

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“MODELADO DE PARARRAYOS EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN L1005 FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO ATPDRAW”**

**TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA**

**AUTOR: BACH. CARLOS RUBEN CHUÑO VIZARRETA**

**ASESOR: DR. ING. JUAN HERBER GRADOS GAMARRA**

**Callao, febrero, 2019**

**PERÚ**

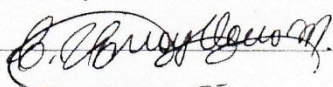
ACTA PARA LA OBTENCION DEL TITULO PROFESIONAL  
POR LA MODALIDAD DE TESIS SIN CICLO DE TESIS

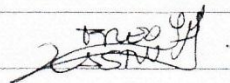
A los 10 días del mes de abril del 2019 siendo las 12:00 horas se reunió el Jurado Examinador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica conformado por los siguientes Docentes Ordinarios de la Universidad Nacional del Callao, (Res. N° 035-2019-DFIEE)

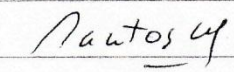
Ing. Carlos Alberto Huayllasco Montalvo	Presidente
Ing. Freidy Adán Castro Salazar	Secretario
Ing. César Augusto Santos Mejía	Vocal

Con el fin de dar inicio a la exposición de Tesis del Señor Bachiller en Ingeniería Eléctrica, quien habiendo cumplido con los requisitos establecidos en la normativa sustentará la Tesis titulada: "MODELADO DE PARARRAYOS EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN L1005 FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO ATPDRAW"

Con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición, considerando lo establecido en el Reglamento de Grados y títulos, correspondiente al otorgamiento del Título Profesional por la Modalidad de Tesis Sin Ciclo de Tesis, efectuadas las deliberaciones pertinentes se acordó: Dar por Aprobado Calificativo Bueno nota: 15 al expositor Señor Bachiller CHUÑO VIZARRETA, CARLOS RUBEN con lo cual se dio por concluida la sesión, siendo las 13:00 horas del día del mes y año en curso.

  
PRESIDENTE

  
SECRETARIO

  
VOCAL

Ms. Ing. CARLOS HUAYLLASCO M.

Ing. Freidy Adán Castro Salazar

Ing. César Santos Mejía

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
OFICINA DE SECRETARÍA GENERAL  
EL SECRETARIO GENERAL DE LA UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO que recibe, CERTIFICA: Que la presente es copia fiel del original. Se expide la presente certificación a solicitud del (a) interesado (a) para los fines que juzgue convenientes

Callao, ... 26 de JUN 2019



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO  
Oficina de Secretaría General  
  
Lic. Cesar Guillermo Jauregui V. Mafuarta  
Secretario General





**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELÉCTRICA**



**“MODELADO DE PARARRAYOS EN LÍNEA DE TRANSMISIÓN L1005 FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO ATPDRAW”**

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO ELECTRICISTA

AUTOR: BACH. CARLOS RUBEN CHUÑO VIZARRETA

ASESOR: DR. ING. JUAN HERBER GRADOS GAMARRA

Callao, febrero, 2019

PERÚ

## **DEDICATORIA**

A mis padres Natalia y Carlos, a mis hermanos Daniel y Sinddy, gracias a su apoyo pude concretar este objetivo.

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero agradecer en primer lugar a Dios, por darme el privilegio de vivir sana y alegremente con mi familia y seres queridos quienes siempre me motivan a ser mejor cada día.

A mi madre Natalia, por su amor y apoyo incondicional desde cuando por primera vez, vi la luz siempre guiándome y orando por mí.

A mi padre Carlos, por su amor, su gran ejemplo de hombre responsable y solidario. Por siempre inculcarnos la importancia del estudio y que es la mejor forma de sobresalir.

A mis hermanos Daniel y Sinddy, por su amistad, soporte y confianza a lo largo de nuestro desarrollo juntos.

A mi alma mater y a mis profesores quienes compartieron conmigo sus enseñanzas y experiencias de la grandiosa carrera de ingeniería Eléctrica.

A la empresa Red de Energía del Perú, por confiar en mi potencial y permitirme aprender de grandes profesionales apasionados por la ingeniería eléctrica.

A mi asesor Dr. Ing. Juan Herber Grados Gamarra, por su apoyo en las correcciones y culminación de mi trabajo de tesis.

## ÍNDICE

CARÁTULA.....	1
DEDICATORIA.....	5
AGRADECIMIENTO.....	6
ÍNDICE.....	7
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
RESUMEN.....	12
ABSTRACT.....	13
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	14
1.1 Determinación del problema.....	14
1.2 Formulación del problema.....	15
1.3 Objetivos de la investigación.....	16
1.4 Justificación.....	17
II. MARCO TEÓRICO.....	18
2.1 Antecedentes del estudio.....	18
2.2 Marco teórico.....	21
2.3 Definición de términos básicos.....	71
III. VARIABLES E HIPÓTESIS.....	73
3.1 Variables de la investigación.....	73
3.2 Operacionalización de variables.....	73
3.3 Hipótesis general y específica.....	73
IV. METODOLOGÍA.....	75
4.1 Tipo de investigación.....	75
4.2 Diseño de la investigación.....	75
4.3 Población y muestra.....	76
4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	78
4.5 Procedimiento de recolección de datos.....	78

V. RESULTADOS .....	79
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	96
VII. CONCLUSIONES.....	98
VIII. RECOMENDACIONES.....	99
IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	100



## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N°1.1:</b> Esquema de la L-1005.....	15
<b>Figura N° 2.1:</b> Representación de un explosor de puntas.....	20
<b>Figura N° 2.2:</b> Pararrayo en L-2051.....	22
<b>Figura N° 2.3:</b> Clasificación de sobretensiones.....	24
<b>Figura N° 2.4:</b> Diferentes tipos de sobretensiones.....	27
<b>Figura N° 2.5:</b> Estructura típica de cargas eléctricas en nube.....	28
<b>Figura N° 2.6:</b> Tipo de descarga nube-suelo.....	29
<b>Figura N° 2.7:</b> Ruptura preliminar región positiva y negativa.....	30
<b>Figura N° 2.8:</b> Líder paso a paso.....	31
<b>Figura N° 2.9:</b> Proceso de conexión.....	32
<b>Figura N° 2.10:</b> Evolución de la etapa de corriente de retorno.....	33
<b>Figura N° 2.11:</b> Líder continuo.....	34
<b>Figura N° 2.12:</b> Etapa de corriente de retorno subsecuente.....	34
<b>Figura N° 2.13:</b> Elemento infinitesimal de una línea.....	36
<b>Figura N° 2.14:</b> Onda incidente vista desde el generador.....	38
<b>Figura N° 2.15:</b> Onda reflejada por la carga.....	39
<b>Figura N° 2.16:</b> Tensión y corriente en línea de transmisión.....	41
<b>Figura N° 2.17:</b> Curva característica $V \times I$ de pararrayo ZnO.....	46
<b>Figura N° 2.18:</b> Archivo plano de entrada del ATP.....	54
<b>Figura N° 2.19:</b> Estructura interna del ATP.....	55
<b>Figura N° 2.20:</b> Programas de apoyo del ATP.....	56
<b>Figura N° 2.21:</b> Datos para fuente tipo Heidler.....	58

<b>Figura N° 2.22:</b> Forma de onda fuente Heidler.....	60
<b>Figura N° 2.23:</b> LCC modelado de línea JMarti.....	63
<b>Figura N° 2.24:</b> Disposición geométrica conductores.....	63
<b>Figura N° 2.25:</b> Datos interruptor controlado por tensión.....	65
<b>Figura N° 2.26:</b> Componente LINEZT_1.....	67
<b>Figura N° 2.27:</b> Componente MOVN pararrayos.....	70
<b>Figura N° 2.28:</b> Datos de operación pararrayos.....	71
<b>Figura N° 4.1:</b> Valor de resistencia PAT L1005.....	77
<b>Figura N° 5.1:</b> Modelo en ATPDraw de la L1005.....	81
<b>Figura N° 5.2:</b> Tensiones de fase en L1005.....	82
<b>Figura N° 5.3:</b> Tensiones de ménsulas en T228.....	83
<b>Figura N° 5.4:</b> Corriente de fuga por T228.....	83
<b>Figura N° 5.5:</b> Impacto de rayo en CG T228.....	84
<b>Figura N°5.6:</b> Back flashover fase B, Rayo 10 kA.....	85
<b>Figura N°5.7:</b> Back flashover fases B y C, Rayo 15 kA.....	86
<b>Figura N°5.8:</b> Back flashover fases B y C, Rayo 20 kA.....	86
<b>Figura N° 5.9:</b> Impacto de rayo fase “C” T228 .....	87
<b>Figura N° 5.10:</b> Flashover fase “C”, rayo 10 kA.....	88
<b>Figura N° 5.11:</b> Flashover fase C y B, rayo 15 kA.....	89
<b>Figura N° 5.12:</b> Flashover fase C y B, rayo 20 kA.....	89
<b>Figura N° 5.13:</b> Impacto rayo en CG, con TLAs en T228.....	90
<b>Figura N° 5.14:</b> Transitorio en tensiones fase, rayo 10kA.....	91

<b>Figura N° 5.15:</b> Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 10kA.....	92
<b>Figura N° 5.16:</b> Corriente de rayo 10kA, aislador fase B.....	92
<b>Figura N° 5.17:</b> Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 15kA.....	93
<b>Figura N° 5.18:</b> Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 20kA.....	93
<b>Figura N° 5.19:</b> L1005 con TLAs, rayo en fase C.....	94
<b>Figura N° 5.20:</b> Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 10kA.....	95
<b>Figura N° 5.21:</b> Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 15 kA.....	96
<b>Figura N° 5.22:</b> Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 20 kA.....	96

## RESUMEN

Desde hace varias décadas la protección de los sistemas eléctricos de potencia ha sido una de las principales razones de los avances tecnológicos en el sector eléctrico. La necesidad de contar con un sistema eléctrico seguro y confiable obliga a las empresas eléctricas a buscar la eficiencia en sus procesos de mantenimiento y operación, de tal forma que se tenga la menor cantidad de interrupciones de los suministros de clientes libres y regulados.

Del sistema eléctrico de potencia, las líneas de transmisión son los elementos que tienen mayor probabilidad de falla, debido a que recorren distancias muy largas por todo el territorio nacional. Por nuestra geografía es muy común que las líneas de transmisión crucen por zonas de alta incidencia de descargas atmosféricas y terreno rocoso con alta resistividad, lo cual no garantiza un buen desempeño de la línea de transmisión.

Diferentes métodos como el mejoramiento de puesta a tierra, aumento de aisladores en cadena de aisladores, mejoramiento del ángulo de blindaje del cable de guarda y la instalación de pararrayos de línea han sido utilizados para mejorar el desempeño de las líneas de transmisión.

El objetivo de la siguiente investigación es presentar una propuesta para mejorar el desempeño de la línea transmisión L1005 frente descargas atmosféricas utilizando los pararrayos de línea y realizando la simulación en el software ATPDraw.

## **ABSTRACT**

For several decades, the protection of electrical power systems has been one of the main reasons for technological advances in the electricity sector. The need to have a safe and reliable electrical system forces electric companies to seek efficiency in their maintenance and operation processes, in such a way that they have the least interruptions in the supply of free and regulated customers.

From the power electrical system, the transmission lines are the elements that are more likely to fail, because they travel very long distances throughout the national territory. In our geography, it's very common for transmission lines to cross areas with high incidence of atmospheric discharges and rocky terrain with high resistivity, which does not guarantee a good performance of transmission lines.

Different methods such as the improvement of grounding, increase of insulators in chain of insulators, improvement of the shielding angle of the guard wire and the installation of line arresters have been used to improve the performance of transmission lines. The objective of the following research is to present a proposal to improve the performance of the L1005 transmission line against atmospheric discharges using the line lightning arresters and performing the simulation in the ATPDraw software.

## **I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.1 Determinación del problema**

El Sistema Eléctrico de Transmisión se encarga de transportar toda la energía eléctrica que generan las diversas centrales eléctricas, a través de líneas de transmisión que recorren la Costa, Sierra y Selva de nuestro país. No obstante, el sistema de transmisión es afectado continuamente por fenómenos naturales como lo son las descargas atmosféricas, la alta vegetación en ciertas zonas (produciendo fallas monofásicas, bifásicas, etc.) y otras razones como la quema de vegetación debajo de las líneas de transmisión, errores humanos al momento de realizar las maniobras de operación, etc.

El grupo ISA es la empresa líder en transmisión de energía eléctrica y está encargada de la construcción, operación y mantenimiento de las líneas de transmisión y subestaciones. Actualmente cuenta con más de 10 mil kilómetros de líneas de transmisión en diferentes niveles de tensión: 500 kV, 220 kV, etc. Por lo que debe garantizar la confiabilidad del servicio.

Nos enfocaremos a estudiar la problemática de la Línea de transmisión Tintaya - Quencoro L-1005 de 138 kV, que es una línea simple circuito en disposición triangular con una longitud de 188km, conformada por estructuras metálicas y un solo cable de guarda. Esta línea entró en operación comercial en el año 1991.

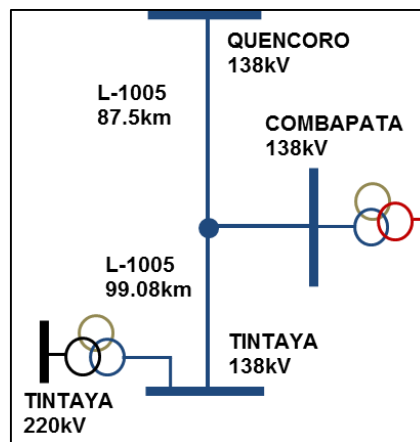
En los últimos 4 años se ha observado que la línea presenta una elevada tasa de desconexión por falla debido a descargas atmosféricas presentes

en las zonas cuya resistividad del suelo es elevada y de alto nivel isocerámico ocasionando interrupción de suministro.

## 1.2 Formulación del problema

La elevada tasa de desconexiones por falla debido a descargas atmosféricas en la línea L-1005, genera el incumplimiento de la NTCSE y posteriormente el pago de compensaciones económicas a los clientes. Esto se debe a la configuración especial que tiene la línea L-1005, la cual posee una derivación tipo "T" que alimenta a la SE Combapata. Al ocurrir una falla en la línea L-1005, ocasiona interrupción de suministro en las ciudades de Combapata, Sicuani, Ttio, Accha, Chara, Chamaca que son alimentadas desde la SE Combapata.

**Figura N°1.1:** Esquema de la L-1005



**Fuente:** Elaboración propia

### **1.2.1 Problema General**

¿Es posible mejorar el desempeño de la línea de transmisión L1005 (Quencoro – Tintaya) frente a descargas atmosféricas?

### **1.2.2 Problemas Específicos**

**PE1:** ¿Es posible obtener una respuesta casi real del comportamiento de la línea de transmisión L1005 con pararrayos de línea frente a descargas atmosféricas en el software ATPDraw?

**PE2:** ¿Será necesario realizar el modelado de todas las torres de la línea de transmisión L1005 en el software ATPDraw?

## **1.3 Objetivos de la investigación**

### **1.3.1. Objetivo general**

Realizar el modelado de la línea de transmisión L1005 (Quencoro – Tintaya) utilizando los pararrayos de línea de ZnO (óxido de zinc) en el software ATPDraw para evaluar su desempeño frente a descargas atmosféricas.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

**OE1:** Identificar y definir los modelos correctos a utilizar, para el estudio de transitorios electromagnéticos en la línea transmisión L1005 mediante el software ATPDraw.

**OE2:** Identificar los vanos críticos de la línea de transmisión L1005, en donde se tienen altos valores de resistencia de puesta a tierra y mayor incidencia de descargas atmosféricas para modelar en ATPDraw.



#### **1.4 Justificación**

El Sector Eléctrico Peruano se encuentra regulado y fiscalizado por el OSINERGMIN, MINEM, LCE, CNE, reglamentos y además por la NTCSE (Norma técnica de calidad de los servicios eléctricos).

La NTCSE tiene dos parámetros de calidad que al ser incumplidas afectan directamente a la empresa de transmisión Red de Energía del Perú, estos son:

- Calidad del producto: referida a la tensión.
- Calidad del suministro: que involucra al número de interrupciones, el rechazo de carga automático por mínima frecuencia y el rechazo de carga manual por mínima tensión.

Debido a la elevada tasa de desconexión por falla que ha venido presentando la línea de transmisión L-1005 en los últimos cuatro años (principalmente por descargas atmosféricas) el número de interrupciones por semestre ha superado el límite permitido por la NTCSE, incumpliendo en el parámetro calidad del suministro.

Por tal motivo la empresa Red de Energía del Perú ha sido multada con el pago de compensaciones económicas hacia sus clientes por incumplimiento de la NTCSE, además de gastos no programados para atender mantenimientos correctivos e inspecciones minuciosas cuando ocurren las fallas. Otro factor importante es el malestar social que se genera en las comunidades por los constantes cortes de energía eléctrica.

## **II. MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Antecedentes del estudio**

#### **Tormenta eléctrica y el pararrayo**

A mediados del siglo XVIII Benjamín Franklin realizaba experimentos con las nubes, siendo su objeto de investigación las tormentas eléctricas. Franklin quería demostrar que sus conjeturas eran ciertas. Él afirmaba que los rayos estaban repletos de cargas eléctricas, por lo que construyó una cometa de estructura metálica, esta poseía un alambre puntiagudo y estaba amarrada con un hilo de seda. Un día muy nublado Franklin sacó a volar la cometa y pudo comprobar que la estructura metálica de la cometa atraía los rayos y se cargaba eléctricamente.

Así él pudo determinar que los objetos metálicos puntiagudos facilitaban la descarga de los cuerpos electrizados. Sus experimentos le llevaron a crear el primer pararrayos de la historia, el cual consistía en una barra de hierro que era ubicado en los puntos más altos de las edificaciones y conectados a tierra por medio de un alambre. De esta forma se obtuvo el primer sistema de protección frente a los rayos, un fenómeno que parecía incontrolable para la época.

#### **Pararrayos en líneas de transmisión**

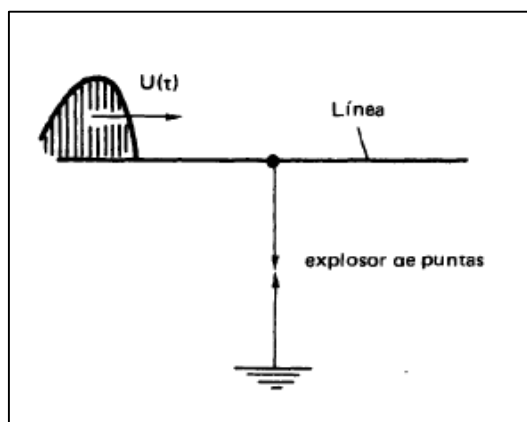
Desde las primeras décadas del siglo XX, las líneas de transmisión vienen recorriendo distancias por encima de los 100 kilómetros, logrando

transportar la electricidad de los centros de generación a casi todas las ciudades del mundo.

Es así que el rayo se convirtió en una de las principales amenazas para las líneas de transmisión, ocasionando elevados índices de desconexión. En un principio no se tenían mayores conocimientos sobre este tipo de fenómeno, tampoco existían los instrumentos y dispositivos adecuados para su estudio y análisis. Con el desarrollo del osciloscopio de rayos catódicos se inició un estudio sistemático del rayo como descarga atmosférica y sus efectos sobre las líneas de transmisión en esa época.

El primer dispositivo utilizado para enviar a tierra las descargas atmosféricas en líneas de transmisión fue un simple explosor de puntas, cuando la sobretensión alcanzaba la característica de choque del explosor, este enviaba a tierra la corriente asociada al rayo.

**Figura N° 2.1:** Representación de un explosor de puntas



**Fuente:** Siegert L. (2002), Alta Tensión y Sistemas de Transmisión

Con estos primeros pararrayos se mejoró el funcionamiento de las líneas, pero el alto costo de mantenimiento y la corta vida útil de estos equipos, dejaron obsoleta esta tecnología.

