito equivalente de Simulink que representa las ecuaciones de espacio de estado del modelo.

### Cuando se utiliza un bloque de PowerGUI en un modelo:

- Coloque el bloque PowerGUI en el diagrama de nivel superior para un rendimiento óptimo.
- Asegúrese de que el bloque utiliza el nombre PowerGUI.

En la **figura 2** mostramos el circuito de impulso de corriente de 8/20 us en Simulink y ya podemos conectar a los elementos de SimPowerSystems. (es.mathworks.com)

**ILUSTRACIÓN 31: Circuito de impulso de corriente de 8/20 us en Simulink**

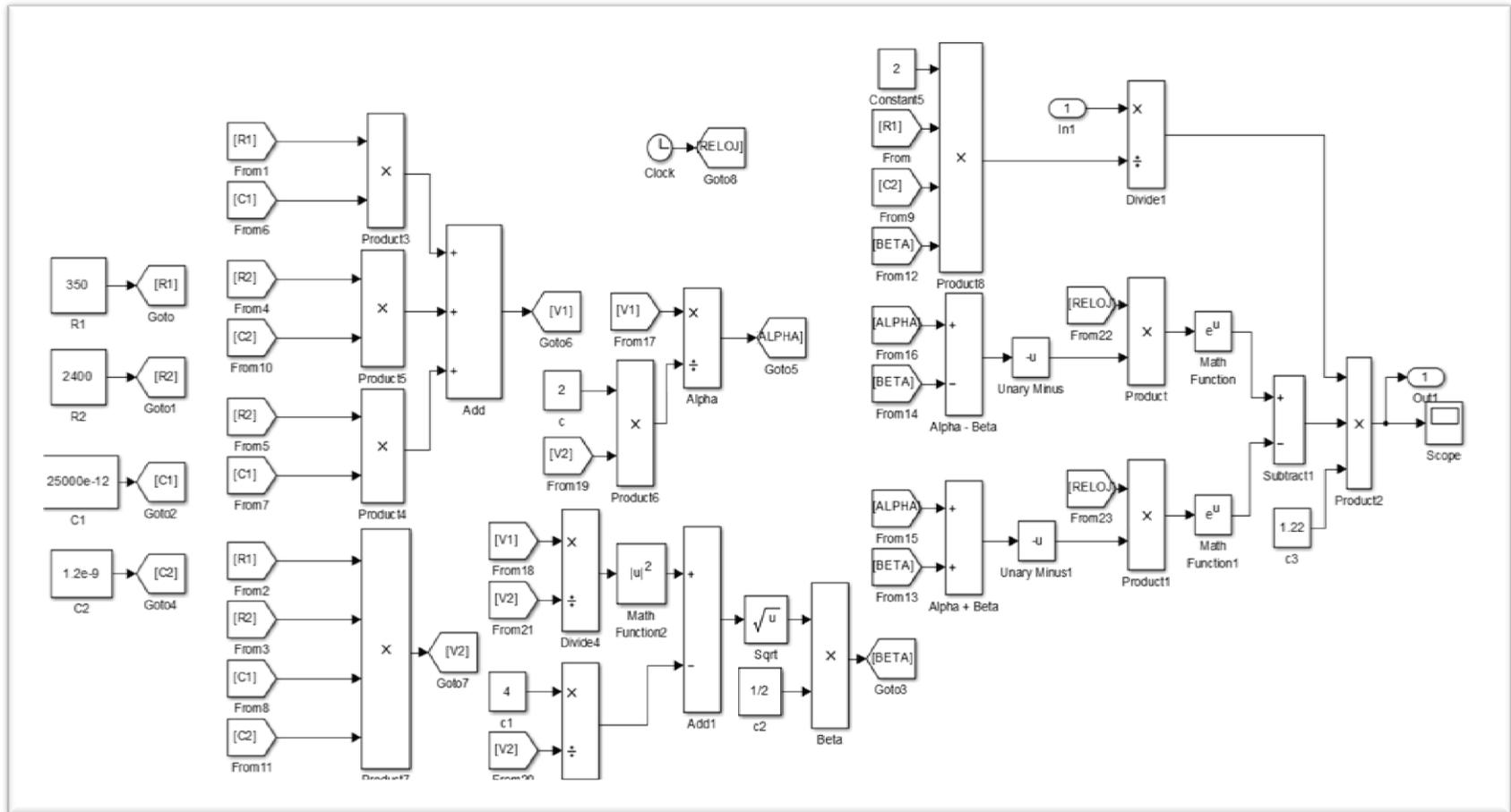


Los autores

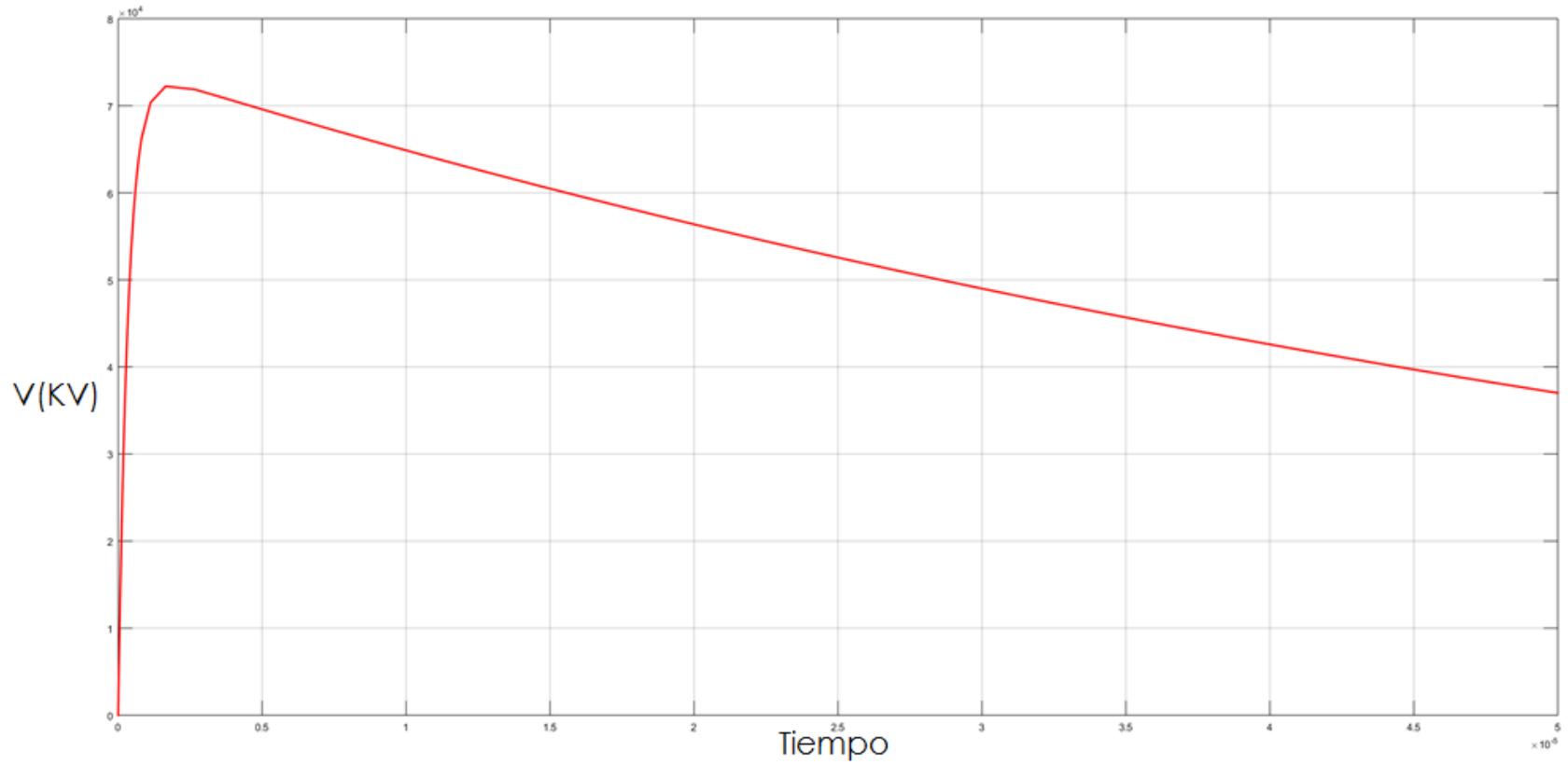
## **5.2 MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DEL CIRCUITO DE IMPULSO DE VOLTAJE TIPO RAYO**

Luego se realiza el circuito de impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50 $\mu$ s 32kV.

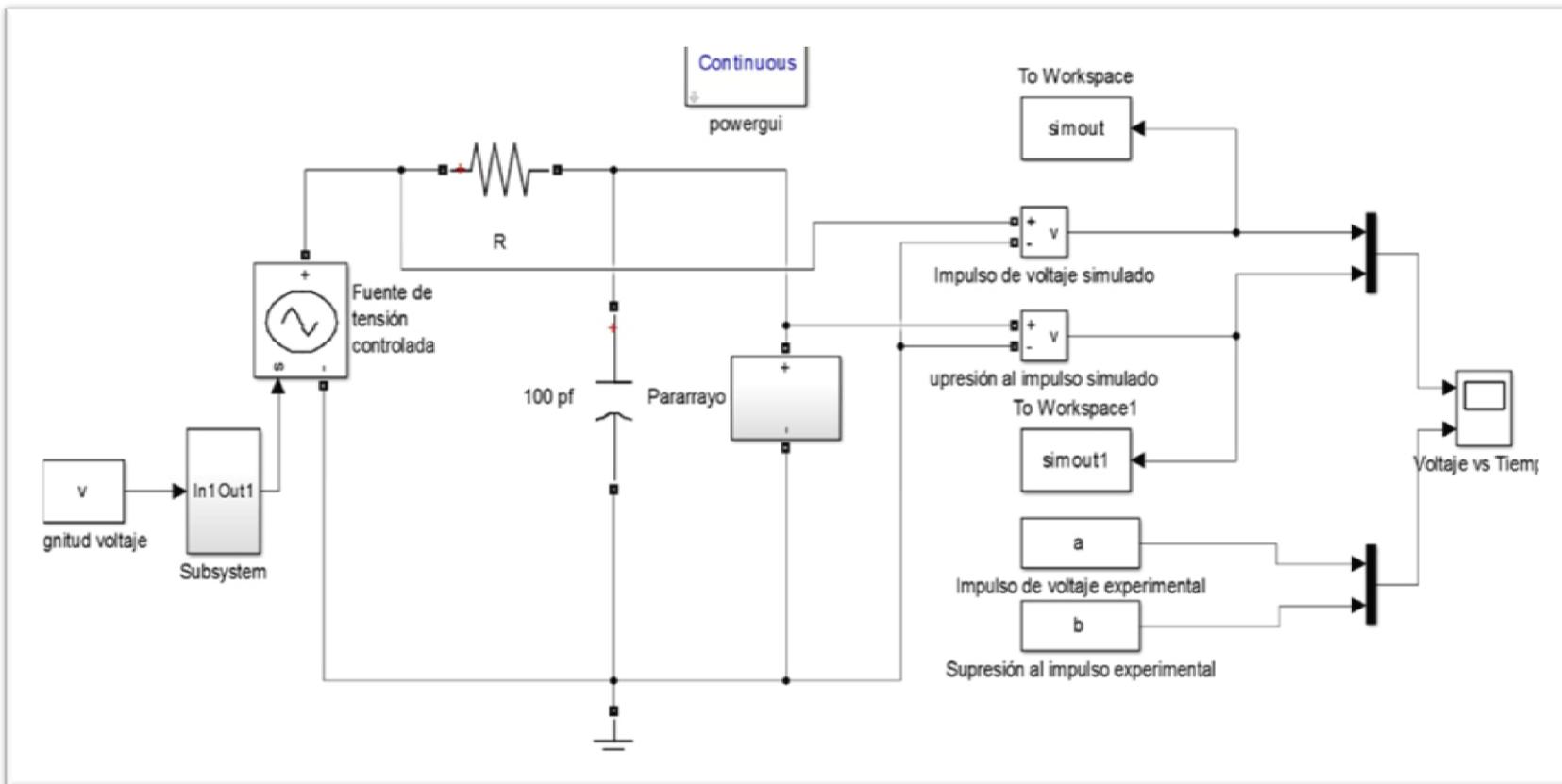
En la siguiente figura 1, se muestra el modelo matemático creado en Simulink del impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50  $\mu$ s.



**ILUSTRACIÓN 32:** Circuito impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50  $\mu$ s.  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 33: Circuito impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50  $\mu$ s**  
Los autores



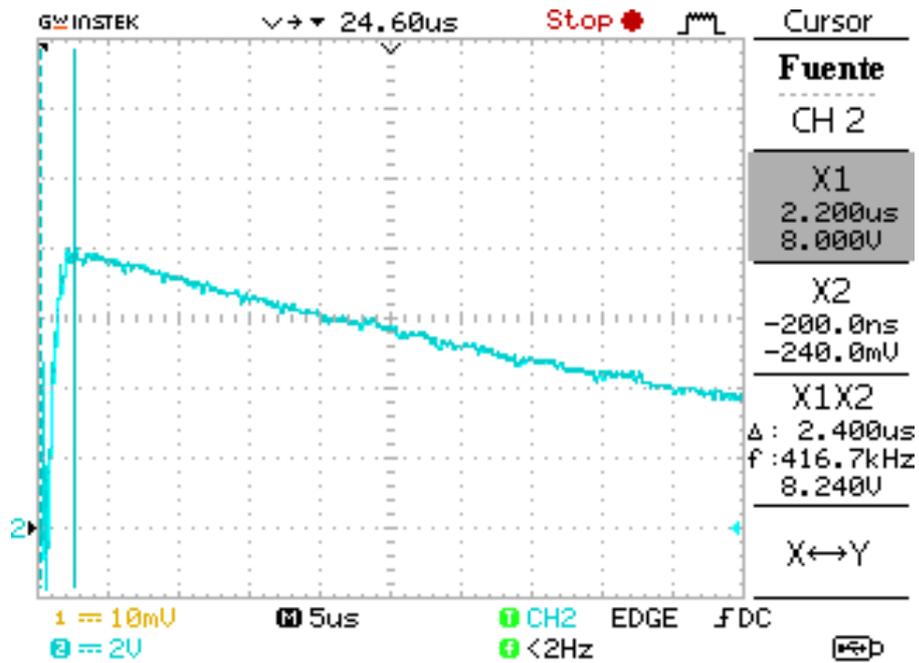
**ILUSTRACIÓN 34: Impulso de voltaje 1,2/50 μs**

Los autores

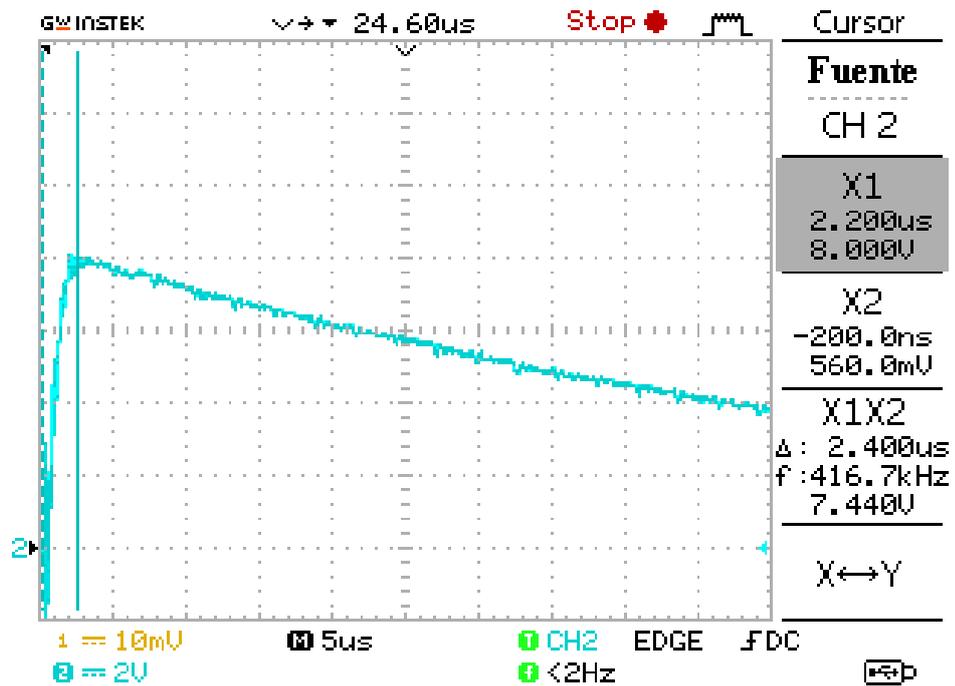
Se realiza las pruebas en el laboratorio con diferentes valores en la separación de las esferas como lo muestra la tabla 7, para la supresión de impulsos, se realizaron las pruebas sin/con pararrayos.

