

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**MÉTODO DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN 220 KV  
CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO PARARRAYOS  
DE LÍNEA**

**INFORME DE SUFICIENCIA**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

**INGENIERO ELÉCTRICISTA**

**PRESENTADO POR:**

**MIGUEL ALEJANDRO LINARES VARGAS**

**PROMOCIÓN**

**2010 - I**

**LIMA - PERÚ**

**2013**

**MÉTODO DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN EN 220 KV  
CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO PARARRAYOS  
DE LÍNEA**

Para mi querida familia.

## **SUMARIO**

En el presente informe de suficiencia se describirá una metodología de protección contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión en 220 kV utilizando pararrayos de línea basado en simulaciones en el ATPDraw. Se presenta además la aplicación a una línea de transmisión con la finalidad de verificar su adecuada protección contra descargas atmosférica y de esa manera mejorar la confiabilidad de operación de la línea de transmisión.

## INDICE

<b>CAPITULO I</b>	<b>2</b>
<b>ANTECEDENTES</b>	<b>2</b>
1.1 Objetivo	2
1.2 Alcances	2
1.3 Definiciones Generales	3
1.3.1 Sobretensiones Transitorias en Sistemas Eléctricos	3
1.3.2 Descargas Atmosféricas	4
1.3.3 Teoria de Onda Viajera en Sistemas Eléctricos	6
1.3.4 ATPDraw (Alternative Transients Program)	7
1.3.5 Sistema de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión	8
1.3.6 Pararrayos Polimericos de Línea	10
<b>CAPITULO II</b>	<b>13</b>
<b>MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PROTEGIDA CON PARARRAYOS</b>	<b>13</b>
2.1 Introducción	13
2.2 Modelado del Rayo	13
2.3 Modelado de las Líneas de Transmisión	15
2.3.1 Modelado de conductores en una línea de transmisión	15
2.3.2 Modelado de la torre de transmisión	16
2.3.3 Modelado de Sistemas de Puesta a Tierra	21
2.3.4 Modelado de Cadenas de Aisladores	25
2.4 Modelado del Pararrayos de Línea	26
<b>CAPITULO III</b>	<b>29</b>
<b>MÉTODO DE PROTECCION DE LINEAS DE TRANSMISION DE 220 KV CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO PARARRAYOS</b>	<b>29</b>
3.1 Descripción de la Metodología	30

3.2	Criterios Generales	33
3.2.1	Factor de corrección a aisladores	33
3.2.2	Fenómenos transitorios originados por una corriente de rayo	33
3.2.3	Despreciando el efecto corona	34
3.2.4	Considerando el peor escenario	35
3.2.5	Probabilidad de caída de rayo	35
3.2.6	Caídas múltiples de impulsos de rayo	36
3.2.7	Reflejo de impulso rayo	36
3.2.8	Tiempo de paso y tiempo de simulación	36
3.3	Consideraciones Generales del Método	36
3.4	Validación del Modelo	38
3.4.1	Prueba de campo	38
	<b>CAPITULO IV</b>	<b>39</b>
	<b>APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA</b>	<b>39</b>
4.1	Caso de Estudio (Línea de Transmisión en 220 kV)	39
4.2	Datos del Sistema Eléctrico a Estudiar	39
4.2.1	Datos de la línea de transmisión	39
4.2.2	Datos de las puestas a tierra	40
4.2.3	Datos de los pararrayos	41
4.3	Aplicación de la Metodología	41
4.4	Modelado y Simulación	44
4.5	Simulación y Resultados	45
4.5.1	Caso de Estudio 1: Sin pararrayos de línea	45
4.5.2	Caso de Estudio 2: Pararrayos de línea en torre adyacente	48
4.5.3	Caso de Estudio 3: Pararrayos de línea en las torres necesarias	49
4.5.4	Observaciones	50
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	<b>51</b>
	<b>ANEXO A: SELECCIÓN ADECUADA DE PARARRAYOS</b>	<b>52</b>
	<b>ANEXO B: MODELADO DINÁMICO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN</b>	<b>59</b>
	<b>ANEXO C: DIAGRAMA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO</b>	<b>63</b>
	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>66</b>

## **PROLOGO**

Este trabajo surge a partir de la necesidad de proteger líneas de transmisión en 220 kV contra descargas atmosféricas utilizando pararrayos de línea, para obtener una mejor protección contra rayos con relación a las líneas que solo utilizan cables de guarda, permitiendo de esta manera mejorar la confiabilidad de las líneas de transmisión, disminuyendo la tasa de salida de la línea debido a descargas atmosféricas. Es por ello que el estudio eléctrico más importante para entender este fenómeno es el estudio de transitorios electromagnéticos de frente de onda rápido.

El presente trabajo comienza desarrollando el marco teórico básico para el análisis de sobretensiones transitorias en líneas de transmisión donde se describen los diferentes conceptos que se deben tener en cuenta para entender los fenómenos asociados a los transitorios electromagnéticos, también se describirá el elemento más importante para la protección contra descargas atmosféricas, los pararrayos de línea. Luego se detalla el modelado de los principales componentes de la línea de transmisión que se utilizará en la simulación, estos modelos serán adaptados para ser modelados de manera práctica en el software Alternative Transient Program (ATPDraw).

En los últimos capítulos se describirá el método planteado de protección de líneas de transmisión en 220 kV contra descargas atmosféricas utilizando pararrayos de línea. Mediante el ATPDraw y utilizando modelos de componentes eléctricos para transitorias de alta frecuencia se procederá a realizar simulaciones de impacto de rayos en la líneas de transmisión en 220 kV típicas, mediante los cuales se determinan los perfiles de sobretensiones en cada punto de análisis, las simulaciones se realizan considerando en la línea de transmisión la inclusión de pararrayos; para finalmente establecer una serie de criterios y determinar el número óptimo de pararrayos hacer utilizado en la línea de transmisión. Y finalmente se obtiene una serie de conclusiones y recomendaciones.

# **CAPITULO I**

## **ANTECEDENTES**

### **1.1 Objetivo**

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar un método de protección contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión de 220 kV utilizando pararrayos de línea, para evitar la formación de contorno inverso en la cadena de aisladores y de esa manera mejorar la confiabilidad de operación de la línea de transmisión, para ello se tienen los siguientes objetivos específicos:

- a) Describir la metodología de protección basado en el análisis de transitorios de frente de onda rápido utilizando modelos en el ATP/EMTP.
- b) Aplicar dicha metodología a una línea de transmisión en 220 kV. Se tomará un modelo general de líneas de transmisión en zonas de gran altitud con alta incidencia de descargas atmosféricas.

### **1.2 Alcances**

El análisis de las sobretensiones transitorias debido a las descargas atmosféricas en líneas de transmisión es un proceso complejo y comprende muchas partes.

La protección de líneas de transmisión con pararrayos involucra el cálculo de las sobretensiones producidas por el impacto de un rayo en la estructura de la torre, en los aisladores y en los conductores de fase (además de una selección adecuada de los de pararrayos) y finalmente la verificación de que los pararrayos cumplen la función de protección en los tramos de línea donde se instalan, determinando para ello el número de pararrayos necesarios.

En el presente informe se detalla la metodología de modelado así como los procedimientos requeridos para una adecuada protección de líneas de transmisión utilizando pararrayos de línea. Este método recibe como datos de entrada los modelos de los diferentes equipos y componentes que conforman las líneas eléctricas para simular transitorios de frente de onda rápida.

Los modelos desarrollados en el presente trabajo se enfocarán en simular el comportamiento del sistema eléctrico frente a descargas atmosféricas del tipo de polaridad negativa descendente, debido a que éstos son los tipos de descargas atmosféricas que con mayor frecuencia impactan en las líneas de transmisión. Para el modelado y simulación se utilizará el programa computacional ATPDraw para determinar las sobretensiones producidas por una descarga atmosférica.

No es alcance de este informe de suficiencia el estudio del apantallamiento eléctrico en líneas de transmisión, estudios estadísticos de las descargas atmosféricas, ni tampoco se incluye cálculos mecánicos en las estructuras que conforman las torres de transmisión.