Con el descubrimiento de los óxidos metálicos y sus aplicaciones para los pararrayos tipo estación, se inició en 1981 un programa para examinar si se podía aplicar esta tecnología en las líneas de transmisión, a fin de solucionar los problemas concernientes a flameos de cadenas de aisladores debido al impacto de los rayos y que no eran resueltos por el blindaje del cable de guarda. (Tobías, 1995, p.26)

Los pararrayos de óxido de zinc (ZnO) con explosores en serie fueron desarrollados e instalados en 1983 por Appalachian Power Company, en el área de Roanoke, Virginia, Estados Unidos en una línea de 138 kV. El objetivo de investigación de esta compañía estaba centrado en explorar los medios para reducir el flameo de aisladores en las localidades expuestas, donde no era posible obtener una baja resistencia de puesta a tierra. Los resultados obtenidos luego de la instalación de los pararrayos, indicaron una mejora en el funcionamiento de la línea a través de una reducción en el número de salidas por descargas atmosféricas en el año. (Tobías, 1995, p.27)

En los siguientes años se desarrolló el material polimérico, el cual reemplazó a la porcelana en la fabricación de pararrayos de línea. El pararrayo polimérico poseía gran resistencia mecánica y soportaba

eficazmente las condiciones ambientales extremas en donde eran instalados, aliviando a los pararrayos de las subestaciones y reduciendo el riesgo de explosión. Muchas empresas norteamericanas iniciaron estudios utilizando como protección principal los pararrayos de línea y dejando de lado el blindaje común del cable de guarda, instalándose los pararrayos en zonas donde había gran incidencia de tormentas eléctricas y dejando las otras zonas libres de protección.

**Figura N° 2.2:** Pararrayo de línea en L-2051



**Fuente:** Elaboración propia

## **2.2 Marco teórico**

### **Introducción a las sobretensiones**

Las sobretensiones son cualquier valor de tensión entre fases o fase – tierra, cuyo valor pico está por encima de la tensión nominal del sistema.

La tensión en el sistema eléctrico es variable y depende de las condiciones del sistema como, por ejemplo: cortocircuitos, oscilaciones de potencia, rechazos de carga, etc.

Las sobretensiones externas son originadas fuera del sistema en consideración siendo su principal fuente las descargas atmosféricas, en cambio las de origen interno son causados por eventos dentro del sistema de potencia, como, por ejemplo: maniobras voluntarias de interruptores ó cortocircuitos. (D'Ajuz, Fonseca, 1987, p.35)

La clasificación de las sobretensiones según su forma y duración, de acuerdo a la Norma IEC 60071 – 1 es la siguiente:

- a) Tensión de frecuencia industrial permanente
- b) Sobretensiones temporales
- c) Sobretensiones transitorias
  - Sobretensiones de frente lento
  - Sobretensiones de frente rápido
  - Sobretensiones de frente muy rápido
- d) Sobretensiones combinadas

**Figura N° 2.3:** Clasificación de sobretensiones

Clases de sobrevoltajes	Baja Frecuencia		Transitorios		
	Permanente	Temporal	Frente lento	Frente Rápido	Frente Muy Rápido
Forma de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Rango de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f=50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1 \geq 3600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_1 \leq 3600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} \leq T_p \leq 5000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} \leq T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \text{ ms}$	$3 \text{ ns} < T_r \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$ $T_1 \leq 3 \text{ ms}$
Parámetros de voltaje estandarizado	$f=50 \text{ Hz} \text{ ó } 60 \text{ Hz}$ $T_1$ (*)	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_1 = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	(*)
Ensayo de voltaje tolerado normalizado	(*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo de impulso tipo maniobra	Ensayo de impulso tipo rayo	(*)

(\*) a especificar por el comité del producto considerado

**Fuente:** Paredes S. (2011) Universidad de Cuenca

### Tensión de frecuencia industrial permanente

Es la tensión a frecuencia nominal, debido al funcionamiento del sistema en condiciones normales de operación. Es normal tener pequeñas variaciones de tensión respecto a la tensión nominal, debido a variaciones en la carga, en la generación y necesidades de la operación. Las variaciones de tensión se encuentran limitadas por el CNE y NTCSE en un  $\pm 5\%$  de la tensión nominal.

El aislamiento de los equipos debe ser capaz de soportar la máxima tensión de operación frente a emergencias cuyas tensiones son 145 kV, 245 kV y 550 kV para las tensiones nominales en Perú 138 kV, 220 kV y 500 kV respectivamente.

## **Sobretensión temporaria**

Es una sobretensión fase – tierra ó entre fases en un punto dado del sistema, cuya principal característica es su larga duración con bajo amortiguamiento. También se le conoce como sobretensiones sostenidas ya que persisten en el sistema hasta que él mismo sea modificado ó que se haya eliminado la causa que dio origen a las sobretensiones. (D'Ajuz, Fonseca, 1987, p.35)

Las amplitudes de estas sobretensiones son menores respecto a los otros tipos de sobretensiones, pero puede ser determinante en el diseño del aislamiento interno y externo de los equipos.

Las sobretensiones temporales generalmente son causadas por:

- Maniobras, por ejemplo, rechazo de carga.
- Fallas, por ejemplo, cortocircuito monofásico.

Puede ser caracterizadas por:

- Su amplitud es menor a 1,5 p.u.
- Su frecuencia de oscilación es menor, igual ó mayor que la fundamental.
- Su tiempo de duración es superior a las decenas de milisegundos.

## **Sobretensiones transitorias de frente lento**

Son sobretensiones que aparecen en un punto del sistema, debido a la operación de equipos de maniobra ó alguna variación brusca en la red.



También se le conoce como sobretensión de maniobra y generalmente son fuertemente amortiguada y de corta duración. La expresión corta duración sirve para caracterizar el tiempo de frente de onda y el tiempo de cola. En base a estos dos parámetros se puede distinguir entre las sobretensiones de maniobra y atmosférica. Así las sobretensiones con tiempo de frente entre 100 y 500  $\mu\text{s}$  (que corresponden a las frecuencias entre 10 kHz y 2 kHz) con tiempo de cola de 2500  $\mu\text{s}$  son consideradas normalmente como sobretensiones de maniobra. (D'Ajuz, Fonseca, 1987, p.36)

La probabilidad de ocurrencia aumenta según se incremente el nivel de tensión de la red, el número de fallas y operaciones de maniobra en el sistema. La magnitud es influenciada por la configuración del sistema, por la potencia de cortocircuito y por las características de los equipos. Pueden ser reducidas por la compensación paralela, resistencias de pre inserción, etc. La determinación de las sobretensiones de maniobra es normalmente realizada por programas digitales que permiten analizar transitorios electromagnéticos en redes eléctricas, uno de los más conocidos es el Alternative Transient Program (ATP) y es el que utilizaremos para el modelado de equipos y posterior simulación.

### **Sobretensiones transitorias de frente rápido**

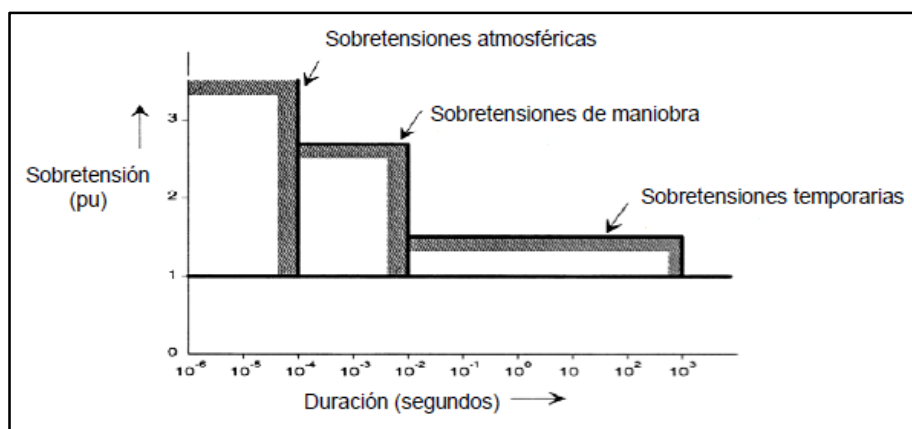
Las sobretensiones transitorias de frente rápido son también conocidas como sobretensiones por descargas atmosféricas. Se caracterizan por ser de muy corta duración, de varios microsegundos y normalmente alcanzan

picos de tensión por encima de la nominal hasta 6 pu. La causa más frecuente de esta sobretensión son los rayos, ya sea por impacto directo o indirecto.

Las sobretensiones con tiempo de frente de onda hasta 20  $\mu\text{s}$  (que corresponden a las frecuencias mayores de 50 kHz) con un tiempo de cola hasta 50  $\mu\text{s}$  son generalmente consideradas como descargas.

La incidencia de descargas atmosféricas directamente en las subestaciones es un evento de baja probabilidad de ocurrencia, en comparación con las líneas de transmisión donde las áreas de exposición son mayores. Con la finalidad de evitar que las fallas sean constantes, se han implementado a lo largo de décadas varios sistemas protección, por ejemplo, la instalación ó mejoramiento del apantallamiento por medio de cables de guarda, mejoramiento del sistema de puesta tierra, aumentar la longitud de las cadenas de aisladores e instalar pararrayos de líneas.

**Figura N° 2.4:** Diferentes tipos de sobretensiones



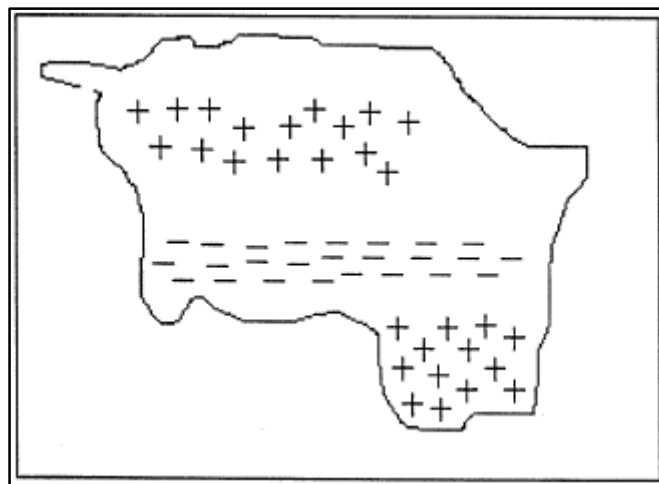
**Fuente:** D'Ajuz A. (1987) Transitorios eléctricos e Cordenacao de Isolamento

## Descargas atmosféricas

Las descargas atmosféricas son normalmente asociadas a las nubes de tormenta, pero ahora se sabe que otros fenómenos pueden ocasionarlas, tales como erupciones volcánicas, tormentas de arena, etc. Para el desarrollo de este trabajo las descargas atmosféricas se consideran provenientes de las nubes de tormenta y cuya formación es debido a la colisión de partículas de hielo de diferentes tamaños, acción de la gravedad, variación de temperatura, corrientes de aire ascendentes y descendentes al interior de la nube, entre otros factores.

La estructura típica de una nube es mostrada en la figura 2.5 donde se observa la presencia de cargas positivas en la base y cima de la nube, en la parte media de la nube hay concentración de cargas negativas

**Figura N° 2.5:** Estructura típica de cargas eléctricas en nube.

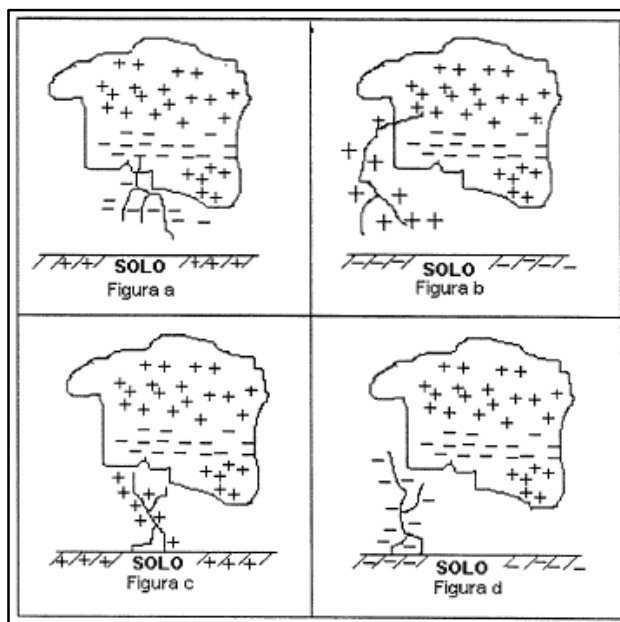


**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

La descarga atmosférica nube-suelo es la más estudiada por ser la que causa más desconexiones en las líneas de transmisión, accidentes hacia las personas e incendios forestales, etc. Este tipo de descarga se puede propagar de cuatro maneras diferentes

- a) Descendente de polaridad negativa
- b) Descendente de polaridad positiva
- c) Ascendente de polaridad negativa
- d) Ascendente de polaridad positiva, según muestra la figura 2.6.

**Figura N° 2.6:** Tipo de descarga nube-suelo



**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

### **Etapas de ruptura preliminar entre las regiones positiva y negativa**

En la figura 2.7 se muestra la fase de ruptura preliminar que ocurre entre las regiones positiva y negativa en la base de la nube. Esto debido a las

corrientes de aire ascendentes y descendentes, variaciones en la temperatura que originan el rozamiento entre las partículas de hielo. En esta etapa las cargas negativas se preparan para ser canalizadas en su movimiento descendente hacia el suelo en forma de pequeños pasos luminosos. Todavía no se tiene totalmente explicado este fenómeno, esta etapa precede a la etapa de líder paso a paso. (Da Silva, 2001, p.8)

**Figura N° 2.7:** Ruptura preliminar región positiva y negativa



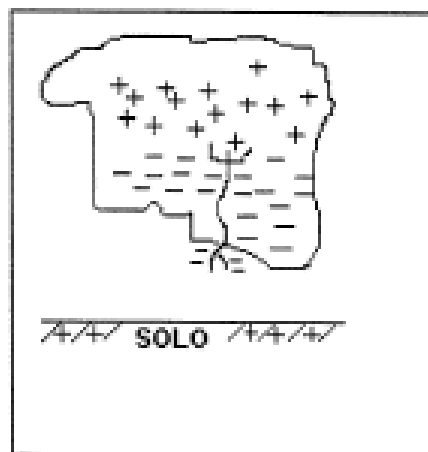
**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

### **Etapa de líder paso a paso**

El líder paso a paso se propaga en dirección a tierra por un camino tortuoso y en pasos, de acuerdo a la figura 2.8. Los pasos del líder tienen una duración típica de 1  $\mu$ s y decenas de metros de longitud. La longitud de los líderes paso a paso varían entre 10 y 50m, buscando el camino más fácil para la formación del canal de propagación de cargas al suelo. Entre cada paso existe una pausa de 20 a 50  $\mu$ s. (Da Silva, 2001, p.8)

Cuando el líder paso a paso se encuentra a decenas de metros del suelo, la diferencia de potencial existente entre la punta del líder y el suelo alcanza valores de 100 millones de voltios. Esto origina un campo eléctrico de intensidad elevada, creando las condiciones para que salga uno o más líderes ascendentes del suelo, denominados líderes conectantes. Cuando el líder conectante se encuentra con el líder paso a paso, se inicia el proceso de conexión. (Da Silva, 2001, p.9)

**Figura N° 2.8:** Líder paso a paso



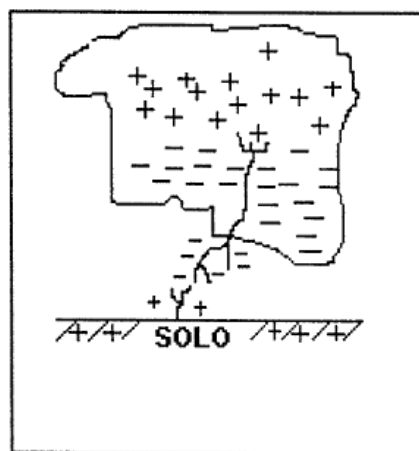
**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

### **Etapas del proceso de conexión**

Los líderes conectantes ascendentes normalmente se forman a partir de árboles, predios, torres o personas cuando se encuentran en zonas abiertas. La figura 2.9 muestra el inicio del proceso de conexión entre líder paso a paso y el líder conectante ascendente.

Cuando estos dos líderes se encuentran, el líder paso a paso es efectivamente conectado al potencial de tierra, dando inicio a la etapa más significativa para el estudio de protecciones, que es la etapa de corriente de retorno.

**Figura N° 2.9:** Proceso de conexión



**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

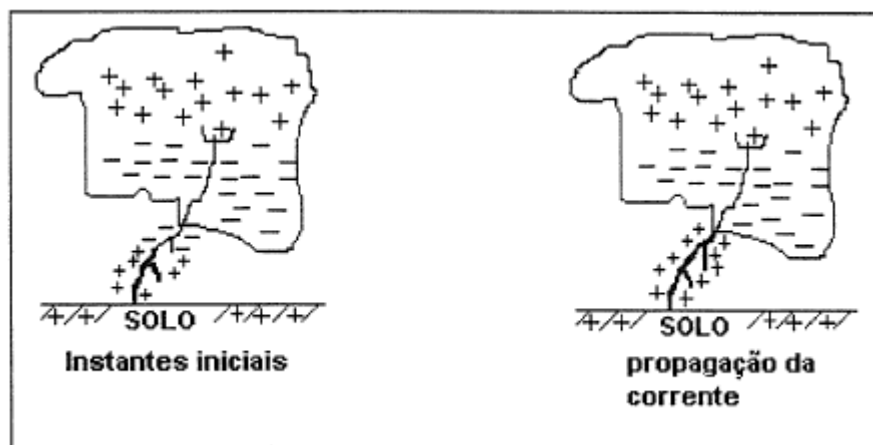
### **Etapa de primera corriente de retorno**

La etapa de corriente de retorno es caracterizada por una onda ionizante que descarga el canal previamente cargado y creado por el líder paso a paso, según la figura 2.10. La velocidad de propagación de corriente de retorno varia de 100 000 km/s a 150 000 km/s cerca al suelo.

La corriente de retorno posee un valor de pico de 30 kA al nivel del suelo, con un tiempo de frente de onda de pocos microsegundos y tiempo de cola en torno a 50  $\mu$ s. Esta etapa de corriente de retorno es la más significativa

para los cálculos de tensiones inducidas, ya que las intensidades de corriente son elevadas y con altas tasas de crecimiento, provocando variaciones de campo que inducen elevados valores de tensión en los equipamientos. (Da Silva, 2001, p.10)

**Figura N° 2.10:** Evolución de la etapa de corriente de retorno



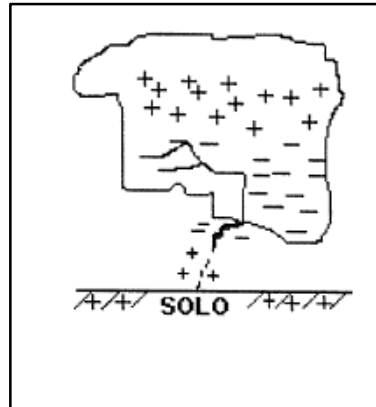
**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

### **Etapa de líder continuo**

En la etapa del líder continuo las cargas se movilizan en dirección al suelo casi siempre por el mismo camino del canal de etapa de corriente de retorno, solo que generalmente no posee ramificaciones. Los valores de corriente de esta etapa son del orden de centenas de amperes, con una velocidad en torno de 3000 km/s. El líder continuo es generalmente seguido por corrientes de retorno subsecuentes. En algunos casos el proceso puede acabar en este punto o se modifica un nuevo líder paso a paso.