Tabla experimental de los valores obtenidos con/sin pararrayos				
Mm	Sin Pararrayos		Con Pararrayos	
	VpDC (V) osciloscopio	VpDC (kV) calculado *4000	VpDC (V) osciloscopio	VpDC (kV) calculado *4000
5	8,16	32640	8	32000
7,5	11,28	45120	9,92	39680
10	13,76	55040	10,64	42560
12	15,12	60480	10,64	42560
14	18,08	72320	10,64	42560

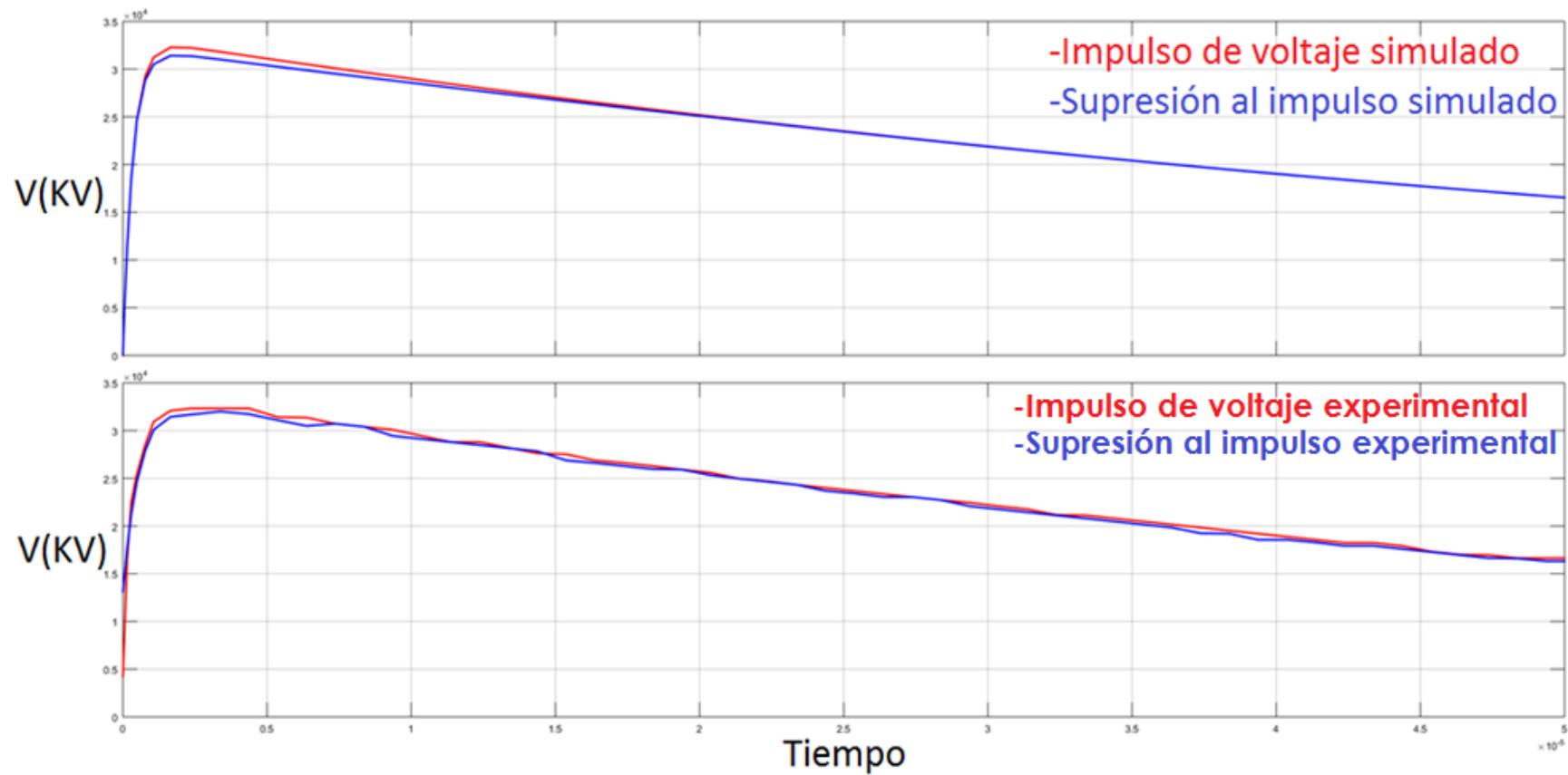
**TABLA 7. Tabla experimental valores obtenidos**  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 35: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 32,6 kV (sin pararrayos)**  
Los autores