### **1.3 Definiciones Generales**

#### **1.3.1 Sobretensiones Transitorias en Sistemas Eléctricos**

En general las líneas de transmisión de alta tensión se presentan fenómenos electromagnéticos de tipo transitorio tales como sobretensiones temporales y sobretensiones transitorias o una combinación de éstas.

Las sobretensiones son tensiones entre fase y tierra o fase y fase con un valor pico que exceda el pico correspondiente a la tensión más alta de diseño para el equipo eléctrico. Las tensiones y sobretensiones pueden clasificarse según la norma IEC 60071, éstas no se basan en el origen de las sobretensiones sino más bien en su forma y duración. Se divide en las siguientes clases:

**Tensión permanente a frecuencia industrial:** Es una tensión de régimen (rms) permanente a frecuencia industrial que tiene un valor constante y se aplica continuamente.

**Sobretensión temporal:** Es un valor anormal de tensión con una amplitud igual o inferior a 1.5p.u. la tensión máxima de operación, son de larga duración. Las causa principal de estas son: pérdida súbita de carga (rechazo de carga), desconexión de cargas inductivas o conexión de cargas capacitivas, efecto Ferranti, fallas desbalanceadas a tierra y fenómenos no lineales como ferresonancia.

**Sobretensión transitoria de frente de onda lento:** Es un valor anormal de tensión con una amplitud igual o inferior a 4p.u. la tensión máxima de operación, tiene una duración de varios milisegundos y están descritas por ondas aperiódicas. Las causas principales de estas son: energización de líneas, re-energización de líneas, rechazo de cargas, maniobras de transformadores sin carga, arranque de motores, etc.

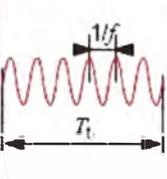
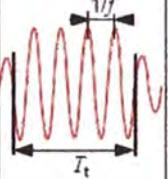
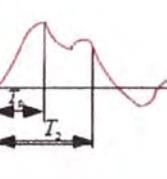
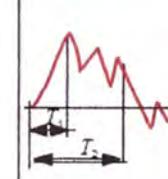
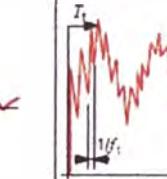
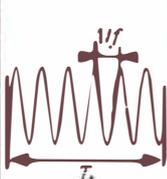
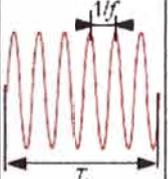
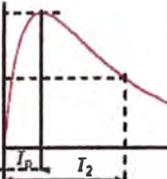
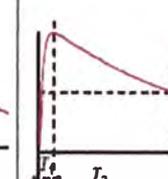
**Sobretensión transitoria de frente de onda rápida:** Es un valor anormal de tensión unidireccional, tiene una duración de varios microsegundos y están descritas por ondas

aperiódicas. Las sobretensiones de frente de onda rápida son causadas principalmente por descargas atmosféricas que impactan en las líneas de transmisión de manera directa en los conductores de fase o por contorneo inversos en la cadena de aisladores de la línea de transmisión.

**Sobretensión transitoria de frente de onda muy rápida:** Es un valor anormal de tensión unidireccional, tiene una duración de varios nanosegundos y están descritas por ondas aperiódicas. Las sobretensiones de frente de onda muy rápido son causadas principalmente por maniobras en subestaciones GIS.

En la Tabla 1.1 se muestran los tipos de onda y se dan las características de las tensiones y sobretensiones de acuerdo a la clasificación de la Norma IEC 60071-1.

**TABLA N° 1.1 Tipos de ondas características de tensiones y sobretensiones**

Clase	Baja frecuencia		Transitoria		
	Continuo	Temporal	Frente-lento	Frente-rápido	Frente muy rapido
Rango de voltaje o sobrevoltaje por fase					
Voltaje o sobrevoltaje por fase	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t \geq 3\,600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0,03 \text{ s} \leq T_t \leq 3\,600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5\,000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$3 \text{ ns} < T_t \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Voltaje estándar por fase					
	$f = 50 \text{ Hz}$ or $60 \text{ Hz}$ $T_t$	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2\,500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1,2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Prueba estándar	Prueba a frecuencia nominal de corta duración	Prueba a frecuencia nominal de corta duración	Prueba a impulso de maniobra	Prueba a impulso de rayo	

La descarga atmosférica o rayo se define como una descarga violenta de cargas eléctricas en un campo eléctrico creado entre una nube y la tierra o entre nubes. Las sobretensiones producidas por una descarga atmosférica se comportan como ondas de alta frecuencia que pueden alcanzar decenas de millones de voltios y la magnitud del impulso de corriente puede fluctuar entre 1 kA y 200 kA con una duración entre 5 y 500 microsegundos.

### **Tipos de descargas atmosféricas**

Existen cuatro tipos de rayo según lo definido por Berger; el nombre asociado a cada tipo corresponde primero a la polaridad de la carga en la nube donde inicia el rayo y segundo a la dirección que sigue el rayo, estos son:

Rayo de polaridad negativa descendente

Rayo de polaridad negativa ascendente

Rayo de polaridad positiva ascendente

Rayo de polaridad positiva descendente

### **Rayo de polaridad negativa descendente**

Rayo de polaridad negativa descendente, predomina en estructuras con alturas menores a los 100 metros en terrenos llanos u ondulados; aproximadamente del 85 al 95% de los rayos que impactan en estas estructuras son rayos de polaridad negativa, con una magnitud promedio de 33 kA. Por lo tanto, para el estudio de líneas de transmisión el análisis de los rayos de polaridad negativa descendente es de principal preocupación.

### **Parámetros típicos de un rayo**

Para estudios eléctricos los parámetros del rayo de mayor interés son:

La corriente pico (kA) de la primera descarga y de las subsecuentes.

La tasa de crecimiento de la corriente en el frente de onda kA/ $\mu$ s.

La forma de onda de la corriente.

El tiempo del frente de onda.

El tiempo de la cresta de la onda.

El tiempo de cola del impulso.

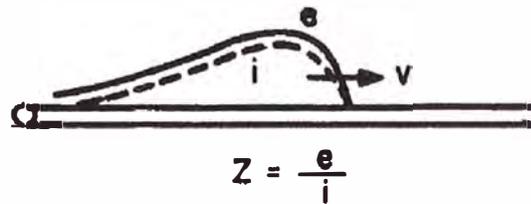
Correlación entre los parámetros kA y kA/ $\mu$ s.

La tasa de incidencia de descargas por kilómetro cuadrado por año (Ng).

### 1.3.3 Teoría de Onda Viajera en Sistemas Eléctricos

#### Impedancia Característica

La impedancia característica ( $Z$ ) es la relación de tensión ( $e$ ) y de corriente ( $i$ ) que produce una onda que se desplaza a lo largo del conductor a una velocidad de propagación ( $v$ ), siendo  $Z$  igual a  $e/i$  tal como es representado en la Figura 1.1.



**Figura 1.1 Representación de una onda viajera desplazándose por un conductor**

Las siguientes ecuaciones pueden ser desarrolladas:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad , \quad v = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \dots(1.1)$$

Donde:

L: Inductancia

C: Capacitancia

v: Velocidad de propagación

#### Comportamiento de la Ondas Viajeras

Cuando las ondas de tensión y corriente que viajan en una línea de transmisión llegan a un punto de discontinuidad, es decir, a un cambio en la impedancia del circuito las ondas de tensión y de corriente se reflejan, y otras ondas se transmiten.

