



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

***MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN  
USANDO LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE***

**Br. Marlin Haydeé Quintero Durán**

**Mérida, Junio, 2009**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

***MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN  
USANDO LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE***  
*Trabajo presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero Electricista*

Br. Marlin Haydeé Quintero Durán  
Tutor: Prof. Marisol Dávila

Mérida, Junio, 2009

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN USANDO  
LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE**

Br. Quintero Durán, Marlin Haydeé

Trabajo de Grado, presentado en cumplimiento parcial de los requisitos exigidos para optar al título de Ingeniero Electricista, aprobado en nombre de la Universidad de Los Andes por el siguiente Jurado.

---

Prof. Lelis N. Ballester  
C.I.13098939

---

Prof. Juan C. Muñoz  
C.I.13524436

---

Prof. Marisol Dávila  
C.I. 10107821

## DEDICATORIA

*A la Santísima Trinidad Bendita y a María Santísima* a quienes amo infinitamente, es en ellos a quienes confío todos los días de mi vida mis momentos de alegría y los no tanto también, a ellos pido su guía en este paso de existir...sin ellos nada es posible.

*A mi amada Madrecita* te amo más que a mi vida. Mujer de mucho sacrificio y de gran abnegación por todos tus hijos, he aquí tu fruto y lo que yo haga luego no alcanzará para tu recompensa mamita.

*A mi amada hermanita* hija digna de tu madrecita, noble de corazón y luchadora. Siempre pensando en el bienestar de tus seres queridos incluso antes de ti misma. Eres una gran mujer, por la cual me siento muy orgullosa.

*A mis amados hermanitos* también muy nobles de corazón. Para mi son un ejemplo de superación y perseverancia.

*A mis amados sobrinos* que los amo tanto como a los seres que aún no he traído al mundo. Pido al *Señor mi Dios*, los hagan grandes hombres de bien.

*A la memoria de mi abuelito* hombre de altos valores morales, siempre tan correcto. Dedicaste tu vida a formar grandes hombres y mujeres, que sin ningún estudio siempre nos diste sabios y oportunos consejos. No te dio tiempo, pero se que donde quiera que estés veras culminar este reto.

## AGRADECIMIENTOS

*A la Santísima Trinidad Bendita y a María Santísima* por colmarme de bendiciones todos los días, por darme los amaneceres de toda mi vida y hacerme sentir hija predilecta. Por asignarme una madre excepcional al lado de las personas que tengo como familia y por ser inmensamente selectos al obsequiarme la familia de amigos que tengo.

*A mi amada Madrecita* por aceptar darme la vida y más aún, por ese inmenso amor que me das todos los días, por vivir y respirar para todos tus hijos. Por tener siempre esa palabra de aliento cuando sentí caer, por darme todo tu apoyo incondicional y por confiar en mí. Sólo la gracia de *Dios* cubre el valor para pagarte.

*A mi amada hermanita* que siempre me diste de lo poco y de lo mucho, por tu protección y dedicación, que sentí tanto como la preocupación de mi madre.

*A mi adorada Prof. Marisol Dávila* que con su nobleza, sencillez y humildad hace gala de su investidura, sin hacer menos a su inteligencia. Una bendición tenemos quienes contamos con el privilegio de encontrarte en el camino. Gracias por la paciencia y dedicación brindada para transmitir el conocimiento.

*A mi querido Prof. Vitoria* por tu apoyo, y más aún por brindarme tu confianza que dio paso a nuestra amistad.

*A mi querida Prof. Zulima* por sus palabras y cariño. Que además de esa gran personalidad que te caracteriza tuve el privilegio de avistar el gran ser que hay en ti, sin hacer menos el orgullo que se siente el haber formado parte de tu salón clase.

*A mi querido Prof. Ernesto* por tu amistad, tu cariño y la preocupación por aportar ideas que facilitarían el desarrollo de este trabajo.

*A mi Prof. José Gregorio* por la confianza que me diste y los gratos momentos compartidos.

*A mi amiga Mariita* por tu amistad y apoyo incondicional durante el desarrollo de este trabajo. Por darte como un ser especial que llena de brillo el camino de las personas que compartimos contigo.

*A mis amigos Melissa (memi), Jania (brujis) y Javier S* por sus amistades incondicionales. Por el cariño que me brindan. Y sobre todo por soportarme.

*A mi amado Richard (mi brujito)* por el amor y la bonita familia que por mucho tiempo me acogieron. Aunque hoy no estés a mi lado, también tienes parte en esto.

*A la ilustre Universidad de los Andes* por albergar profesores de tan prestigioso nivel, que impartieron el conocimiento con entereza logrando contribuir en mi crecimiento académico.

**Marlin Haydeé Quintero Durán. Modelado del Descargador de Sobretensión usando la Transformada Numérica de Laplace.** Universidad de los Andes. Tutor: Prof Marisol Dávila. Junio 2009.

## RESUMEN

Las sobretensiones por descargas atmosféricas son uno de los principales motivos de fallas en un sistema de potencia, ya que estas originan un efecto transitorio que son perjudiciales en los equipos que componen una red eléctrica, por ello es indispensable la protección del sistema eléctrico contra sobretensiones transitorias. En la actualidad se cuenta con un dispositivo, el descargador de sobretensión, que permite proteger a los equipos eléctricos de esos fenómenos transitorios. Existen en el mercado dos clases principales de descargadores de sobretensión, estos son el de Silicón Carbono (SiC) y el de Metal-óxido (ZnO), quienes tienen el comportamiento de una resistencia no lineal, en la cual a medida que se incrementa el voltaje el valor de la resistencia disminuye. Debido a la importancia que este dispositivo representa en el sistema de potencia, es necesario realizar su modelado, para poder predecir su comportamiento ante los diferentes fenómenos transitorios, para ello se dispone de numerosos modelos circuitales y matemáticos establecidos por las normas internacionales de IEEE que permiten determinar con cierta precisión dicho comportamiento. Hasta ahora una de las herramientas computacionales más utilizada para el análisis de este dispositivo es el Programa para análisis de Transitorios Electromagnéticos (ATP/EMTP), aquí se plantea utilizar como herramienta matemática para realizar el análisis, la Transformada Numérica de Laplace (TNL), la cual ya ha sido probada para el modelado de otros dispositivos de la red, como son las líneas de transmisión y ha demostrado ser una poderosa herramienta en el análisis de fenómenos en el dominio de la frecuencia. Al aplicar la TNL en el modelado del descargador se consiguió con la dificultad de representar el elemento no lineal, lo cual se superó modelando la resistencia no lineal como un conjunto de segmentos lineales obteniéndose resultados aceptables al compararlos con aquellos obtenidos al aplicar el ATP/EMTP.

**Descriptor:** Descargador de Sobretensión, Metal-óxido (ZnO), Descarga Atmosférica, Transformada Numérica de Laplace, ATP/EMTP, ATPDraw.

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN .....	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS.....	iv
RESUMEN.....	v
INTRODUCCIÓN.....	1

<b>Capítulo</b>	<b>pp.</b>
<b>I. MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN .....</b>	<b>4</b>
1.1 ANTECEDENTES .....	4
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	6
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	6
1.4 OBJETIVOS.....	7
1.4.1 General .....	7
1.4.2 Específicos.....	7
1.5 MARCO METODOLÓGICO .....	7
<b>II. EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN .....</b>	<b>9</b>
2.1 EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN.....	9
2.1.1 Tipos de Descargadores.....	9
2.1.2 Ventajas de los Descargadores de Silicón-carbono (SiC) .....	16
2.1.3 Desventajas de los Descargadores de Silicón-carbono (SiC).....	16
2.1.4 Ventajas de los Descargadores de Metal-óxido (ZnO).....	17
2.1.5 Desventajas de los Descargadores de Metal-óxido (ZnO) .....	18
2.1.6 Parámetros de Selección de un Descargador de Sobretensión .....	18
2.2 MODELOS DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN.....	19
2.2.1 Modelo IEEE .....	20
2.2.2 Modelo Pinceti.....	22
<b>III. MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN USANDO</b>	
<b>ATP/EMTP .....</b>	<b>24</b>
3.1 MODELO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN.....	24
3.2 EL ELEMENTO VARISTOR METAL-ÓXIDO (MOV TIPO 92).....	25
3.2.1 Atributos del elemento MOV Tipo 92.....	26
3.2.2 La rutina “ARRDAT” .....	27
3.3 MODELO DEL RAYO EN ATPDraw .....	28
3.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS USANDO EL ATPDRAW .....	29
3.4.1 Aplicación del Descargador de Sobretensión a un Sistema de Potencia	32
<b>IV. MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN USANDO LA</b>	
<b>TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE.....</b>	<b>45</b>
4.1 COMPRENSIÓN DE LA TRANSFORMADA NÚMERICA DE	
LAPLACE .....	46
4.1.1 Señales de Tiempo Continuo y Discreto .....	46
4.2 TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE APLICADA AL	
MODELO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN.....	51

4.2.1 Criterios para el Desarrollo del Programa en el estudio de Transitorios	52
4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL RAYO EN MATLAB.....	54
4.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ALGORITMO USADO EN EL CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN .....	55
4.5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS USANDO LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE .....	57
CONCLUSIONES.....	59
RECOMENDACIONES .....	61
REFERENCIAS .....	62



**LISTA DE TABLAS**

<b>Tabla</b>	<b>pp.</b>
3.1 Datos de los parámetros que comprenden el circuito del modelo de descargador del IEEE W.G 3.4.11.....	30
3.2 Datos de los parámetros $A_0$ y $A_1$ para la construcción de la característica V-I del MOV Tipo 92 .....	30
3.3 Datos de tensiones a lo largo de las Líneas de Transmisión con y sin descargador de sobretensión .....	43

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>pp.</b>
2.1 Descargador de sobretensión de Silicón-carbono.....	11
2.2 Descargador de sobretensión de Metal-óxido .....	13
2.3 Característica Tensión / Corriente de un descargador de Metal-óxido con respecto al Silicón-carbono.....	15
2.4 Modelo del descargador de sobretensión de Metal-óxido IEEE dependiente de la frecuencia .....	20
2.5 Modelo Pinceti del descargador de sobretensión de Metal-óxido dependiente de la frecuencia .....	22
2.6 Característica estática de los elementos no-lineales A0 y A1 .....	23
3.1 Modelo de descargador de sobretensión de IEEE W.G 3.4.11.....	25
3.2 Circuito para el estudio del comportamiento del Descargador de Sobretensión de ZnO frente a una Descarga Atmosférica 8/20 $\mu$ s.....	31
3.3 Sistema de potencia sin descargadores de sobretensión y con descarga directa en Línea de Transmisión .....	33
3.4 Sistema de potencia sin Descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Cable de Guarda .....	35
3.5 Sistema de potencia con Descargadores de sobretensión y con descarga directa en las Líneas de Transmisión.....	37
3.6 Sistema de potencia con Descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Cable de Guarda .....	39
3.7 Sistema de potencia con descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Descargador .....	41
4.1 Representación de señales.(a) Señales en tiempo continuo y (b) tiempo discreto .....	46
4.2 Representación de las señales en el proceso de conversión A/D .....	47
4.3 Resistencia Lineal por trozos. (a) Segmento lineal por trozos (b) Representación con fuente de corriente (c) Representación con fuente de voltaje.....	51
4.4 Modelo del circuito utilizado para la construcción del algoritmo que calcula las tensiones en las ramas del descargador .....	53
4.5 Modelo del circuito del descargador con las resistencias de piezo lineal de los elemento no lineales A <sub>0</sub> y A <sub>1</sub> .....	53
4.6 Forma de onda normalizada de la tensión de impulso.....	54
4.7 Diagrama de flujo que representa el algoritmo que calcula las sobretensiones del descargador usando la Transformada Numérica de Laplace .....	56

## LISTA DE GRÁFICOS

<b>Gráfico</b>	<b>pp.</b>
2.1 Característica no-lineal de un descargador de sobretensión de Silicón-carbono.....	12
2.2 Característica no-lineal de un descargador de sobretensión de Metal-óxido .....	14
3.1 Fuente de corriente Heidler Tipo 15, que simula una descarga atmosférica con amplitud 30 kA y con pendiente de 8/20 $\mu$ s .....	29
3.2 Tensiones reflejadas en el descargador de sobretensión .....	31
3.3 Tensiones a lo largo de la línea, con descarga 30 kA, 8/20 $\mu$ s directa en la Línea de Transmisión en la fase A. Sistema de potencia sin descargadores .....	34
3.4 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 $\mu$ s directa en Cable de Guarda. Sistema de potencia sin descargadores .....	36
3.5 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 $\mu$ s directa en la Línea de Transmisión. Sistema de potencia con Descargadores .....	38
3.6 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 $\mu$ s directa en el Cable de Guarda. Sistema de potencia con Descargadores .....	40
3.7 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 $\mu$ s directa en el Descargador. Sistema de potencia con Descargadores .....	42
4.1 Tensión en el tiempo en los nodos del descargador, sin la inclusión de los elementos no lineales .....	57
4.2 Tensión en el tiempo en los nodos del descargador, con la inclusión de los elementos no lineales .....	58

## INTRODUCCIÓN

Cada día cobra mayor importancia el garantizar una correcta operación de los sistemas eléctricos de potencia, lo que hace necesario el estudio de una de las primordiales causas de falla a las que están sometidos los sistemas, como son las sobretensiones producidas por descargas atmosféricas, las cuales tienen un alto impacto en los equipos eléctricos.

Los descargadores de sobretensión son elementos muy importantes en el diseño de protección de un sistema de potencia ya que éstos disminuyen el efecto de las sobretensiones sobre los diversos componentes de la red, evitando en muchas ocasiones que se produzcan salidas innecesarias del sistema. El correcto dimensionamiento y selección de estos equipos que garantiza la protección del sistema, por lo cual es necesario poder predecir previamente su comportamiento, lo cual se logra a través de un correcto modelado.

El objetivo principal de este trabajo es un estudio del comportamiento del descargador frente a descargas atmosféricas, considerando las sobretensiones ocasionadas por dicho fenómeno, para lo cual se implementará un modelo de descargador normalizado por las normas internacionales de la IEEE. Como herramienta de análisis matemático se utiliza la Transformada Numérica de Laplace (TNL) implementada a través del programa MATLAB (MATrix LABoratory) y como herramienta de comprobación el software ATP/EMTP (Alternative Transients Program / Electromagnetic Transients Program). La aplicación de la TNL tiene como ventaja el poder realizar el análisis del comportamiento del descargador en el dominio de la frecuencia directamente, considerando que el fenómeno de la descarga es transitorio, por tanto, asociado a altas frecuencias. Una de las dificultades encontradas al aplicar la TNL en el modelado del descargador es la representación del elemento no lineal, para lo cual se recurrió al modelo propuesto por los autores del EMTP quienes plantean modelar la resistencia no lineal como un conjunto de segmentos lineales en paralelo con fuentes de corriente.

Para tener una clara comprensión del tema tratado, el trabajo desarrollado se presenta comenzando con un capítulo introductorio en el cual se muestran los antecedentes, la justificación del estudio que se va a analizar, se fijan los objetivos que se persiguen, así mismo se propone un planteamiento del problema que se dispone resolver y el marco metodológico en donde se expone la manera como se desarrolló la investigación.

Luego en el capítulo II se describe las características constitutivas de los diferentes modelos y tipos de descargadores de sobretensión, se establecen los principios de operación y funcionamiento que les permiten cumplir con su función de protección del aislamiento también se precisan su construcción, parámetros básicos y las especificaciones que los fabricantes proporcionan para su adecuada selección e instalación así como las ventajas y desventajas que cada uno presenta.