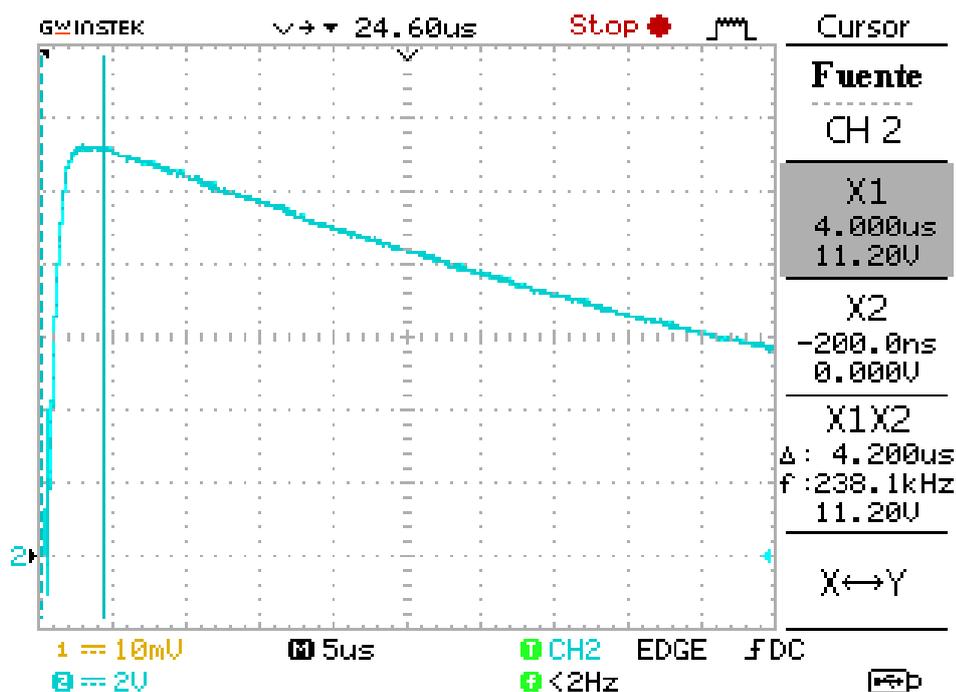


**ILUSTRACIÓN 36: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 32 kV (con pararrayos)**  
Los autores

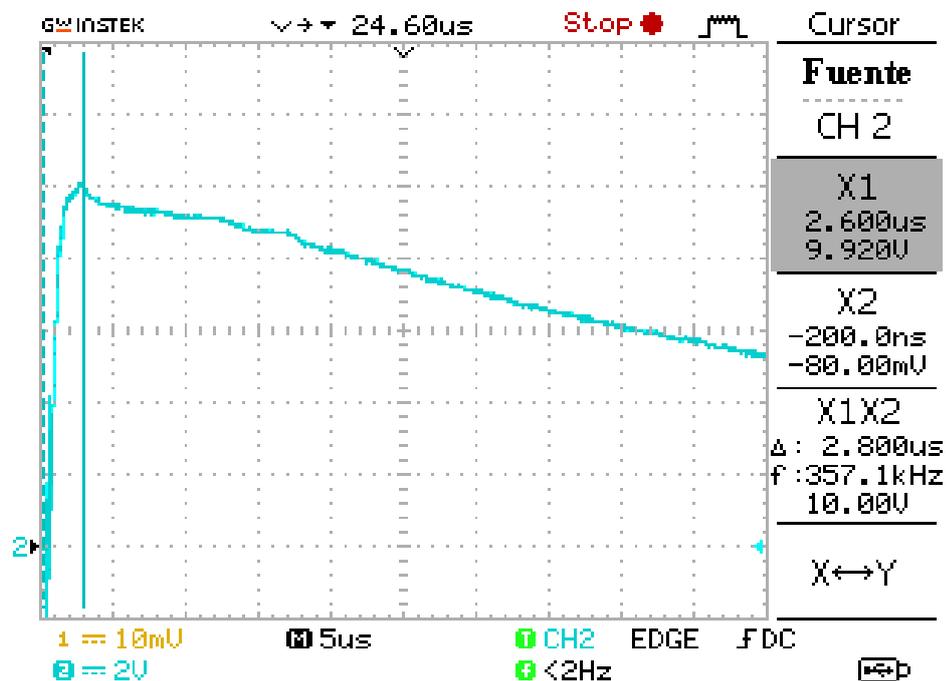


**ILUSTRACIÓN 37: Comparación de datos del Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 32,6 kV**

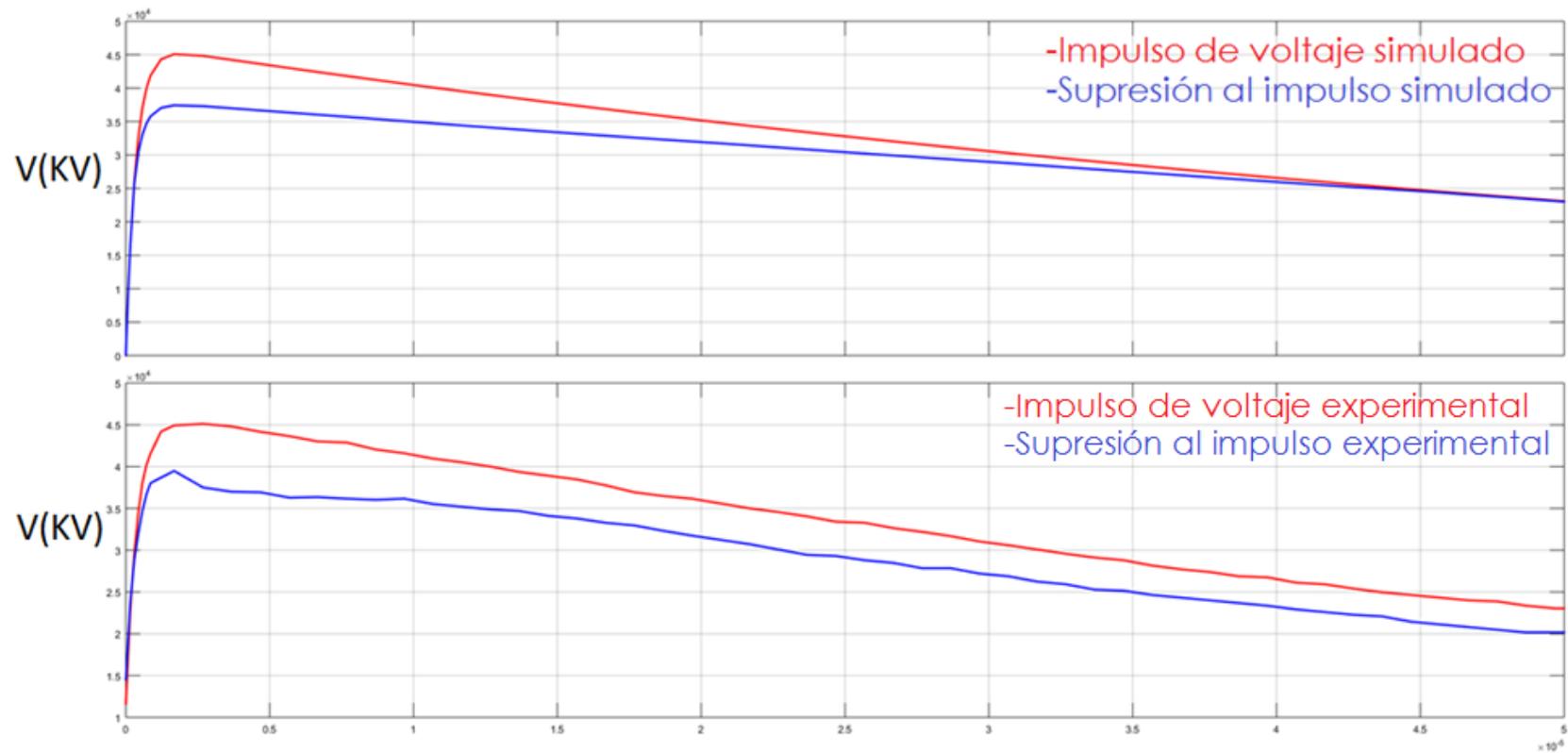
Los autores



**ILUSTRACIÓN 38: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 45,12 kV (sin pararrayos)**  
Los autores

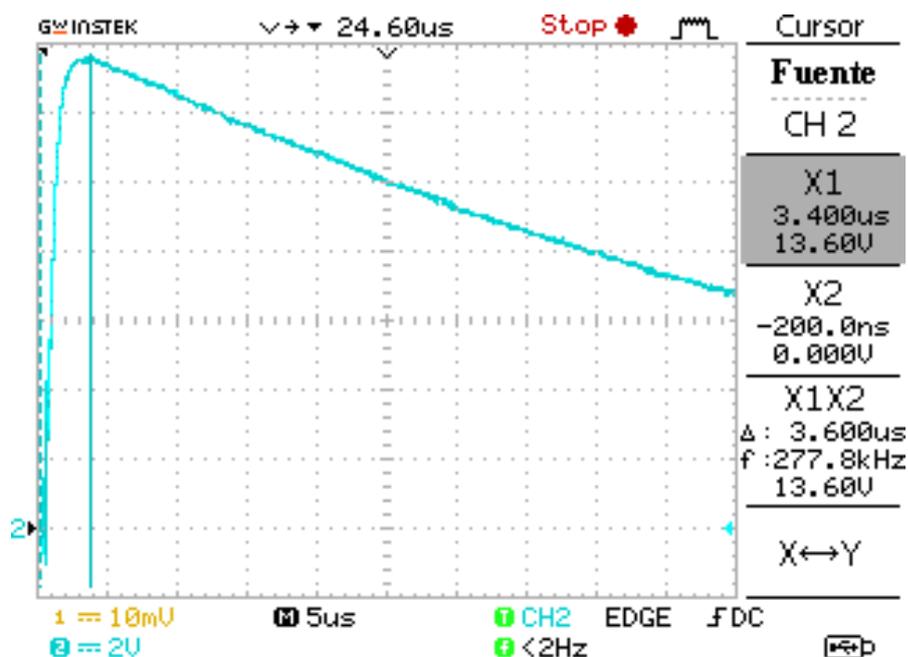


**ILUSTRACIÓN 39: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 39,68 kV (con pararrayos)**  
Los autores

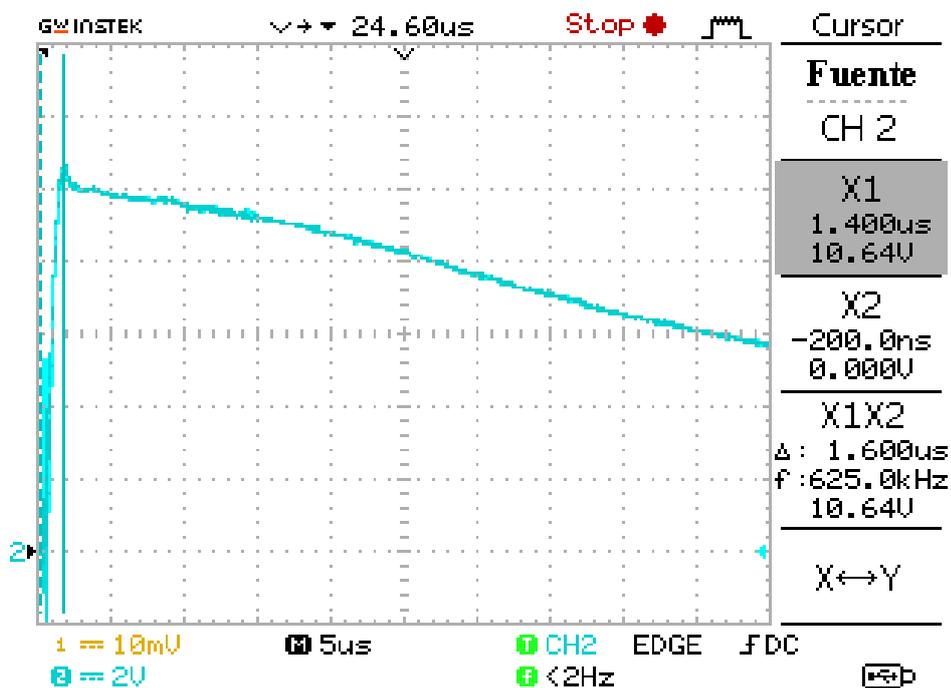


**ILUSTRACIÓN 40: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 45,12 kV**

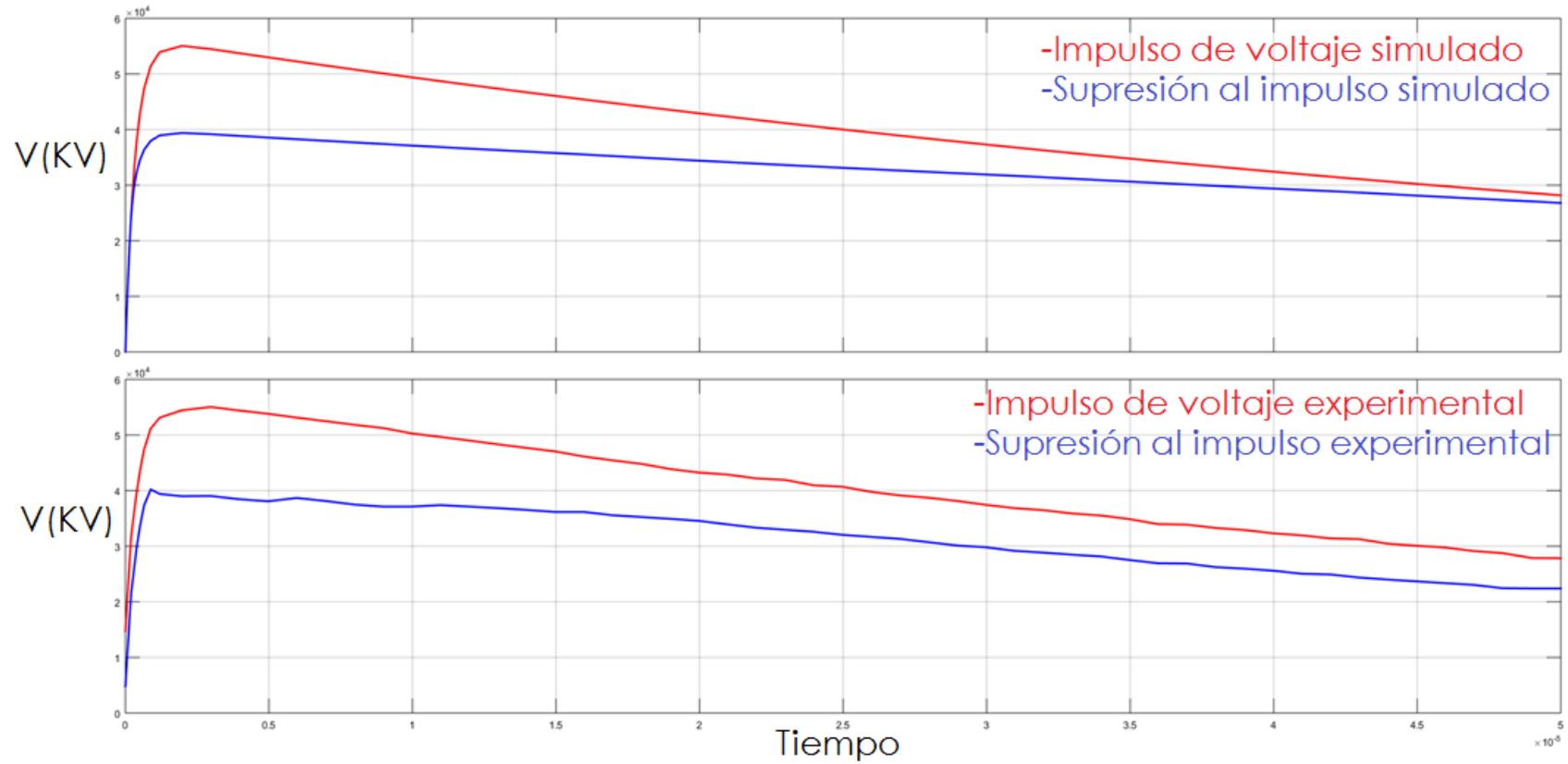
Los autores



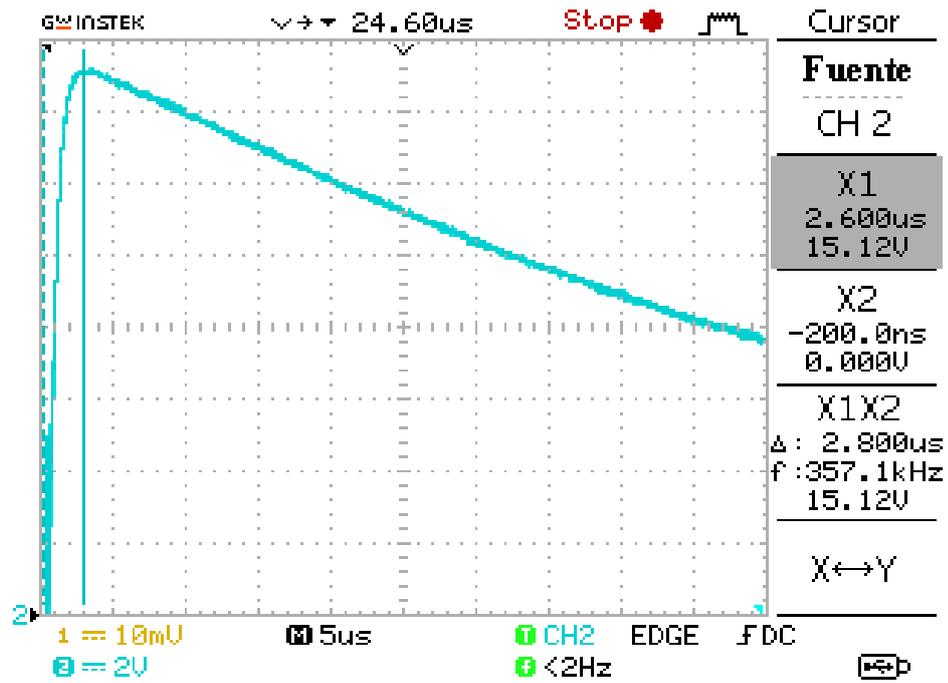
**ILUSTRACIÓN 41: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 55,04 kV (sin pararrayos)**  
Los autores



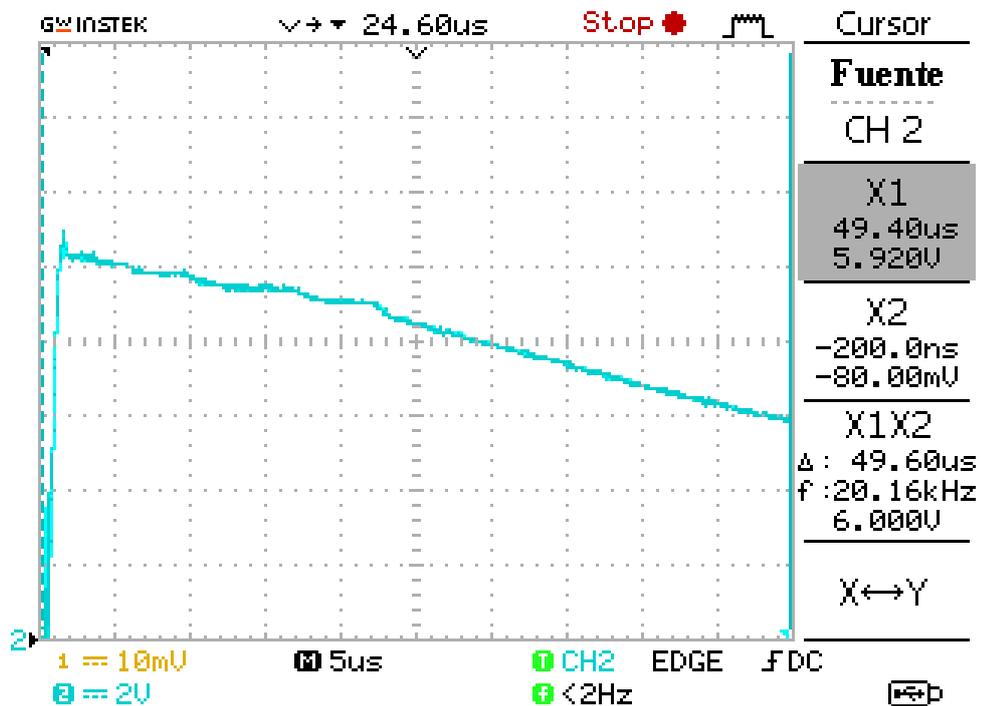
**ILUSTRACIÓN 42: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 42,56 kV (con pararrayos)**  
Los autores



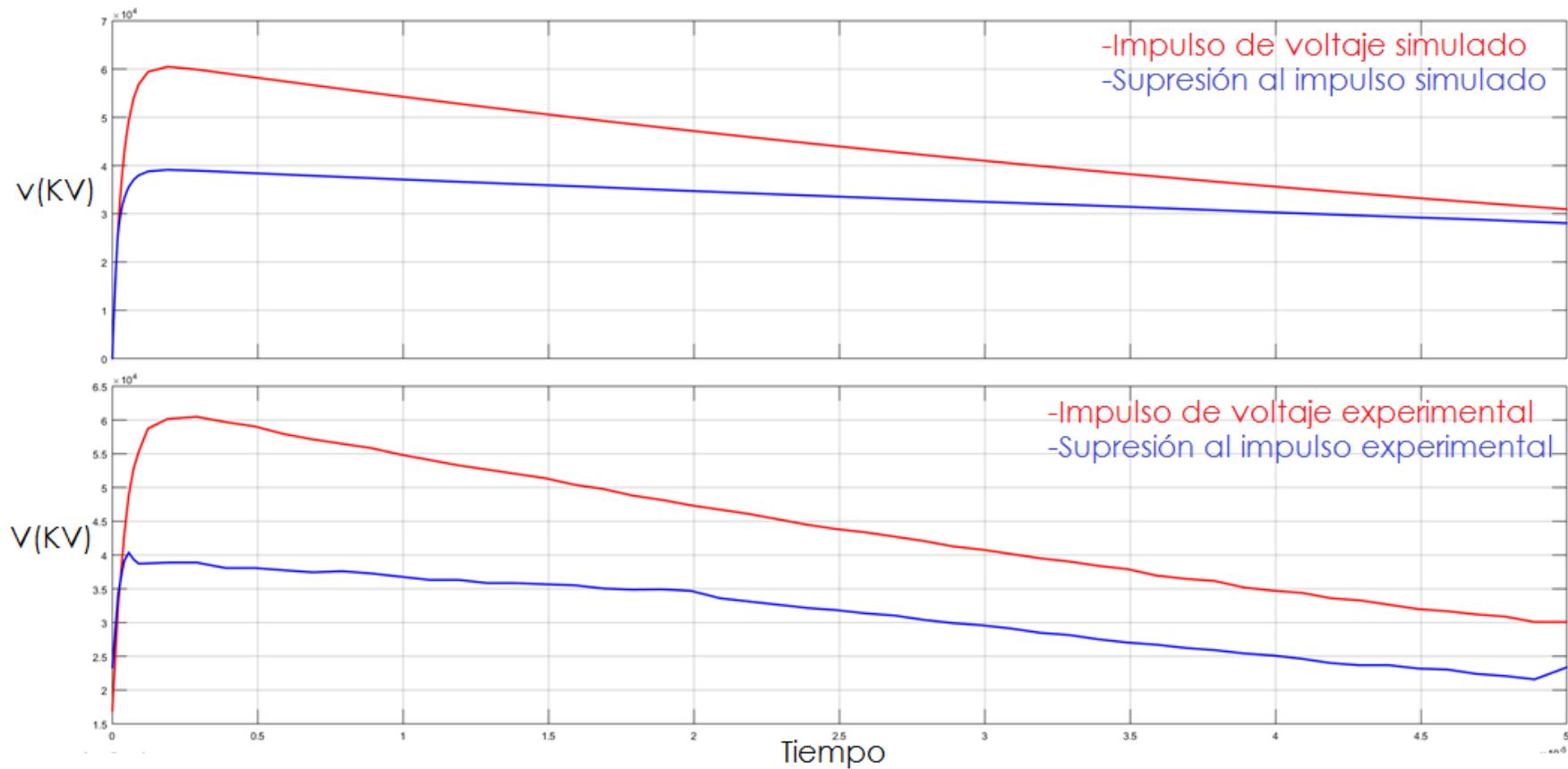
**ILUSTRACIÓN 43: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 55,04 kV**  
 Los autores