En la Figura 1.2 se muestra un pequeño tramo de un circuito eléctrico que se compone básicamente de una impedancia de conductor  $Z_1$  y otra impedancia final  $Z_k$ , que puede ser resistiva, capacitiva, inductiva o cualquier combinación de éstos, donde la suma de todas las corrientes en el nodo A es cero. Las ecuaciones utilizadas para la solución generalmente del circuito eléctrico se dividen en las ecuaciones normales, que describen las ondas que se desplazan por el circuito y las ecuaciones de contorno, que especifican las condiciones de tensión y corriente necesarias en el punto de discontinuidad. Estas ecuaciones matemáticas son:

Ecuaciones Normales

$$e = iZ$$

$$e' = i'Z$$

$$e'' = i''Z_k$$

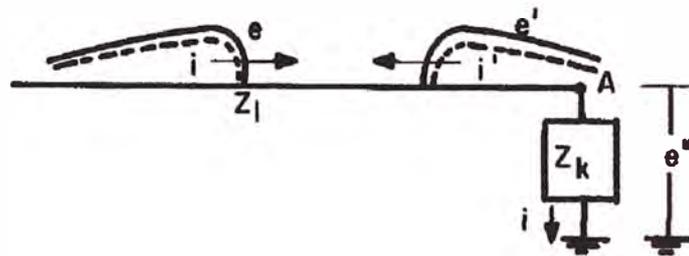
Ecuaciones de Contorno

$$i'' = i - i'$$

$$e'' = e + e' \quad \dots(1.2)$$

Desarrollando las ecuaciones tenemos:

$$e'' = \frac{2Z_k}{Z + Z_k} e$$



**Figura 1.2 Circuito general**

También se tiene:

$$i'' = \frac{2Z}{Z + Z_k} i \quad e' = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} e \quad i' = \frac{Z_k - Z}{Z + Z_k} i \quad \dots(1.3)$$

Cuando \$Z\_k=0\$, en un cortocircuito, se tiene:

$$\begin{aligned} e'' &= 0 & i'' &= 2i \\ e' &= -e & i' &= -i \end{aligned} \quad \dots(1.4)$$

Cuando \$Z\_k= \infty\$, en circuito abierto, se tiene:

$$\begin{aligned} e'' &= 2e & i'' &= 0 \\ e' &= e & i' &= -i \end{aligned} \quad \dots(1.5)$$

### 1.3.4 ATPDraw (Alternative Transients Program)

Ante la necesidad de contar con información detallada relativa a los fenómenos electromagnéticos transitorios que se pueden presentar en los sistemas eléctricos de potencia, han surgido herramientas computacionales y métodos numéricos avanzados que permiten analizar prácticamente cualquier evento transitorio en los sistemas eléctricos donde se presenten estos fenómenos.

El ATPDraw para Windows es un preprocesador gráfico (mouse – driven), para la versión ATP del Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP).

Este programa ayuda a crear y editar el modelo de la red eléctrica que será simulado, interactivamente. En el programa el usuario puede construir un circuito eléctrico, seleccionando los componentes predefinidos de un menú de elementos. El preprocesador entonces crea el archivo de entrada correspondiente del ATP automáticamente en el formato correcto. El nombre de los nodos del circuito es administrado por el ATPDraw y el usuario solo necesita darle nombre a los nodos claves.

El ATPDraw actualmente mantiene aproximadamente 70 componentes estándar y 28 objetos TACS. Además, el usuario puede crear sus propios objetos de circuito usando el módulo de base de datos del ATP. Circuitos monofásicos y trifásicos pueden ser construidos. Múltiples ventanas del circuito pueden mantenerse para trabajar en varios circuitos simultáneamente y copiar información entre ellos. La posibilidad de construir bibliotecas de circuitos y subcircuitos hace del ATPDraw una herramienta poderosa en el análisis de transitorios de sistemas eléctricos de potencia.

El paquete ATPDraw incluye el programa ATP\_LCC para las constantes de Línea/Cable y una utilidad que hace posible el uso de archivos de circuitos existentes creados por versiones anteriores del programa bajo el nuevo ambiente; el programa está escrito en Fortran.

El ATP es considerado como uno de los programas más utilizados para la simulación digital de fenómenos transitorios electromagnéticos, así como de naturaleza electromecánica en sistemas eléctricos de potencia. Esto ha sido desarrollado continuamente a través de contribuciones internacionales sobre los pasados 25 años, coordinado por el grupo de usuarios del EMTP Canadiense/Americano.

Los métodos y modelos básicos usados en el EMTP, están explicados de manera detallada en el libro "Electro-Magnetic Transients Program", Theory Book.

Estos modelos matemáticos desarrollados en el EMTP, son la base sólida que sustenta el modelado de los diferentes componentes y equipos eléctricos que se detallará en el siguiente capítulo.

### **1.3.5 Sistema de Puesta a Tierra en Líneas de Transmisión**

El sistema de puesta a tierra es un factor muy importante en el diseño de líneas de transmisión, puesto que por éste se propagará las corrientes de falla a tierra, reduciendo los potenciales peligrosos en torno a la estructura y un correcto funcionamiento de las

protecciones eléctricas. Por lo general existe un sistema de puesta a tierra en cada torre de una línea de transmisión de alta tensión que esta compuesta por contrapesos o varillas conductoras, en lo posible éste tiene un valor de resistencia de dispersión menor a 25 ohms.

El valor y el comportamiento transitorio de la puesta a tierra de las torres de la línea es un factor importante que se tiene en cuenta para el análisis de la respuesta transitoria de la línea de transmisión en especial para el análisis de la dispersión de la corriente de rayo, por ellos se establece el concepto de impedancia de impulso de la puesta a tierra.

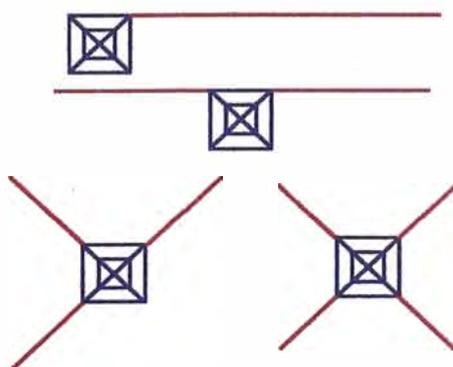
### **Impedancia frente a transitorios de alta frecuencia**

Al analizar el comportamiento a altas frecuencias no solo el componente resistivo es importante sino también el comportamiento inductivo y capacitivo de la puesta a tierra, en el caso particular del contrapeso este valor es importante. En el caso de varillas verticales se puede modelar por el modelo ionizante (véase Capítulo 3).

### **Contrapesos**

La utilización de contrapesos es de práctica común y consiste en enterrar horizontalmente conductores desnudos conectados a las estructuras de las torres, donde la resistencia disminuirá con la longitud y con el aumento del diámetro del contrapeso, siendo un medio excelente para reducir la resistencia de la puesta a tierra por que incrementa el área de contacto con el suelo, sin embargo pueden tener altos valores de impedancia transitoria. Para disminuir esta impedancia de impulso se recomienda tener contrapesos de longitudes inferiores a las 30m.

Un contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso, dependiente de las condiciones del suelo. Con la propagación de la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia de impulso puede ser elevada y evitar una adecuada derivación de la corriente transitoria de alta frecuencia a tierra, afectando negativamente la operatividad de la línea. En la Figura 1.3 se muestra diferentes configuraciones de contrapesos.



**Figura 1.3 Contrapesos en diferentes configuraciones**

### 1.3.6 Pararrayos Poliméricos de Línea

El pararrayos es un dispositivo cuyo objetivo fundamental es la protección contra sobretensiones reduciendo las amplitudes de las sobretensiones de frente de onda lenta y rápida en los terminales de los equipos o sistemas protegidos a niveles de sobretensión aceptables, de tal manera que después de desaparecer dichas sobretensiones el aislamiento de los equipos del sistema eléctrico no sufra daños [7].

En especial, para líneas de transmisión es de uso común de los pararrayos poliméricos de óxido de zinc, debido a que:

El peso permite la fácil instalación en estructuras existentes.

El revestimiento de polímero ofrece mayor seguridad para los componentes de la línea y las personas que puedan haber en las proximidades.

Están expuestos a condiciones más duras que en una subestación eléctrica.

Tiene adecuado valores de energía de disipación.

#### **Pararrayos de óxido de Zinc (ZnO)**

Este dispositivo está formado por elementos en la base de óxido de zinc (ZnO) y pequeñas cantidades de otros óxidos metálicos adicionados al ZnO presentan un elevado grado de no linealidad en su característica “voltaje versus corriente”, brindando a los elementos de ZnO bajos valores de corriente en la región de operación, asociado a una buena estabilidad cuando continuamente se requiere del voltaje normal de operación, aparte de alta capacidad de absorción de energía.