Un tercer capítulo donde se consideran aspectos de la teoría vista en los anteriores capítulos y se establece como modelo el descargador de Metal-óxido descrito por IEEE, con el que se simula el efecto transitorio aplicando una descarga que se modela como una fuente de corriente con forma de onda estandarizada de  $8/20 \mu s$ , se describen los elementos a utilizar en el modelo y se da a conocer el método de integración trapezoidal que es la forma con la cual el ATP resuelve el modelo matemático y arroja resultados gráficos con los cuales se analiza el efecto transitorio. Además, se muestra el análisis cuando se incluye el modelo del descargador dentro de un sencillo sistema de potencia y se presentan dos casos, una descarga directa a la línea de transmisión y el otro una descarga directa en cable de guarda.

En el capítulo IV se precisa la teoría para la comprensión de la Transformada Numérica de Laplace y su posterior aplicación en el modelo de la IEEE, cuyo tratamiento viene dado con la disposición de un algoritmo que se resume en primer lugar con la adaptación de la descarga atmosférica de forma frecuencial cuya expresión analítica ya viene dada y estandarizada, y en segundo lugar el cálculo de las tensiones en el dominio de la frecuencia y posterior transformación al dominio del tiempo.

Finalmente, se presentan las conclusiones y recomendaciones generadas al realizar este trabajo.

# **CAPÍTULO I**

## **MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

### **1.1 ANTECEDENTES**

El modelado correcto y preciso del descargador de sobretensión, ha sido de gran importancia debido a que su característica es necesaria para los estudios de coordinación de aislamiento, de tal manera que garantice la confiabilidad de los sistemas de potencia [Fernández F, 2001]. En este sentido muchos investigadores han dirigido sus trabajos en el desarrollo de modelos de descargadores para reproducir las características dinámicas observadas en su comportamiento frente a impulsos de corrientes provenientes de las descargas atmosféricas. Son innumerables los estudios realizados en este sentido, hasta lograr desarrollar un modelo con elementos que representen, lo más cercano posible, al dispositivo real.

Para disponer de respuestas adecuadas que permitan la correcta selección de este dispositivo de protección, se han desarrollado técnicas en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo, que permiten determinar el comportamiento del dispositivo ante los procesos transitorios más frecuentes en los sistemas de potencia.

Entre algunos de los trabajos desarrollados se encuentra el modelo dependiente de la frecuencia elaborado por el grupo de trabajo de la IEEE W.G.3.4.11 [1992], donde se expone de manera precisa el análisis de operación del descargador. Otro es el modelo simplificado de P.Pinceti [1999] derivado del modelo desarrollado por la IEEE, que muestra de manera similar

el comportamiento del dispositivo, cuya variación principal está en la simplicidad de los criterios propuestos para la identificación de los parámetros del modelo, los cuales son calculados a través de un procedimiento muy simple.

Una herramienta ampliamente utilizada para el modelado del descargador es el programa de simulación de transitorios ATP/EMTP (Alternative Transient Program / Electromagnetic Transients Program); entre los autores que han utilizado este programa se encuentran Saengsuwan Trin y Thipprasert Wichet [2004] y Daniel W. Durbak [2001], quienes realizan el análisis de operaciones del descargador de sobretensión de Metal-óxido, utilizando los modelos establecidos por la IEEE y el modelo de Pinceti. Con el uso del ATP/EMTP logran predecir la operación de los descargadores en el sistema de potencia obteniendo márgenes de error entre ambos modelos.

Doeg Rodríguez y Carlos Ramos [Rodríguez Doeg, 2004], presentan la Simulación del rayo y del descargador de Sobretensión y sus efectos sobre Sistemas de Potencia de Distribución; otra contribución en el manejo del programa ATP/EMTP es el trabajo de Modelado del descargador de sobretensión de Metal-óxido con conexión por separación de electrodos, presentado por Helmuth Ortiz [Ortiz Helmuth, 2006], quien compara los errores que introduce al usar los diferentes modelos de descargador.

Una de las herramientas matemáticas utilizadas en el análisis de transitorios electromagnéticos es la técnica de la Transformada Numérica de Laplace (TNL), la cual fue desarrollada por Wilcox en 1978 [Dávila M, 2002]. Esta técnica permite realizar análisis en el dominio de la frecuencia directamente. Esta herramienta ha sido aplicada en el análisis de sistemas eléctricos [J. L Naredo V, y otros, 1998], especialmente en el análisis de Líneas de Transmisión uniformes, no uniformes y con dependencia frecuencial en sus parámetros [Ramírez A, 2001] [Dávila M, 2002], así como en otras aplicaciones para el análisis de transitorios electromagnéticos [P. Gómez, 2007]. Esta ha sido comparada con métodos convencionales en el dominio de tiempo, como son el método de las características y programas de simulación de transitorios, y ha resultado ser bastante eficiente. Por las razones



antes expuestas, aquí se plantea modelar el descargador de sobretensión utilizando esta técnica.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

Los Descargadores de Sobretensión son normalmente utilizados en las redes de potencia para proteger a los equipos importantes como son generadores, transformadores y líneas de transmisión. Hay dos tipos básicos de descargadores como lo son el de Silicón-carbono y Metal-óxido, estos últimos han venido a sustituir a los primeros debido a que presentan menos fallas que los de Silicón. Dadas las ventajas que tienen los descargadores de Metal-óxido es importante modelar dicho dispositivo considerando elementos circuitales que representen de manera aproximada su comportamiento. A lo largo de la historia se han desarrollado varios modelos, en este caso se pretende modelar el dispositivo usando el modelo establecido por IEEE, utilizando la Transformada Numérica de Laplace como herramienta matemática y utilizar ATP/EMTP como elemento de validación del modelo que se realice.

## **1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las sobretensiones de tipo atmosférico son el motivo principal de falla en el sistema de potencia en la parte de transmisión y distribución de energía eléctrica. Las descargas atmosféricas o rayos producen sobretensiones que se propagan a lo largo del sistema, pudiendo deteriorar los aislamientos de los equipos hasta el punto de producir su perforación. Para evitar esto, los equipos eléctricos se protegen mediante la instalación de descargadores de sobretensión lo más cercanos posible a ellos, ya que estos dispositivos limitan la tensión evitando superar el nivel de aislamiento del equipo.

Al igual que los distintos dispositivos existentes en el sistema son representados a través de modelos circuitales y matemáticos, es necesario modelar el descargador de sobretensión para

así poder de alguna manera predecir la respuesta del dispositivo bajo determinadas condiciones de operación, especialmente ante la presencia de un rayo, además, el hecho de conocer su comportamiento servirá para la adecuada selección del equipo que logre cumplir con las exigencias que impone la coordinación de aislamiento.

## **1.4 OBJETIVOS**

### **1.4.1 General**

Modelar el Descargador de Sobretensión utilizando la Transformada Numérica de Laplace.

### **1.4.2 Específicos**

- Estudiar los diferentes modelos para representar un Descargador de Sobretensión.
- Estudiar las diferentes herramientas matemáticas utilizadas para el modelado del Descargador de Sobretensión.
- Estudiar y comprender el uso de la Transformada Numérica de Laplace (TLN) como herramienta útil en el modelado de los elementos del Sistema de potencia.
- Aplicar la TNL al modelo del Descargador de Sobretensión.
- Comparar y validar resultados utilizando el ATP/EMTP.

## **1.5 MARCO METODOLÓGICO**

Este trabajo está basado en la investigación documental, aplicando modelos ya preestablecidos

y normalizados por normas internacionales. Para su desarrollo se comenzó con el estudio de los diferentes modelos de representación del descargador de sobretensión con el objeto de evaluar las opciones y limitaciones de los modelos existentes. Una vez conocido los modelos, se procedió con la familiarización en el uso del programa ATP requerido para la representación de los elementos, para su posterior aplicación en la simulación de los transitorios electromagnéticos generados con la utilización del modelo de descargador seleccionado. Posteriormente se enfoca el trabajo al estudio y comprensión de la Transformada Numérica de Laplace, herramienta matemática empleada para el análisis de los fenómenos electromagnéticos, para finalmente proceder con su aplicación al modelo de descargador de sobretensión y así realizar una comparación con aquellos resultados obtenidos usando la herramienta ATP/EMTP.

# **CAPÍTULO II**

## **EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

### **2. 1 EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

El descargador de sobretensión es un dispositivo que normalmente está compuesto por varistores, que tienen la propiedad de presentar una resistencia muy elevada para las tensiones normales del circuito, mientras que cuando se presenta una sobretensión, la resistencia del varistor se hace muy pequeña, derivando a tierra las perturbaciones eléctricas que pudieran ocasionar daños en los elementos que componen el sistema de potencia como generadores, transformadores, cables. Estos dispositivos son elaborados con elementos para la extinción del arco, su principio general de operación se basa en la formación de un arco eléctrico entre dos explosores cuya operación está determinada de antemano de acuerdo a la tensión a la que va a operar [EMTP Theory Book, 1998].

La función principal del descargador de sobretensión es reducir los efectos eléctricos y magnéticos que la corriente de descarga de los rayos puede producir de forma directa en los equipos. Estos dispositivos son instalados lo más cerca posible del elemento a proteger y conectados permanentemente al sistema.

#### **2.1.1 Tipos de Descargadores**

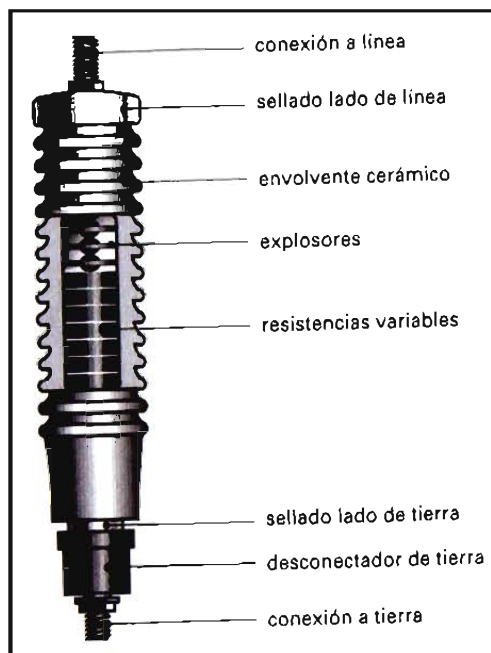
Los descargadores de sobretensión han tenido una evolución importante, pasando de los

descargadores de cuernos, en los que las descargas de sobretensión se realizaban sobre los cuernos metálicos separados por aire, a los actuales descargadores auto valvulares cuyo principio se basa en la descarga de sobretensión sobre unas válvulas o resistencias variables. En la actualidad existen dos tipos básicos de descargador de sobretensión normalizados de acuerdo con las Norma IEC 71-2, el descargador de Silicón-carbono, y el descargador de metal-óxido. Hasta hace aproximadamente 10 años, sólo era usado el descargador de Silicón-carbono, pero el descargador de Metal-óxido rápidamente lo fue sustituyendo.

a) **Silicón-carbono (SiC)** Es el descargador de sobretensión más antiguo, llamado también auto valvular, este tipo de descargador está formado por una o varias resistencias no-lineales de Silicón-carbono en serie con uno o varios explosores en su interior, posee una cubierta aislante hermética que produce la distribución de la tensión. El Silicón-carbono es un compuesto que se puede denominar como una aleación de silicio y carburo sólido, semiconductor y refractario. Es un polvo fino del color negro o gris oscuro, que presenta muchas ventajas para ser utilizado en dispositivos que impliquen trabajar en condiciones extremas de temperatura, voltaje y frecuencia. Este material se obtiene de la fusión de arenas o cuarzos de alta pureza, que pueden soportar un elevado gradiente de voltaje o de campo eléctrico. El descargador de sobretensión posee un bloque de resistencias en serie con un espacio entre electrodos (típicamente 4 cm), para producir el voltaje de la descarga disruptiva deseado y tiene el comportamiento de una resistencia no lineal. Para obtener la descarga para un valor específico de voltaje es necesario que varios de esos bloques sean colocados en una conexión serie.

Cuando ocurre una sobretensión en el sistema, se excede el voltaje de formación de arco en el descargador, la resistencia de Silicón-carbono disminuye su valor con rapidez cuanto mayor es la tensión de descarga y adquiere un valor elevado cuando la tensión se reduce a valores de frecuencia de trabajo. De manera que, cuando exista una tensión de servicio el descargador opone paso a la corriente comportándose como un aislador, mientras que en caso de una sobretensión, su resistencia eléctrica disminuye, permitiendo así la fácil descarga a tierra con la eliminación de dicha sobretensión.

El explosor tiene doble función, debe cebarse (mínima magnitud de voltaje que provoca el estado pleno de conducción del descargador) en caso de aparición de la sobretensión y luego después de amortiguar la onda de sobretensión, debe suprimir la corriente de fuga a su paso por cero. En algunos descargadores esta doble función la realizan dos explosores conectados en serie y denominados respectivamente, explosor de cebado y de extinción.

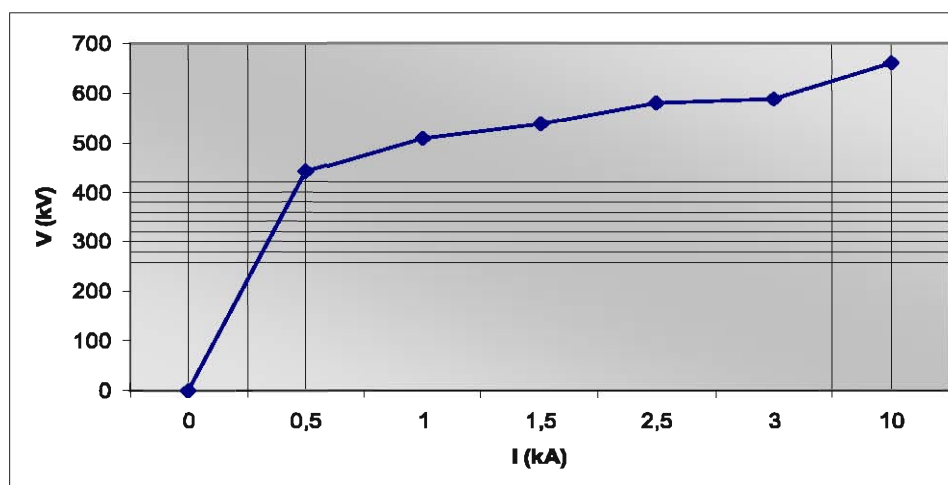


**Figura 2.1 Descargador de sobretensión de Silicón-carbono**  
[\[http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/EquipoElectrico.pdf\]](http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/EquipoElectrico.pdf)

Tal como se observa en la figura 2.1, el descargador de sobretensión consta de una envolvente de cerámica en cuyo interior están conectadas las resistencias no lineales de Silicón-carbono con los explosores metálicos, aislados entre sí por separadores de cerámica. *La envolvente de cerámica*, es generalmente de porcelana blanca o roja de alta resistencia elaborada con una línea de fuga para que ningún arco contornee bajo los efectos de contaminación. *Las resistencias no lineales* actúan de manera de limitar el paso de corriente a tierra cuando el pararrayos se ha cebado por una sobretensión. *Los explosores* se encuentran conectados en serie con el conjunto de resistencias no lineales y son los que están conectados directamente a la línea, de modo que al producirse una sobretensión que sobre pasa cierto

nivel de tensión estos se ceban, permitiendo el paso de la corriente a través de las resistencias dirigida a tierra. *El sistema de sellado* se realizan con anillos de goma sintética de cloropreno, el cual garantiza su duración ya que se encuentra rodeado de nitrógeno en estado puro y seco. La conexión de tierra tiene doble función, por un lado es conectar el descargador a tierra y garantizar el paso de la corriente de descarga y por otro lado es evitar la destrucción de una línea por fallo de un descargador como consecuencia de una serie continua de descargas o una sobretensión mantenida y prolongada. Cuando ocurre una sobrecarga térmica, funciona un dispositivo de eyección que desconecta el cable de conexión a tierra y coloca de esta forma el descargador fuera de servicio [<http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/EquipoElectrico.pdf>].