**Figura N° 2.11:** Lider continuo

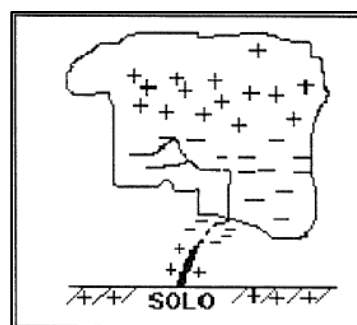


**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

### **Etapa de corriente de retorno subsecuente**

Las corrientes de retorno subsecuente poseen velocidades de propagación más elevadas, frentes de onda más rápidos, picos de corriente en tiempos menores y normalmente menores intensidades de corriente que en la etapa de corriente de retorno. El valor más representativo es de 3 a 4 corrientes de retorno subsecuente. (Da Silva, 2001, p12)

**Figura N° 2.12:** Etapa de corriente de retorno subsecuente



**Fuente:** Da Silva J. (2001) Calculo de tensao induzida por descarga atmosférica

## **Transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión**

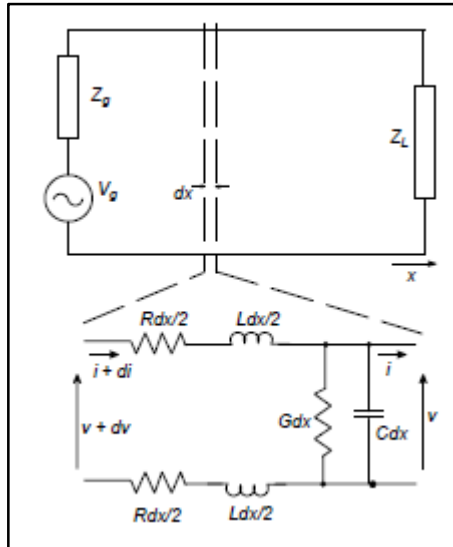
Las líneas de transmisión están formadas por conductores eléctricos que poseen una disposición geométrica, la cual determina las características de las ondas electromagnéticas que viajan a través de ella. En una línea de transmisión la resistencia, inductancia, capacitancia y conductancia están distribuidas uniformemente a lo largo de la línea, por lo que es necesario utilizar las ecuaciones del campo electromagnético.

Cuando una línea de transmisión se somete a una perturbación, como la de un rayo o una maniobra de conexión, surgen ondas de voltaje y corriente que viajan a lo largo de la línea a una velocidad cercana a la de la luz. Cuando estas ondas llegan a los terminales de la línea, surgen ondas reflejadas de tensión y corriente que viajan de regreso por la línea, sobrepuestas a las ondas iniciales. Debido a las pérdidas en la línea, las ondas que viajan son atenuadas y desaparecen después de algunas reflexiones.

## **Ecuaciones de la línea de transmisión**

Suponemos un elemento infinitesimal de una línea abierta de dos conductores paralelo con parámetros  $R$ ,  $L$ ,  $C$  y  $G$ , los cuales pueden suponerse tan pequeños como se quiera de modo que los parámetros del circuito puedan considerarse concentrados, tal como la siguiente figura.

**Figura N° 2.13:** Elemento infinitesimal de una línea



**Fuente:** Vega P. (2007) Sistema de telecomunicaciones

Se puede considerar que el valor de la resistencia de este elemento infinitesimal es  $Rdx$ , ya que la resistencia por unidad de longitud está distribuida en dos ramas de longitud  $dx$ . Se observa que la capacitancia y conductancia en paralelo están concentrados en un solo elemento. El voltaje y la corriente a la entrada del elemento infinitesimal son  $v + dv$  e  $i + di$ , respectivamente y a la salida,  $v$  e  $i$ . La caída de tensión a lo largo de  $dx$  es  $dv$  y la corriente  $di$  circula a través de la conductancia y la capacidad.

Suponiendo variaciones senoidales para el voltaje y la corriente, podemos aplicar las leyes de Kirchhoff al circuito anterior que ahora es de parámetros concentrados:

$$dv = i(R + j\omega L)dx \tag{1}$$

$$di = v(G + j\omega C)dx \quad (2)$$

$$\frac{dv}{dx} = (R + j\omega L)i = zi \quad (3)$$

$$\frac{di}{dx} = (G + j\omega C)v = yv \quad (4)$$

Donde  $z = R + j\omega L$ , es la impedancia en serie por unidad de longitud e  $y = G + j\omega C$ , la admitancia en paralelo, también por unidad de longitud.

Tomando la segunda derivada de las ecuaciones anteriores se tiene:

$$\frac{d^2v}{dx^2} = zyv \quad (5)$$

$$\frac{d^2i}{dx^2} = zyi \quad (6)$$

La solución general de las ecuaciones (5) y (6) puede expresarse como:

$$V(x) = V^+e^{-\gamma x} + V^-e^{\gamma x} \quad (7)$$

$$I(x) = I^+e^{-\gamma x} + I^-e^{\gamma x} \quad (8)$$

Donde: 
$$\gamma = \sqrt{zy} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (9)$$

Se define como constante de propagación de la línea, como se ve en (9) es compleja y puede escribirse como:

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (10)$$

Donde  $\alpha$  es la constante de atenuación, expresada en nepers/m y  $\beta$  la constante de fase en rad/m.

Las ecuaciones (7) y (8) son las soluciones de la ecuación de onda para la tensión y la corriente en la línea y conviene analizar su significado, utilizando para ello la ecuación (7), siendo la argumentación igualmente válida para la (8). (Perez, 2007, p.282)

La ecuación (7) representa una onda de voltaje vista desde el extremo generador que, con ayuda de (10) puede escribirse como:

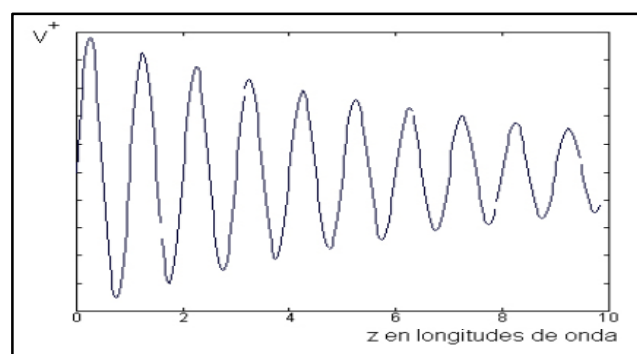
$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j\beta x} + V^- e^{\alpha x} e^{j\beta x} \quad (11)$$

En función del tiempo en forma compleja:

$$V(x) = V^+ e^{-\alpha x} e^{-j(\omega t - \beta x)} + V^- e^{\alpha x} e^{j(\omega t + \beta x)} \quad (12)$$

El primer término de la derecha representa un voltaje de amplitud  $V^+$  en el extremo del generador, que decrece exponencialmente a lo largo de la línea según  $e^{-\alpha x}$  como se muestra en la figura 2.14. Esta componente de la onda, que viaja del generador hacia la carga se designa como onda incidente. (Perez, 2007, p.283)

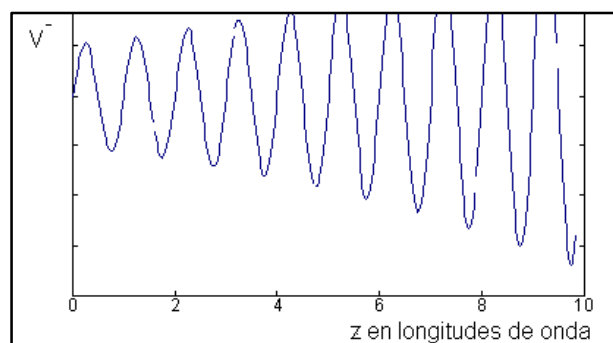
**Figura N° 2.14:** Onda incidente vista desde el generador



**Fuente:** Perez V. (2007) Sistema de telecomunicaciones

El segundo término de la derecha representa una onda de voltaje que viaja en dirección opuesta a la onda incidente, cuya amplitud en el extremo del generador es  $V^-$ . Vista desde el generador, la amplitud de la onda es creciente al aumentar  $X$ , se trata de una onda reflejada por la carga.

**Figura N° 2.15:** Onda reflejada por la carga



**Fuente:** Perez V. (2007) Sistema de telecomunicaciones

Las gráficas anteriores no están trazadas respecto al tiempo, sino a la distancia desde el generador, el cual se ha designado como  $X$  y representa la distribución del voltaje a lo largo de la línea. La distribución del voltaje en la línea está dada por la suma de las ondas incidente y reflejada como indica la ecuación (7) lo que da lugar a una onda estacionaria a lo largo de la línea. (Perez, 2007, p.284)

### **Impedancia característica**

En las ecuaciones (7) y (8)  $V^+$ ,  $V^-$ ,  $I^+$  e  $I^-$  son las constantes de integración cuyos valores resultan de aplicar las condiciones de frontera a la solución de las ecuaciones de la línea. Tales condiciones de frontera están

representadas aquí por la impedancia de carga y el voltaje aplicado a la línea. De estas cuatro constantes, solamente dos son independientes, ya que:

$$I^+ = \frac{V^+}{\sqrt{\frac{z}{y}}} = \frac{V^+}{Z_0} \quad (13)$$

$$I^- = -\frac{V^-}{Z_0} \quad (14)$$

Donde:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \quad (15)$$

Se define como impedancia característica de la línea que, junto con la constante de propagación, se designan como parámetros secundarios de la línea y son independientes de la longitud de ésta. La impedancia característica de una línea depende de la permitividad, permeabilidad, frecuencia y geometría de la línea. Como se ve de (15) la impedancia característica es en general compleja, es decir: (Perez, 2007, p.285)

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \quad (16)$$

Si la frecuencia es suficientemente alta como para que se cumpla que  $R \ll \omega L$  y  $G \ll \omega C$ , (15) puede aproximarse como:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (17)$$

En tales condiciones la impedancia característica es real, puramente resistiva y no depende de la frecuencia, únicamente de la inductancia y capacidad distribuidas y esta última a su vez de la permitividad del dieléctrico. Entonces la impedancia característica, es una propiedad geométrica de la línea y es independiente de la longitud de la línea.

### **Coefficiente de reflexión**

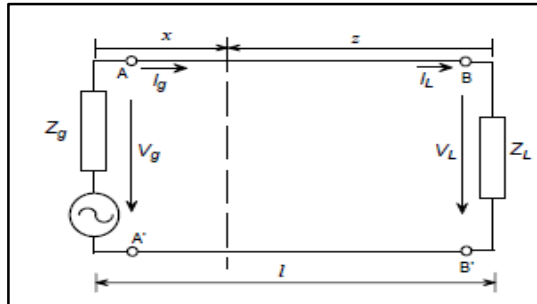
Las expresiones (7) y (8) representan la tensión y corriente a lo largo de la línea de transmisión, con dos componentes, una onda directa que viaja del generador hacia la carga y otra que viaja de la carga hacia el generador. De acuerdo con esto, la onda reflejada en la línea de transmisión puede describirse como un voltaje, acompañado de una corriente que circula de la carga hacia el generador y que decrece exponencialmente según se aleja de la carga. Así, la tensión reflejada puede expresarse en términos desde la distancia medida de la carga  $z$  como:

$$V(z) = V_L e^{-\gamma z}$$

$$I(z) = -\frac{V(z)}{Z_0} = -\frac{V_L}{Z_0} e^{-\gamma z} \quad (18)$$



**Figura N° 2.16:** Tensión y corriente en línea de transmisión



**Fuente:** Vega P. (2007) Sistema de telecomunicaciones

En la figura 2.16 se indican las tensiones y corrientes en la línea de transmisión:

$Z_g$  = Impedancia interna del generador.

$V_g$  = Voltaje en los terminales del generador.

$I_g$  = Corriente en el extremo del generador.

$Z_L$  = Impedancia de carga.

$V_L$  = Voltaje en los terminales de carga.

$I_L$  = Corriente en el extremo de la carga.

$Z$  = Distancia medida desde el extremo de la carga.

Ahora bien, el voltaje en las terminales de la carga es la suma de dos voltajes: el incidente, debido al generador,  $V_i$ , y otro reflejado por la carga,  $V_r$ . La relación entre el voltaje reflejado y el incidente se designa como coeficiente de reflexión,  $\Gamma$ :

$$\Gamma = \frac{V_r}{V_i} = \frac{Z_L/Z_0 - 1}{Z_L/Z_0 + 1} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (19)$$

El coeficiente de reflexión es, en general, complejo y, aunque se expresa en términos de la situación en la carga, puede expresarse en cualquier punto a distancia  $z$  de ésta como:

$$\Gamma(z) = |\Gamma_L| e^{-2\alpha z} \quad (20)$$

Donde  $\Gamma_L$  es el valor del coeficiente de reflexión en la carga, dado por la magnitud de (19). Cuando la atenuación en la línea es cero ( $\alpha=0$ ), el coeficiente de reflexión tiene la misma magnitud en toda la línea, pero si  $\alpha \neq 0$ , la magnitud de la onda reflejada se reduce según aumenta la distancia a la carga como indica (20).

La relación entre el voltaje y la corriente en la carga y los voltajes de las ondas incidentes y reflejada puede deducirse de las ecuaciones anteriores y está dado por:

$$V_i = \frac{V_L}{1 + \Gamma} = \frac{V_L + I_L Z_0}{2} \quad (21)$$

$$V_r = \Gamma V_i = \frac{\rho V_L}{1 + \Gamma} = \frac{V_L - I_L Z_0}{2} \quad (22)$$

El voltaje y la corriente en un punto dado de la línea de transmisión son la suma de los voltajes y corrientes de la onda incidente y reflejada, respectivamente, según se definen (21). Estos resultados pueden escribirse también en términos de funciones hiperbólicas:

$$V(z) = V_L \cosh \gamma z + I_L Z_0 \sinh \gamma z \quad (23)$$

$$I(z) = I_L \cos hyz + \frac{V_L}{z_0} \text{sen } hyz \quad (24)$$

### **Pararrayos de línea**

Los pararrayos de líneas son dispositivos de protección que se instalan en las líneas del sistema eléctrico de potencia y sirven para reducir las sobretensiones transitorias que pueden ser provocadas por descargas atmosféricas, maniobras, etc. evitando que se supere el nivel de aislamiento de las cadenas de aisladores y por consecuencia la desconexión de la línea de transmisión.

La aplicación de los pararrayos para mejorar el desempeño de las líneas de transmisión fue apenas a final de la década de los 70, pero ciertos equipamientos de protección contra descargas atmosféricas ya venían siendo utilizados hace más de 100 años, desde un inicio las líneas de transmisión se protegían por medio de explosores de puntas, descargadores catódicos, descargadores de expulsión.

En estos explosores la ignición del arco eléctrico ocurría con una tensión relativamente baja, la suficiente para proporcionar una excelente protección contra descargas atmosféricas, pero insuficiente para extinguir la corriente a frecuencia industrial, a menos que una resistencia de alto valor fuera conectado en serie.

En el año 1908 surgió el primer equipamiento empleando un elemento no lineal. Este dispositivo de protección era compuesto de un gap esférico en serie con un tanque conteniendo células no lineales a base de aluminio.

Este equipamiento representó una buena limitación de corriente, pero las tensiones de descargas eran muy altas y aleatorias, además del tamaño propio del equipo. (De Oliveira, 2013, p.20)

En 1930, surgieron los resistores lineales a base de carburo de silicio (SiC). Estas resistencias asociadas con un conjunto de espinterómetros, producían una protección más eficaz que los equipos usados hasta ese momento. Las resistencias a base de carburo de silicio (SiC) posibilitaron la creación de pararrayos de menores tamaños y con tensiones de disparo significativamente reducidas. Hasta el día de hoy siguen siendo utilizados, pero con el desarrollo y perfeccionamiento de nuevos materiales, su utilización en algunos años será inviable. (De Oliveira, 2013, p.20)

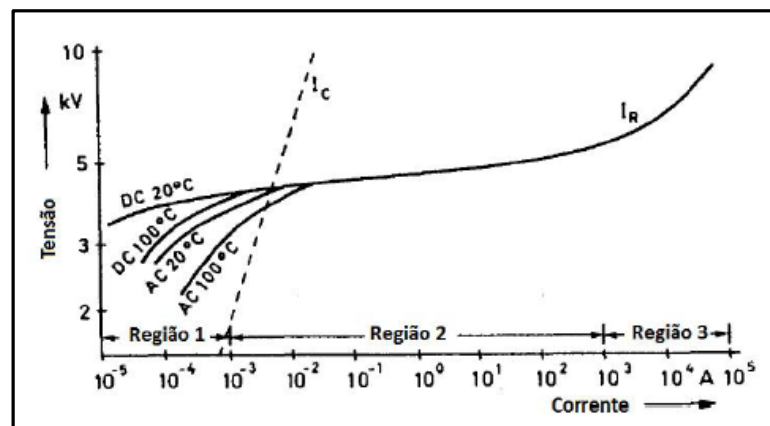
A mediados de los años 70, surgieron los varistores de óxido metálico capaces de soportar las elevadas tensiones nominales de los sistemas eléctricos de potencia sin necesidad de usar espinterómetros. Este nuevo material posibilitó la creación de los pararrayos de óxido metálico, cuya capacidad de absorción de energía es dos veces mayor que la de pararrayos de carburo de silicio. Debido al desconocimiento sobre la estabilidad y vida útil de los materiales de óxido metálico, los primeros pararrayos de óxido metálico contenían espinterómetros para reducir la tensión de frecuencia industrial colocada entre los bloques. Con un conocimiento mayor de las propiedades del material los espinterómetros fueron retirados.

La aplicación de los pararrayos de óxido metálico para líneas de transmisión se inició en los años 80 en las líneas de 66, 77 y 138 kV. En la actualidad los pararrayos instalados en las subestaciones y líneas de transmisión son de óxido metálico, debido a que poseen mejores ventajas que los pararrayos de carburo de silicio.

### Características de los pararrayos de óxido de zinc

Un factor muy importante para entender el comportamiento de un pararrayos de óxido de zinc es la curva característica de  $V \times I$ .

**Figura N° 2.17:** Curva característica  $V \times I$  de pararrayo óxido de zinc



**Fuente:** De Oliveira P. (2013) Estudos da absorcao de energia do para-raios ZnO

Esta curva tiene una característica no lineal y puede ser dividida en tres regiones. La región 1 es la de máxima tensión de operación continua del pararrayos (**MCOV**), es decir es la máxima tensión eficaz (**rms**) fase-tierra a frecuencia industrial que puede ser aplicado continuamente al pararrayos. Este valor de tensión es proporcionado por el fabricante, siendo de un

orden del 80% al 90% de la tensión nominal del pararrayos. En esta región la corriente es menor que 1 ma y es principalmente capacitiva.

En la región 2 una pequeña variación de tensión implica una gran variación de corriente. Esta región es conocida como la región **TOV** (transient over voltaje). Es admisible que los pararrayos operen en esta región por un tiempo máximo de 10 segundos. Tal región es responsable por la soportabilidad de los pararrayos frente a los transitorios a 60 Hertz que puedan surgir en la red. En caso el pararrayos sea sometido a una operación, en esta región mayor a los 10 segundos, la corriente de fuga eleva la temperatura las pastillas de óxido de zinc, lo cual a su vez eleva la corriente de fuga de los pararrayos, dañándolos. (De Oliveira, 2013, p.22)

En la región 3, es la región de protección del pararrayos contra descargas atmosféricas. En esta región la corriente varía entre 1 a 100 kA y posee una relación aproximadamente lineal con la tensión. Otro factor importante es la capacidad de absorción de energía del pararrayos. Es la capacidad de los pararrayos para absorber la energía sin que se comprometa su integridad física. Normalmente los pararrayos de óxido de zinc poseen una capacidad de absorción de energía de 2 a 7 kJ/kV de su tensión nominal. La energía absorbida por el pararrayos puede calcularse por la integral de curva de potencia, de acuerdo a la ecuación 25:

$$E = \int_{t_i}^{t_f} v(t)i(t)dt \quad (25)$$

Donde:

$v(t)$  es la tensión sobre el pararrayos.

$i(t)$  es la corriente drenada por el pararrayos.

$t_i$  es el tiempo donde se inicia la circulación de corriente por el pararrayo.

$t_f$  es el tiempo donde termina la circulación de corriente en el pararrayo.

### **Tensión nominal y máxima tensión de operación continua**

La tensión nominal y la tensión de operación continua de un pararrayos están relacionados directamente. Ambos relacionan la máxima tensión fase-tierra a frecuencia industrial para poder ser aplicado continuamente a través de los terminales del pararrayos. Para determinar la tensión de operación continua del sistema, el tipo de aterramiento del neutro es muy importante, la tensión debe permanecer por un periodo ininterrumpido de 30 segundos.