El pararrayos de óxido de zinc con envoltorio polimérico, por el hecho de presentar menor peso, mayor facilidad y flexibilidad en el montaje, y por la no fragmentación o explosión de dicho envoltorio con desprendimiento de los elementos de ZnO, ha sido instalado más próximo a los equipos a proteger, mejorando de forma considerable las características de protección de esos equipos cuando se presentan sobretensiones electromagnéticas de frente rápido, a través de la reducción de voltajes impulsivos en sus terminales, debido a la menor extensión de los cables de conexión y la menor distancia de los pararrayos a los equipos, siendo muy práctica en algunos casos, la instalación de pararrayos directamente en las terminales de los transformadores.

#### **Funcionamiento del pararrayos**

El funcionamiento del pararrayos se basa en el comportamiento no lineal, variable y dependiente de la tensión que posee el varistor, se describe de la siguiente manera:

Para condiciones de tensión nominal, el funcionamiento del pararrayos es similar al de un aislador que está conectado a una red eléctrica.

Para condiciones de sobretensión, el funcionamiento del pararrayos sigue la trayectoria de valores no lineales de la curva característica tensión - corriente.

### **Funcionamiento en condiciones de tensión nominal de la red**

En condiciones normales de operación de la red, el pararrayos se comporta como un aislante eléctrico conectado entre la línea (fase) y tierra, en estas circunstancias el varistor de óxido metálico presenta un valor muy alto de resistencia eléctrica, con la circulación a través del varistor y sobre el aislamiento de pequeñas corrientes de fuga de tipo capacitivo - resistivo, con componentes armónicas, cuyo valor (rms) está comprendido entre 0.2 mA y 3 mA; dicha corriente fluye de manera permanente entre línea y tierra a través del pararrayos en condiciones normales de operación.

### **Funcionamiento en condiciones de sobretensión en la red**

En condición de sobretensión en el sistema eléctrico se produce el comportamiento dinámico del varistor de óxido metálico, lo que se traduce en la reducción del valor de su resistencia eléctrica y en consecuencia el incremento del valor de corriente que pasa por el pararrayos hacia tierra. Este comportamiento dinámico se ve reflejado, según la ley de Ohm, en el valor de la tensión presente entre los terminales del pararrayos. Los valores de tensión que describen el comportamiento dinámico del pararrayos son los siguientes:

Tensión nominal del pararrayos, es el máximo valor eficaz de tensión de fase-tierra permisible entre los terminales del pararrayos, para el cual ha sido diseñado; se utiliza como un parámetro de referencia para las características específicas de operación.

Tensión de conducción del pararrayos, es la mínima magnitud de tensión que provoca el estado pleno de conducción del pararrayos. Corresponde al punto de la característica tensión - corriente en el cual la pendiente de la recta tangente a la curva se reduce significativamente, punto de inflexión.

Tensión de desconducción del pararrayos, es el valor máximo de tensión post descarga en la que al eliminarse la sobretensión, se recupera plenamente la resistencia a la conducción facilitando provoca el corte del paso de corriente a tierra y haciendo que el pararrayos alcance y mantenga el estado de aislador eléctrico.

Tensión máxima de operación continua (MCOV), es el máximo valor de tensión al cual puede quedar sometido el pararrayos antes de iniciar el estado de conducción. En la

característica tensión - corriente del varistor, corresponde al punto en el cual la pendiente de la recta tangente a la curva empieza a reducir su valor.

En general, cuando aparece una sobretensión en la red, éste se ve reflejado en los terminales del pararrayos, conectados entre la línea y tierra. Al momento que la tensión en los terminales del pararrayos supera el MCOV se inicia la reducción de la resistencia eléctrica del MOV, empezando la circulación de una corriente a través del pararrayos. Al momento que la tensión en los terminales del pararrayos supera el valor de la tensión de conducción, se da una reducción abrupta y significativa en la resistencia eléctrica del MOV y a través del pararrayos circula una corriente que es drenada a tierra. Luego que la sobretensión se ha eliminado y llega a una magnitud igual o menor a la tensión de desconducción se interrumpe el paso de corriente por el pararrayos y éste recupera el estado de aislamiento que poseía antes de que apareciera la sobretensión.

Se debe hacer una adecuada selección del pararrayos y su relación con la máxima tensión tolerable en el sistema (véase Anexo A).

## CAPITULO II

### MODELADO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN PROTEGIDA CON PARARRAYOS

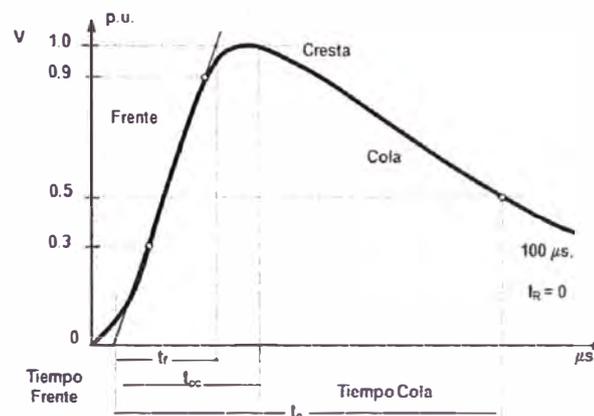
#### 2.1 Introducción

En este capítulo se realiza una síntesis de trabajos de investigación centradas en el desarrollo de directrices de modelado de transitorios de frente rápido (es decir, en un rango de frecuencia de 10 kHz hasta 1 MHz), donde se usa filosofías de modelado, relaciones matemáticas simplificadas y datos típicos de componentes eléctricos de una línea de transmisión. Los modelos a desarrollar son simulados mediante la ayuda del programa de análisis de transitorios electromagnéticos de sistemas eléctricos ATPDraw Versión 5.7.

#### 2.2 Modelado del Rayo

El ATPDraw tiene programado modelos de fuentes de corriente tipo impulso, que obedecen a distintas funciones matemáticas adoptadas por organismos internacionales de normalización (IEEE, IEC, etc.). Los modelos de onda de rayo más populares son los de doble exponencial, la triangular y la función de Heidler.

El impulso de rayo estándar se describe por su tiempo a cresta y su tiempo a la mitad del valor de la cola, como se muestra en la Figura 2.1. La norma IEC 60071-1, establece un rango para  $t_f$  comprendida entre  $0.1 \mu s$  y  $20 \mu s$  y un valor menor de  $300 \mu s$  para  $t_T$ ; con un valor estándar para  $t_f$  igual a  $1.2 \mu s$  y para  $t_T$  igual a  $50 \mu s$ , onda tipo 1.2/50.



**Figura 2.1** Forma de onda estandarizada tipo impulso rayo

En el desarrollo del presente trabajo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 [3] debido a que es la fuente que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda del rayo estándar. Este modelo está definido por la siguiente expresión:

$$h(t) = k \frac{(t/\tau)^n}{1 + (t/\tau)^n} \cdot e^{-t/\tau} \quad \dots(2.1)$$

Las características de este modelo implementado en el ATPDraw, modelo Heidler tipo 15, se muestran a continuación:

- Tipo: Fuente de corriente
- Amplitud (A): El valor pico de la función onda
- T<sub>f</sub> (t): El tiempo de frente de onda. Intervalo entre t=0 y el tiempo del pico de la función onda
- Tau (t): Duración entre el tiempo t=0 y el tiempo cuando la amplitud de la función rayo ha caído a 37% de su valor pico.
- n: Factor que influye en la tasa de aumento la función onda
- T<sub>sta</sub> (t): >Tiempo de comienzo
- T<sub>sto</sub> (t): Tiempo de parada

La expresión matemática de la función onda es:

$$h(t) = \text{Amplitud} \frac{(t/T_f)^n}{1 + (t/T_f)^n} \cdot e^{-t/\tau} \quad \dots(2.2)$$

La ventana de entrada se muestra en la Figura 2.2.

### Consideraciones

Hay que tener en cuenta los siguientes puntos:

- El modelo anterior desarrollado representa a las descargas atmosféricas de polaridad negativa descendentes; debido a que son las más comunes (alrededor de un 85% de los rayos que afectan a instalaciones eléctricas son de polaridad negativa) y los que se consideran en las normas como la IEC, ANSI y estándares de fabricación.
- Para definir adecuadamente el comportamiento de la forma de onda hay que tener en consideración que el tiempo de frente de onda (T<sub>f</sub>) depende de la magnitud del rayo como se muestra en la siguiente expresión [1]:

$$t_f = 0.207 \cdot I_F^{0.53}$$

- El factor  $n$  es importante porque afecta el comportamiento de la onda en el tiempo de frente de onda, el valor recomendado está en el intervalo entre 2 y 4.