**ILUSTRACIÓN 44:** Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 60,48 kV (sin pararrayos)  
 Los autores

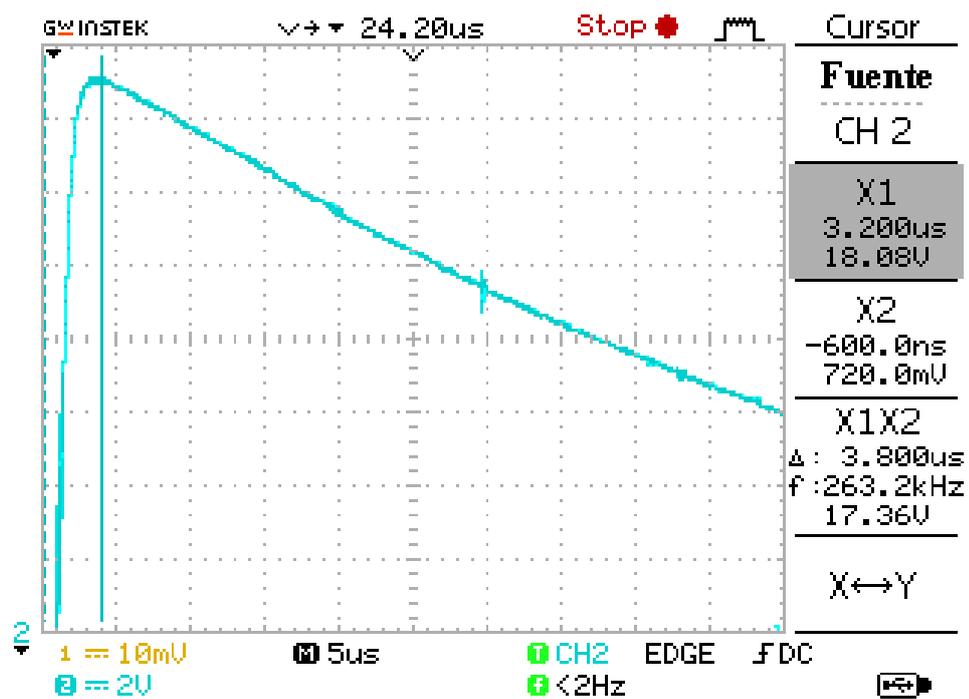


**ILUSTRACIÓN 45:** Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 42,56 kV (con pararrayos)  
 Los autores

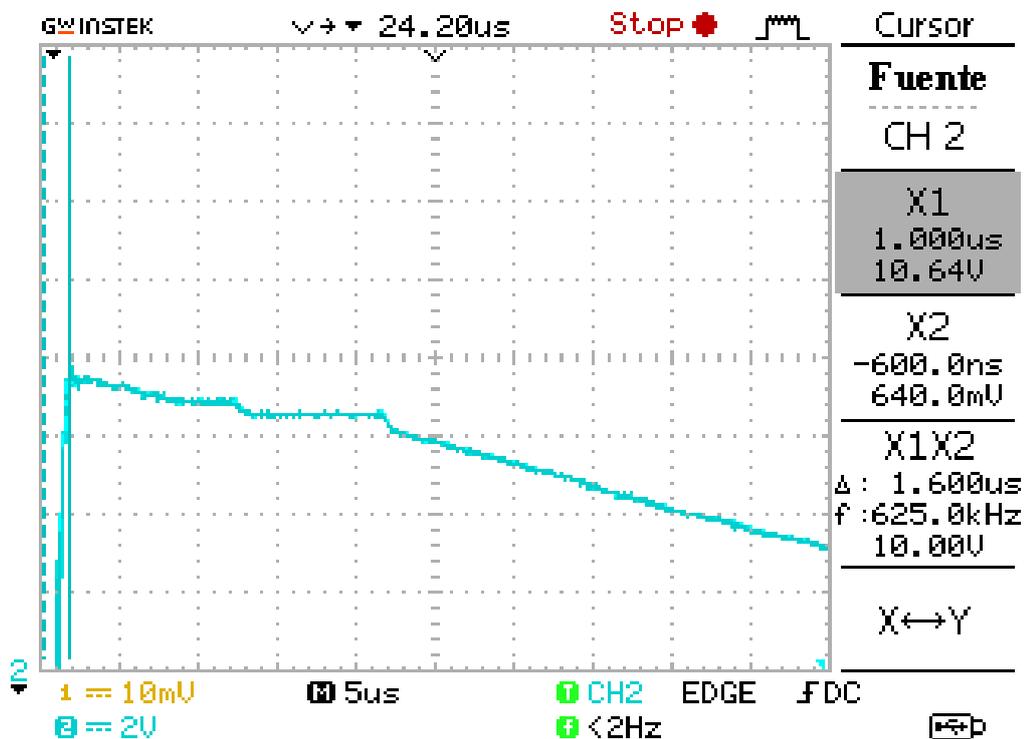


**ILUSTRACIÓN 46: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu s$  60,48 kV**

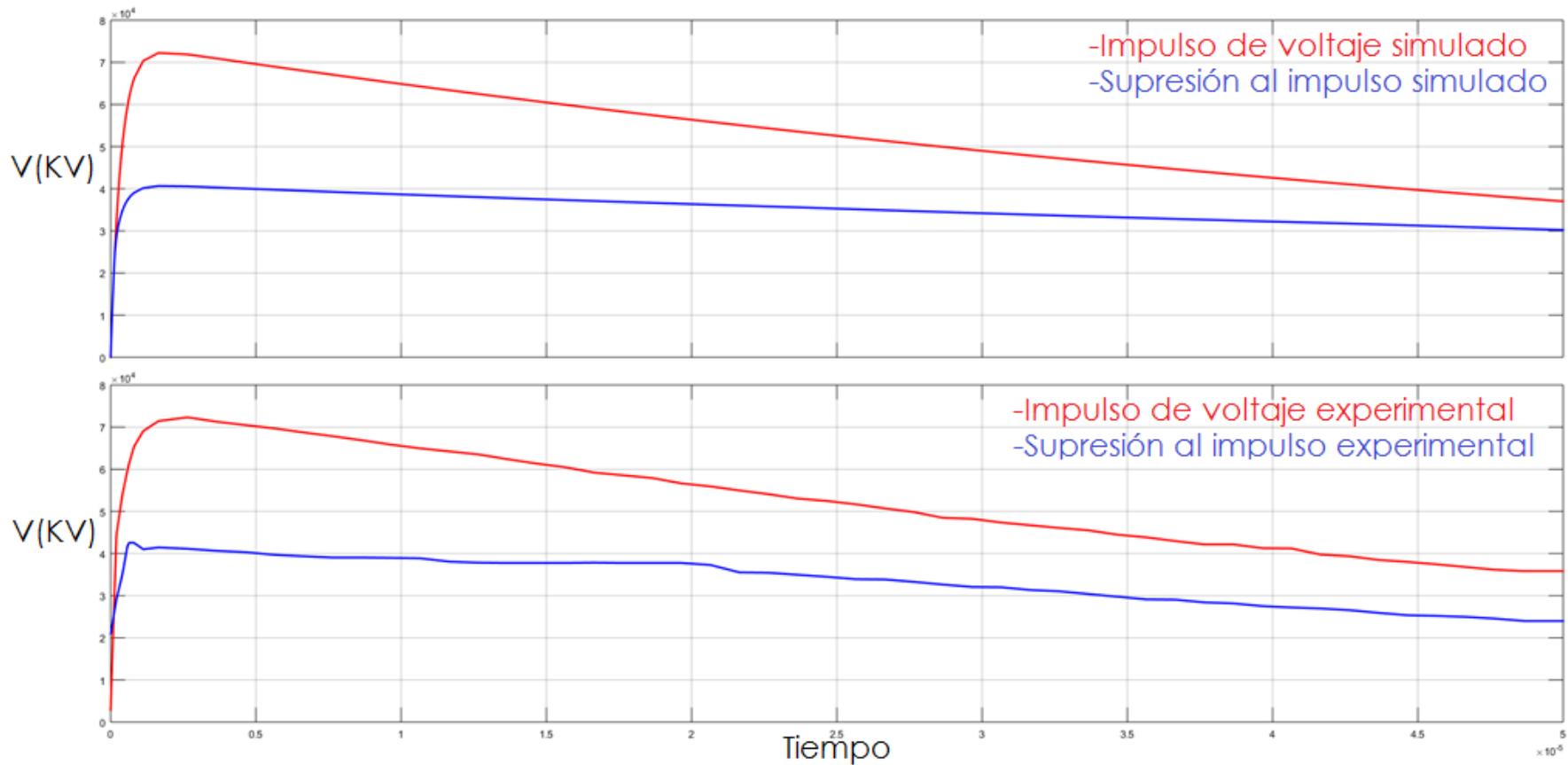
Los autores



**ILUSTRACIÓN 47: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 72,32 kV (sin pararrayos)**  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 48: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 42,56 kV (con pararrayos)**  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 49: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 72,32 kV**

Los autores

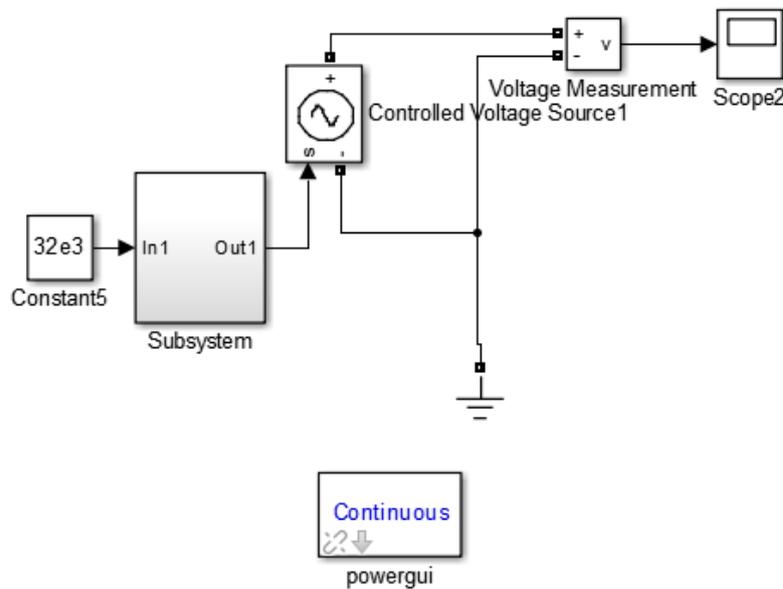
Una vez realizado el modelo matemático se procede a crear un subsistema para copiar el modelo realizado en la figura 1 y se lo pega en el subsistema.

### Fuente de tensión controlada



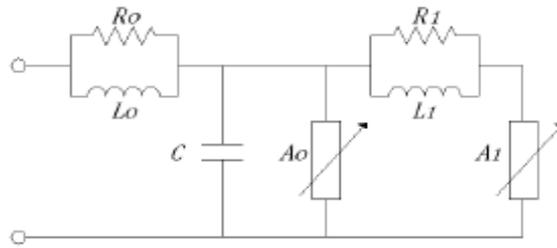
### Símbolo 5.

En la figura 2 mostramos el circuito de impulso de voltaje de  $1.2/50 \mu\text{s}$  en Simulink y ya podemos conectar a los elementos de SimPowerSystems.



**ILUSTRACIÓN 50: El circuito de impulso de voltaje de  $1.2/50 \mu\text{s}$ .**  
Los autores

### Modelo de pararrayo con fuente de impulso de corriente 8/20 $\mu$ s



Este modelo descargador de sobretensión fue recomendada por el IEEE W.G.3.4.11 mostrado en la **ilustración 13**.

Los descargadores de óxido metálico son dispositivos dependientes de la frecuencia, es decir, la tensión en el descargador es una función tanto de la pendiente o velocidad de elevación y la magnitud de la corriente conducida por el descargador.

Para este modelo, la característica no lineal V-I de un descargador está representada con dos secciones de una resistencia no lineal A0 y A1 como se muestra en la ilustración. Las dos secciones están separadas por un filtro RL. Para tensiones de subida de frente lento, la influencia del filtro es insignificante y las dos secciones no lineales del modelo son esencialmente en paralelo. Para tensiones de frente rápido la impedancia de filtro RL se hace más significativa.

El principal problema con el uso del modelo fue la forma de elegir los parámetros del modelo, (D Durbak, 1985) da algunas fórmulas sugeridas para las elecciones de los parámetros del modelo basado en la altura estimada de un pararrayos y el número de columnas paralelas de disco de óxido metálico.

La inductancia L1 y Resistencia R1 son el filtro entre las dos resistencia no lineales, las fórmulas para estos dos parámetros son.

$$\text{Ecuación 26} \quad L1 = 15 \frac{d}{n} \mu h$$

$$\text{Ecuación 27} \quad R1 = 65 \frac{d}{n} \Omega$$

La inductancia L0 en el modelo representa la inductancia asociada a los campos magnéticos en las inmediaciones del descargador. El resistor R0 se utiliza para

estabilizar la integración numérica cuando el modelo se implementa en un programa de ordenador digital. La capacitancia C representa la capacitancia del pararrayos.

Ecuación 28 
$$L0 = 0,2 \frac{d}{n} \mu h$$

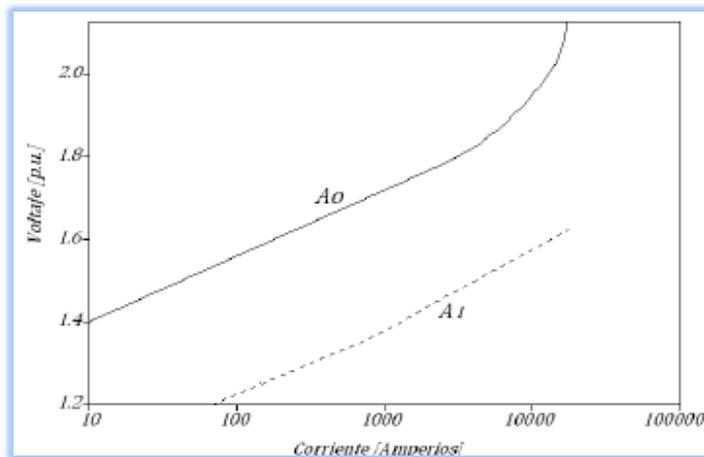
Ecuación 29 
$$R0 = 100 \frac{d}{n} \Omega$$

Ecuación 30 
$$C0 = 100 \frac{n}{d} \text{pf}$$

$d$  = es la alta estimación del descargador en metros

$n$  = es el número de columnas paralelas de MO en el descargador

Las características no lineales V-I de A0 y A1 pueden estimarse a partir de las curvas puestas en unidades indicadas en **la ilustración 14**.



### Resistencias no lineales A0 y A1

Para encontrar cada uno de los puntos de las características V-I de las resistencias no lineales A0 y A1 se emplean las siguientes ecuaciones

Ecuación 31 
$$A0 = \left[ I * R \text{ relativo en p. u. para } A0(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

Ecuación 32 
$$A1 = \left[ I * R \text{ relativo en p. u. para } A1(i) * V_{10}^{1/1.6} \right]$$

En donde los  $I * R$  relativos en p.u. para A0 y A1 pueden ser estimados de las curvas por unidad.

De esta manera se calcula el voltaje del descargador para cada punto de corriente de la resistencia no lineal buscada.

### Selección de parámetros para un descargador de óxido metálico

En este trabajo se va a modelar un pararrayos de óxido de metal marca Hubbell de Ohio Brass PDV-100 óptima con número de catálogo (213709) tipo distribución que es para media tensión con voltaje nominal de 10 KV.