La tensión de operación continua que un pararrayos debe soportar es la tensión eficaz fase-tierra del sistema adicionada de un margen de, no mínimo 5%. Este margen cubre los posibles aumentos en la amplitud de tensión ocasionados por los posibles armónicos que ocurren en el sistema.

$$U_{c,min} \geq 1,05 \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

$U_{c,min}$  es la tensión de operación continua sobre el pararrayos.

$U_s$  es la tensión fase-fase del sistema.

Una vez determinada la tensión de operación continua a la que el pararrayo estará sometido, es posible determinar la tensión nominal del pararrayos con la ecuación 26. El factor 1,25 es un valor empírico, utilizado por los fabricantes en las especificaciones de casi todos los tipos de pararrayos de óxido metálico.

$$U_r \geq 1,25U_{c,mín} \quad (27)$$

$U_r$  es la tensión nominal del pararrayos calculada a través de la máxima tensión operación continua.

Cabe resaltar que la máxima tensión de operación continua del pararrayos es siempre menor que la tensión nominal del mismo. En la siguiente tabla se muestra los valores de tensión nominal y MCOV para diversos pararrayos fabricados por la empresa Balestro.

**Cuadro N° 2.1:** MCOV en función de tensión nominal

Tensiones nominales $U_r$ (kV)	Tensiones de operación continua MCOV $U_c$ (kV)
21	17
36	29
60	48
72	58
120	98
192	154

**Fuente:** De Oliveira P. (2013) Estudos da absorcao de energia do para-raios ZnO



## Corriente de descarga nominal

La corriente de descarga nominal sirve para clasificar al pararrayos de óxido metálico. La norma IEC 60099-4 especifica 5 diferentes valores de corriente de descarga nominal para diferentes tensiones nominales de pararrayos.

**Cuadro N° 2.2:** Corriente de descarga nominal

1500 A	2500 A	5000 A	10000 A	20000 A
-	$U_r \leq 36 \text{ kV}$	$U_r \leq 132 \text{ kV}$	$3 \text{ kV} \leq U_r \leq 360 \text{ kV}$	$360 \text{ kV} \leq U_r \leq 756 \text{ kV}$

**Fuente:** De Oliveira P. (2013) Estudos da absorcao de energia do para-raios ZnO

Estos valores no se refieren exactamente a las características de operación de los pararrayos, por el contrario, esos valores especifican diferentes demandas y requisitos de ensayos a los cuales deben ser sometidos los pararrayos de línea. La norma IEC 60099-4 clasifica en 5 categorías la corriente de descarga nominal de los pararrayos. Para los sistemas de alta tensión son usualmente clasificado en apenas 2 de 10 kA y 20 kA. La principal diferencia entre ambos radica en la clase de descarga de línea.

## Clase de descarga de línea

La clase de descarga de línea es una clasificación dada solo para los pararrayos de línea de alta tensión. Según la IEC 60099-4 los pararrayos

de línea son clasificados en 5 categorías donde cada clase de descarga de línea específica la capacidad de absorción de energía del pararrayos.

El cuadro 2.3 muestra las cinco clases de descarga de línea con sus respectivas corrientes de descarga nominal y las capacidades de absorción de energía. Un pararrayos de 10 kA de corriente de descarga nominal puede ser clasificado en tres clases de descarga de línea (1 a 3), mientras un pararrayos de 20 kA, apenas en 2 (4 o 5). Por lo que, antes de especificarse la clase de descarga de línea, se debe determinar la corriente de descarga nominal del pararrayos.

La capacidad de absorción de energía de los pararrayos es verificada por medio de una prueba de corriente de larga duración y una prueba de carga operacional. En la prueba de carga operacional, los pararrayos son sometidos a dos impulsos de amplitud y duración específica, después de los cuales debe mantener una estabilidad térmica con la tensión de operación del sistema. (De Oliveira, 2013, p.25)

**Cuadro N° 2.3:** Clases de descarga de línea.

CDL	Tensión del sistema (kV)	CDN (kA)	CAE (kJ/kV de Ur)
1	≤ 245	10	1,8 a 2,2
2	≤ 300	10	4,5 a 5,5
3	≤ 420	10	8
4	≤ 550	20	11
5	≤ 800	20	15

**Fuente:** De Oliveira P. (2013) Estudos da absorcao de energia do para-raios ZnO

Donde:

CDL: Clase de descarga de línea

CDN: Corriente de descarga nominal

CAE: Capacidad de absorción de energía

### **Modelado de elementos en ATP Draw**

El ATP es uno de los programas más utilizados para la simulación de transitorios electromagnéticos presentes en los sistemas eléctricos de potencia. Con este programa digital se pueden simular complejas redes y sistemas de control de diferentes estructuras. EL ATP cuenta con gran variedad de modelos y características importantes que permiten representar y obtener respuestas de los fenómenos transitorios.

El EMTP (Electromagnetic Transient Program) fue desarrollado por el dominio del público y la Bonneville Power Administration (BPA) de Portland. Ante la iniciativa comercial en 1984 a cargo del grupo de coordinación de desarrollo de la EMTP y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) de Palo Alto. Por tal motivo el nacimiento del ATP data a inicios de 1984, cuando los doctores Meyer y Liu no aprobaron la propuesta de comercialización del EMTP por lo que el Dr. Meyer usando su tiempo libre, empezó un nuevo programa desde una copia del dominio público del EMTP. Desde entonces el programa ATP ha sido continuamente desarrollado a través de las contribuciones internacionales de los Doctores Meyer y Liu.

Uno de los más importantes aportes fue la interfaz gráfica ATPDraw que comenzó su desarrollo a finales de los 80, la cual facilitó el trabajo con el ATP dado que permite ensamblar los distintos componentes del sistema en un ambiente gráfico. La utilización de ATPDraw facilita y ahorra la elaboración de los archivos en formato ATP.

El programa ATP predice las variables de interés dentro de las redes eléctricas de potencia como funciones del tiempo. Básicamente utiliza la regla de integración trapezoidal para resolver ecuaciones diferenciales en el dominio del tiempo.

El ATP cuenta con muchos modelos incluyendo máquinas giratorias, transformadores, pararrayos, líneas de transmisión y cables. Permite el modelado de sistemas de control y componentes con características no lineales como el efecto corona y el arco eléctrico. Sistemas dinámicos sin ninguna red eléctrica también pueden ser simulados usando TACS (Transient Analysis of Control Systems).

Los estudios que se realizan con el ATP en su mayoría son el diseño y la solución de problemas de la operación de los sistemas eléctricos de potencia. Los casos típicos son:

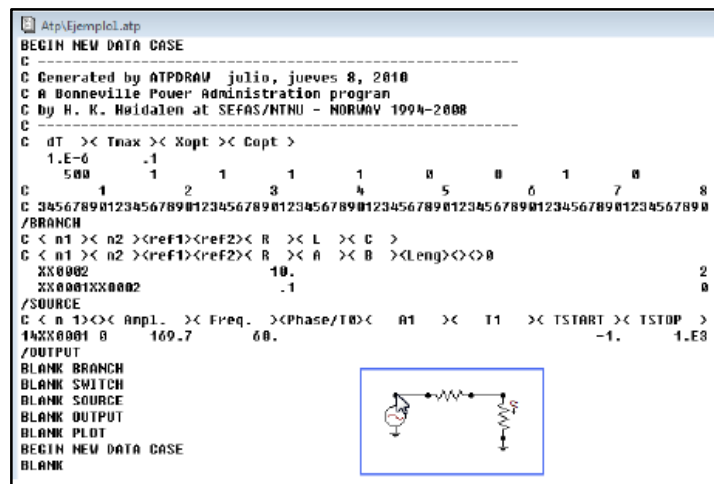
- Transitorios de maniobra
- Impulsos atmosféricos
- Coordinación de aislamiento
- Sistema de alta tensión en corriente continua HVDC

- Ferro resonancia
- Compensadores estáticos
- Sistemas de control en general

### Estructura del ATP

El ATP es un programa ejecutable escrito en FORTRAN que lee archivos planos que contienen la configuración de la simulación, la descripción del sistema a simular y la descripción de las variables a registrar. Es posible escribir los archivos planos manualmente teniendo en cuenta una serie de reglas descritas en el libro manual, sin embargo, no es muy práctico. La siguiente figura muestra un ejemplo de un archivo plano para un circuito monofásico de AC con dos resistencias.

**Figura N° 2.18:** Archivo plano de entrada del ATP



```

Atp\Ejemplo1.atp
BEGIN NEW DATA CASE
C
-----
C Generated by ATPDRAW julio, jueves 8, 2010
C A Bonneville Power Administration program
C by H. K. Haldalen at SEFAS/NTNU - NORMAN 1994-2008
C
-----
C dt << Tmax >> Xopt << Copt >
1.E-06 .1
500 1 1 1 1 0 0 1 0
C 1 2 3 4 5 6 7 8
C 34567890123456789012345678901234567890123456789012345678901234567890
/BRANCH
C < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< L >< C >
G < n1 >< n2 ><ref1><ref2>< R >< A >< B ><Leng><><0
XX0002 10. 2
XX0001XX0002 .1 0
/SOURCE
C < n 1><>< Ampl. >< Freq. ><Phase/T0>< A1 >< T1 >< TSTART >< TSTOP >
14XX0001 0 169.7 60. -1. 1.E8
/OUTPUT
BLANK BRANCH
BLANK SWITCH
BLANK SOURCE
BLANK OUTPUT
BLANK PLOT
BEGIN NEW DATA CASE
BLANK
  
```

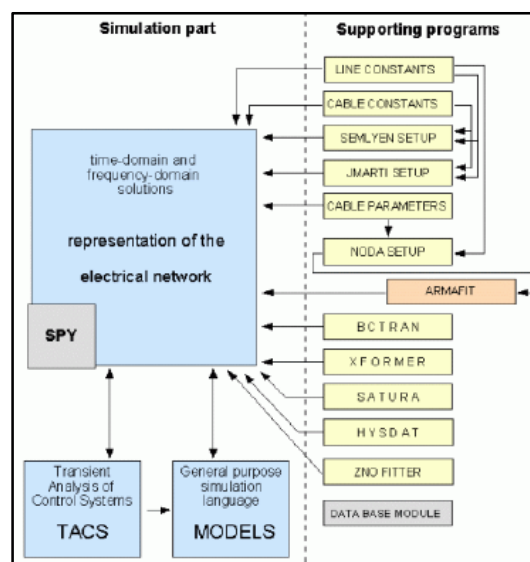
**Fuente:** Vázquez K. (2003) Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando ATP

La estructura interna del ATP está compuesta por un núcleo y subrutinas de apoyo. El núcleo es el programa que se encarga de realizar la solución de las ecuaciones en el dominio del tiempo o la frecuencia para la red bajo simulación. El núcleo interactúa con elementos de control TACS y elementos descritos a través del lenguaje de simulación MODELS, estos elementos junto con el núcleo conforman el bloque de simulación del ATP.

Los programas de soporte tienen las siguientes funciones:

- Cálculo de parámetros de líneas y cables (LCC)
- Generación de modelos de línea especiales (JMarti, Noda, etc)
- Cálculo de parámetros modelos de transformadores (BCTRAN, etc)
- Conversión de curvas de histéresis y saturación

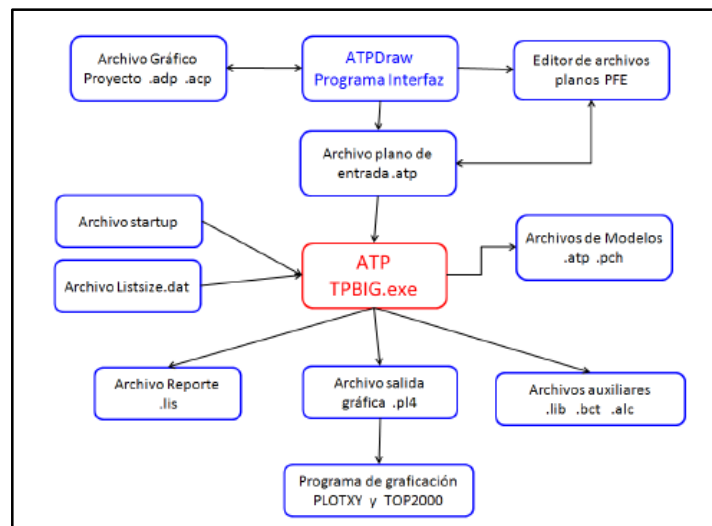
**Figura N° 2.19:** Estructura interna del ATP



**Fuente:** Vázquez K. (2003) Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando ATP

La entrada de datos y la visualización de resultados utilizan programas externos, para la generación del archivo plano y la gestión de las subrutinas internas se utiliza el programa ATPDraw, para la visualización se utilizan programas como el PLOTXY. La figura 2.20 describe los programas de apoyo y las extensiones de los archivos relacionados.

**Figura N° 2.20:** Programas de apoyo del ATP



**Fuente:** Vázquez K. (2003) Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando ATP

El ATPDraw además de generar el archivo plano se encarga de cargar el ATP y hacer que procese el archivo plano correspondiente a la simulación, toda esta labor requiere que también se encargue de la gestión de archivos y por ello necesita una configuración de directorios además de la configuración para cargar el ATP.

## Descripción y modelado de componentes

En el ATP existen muchos modelos con los cuales podemos representar los elementos de nuestro sistema a simular. En el cuadro 2.4, se muestran los elementos del sistema y su representación en el ATP:

**Cuadro N° 2.4:** Elementos a modelar en ATP

<b>Elemento del sistema</b>	<b>Representación en ATP</b>
Descarga Atmosférica	Fuente de impulso Heidler (Type 15)
Línea de transmisión	Modelo JMarti
Torre de transmisión	Línea de transmisión monofásica con parámetros distribuidos
Resistencia de PAT	Elemento lineal
Pararrayos	Elemento no Lineal MOV (Type 92)
Cadena de aisladores	Interruptor controlado por tensión

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se explicará en que consiste cada uno de los modelos a utilizar, características y los datos que se tienen que completar para realizar el modelado en el ATPDraw.

### Descarga atmosférica

Para el modelado de la corriente del rayo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 ya que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda estandarizada para el impulso de corriente ó tensión.



La forma de onda de corriente suministrada por la fuente Heidler está dada por la expresión matemática:

$$i(t) = \frac{I_0}{n} * \frac{k^n}{1+k^n} * e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (28)$$

Donde:  $k = \frac{t}{\tau_1}$

$\tau_1$ : Constante de tiempo de frente, es proporcional a la duración del frente (intervalo de tiempo entre  $t=0$  y el tiempo del pico de la función).

$t$ : es proporcional a la duración de la descarga (intervalo de tiempo entre  $t=0$  y el punto de la cola donde la amplitud decae al 37% de su valor pico).

$I_0$ : Valor pico

$n$ : Constante de ajuste

$n$ : Influencia de la tasa de crecimiento y el instante de tiempo de la máxima tasa de crecimiento.

Para poder utilizar este modelo de fuente es necesario conocer los datos que debemos ingresar a la interfaz gráfica. La figura 2.21 muestra el cuadro de dialogo con los datos a ingresar para el modelado de la corriente de rayo.

**Figura N° 2.21:** Datos para fuente tipo Heidler

DATA	UNIT	VALUE
Amplitude	Ampere	30000
T <sub>f</sub>	s	1.2E-6
tau	s	5E-5
n		5
T <sub>start</sub>	s	-1
T <sub>stop</sub>	s	1

NODE	PHASE	NAME
HEI	1	trayo

Order: 0    Label:

Comment:

Type of source:  
 Current     Hide  
 Voltage

Edit definitions    OK    Cancel    Help

**Fuente:** Elaboración propia

**U/I:** Para la fuente de tensión (0) y para la fuente de corriente (-1).

**Amp:** Número multiplicativo de la función, no representa el valor pico.

**T<sub>f</sub>** : tiempo de frente de onda en us. Intervalo de tiempo entre t=0 y el que demora en alcanzar su valor pico.

**tau:** tiempo de cola de la onda. Intervalo de tiempo entre t=0 y el tiempo en que la amplitud de la onda ha decrecido hasta el 37% del valor pico.

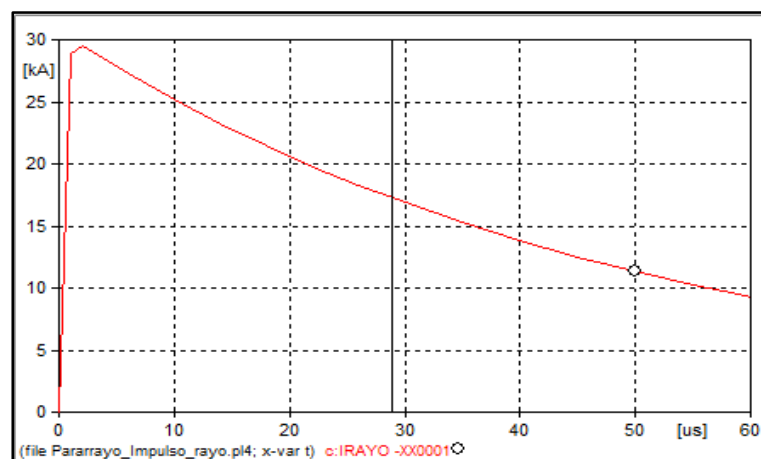
**n:** Factor de influencia de la tasa de crecimiento. Al incrementar el valor de n se incrementa la máxima pendiente.

**T<sub>sta</sub>:** Tiempo de inicio en segundos.

**T<sub>sto</sub>:** Tiempo de finalización de en segundos.

Para nuestro caso de estudio utilizaremos la forma de onda que se muestra en la figura 2.22, es una onda normalizada de 1.2/50 tipo impulso atmosférico, es decir, con un tiempo de frente de onda de 1.2  $\mu s$ , un tiempo de cola de 50  $\mu s$  y una corriente pico de 30  $kA$  la cual puede variar según los casos a estudiar.

**Figura N° 2.22:** Forma de onda fuente Heidler



**Fuente:** Elaboración propia

### Línea de transmisión

El ATP dispone de la subrutina “Line Constants” para el cálculo de parámetros de líneas de transmisión y cables que producen varios modelos, cada una de las cuales deben ser empleados según el tipo de transitorio a simularse.

Los modelos PI y K.C. LEE consideran parámetros concentrados y constantes mientras que los modelos SEMLYEN SETUP y JMARTI SETUP consideran parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia

mediante una descomposición nodal. EL modelo TAKU NODA SETUP difiere de los dos anteriores porque el cálculo lo realiza en componentes de fase.

En el caso de la descarga atmosférica que es un fenómeno de alta frecuencia, el modelo de línea debe responder a la variación de la frecuencia por lo que se requiere que los parámetros de línea sean calculados en función de la frecuencia. (Vázquez, 2003, p.34)

El modelo JMarti SETUP con parámetros en función de la frecuencia es el más utilizado para el cálculo de transitorios de alta frecuencia y es el que utilizaremos en esta investigación. En los párrafos siguientes se describirá la sustentación teórica de este modelo.

Los parámetros más importantes en la propagación de onda son la impedancia característica dada por:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+jwL}{G+jwC}} \quad (29)$$

y la constante de propagación:

$$\gamma = \sqrt{(R + jwL)(G + jwC)} \quad (30)$$

Los dos parámetros son dependientes de la frecuencia, siendo el factor de propagación:

$$A(w) = e^{-\gamma l} \quad (31)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (32)$$

El factor de propagación contiene el factor de atenuación  $e^{-\alpha l}$  y un cambio de fase  $e^{-j\beta l}$ , ambos son función de la frecuencia .