El descargador de sobretensión de Silicón-carbono posee una característica no lineal  $V-I$  como la mostrada en la gráfica 2.1, en ella se puede observar su comportamiento no lineal.

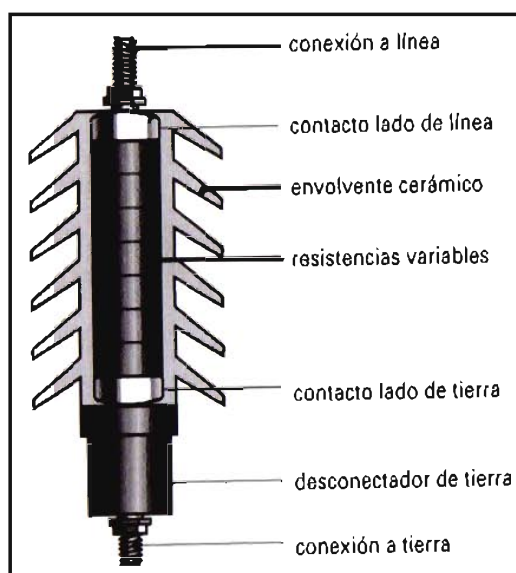


**Gráfica 2.1 Característica no-lineal de un descargador de sobretensión de Silicón-carbono [EMTP Theory Book, 1998]**

**b) Metal-óxido (ZnO)** como su nombre lo indica, estos descargadores se basan en el uso de resistores de óxido metálico, en su gran mayoría óxido de zinc. La principal característica de este tipo de resistores es la extrema no linealidad de su relación Voltaje - Corriente. Se compone de pequeños cilindros formados por partículas de cristales de óxido de zinc (ZnO) y

rodeadas por un material (porcelana vitreada o una envoltura de polímeros con compuestos de silicón) de mayor resistencia eléctrica que el cristal, los cuales están concentrados en una columna hueca de porcelana sin entrehierros. El material envolvente hace que los cristales óxido de zinc se separen, permitiendo cierto contacto entre ellos, ocasionando de esta manera una resistencia no lineal. La resistencia de los cristales es mucho menor que la del material envolvente, de tal forma que cuando ocurre una sobretensión entre los elementos no lineales, casi toda la tensión se refleja en la capa envolvente produciéndose así un fenómeno multiplicador de corriente, y se obtiene una característica altamente no lineal entre la tensión aplicada y la corriente resultante, que se aproxima al caso del descargador ideal.

En la figura 2.2 se observan las partes constituyentes de un descargador de sobretensión Metal-óxido.



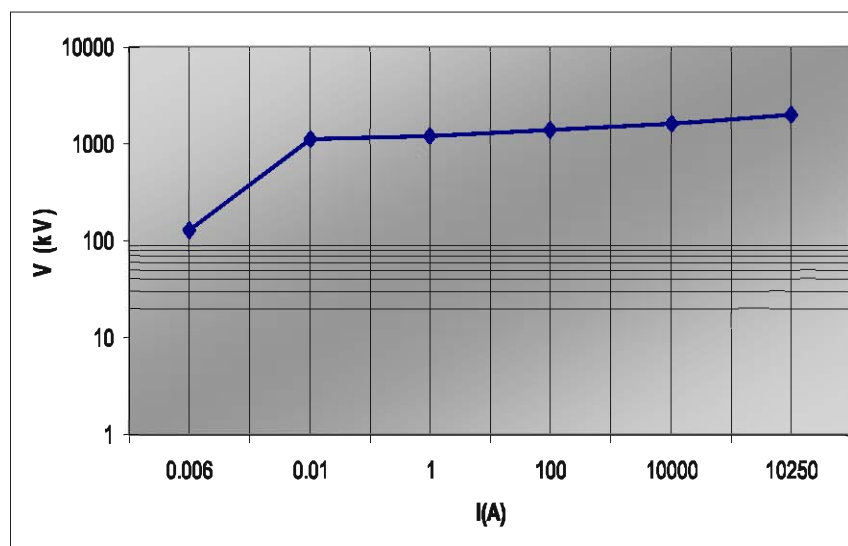
**Figura 2.2 Descargador de sobretensión de Metal-óxido**  
 [http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/EquipoElectrico.pdf]

*La envoltura exterior* puede ser un envolvente de cerámica de porcelana blanca o roja de alta resistencia o un envolvente polimérico mucho más ligero y resistente. *Las resistencias no lineales* tienen la misma función de las resistencias de Silicón-carbono con la diferencia que estas poseen un coeficiente de no linealidad más elevado, con lo que se logra que en



condiciones nominales de servicio, que por estas pasen una corriente de fuga despreciable, mientras que para condiciones de sobretensión éstas absorban las corrientes de descarga. *La conexión a tierra* posee las mismas características que en los descargadores de Silicón-carbono.

El comportamiento del descargador variará según la corriente que circule a través de él. Así, las corrientes a través del descargador en condiciones de tensión de frecuencia industrial serán tan pequeñas que se comporta como un aislador. Al contrario, si las corrientes que circulan a través de este son corrientes de impulso en el orden de kiloamperios, como es el caso de las corrientes asociadas a sobretensiones atmosféricas o de maniobra, el pararrayos se comporta como un conductor, descargando a tierra estas corrientes y haciendo que la tensión resultante en sus terminales no sea excesivamente alta.

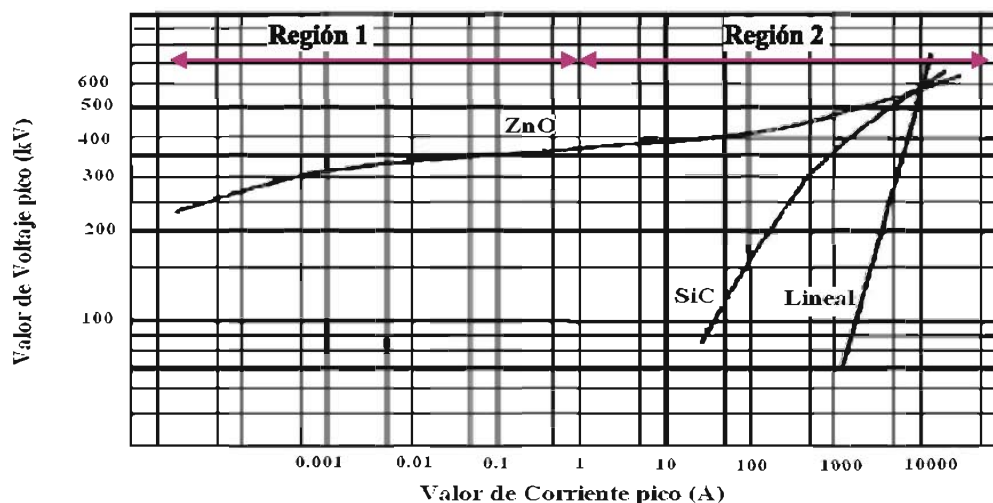


**Gráfica 2.2 Característica no-lineal de un descargador de sobretensión de Metal-óxido[EMTP Theory Book, 1998]**

Este tipo de descargador posee una característica  $V-I$  como la que se puede observar en la gráfica 2.2, donde muestra la característica propia de un resistor de (ZnO) altamente no lineal, con una pendiente casi infinita en la región tensión normal, y una pendiente casi horizontal en

la región de protección de sobrevoltaje.

La figura 2.3 muestra de forma comparativa el comportamiento de la resistencia eléctrica de un descargador de ZnO y el de SiC, en función del voltaje presente entre sus terminales. Dividiendo la grafica en dos regiones, se puede observar en la *región 1* una curva poco pronunciada, es la zona de operación (o zona de subtensión) a frecuencia industrial se tiene la tensión máxima de operación continua (MCOV) o de régimen permanente y la tensión asignada o nominal del pararrayos, ambas tensiones deberán ser mayores que la tensión máxima del sistema. Dentro de las tensiones posibles a esta frecuencia las corrientes que lo atraviesan son tan pequeñas que el descargador se comporta como un aislador. Siguiendo por la curva, se llega a la *región 2*, zona de protección, en donde se puede identificar la corriente nominal de descarga con su respectiva tensión residual. La corriente nominal de descarga puede ser a impulsos de maniobra o a impulsos atmosféricos, siendo esta última corresponde a corrientes de frente rápido.



**Figura 2.3** Característica Tensión / Corriente de un descargador de Metal-óxido con respecto al Silicón-carbono [[http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_7196.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7196.pdf)]

En la zona de operación con tensiones de frecuencia industrial, si bien las corrientes a través del descargador son pequeñas comparadas con las corrientes de descarga, su duración

es mucho mayor, razón por la cual, el esfuerzo térmico del descargador en la zona de frecuencia industrial es más crítico que en la zona de protección.

### **2.1.2 Ventajas de los Descargadores de Silicón-carbono (SiC)**

- Instalación simple.
- No se provoca interrupción de servicio ni ondas cortadas.
- Posee rapidez en el tiempo de respuesta.
- El silicón permite soportar condiciones adversas ya que tiene muchas características que evitan su rápido envejecimiento, como son la operación a altas temperaturas y resistencia a la contaminación.
- Mantenimiento sencillo y económico.
- Posee una alta capacidad para la disipación de energía.
- Mayor ionización, mayor rapidez y por tanto, mayor efectividad.

### **2.1.3 Desventajas de los Descargadores de Silicón-carbono (SiC)**

- La presencia de explosores produce un carácter errático asociado al desgaste de estos.
- Poseen un alto riesgo de explosión.
- Posee baja tensión residual.

- Tiene alta corriente de fuga.
- El nivel en el tiempo de respuesta puede ser menor por la presencia de explosores con respecto a los que no poseen explosores.

#### **2.1.4 Ventajas de los Descargadores de Metal-óxido (ZnO)**

- Su coeficiente de no-linealidad es muy superior al del SiC, lo que permite prescindir de los explosores.
- El paso de la zona de alta impedancia a la de baja impedancia es muy rápido y desaparecen los problemas de retardo al encendido de los electrodos, presente en los descargadores de Silicón-carbono.
- Presenta una tensión residual muy estable, puesto que la ausencia de explosores elimina el carácter errático asociado al desgaste de estos.
- Mayor tensión residual para corriente de descarga nominal correspondiente.
- El nivel de protección de un pararrayos de ZnO queda determinado únicamente por el mayor valor del voltaje residual con corriente de descarga nominal. Este nivel es prácticamente independiente de la forma de onda de la corriente de descarga.
- Estos descargadores han sido tradicionalmente de envoltente cerámica, en los 90's aparecen envoltentes poliméricas que disminuyen los riesgos derivados de explosiones por sobre presiones en el interior de los mismos.
- Debido a que absorben menos energía que los SiC, pueden soportar mayor cantidad de rayos y operaciones de interruptores.

- Óptimo nivel de rapidez en el tiempo de respuesta debido a la ausencia de explosores.
- Posee buena disponibilidad de tensiones de limitación.
- La corriente de fuga es baja lo que evita que se produzcan arcos alrededor del descargador.
- Las dimensiones de sus partes se reduce respecto al tipo SiC, lo que los hace más compactos, permitiendo disminuir el tamaño sin incrementar el precio.
- Tiene una buena fiabilidad.

#### **2.1.5 Desventajas de los Descargadores de Metal-óxido (ZnO)**

- Tiene una deficiente disipación de energía, lo que puede hacer que incremente la temperatura dentro del descargador.
- Posee una mala resistencia al calentamiento, lo cual puede conducir al colapso térmico.
- Es propenso al rápido envejecimiento a las condiciones medioambientales polución marina (salitre), exposición a los rayos solares, lluvia, viento, etc.

#### **2.1.6 Parámetros de Selección de un Descargador de Sobretensión**

Estos deberán ser identificados por sus datos de placa con al menos ciertas especificaciones

- Tensión Nominal o asignada (máximo voltaje RMS permitido a 60 Hertz para el cual el descargador es diseñado).

- Tensión Máxima de Operación Continua MCOV (tensión admisible con frecuencia industrial que puede aplicarse continuamente en los terminales del descargador antes de iniciar su estado de conducción).
- Tensión residual (tensión en los terminales del descargador cuando se inyecta un impulso de corriente).
- Frecuencia asignada (si difiere de las frecuencias estándar: 50 y 60 Hz).
- Corriente nominal de descarga (onda de corriente que circula por el descargador después de un cebado).
- Corriente sostenida de corto circuito asignada en  $kA$ . En descargadores en los que no se especifica el comportamiento en corto circuito se usa la marca “---”.
- Nombre del fabricante y código de identificación.
- Identificación de la posición de los elementos para el ensamblaje (Aplicable sólo en descargadores con varios elementos).
- Año de fabricación.
- Número de serie.
- Clase de descarga de línea (opcional).
- Nivel de soporte a la contaminación del revestimiento del pararrayos (opcional).

## **2.2 MODELOS DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

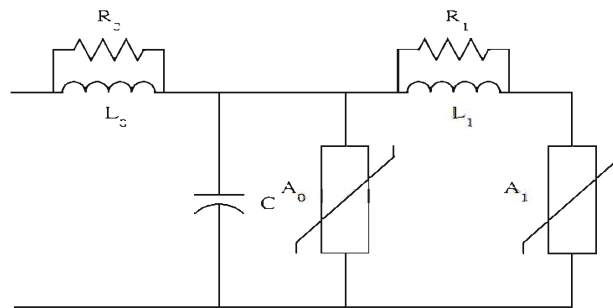
El descargador de sobretensión de Metal-óxido tiene las características dinámicas que son de

gran importancia en los estudios de coordinación de sobrevoltaje que implican sobretensiones de frente rápido que son generalmente causadas por un rayo. Se han propuesto varios modelos con la exactitud aceptable para simular este comportamiento dependiente de frecuencia, como son el modelo de la IEEE y PINCETI.

### 2.2.1 Modelo IEEE

La idea básica del modelo que presenta la IEEE es de dividir la única resistencia no lineal en  $N$  resistencias no lineales en paralelo, que son separadas por filtros paso bajos, como ilustrado en la figura 2.4.

El modelo recomendado por IEEE W.G 3.4.11 proporciona una característica no lineal  $V-I$  que se obtiene mediante las dos resistencias no lineales ( $A_0$  y  $A_1$ ) que se encuentran separadas por un filtro  $R-L$  que para sobretensiones de frente lento (originadas por maniobras, que son de corta duración) se comporta como una impedancia muy pequeña quedando las resistencias no lineales prácticamente en paralelo.