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Amplitude	Ampere		HEI	1	
T <sub>f</sub>	s				
t <sub>au</sub>	s				
n					
T <sub>start</sub>	s				
T <sub>stop</sub>	s				

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label: RAYO

Comment:

Type of source  
 Current  Hide  
 Voltage

Edit definitions OK Cancel Help

**Figura 2.2 Ventana de datos de entrada del rayo**

## 2.3 Modelado de Líneas de Transmisión

A continuación se detalla el modelado de los principales elementos que constituyen la línea de transmisión.

### 2.3.1 Modelado de conductores en una línea de transmisión

Para el análisis de transitorios electromagnéticos en líneas de transmisión los parámetros más representativos son: la impedancia característica y el factor de propagación, que de forma general están dados por las siguientes expresiones [3]:

$$Z(w) = \sqrt{\frac{R' + jwL'}{G' + jwC'}} \quad \dots(2.3)$$

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

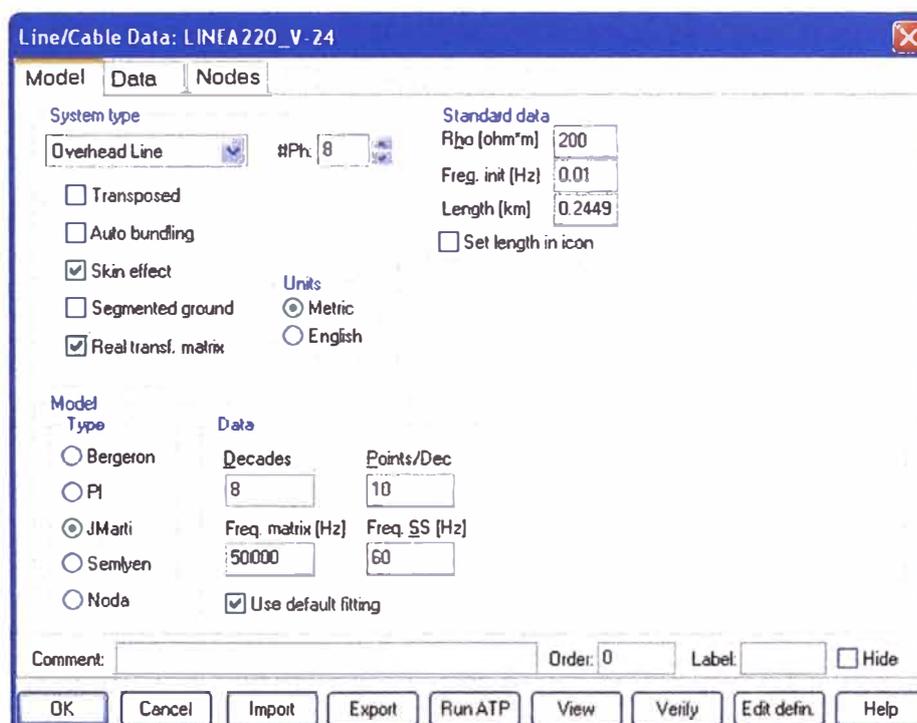
El exponente  $\gamma$  se denomina constante de propagación y está dado por:

$$\gamma = \sqrt{(R' + jwL')(G' + jwC')} \quad \dots(2.4)$$

Tanto  $Z$  y  $\gamma$  son complejos y dependientes de la frecuencia. Donde  $R'$ ,  $L'$ ,  $C'$  y  $G'$  son los parámetros de la línea de transmisión, los cuales juegan un papel importante en la determinación de  $Z$  y  $\gamma$ .

Para el análisis, en el presente trabajo se utiliza el modelo de ATP LCC del tipo JMarti disponible en el ATPDraw que modela la línea de transmisión y sus respectivos parámetros en función de la frecuencia, este modelo está especializado para el análisis de transitorios de alta frecuencia, debido a que:

- Este modelo fue desarrollado para el modelado de líneas de transmisión en un rango completo de frecuencias.
- Las rutinas de obtención de datos es sencilla y ayudan a obtener una representación en transformaciones nodales de líneas desbalanceadas y no transpuestas.
- El proceso que realizó J. Marti se basa en la aplicación básica de BODE, el cual adapta la función libremente dependiendo como se vayan necesitando polos y ceros para la curva.



**Figura 2.3 Caja de dialogo de datos del modelo de la línea**

En la Figura 2.3 se muestra una ventana cuyos datos corresponden al modelo de la línea de transmisión que será utilizada, donde se muestra la caja de dialogo de entrada que corresponde a los datos geométricos de la línea, como son la disposición de los conductores, números de hilos por fase, radio interno y externo, altura de la torre, etc.

### 2.3.2 Modelado de la torre de transmisión

Para el modelado de la torre de transmisión principalmente se utiliza una serie de impedancias, teniendo como parámetro principal la impedancia característica y la velocidad de propagación del impulso [5].

### Modelo Torre Simple distribuida

Este es el modelo más simple donde se concentra en hallar la impedancia de la torre en su totalidad. Esta configuración se muestra de manera simplificada en la Figura 2.4, la mayor ventaja es la facilidad y la simplicidad de aplicar el modelo. Además, la fórmula muestra una estrecha concordancia con los resultados medidos de una impedancia característica torre de varios pisos sin considerar el circuito paralelo R/L.

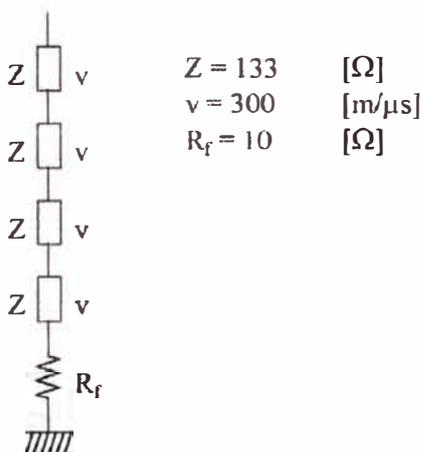
Esta última ecuación es la que es empleada para hallar la impedancia característica de las torres de transmisión y esta puede ser transformada como se muestra a continuación:

$$Z = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \Omega \quad \dots(2.5)$$

Donde:

H: La altura de la torre

r: Radio medio da la torre

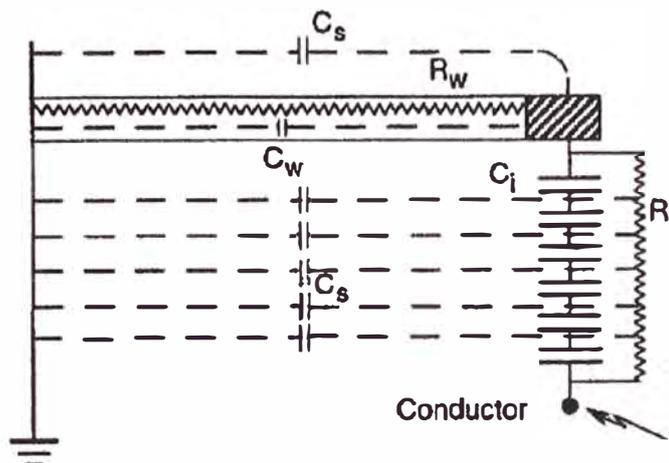


**Figura 2.4 Ejemplo de modelado de torre de transmisión**

### Postes de Madera y Crucetas

Los postes de madera y crucetas pueden ser modelados por una combinación en paralelo de una resistencia y un condensador como se muestra en la Figura 2.5, donde se muestra una combinación de una madera transversal del brazo y una cadena de aisladores de suspensión soportados sobre una estructura de tierra.

