



## Análisis matemático de la supresión de impulsos tipo atmosférico en sistemas de distribución

### Mathematical analysis of the suppression of atmospheric impulses in distribution systems

Josué Quimiz | [iD](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

Nathalie Guerra | [iD](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

Kléver Carrión | [iD](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

David Cárdenas | [iD](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

Carlos Chávez | [iD](#) Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador

#### HISTORIAL DEL ARTÍCULO

Recepción: 09/07/2021

Aceptación: 08/10/2021

#### PALABRAS CLAVE

Supresión de impulsos, óxido de zinc, pararrayos, varistor.

#### RESUMEN

Se realizó el estudio y análisis de la supresión de impulsos tipo atmosférico al pararrayo de un sistema de distribución eléctrica, basado en la comparación de resultados teóricos desarrollados con el software Matlab-Simulink y los experimentales realizados en el laboratorio de Alta Tensión de la Universidad Politécnica Salesiana del Ecuador, con el objeto de entender el comportamiento eléctrico y matemático de la protección al sistema de distribución. Se utilizó el circuito equivalente del modelo dependiente de la frecuencia de la IEEE «Modeling of metal oxide surge arresters». El análisis matemático consistió en construir las ecuaciones del circuito equivalente y utilizar la herramienta de Matlab que extrapole con la mejor aproximación el comportamiento de las resistencias no lineales del pararrayo, además, se modeló el circuito generador de impulso atmosférico definido en las normas ANSI/IEEE Standard 4-1995 requerido para la supresión.

#### ARTICLE HISTORY

Received: 09/07/2021

Accepted: 08/10/2021

#### KEY WORDS

Pulse suppression, zinc oxide, lightning rod, varistor.

#### ABSTRACT

The study and analysis of the suppression of atmospheric impulses to the lightning rod of an Electrical Distribution System was carried out, based on the comparison of theoretical results developed with the Matlab - Simulink software and the experimental ones carried out in the High Voltage laboratory of the Salesian Polytechnic University of Ecuador, in order to understand the electrical and mathematical behavior of the protection to the distribution system. The equivalent circuit of the IEEE frequency-dependent model «Modeling of metal oxide surge arresters» was used. The mathematical analysis consisted in constructing the equations of the equivalent circuit and using the Matlab tool that extrapolates with the best approximation the behavior of the nonlinear resistances of the beam, in addition, the atmospheric impulse generating circuit defined in the ANSI/IEEE Standard 4-1995 standards required for suppression was modeled.

## I. INTRODUCCIÓN

En la actualidad es más frecuente encontrarse 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 [1], por ello se desarrolló este proyecto enfocándose en los siguientes parámetros:

Se abordó 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 su energía a tierra. El pararrayos reduce a un nivel de voltaje adecuado generado por la corriente que fluye por la red para no dañar el equipo.

Se utilizó un modelo de circuito eléctrico para el análisis teórico matemático de respuesta a los transientes de voltaje que se generan mediante un circuito generador de impulso de voltaje y un modelo de circuito descargador de sobretensión.

Respuestas de señal que se analizan mediante la aplicación de Matlab-Simulink, de supresión de transiente, aplicado en media tensión, obteniéndose porcentaje de error al comparar los impulsos de voltaje simulado y experimental con las respectivas señales de supresión al impulso experimental y simulado, respectivamente en referencia al pararrayo real valvular de óxido de zinc.

## 2. MÉTODO

### DESCARGAS TIPO ATMOSFÉRICAS

Según [2], 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.

### PARARRAYOS

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 [3].

En la tabla 1 se resumen las principales características de los pararrayos de ZnO comparados con los de SiC (ver Tablas 1 y 2). En forma general, pueden resumirse a continuación las ventajas que estos dispositivos tienen con respecto a los del tipo auto valvular [4].