La función racional que aproxima  $A(w)$  tiene la forma:

$$A_{aprox}(s) = e^{-st_{min}} k \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (33)$$

Con  $s=jw$  y  $n < m$ . La expresión anterior es una aproximación del factor de propagación  $A(w)$  y puede representarse por fracciones parciales:

$$k \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} = \frac{k_1}{(s+p_1)} + \frac{k_2}{(s+p_2)} + \dots + \frac{k_m}{(s+p_m)} \quad (34)$$

De igual forma la impedancia característica  $Z_0$  es aproximada por una función racional de la forma:

$$Z_{0-aprox}(s) = k \frac{(s+z_1)(s+z_2)\dots(s+z_n)}{(s+p_1)(s+p_2)\dots(s+p_n)} \quad (35)$$

La expresión anterior puede representarse en fracciones parciales:

$$Z_{0-aprox}(s) = k_0 + \frac{k_1}{(s+p_1)} + \frac{k_2}{(s+p_2)} + \dots + \frac{k_m}{(s+p_m)} \quad (36)$$

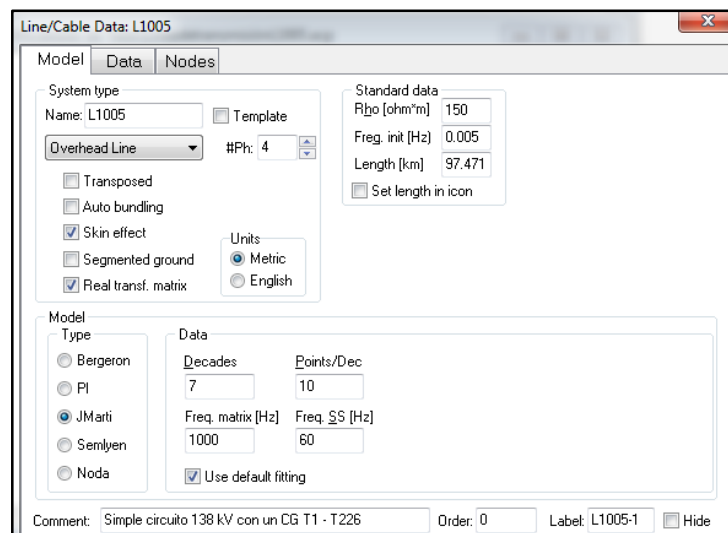
El éxito de este método es la aproximación a funciones racionales para  $A(w)$  y  $Z_0(w)$ . JMarti usa los diagramas de bode para aproximar las magnitudes de las funciones. (Vázquez, 2003, p.40)

El modelo JMarti es el más complejo de simular debido a la gran cantidad de datos de entrada que solicita, los cuales permiten hacer una variación

en un rango de frecuencias, lo que ayuda a obtener mejores resultados en el análisis de fallas.

La figura 2.23 y 2.24 muestra el cuadro de dialogo con los datos a ingresar para el modelo de línea, las características de los conductores de fase, del cable de guarda y la configuración física de las estructuras de soporte.

**Figura N° 2.23:** LCC modelado de línea JMarti



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 2.24:** Disposición geométrica conductores

Model Data Nodes							
#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0	0.9975	0.1419	3.043	28.6	0
2	2	0	0.9975	0.1419	-3.043	28.6	0
3	3	0	0.9975	0.1419	3.043	31.8	0
4	4	0	0.4763	3.75	0	38.4	0

**Fuente:** Elaboración propia

A continuación, se describen cada una de los parámetros que nos muestra la opción Line model para el modelo JMARTI, según figura 2.23:

**Rho:** Resistividad del terreno en  $\text{ohm}\cdot\text{m}$  (teoría de Carson)

**Lenght:** Longitud de la línea de transmisión

**Freq. Init:** Es la frecuencia a la cual se calcularán los parámetros. En el modelo JMarti freq. es usada como la frecuencia a la que se calcula la matriz de transformación.

**Metric/English:** Se puede elegir entre el sistema internacional o inglesas.

**Transposed:** Para las líneas que son transpuestas, se activa la opción.

**Auto bundling:** Para aquellas líneas que tienen subconductores por fases.

**Seg. Ground:** Cuando el cable de guarda esta aterrizado cada cierto número de torres. Cuando no se pone check se asume que el cable de guarda esta aterrizado continuamente.

**Skin effect:** Se refiere al efecto Skin, la resistencia dependiente de la frecuencia.

**Real transf. Matrix:** Es la matriz de transformación interna (componentes de fases a componentes modales) recomendado para la simulación de transitorios.

**Decades:** Cantidad de décadas para el cálculo de la constante.

**Point/Dec:** Número de puntos de muestra por década

**Freq. SS:** La frecuencia de estado estable para el cálculo de la condición de estado estable.

**Freq. Matrix:** Frecuencia a la que se calcula la matriz de transformación.

**Freq. Init:** Frecuencia inicial para la escala logarítmica.

### Cadena de aisladores

Las cadenas de aisladores serán representadas por interruptores controlados por tensión, los cuales simularán la descarga inversa, cerrando el interruptor, si la tensión entre la cruceta y el conductor supera el valor de aislamiento de la cadena de aisladores.

El interruptor controlado por tensión es un interruptor normalmente abierto. El cierre del interruptor ocurre a un tiempo mayor o igual al tiempo de cierre siempre y cuando se haya superado la tensión de activación. Luego de un retardo de tiempo el interruptor intenta abrir nuevamente.

**Figura N° 2.25:** Datos interruptor controlado por tensión

DATA	UNIT	VALUE
T-cl		0
T-de		0.001
Imar		0
V-fl		10000

NODE	PHASE	NAME
SWF	1	
SWT	1	

Order: 0      Label:

**Fuente:** Elaboración propia



**T<sub>cl</sub>**: Tiempo de cierre del interruptor (s)

**T<sub>de</sub>**: Tiempo mínimo que el interruptor debe permanecer cerrado (s)

**Imar**: Corriente marginal, el interruptor abre para  $T_{cl} > T_{de}$  si  $|i| > I_{mar}$

**V<sub>fl</sub>**: Tensión de activación, superado este valor el interruptor cierra.

### **Torre de transmisión**

Un modelado riguroso de propagación de ondas electromagnéticas en conductores con orientación predominantemente vertical como es el caso de las torres reticuladas requiere el empleo de modelos electromagnéticos. Para aquellas situaciones en que el tiempo de frente de la corriente de descarga es mayor que dos veces el tiempo de tránsito de dicha corriente en la torre, se puede aplicar la teoría de líneas de transmisión sin que se cometan errores significativos.

En este caso la torre de transmisión será modelada como una línea de transmisión monofásica de parámetros distribuidos, según modelo Clarke cuya impedancia característica va depender de la geometría de la torre. Uno de los modelos utilizados para representar torres de transmisión es el cilíndrico de Wagner e Hileman, cuya fórmula se muestra a continuación:

$$Z = 60 \left[ \ln \left( \frac{\sqrt{22}h}{r} \right) - 1 \right] \quad (37)$$

El otro modelo es el cónico de Sargent e Darveniza, a continuación, se muestra su fórmula, que dependerá de la geometría de la torre:

$$Z = 30 \ln \left( \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right) \quad (38)$$

A continuación, se muestran los datos a completar en el cuadro de diálogo para el modelado de la torre en el ATPDraw.

**R/L:** Resistencia por longitud en ohm/m

**Z:** La impedancia característica de la torre en ohm  $Z = \sqrt{\frac{L'}{C'}}$

**V:** velocidad de propagación de la onda en m/s  $v = \sqrt{\frac{1}{L'C'}}$

**Figura N° 2.26:** Componente LINEZT\_1

The screenshot shows a dialog box titled "Component: LINEZT\_1". It contains two tables under the "Attributes" section:

DATA	UNIT	VALUE
R/l	Ohm/m	0
Z		353.2
v		255000000

NODE	PHASE	NAME
From	1	
To	1	

Below the tables are fields for "Copy", "Paste", "Reset", "Order: 0", and "Label:". A "Comment:" field is also present. The "Lines" section includes a "Length" field set to 3.55 [m], an "Output" dropdown set to "No", and radio buttons for "ILINE" (L', C', Z, v, Z, tau) and "Conductance" (G=0, G=R\*C/L). Checkboxes for "Hide" and "\$Vintage,1" are also visible. At the bottom are "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help" buttons.

**Fuente:** Elaboración propia

## Resistencia de puesta a tierra

El valor pico de la sobretensión que aparece sobre la torre esta principalmente determinado por la resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga, debido a que la reflexión de la base de la torre puede llegar mucho más rápido a la cima de torre que las reflexiones de las torres adyacentes. La influencia de la resistencia de puesta a tierra aparente sobre la tensión en la cima de la torre es determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo. La respuesta del tiempo es importante solo cuando los contrapesos instalados superan los 30 metros de la longitud de la base de la torre. La respuesta del tiempo es generalmente despreciada y la impedancia es determinada por su dependencia de la corriente con la siguiente expresión:

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I}{I_g}}} \quad (39)$$

Donde:

$R_0$ : es la resistencia de puesta a tierra medida a baja corriente y baja frecuencia en ohm.

$R_T$ : es la resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga en ohm.

$I_g$ : es la corriente limitante para inicializar la ionización suficiente del suelo.

$I$ : es la corriente del rayo a través de la resistencia de puesta a tierra.

La corriente limitante es función de la ionización del suelo y está dada por:

$$I_g = \frac{E_0 * \rho}{2\pi R_0^2} \quad (40)$$

Donde:

$\rho$  : es la resistividad del suelo, ohm/metro.

$E_0$  : es la gradiente de ionización del suelo (300kV/m).

Como se puede observar en las expresiones anteriores la resistencia de puesta a tierra no es constante, su valor depende de la corriente, por lo que para su modelado se utiliza una resistencia con característica no lineal, dependiente de la corriente. (Vázquez, 2003, p.46)

Para nuestro modelado utilizaremos los valores obtenidos de la medición de la resistencia de puesta a tierra con el método de alta frecuencia.

### **Pararrayos de línea**

Para realizar el modelado del pararrayos de línea utilizamos una resistencia no lineal con característica no exponencial type 92.

El modelo a implementar debe cumplir con las siguientes características:

- No conducir para voltajes de operación normal.
- Conducir corriente cuando se presente las sobretensiones a causa de fallas en el sistema.

Por lo tanto, el descargador debe tener una resistencia muy elevada en operación normal y una resistencia muy baja para sobretensiones

transitorias y de maniobra. Es decir, la característica corriente tensión es una función no lineal y está representado por la siguiente ecuación exponencial:

$$i = p\left(\frac{v}{V_{ref}}\right)^q \quad (41)$$

Donde q es el exponente, p es un factor multiplicador que se encuentra en unidades de corriente, Vref es una tensión de referencia que normaliza la ecuación. A continuación, en las figuras 2.4.10 y 2.4.11 se muestran el cuadro de dialogo con los datos a completar en el componente MOVN, los datos de corriente tensión para modelar la curva característica de operación del pararrayos, es importante señalar que estos datos son proporcionados por el fabricante del pararrayos.

**Figura N° 2.27:** Componente MOVN pararrayos

The screenshot shows a dialog box titled "Component: MOVN" with two tabs: "Attributes" and "Characteristic". The "Attributes" tab is active, displaying a table of parameters:

DATA	UNIT	VALUE
Vref	Volts	50000
Vflash	<0: No gap	-1
Vzero	Volts	0
#COL		1
#SER		1
EriLim	pu	0.05
Ilim	A	0.001

To the right of the attributes table is a table for connection nodes:

NODE	PHASE	NAME
From	1	Pr
To	1	

Below the tables are fields for "Order" (set to 0) and "Label". There is also a "Comment" field and an "Output" section with a dropdown menu set to "3 - Current&Voltage" and a "Hide" checkbox. At the bottom right, there is a "NumPh" spinner set to 1. The dialog box has "Edit definitions", "OK", "Cancel", and "Help" buttons at the bottom.

**Fuente:** Elaboración propia

Donde:

**Vref:** es la tensión de referencia.

**Vflash:** es la tensión de descarga en por unidad.

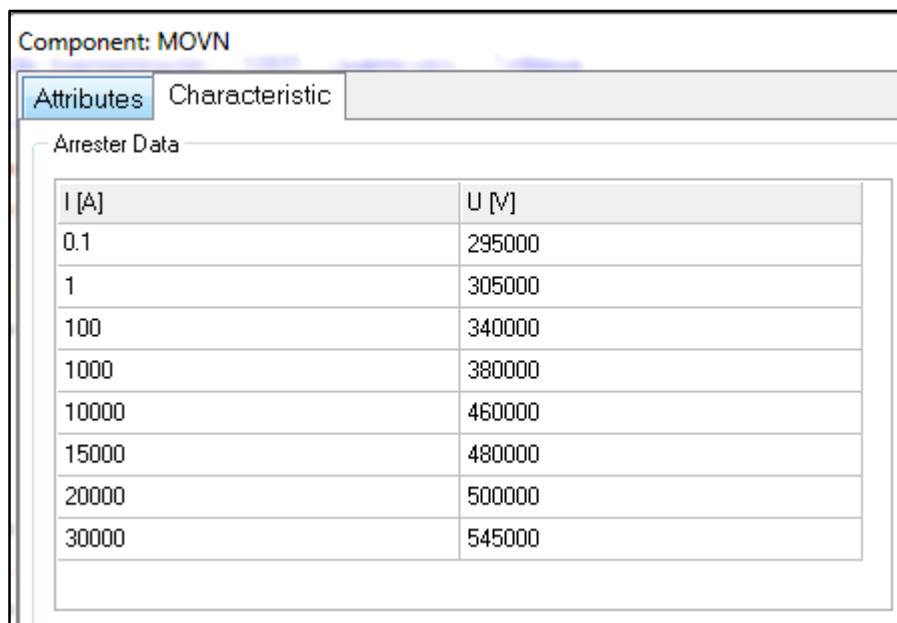
**Vref:** Sin caso no tiene gaps se utiliza el número -1.

**Vzero:** es la tensión inicial en voltios, casi en todos los casos se pone cero.

**#COL:** es el número de columnas del pararrayos.

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

**Figura N° 2.28:** Datos de operación pararrayos



The image shows a software interface window titled 'Component: MOVN'. It has two tabs: 'Attributes' (selected) and 'Characteristic'. Below the tabs is a section labeled 'Arrester Data' containing a table with two columns: 'I [A]' and 'U [V]'. The table lists the following data points:

I [A]	U [V]
0.1	295000
1	305000
100	340000
1000	380000
10000	460000
15000	480000
20000	500000
30000	545000

**Fuente:** Elaboración propia

### 2.3 Definición de términos básicos

- **NTCSE:** Es la norma técnica de calidad de los servicios eléctricos, establece los niveles mínimos de calidad, obligaciones de las empresas y clientes que operan bajo la ley de concesiones eléctricas LCE.
- **Descarga atmosférica:** Conocido como rayo, es una poderosa descarga natural de cargas eléctricas, producida durante una tormenta eléctrica.
- **Pararrayos de línea:** Dispositivo de protección contra sobretensiones atmosféricas y de maniobra que se colocan en líneas de transmisión.
- **ATPDraw:** Software alternativo para simulación de transitorios electromagnéticos en sistemas eléctricos de potencia.
- **Sobretensiones:** Cualquier valor de tensión entre fases o fase – tierra, cuyo valor pico está por encima de la tensión nominal del sistema.
- **Transitorios electromagnéticos:** Fenómeno de muy corta duración que aparece como respuesta a los cambios de topología en los sistemas eléctricos de potencia.
- **Ondas viajeras:** Al producirse una perturbación en la línea de transmisión se propagan ondas que viajan a velocidades cercanas a la de la luz, produciendo reflexiones cada vez que encuentran una discontinuidad en su paso.

- **MCOV:** Máxima tensión de operación continua de los pararrayos.
- **TOV:** Máxima tensión transitoria que pueden soportar los pararrayos por 10 segundos.
- **Modelo JMarti:** Modelo de línea de transmisión cuyos parámetros son dependientes de la frecuencia y se puede utilizar en ATPDraw.
- **Elemento no lineal:** Aquellos elementos cuya característica de operación no guardan una relación directa entre la caída de potencia y la corriente que circula por el elemento.
- **ZnO:** Óxido de zinc



### **III. VARIABLES E HIPÓTESIS**

#### **3.1 Variables de la investigación**

Se describe de la siguiente manera:

**X:** Modelado de descarga atmosférica en la línea de transmisión L1005 con y sin pararrayos de líneas en el software ATPDraw.

**Y:** Mejorar desempeño de la línea de transmisión L1005 frente a descargas atmosféricas.

#### **3.2 Operacionalización de variables**

Se realizará simulaciones en el software ATPDraw haciendo variaciones en la variable independiente y se evaluará la respuesta de la variable dependiente, es decir, si la línea de transmisión desconecta ante el impacto de una descarga atmosférica con y sin pararrayos de línea.

Tenemos:  $Y = f(X)$

#### **3.3 Hipótesis general y específicas**

##### **Hipótesis general**

El modelado de la línea de transmisión L1005 (Quencoro – Tintaya) protegida con pararrayos de línea de ZnO mejora el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas atmosféricas.

### **Hipótesis específicas**

**H.E.1:** Utilizando la norma IEC 61-1 para modelar la forma de onda de la corriente del rayo, el modelo JMarti para representar la línea de transmisión L-1005 y el modelo de pararrayos MOV Type 92 obtendremos una respuesta casi real del comportamiento de la línea de transmisión L-1005 frente a descargas atmosféricas.

**H.E.2:** Realizando el modelado los vanos críticos de la línea de transmisión L1005 en el ATPDraw, podremos evaluar el desempeño de la línea sin necesidad de modelar todas las torres de transmisión.

## **IV. METODOLOGÍA**

### **4.1 Tipo de investigación**

La investigación desarrollada es del tipo experimental, debido a que se manipula la variable independiente cuando se realiza el modelado y la simulación en el software ATPDraw con la finalidad de medir ó describir los efectos que está produce en la variable dependiente.

### **4.2 Diseño de la investigación**

La primera parte de la investigación consiste en adquirir los conocimientos teóricos y realizar el modelado en el software ATPDraw de cada uno de los componentes de la línea de transmisión L1005, la descarga atmosférica y el pararrayos de línea de óxido de zinc.

Seguidamente se realiza la simulación del impacto de descarga atmosférica en la línea de transmisión L1005 sin pararrayos de línea y se registran los resultados, posteriormente se simula el impacto de descarga atmosférica en la línea de transmisión L1005 con pararrayos de línea en los tramos identificados como críticos y se registran los resultados.

Finalmente se realiza un análisis comparativo de los resultados obtenidos en las gráficas de cada simulación, donde se visualiza los valores de tensión que se alcanzan con las sobretensiones en el cable de guarda y los conductores de fase por efecto de las descargas atmosféricas.

### **4.3 Población y muestra**

#### **a. Delimitación de la Unidad de Análisis del problema objeto de investigación**

Para realizar las simulaciones de impacto de descargas atmosféricas en la línea de transmisión L1005 en el software ATPDraw, se ha delimitado como “unidad de análisis” la zona crítica de la línea, es decir, aquellas torres que tienen un alto valor de resistencia de puesta a tierra.

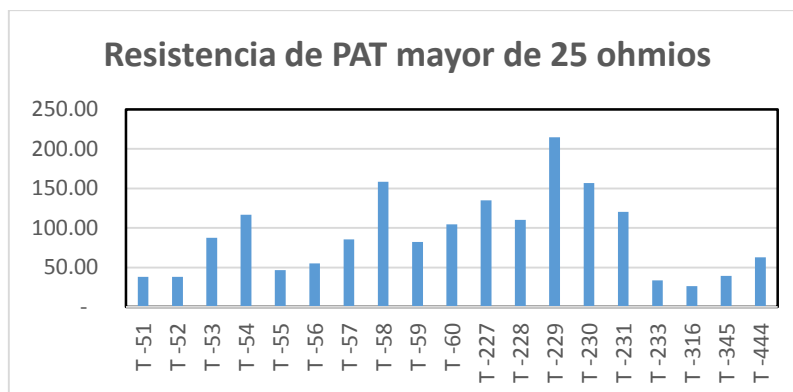
#### **b. Población (N)**

La población está compuesta por la cantidad total de torres de la línea de transmisión L1005 Quencoro – Tintaya. la cual asciende a  $N= 453$  torres, haciendo una longitud total de 188 km.