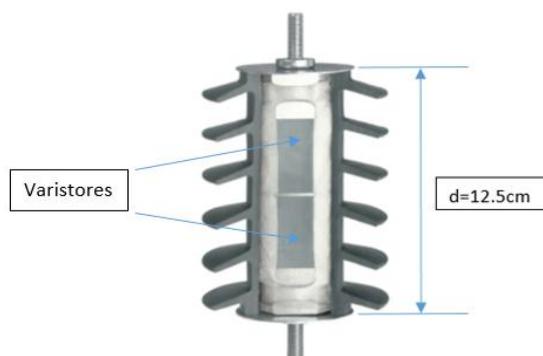
Se requiere la siguiente información del descargador que se encuentra en la hoja de datos del mismo:

$d$  -longitud del pararrayos

$n$  - número de discos de oxide de metal que contiene el pararrayos

$v_{10}$  -voltaje de descarga para una corriente de 10KA, 8/20  $\mu$ s, en KV

La longitud y el número de discos del pararrayos se muestran en la figura 3 y el voltaje de descarga para un impulso de corriente de 10KA en la tabla 1 que son sacados de la hoja de datos del fabricante Hubbell.



**ILUSTRACIÓN 51: Descargador PDV-100 optima**  
(Incorporated, July, 2010)

#### Electrical Characteristics

##### Heavy Duty PDV100-Optima

Rated Voltage kV	MCOV kV	Unit Catalog Number	0.5 $\mu$ sec 10kA Maximum IR-kV <sup>(1)</sup>	500 A Switching Surge Maximum IR- kV <sup>(2)</sup>	8/20 Maximum Discharge Voltage - kV					
					1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2.55	213703	10.7	7.3	8.0	8.6	9.1	9.9	11.2	13.3
6	5.1	213705	21.5	14.7	16.0	17.1	18.2	19.8	22.5	26.5
9	7.65	213708	31.4	21.5	23.5	25.1	26.6	29.0	32.9	38.8
10	8.4	213709	34.3	23.4	25.6	27.4	29.0	31.6	35.9	42.3
12	10.2	213710	40.8	27.8	30.4	32.6	34.5	37.6	42.7	50.3
15	12.7	213713	51.8	35.4	38.7	41.4	43.8	47.8	54.3	64.0
18	15.3	213715	61.1	41.7	45.6	48.8	51.7	56.4	64.1	75.5
21	17.0	213717	68.8	47.0	51.4	55.0	58.2	63.5	72.1	85.0
24	19.5	213720	82.6	56.4	61.6	66.0	69.9	76.2	86.6	102.0
27	22.0	213722	92.7	63.3	69.2	74.0	78.4	85.5	97.1	114.5
30	24.4	213724	101.9	69.6	76.0	81.4	86.2	94.0	106.8	125.9
36	29.0	213729	122.4	83.5	91.3	97.8	103.5	112.9	128.3	151.2

**Tabla 3.**Características eléctricas del descargador PDV-100 optima  
(Incorporated, July, 2010)

Usando las ecuaciones presentadas anteriormente se terminan como sigue:

$$\text{Ecuación 33} \quad L0 = 0,2 \frac{d}{n} uh \equiv 0,2 \frac{0,125}{1} = 0,025 uh$$

$$\text{Ecuación 34} \quad R0 = 100 \frac{d}{n} \Omega \equiv 100 \frac{0,125}{1} = 12,5 \Omega$$

$$\text{Ecuación 35} \quad L1 = 15 \frac{d}{n} uh \equiv 15 \frac{0,125}{1} = 1,875 \mu h \rightarrow 0,9375 \mu h \rightarrow 0,46875 \mu h \rightarrow 0,234375 \mu h$$

$$\text{Ecuación 36} \quad R1 = 65 \frac{d}{n} \Omega \equiv 65 \frac{0,125}{1} = 8,125 \Omega$$

$$\text{Ecuación 37} \quad C0 = 100 \frac{n}{d} pf \equiv 100 \frac{1}{0,125} = 800 pf$$

El componente de L1 es la mayor influencia en el resultado del análisis de sobretensiones. Sin embargo, el valor inicial de L1 está dado por las dimensiones físicas del descargador de sobretensiones, debe ser que ser ajustado con intento y error procedimiento para que coincida con las tensiones residuales para corrientes de descarga rayo publicado en el catálogo del fabricante.

Entonces gracias a la simulación se partió del valor calculado inicialmente que fue 1,875  $\mu h$  y luego se cambió a 0,234375  $\mu h$  para que coincida con los valores de tensiones residuales dados por la hoja del fabricante.

Los bloques A0 y A1 de resistencia no lineal están representados por la ecuación:

$$\text{Ecuación 38} \quad \frac{I}{I0} = \left(\frac{V}{V0}\right)^\alpha$$

En la ilustración 34 se usa para determinar las características iniciales de las resistencias no lineales A0 y A1. Se hace uso de las siguientes fórmulas para obtener los valores de por unidad a kilo voltios.

$$\text{Ecuación 39} \quad KV = A0_{pu} \frac{V_{10}}{1,6}$$

$$\text{Ecuación 40} \quad KV = A1_{pu} \frac{V_{10}}{1,6}$$

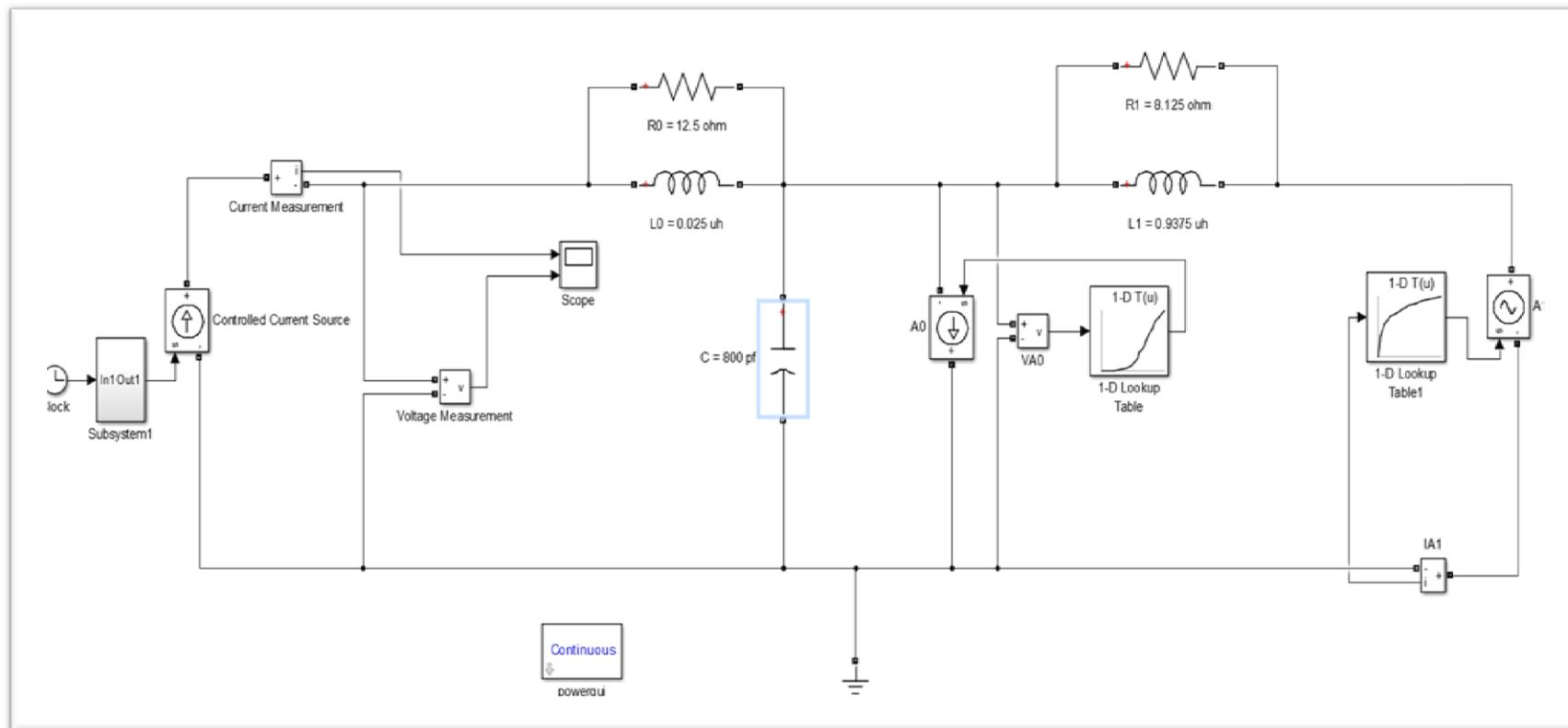
En la **tabla 8** se muestran los valores en KV de cada resistencia no lineal A0 y A1.

Resistencia A0			Resistencia A1		
KA	V(pu)	V(KV)	KA	V(pu)	V(KV)
0,01	1,4	27,65			
0,1	1,54	30,415	0,1	1,23	24,293
1	1,68	33,18	1	1,36	26,86
2	1,74	34,365	2	1,43	28,243
4	1,8	35,55	4	1,48	29,23
6	1,82	35,945	6	1,5	29,625
8	1,87	36,936	8	1,53	30,218
10	1,9	37,525	10	1,55	30,613
12	1,93	38,118	12	1,56	30,81
14	1,97	38,908	14	1,58	31,205
16	2	39,5	16	1,59	31,403
18	2,05	40,488	18	1,6	31,6
20	2,1	41,475	20	1,61	31,798

**TABLA 8: Resistencias no lineal A0 y A1**

Los autores

En la **ilustración 51** se muestra el circuito del equivalente eléctrico del pararrayos propuesto por el IEEE W.G.3.4.11, este circuito fue elaborado en el software en Matlab - Simulink.



**ILUSTRACIÓN 52:** El circuito equivalente eléctrico del pararrayos propuesto por el IEEE W.G.3.4.11  
**Los autores**

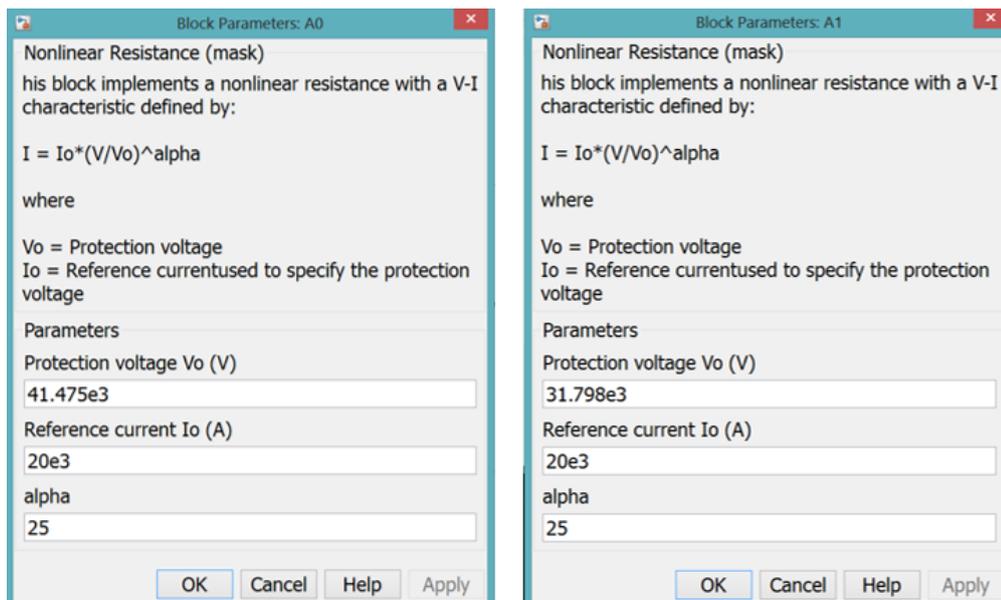
Las resistencias no lineales A0 y A1 son subsistemas creados por MATWORKS líder mundial en desarrollo de software ilustración 37 donde tenemos la misma fórmula utilizada por el modelo propuesto.

Ecuación 41 
$$\frac{I}{I_0} = \left(\frac{V}{V_0}\right)^\alpha$$



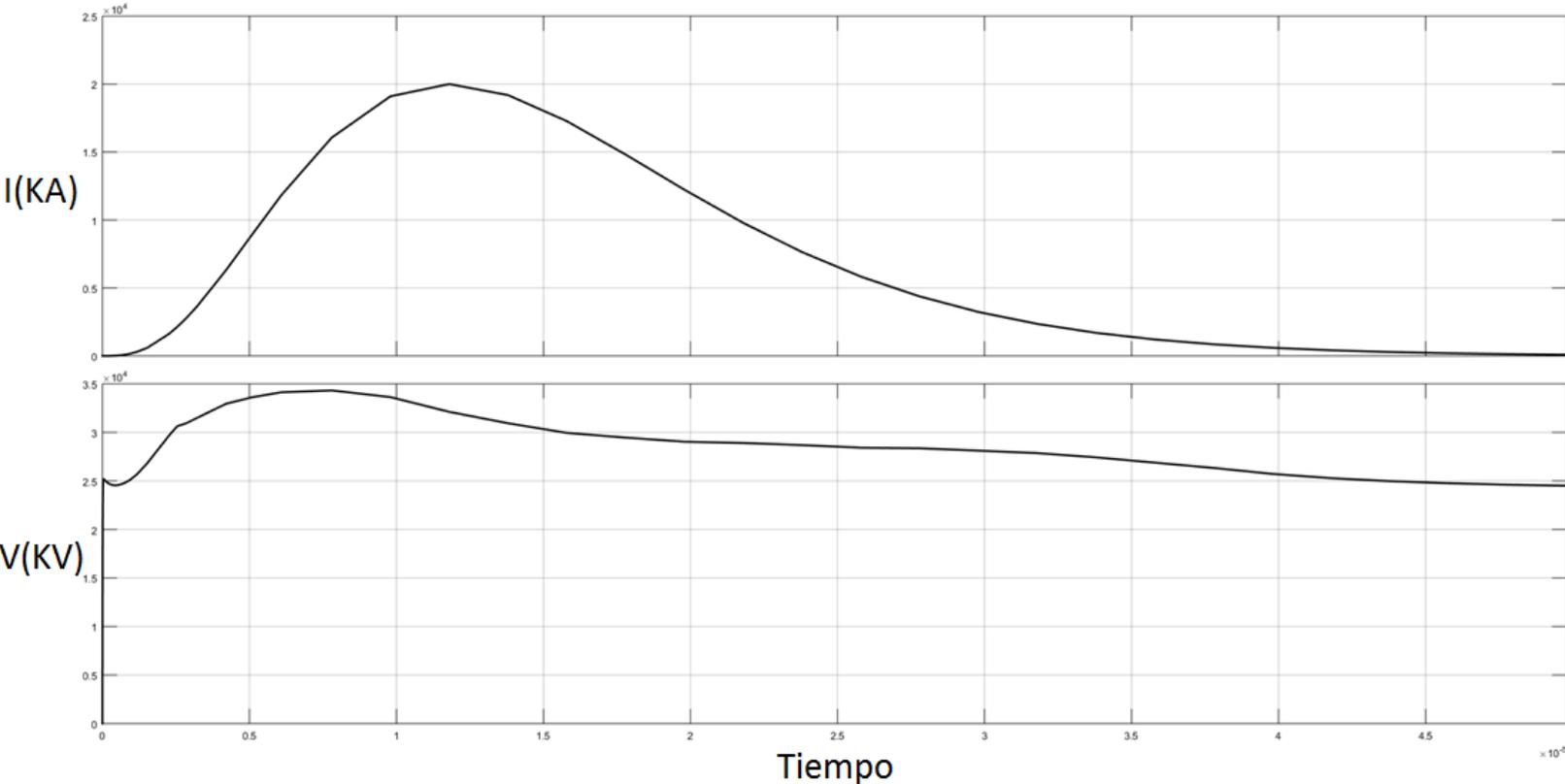
**Símbolo 6.** Elementos de resistencias no lineales A0 y A1

En la **ilustración 52** muestra los valores que se deben ingresar como son V0 y I0 que son los valores calculados en la tabla 1.5 y el alpha que es la característica no lineal para poder obtener los valores residuales del pararrayo.