- Mejoran los márgenes de protección
- Mayor capacidad térmica
- Construcción más sencilla al no tener entrehierros

- Tamaño y peso reducido
- Mejor comportamiento en zonas contaminadas

La característica tensión-intensidad de la zona no lineal (ver Figura 1) para un varistor de resistencia variable viene expresada en general según la siguiente ecuación [5]:

$$I = \beta \cdot U^\alpha \quad (1)$$

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 [7]:

- Región 1: Predescarga, prerruptura o lineal
- Región 2: Región de descarga, ruptura o no lineal
- Región 3: Alta descarga o alta corriente (ver Figura 2)

### MODELO DEPENDIENTE DE LA FRECUENCIA IEEE [8].

Se muestra en la figura 3 el modelo de la frecuencia propuesto por la IEEE, compuesto por 2 resistencias no lineales A0 y A1 (ver Figura 3).

### RELACIÓN TENSIÓN-INTENSIDAD DEL MODELO [8]

En la tabla 3 se muestran los valores en kV de cada resistencia no lineal A0 y A1 [9]. Para este análisis se obtuvo por medio de cálculos los valores de las resistencias A0 y A1 en este tipo de pararrayos [10] (ver Tabla 3). Se realizó el impulso de tensión tipo rayo normalizado con un tiempo de subida hasta el valor de cresta de 1,2  $\mu$ s y un tiempo de cola de 50  $\mu$ s (forma de onda que se utilizó para crear el modelo de la descarga eléctrica) (ver Figura 4).

### TABLAS DEL PARARRAYOS PDV-100 OPTIMA [12]

El pararrayos de óxido de zinc que utilizamos es el PDV100-óptima de 10 kA para realizar las pruebas en el laboratorio y para ello necesitamos los valores del fabricante, que se muestran a continuación en la tabla 4 de las características eléctricas y tabla 5 de las características físicas (ver Tablas 4, 5).

**Tabla 1. Comparación entre los pararrayos de ZnO y SiC**

<b>Carburo de silicio</b>	<b>Óxido de zinc</b>
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 esta por tanto una variable muy importante en su diseño.

**Tabla 2. Tensiones nominales para las clases de pararrayos**

Distribución	1	3	6	9	10	12	15	18	21	25	27	30
Intermedios	3	6	9	1	1	2	2	3	3	3	4	6
Estación				2	5	1	4	0	6	9	8	0

**Tabla 3. Valores de las resistencias A0 y A1**

<b>Resistencia A0</b>			<b>Resistencia A1</b>		
<b>kA</b>	<b>V(pu)</b>	<b>V(kV)</b>	<b>kA</b>	<b>V(pu)</b>	<b>V(kV)</b>
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 4. Características físicas**

<b>Características físicas</b>			
<b>Trabajo pesado PDV 100-óptima</b>			
Voltaje nominal		kV	10
mCOV		kV	8,4
Número de catálogo de unidad		-	213709
Altura con soporte de base aislante		pulgadas	8,7
Distancia de fuga terminal a base		pulgadas	14,4
Limpieza de montaje	Línea central a línea central	pulgadas	6,2
	Línea central a tierra	pulgadas	4,2
Pesos netos aproximados	Unidad	Libra	2,8
	Unidad con soporte de base aislante	Libra	3,8
	Unidad con soporte de base aislante y soporte	Libra	6,3

**Tabla 5. Características eléctricas**

Trabajo pesado PDV100-óptima	Características eléctricas		
Voltaje nominal		kV	10
MCOV		kV	8,4
Número de catálogo de unidad		-	213709
0,5 μsec 10 kA máximo IR-kV <sup>(1)</sup>		-	34
500 A máximo de sobretensión de conmutación IR-kV <sup>(2)</sup>		-	24,4
8/20 descarga máxima de voltaje - kV	1,5	kA	25,4
	3	kA	27,1
	5	kA	28,8
	10	kA	31,6
	20	kA	35,6
	40	kA	42,3