#### **c. Muestra**

La muestra está representada por el número de torres de transmisión continuas que tienen el mayor valor de resistencia de puesta a tierra. Este dato se obtiene de las planillas homologadas de la línea L1005, ahí se registran los valores de la resistencia de puesta a tierra de cada torre y se describen otros componentes y características de cada torre de transmisión. En la siguiente figura 4.1 se muestra el valor de resistencia del sistema de puesta a tierra de aquellas torres que tienen un valor superior a 25 ohmios.

**Figura N° 4.1:** Valor de resistencia PAT L1005



**Fuente:** Elaboración propia

Por experiencia del investigador en estudios de fenómenos transitorios de líneas transmisión utilizando el software ATPDraw, será suficiente modelar 3 torres continuas con un valor alto de resistencia de puesta a tierra, debido a que la descarga atmosférica es un fenómeno de alta frecuencia que se atenúa rápidamente en las torres adyacentes. Por tal motivo para el modelado en ATPDraw elegimos las torres T-227, T-228 y T-229 cuyo valor de resistencia de puesta a tierra se muestra en el siguiente cuadro.

**Cuadro N° 4.2:** Torres con elevada resistencia PAT

L 1005	R (ohm)	Altitud (msnm)
T-227	135.00	3512.13
T-228	110.33	3547.88
T-229	214.67	3560.63
T-230	156.67	3565.5
T-231	120.33	3580.21
T-233	33.57	3565.23
T-316	26.30	4185.61
T-345	39.10	4078.19
T-444	62.77	3975.12

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos**

Para esta investigación se ha utilizado la técnica del análisis documental, la cual ha permitido utilizar las fuentes de información primaria y aprender más sobre los fenómenos físicos, las teorías que rigen el comportamiento de las líneas de transmisión y el modelado en el software ATPDraw. Información vital para poder desarrollar la presente investigación.

Como instrumento de recolección de datos se ha utilizado las fichas de registro de datos, la cual nos ha permitido recoger y anotar la información significativa de las fuentes consultadas.

#### **4.5 Procedimiento de recolección de datos**

El proceso de recolección de datos para esta investigación empezó con la designación de tiempo y recursos para el investigador. Las primeras fuentes de información que se consultaron fueron los libros y publicaciones sobre modelado en ATPDraw. La capacitación con especialistas en transitorios electromagnéticos y del mantenimiento de líneas de transmisión, fue valioso para el desarrollo de la investigación. Por último, la tabulación y el análisis de los datos obtenidos de la simulación en el software ATPDraw nos da un panorama de cuán importante son los pararrayos en las líneas de transmisión.

## **V. RESULTADOS**

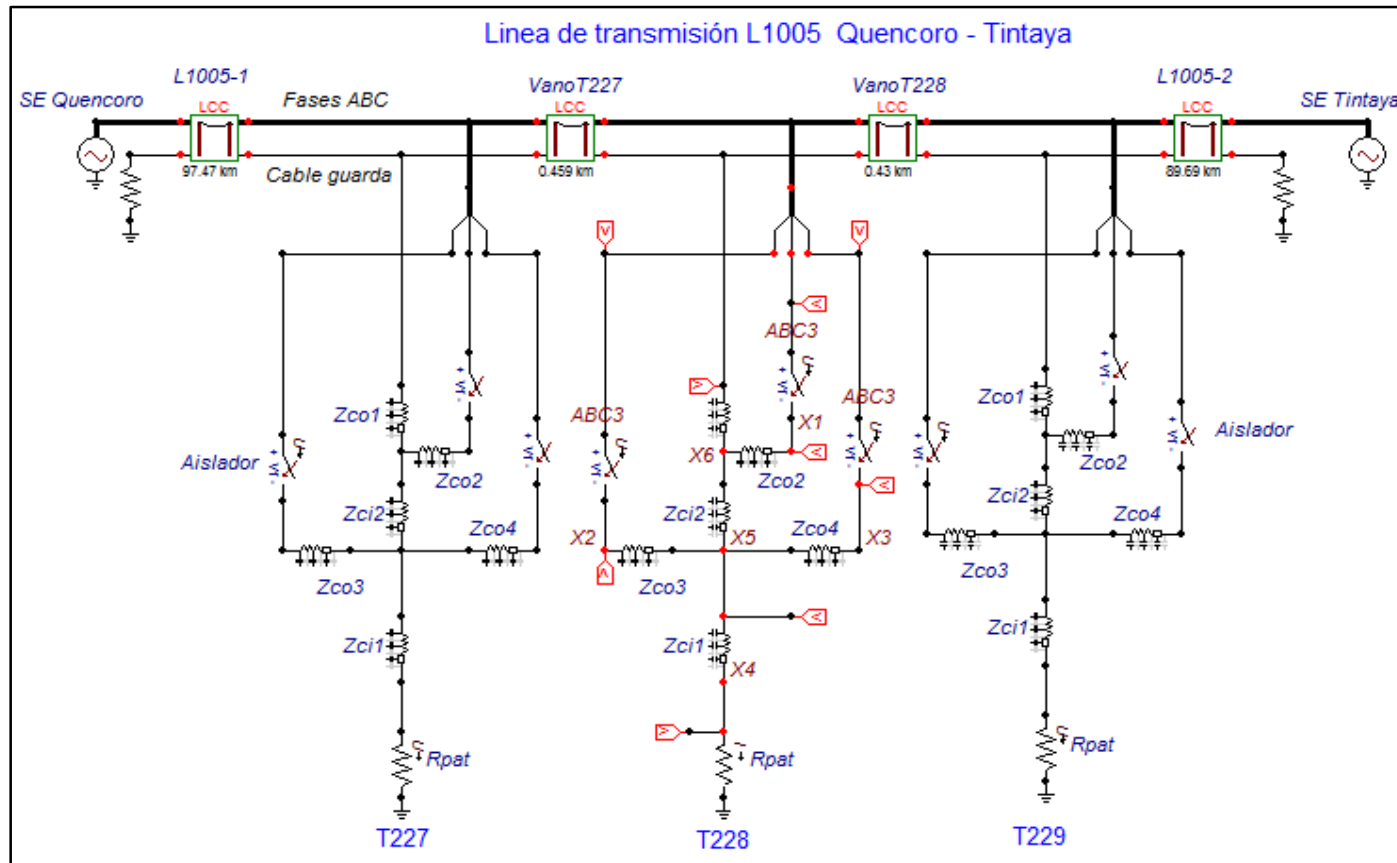
### **Introducción**

En este capítulo se presentan los resultados de las simulaciones realizadas en el software ATPDraw respecto al desempeño de la línea de transmisión de 138 kV L1005, cuando es impactada por una descarga atmosférica teniendo como protección adicional a los pararrayos de líneas, siguiendo los conceptos y modelos descritos en el capítulo 2. En primer lugar, se realiza la validación del modelo completo de la línea de transmisión L1005, a través de simulaciones verificando la operación de cada componente. Finalmente se realiza un análisis de los parámetros obtenidos de la simulación que impactan en el desempeño de la línea de transmisión L1005 con y sin pararrayos de línea.

### **Validación del modelo implementado**

Se realiza la validación del modelo en estado estacionario, es decir en operación normal cuando no existe impacto de descarga atmosférica en la línea de transmisión. Según lo descrito en la metodología se ha modelado tres torres de transmisión identificadas como críticas y en estas condiciones se verifica que no existan errores de simulación, se toman valores de las tensiones de fases y tensiones en cadena de aisladores en la torre T228. En la siguiente figura, se muestra el modelo implementado de la línea de transmisión L1005 en el software ATPDraw:

Figura N° 5.1: Modelo en ATPDraw de la L1005

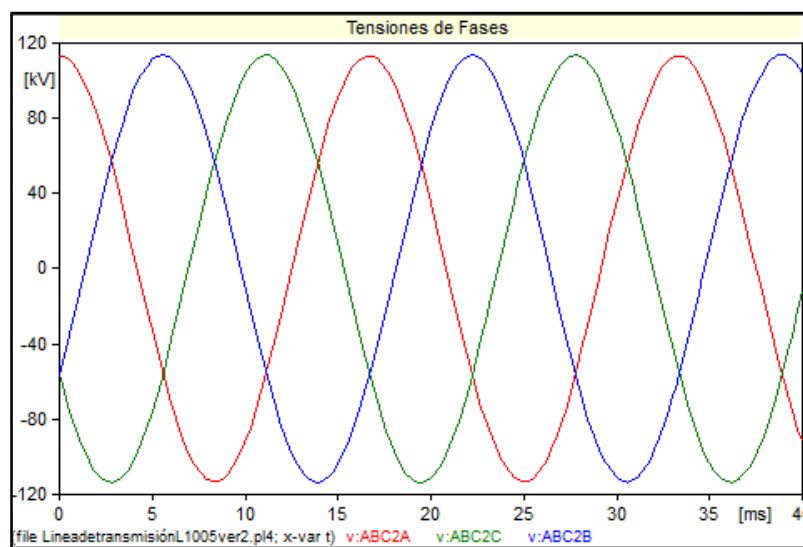


Fuente: Elaboración propia



Las tensiones de fases en estado estacionario se encuentran balanceadas y desfasadas 120 grados respectivamente. Estas tensiones fueron tomadas por los voltímetros ubicados en los nodos ABC3 de la torre T228, según el modelo implementado.

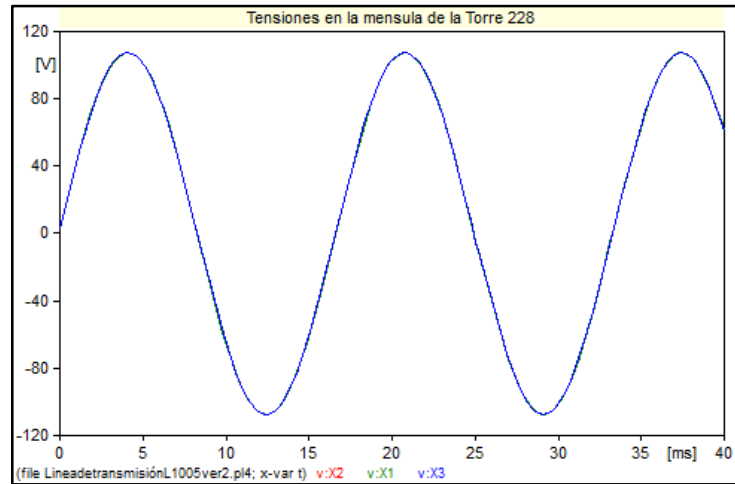
**Figura N° 5.2:** Tensiones de fase en L1005



**Fuente:** Elaboración propia

Las ménsulas son la parte de la torre donde se anclan las cadenas de aisladores que soportan el tiro de los conductores, en teoría las tensiones en las ménsulas deberían ser cero, pero siempre aparece una tensión producto de la inducción de los conductores de fase hacia la torre, tal como se muestra en la siguiente figura 5.3 el valor de inducción es cercano a los 100 volt. Estas tensiones fueron tomadas por lo voltímetros ubicados en los nodos X1, X2 y X3 de la torre T228.

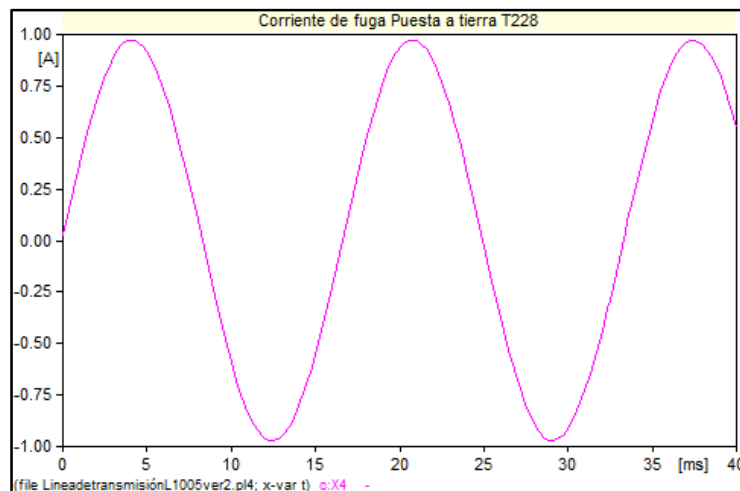
**Figura N° 5.3:** Tensiones de ménsulas en T228



**Fuente:** Elaboración propia

En estado de operación normal, la corriente de fuga producto de la inducción que circula por la torre hasta disiparse por la resistencia de puesta a tierra debe ser muy pequeña. Tal como lo muestra la siguiente figura.

**Figura N° 5.4:** Corriente de fuga por T228



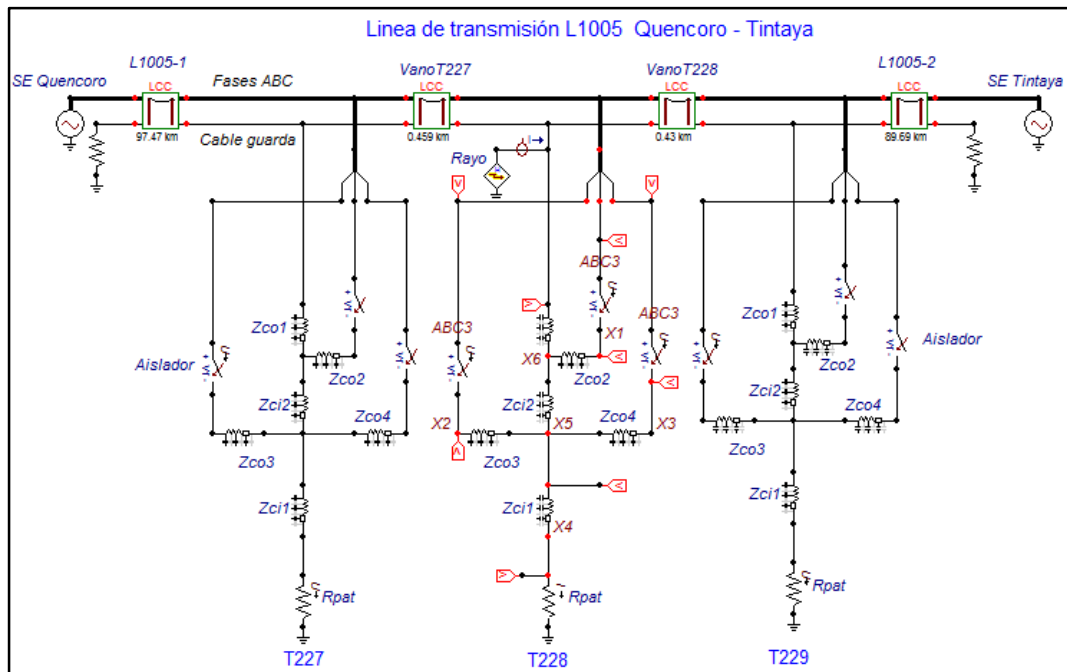
**Fuente:** Elaboración propia

## Simulación de una descarga atmosférica en el cable de guarda

Para este primer caso de simulación la descarga atmosférica impactará en el cable de guarda de la T228 cuyo valor de resistencia de puesta a tierra es 110.33 ohm, los valores de la corriente de rayo serán variables de 10, 15 y 20 kA respectivamente y la línea de transmisión no cuenta con pararrayos de línea instalados.

En la figura 5.5 se muestra el modelo a simular en el ATPDraw para este caso:

**Figura N° 5.5:** Impacto de rayo en CG T228

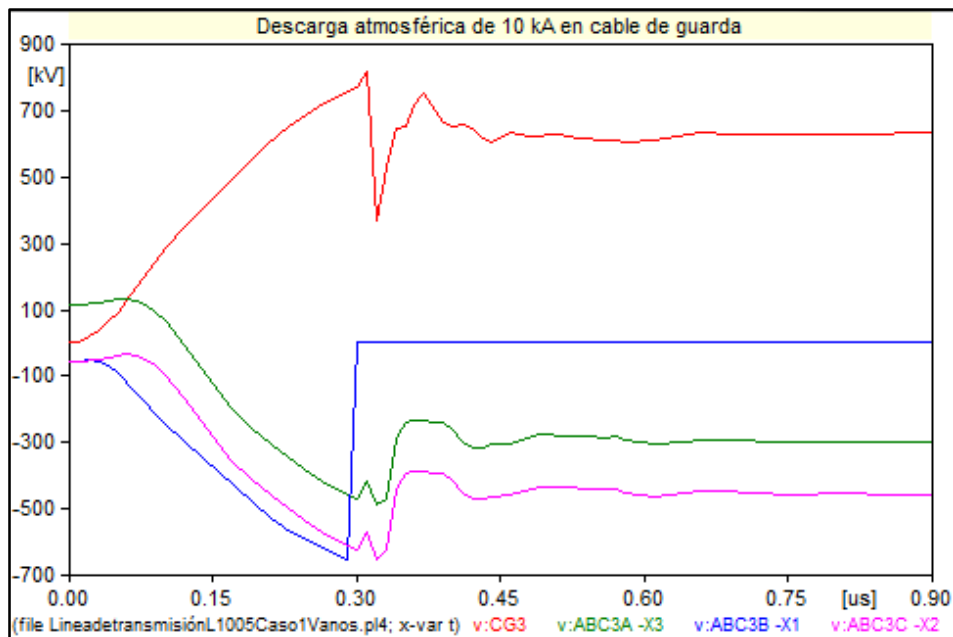


**Fuente:** Elaboración propia

En las siguientes figuras se observan las formas de onda de tensión que provoca la descarga atmosférica de 10, 15 y 20 kA en el cable de guarda y la diferencia de tensión existente entre el conductor de cada fase y su ménsula en la torre 228 respectivamente. Se observa que en los tres casos ocurriría un back flashover en la fase B, es decir una falla entre la torre y el conductor de la fase B. En los dos últimos casos, cuando la corriente del rayo aumenta también se produce un back flashover en la fase C.

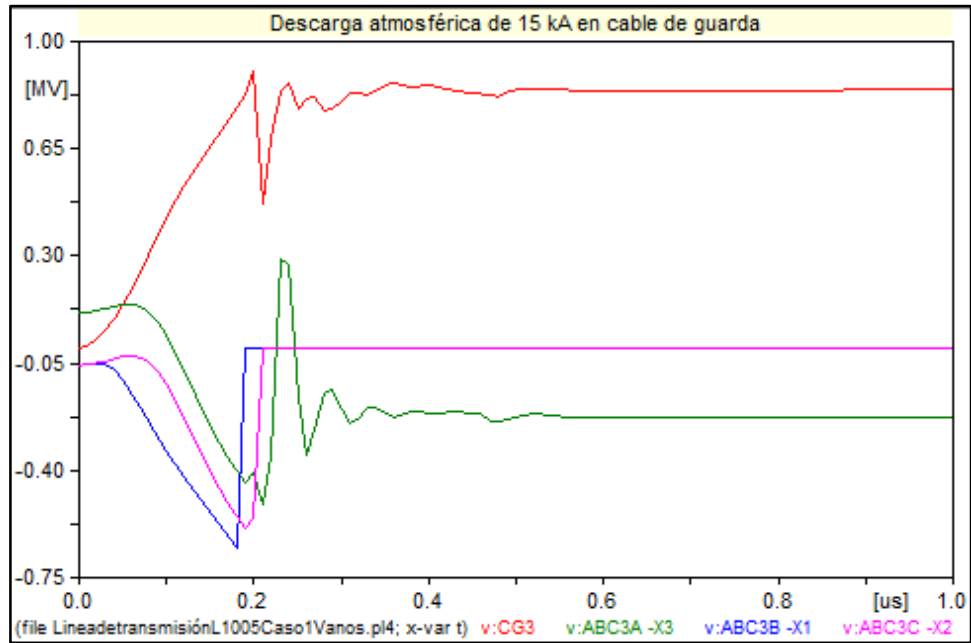
Esto significa que la diferencia de tensión en la cadena de aisladores ha superado su nivel de aislamiento, por lo que se forma un arco eléctrico entre la ménsula de la torre y el conductor de fase ocasionando la falla monofásica.