**ILUSTRACIÓN 53: Los bloques A0 y A1 de resistencia no lineal**  
Los autores

A continuación se muestra la respuesta del voltaje residual al impulso de corriente de 10KA en un tiempo de 8/20  $\mu s$  ilustración 53.



**ILUSTRACIÓN 54: Voltaje residual al impulso de corriente de 10KA en un tiempo de 8/20  $\mu s$**   
Los autores

Este modelo fue elegido ya que puede dar resultados satisfactorios para corrientes de descarga con un rango de tiempos de frente de 0,5 a 45  $\mu s$ .

**NOTA:** Para estas pruebas no se pudo realizar la comparación del impulso de corriente tipo rayo en el laboratorio, porque no se encuentra adaptado para ese tipo de pruebas. Por ello se procede a realizar las pruebas de impulso de voltaje tipo rayo.

Es importante para analizar el circuito obtener los datos del fabricante, principalmente el voltaje máximo de descarga para 10 kA cuando se aplica un impulso de corriente de 8/20 $\mu s$ .

### 5.3 PORCENTAJES DE ERROR

Ecuación 42 
$$\%error = \frac{\text{valor teórico} - \text{valor experimental}}{\text{valor teórico}} \times 100$$

$$\%error_{32,32kV} = \frac{1162718,82 - 1179200}{1162718,82} * 100 = -1,41746892$$

$$\%error_{45,12kV} = \frac{1739394,19 - 1694880}{1739394,19} * 100 = 2,55917797$$

$$\%error_{55,04kV} = \frac{1682672,66 - 1618920}{1682672,66} * 100 = 3,78877363$$

$$\%error_{60,48kV} = \frac{1619309,92 - 1487360}{1619309,92} * 100 = 8,14852796$$

$$\%error_{72,32kV} = \frac{1926155,283 - 1848640}{1926155,283} * 100 = 4,02435276$$

## CAPITULO VI

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1 CONCLUSIONES

- Se alcanzó el objetivo de implementar 2 modelos de pararrayos en el programa Matlab – Simulink, en base a los datos generados por el fabricante, el primero es el equivalente eléctrico de un pararrayos propuesto por la IEEE W.G.3.4.11 y el segundo un modelo que consiste en una resistencia no lineal.
- Según los estudios realizados de las sobretensiones debido a las descargas atmosféricas es necesario realizar el modelo completo propuesto por la IEEE, en especial en redes eléctricas en las que las sobretensiones por descargas atmosféricas prevalecen.
- Se plantearon las ecuaciones utilizando las leyes de voltaje de Kirchhoff (nodos) y se modeló en el programa Matlab – Simulink, dando como resultado la curva característica del comportamiento no lineal del elemento. Esta curva nos ayudó a encontrar el valor de la resistencia en el momento en que se realizó la prueba en el laboratorio con una fuente de voltaje de impulso de 1,2 a 50 $\mu$ s.
- Se planteó el circuito generador de impulsos en el programa Matlab – Simulink obtenido del resultado del “Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la UPS-GYE”, donde se conectó al pararrayos y se obtuvo la supresión de valores medidos con una separación de esferas de 5, 7.5, 10, 12 y 14, se comparó en MATLAB, con el 6% de error para la impulso de voltaje.

- Con estas pruebas muchos estudiantes pueden obtener la supresión de impulsos tipo atmosféricas de otros pararrayos, con sus respectivas tablas y cálculos correspondientes.

## 6.2 RECOMENDACIONES

- Para la comprensión del funcionamiento de un pararrayos se recomienda el estudio de este trabajo, porque se realizó el modelo matemático en el programa Matlab – Simulink de pruebas de impulso de corriente que no se pueden realizar en un laboratorio no equipado con estas características.
- Queda por realizar el análisis de supresión de impulsos en el pararrayos, pero de tipo maniobra, en un trabajo futuro.
- No olvidar realizar las correctas conexiones del circuito y así evitar posibles accidentes y/o daños a los equipos a utilizar.
- Al momento de realizar prácticas del circuito generador de impulsos es muy importante recordar la conexión del capacitor divisor de voltaje.
- Recomendar a los estudiantes que realicen más análisis, más simulaciones, más uso del programa Matlab – Simulink, ya que sirve de mucha ayuda para realizar este tipo de proyectos.

### 6.3 ANEXOS

Se muestra el modelo realizado en Matlab - Simulink.

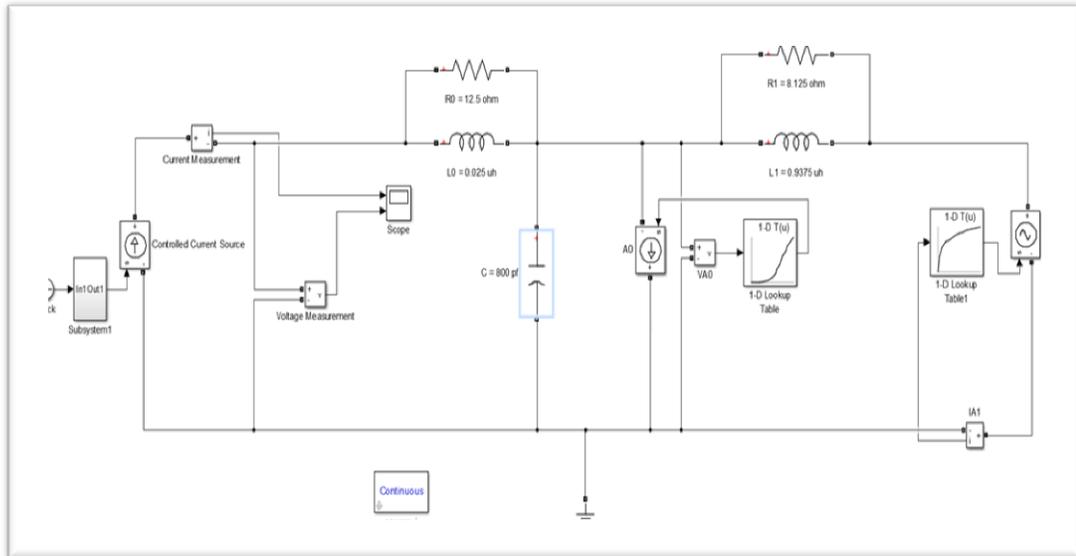


ILUSTRACIÓN 52: El circuito equivalente eléctrico del pararrayos

Los autores

La gráfica indica la respuesta del voltaje residual al impulso de corriente de 10KA en un tiempo de  $8/20 \mu s$ .

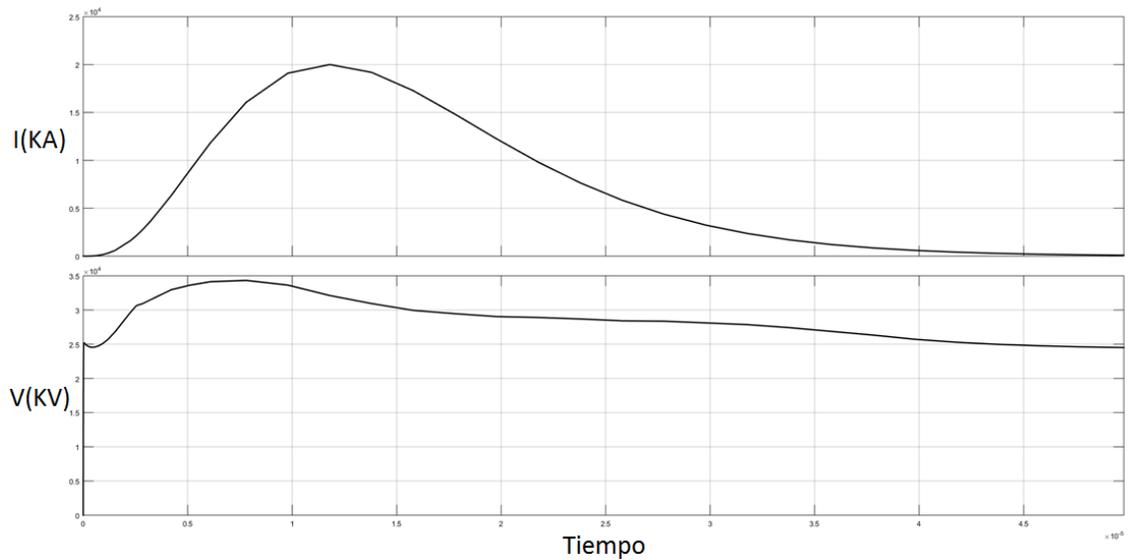


ILUSTRACIÓN 54: Voltaje residual al impulso de corriente de 10KA de  $8/20 \mu s$

Los autores

En la simulación se obtuvieron los valores de voltaje residual o voltaje de descarga que concuerda con el valor de corriente nominal de 10 kA, y se logró el valor de voltaje de aproximadamente 31.6 KV, las pruebas que se realizan a los descargadores de sobretensión en los laboratorios bien equipados, permiten generar impulsos de corrientes muy altos y de esta manera obtener el nivel de protección para impulsos tipo rayo en los descargadores de sobretensión, así como se muestra en la siguiente figura:

En la tabla 4 de las características eléctricas del descargador que se analizó de 10 kV nominales con MCOV (tensión de sobretensión continua) número de catálogo 213709.

Rated Voltage kV	MCOV kV	Unit Catalog Number	0.5 $\mu$ sec 10kA Maximum IR-kV <sup>(1)</sup>	500 A Switching Surge Maximum IR- kV <sup>(2)</sup>	8/20 Maximum Discharge Voltage - kV					
					1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA
3	2.55	213703	10.7	7.3	8.0	8.6	9.1	9.9	11.2	13.3
6	5.1	213705	21.5	14.7	16.0	17.1	18.2	19.8	22.5	26.5
9	7.65	213708	31.4	21.5	22.5	25.1	26.6	28.0	32.0	38.8
10	8.4	213709	34.3	23.4	25.6	27.4	29.0	31.6	35.9	42.3
12	10.2	213710	40.8	27.8	30.4	32.6	34.5	37.6	42.7	50.3
15	12.7	213713	51.8	35.4	38.7	41.4	43.8	47.8	54.3	64.0
18	15.3	213715	61.1	41.7	45.6	48.8	51.7	56.4	64.1	75.5
21	17.0	213717	68.8	47.0	51.4	55.0	58.2	63.5	72.1	85.0
24	19.5	213720	82.6	56.4	61.6	66.0	69.9	76.2	86.6	102.0
27	22.0	213722	92.7	63.3	69.2	74.0	78.4	85.5	97.1	114.5
30	24.4	213724	101.9	69.6	76.0	81.4	86.2	94.0	106.8	125.9
36	29.0	213729	122.4	83.5	91.3	97.8	103.5	112.9	128.3	151.2

TABLA 4: Tabla de las características físicas del pararrayos  
(Incorporated, July, 2010)

Después de realizar el estudio, lo importante es demostrar cómo se debe obtener en Matlab los datos experimentales y poder comparar los resultados. Los problemas encontrados fueron:

- No se pudo generar el impulso de corriente de 10 kA.
- Hubo dificultad en medir la corriente que pasa a través del descargador, debido a que el laboratorio no está equipado para poder realizar este tipo de pruebas; pero si está en capacidad de poder generar impulso de voltaje tipo rayo de tiempos de frente de onda de 1,2  $\mu$ s y de cola de onda de 50  $\mu$ s esta onda estandarizada, es utilizado para simular la sobretensión tipo rayo en aisladores, en elementos de protección y también para descargadores de sobretensión. Además se puede medir el voltaje cuando se produce la descarga del impulso con y sin elementos de protección.



La línea azul de la parte superior del diagrama es la supresión del descargador que se obtiene de los datos experimentales en el laboratorio y la curva azul de la parte inferior del diagrama es la supresión del descargador obtenida de la simulación.

Como se puede visualizar sin calcular el porcentaje de error, las curvas de la supresión son diferentes.

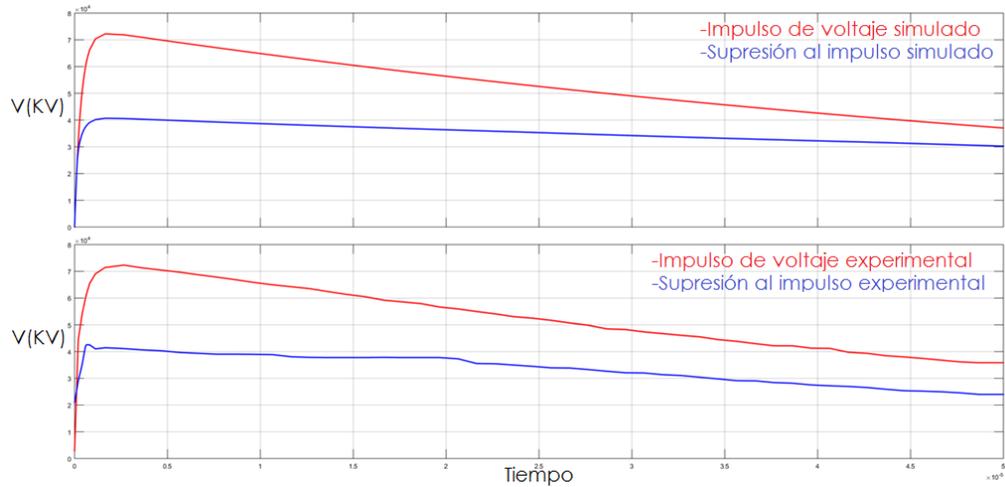


ILUSTRACIÓN 49: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s 72,32 kV

Los autores

Luego se realizó una simulación escogiendo un bloque de la librería de Matlab - Simulink llamado “surge arrester”, este bloque necesita valores iniciales como son los de voltajes y corrientes de referencia, valores de alpha y k, éstos valores son necesarios para formar una curva no lineal completa, este bloque lo hace en tres segmentos formando así la curva completa.