**Tabla 6. Comparativo de 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

**Figura 1. Comparación de resistencias no lineales [6]**

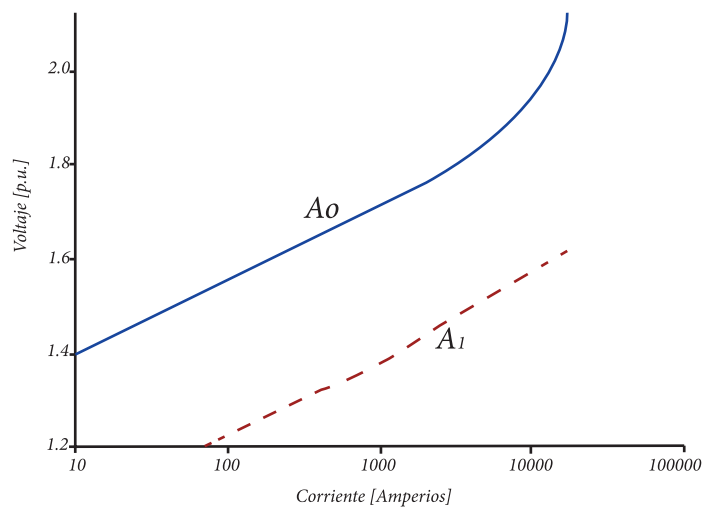


Figura 2. Característica tensión-intensidad de los pararrayos de ZnO y SiC

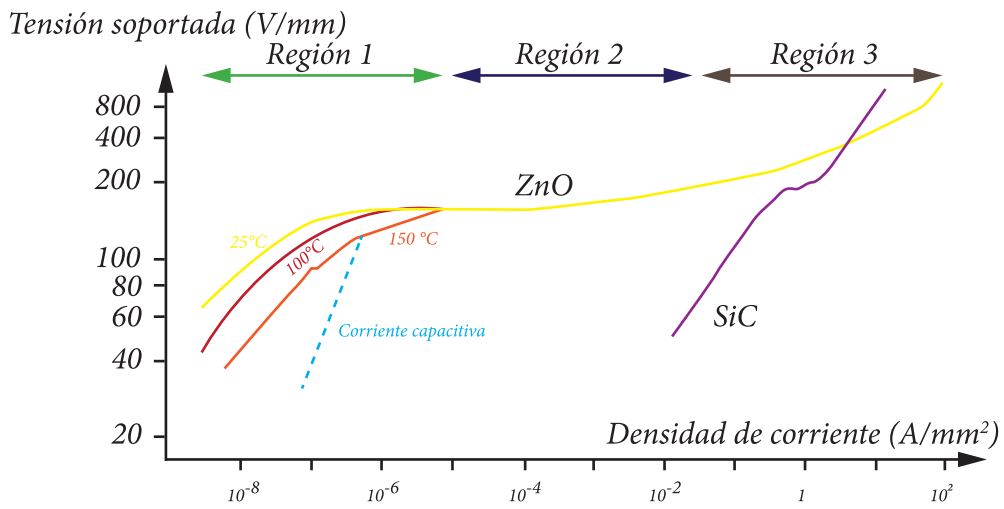


Figura 3. Modelo de la frecuencia [6]

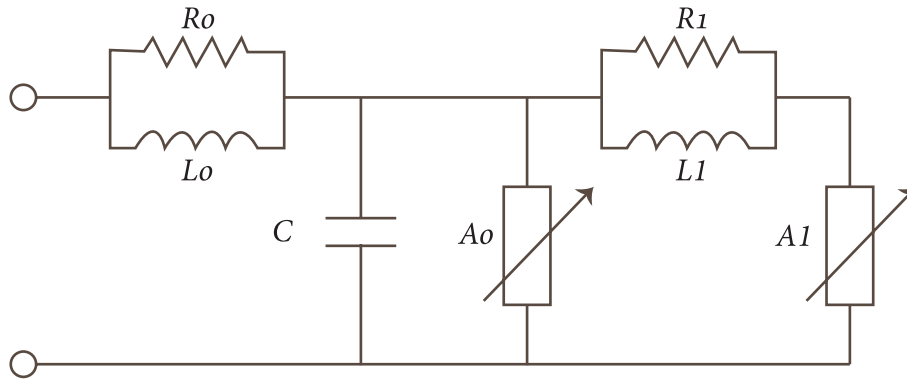


Figura 4. Onda normalizada de  $1.2 \times 50 \mu\text{seg}$  [11]