**Figura 2.4 Modelo del descargador de sobretensión de Metal-óxido IEEE dependiente de la frecuencia [Saengsirwan. T, 2004]**

Al contrario, durante sobretensiones de frente rápido (que generalmente son las ocasionadas por el rayo o descarga atmosférica, que tienen duración muy corta y de amplitud

muy superior al valor cresta de la tensión nominal), la impedancia del filtro se hace significativa, y causa una distribución de corriente entre las dos ramas. Por razones de precisión la corriente por la rama  $A_0$  aumenta cuando disminuye la duración del frente. Donde la resistencia  $A_0$  es mayor que la resistencia  $A_1$  para cualquier corriente dada, mientras mayor sea la corriente de descarga, mayor será el voltaje residual. Esto porque la inductancia  $L_1$  fuerza la corriente de alta frecuencia a fluir más por la resistencia  $A_0$  que en la resistencia  $A_1$ .

El elemento  $L_0$  representa una inductancia pequeña pero finita asociada con los campos magnéticos en el contorno del descargador de sobretensión, mientras  $R_0$  sólo se utiliza para amortiguar las oscilaciones numéricas. La capacitancia  $C$  es la capacitancia parasita del descargador de sobretensión. La inductancia  $L_1$  y la resistencia  $R_1$  del modelo comprende el filtro entre las dos resistencias no lineales.

El principal problema de este modelo es cómo identificar sus parámetros. El WG.3.4.11 sugiere un procedimiento iterativo donde las correcciones sobre los diferentes elementos son necesarias hasta que se obtenga un comportamiento satisfactorio. Los valores iniciales de los elementos pueden ser obtenidos a través de las fórmulas, tomando en cuenta para ello los datos eléctricos (voltajes residuales) y los parámetros físicos (la altura total, el diámetro de bloque, el número de columnas).

La inductancia  $L_1$  y la resistencia  $R_1$  del modelo comprende el filtro entre las dos resistencias no lineales. El elemento  $L_0$  representa la inductancia asociada con los campos magnéticos en la periferia del descargador. La resistencia  $R_0$  es usada para estabilizar la integración numérica, cuando en la práctica el circuito es modelado en programas de cálculo numérico. Las fórmulas para calcular estos dos parámetros son [Saengsirwan. T, 2004]:

$$L_1 = 15d/n \text{ } \mu\text{H.}$$

$$R_1 = 65d/n \text{ } \Omega.$$

$$L_0 = 0.2d/n \text{ } \mu\text{H.}$$

$$R_0 = 100d/n \text{ } \Omega$$

$$C = 100n/d \text{ pF.}$$



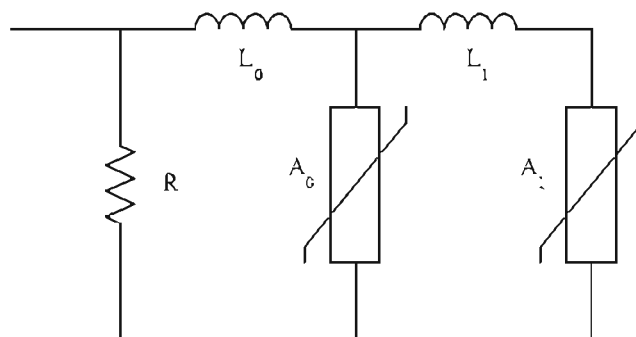
donde

$d$  es la altura estimada del descargador en metros (en general se usan dimensiones de datos del catálogo).

$n$  es el número de las columnas paralelas de Metal-óxido en el descargador.

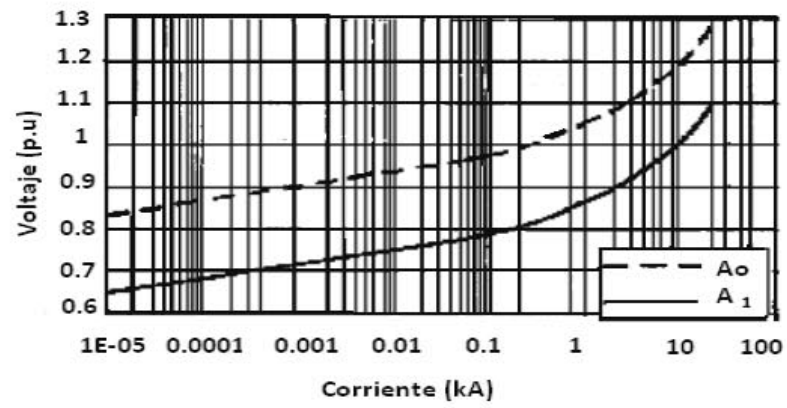
### 2.2.2 Modelo Pinceti

El modelo presentado de Pinceti deriva del modelo estándar de IEEE, con algunas pequeñas diferencias como se puede ver en la figura 2.5. La capacitancia  $C$  es eliminada, ya que sus efectos sobre el comportamiento en el modelo son insignificantes, las dos resistencias en paralelo con las inductancias son sustituidas por una resistencia  $R$  (de aproximadamente  $1\text{ M}\Omega$ ) entre los terminales de entrada, con el propósito de evitar problemas de inestabilidad numérica.



**Figura 2.5 Modelo Pinceti del descargador de sobretensión de Metal-óxido dependiente de la frecuencia [Saengsirwan. T, 2004]**

La definición de la característica no lineal de resistencias ( $A_0$  y  $A_1$ ) es como la mostrada en la figura 2.6. Esta curva resulta de las curvas propuestas por la WG.3.4.11 IEEE con valor máximo del voltaje residual durante una prueba de descarga de  $10\text{ kA}$  de impulso de la corriente de relámpago.



**Figura 2.6 Característica estática de los elementos no-lineales A0 y A1 [Saengsrwan. T, 2004]**

# **CAPÍTULO III**

## **MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN USANDO ATP/EMTP**

El Alternative Transients Program (ATP) es considerado un programa de simulación muy completo, ya que puede ser utilizado en un gran número de aplicaciones, para el estudio de fenómenos transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia. Con el programa se puede calcular las variables de interés dentro de una red eléctrica en función del tiempo y cuya solución numérica es obtenida con la aplicación del algoritmo de Dommel que se basa en la regla trapezoidal para la obtención de los modelos discretos de los elementos en parámetros concentrados y el método de Bergeron obtención del modelo discreto de una línea ideal en parámetros distribuidos.

ATP posee muchos elementos tales como líneas de transmisión, transformadores, máquinas rotativas, cables y un gran número de componentes útiles en el análisis de los sistemas de control, equipos de electrónica de potencia y componentes con características no lineales, tales como arcos y corona son también posibles analizar. Se pueden estudiar fenómenos tales como las fallas, descargas y todo tipo de maniobras.

### **3.1 MODELO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

El descargador de Metal-óxido puede ser representado con precisión mediante alguno de los

modelos de resistencia no lineal disponibles en el ATP. Sin embargo, aunque esta representación no es adecuada para frecuencias elevadas, es posible utilizar otros componentes disponibles en el programa para construir un modelo de descargador que se comporte satisfactoriamente a estas frecuencias. ATP/EMTP generalmente acepta representar el descargador de sobretensión de Metal-óxido con un circuito de doble resistencia no lineal para transitorios rápidos como por ejemplo al simular la aplicación de una descarga atmosférica. Una forma de hacerlo es siguiendo el procedimiento propuesto por un grupo de trabajo del IEEE W.G 3.4.11, cuya estructura del modelo propuesto es el conocido modelo dependiente de la frecuencia (ver figura 3.1).

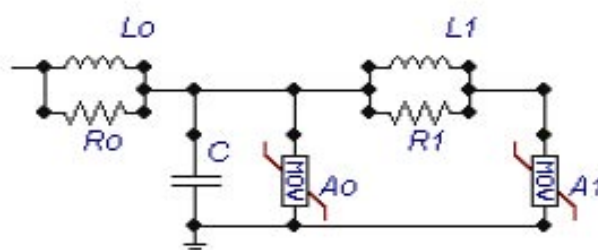


Figura 3.1 Modelo de descargador de sobretensión de IEEE W.G 3.4.11

### 3.2 ELEMENTO MOV TIPO 92 (VARISTOR METAL-ÓXIDO)

El ATP/EMPTP ofrece este elemento que describe el comportamiento de la resistencia no lineal. Este modelo prevé la verdadera representación no lineal del descargador de sobretensión de ZnO. El componente MOV Tipo 92 tiene una ventana de Atributos y otra de que permite ingresar los puntos para obtener la característica de tensión-corriente ( $V-I$ ) que va a reflejar su naturaleza no-lineal, en ella es posible introducir hasta 29 puntos de la característica de forma creciente y sin especificar el punto (0,0). La función del MOV en particular, es que este llama a una rutina interna "ARRDAT" para realizar una prueba exponencial de los puntos de tensión-corriente ( $V-I$ ) especificados previamente. La ecuación que precisa la coacción básica para el modelado del ZnO viene definida por la función de potencia que tiene la forma de la ecuación (3.1), como sigue

$$i = p * \left( \frac{V}{V_{ref}} \right)^q \quad (3.1)$$

donde

$i$ : es la corriente del descargador.

$V$ : es el voltaje del descargador.

$p$  y  $q$ : son parámetros constantes únicos del dispositivo. Valores típicos para  $q$  = de 20 a 30.

$V_{ref}$ : típicamente este voltaje de referencia es dos veces la tensión nominal o cercana a esta y se utilizará para la escala de tensión de los puntos de datos. En teoría, el escalamiento debe ser usado para prevenir el desbordamiento numérico durante el comportamiento exponencial, este dato normaliza la ecuación. [ATP Rule Book, 1987-99].

Dado que es difícil de describir toda la región (figura 2.2) con una sola función de potencia, la región de voltaje ha sido dividida en segmentos, donde cada segmento es definido por su propia función de potencia. Para voltajes considerablemente por debajo de  $V_{ref}$ , la corriente es sumamente pequeña y por lo tanto una sola representación lineal puede ser usada para esta región de bajo voltaje. En la región de protección de sobrevoltaje es significativa, por lo tanto dos segmentos con funciones de potencia son suficientes.

### 3.2.1 Atributos del elemento MOV Tipo 92

Como se mencionó anteriormente el elemento MOV Tipo 92 posee un cuadro de diálogo intrínseco donde se deben introducir los valores de los datos propios del descargador, necesarios para su correcto desempeño para la simulación. Estos atributos corresponden a:

**Vref** = Es la tensión de referencia expresada en la ecuación (3.1) y se expresa en voltios [V].

**V<sub>flash</sub>**= Es la tensión de descarga en p.u. del V<sub>ref</sub>. Si el descargador no posee separación entre electrodos, se debe usar un número negativo.

**V<sub>zero</sub>**= se refiere al voltaje inicial en voltios [V]. Este dato es opcional.

**COL**= tiene que ver con el número de columnas (paralela copias o elementos) de la característica. Si se deja en blanco, cero, o uno, este asume una columna, y la característica se utiliza sin modificaciones. Pero para valores positivos COL (normalmente un número entero), el coeficiente COEF de todas las tarjetas siguientes internamente serán multiplicados por COL durante la introducción de datos, antes de su almacenamiento y uso.

**COEF** = es el coeficiente '*p*' de la ecuación que precisa el modelado del ZnO y debe estar en Ampere.

**SER** = es el número de bloques en serie en cada rama.

**ErrLim** = es el error relativo máximo permitido durante la determinación automática del número de segmentos. Dejar el campo en blanco o nulo, se convertirá en un valor por defecto de 1/20. Este acondicionamiento de tolerancia debe ser introducido en p.u.

### 3.2.2 La rutina "ARRDAT"

El acceso a los programas de "ARRDAT" se hace por medio de un ajustador de ZnO (ZnO FITTER) de la Sección II-A-40 [ATP Rule Book, 1987-99]. ARRDAT produce la rama de Tipo 92 para representar un descargador de sobretensión de ZnO. Esta rutina ajusta la curva exponencial de un conjunto de puntos de datos, en el plano log-log utilizando el método de mínimos cuadrados, además de determinar automáticamente los segmentos en que se va a dividir la curva, y lo hace basándose en el error relativo (ErrLim) máximo de tolerancia introducido por el usuario.

### 3.3 MODELO DEL RAYO EN ATPDraw

La iniciación típica de una descarga corresponde para una corriente pico moderada que va de  $10 \text{ kA}$  a  $20 \text{ kA}$ , pero de vez en cuando estos valores se extienden hasta unos cientos de unos miles de amperios. Entre las fuentes estáticas que ATP/EMTP permite simular de forma clara y precisa la particularidad de una descarga atmosférica (rayo) se tiene la “*Función Impulso Heidler Tipo 15*” que puede ser de corriente o tensión, es un elemento ideal, de magnitudes asociadas que no varían y sin impedancia interna. Esta fuente está definida por la ecuación (3.2) y representada por la gráfica (3.1)

$$f(t) = \text{AMPLITUD} \times \frac{\left(\frac{t}{T_f}\right)^N}{1 + \left(\frac{t}{T_f}\right)^N} \times e^{-t/\tau} \quad (3.2)$$

donde

**AMPLITUD**=es la magnitud de la descarga en ampere (A) o voltios (V) y no representa el valor máximo de la descarga.

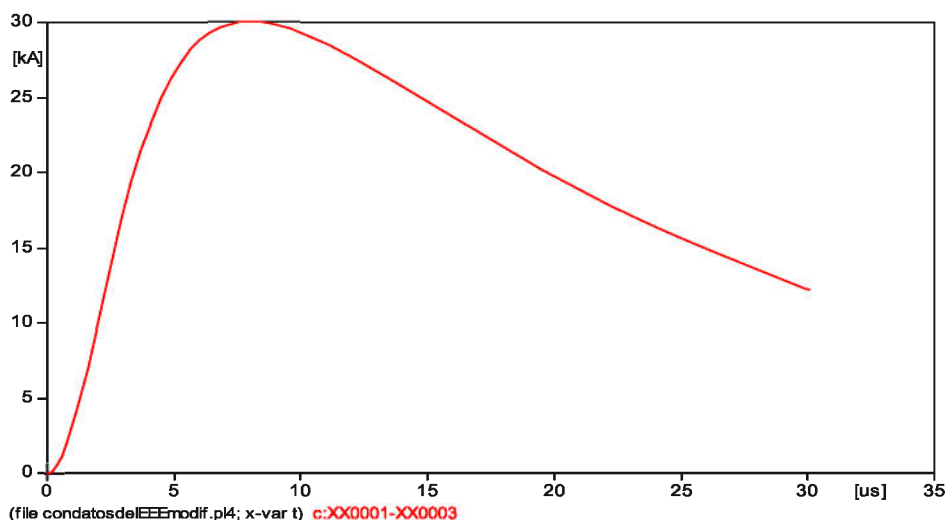
**$T_f$**  = es la constante de tiempo en segundos (s) del frente de onda, es proporcional a la duración del frente. Comprende el intervalo entre  $t=T_{START}$  y el tiempo para alcanzar el pico de la función.

**$\tau$** = es proporcional a la duración en segundos (s) de la descarga. Comprende el intervalo entre  $t= T_{START}$  y el tiempo en el cual la función ha descendido al 50% de su valor pico.

**$N$**  = determina la velocidad de crecimiento y el instante de tiempo de la máxima velocidad de crecimiento.

Para efectos de la simulación se utilizó una fuente de corriente con una magnitud de  $30 \text{ kA}$  con una pendiente de descarga estándar de  $8/20 \mu\text{s}$  que corresponde a  $8 \mu\text{s}$  como el

tiempo alcanzado del valor cresta de la onda y  $20 \mu s$  para el tiempo de cola o donde ha alcanzado el 50% del valor cresta de la onda, la cual se puede apreciar que tiene la forma de la gráfica 3.1.