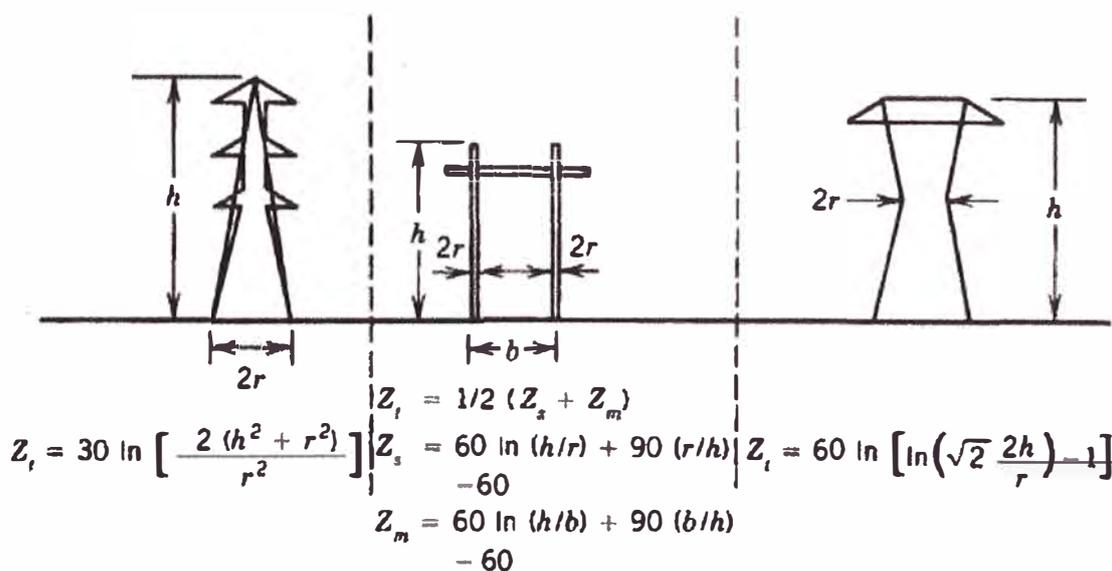
El efecto de las crucetas se pueden despreciar debido a que el recorrido que hace el impulso de rayo es mucho menor que el recorrido que hace sobre la estructura de la torre de transmisión o considerar el pequeño tramo como el modelo tomado para el total de la torre.



**Figura 2.5 Representación de una cruceta de madera**

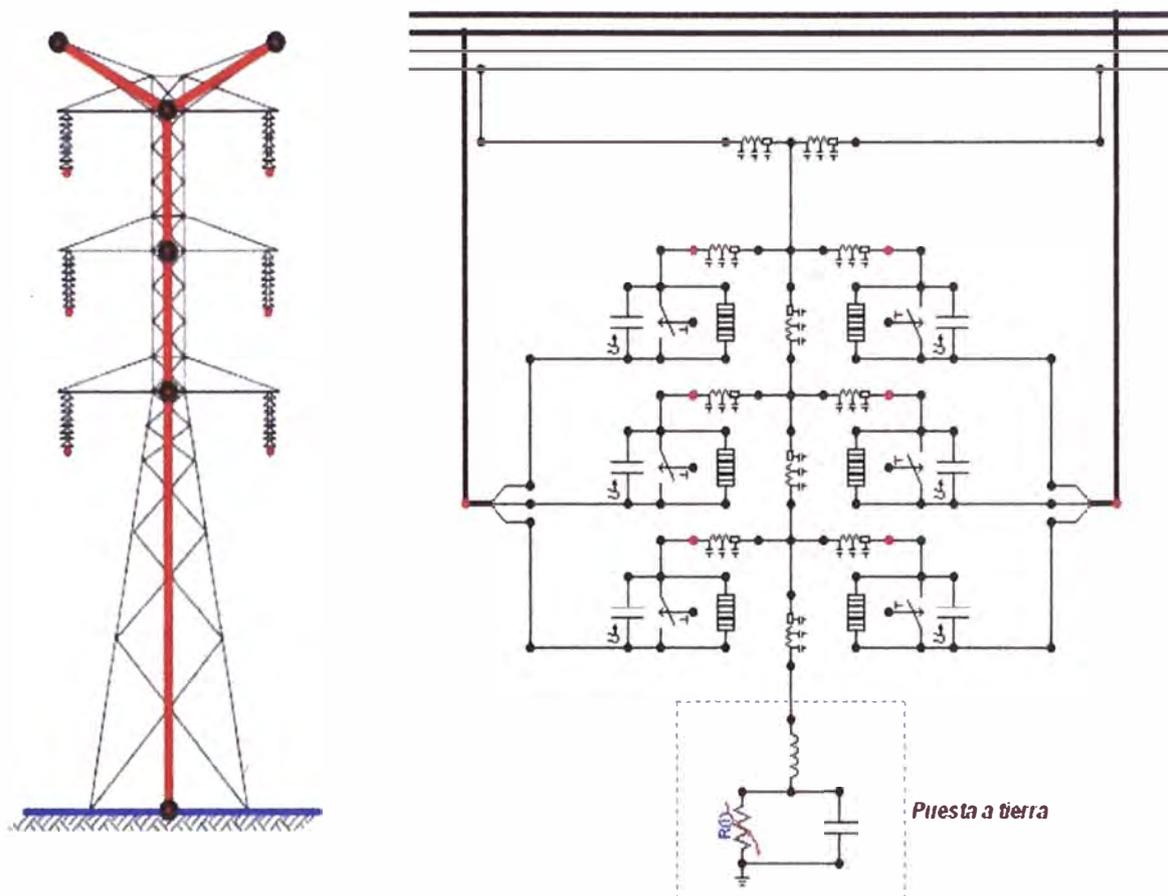
En resumen en el modelado de la estructura (torre de transmisión) se considera los tramos más importantes. Si se desea se puede detallar aun más incluyendo por ejemplo las crucetas en las fases, pero la precisión que se logra al detallar no es importante. Cada uno de los elementos metálicos se puede modelar como un tramo de línea ideal sin pérdidas con una impedancia característica dada por (estructuras de forma cónica), donde se tomará como velocidad de propagación de la onda el 85% de la velocidad de la luz además teniendo los modelos típicos para las torres de transmisión más utilizadas en la actualidad, como se muestra en la Figura 2.6.

La torre se divide de acuerdo a los tramos que se necesiten con la misma impedancia característica, esta por lo general está en un rango entre 100-300  $\Omega$  y de acuerdo a la distancia que se considere.



**Figura 2.6 Modelos de torres típicas**

En la Figura 2.7 se muestra el modelo a implementarse en el ATPDraw de una estructura metálica que corresponde a las torres de la línea de transmisión, donde la línea roja indica la trayectoria esperada que sigue el rayo (línea roja).



**Figura 2.7 Modelo en ATPDraw de la estructura de una torre de transmisión**

Las características del modelo de impedancia utilizado en el ATPDraw para el modelado de la estructura de la torre de transmisión (la caja de diálogos se muestra en la Figura 2.8) está compuesta principalmente por una serie de impedancias características que se ordenan de tal manera que representan la estructura, cuyos parámetros de modelación se muestran a continuación:

- Tipo: LINEZT\_1 (Distributed parameters, single phase)
- $R/l$  (Ohm/m): Resistencia por unidad de longitud
- $Z$  (Ohm): Impedancia característica
- $V$  (m/s): Velocidad de propagación de onda
- Length (m): Longitud de la línea
- Se considera  $G=0$

Component: LINEZT\_1

Attributes

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
R/l	Ohm/m	$\rho$	From	1	SUELO
Z		200	To	1	VX1
v		300000000			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Lines

Length 19 [m] Output No

ILINE  
 L', C'  
 Z, v  
 Z, tau

Conductance  
 G=0  
 G=R\*C/L

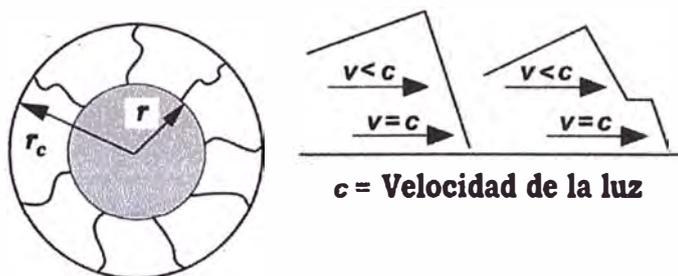
Hide  
 \$Vintage.1

Edit definitions OK Cancel Help

**Figura 2.8** Caja de dialogo de datos del modelo de impedancia

### Efecto corona, distorsión y atenuación

Cuando la tensión en un conductor alcanza un valor crítico ( $v_c$ ) y el campo eléctrico alrededor de éste se produce el rompimiento dieléctrico del aire, ionizándose el aire alrededor del conductor. Como consecuencia, el efecto corona implica un aumento en la capacitancia de la línea debido a la ionización del aire alrededor del conductor, como se muestra en la Figura 2.9. Este efecto parece tanto entre fase - tierra y entre fases, la mayor parte de los modelos para el efecto corona son de fase a tierra. Dado que este efecto tiende a reducir la inclinación de la sobretensión que se propaga; hay muchas propuestas sobre los métodos para simular efecto corona.