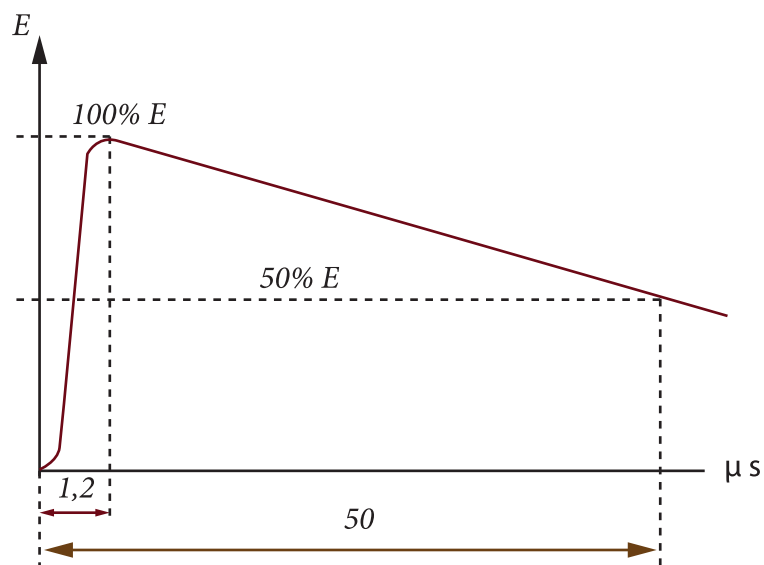


Figura 5. Circuito del impulso de voltaje tipo rayo

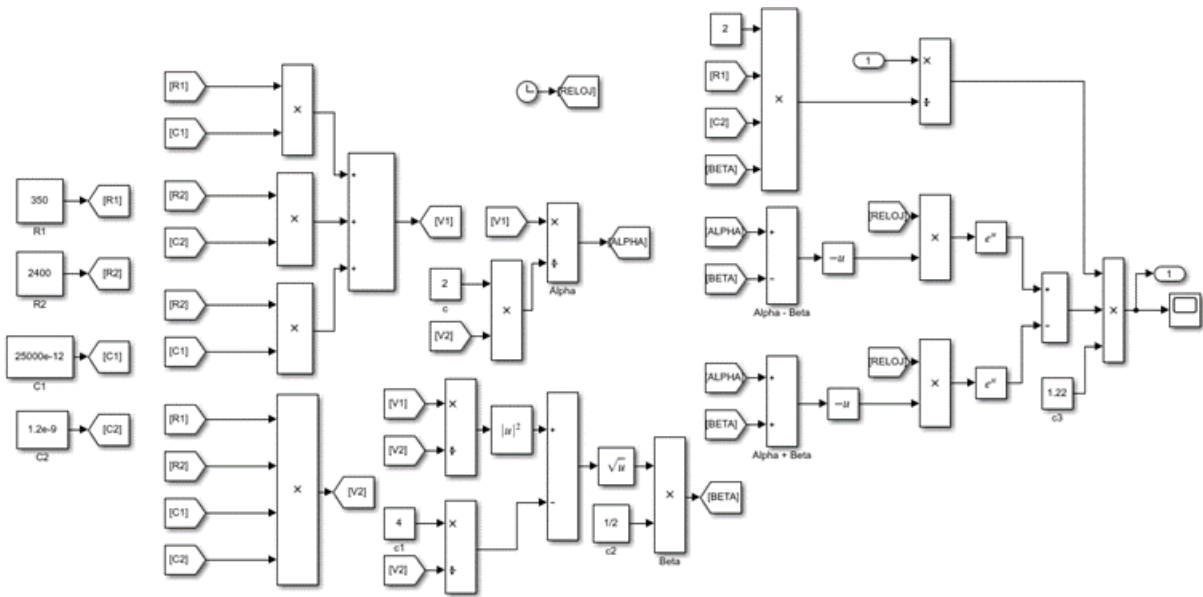


Figura 6. Impulso de voltaje tipo rayo

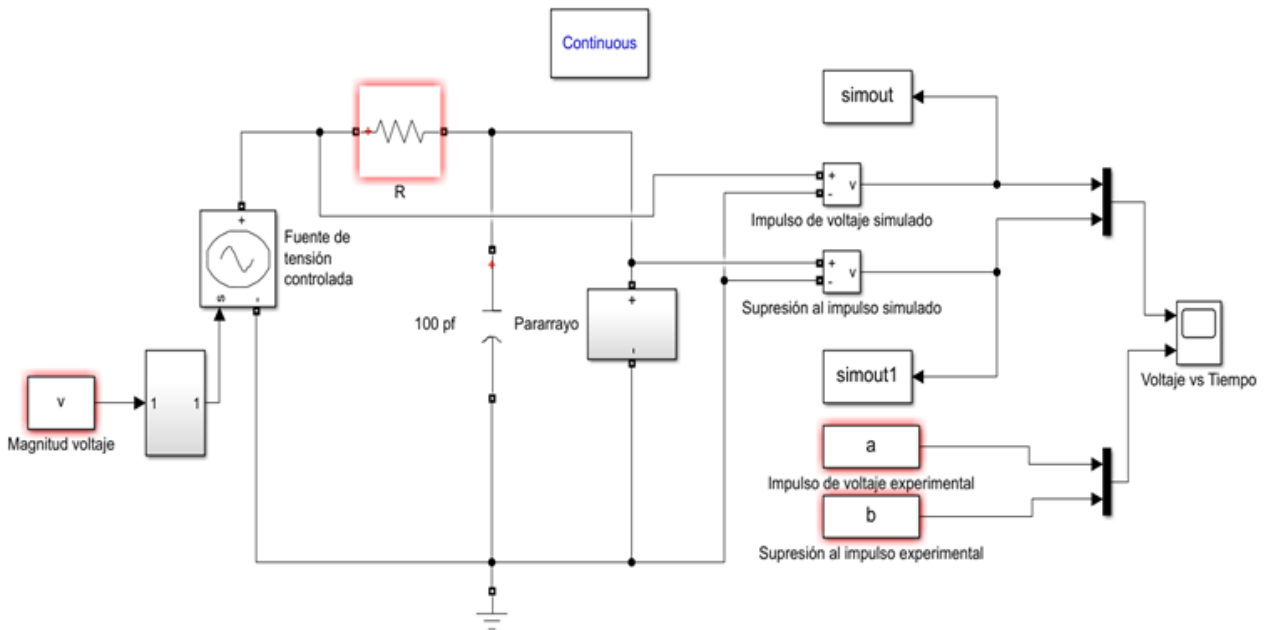