**Gráfica 3.1 Fuente de corriente Heidler Tipo 15, que simula una descarga atmosférica con amplitud  $30 \text{ kA}$  y con pendiente de  $8/20 \mu s$**

### 3.4 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS USANDO EL ATPDRAW

Ahora bien, una vez conocidos tanto el modelo de descargador como el tipo de descarga aplicada, para observar el comportamiento del dispositivo en estudio, se completa entonces para ello un circuito único como el mostrado en la figura 3.3 para una apropiada simulación. Este modelo puede ser creado fácilmente por los elementos que posee el ATPDraw. La prueba para la simulación se hizo con el circuito de la figura 3.3, en función a la virtual aplicación de un fenómeno natural como lo es la descarga atmosférica que produce sobretensiones de frente rápido, para ello se utilizó una fuente de corriente con forma de onda normalizada de amplitud  $30 \text{ kA}$  con pendiente de  $8/20 \mu s$  (ver gráfica 3.1), además de manipular datos (tablas 3.1 y 3.2) para los parámetros que comprenden el circuito del modelo de descargador de ZnO de IEEE W.G 3.4.11 (ver figura 3.1) basado en el tipo PAZ-P09-1 con una tensión residual según el fabricante de  $28.20 \text{ kV}$  [<http://www.google.co.ve/url?sa=t&sour>]. De acuerdo con los resultados que se obtenga bajo la simulación se puede comparar el



comportamiento ideal, con respecto a los datos de fabricación del descargador. De acuerdo con lo mencionado el error relativo viene definido por [Bayadi, 2003]

$$\epsilon_r = \frac{V_{rsim} - V_{rman}}{V_{rman}} * 100 \quad (3.3)$$

donde

$V_{rsim}$  = es el voltaje residual en la simulación.

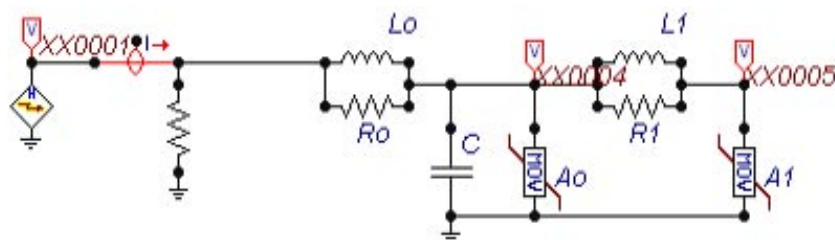
$V_{rman}$  = es el voltaje residual del fabricante.

**Tabla 3.1 Datos de los parámetros que comprenden el circuito del modelo de descargador del IEEE W.G 3.4.11 [Saengsirwan. T, 2004]**

d(m)	n(# de columnas)	L <sub>1</sub> (μH)	R <sub>1</sub> (Ω)	L <sub>0</sub> (μH)	R <sub>0</sub> (Ω)	C (pF)	A <sub>0</sub> V <sub>ref</sub> (kV)	A <sub>1</sub> V <sub>ref</sub> (kV)
0.302	1	4.53	19.63	0.0604	30.2	331.126	33.6204	27.4227

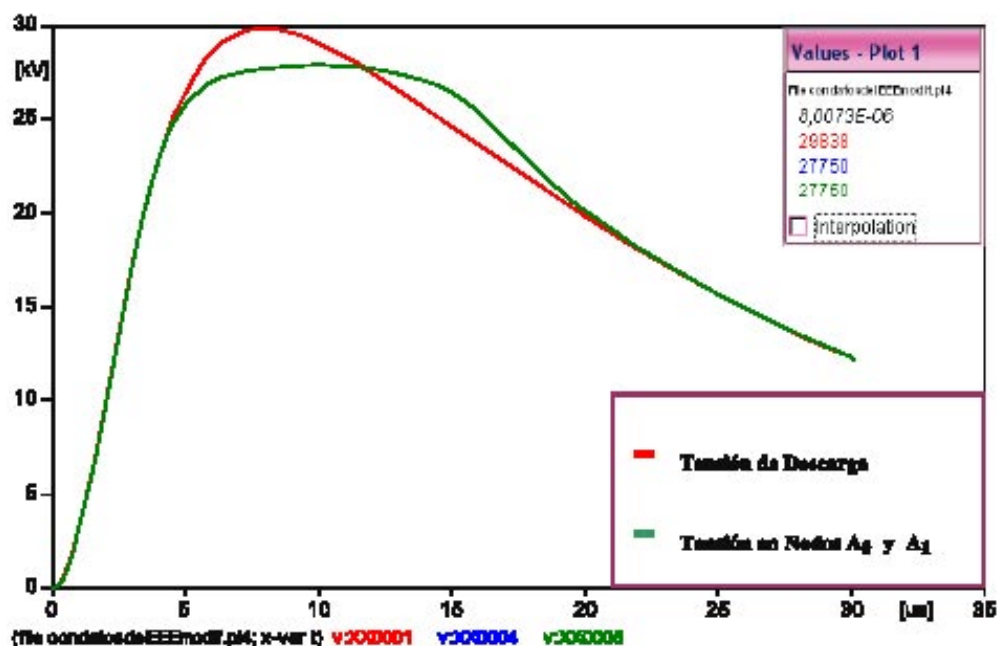
**Tabla 3.2 Datos de los parámetros A<sub>0</sub> y A<sub>1</sub> para la construcción de la característica V-I del MOV Tipo 92 [Saengsirwan. T, 2004]**

I(A)	A <sub>0</sub> V(KV)	A <sub>1</sub> V(KV)
10	24.7625	0
100	27.2529	21.7627
1000	27.2529	24.055
2000	30.7904	25.3002
4000	31.8375	26.1775
6000	32.2054	26.5454
8000	33.0827	27.0548
10000	33.6204	27.4227
12000	34.1298	27.5925
14000	34.8373	27.9604
16000	35.375	28.1302
18000	36.2523	28.3
20000	37.1579	28.4698



**Figura 3.2** Circuito para el estudio del comportamiento del Descargador de Sobretensión de ZnO frente a una Descarga Atmosférica 8/20µs

De los resultados de las formas de ondas obtenidas en el cálculo de las sobretensiones, que se han reflejado en los terminales del dispositivo (ver gráfica 3.2), se puede observar que la onda de tensión residual conseguida con la simulación fue de  $27,750 \text{ kV}$ , lo que representa un valor muy cercano al proporcionado por el fabricante de  $28,20 \text{ kV}$  (Surge Arresters Precise), con un error relativo de  $\epsilon_r = -1.59\%$ .



**Gráfica 3.2** Tensiones reflejadas en los nodos del descargador de sobretensión

### 3.4.1 Aplicación del Descargador de Sobretensión a un Sistema de Potencia

Ahora bien, una vez observado el favorable comportamiento del descargador de sobretensión, se puede ver la aplicación del mismo a un sistema de potencia para conocer su interacción con la red. Para la modelación y simulación del descargador de sobretensión para la interacción con el sistema de potencia se introdujo una serie de elementos de manera de adecuar de forma sencilla un pequeño sistema de potencia. En las figuras 3.3, 3.4, 3.5 y 3.6 muestran los elementos empleados para simular el sistema de potencia se pueden mencionar fuentes de tensión, líneas de transmisión, torres entre otros, los cuales vienen representados con las siguientes especificaciones:

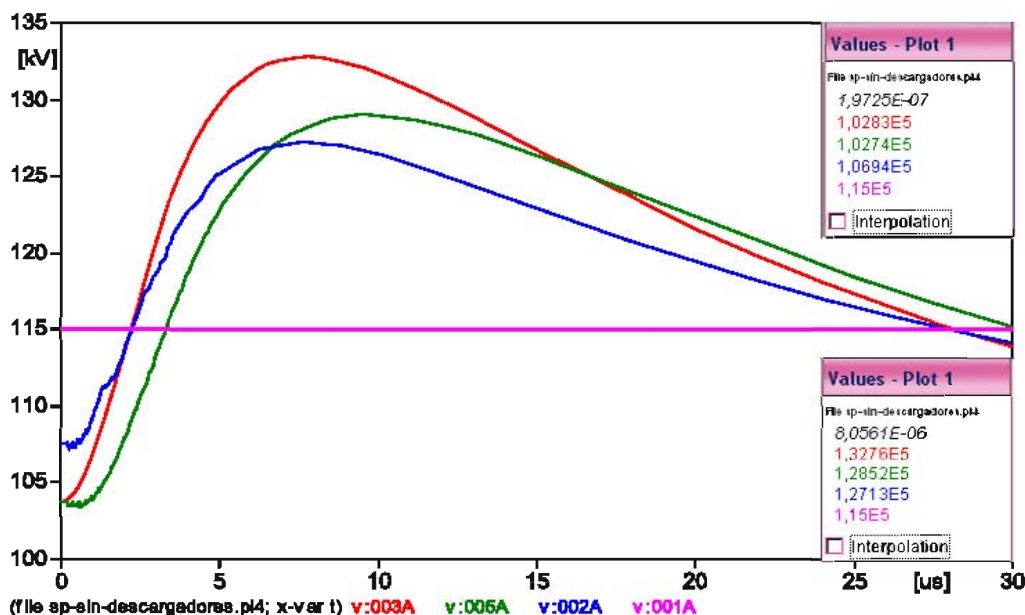
**a.- Modelo de Torres** se modelan con impedancias de parámetros distribuidos.

**b.- Modelo de la Línea de Transmisión** modelada con parámetros distribuidos calculada con subrutina de Línea Constante, dada la disposición geométrica de los conductores, su calibre, resistencia por unidad de longitud y que considera las correcciones planteadas por J. R Martí donde se toman en cuenta la resistividad, los parámetros internos a partir de dimensiones de los conductores, el acoplamiento mutuo de las líneas trifásicas, el número de conductores por fase, acceso a hilos de guarda, inclusión de la catenaria (altura en torre) y los parámetros con dependencia de la frecuencia.

**c.- Modelo de la puesta a tierra** para el aterramiento de las torres se utilizaron resistencias de rama lineal.

**d.- Fuentes de Tensión Monofásica** El tipo de fuente es de una función sinusoidal en el tiempo y frecuencia en Hertz, en cuanto a la fase ésta se indica en términos de ángulo 120 grados de desfase entre ellas.

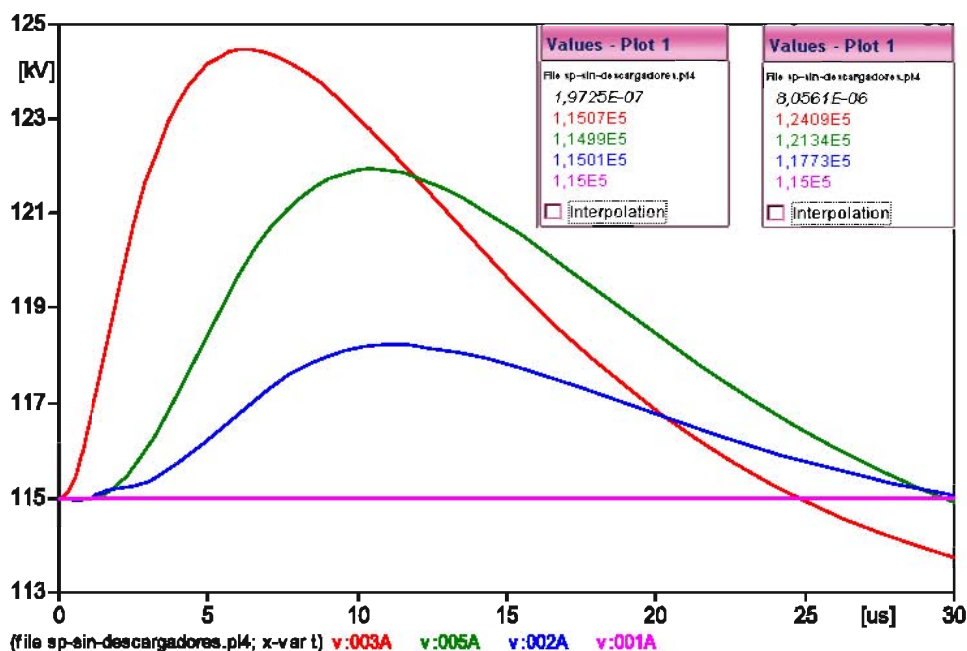
**Figura 3.3 Sistema de potencia sin descargadores de sobretensión y con descarga directa en Línea de Transmisión**



**Gráfica 3.3 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20  $\mu$ s directa en la Línea de Transmisión en la fase A. Sistema de potencia sin Descargadores**

En la gráfica 3.3 se puede observar que la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión van a depender de la distancia que exista entre el punto de medición y aquel donde se aplique la descarga. Al realizar una comparación de las magnitudes de la tensión para el tiempo donde se produce el valor cresta de la descarga atmosférica (8  $\mu$ s,) se tiene que la máxima tensión se presenta en el *nodo 003* (curva en rojo) con un valor de 132,76 kV, correspondiendo éste al punto más cercano a la descarga (ver figura 3.3), disminuyendo el valor de las sobretensiones en los nodos a medida que estos se alejan. De igual manera ocurre para el tiempo en que se inicia la descarga (0,197  $\mu$ s), la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión varían a medida que se aleja del punto de aplicación de la descarga.

**Figura 3.4 Sistema de potencia sin Descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Cable d**

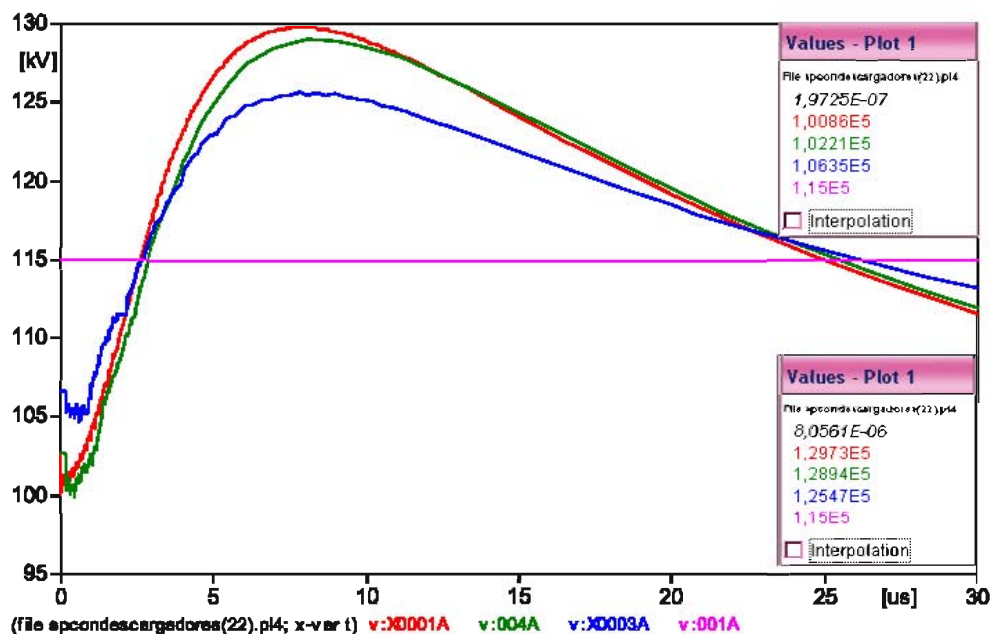


**Gráfica 3.4 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20  $\mu$ s directa en el Cable de Guarda. Sistema de potencia sin Descargadores**

En la gráfica 3.4 se puede observar que la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión van a depender de la distancia que exista entre el punto de medición y aquel donde se aplique la descarga. Al realizar una comparación de las magnitudes de la tensión para el tiempo donde se produce el valor cresta de la descarga atmosférica (8  $\mu$ s) se tiene que la máxima tensión se presenta en el *nodo 003* (curva en rojo) con un valor de 124,09 kV, correspondiendo éste al punto más cercano a la descarga (ver figura 3.4), disminuyendo el valor de las sobretensiones en los nodos a medida que estos se alejan. De igual manera ocurre para el tiempo en que se inicia la descarga (0,197  $\mu$ s), la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión varían a medida que se aleja del punto de aplicación de la descarga, con la diferencia de que estas comienzan con un valor cercano al de la tensión de trabajo.