**Figura N°5.6:** Back flashover fase B, Rayo 10 kA



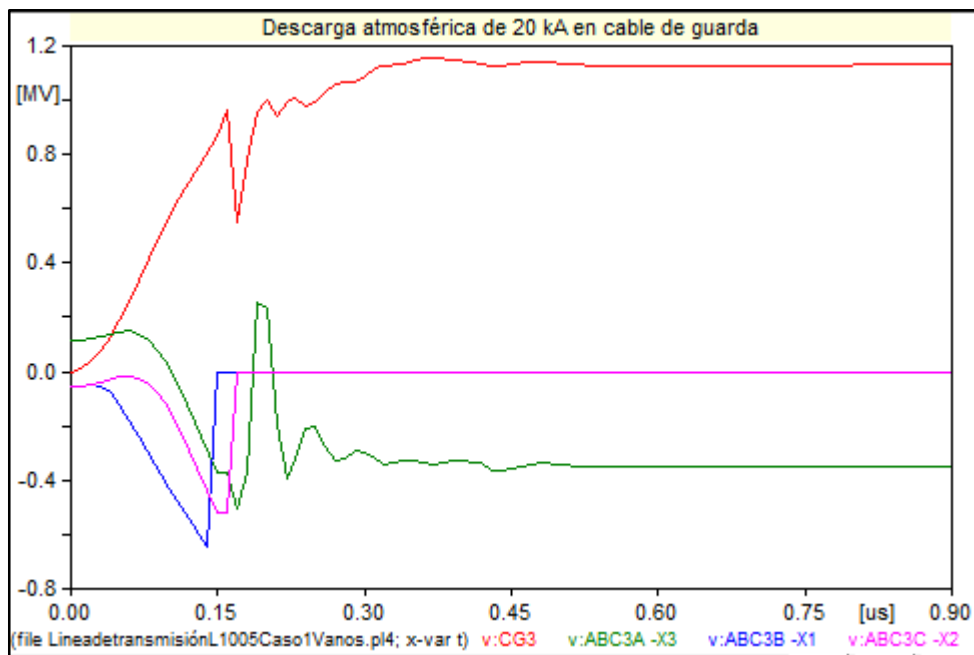
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N°5.7:** Back flashover fases B y C, Rayo 15 kA



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N°5.8:** Back flashover fases B y C, Rayo 20 kA



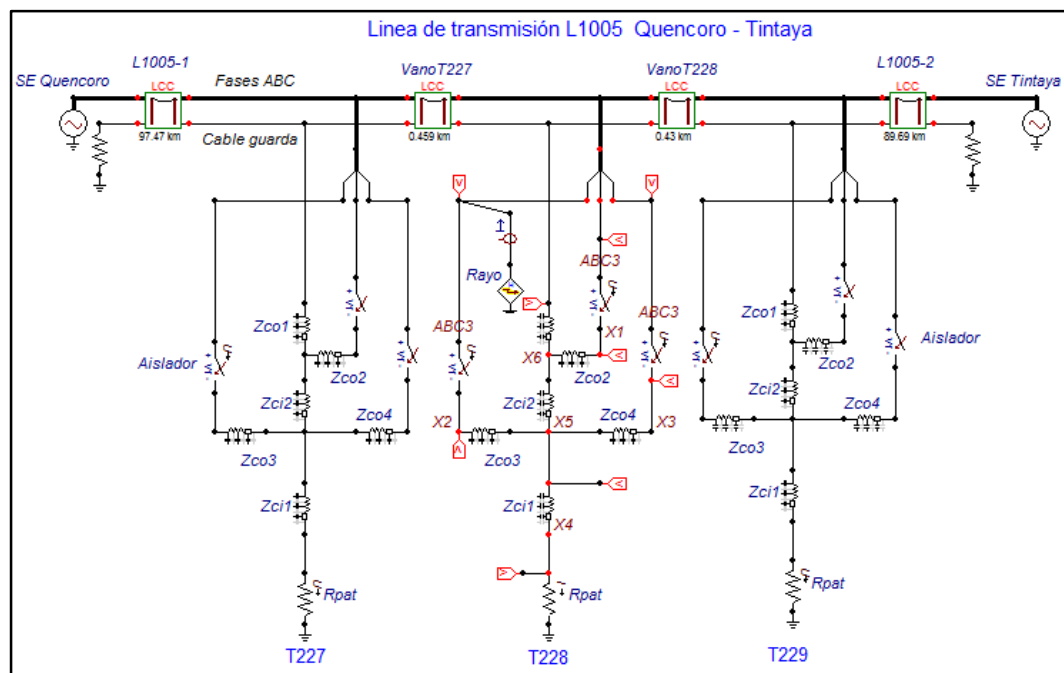
**Fuente:** Elaboración propia

## Simulación de una descarga atmosférica en la fase C

Para este segundo caso de simulación la descarga atmosférica impactará en la fase C de la T228 cuyo valor de resistencia de puesta a tierra es 110.33 ohm, los valores de la corriente de rayo serán variables de 10, 15 y 20 kA respectivamente y la línea de transmisión no cuenta con pararrayos de línea instalados.

En la siguiente figura se muestra el modelo a simular en el ATPDraw para este caso:

**Figura N° 5.9:** Impacto de rayo fase "C" T228

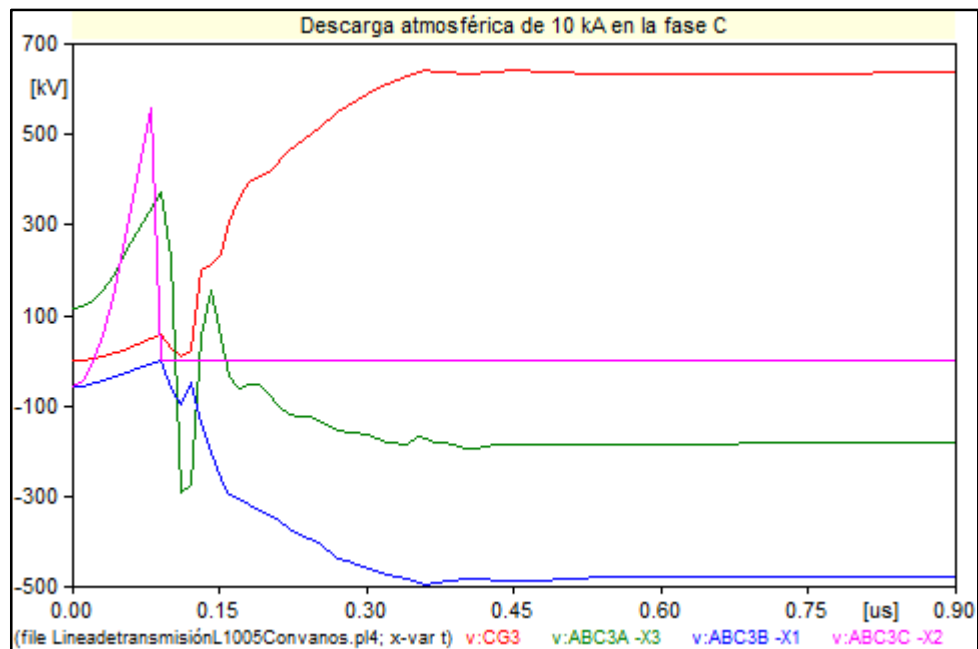


Fuente: Elaboración propia

En las siguientes figuras se observan las formas de onda de tensión que provoca el rayo de 10, 15 y 20 kA al impactar en la fase C, además la tensión en el cable de guarda y la diferencia de tensión en las demás fases de la torre 228. Se observa que en los tres casos ocurriría un flashover en la fase C, es decir una falla entre la torre y el conductor de la fase C. Debido a que a que la diferencia de tensión entre el conductor y la ménsula ha superado el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores.

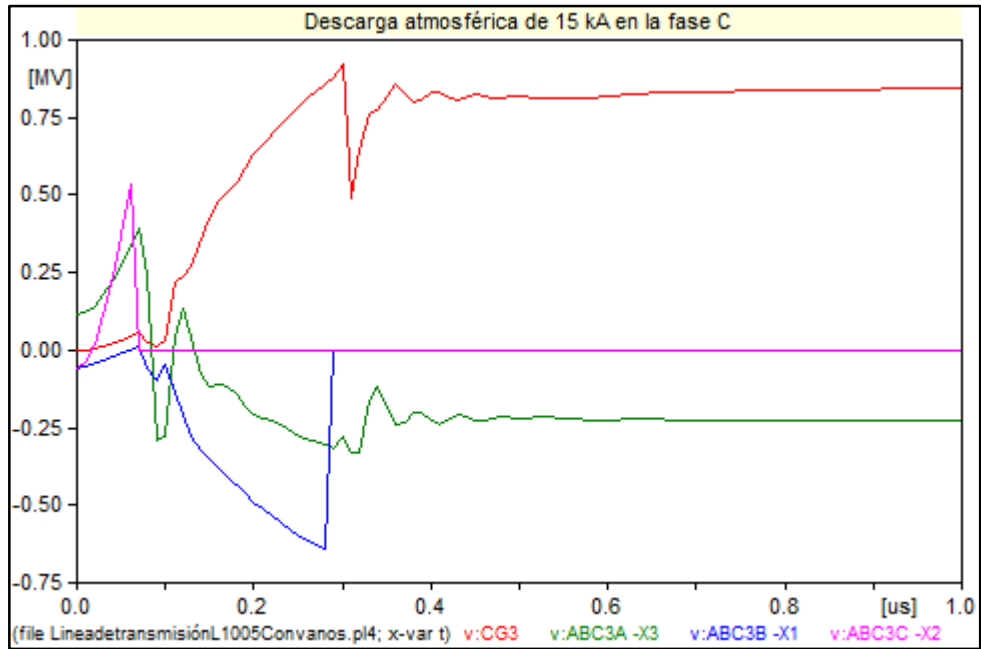
En los dos últimos casos, cuando la corriente del rayo aumenta a 15 y 20 kA se produce un back flashover en la fase B aproximadamente 20 us después de sucedido la falla en la fase C.

**Figura N° 5.10:** Flashover fase "C", rayo 10 kA



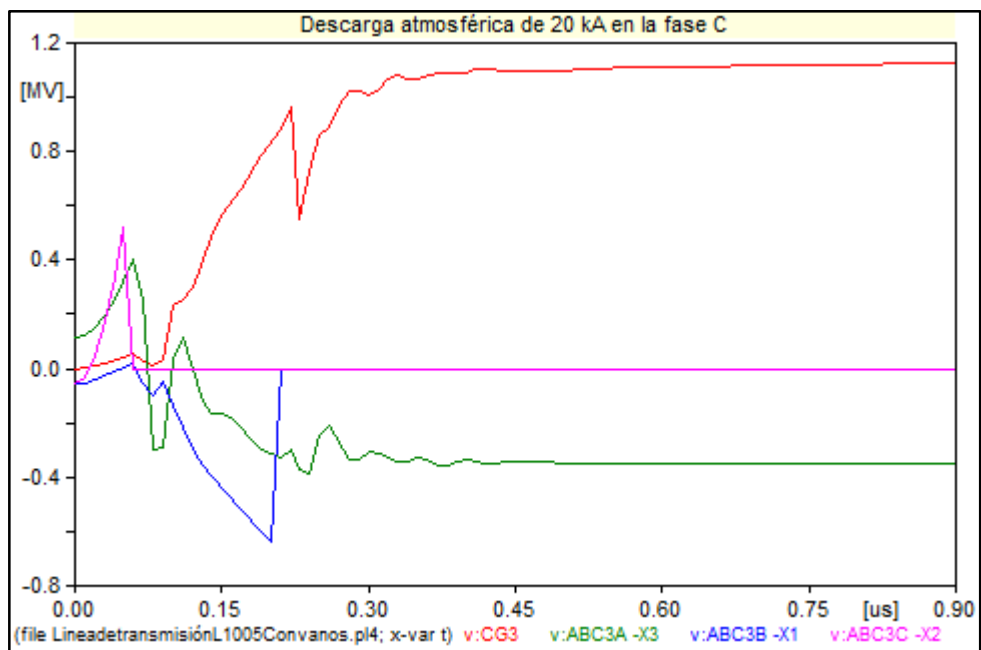
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 5.11:** Flashover fase C y B, rayo 15 kA



Fuente: Elaboración propia

**Figura N° 5.12:** Flashover fase C y B, rayo 20 kA



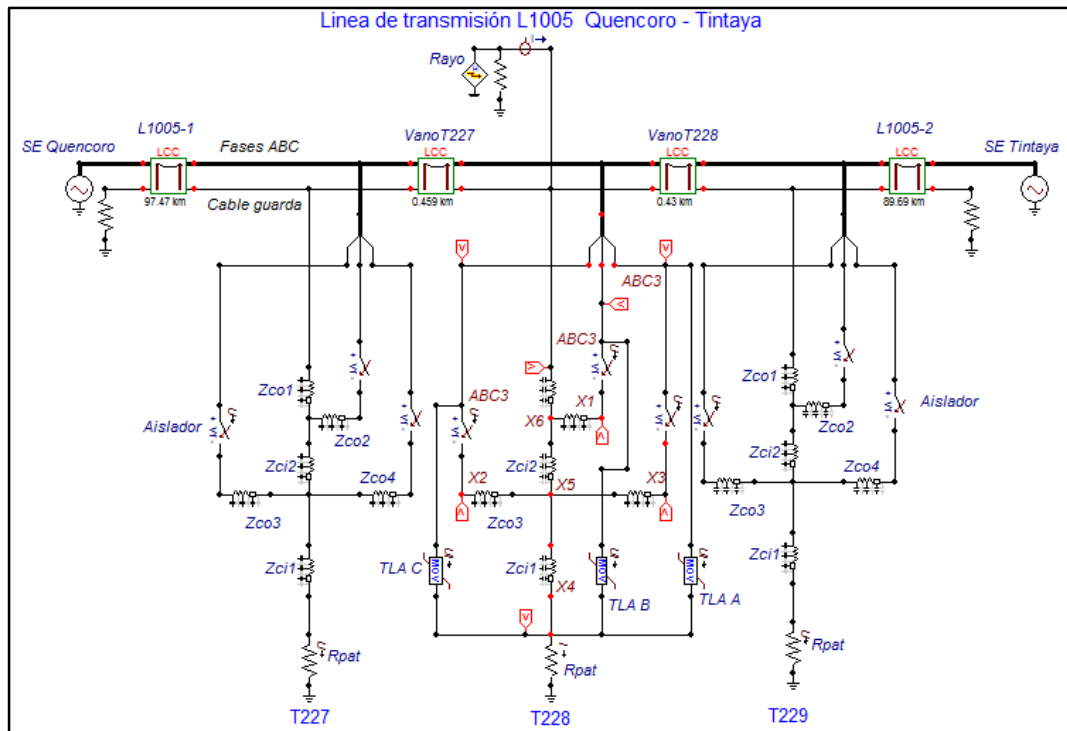
Fuente: Elaboración propia



## Simulación de una descarga atmosférica en el cable de guarda con pararrayos de líneas en las 3 fases de la torre 228

Para este tercer caso de simulación la descarga atmosférica impactará en el cable de guarda de la T228 cuyo valor de resistencia de puesta a tierra es de 110.33 ohm, los valores de la corriente de rayo seguirán siendo variables de 10, 15 y 20 kA respectivamente, a diferencia de los casos anteriores esta vez la línea de transmisión contara con pararrayos de línea conocidos también como TLAs instalados entre cada fase y la estructura de la torre 228, es decir a tierra. En la siguiente figura se muestra el modelo a simular en el ATPDraw para este caso:

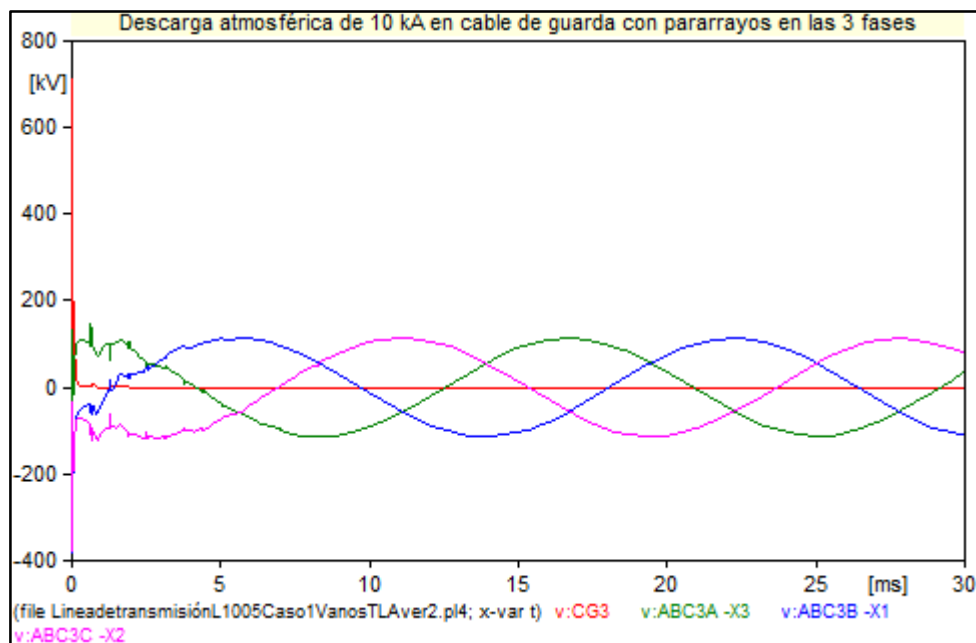
**Figura N° 5.13:** Impacto rayo en CG, con TLAs en T228



Fuente: Elaboración propia

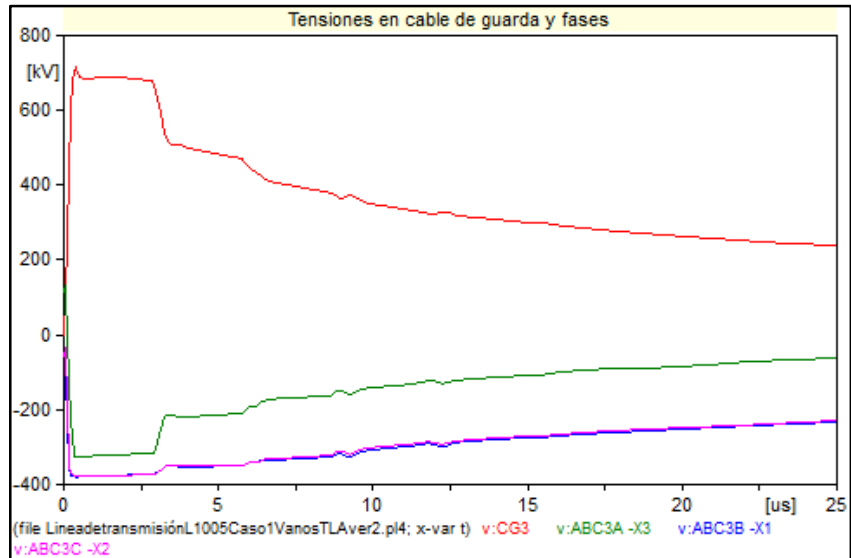
En la siguiente figura se ha tomado una ventana de tiempo de 30 ms para la simulación, donde se observa claramente que el efecto de impacto del rayo de 10 kA en una línea de transmisión dura pocos microsegundos y se atenúa rápidamente hacia las torres adyacentes, por lo que las tensiones de fase se mantienen balanceadas y con sus valores nominales después de pasado el fenómeno transitorio. Adicionalmente se observa que el rayo de 10 kA no provoca back flashover en ninguna de las fases, a diferencia de los casos anteriores. El pararrayos de línea cumple su función de descargar a tierra las sobretensiones en microsegundos, por tal motivo no se produce una falla por aislamiento en las cadenas de los aisladores.