Figura 7. Circuito generador de impulso sin pararrayos

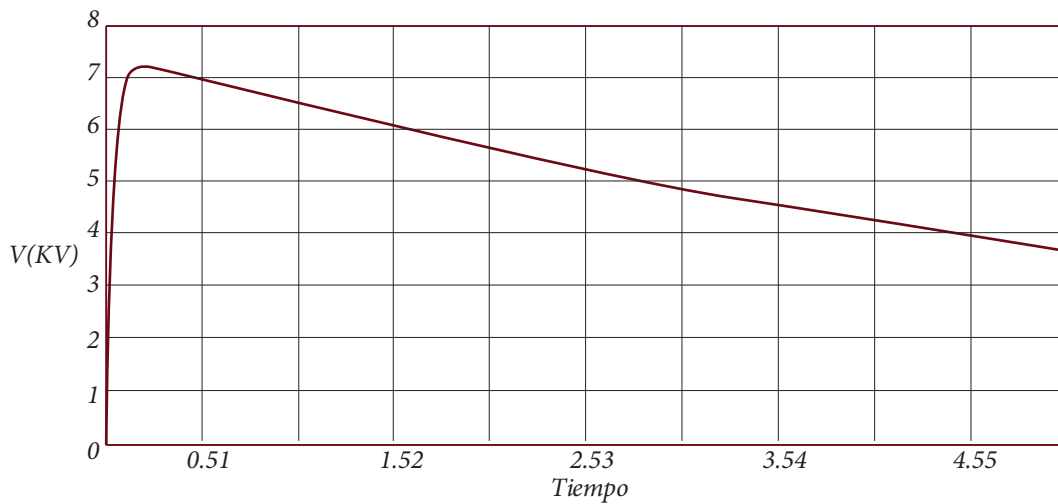
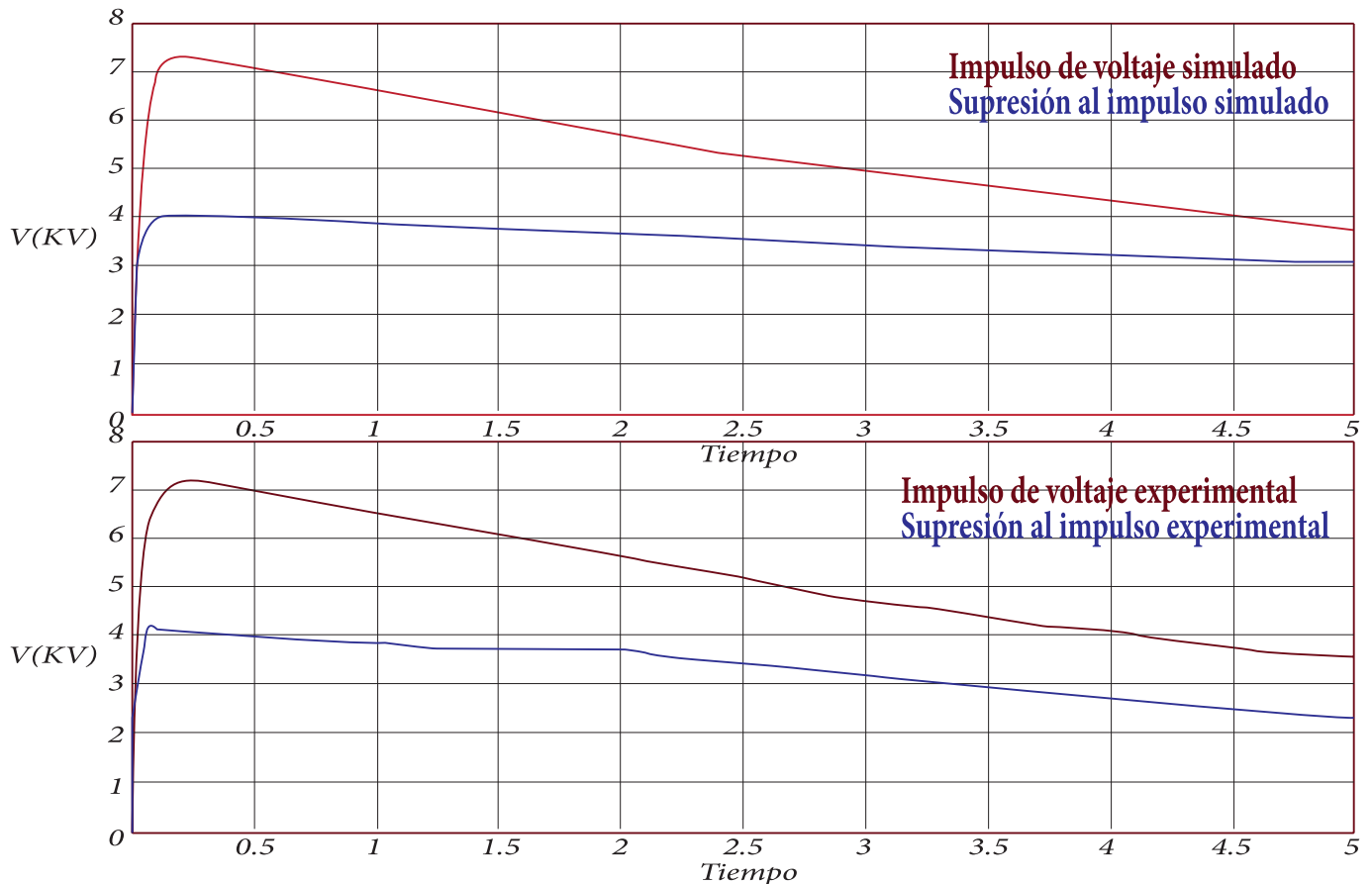


Figura 8. Supresión del impulso tipo rayo



### 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### SIMULACIÓN

Se realiza la solución del circuito propuesto en la figura 3, utilizando Kirchhoff y ley de Ohmm, obteniendo las respectivas ecuaciones algebraicas mediante Laplace, ecuaciones que servirán para la simulación en las aplicaciones de Matlab/Simulink.