**Figura 2.9** Efecto corona en la propagación de un impulso tipo rayo

Se ha sabido durante algún tiempo que la corona tiene un efecto significativo sobre las sobretensiones asociadas a los rayos en líneas de transmisión. Las conclusiones importantes acerca del efecto corona son:

Las condiciones climáticas no tiene un impacto significativo sobre la distorsión corona.

El factor de acoplamiento entre las fases aumenta con picos de tensión más pronunciados.

El tiempo de cola de la onda de rayo no está influenciada por el efecto corona.

En resumen, el modelado del efecto corona está basado en el proceso microscópico del fenómeno, siendo complicado e impráctico considerarlo en el análisis de sobretensiones transitorias, más aún si no hay un tramo considerable de propagación para el impulso. Por lo tanto se asumirá como un factor de seguridad el no considerar dicho fenómeno.

### **2.3.3 Modelado de Sistemas de Puesta a Tierra**

El modelado del comportamiento dinámico de un sistema de puesta a tierra cuando circula a través de éste una corriente transitoria de frente rápido es muy complejo. Por consiguiente, es difícil representar con precisión la propagación de la onda a través de este sistema. Sin embargo existen modelos aproximados del comportamiento dinámico del sistema de puesta a tierra, como se detalla a continuación:

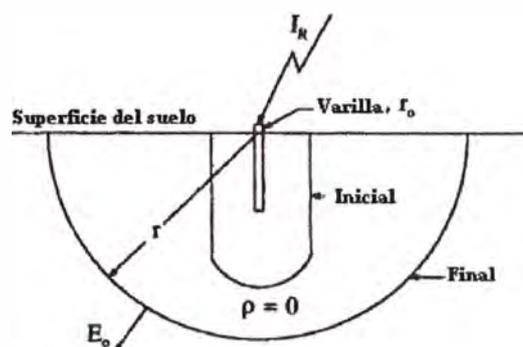
#### **Modelo Ionizado**

Este modelo de puesta a tierra se define para varillas de tierra o contrapesos de pequeña longitud dentro de un rango de 15 metros de la base de la torre. El mecanismo de la ionización es que altas magnitudes de la corriente del rayo, que fluyen a través de la resistencia del terreno, disminuyen la resistencia del terreno significativamente por debajo de los valores medidos.

Para altas corrientes representativas de un rayo, cuando el gradiente supera un gradiente crítico de  $E_0$ , la ruptura del suelo se produce; es decir, como la corriente aumenta, se genera vapor de la humedad del suelo que a su vez produce arcos. Dentro de las zonas de formación de arcos, la resistividad disminuye desde su valor original, hasta un valor límite que se aproxima a cero (se convierte en un conductor perfecto). Esta descomposición del suelo puede ser visto como el aumento del diámetro y la longitud de la varilla como se muestra en la Figura 2.10, que muestra el límite inicial o área. A medida que aumenta la ionización, la forma de la zona se vuelve más esférica, como se ilustra en la Figura 2.10, que muestra también el límite final. La expresión de  $I_g$  esta dada por [1]:

$$I_g = \frac{1}{2\pi} \frac{\rho E_0}{R_0^2} \quad \dots(2.6)$$

La baja resistencia de corriente continua es  $R_0$  y la resistividad del suelo es  $\rho$  (ohm-metros);  $E_0$  se aproxima a 400 kV/m.



**Figura 2.10 Una alta corriente, la barrilla se convierte en una semiesfera**

Para corrientes superiores a  $I_g$ , la distribución de la tierra continúa y se expande, alcanzando un radio  $r$ . Dentro de esta área descrita por  $r$ , la resistividad del suelo se considera cero, siendo el suelo un conductor perfecto; esta disminución no es rápida hasta las zonas de formación de arco, aproximado de una semiesfera. La trama de la resistencia se muestra en la Figura 2.11, cuando éste se produce en configuraciones de puesta a tierra de mayor dimensionamiento o un conjunto de varillas, una semiesfera se produce a una corriente  $I_g$ . Para una varilla o varillas concentradas en cualquier terreno, la característica se puede aproximar por la ecuación:

Así, la resistencia bajo altas corrientes es simplemente la resistencia de una semiesfera de radio  $r$ . Por lo tanto, la resistencia se vuelve  $R_i$  y se expresa:

$$R_i = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{I_R}{I_g}}} \quad \dots(2.7)$$

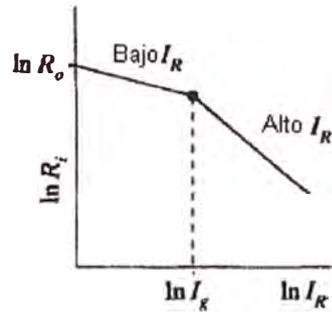
Donde:

$R_i$ : Valor de la resistencia dinámica

$R_0$ : Resistencia a corriente continua

$I_g$ : Corriente de dispersión máxima

$I_R$ : Corriente que atraviesa la puesta a tierra



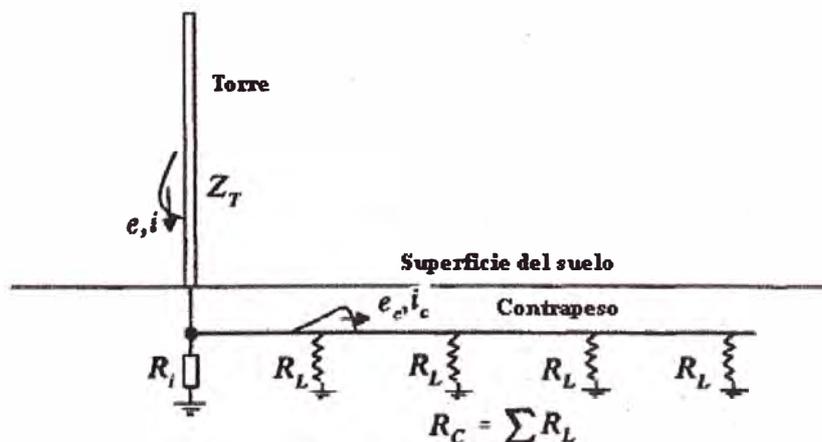
**Figura 2.11 Resistencia al impulso de un conjunto de varillas**

### Modelo de parámetros distribuidos

Este modelo representa cada segmento de la red de aterramiento como un segmento de propagación en base a las características dinámicas de los parámetros eléctricos R, L y C, principalmente se utiliza para modelar contrapesos de larga longitud [5].

Los contrapesos son conductores horizontales enterrados en la tierra a una profundidad de aproximadamente 1 metro y conectado a la base de la torre. Se creía que los contrapesos eran eficaces debido a su acoplamiento capacitivo con los conductores de fase. Sin embargo, se encontró que este acoplamiento fue sólo en un intervalo de 3 a 10%.