**Figura 3.5 Sistema de potencia con Descargadores de sobretensión y con descarga directa en las Líneas de**

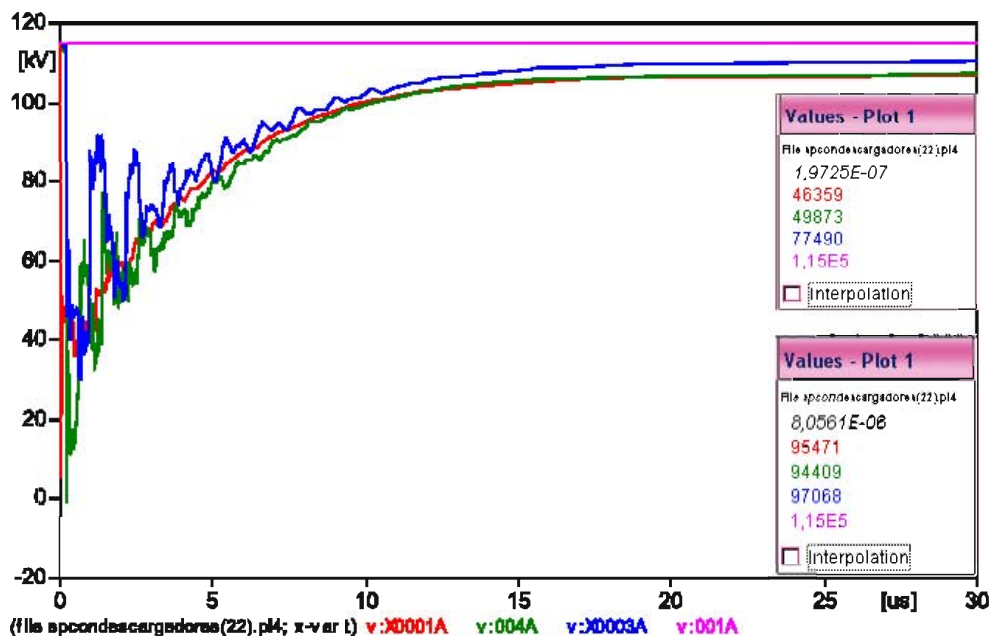




**Gráfica 3.5 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20  $\mu$ s directa en la Línea de Transmisión. Sistema de potencia con Descargadores**

En la gráfica 3.5 se puede observar que la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión van a depender de la distancia que exista entre el punto de medición y aquel donde se aplique la descarga. Al realizar una comparación de las magnitudes de la tensión para el tiempo donde se produce el valor cresta de la descarga atmosférica (8  $\mu$ s) se tiene que la máxima tensión se presenta en el *nodo 0001* (curva en rojo) con un valor de 129,74 kV, correspondiendo éste al punto más cercano a la descarga (ver figura 3.5), disminuyendo el valor de las sobretensiones en los nodos a medida que estos se alejan. De igual manera ocurre para el tiempo en que se inicia la descarga (0,197  $\mu$ s), la magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión varían a medida que se aleja del punto de aplicación de la descarga.

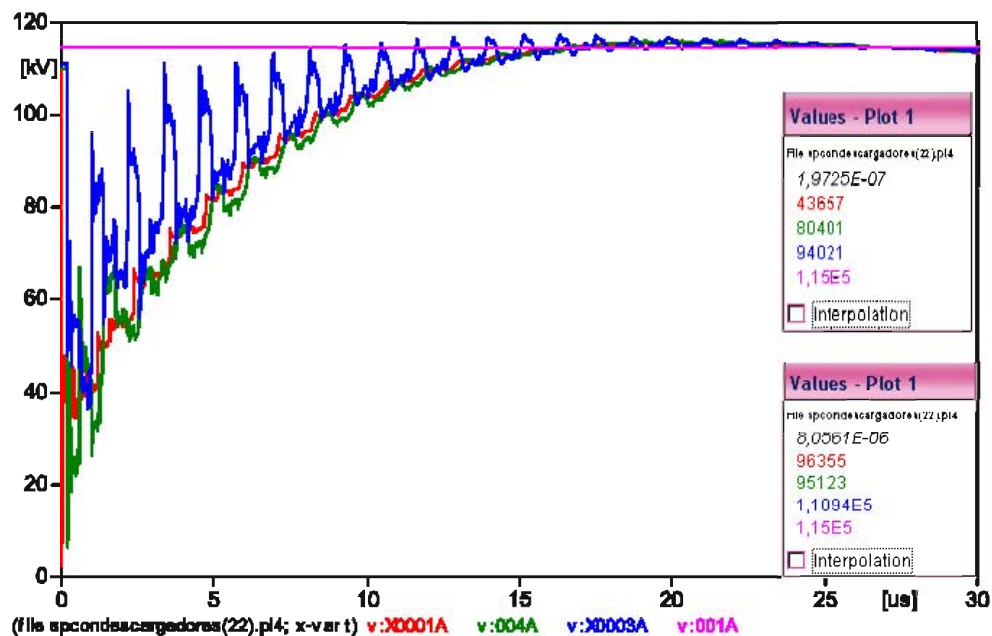
**Figura 3.6 Sistema de potencia con Descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Cable**



**Gráfica 3.6 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 μs directa en el Cable de Guarda. Sistema de potencia con Descargadores**

Se puede observar en la gráfica 3.6 que las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión cuando se aplica la descarga directa en el cable de guarda, para el tiempo en que ésta comienza ( $0.197 \mu s$ ) se ven reducidas de manera significativa cayendo por debajo de la tensión del sistema, respuesta asociada a la presencia de los descargadores de sobretensión de limitar las sobretensiones. Considerando en la curva, para el tiempo en que ocurre el valor de tensión cresta de la descarga ( $8 \mu s$ ), las magnitudes se mantienen por debajo de la tensión del sistema ( $115 kV$ ), logrando posteriormente reestablecerse a valores cercanos a la tensión de trabajo.

**Figura 3.7 Sistema de potencia con descargadores de sobretensión y con descarga directa en el Descargador**



**Gráfica 3.7 Tensiones a lo largo de la línea de transmisión, con descarga 30 kA, 8/20 μs directa en el Descargador. Sistema de potencia con Descargadores**

Se puede observar en la gráfica 3.7 que las magnitud de las tensiones a lo largo de las líneas de transmisión cuando se aplica la descarga directa en el cable de guarda, para el tiempo en que ésta comienza ( $0.197 \mu s$ ) se ven reducidas de manera significativa cayendo por debajo de la tensión del sistema, respuesta asociada a la presencia de los descargadores de sobretensión de limitar las sobretensiones. Haciendo el recorrido por la curva, para el tiempo en que ocurre el valor de tensión cresta de la descarga ( $8 \mu s$ ) las magnitudes se mantienen por debajo de la tensión del sistema ( $115 kV$ ), logrando posteriormente reestablecerse las tensiones a valores iguales a la tensión de trabajo.

**Tabla 3.3 Datos de tensiones a lo largo de las Líneas de Transmisión con y sin Descargador de sobretensión, para el tiempo de  $0,197 \mu s$**

Punto de aplicación de la Descarga (Rayo)	para $t = 0,197 \mu s$							
	Tensiones al Inicio de la Descarga, sin Descargador (kV)				Tensiones al Inicio de la Descarga, con Descargador (kV)			
	001	002	003	005	001	003	0001	004
Línea de Transmisión	115	106.9	102.8	102.7	115	106.3	100.8	102.2
Cable de Guarda	115	115	115	114.9	115	77.4	46.3	49.8
Descargador	-	-	-	-	115	94	43.6	80.4

**Tabla 3.4 Datos de tensiones a lo largo de las Líneas de Transmisión con y sin Descargador de sobretensión, para el tiempo de  $8 \mu s$**

Punto de aplicación de la Descarga (Rayo)	para $t = 8 \mu s$							
	Tensiones, Sin Descargador (kV)				Tensiones Con Descargador (kV)			
	001	002	003	005	001	003	0001	004
Línea de Transmisión	115	127.1	132.7	128.5	115	125.4	129.7	128.9
Cable de Guarda	115	117.7	124	121.3	115	97	95.4	94.4
Descargador	-	-	-	-	115	110.9	96.3	95.1

En la tabla 3.3 y 3.4 se puede observar los datos extraídos de las gráficas 3.3, 3.4, 3.5, 3.6 y 3.7 para los casos en estudio, el sistema de potencia sin descargador y con él, aplicando la descarga directa en la Línea de Transmisión, Cable de Guarda y en el Descargador, para observar las tensiones en los nodos a lo largo de las Líneas de Transmisión. De los resultados arrojados en las pruebas, se puede notar el efecto del descargador cuando se inicia la inyección de la descarga ( $0.197 \mu s$ ), donde este logra limitar la tensión de manera instantánea debido a la tensión residual que estos poseen, que es el valor de tensión que estos pueden limitar al momento de producirse la descarga. También se puede apreciar que para el tiempo donde ocurre la tensión cresta de la descarga ( $8 \mu s$ ) las magnitudes de las sobretensiones varían a

medida que estas se alejan del punto de aplicación de la descarga y que además se ven limitadas cuando en el sistema de potencia se introduce los descargadores de sobretensión.

# **CAPÍTULO IV**

## **MODELADO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN USANDO LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE**

Considerando que hay numerosas herramientas matemáticas y computacionales para el modelado de los diferentes dispositivos en un sistema, en este capítulo se estudia la factibilidad de aplicar la herramienta matemática como es la Transformada Numérica de Laplace.

La Transformada de Fourier y Laplace son herramientas muy poderosas en el análisis para la solución de ecuaciones diferenciales e integrales. Sin embargo, su aplicación a problemas prácticos es limitada, dado que la transformación del dominio tiempo al dominio de la frecuencia y de forma recíproca puede ser muy difícil o incluso imposible. En el dominio de la frecuencia, se permite analizar y resolver problemas complejos que se presentan en una red eléctrica, permitiendo tomar en cuenta elementos dependientes de la frecuencia, que en muchos casos, para resolverlos en el dominio del tiempo se hacen bastante complicados. Aun y cuando la Transformada de Laplace es de gran utilidad en la aplicación de dichos análisis, esta presenta inconvenientes al ser aplicada en la práctica. Estas dificultades son superadas con el uso de la Transformada Numérica de Laplace, la cual introduce soluciones que se fundamentan en el manejo de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), que permite modelar los elementos que conforman una red eléctrica de manera más exacta con relación a si se estuviere analizando en el dominio del tiempo. Esta además reduce errores provocados por el truncamiento y discretización de ecuaciones analíticas.

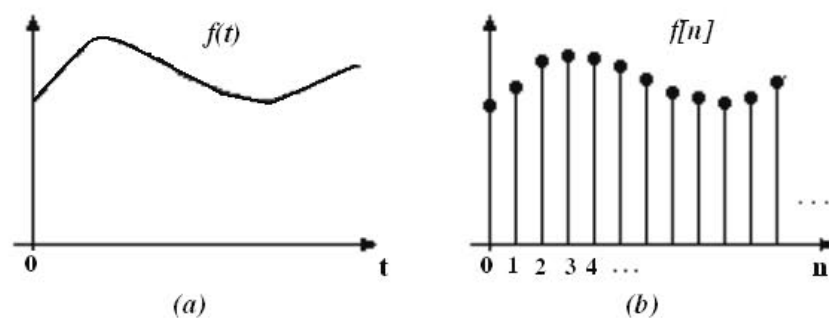


## 4.1 COMPRESIÓN DE LA TRANSFORMADA NÚMÉRICA DE LAPLACE

### 4.1.1 Señales de Tiempo Continuo y Discreto

Las Señales se pueden clasificar como de tiempo continuo (funciones continuas) que son las llamadas señales analógicas y las de tiempo discreto (sucesiones) que son las llamadas señales digitales. Se establece esta clasificación porque es necesario para el tratamiento con modelos matemáticos para el procesamiento de señales o solución de circuitos. Donde, para el caso de Tiempo Continuo se emplean las Transformadas de Laplace o la de Fourier y para el caso de Tiempo Discreto se emplean las Transformadas Zeta o la Transformada Discreta de Fourier (basada esta en la Serie Exponencial de Fourier).

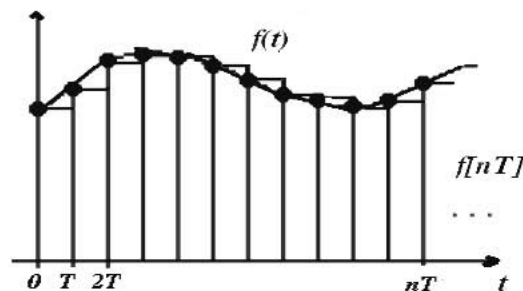
Para el tratamiento de estas señales se hace necesaria la conversión de las mismas de su forma analógica a digital. La conversión A/D significa tomar registros a intervalos discretos regulares de la señal (eléctricas o de otra naturaleza) consideradas como variables de forma continua en el tiempo (representables por números reales). Dichos valores discretos llamados muestras conforman una sucesión cuyo dominio son los números enteros y su codominio los reales (fraccionarios), finalmente los datos se reducen a códigos binarios.



**Figura 4.1 Representación de señales.(a) Señales en tiempo continuo y (b) tiempo discreto [Juan Sacerdoti. 2003]**

Por ejemplo si se considera una función  $f(t)$  continua, las muestras de la función, tomadas a intervalos regulares de tiempo  $T$  empezando de  $t=0$  forman la sucesión de números reales  $f[0], f[T], f[2T], f[3T], \dots, f[nT] \dots$  (figura 4.2).

Básicamente, se hace un muestreo digital que consiste en tomar muestras periódicas de la amplitud de una señal analógica, siendo el intervalo entre las muestras constante. La relación de este muestreo, se denomina frecuencia o tasa de muestreo y determina el número de muestras que se toman en un intervalo de tiempo.



**Figura 4.2** Representación de las señales en el proceso de conversión A/D [Juan Sacerdoti, 2003]

El muestreo está basado en el teorema de muestreo de Nyquist que establece que la frecuencia mínima de muestreo necesaria para evitar el “Aliasing” (efecto que causa que señales continuas distintas se tornen indistinguibles cuando se muestrean digitalmente) debe ser  $f_m > 2.BW$  ( $f_m$ : frecuencia de muestreo,  $BW$ : ancho de banda de la señal a muestrear). Este Teorema es la base de la representación discreta de una señal continua. También hay que decir que el muestreo de la señal implica pérdida de información respecto a la señal de entrada, ya que de un número infinito de valores posibles para la entrada sólo tenemos un valor finito de valores posibles para la salida.