Se realizó el circuito de impulso de voltaje tipo rayo 1,2/50  $\mu$ s 32 KV, mostramos diseño creado en Simulink que luego se creará en un subsistema, como se muestra en la figura 5 (ver Figura 5). También, una simulación de la supresión de impulsos de voltaje tipo atmosféricos (ver Figura 6).

En las figuras que se muestran a continuación, se puede observar el trabajo de atenuación de impulso que realiza el pararrayos.

La figura 7, muestra las señales obtenidas con la simulación del circuito generador de impulsos sin pararrayos (ver Figura 7).

La figura 8 muestra la señal obtenida con la simulación del circuito generador de impulsos con pararrayos, la supresión del impulso, tanto teórico como práctico (ver Figura 8).

### 4. CONCLUSIONES

Se alcanzó el objetivo de implementar 2 modelos de pararrayos en el programa Matlab-Simulink, con base en 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 de Mathworks.

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 esperado según la validación de la práctica 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 mm, se comparó en Matlab, con el 6% de error para el impulso de voltaje.

La tabla 6 muestra los valores obtenidos experimentalmente, los valores calculados mediante el circuito generador de impulsos de voltaje tipo rayo, estos valores

obtenidos corresponden a la parte experimental y simulada, utilizando el pararrayos y sin utilizar el pararrayos.

Con estas pruebas se pueden obtener la supresión de impulsos tipo atmosféricas de otros pararrayos, con sus respectivas tablas y cálculos correspondientes para realizar un estudio más profundo y en aplicaciones a futuro.

## REFERENCIAS

- [1] A. Aguirre, A. A., Diseño del manual de procedimientos de prácticas para el laboratorio de alta tensión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Guayaquil, 2015.
- [2] Q. Jiang, X. Li, B. Wang and H. Wang, PMU-based fault location using voltage measurements in large transmission networks. *IEEE transactions on power delivery*, 27(3), 1644-1652, 2012.
- [3] J. F. Lazo Cárdenas y N. A. Vélez Tenemaza, Estudio para la implementación de pararrayos en sistemas de distribución de media tensión (Bachelor's thesis), 2016.
- [4] J. P. Guacho Vizuete y E. J. Gutiérrez Navas, Estudio de factibilidad de un plan de contingencia ante una posible suspensión de energía eléctrica en la ciudad de baños frente a un desastre natural a nivel de 13.8 kv en la Empresa Eléctrica Ambato Regional Centro Norte SA (Bachelor's thesis, LATACUNGA/UTC), 2015.
- [5] L. Aguas Romero and R. Jiménez Chinchilla, Guía de trabajos independientes para sistemas eléctricos de potencia (Doctoral dissertation, Universidad de la Costa CUC), 2013.
- [6] T. o. P. D. IEEE, «Modeling of metal oxide surge arresters», vol. 7, no. 1, pp. 302-309, Jan 1992.
- [7] A. H. Rojas, Sistema de protecciones contra descargas atmosféricas en la línea eléctrica de la mina Yagrumaje. Cuba, 2012.
- [8] J. A. Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión. España: McGraw-Hill España, 2013.
- [9] M. S. Naidu and V. Kamaraju, High voltage engineering. Tata McGraw-Hill Education, 2013.
- [10] F. Fernández and R. Díaz, Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations, 2001
- [11] Coordinación de aislamiento. Parte 1: Definiciones, principios y reglas, Norma UNE-EN 60071-1
- [12] M. Nafar, G. B. Gharehpetian and T. Niknam, A novel parameter estimation method for metal oxide surge arrester models. *Sadhana*, 36(6), 941-961, 2011.