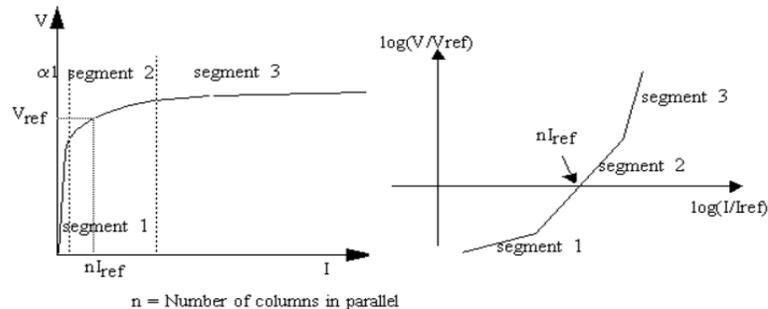
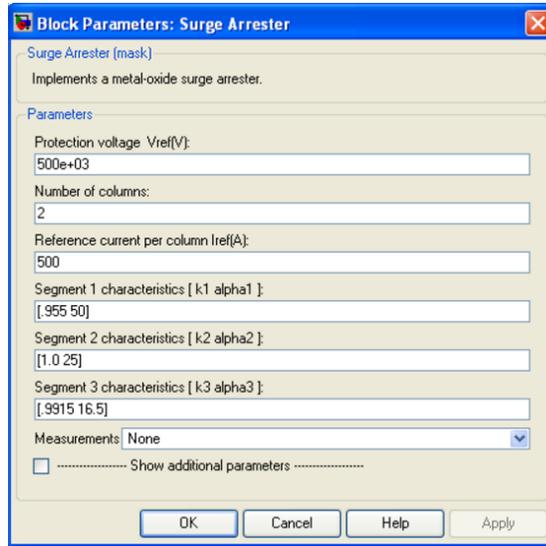


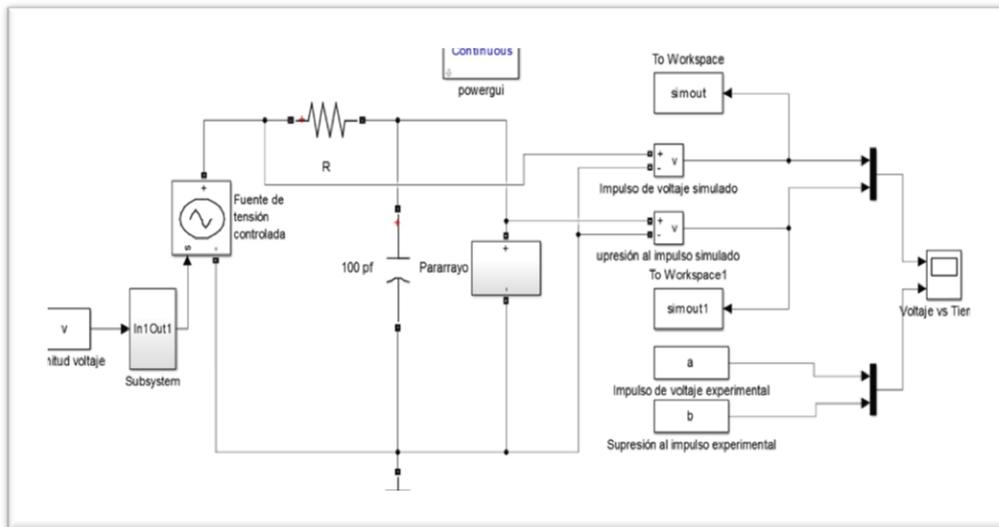
ILUSTRACIÓN 55: Curva característica de un descargador de sobretensión del bloque surge arrester

Los autores



**ILUSTRACIÓN 56: Valores solicitados por el bloque**  
Los autores

A continuación el modelo con el bloque surge arrester de Matlab Simulink.



**ILUSTRACIÓN 34: Impulso de voltaje 1,2/50  $\mu$ s**

Los autores

La supresión del modelo a un impulso de tensión tipo rayo de 72.32KV, como se explicó anteriormente la curva roja es la obtenida experimentalmente en el laboratorio y la

morada es la obtenida por la simulación, entonces de igual manera visualmente no se tiene una simulación con una respuesta aproximada a la experimental.

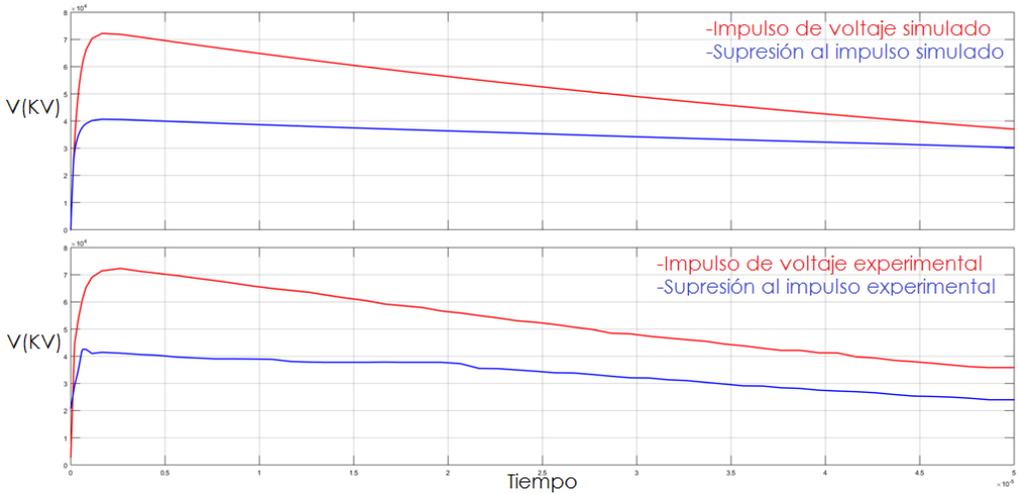


ILUSTRACIÓN 49: Comparación del impulso de voltaje 1,2/50  $\mu s$  72,32 kV

Los autores

## Tablas de errores

<b>Tabla de errores con 32.32 kV</b>				
<b>Datos teóricos</b>		<b>Datos experimentales</b>		<b>Error</b>
1,20E-06	30080	1,20E-06	30252,232	0,5693201
1,40E-06	30400	1,44E-06	30573,002	0,5658646
2,40E-06	31680	2,44E-06	30630,277	-3,427077
3,40E-06	32000	3,44E-06	30318,74	-5,545282
4,40E-06	31680	4,44E-06	29989,456	-5,637129
5,40E-06	31040	5,44E-06	29663,464	-4,64051
6,40E-06	30400	6,44E-06	29341,937	-3,605974
7,40E-06	30720	7,44E-06	29024,886	-5,84021
8,40E-06	30400	8,44E-06	28704,876	-5,905352
9,40E-06	29440	9,44E-06	28366,409	-3,784726
1,04E-05	29120	1,04E-05	28034,132	-3,873377
1,14E-05	28800	1,14E-05	27705,835	-3,949221
1,24E-05	28480	1,24E-05	27382,386	-4,008466
1,34E-05	28160	1,34E-05	27061,906	-4,05771
1,44E-05	27840	1,44E-05	26731,403	-4,147169
1,54E-05	26880	1,54E-05	26407,482	-1,789333
1,64E-05	26560	1,64E-05	26086,237	-1,81614
1,74E-05	26240	1,74E-05	25770,641	-1,821294
1,84E-05	25920	1,84E-05	25458,73	-1,811832
1,94E-05	25920	1,94E-05	25165,783	-2,996994
2,04E-05	25280	2,04E-05	24871,984	-1,640463
2,14E-05	24960	2,14E-05	24570,526	-1,585127
2,24E-05	24640	2,24E-05	24261,172	-1,561459
2,34E-05	24320	2,34E-05	23929,745	-1,630838
2,44E-05	23680	2,44E-05	23606,714	-0,310445
2,54E-05	23360	2,54E-05	23287,615	-0,31083
2,64E-05	23040	2,64E-05	22972,885	-0,292148
2,74E-05	23040	2,74E-05	22659,354	-1,679862
2,84E-05	22720	2,84E-05	22350,839	-1,651666
2,94E-05	22080	2,94E-05	22045,854	-0,154886
3,04E-05	21760	3,04E-05	21745,369	-0,067284
3,14E-05	21440	3,14E-05	21448,355	0,0389552
3,24E-05	21120	3,24E-05	21156,015	0,1702343
3,34E-05	20800	3,34E-05	20865,18	0,3123852
3,44E-05	20480	3,44E-05	20574,534	0,4594698
3,54E-05	20160	3,54E-05	20288,335	0,632555
3,64E-05	19840	3,64E-05	20006,246	0,8309725
3,74E-05	19200	3,74E-05	19727,432	2,6735985
3,84E-05	19200	3,84E-05	19452,768	1,2993921
3,94E-05	18560	3,94E-05	19181,624	3,2407268

4,04E-05	18560	4,04E-05	18914,558	1,8745222
4,14E-05	18240	4,14E-05	18650,925	2,2032409
4,24E-05	17920	4,24E-05	18391,239	2,5623012
4,34E-05	17920	4,34E-05	18134,91	1,1850603
4,44E-05	17600	4,44E-05	17882,392	1,5791633
4,54E-05	17280	4,54E-05	17633,138	2,0026949
4,64E-05	16960	4,64E-05	17387,586	2,4591469
4,74E-05	16640	4,74E-05	17145,238	2,946814
4,84E-05	16640	4,84E-05	16906,474	1,5761628
% Error			Total	-1,02776

**TABLA 9:** Tabla de errores con 32.32 kV  
Los autores

<b>Tabla de errores con 45.12 kV</b>				
<b>Datos teóricos</b>		<b>Datos experimentales</b>		<b>Error</b>
1,40E-06	38400	1,46E-06	36490,6735	-5,2323684
2,00E-06	38720	1,99E-06	36605,6095	-5,776138
2,80E-06	37120	2,84E-06	36421,9439	-1,916581
3,60E-06	37120	3,69E-06	36176,3891	-2,60836132
4,40E-06	37120	4,54E-06	35927,584	-3,31894277
5,40E-06	36480	5,39E-06	35681,2848	-2,23847085
6,20E-06	37600	6,24E-06	35422,9112	-6,14599071
7,00E-06	36160	7,09E-06	35159,9896	-2,84417158
8,00E-06	36160	7,94E-06	34900,1557	-3,60985285
8,80E-06	35840	8,79E-06	34643,4063	-3,45403021
9,60E-06	36160	9,64E-06	34389,7037	-5,14775088
1,04E-05	35840	1,05E-05	34139,0119	-4,98253458
1,12E-05	35840	1,13E-05	33891,2952	-5,74986832
1,22E-05	34880	1,22E-05	33646,5181	-3,66600158
1,30E-05	34880	1,30E-05	33404,6459	-4,41661346
1,38E-05	34880	1,39E-05	33165,6441	-5,1690717
1,46E-05	34240	1,47E-05	32929,4785	-3,97978198
1,56E-05	33920	1,56E-05	32696,1157	-3,74321021
1,64E-05	33600	1,65E-05	32465,5222	-3,49440812
1,72E-05	33280	1,73E-05	32237,6652	-3,23328263
1,82E-05	32640	1,82E-05	32012,5122	-1,96013285
1,90E-05	32000	1,90E-05	31790,0312	-0,66048615
1,98E-05	31360	1,99E-05	31566,3795	0,65379533
2,06E-05	31360	2,07E-05	31313,5829	-0,14823315
2,16E-05	30720	2,16E-05	31065,2324	1,11131445
2,24E-05	30080	2,24E-05	30819,0178	2,39792786

2,32E-05	30080	2,33E-05	30576,2867	1,62310963
2,40E-05	29440	2,41E-05	30336,0737	2,95382236
2,50E-05	29120	2,50E-05	30098,9425	3,25241491
2,58E-05	28800	2,58E-05	29864,4784	3,56436289
2,66E-05	28480	2,67E-05	29632,8902	3,8905763
2,74E-05	28160	2,75E-05	29403,9909	4,23068727
2,84E-05	27840	2,84E-05	29177,8458	4,58514252
2,92E-05	27520	2,92E-05	28954,3604	4,9538667
3,00E-05	27200	3,01E-05	28724,0366	5,30578828
3,10E-05	26560	3,09E-05	28470,4133	6,71017054
3,18E-05	26240	3,18E-05	28221,612	7,02161167
3,26E-05	25920	3,26E-05	27974,6833	7,34479567
3,34E-05	25600	3,35E-05	27731,3446	7,68568792
3,42E-05	25280	3,43E-05	27490,3974	8,04061639
3,52E-05	24960	3,52E-05	27252,7653	8,41296401
3,60E-05	24640	3,60E-05	27011,6527	8,78010971
3,68E-05	24320	3,69E-05	26759,5543	9,11657294
3,76E-05	24000	3,77E-05	26511,4202	9,47297502
3,86E-05	23680	3,86E-05	26265,9698	9,8453239
3,94E-05	23680	3,94E-05	26023,5625	9,00554075
4,02E-05	23040	4,03E-05	25783,924	10,6419953
4,10E-05	22720	4,11E-05	25547,2352	11,0666975
4,20E-05	22400	4,20E-05	25320,8209	11,5352537
4,28E-05	22080	4,28E-05	25111,4629	12,0720282
4,36E-05	22080	4,37E-05	24894,3072	11,3050232
4,44E-05	21760	4,45E-05	24664,6729	11,7766527
4,54E-05	21120	4,54E-05	24438,1975	13,5779141
4,62E-05	20800	4,62E-05	24172,4848	13,9517507
4,70E-05	20480	4,71E-05	23904,4563	14,3255979
4,80E-05	20160	4,79E-05	23632,9577	14,6954003
4,88E-05	20160	4,88E-05	23371,6221	13,7415454
4,90E-05	20160	4,96E-05	23107,4666	12,7554728
		% Error	total	3,41221078

**TABLA 10:** Tabla de errores con 45.12 kV  
Los autores

<b>Tabla de errores con 55.04 kV</b>				
<b>Datos teóricos</b>		<b>Datos experimentales</b>		<b>Error</b>
4,00E-07	30080	4,22E-07	32704,2158	8,02409039
6,00E-07	36480	5,82E-07	35159,6553	-3,75528344
1,20E-06	39360	1,17E-06	38338,8536	-2,66347667
1,80E-06	38720	1,77E-06	38782,3921	0,16087747
2,80E-06	39040	2,77E-06	38624,9126	-1,07466246
3,80E-06	38720	3,77E-06	38344,872	-0,97830037
4,80E-06	38080	4,77E-06	38061,3195	-0,04908009
5,80E-06	38400	5,77E-06	37781,3803	-1,63736667
6,80E-06	38400	6,77E-06	37505,3234	-2,3854655
7,80E-06	37760	7,77E-06	37233,118	-1,4150897
8,80E-06	37120	8,77E-06	36964,7105	-0,42010196
9,80E-06	37120	9,77E-06	36700,0475	-1,14428319
1,08E-05	37120	1,08E-05	36439,0762	-1,86866378
1,18E-05	37120	1,18E-05	36181,7445	-2,59317371
1,28E-05	37120	1,28E-05	35928,0013	-3,31774279
1,38E-05	36800	1,38E-05	35677,7962	-3,14538429
1,48E-05	36160	1,48E-05	35412,4329	-2,11102996
1,58E-05	36160	1,58E-05	35141,8608	-2,89722622
1,68E-05	35840	1,68E-05	34875,0202	-2,7669657
1,78E-05	35520	1,78E-05	34611,8979	-2,62367043
1,88E-05	35200	1,88E-05	34352,4414	-2,46724424
1,98E-05	34560	1,98E-05	34096,5996	-1,35908099
2,08E-05	33920	2,08E-05	33844,3222	-0,22360562
2,18E-05	33600	2,18E-05	33595,5595	-0,01321753
2,28E-05	32960	2,28E-05	33350,2625	1,17019331
2,38E-05	32320	2,38E-05	33108,383	2,38121881
2,48E-05	32320	2,48E-05	32869,8734	1,67287956
2,58E-05	31680	2,58E-05	32634,6866	2,925374
2,68E-05	31080	2,68E-05	32402,7765	4,08229365
2,78E-05	30720	2,78E-05	32174,0973	4,5194657
2,88E-05	30400	2,88E-05	31948,604	4,84717277
2,98E-05	30080	2,98E-05	31726,2523	5,18892781
3,08E-05	29440	3,08E-05	31489,1648	6,50752343
3,18E-05	29120	3,18E-05	31229,9362	6,75613365
3,28E-05	28480	3,28E-05	30973,9383	8,0517313
3,38E-05	28160	3,38E-05	30722,4184	8,34054917
3,48E-05	27520	3,48E-05	30473,7202	9,69268009
3,58E-05	27200	3,58E-05	30228,9933	10,0201594
3,68E-05	26880	3,68E-05	29987,3006	10,3620552