**Figura N° 5.14:** Transitorio en tensiones fase, rayo 10kA



**Fuente:** Elaboración propia

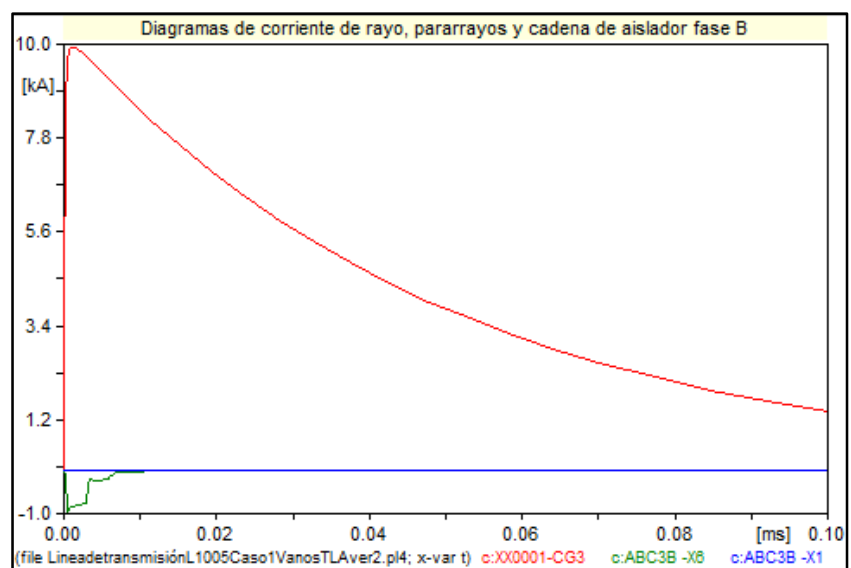
**Figura N° 5.15:** Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 10kA



**Fuente:** Elaboración propia

Observamos los valores de corriente del rayo, la corriente en el TLA fase B y la corriente que circula en la cadena de aisladores fase B es casi cero.

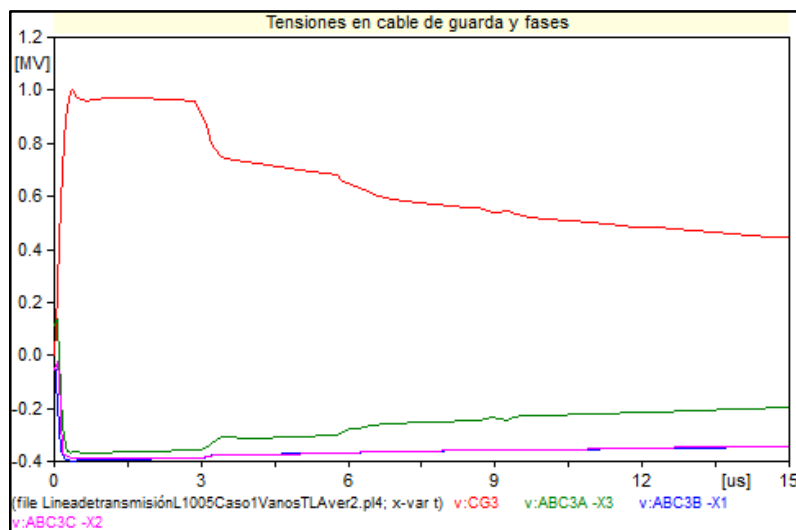
**Figura N° 5.16:** Corriente de rayo 10kA, aislador fase B



**Fuente:** Elaboración propia

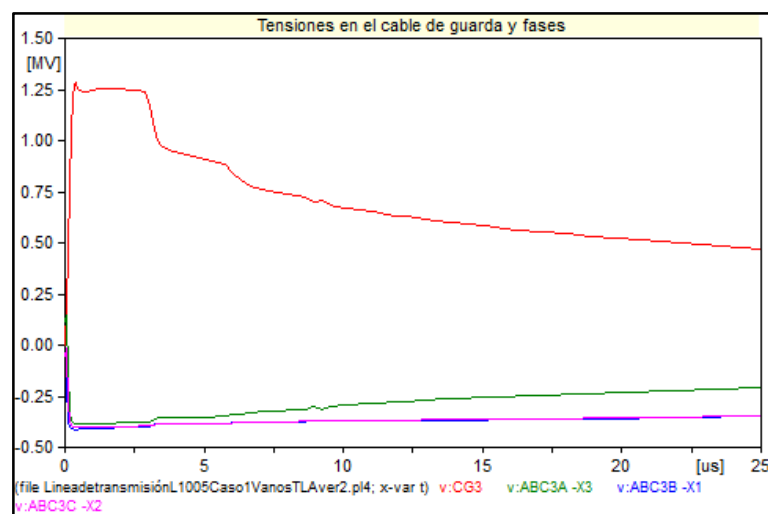
En las siguientes figuras se observa que aun cuando la corriente del rayo aumenta de 15 a 20 kA este no produce back flashover, debido a que las sobretensiones se ven reducidas por los pararrayos de línea.

**Figura N° 5.17:** Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 15kA



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 5.18:** Sobretensiones de fase con TLAs, rayo 20kA



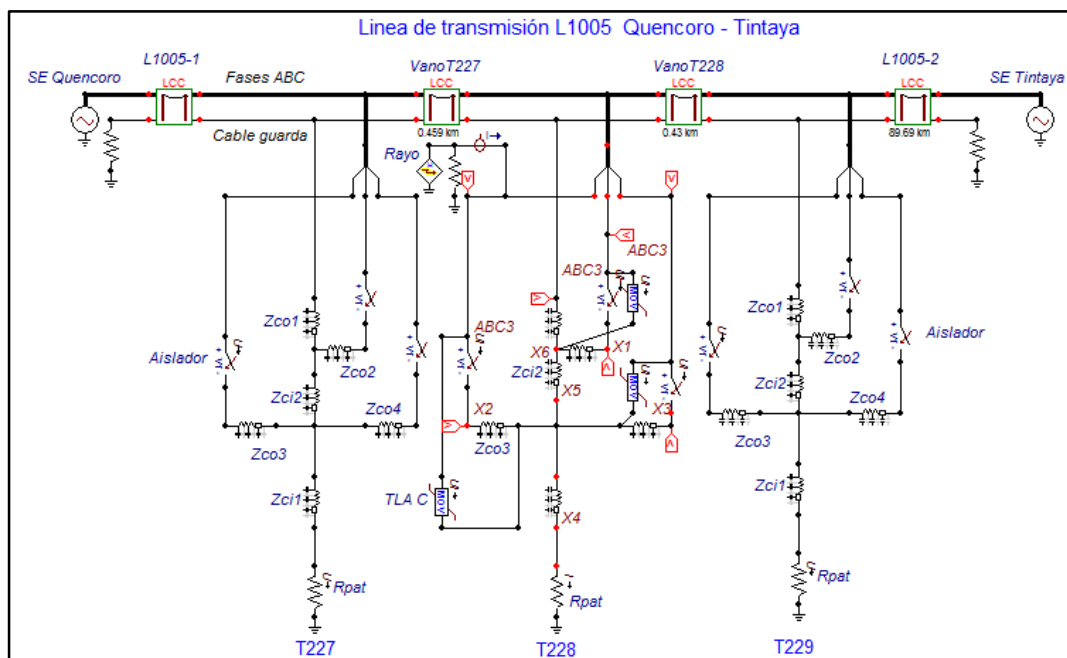
**Fuente:** Elaboración propia

## Simulación de una descarga atmosférica en la fase C con pararrayos de línea en las tres fases de la torre 228

Para este cuarto caso de simulación la descarga atmosférica impactará en la fase C de la T228 cuyo valor de resistencia de puesta a tierra sigue siendo 110.33 ohm, los valores de la corriente de rayo serán variables de 10, 15 y 20 kA respectivamente. Se tiene instalado los pararrayos de línea en cada fase de la línea de transmisión. A comparación del segundo caso, no se debe producir flashover en ninguna de las fases.

En la siguiente figura se muestra el modelo a simular en el ATPDraw para este caso:

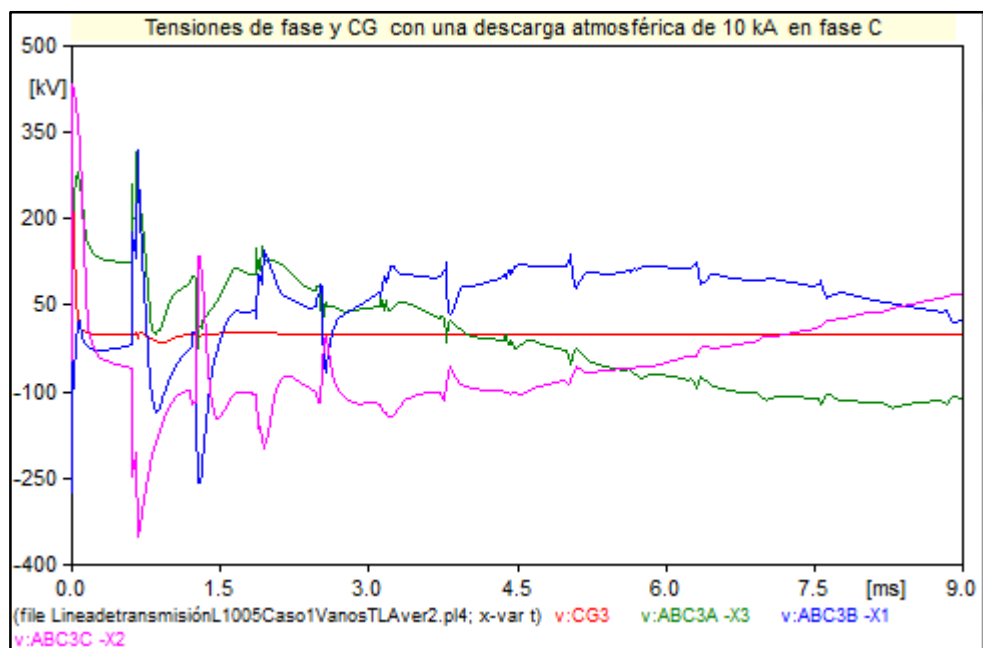
**Figura N° 5.19:** L1005 con TLAs, rayo en fase C



Fuente: Elaboración propia

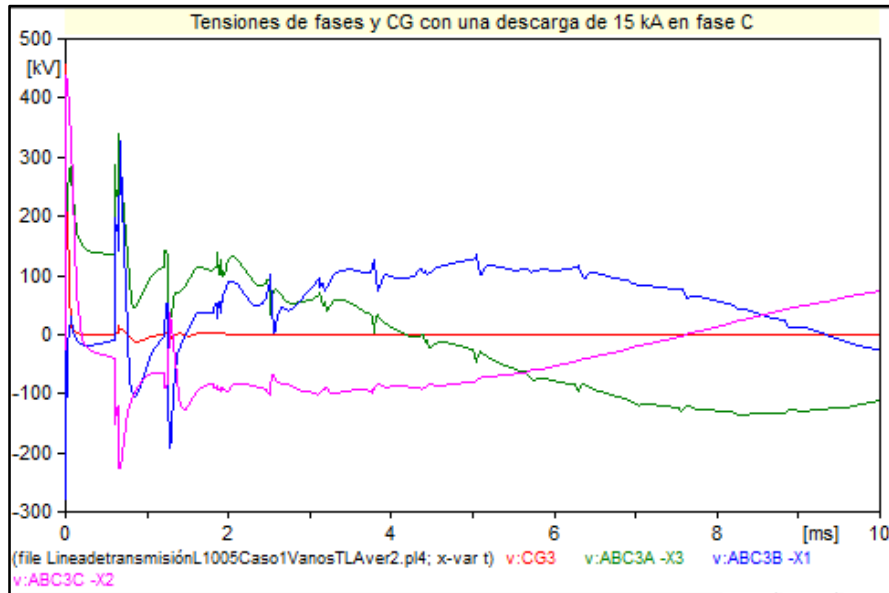
En la siguiente figura se observa las sobretensiones producidas en las fases A, B, C y el cable de guarda cuando es impactado por un rayo de 10 kA, los conductores de fase se encuentran protegidos con los pararrayos de línea, por lo que no se produce flashover en ninguna de las fases. Adicionalmente se observan los transitorios que se producen en todas las fases, en el cable de guarda se observa que se tiene una sobretensión que dura menos de 1 milisegundo y desaparece volviendo a su valor normal en estado estacionario que es de 0 voltios.

**Figura N° 5.20:** Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 10kA



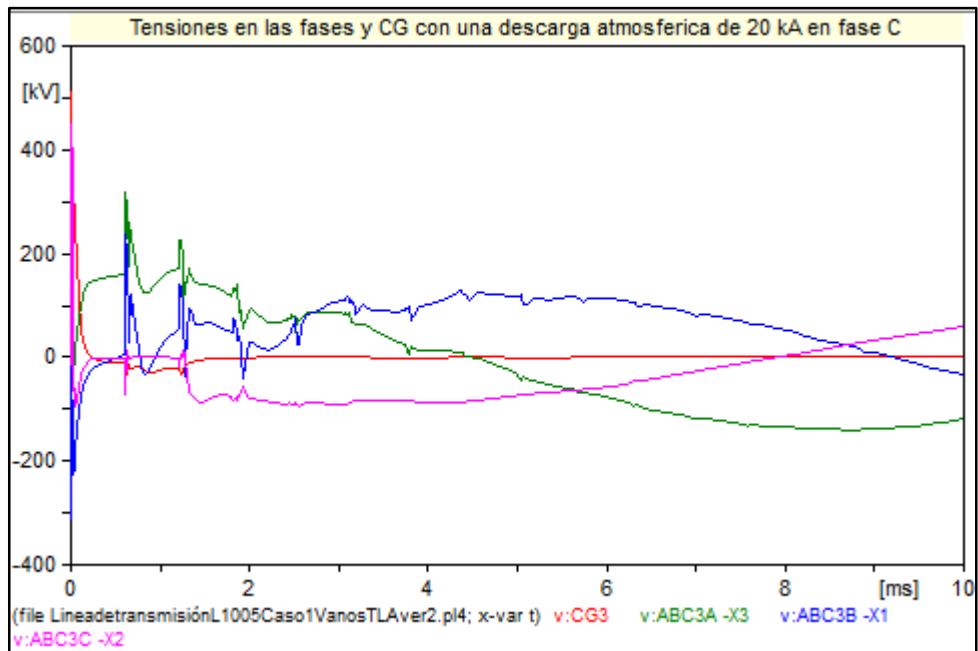
**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 5.21:** Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 15 kA



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura N° 5.22:** Sobretensiones en fases con TLAs, rayo 20 kA



**Fuente:** Elaboración propia

## **VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS**

### **6.1 Contrastación de hipótesis con los resultados**

#### **Hipótesis general**

El modelado de la línea de transmisión L1005 (Quencoro – Tintaya) protegida con pararrayos de línea de ZnO mejora el desempeño de la línea de transmisión frente a descargas atmosféricas.

#### **Contrastación de la Hipótesis general**

Se ha logrado modelar en forma exitosa la línea de transmisión L1005 Quencoro – Tintaya y se ha verificado con la simulación en el software ATPDraw que los pararrayos de línea mejoran el desempeño de esta línea de transmisión frente a las descargas atmosféricas, aumentando la confiabilidad del servicio de transmisión.

#### **Hipótesis específica**

**H.E.1:** Utilizando la norma IEC 61-1 para modelar la forma de onda de la corriente del rayo, el modelo JMarti para representar la línea de transmisión L-1005 y el modelo de pararrayos MOV Type 92 obtendremos una respuesta casi real del comportamiento de la línea de transmisión L-1005 frente a descargas atmosféricas.

#### **Contrastación de H.E.1:**

Se ha demostrado mediante la simulación en el ATPDraw que los modelos propuestos e implementados han sido los correctos y se ha



podido obtener una respuesta casi real de la línea de transmisión frente a descargas atmosféricas. Se verifica la operación del modelo de la línea de transmisión en estado estacionario y transitorio.

**H.E.2:** Realizando el modelado los vanos críticos de la línea de transmisión L1005 en el ATPDraw, podremos evaluar el desempeño de la línea sin necesidad de modelar todas las torres de transmisión.

**Contrastación de H.E.2:**

Se ha demostrado en las simulaciones que no es necesario modelar todas las torres de la línea de transmisión L1005 para obtener una respuesta frente a descargas atmosféricas. Se verifica en las simulaciones que el efecto de las descargas atmosféricas es de muy corta duración del orden de los microsegundos y se amortigua en rápidamente en las torres adyacentes, por lo que fue suficiente modelar solo tres vanos críticos.

## VII. CONCLUSIONES

- 7.1** Se verificó que el modelado de la línea de transmisión L1005 (Quencoro – Tintaya) utilizando los pararrayos de línea de ZnO (óxido de zinc) en el software ATPDraw, mejora el desempeño de dicha línea frente a descargas atmosféricas, es decir, no se producen desconexiones por este fenómeno. La confiabilidad de la línea de transmisión mejora.
- 7.2** Para estudios de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión es recomendable utilizar el modelo JMarti para representar la línea de transmisión L-1005, el modelo MOV type 92 para el pararrayo de línea de ZnO, la fuente tipo Heidler para representar la descarga atmosférica y el interruptor controlado por tensión para representar las cadena de aisladores. Los modelos elegidos fueron los correctos y permitieron determinar el desempeño de la línea de transmisión L1005 con pararrayos frente a descargas a las atmosféricas.
- 7.3** Se identificó como vanos críticos a los comprendidos entre las torres T227, T228 y T229 de la línea de transmisión L1005, de esta forma se simplificó el modelo de la línea de transmisión a realizar en el software ATPDraw y se pudo obtuvo una respuesta casi real de su comportamiento frente a descargas atmosféricas.

## VIII. RECOMENDACIONES

- 8.1** Se recomienda instalar los pararrayos de línea en los vanos críticos identificados de la línea de transmisión L1005 para mejorar su desempeño frente a descargas atmosféricas.
  
- 8.2** Se requiere realizar una estrategia de mantenimiento que permita verificar el estado óptimo y buen funcionamiento de los pararrayos de línea a instalarse.
  
- 8.3** Se recomienda modelar en ATPDraw las líneas de transmisión L1122 y L1124 utilizando pararrayos de línea, debido a que también tienen una alta incidencia de desconexión debido a descargar atmosféricas.

## IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] D'AJUZ, A.; FONSECA, C.; SALGADO, F.; AMON, J.; NORA, L.; POLO, M.; ESMERALDO, P.; VAISMAN, R.; De OLIVEIRA, S. **Transitorios Eléctrico é Cordenacao de Isolamento**. Brasil. Editorial EDUFF. 1987.

[2] DAMAS NIÑO, Marcelo Nemesio. **Separatas del Curso de Tesis – I y Tesis – II**. Lima – Perú. Marzo 2013.

[3] Da Silva, Joaquim Paulo. **Cálculo de tensao induzida por descarga atmosférica: Implementacao da teoría de Rusck no EMTP**. Tesis postgrado. Brasil. Universidad Federal de Minas Gerais. 2001

[4] De Oliveira Pedrosa, Rodrigo. **Estudo da absorcao de energía do para-raios de ZnO instalados en linhas de transmissao de 138 kV**. Tesis postgrado. Brasil. Universidad Federal de Minas Gerais. 2013.

[5] PAREDES QUITO, Sergio. **Simulación de Transitorios Electromagnéticos de la Línea Cuenca – Macas con la Aplicación del Simulador ATP para la Empresa Eléctrica Regional Centro Sur C.A.**

Tesis pregrado. Ecuador. Universidad de Cuenca. 2011.[6] Da Silva, Joaquim Paulo. **Cálculo de tensao induzida por descarga atmosférica: Implementacao da teoría de Rusck no EMTP**. Tesis postgrado. Brasil. Universidad Federal de Minas Gerais. 2001

[6] Pérez Vega, Constantino; Zamanillo, Jose; Casanueva Alicia. **Sistema de telecomunicación**. España. Editorial Universidad de Cantabria. 2007.

[7] SIEGERT C., Luis. **Alta Tensión y Sistemas de Transmisión**. México. Editorial Limusa. 2002.

[8] TOBIAS CHAVARRIA, Guty Ronald. **Protección de líneas de transmisión de 69 kV contra descargas electroatmosféricas utilizando pararrayos polímeros de línea y evaluación técnico-económica**. Tesis pregrado. Universidad de San Carlos de Guatemala. 1995

[9] Vásquez Ocaña, Kléber. **Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP (Alternative transients program) aplicado a la línea de transmisión Santa Rosa – Pomasqui a 230 kV**. Tesis pregrado. Ecuador. Escuela Politécnica Nacional. 2003.