Luego, el proceso que sigue al muestreo en la digitalización de la señal es la cuantificación, que al contrario del muestreo, no es reversible y se produce una pérdida de información que trae como consecuencia una distorsión conocida como error o ruido de cuantificación. Dicho

de otro modo, las muestras discretas de una señal son valores exactos que aún no han sufrido redondeo o truncamiento alguno sobre una precisión determinada, esto es, aún no han sido cuantificadas. En la cuantificación se convierte una sucesión de muestras de amplitud continua en una sucesión de valores discretos preestablecidos. Durante el proceso de cuantificación se mide el nivel de tensión de cada una de las muestras, obtenidas en el proceso de muestreo y se les asigna un valor finito o discreto de amplitud seleccionado de un margen de niveles previamente fijado, si el nivel obtenido no coincide exactamente con ninguno, se toma como valor el inferior más próximo.

Ahora bien, para evitar inconvenientes en cuanto a la distorsión que impidan la reconstrucción de la señal analógica original a partir de las muestras cuantificadas, es importante saber cuántas muestras se han de tomar, lograr la elección apropiada de la velocidad de muestreo y precisión en el proceso de cuantificación. De esto depende el error medio admisible, el método de reconstrucción de la señal y el uso final de los datos de la conversión.

A este nivel del proceso de digitalización, la señal analógica se convierte en una señal digital ya que los valores que están preestablecidos son finitos, aunque todavía no se haya llevado al sistema binario. Aún y cuando la señal quede representada por un valor finito, es durante la codificación (proceso siguiente de la conversión analógico/digital), cuando se transforme en una sucesión de ceros y unos.

#### **4.1.2 La Transformada Numérica de Laplace**

Partiendo de la correspondencia que existe entre la Transformada de Fourier y Laplace, se hace fácil pasar del dominio de la frecuencia al dominio del tiempo, y de forma recíproca del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

Si se tiene  $f(t)$  como una función causal en el dominio del tiempo, siendo  $F(s)$  su imagen en el dominio de la frecuencia. La Transformada directa e inversa de Laplace [J. Luis Naredo. V, 1998]

$$F(s) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt \quad (4.1)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi j} \int_{c-j\infty}^{c+j\infty} F(s) e^{st} ds \quad (4.2)$$

Donde  $s = c + j\omega$  ; siendo  $\omega$  la frecuencia angular y  $c$  una constante finita de amortiguamiento, con un valor mayor o igual a cero. Cuando  $c$  vale cero, las ecuaciones se corresponden con las Transformadas de Fourier [J. Luis Naredo. V, 1998]

$$F(j\omega) = \int_0^{\infty} f(t) e^{-j\omega t} dt \quad (4.3)$$

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(j\omega) e^{j\omega t} d\omega \quad (4.4)$$

Ahora para el tratamiento numérico de la Transformada de Fourier es imprescindible definir límites de integración finitos, por lo que el rango de  $t$  se truncan sustituyéndolo por  $[0, T]$ , así mismo el rango de  $\omega$  sustituyéndolo por  $[-\Omega, +\Omega]$ . Además se hacen necesario discretizar las ecuaciones, asumiendo para el tiempo  $t = m\Delta t$ , siendo  $m = 0, 1, 2, \dots, M$  y  $\Delta t = T/M$ , de manera similar se discretiza el rango de integración de la frecuencia  $\omega = n\Delta\omega$ , donde  $n = -N, \dots, -1, 0, 1, \dots, N$  y  $\Delta\omega = \Omega/N$ , para quedar los rangos muestreados y discretizados de  $t$  y de

$$F(jn\Delta\omega) \cong \Delta t \sum_{m=0}^{M-1} f(m\Delta t) e^{-jmn\Delta t \Delta\omega} \quad (4.5)$$

$$f(m\Delta t) \cong \frac{\Delta\omega}{2\pi} \sum_{n=-N}^{N-1} F(jn\Delta\omega) e^{jmn\Delta\omega} \quad (4.6)$$

Con el tratamiento Numérico de Laplace los procesos de discretización y truncamiento producen errores, que pueden apreciarse, por truncamiento las oscilaciones de Gibbs, que aumenta alrededor del punto de discontinuidad y los efectos por errores de discretización producen encimamientos de la señal. Para lograr disminuir el efecto de las oscilaciones de Gibbs se hace necesario evitar los truncamientos bruscos, proporcionando suavizados que se obtienen aplicando unas funciones denominadas ventanas de datos, como lo son Hamming, Lanczos y Von Hann (o Hanning). Por otro lado para reducir los errores por discretización es valido amortiguar artificialmente multiplicando por la exponencial decreciente  $e^{-ct}$ , esto hace que se conviertan así en las ecuaciones de la Transformadas Numéricas de Laplace.

$$F(c + jn\Delta\omega) = \Delta t \sum_{m=0}^{M-1} f(m\Delta t) e^{-cm\Delta t} e^{-j2\pi mm/M} \quad (4.7)$$

$$f(m\Delta t) = \frac{e^{cm\Delta t}}{\Delta t} \left[ \frac{1}{M} \sum_{n=0}^{M-1} F(jn\Delta\omega) \sigma_w e^{j2\pi mm/M} \right] \quad (4.8)$$

donde

$\sigma_w$  es la ventana de datos utilizada (Lanczos, Von Hann u otra).

$m\Delta t$  es el rango de frecuencias, seleccionado bajo el teorema de Nyquist, para  $-\Omega \leq \omega \leq \Omega$ .

Siendo  $\Omega = \frac{\pi}{\Delta t}$  el periodo en la frecuencia.

$M=2N$  para evitar problemas en la IFFT (Inversas de Transformada Rápida de Fourier ) se deben asignar números de muestras pares, escogiendo muestras de potencia de  $2^X$ .

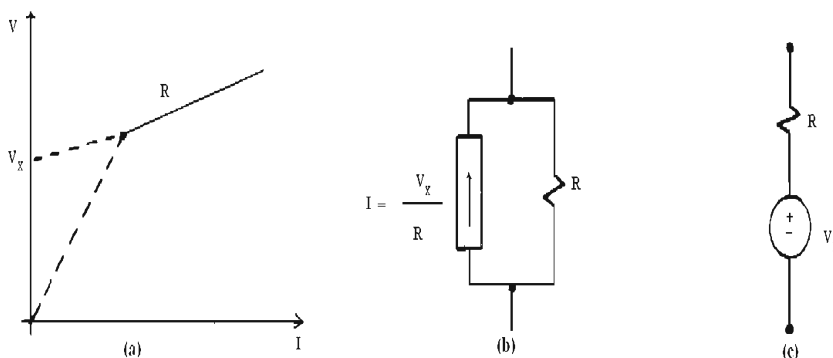
$T = \frac{2\pi}{\Delta\omega}$  viene a ser el tiempo máximo de observación.

$c = -\log \frac{\varepsilon}{T}$  la constante de amortiguamiento definida por el error y el periodo máximo de observación.

## 4.2 TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE APLICADA AL MODELO DEL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN

Por lo general, una red eléctrica contiene sólo algunos elementos no lineales. Es por ello, que es más conveniente modificar con métodos lineales los elementos no lineales, en lugar de usar métodos de solución no lineales (menos eficientes) para toda la red.

La solución aplicada para este modelo es la representación lineal por trozos de la característica altamente no lineal que describe el modelo del descargador de sobretensión, con la curva tensión/corriente (V/I) en trozos lineales. Los elementos no lineales son simulados como inyecciones de fuentes de corrientes, que son sobrepuestas en la red lineal después de encontrada previamente una solución sin los elementos no lineales. El elemento no-lineal se expone de forma que para cada segmento lineal con una pendiente de valor  $R = dv/di$ , se especifique como una fuente de voltaje  $V_x$  en serie con una resistencia  $R$ , o una fuente corriente  $V_x/R$  en paralelo con una resistencia  $R$  como se puede observar en la figura 3.2.



**Figura 4.3 Resistencia Lineal por trozos. (a) Segmento lineal por trozos (b) Representación con fuente de corriente (c) Representación con fuente de voltaje [EMTP Theory Book, 1998]**

#### 4.2.1 Criterios para el Desarrollo del Programa en el estudio de Transitorios

Para el estudio de fenómenos transitorios electromagnéticos se hace muy útil el uso de la Transformada Numérica de Laplace. Partiendo de la construcción de un algoritmo adicional que permita obtener las tensiones en el dominio de la frecuencia en los terminales del descargador y a partir de estas obtener las tensiones en el dominio del tiempo basándose en un modelo de circuito para el tipo de descargador de metal-óxido (ver figura 4.4).

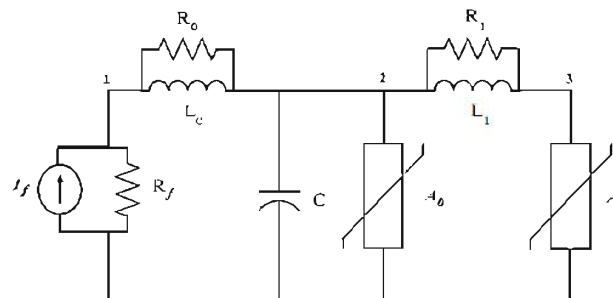
En forma general, en la figura 4.5, se calcula la matriz de corrientes total conformada por las corrientes que circulan por las ramas del descargador de sobretensión, asumiendo inicialmente como cero las corrientes  $I_2$  e  $I_3$  que son las corrientes que se usan para modelar los elementos no lineales, quedando estas ramas sólo con una resistencia lineal cada una. Por otro lado, se construye la matriz de admitancia total  $Y_{total}$  ecuación (4.9) con los elementos circuitales, para posteriormente obtener la matriz de tensión total  $\bar{V}$  del circuito ecuación (4.10) y todo esto en el dominio de la frecuencia.

Una vez obtenida la matriz total de tensión en el dominio de la frecuencia, se utiliza la función de la Transformada inversa de Laplace [M. Dávila, 2002] para la transformación de estas tensiones en el dominio del tiempo. Como para los elementos no lineales que conforman el descargador sus resistencias no lineales  $A_0$  y  $A_1$  se van a modelar como inyección de fuentes de corriente en paralelo con una resistencia (figura 4.5), se hace un nuevo recálculo de las tensiones en nodos pero ahora con la inclusión de las ramas no lineales y se repite el procedimiento de del calculo de las tensiones con ecuación (4.9) (4.10) (4.11) y de la misma manera se realiza la conversión del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

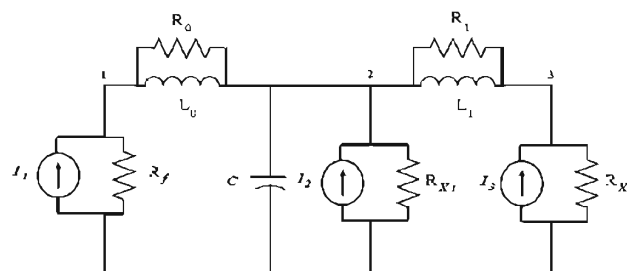
$$Y_{total} = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_f} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{X_{L_0}} & -\frac{1}{R_0} - \frac{1}{X_{L_0}} & 0 \\ -\frac{1}{R_0} - \frac{1}{X_{L_0}} & \frac{1}{R_0} + \frac{1}{X_{L_0}} + \frac{1}{X_C} + \frac{1}{R_{X_1}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{X_{L_0}} & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{X_{L_1}} \\ 0 & -\frac{1}{R_1} - \frac{1}{X_{L_1}} & \frac{1}{R_1} + \frac{1}{X_{L_1}} + \frac{1}{R_{X_2}} \end{bmatrix} \quad (4.9)$$

$$\bar{V} = Y_{total}^{-1} * \bar{I} \quad (4.10)$$

$$\begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ V_3 \end{bmatrix} = Y_{total}^{-1} * \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{bmatrix} \quad (4.11)$$



**Figura 4.4 Modelo del circuito utilizado para la construcción del algoritmo que calcula las tensiones en las ramas del descargador**



**Figura 4.5 Modelo del circuito del descargador con las resistencias de piezo lineal de los elemento no lineales A<sub>0</sub> y A<sub>1</sub>**



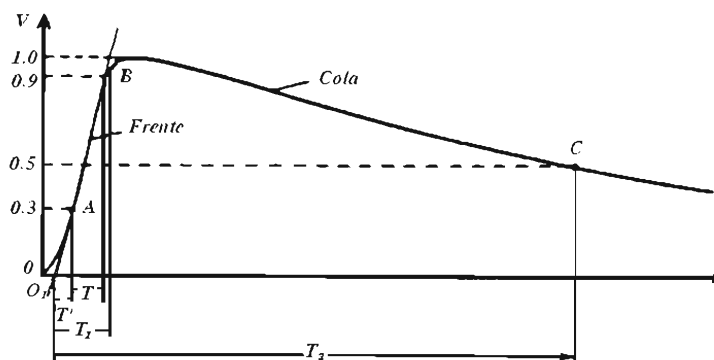
donde:

$R_{x1}$  es la resistencia de piezo lineal del elemento no lineal ( $A_0$ ) en la rama en el *nodo 2* (figura 4.4).

$R_{x2}$  es la resistencia de piezo lineal del elemento no lineal ( $A_1$ ) en la rama en el *nodo 3* (figura 4.4).

### 4.3 MODELO MATEMÁTICO DEL RAYO EN MATLAB

Aunque las formas de onda de las sobretensiones atmosféricas poseen gran variedad, se han estandarizado algunas de ellas para efectuar pruebas de impulso en equipos y máquinas eléctricas. Como onda normalizada de tensión impulsiva se entiende como aquella que posee unas características bien definidas respecto a la duración y amplitud de la misma y para el caso de la sobretensión atmosférica la Norma ANSI/IEEE Standard 4-1995 [EMTP Theory Book, 1998] la establece como se muestra en la figura 4.6.



**Figura 4.6** Forma de onda normalizada de la tensión de impulso [EMTP, 1994]

En la forma de onda normalizada de la tensión impulso,  $T_1$  es el tiempo de frente virtual de un impulso de tiempo atmosférico el cual es de 1.67 veces el intervalo de tiempo transcurrido entre los instante cuando un impulso tiene como valores 30% y 90% del valor pico. Tales instantes de se denominan puntos A y B del frente de la onda.  $T_2$  se llama tiempo de cola y es

el intervalo de tiempo entre el origen virtual  $O_1$  y el instante en el tiempo cuando el voltaje ha disminuido a la mitad del valor pico.