3,78E-05	26240	3,78E-05	29749,2532	11,7961053
3,88E-05	26240	3,88E-05	29514,3163	11,0939935
3,98E-05	25600	3,98E-05	29282,8051	12,5766815
4,08E-05	25600	4,08E-05	29054,4063	11,8894403
4,18E-05	24640	4,18E-05	28829,2732	14,5313175
4,28E-05	24640	4,28E-05	28566,9218	13,7463945
4,38E-05	24000	4,38E-05	28305,8019	15,2117292
4,48E-05	23680	4,48E-05	28044,3867	15,5624251
4,58E-05	23360	4,58E-05	27788,903	15,9376676
4,68E-05	23040	4,68E-05	27535,7069	16,3268257
4,78E-05	22720	4,78E-05	27287,2413	16,7376441
4,88E-05	22400	4,88E-05	27035,6812	17,1465302
		% Error	TOTAL	4,4382346

**TABLA 11:** Tabla de errores con 55.04 kV  
Los autores

<b>Tabla de errores con 60.48 kV</b>				
<b>Datos teóricos</b>		<b>Datos experimentales</b>		<b>Error</b>
2,00E-06	39040	2,12E-06	39461,9055	1,06914629
3,00E-06	38720	3,12E-06	39230,2591	1,30067746
4,00E-06	38080	4,12E-06	38953,3232	2,24197351
5,00E-06	38080	5,12E-06	38678,5319	1,54745255
6,00E-06	38080	6,12E-06	38407,3765	0,85237914
7,00E-06	37440	7,12E-06	38139,9956	1,8353322
8,00E-06	37440	8,12E-06	37876,3417	1,15201646
9,00E-06	37440	9,12E-06	37616,3633	0,46884722
1,00E-05	36800	1,01E-05	37360,0091	1,49895323
1,10E-05	36160	1,11E-05	37107,2285	2,5526791
1,20E-05	36160	1,21E-05	36857,9716	1,89367882
1,30E-05	35520	1,31E-05	36612,1893	2,98313021
1,40E-05	35840	1,41E-05	36369,833	1,4567925
1,50E-05	35840	1,51E-05	36130,8549	0,80500434
1,60E-05	35520	1,61E-05	35895,208	1,0452871
1,70E-05	34880	1,71E-05	35662,8456	2,19512938
1,80E-05	34880	1,81E-05	35414,1953	1,50842135
1,90E-05	34560	1,91E-05	35160,9523	1,70914679
2,00E-05	33920	2,01E-05	34911,2002	2,83920394
2,10E-05	33600	2,11E-05	34664,9282	3,07206245
2,20E-05	33280	2,21E-05	34422,0873	3,31789102
2,30E-05	32640	2,31E-05	34182,6297	4,51290525

2,40E-05	32000	2,41E-05	33946,5081	5,73404524
2,50E-05	31680	2,51E-05	33713,6762	6,0321995
2,60E-05	31360	2,61E-05	33484,0881	6,34357452
2,70E-05	31040	2,71E-05	33257,6986	6,66822615
2,80E-05	30080	2,81E-05	33034,4631	8,94357829
2,90E-05	30080	2,91E-05	32814,3377	8,33275291
3,00E-05	29440	3,01E-05	32597,2791	9,6857135
3,10E-05	29120	3,11E-05	32383,2445	10,0769535
3,20E-05	28480	3,21E-05	32172,1918	11,4763453
3,30E-05	28160	3,31E-05	31964,0795	11,9011077
3,40E-05	27520	3,41E-05	31758,8666	13,3470337
3,50E-05	26880	3,51E-05	31547,6269	14,795493
3,60E-05	26560	3,61E-05	31304,0889	15,1548538
3,70E-05	26240	3,71E-05	31065,1023	15,5322273
3,80E-05	25920	3,81E-05	30828,5374	15,9220572
3,90E-05	25600	3,91E-05	30596,0136	16,3289691
4,00E-05	24960	4,01E-05	30366,1406	17,8031862
4,10E-05	24640	4,11E-05	30139,9323	18,2479917
4,20E-05	24000	4,21E-05	29916,5131	19,7767469
4,30E-05	23680	4,31E-05	29696,4908	20,2599386
4,40E-05	23680	4,41E-05	29479,3109	19,6724778
4,50E-05	23360	4,51E-05	29265,3316	20,178591
4,60E-05	22720	4,61E-05	29054,1963	21,801313
4,70E-05	22400	4,71E-05	28846,11	22,3465486
4,80E-05	22080	4,81E-05	28604,1634	22,8084398
4,90E-05	21760	4,91E-05	28357,7007	23,2659932
		% Error	total	8,83946808

**TABLA 12:** Tabla de errores con 60.48 kV  
Los autores

<b>Tabla de errores con 72.32 kV</b>				
<b>Datos teóricos</b>		<b>Datos experimentales</b>		<b>Error</b>
2,00E-07	29120	1,96E-07	28147,1898	-3,45615397
1,00E-06	41600	1,02E-06	39470,3036	-5,39569285
1,40E-06	40960	1,56E-06	40158,4081	-1,9960748
2,40E-06	41280	2,44E-06	40141,2021	-2,83697997
3,20E-06	40640	3,32E-06	39929,0919	-1,7804265
4,20E-06	40640	4,20E-06	39702,6458	-2,36093647
5,00E-06	40000	5,08E-06	39477,8978	-1,32251764
6,80E-06	39360	6,84E-06	39036,3874	-0,82900253
7,60E-06	39040	7,72E-06	38819,6775	-0,56755374
8,60E-06	39040	8,60E-06	38605,6234	-1,12516409
9,40E-06	39360	9,47E-06	38394,1924	-2,51550442
1,04E-05	39040	1,04E-05	38185,3521	-2,23815647
1,12E-05	38720	1,12E-05	37979,0704	-1,95088924
1,20E-05	37760	1,21E-05	37775,3157	0,04054425
1,30E-05	37760	1,30E-05	37574,0567	-0,49487143
1,40E-05	37440	1,39E-05	37375,2625	-0,17320954
1,48E-05	37760	1,48E-05	37178,9024	-1,56297677
1,56E-05	37760	1,56E-05	36984,9462	-2,09559258
1,64E-05	37440	1,65E-05	36793,364	-1,75747989
1,74E-05	37760	1,74E-05	36604,1262	-3,157769
1,82E-05	37760	1,83E-05	36417,2036	-3,68725836
1,92E-05	37760	1,92E-05	36232,5672	-4,21563511
2,00E-05	37760	2,00E-05	36050,7687	-4,74117846
2,08E-05	36800	2,09E-05	35870,4751	-2,59133707
2,18E-05	35520	2,18E-05	35692,5764	0,48350784
2,26E-05	35520	2,27E-05	35505,8189	-0,03994011
2,36E-05	34880	2,36E-05	35308,6753	1,21407939
2,44E-05	34560	2,44E-05	35113,8773	1,57737435
2,52E-05	34240	2,53E-05	34921,4698	1,95143517
2,62E-05	33920	2,62E-05	34731,4225	2,33627774
2,70E-05	33600	2,71E-05	34543,7063	2,73191967
2,80E-05	32960	2,79E-05	34358,2927	4,06973857
2,88E-05	32640	2,88E-05	34175,1534	4,49201611
2,96E-05	32000	2,97E-05	33994,2605	5,86646246
3,06E-05	32000	3,06E-05	33815,5865	5,36908192
3,14E-05	31680	3,15E-05	33639,1042	5,82388936
3,22E-05	31360	3,23E-05	33464,7866	6,28955646
3,32E-05	30720	3,32E-05	33292,6073	7,72726294
3,40E-05	30080	3,41E-05	33122,54	9,18570846
3,50E-05	29760	3,50E-05	32954,5587	9,69382937

3,58E-05	29120	3,59E-05	32788,6379	11,1887475
3,66E-05	29120	3,67E-05	32624,7524	10,7426175
3,76E-05	28480	3,76E-05	32462,8771	12,2690206
3,84E-05	27840	3,85E-05	32302,9874	13,8160206
3,92E-05	27840	3,94E-05	32145,0589	13,3925993
4,02E-05	27520	4,03E-05	31989,0677	13,9706094
4,10E-05	27200	4,11E-05	31834,9899	14,5594199
4,20E-05	26880	4,20E-05	31682,802	15,159019
4,28E-05	26560	4,29E-05	31516,1114	15,7256437
4,38E-05	25920	4,38E-05	31330,0858	17,2680209
4,46E-05	25280	4,47E-05	31145,8769	18,8335584
4,54E-05	25280	4,55E-05	30965,0842	18,3596601
4,64E-05	24960	4,64E-05	30785,5283	18,9229442
4,72E-05	24640	4,73E-05	30609,0106	19,5008284
4,82E-05	24000	4,82E-05	30433,9455	21,1406882
		% Error	total	4,56017783

**TABLA 13:** Tabla de errores con 72.32 kV  
Los autores



**ILUSTRACIÓN 57:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 58:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 59:** Los autores



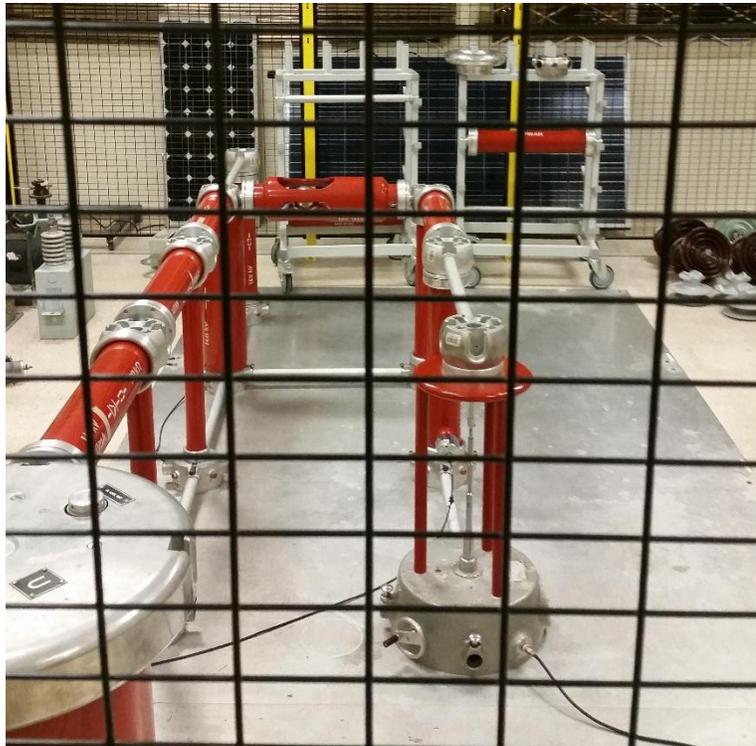
**ILUSTRACIÓN 60:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 61:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 62:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 63:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 64:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 65:** Los autores



**ILUSTRACIÓN 66:** Los autores

## 6.4 BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre Alonso, A. A. (2015). *Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil*. Guayaquil.
- ALMIRAL MESA, J. (2009). *Temas de Ingeniería eléctrica*. ed. Félix Varela. Págs, 19-43. La Habana, Cuba.: Félix Varela.
- Aodsup, K. &. (2012, March). *Numerical Modeling and Very-Fast Transient Simulation of MOV Surge Arresters*. In 2012 Asia-Pacific : Power and Energy Engineering Conference (pp. 1-4). IEEE.
- Cuenca Nicolalde, E. E. ((2013).). *Análisis y selección de modelos de descargadores para estudios de sobrevoltajes utilizando el programa Alternative Transients Program-ATP (Doctoral dissertation, QUITO/EPN/2013)*.
- D Durbak, D. W. (1985). *Zinc-oxide arrester model for fast surges*. *EMTP Newsletter*, 5(1).es.mathworks.com. (s.f.). *Herramienta de programación*. . EMTP Newsletter, vol. 5, no. 1.
- es.mathworks.com. (s.f.). *Herramienta de programación*.
- Espinosa, R. O. (2005). *Sistemas de distribución*. Noriega editores. Colombia.: Noriega Limusa.
- Espinoza. (2009). *Sistemas de distribución*.
- G., D. F. (2009). *Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 kV*. Colombia.
- García, D. F. ((2009). ). *Diseño y construcción de un generador de impulso de voltaje de 10 KV*. *Revista Tecnura*, 12(24), 4-13.
- Giannettoni, P. P. ((Apr 1999).). *A simplified model for zinc oxide surge arresters*. IEEE Transactions on Power Delivery.
- Gil Rodríguez, M. (14 June 2016.). *Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería*. España: Ediciones Díaz de Santos, 2015. ProQuest ebrary. Web. .
- Gil Rodríguez, Manuel. Introducción rápida a Matlab y Simulink para ciencia e ingeniería. España: Ediciones Díaz de Santos, 2015. ProQuest ebrary. Web. 14 June 2016. (s.f.)*.
- Hasse, P. (2002). *Surge Protective Devices (SPDs) for Power Supply Systems and for Information Technology Systems*. In. Habana, p. 43.

<https://www.cibernautica.com/rayosycentellas/index.htm>. (s.f.).

<http://asturiasverde.blogspot.com>. (2008\_11\_01\_).

[https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema\\_de\\_suministro\\_el%C3%A9ctrico](https://es.wikipedia.org/wiki/Sistema_de_suministro_el%C3%A9ctrico). (s.f.).

<https://www.lecmex.com>. (2005). *Un nuevo enfoque a las protecciones contra descargas eléctricas atmosféricas para líneas de transmisión y distribución*. In.

[https://www.schneiderelectric.es/html/.../docs/guia.../capitulo\\_03.pdf](https://www.schneiderelectric.es/html/.../docs/guia.../capitulo_03.pdf). (s.f.).

<https://www.zenithelectricidad.com>. (2002).

IEEE, T. o. (Jan 1992). "Modeling of metal oxide surge arresters". vol. 7, no. 1, pp. 302-309.

Incorporated, H. (July, 2010). *Distribution Class (PDV) and Riser Pole (PVR) Surge Arresters*. AIKEN, SC, USA.

Jones, R. A. ( (1992). ). *Modeling of metal-oxide surge arresters*. . IEEE Transactions on Power Delivery, 7(1), 302-309.

Kuffel, J. &. (2000). *High voltage engineering fundamentals*.

Leopoldo, H. (s.f.). *Descargas de Origen Atmosférico*. Argentina: Soibelzon.

Mockey, I. O. (2002). *Protección Contra las Descargas Atmosférica*. In. Santiago de Cuba, p. 51.

Morón, J. A. (2009). *Sistemas eléctricos de distribución*. Reverté.

Morón, J. A. (2009). *Sistemas eléctricos de potencia*. Reverté.

Naidu, M. S. ((2013). ). *High voltage engineering*. . Tata McGraw-Hill Education.

NC. (1987). *Protección contra las descargas eléctricas atmosféricas*. In. Cuba.

Ramírez, S. (2009). *Redes de Distribución de Energía*. Bobota.

Rojas, A. H. (2012). *Sistema de protecciones contra descargas atmosféricas en la línea eléctrica de la mina Yagrumaje*. . Cuba.

Torresini, A. A. (2000). *Sobretensiones, coordinacion de la aislacion*.

Velasco, J. A. (2013). *Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión*. España: McGraw-Hill España.

Woodworth, J. (Junio 2011). *ArresterWorks*.