Además esta función viene definida por una ecuación analítica que se describe a continuación ecuación (4.12) para el dominio del tiempo como la diferencia de la doble exponencial como sigue

$$V(t) = V_0 (e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (4.12)$$

donde

$V_0$ = amplitud del voltaje

$T_1 = -1/\alpha$

$T_2 = -1/\beta$

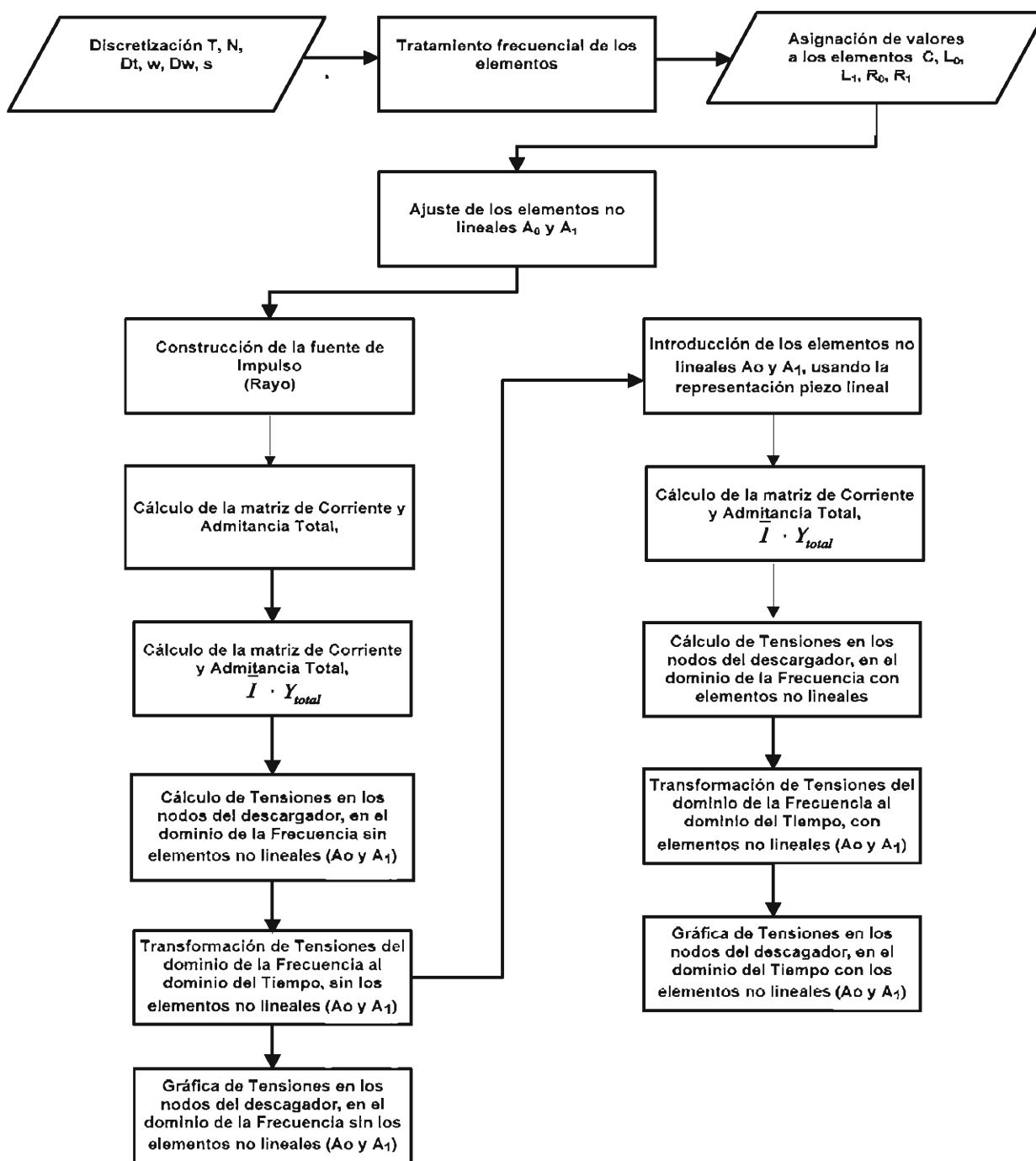
Y para la definición en el dominio de la frecuencia a partir de la ecuación (4.13) con la transformada de la función  $V(t)$ , quedando de la siguiente manera

$$V(s) = \frac{1}{(s + \alpha)} - \frac{1}{(s + \beta)} \quad (4.13)$$

#### **4.4 DIAGRAMA DE FLUJO PARA EL ALGORITMO USADO EN EL CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN EL DESCARGADOR DE SOBRETENSIÓN**

Para conocer de una manera más sencilla y específica de cómo se desarrolla el programa para el cálculo de las tensiones en nodos del descargador de sobretensión, en la figura 4.5 se presenta un diagrama de flujo que logra disponer los procesos realizados durante el desarrollo del cálculo de las tensiones en los nodos del descargador de sobretensión al aplicarle una

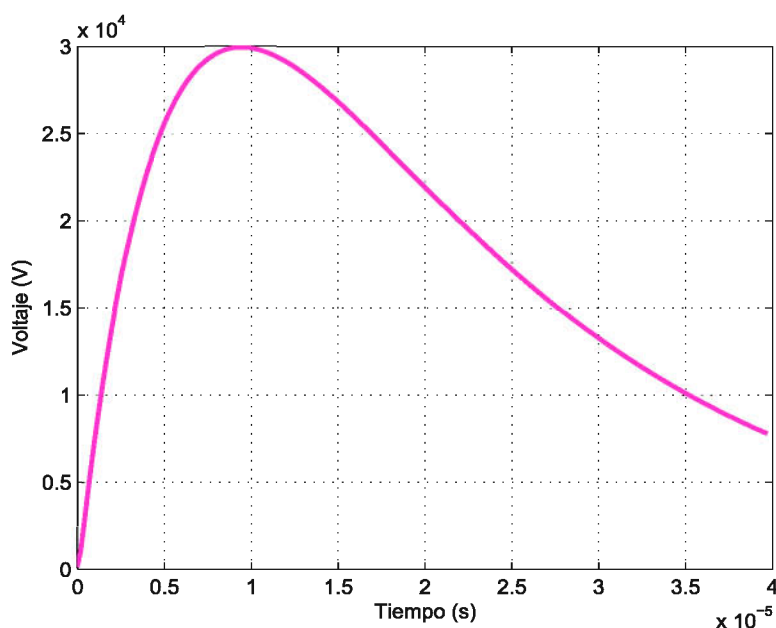
descarga atmosférica de  $8/20 \mu s$ . En el diagrama de flujo se describe la secuencia de los diferentes pasos:



**Figura 4.7 Diagrama de flujo que representa el algoritmo que calcula las tensiones en el descargador usando la Transformada Numérica de Laplace**

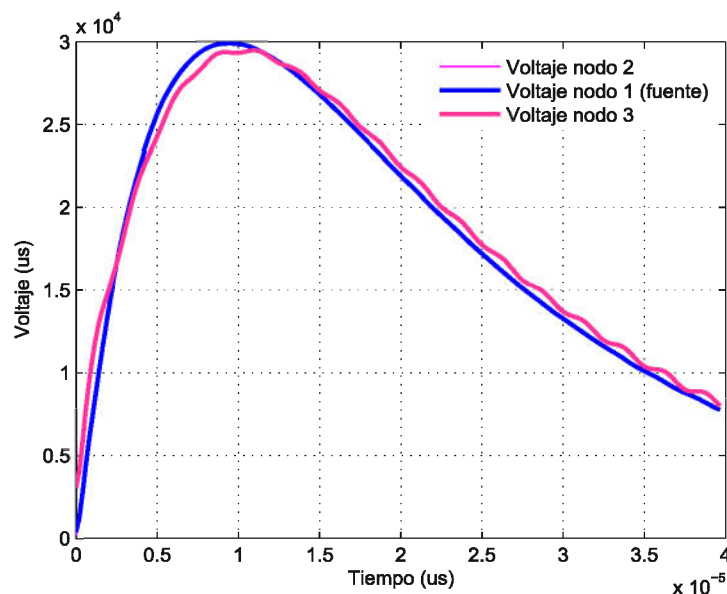
## 4.5 VALIDACIÓN DE LOS RESULTADOS USANDO LA TRANSFORMADA NUMÉRICA DE LAPLACE

Con base a la construcción del algoritmo con la herramienta computacional de MATLAB, es que se logra el estudio en el análisis de las sobretensiones como la representación de un fenómeno transitorio electromagnético con el cual se ve afectado el descargador. Se tienen inicialmente las tensiones (gráfica 4.1) encontradas previas a la inclusión de los elementos no lineales del circuito (figura 4.5) que representa el dispositivo.



**Gráfica 4.1 Tensión en el tiempo en los nodos del descargador, sin la inclusión de los elementos no lineales**

La gráfica 4.1 corresponde al valor de tensión en los nodos del descargador de sobretensión sin la inclusión de los elementos no lineales  $A_0$  y  $A_1$  del modelo (ver figura 4.5), y se puede observar que el valor de tensión de descarga (curva rosada) se ve reflejada por igual en todos los nodos del descargador debido a la ausencia de los elementos no lineales que son los que definen la característica no lineal del dispositivo.



**Gráfica 4.2 Tensión en el tiempo en los nodos del descargador, con la inclusión de los elementos no lineales**

La gráfica 4.2 muestra las tensiones en los nodos del descargador, la curva en color azul el valor de tensión de la descarga aplicada y representa la tensión en el **nodo 1** en la entrada del descargador (ver figura 3.3) que solapa la curva del **nodo 2**, esto porque los elementos son tan pequeños que no produce caída de tensión reflejándose la misma tensión para ambos nodos. En el **nodo 3**, tensión en bornes del descargador, se puede observar la atenuación voltaje de  $30\text{ kV}$  a  $28,8\text{ kV}$ , que a bien es la respuesta esperada por el descargador, al compararla con aquella obtenida usando el ATP/EMTP (gráfica 3.2).

## CONCLUSIONES

Este estudio se realizó para analizar el desempeño del descargador de sobretensión, donde se pudo apreciar que la corriente de descarga atmosférica provoca sobretensiones no deseadas en el sistema y por ende pudiendo afectar los equipos. La utilización tanto de la herramienta de la Transformada Numérica de Laplace en el programa de aplicación MATLAB para los cálculos numéricos y ATP/EMTP como herramienta de comprobación de los cálculos obtenidos, han resultado ser muy útiles y prácticas en el estudio de sobretensiones transitorias como fenómeno electromagnético que pueden incidir de forma perjudicial en los sistemas de potencia y más aun poniendo en riesgo la vida útil de los equipos que lo componen si estos no están protegidos debidamente.

En el estudio de las sobretensiones la influencia del rayo y los elementos del modelo del descargador usados, son dos aspectos que definen una importante dependencia de la frecuencia que resulta complejo estudiar en el dominio del tiempo debido a las discontinuidades o inestabilidades numéricas presentadas. Por esta razón se optó por la propuesta de un método como el de la TNL que permite manipular las ecuaciones en el dominio de la frecuencia y fácilmente transformar los resultados al dominio del tiempo, ofreciendo una buena aproximación y una gran rapidez en el cálculo numérico en comparación con un análisis en el dominio del tiempo.

El hecho de contar con un modelo ya establecido que modela el descargador de sobretensión de Metal-óxido, permitió de manera sencilla poder aplicar la TNL obteniéndose resultados aceptables al compararlos con aquellos obtenidos al utilizar el ATP/EMTP. Es importante destacar que los resultados obtenidos al aplicar la TNL muestran pequeñas oscilaciones las cuales se deben a la representación piezo lineal del elemento no lineal.

En cuanto a los resultados obtenidos al incluir el modelo de descargador utilizado en un

sistema de potencia sencillo a través del ATP/EMTP, se pudo observar que las sobretensiones originadas por impacto directo en las líneas son mayores que las originadas por impacto directo en el cable de guarda cuando el sistema de potencia no cuenta con descargadores conectados a este, a pesar de que los conductores de guarda están directamente conectados a la torre y esta a su vez se encuentra conectada a la resistencia de puesta tierra, las sobretensiones se ven más reducidas cuando al sistema de potencia se conectan los descargadores en las fases de las líneas de transmisión, respuesta esperada ya que la función de este dispositivo es limitar el valor de las sobretensiones provocadas en estas.

## RECOMENDACIONES

Los criterios de interpretación de los resultados en el estudio de las sobretensiones electromagnéticas que se realizaron al descargador de sobretensión de Metal-Óxido se fundamentaron en parámetros de referencia que el fabricante del descargador proporciona para las distintas marcas y tipos de los mismos, por lo que si no se dispone de datos del fabricante para interpretar los resultados de las pruebas realizadas, deberá recurrirse a información disponible de descargadores similares.

Se recomienda el acople del programa aquí desarrollado con el de “Análisis de Transitorios Electromagnéticos en Líneas de Transmisión considerando dependencia frecuencial y no uniformidades” [Marisol Dávila, 2002] que se basa también en la aplicación de la Transformada Numérica de Laplace para comparación y comprobación con la prueba realizada en este trabajo con el programa ATP/EMTP.

Como en la actualidad se logró implementar el modelo circuital que caracteriza al descargador de sobretensión de Metal-óxido para estudiar su comportamiento y su interacción con la red ante la presencia de fenómenos electromagnéticos con la implementación de la Transformada Numérica de Laplace, este contribuye para la continuidad en el estudio de los diferentes elementos que componen la red, para de esta manera crear una herramienta poderosa de simulación que permita interactuar todos los posibles elementos modelados que componen el sistema eléctrico y así facilitar su análisis bajo las condiciones que se precise.



## REFERENCIAS

- Bianchi L. R. (2002). ATP para inexpertos. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional de La Plata. Buenos Aires, Argentina.
- Bayadi A.; Harid N. (2003). Simulation of metal oxide surge arrester dynamic behavior under fast transients. The international Conference on Power Systems Transients. Disponible en: <http://www.ipst.org/TechPapers/2003/IPST03Paper14b-1.pdf> . Consultado en Septiembre del 2008.
- Dávila. M. (2002). Análisis de Transitorios electromagnéticos en líneas de Transmisión no uniformes con dependencia frecuencia. Tesis de maestría, CINVESTAV. México.
- Dommel Hermann. (1994). EMTP. Theory Book.
- Durbak, Daniel W. (2001). Surge arrester modeling. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/7330/19809/00916946.pdf?arnumber=916946>. Consultado en Julio del 2008.
- Fernández. F. (2001). Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations. Disponible en: <http://www.herrera.unt.edu.ar/alta-tension/publicaciones/Paper1vf.pdf>. Consultado en Julio del 2008.
- Gómez Z. P. (2007). On the Application of the numerical Laplace transform for accurate electromagnetic transient analysis. Disponible en: <http://www.ejournal.unam.mx/rmf/no533/RMF005300308.pdf>. Consultado Noviembre del 2008.
- Hans Kr Hoidalén. (1998). ATPDRAW, User's Manual version 1.0. Disponible en: <http://uyak03.files.wordpress.com/2008/02/atpdraw-user-manual.pdf>. Consultado en Julio del 2008.
- Hoffman. J.D. (1992). Numerical Methods for Engineers and Scientists, McGraw Hill.
- Juárez V Germán A, (2005). Pruebas predictivas a pararrayos de óxido metálico para alta tensión tipo Subestación. Disponible en: [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_7196.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_7196.pdf). Consultado en Julio del 2008.
- Margil R. Alanis, (2005). Disponible en: <http://gama.fime.uanl.mx/~omeza/pro/EquipoElectrico.pdf> . Consultado en Septiembre del 2008.
- Naredo, José y otros (1998). La Transformada Numérica de Laplace como una Herramienta de

Investigación y Desarrollo en Ingeniería Eléctrica. Guadalajara, México.

Ortiz Helmuth, (2006). Modeling of metal – oxide distribution surge arresters with an intentionally connected series gap. Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá, Colombia.

Peñaloza S. Francisco J. (2001). Simulación de la operación de apartarrayos en líneas de transmisión utilizando el programa ATP/ EMTP. LAPEM.

Pinceti P, M.Giannttoni, (1999). A simplified model for zinc oxide surge arrester, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 14, No.2, pp 393-398.

Sacerdoti. Juan. (2003). Transformada Z. Disponible en: <http://materias.fi.uba.ar/61107/Apuntes/TZ00.pdf>. Consultado en Octubre del 2008.

Saengsirwan, T.; Thipprasert, W. (2004). Lightning Arrester Modeling Using ATP-EMTP. TENCON 2004 IEEE Region 10 Conference. Volume C, Issue, del 21 al 24 Nov.

W, Scott Meyer and Tsu - huei Liu (1987-99).ATP Rule Book. United States of America.