En la Figura 2.12 se ilustra el fenómeno; las ondas de tensión y corriente que bajan de la torre viajan e inciden sobre una combinación de la tierra concentrada y los contrapesos, lo que resulta en las ondas de corriente  $i_c$  y tensión  $e_c$ , éstas viajan a lo largo de los contrapesos a aproximadamente  $1/3$  la velocidad de la luz. Estas ondas de corriente y tensión se reflejan y disipan a través de la resistencia a las fugas a lo largo de los contrapesos y por lo tanto con un retardo de tiempo disminuyen la resistencia de puesta a tierra total de la torre. Los principales componentes de la impedancia de contrapeso son:



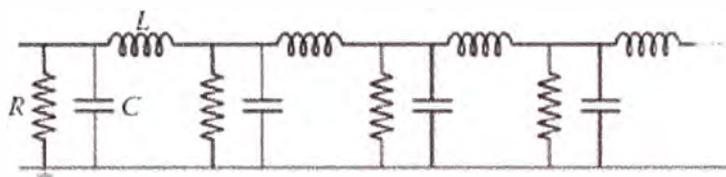
**Figura 2.12 Las ondas de tensión y de voltaje viajan por el contrapeso y decrecen a medida que se propaga la onda en función del tiempo**

Las ecuaciones de este circuito son similares a las ecuaciones de una línea con distribuidos parámetros y se puede expresar como sigue:

$$L = \frac{\partial V(x, s)}{\partial x} = -sLI(x, s) \quad \dots(2.8)$$

$$\frac{\partial I(x, s)}{\partial x} = -(G + sC)V(x, s) \quad (G = 1 / R)$$

E.D. Sunde representa estos componentes por un circuito equivalente para un contrapeso único como se muestra en la Figura 2.13 (véase Anexo B).



**Figura 2.13 Circuito equivalente de un contrapeso**

Se tiene en cuenta la ionización del suelo una resistencia no lineal podría ser incluido en la forma de una constante. Sin embargo, la ionización del suelo no es instantánea y la resistividad del suelo disminuye con una constante de tiempo de aproximadamente  $2\mu s$ , este valor es bastante grande en comparación con los tiempos de frente de onda asociadas con las descargas atmosféricas, por ejemplo. Por otra parte, si se produce la ionización del suelo, siempre se produce una reducción de la elevación del potencial de tierra. Por lo tanto, haciendo caso omiso de este fenómeno siempre da resultados conservadores. El análisis siguiente considera solamente un circuito equivalente con parámetros constantes y lineales.

Las expresiones para el cálculo de  $R$ ,  $L$  y  $C$  en la longitud por unidad, para conductores horizontales son:

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{\pi \ell} * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right], \quad C = \pi \epsilon \ell * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0 \ell}{2\pi} * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right],$$

$$\alpha = \sqrt{2 * a * h} \quad (\ell \gg a, \ell \gg d) \quad \dots(2.9)$$

Donde:

- $\ell$  es la longitud del conductor, en m
- $a$  es el radio del conductor, en m

- $d$  es la profundidad de enterramiento, en m
- $\rho$  es la resistividad del suelo (se supone que sea homogéneo) en  $\Omega\cdot m$
- $\mu_0$  es la permitividad de vacío ( $4\pi \times 10^{-7}$  H / m)
- $\epsilon$  es la permitividad del suelo (valor típico:  $\epsilon = 10\epsilon_0$ , con  $\epsilon_0 = 8,85 \times 10^{-12}$  F / m)

Se debe tener en cuenta que los cálculos anteriores de los parámetros serán en unidad de longitud que dependerá de las características del contrapeso. Aunque diferentes autores divergen en la determinación de estos valores de R, L y C, las discrepancias permanecen generalmente respecto a las aproximaciones debidas a variaciones de resistividad del suelo o de la falta de homogeneidad del suelo.

#### 2.3.4 Modelado de Cadenas de Aisladores

Se utilizó para modelar la cadena de aisladores el modelo en ATP “TACSSWIT - Simple TACS - controlled TYPE 13 switch”, éste se simula utilizando la opción de los TACS disponibles en el ATPDraw que permite implementar formulas matemáticas y bloques de control, que básicamente consiste en un interruptor que cierra al mandar una señal de control, para nuestra aplicación la señal del control es la curva tensión-tiempo de disrupción característica de la cadena de aisladores [6], como se muestra en la Figura 2.15. Esta respuesta del aislamiento a los impulsos de sobretensión transitoria es representada por la siguiente ecuación:

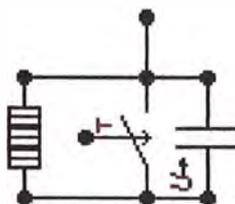
$$V_{b-t} = \left( 0.58 + \frac{1.39}{(t \cdot 10^6)^{0.5}} \right) * CFO * 10^3 \quad \dots (2.10)$$

Donde:

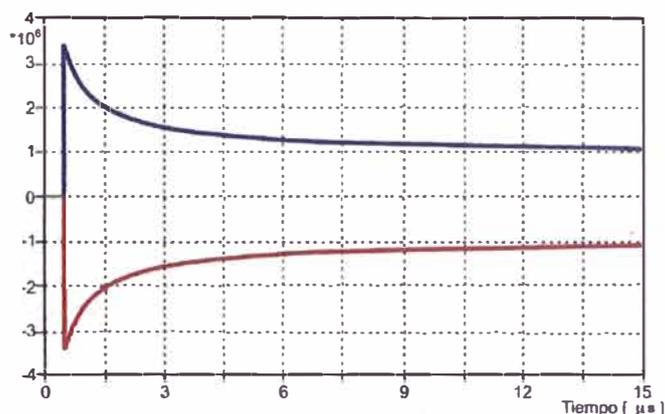
- $V_{b-t}$ : Tensión pico de disrupción
- $t$ : Tiempo de contorneo inverso
- CFO: Nivel de aislamiento al impulso (Critical Flash Over)

Para controlar el hecho que para valores iniciales muy pequeños el valor del voltaje de contorneo tiende al infinito, se puede multiplicar el valor del voltaje de flameo por una señal de desplazamiento de tiempo. Además hay que considerar el valor de la capacitancia asociada a la cadena de aisladores, éste valor esta comprendido entre 10-100 pF.

La tensión de disrupción de los aisladores toma el voltaje de resistencia al impulso tipo rayo, pero hay que tener en consideración la aplicación del factor de corrección por altura.



**Figura 2.14 Modelo de cadena de aisladores graficado en el ATPDraw**



**Figura 2.15 Implementación de la función contorno inverso en el tiempo**

#### 2.4 Modelado del Pararrayos de Línea

El modelo más apropiado y aceptado es el del CIGRE y es que se utilizará en el presente trabajo debido a su simplicidad y poco requerimiento computacional. Se utilizará el modelo MOV tipo 92 (modelo exponencial dependiente de la corriente) que hace una aproximación de la curva tensión-corriente característica de cada pararrayos para representar el parámetro no lineal, para la inductancia y la capacitancia se utiliza los modelos disponibles en el ATPDraw.

En las figuras 2.16 y 2.17 se muestran las ventanas de entrada de las características del modelo tipo 92, implementado en el ATPDraw, que son:

- Vref: Tensión de referencia en [V] (Normalmente se coloca la tensión nominal).
- Vflash: Valor negativo cuando no hay un espaciamento.
- Vzero: Tensión inicial, para nuestro análisis es 0V.
- COL: Número de columnas de pararrayos (normalmente 1).
- SER: Número de bloques en serie en cada rama (normalmente 1).
- ErrLim: Tolerancia de error (normalmente 0.05pu.)

Se debe tener en cuenta un factor de corrección debido a que la curva característica está dada para un impulso rayo de 8/20  $\mu$ s, mientras que las ondas que realmente inciden

en el pararrayos serán de un menor tiempo de frente el factor de corrección será de 1.1 y deberá multiplicarse a las tensiones residuales. No se considera la determinación de la energía que puede disipar el pararrayos ya que este puede disipar la energía producida por un rayo (para estudios de capacidad de disipación de energía del pararrayos se utiliza estudios de transitorios de maniobra) [8].

Component: MOV

Attributes Characteristic

DATA	UNIT	VALUE	NODE	PHASE	NAME
Vref	Volts	600000	From	1	XX0003
Vflash	<0: No gap	-1	To	1	T_T_2A
Vzero	Volts	200000			
#COL		1			
#SER		1			
ErrLim	pu	0.5			

Copy Paste entire data grid Reset Order: 0 Label:

Comment:

Output  Hide

0 - No

Edit definitions OK Cancel Help

**Figura 2.16** Ventana de datos de entrada del pararrayos

Component: MOV

Attributes Characteristic

Arrester Data

I [A]	U [V]
5000	453000
10000	482000
20000	523000
40000	583000

Add Delete Sort

Move

External characteristic

Data source: Edit...  Include characteristic

Save... Copy Paste View

Edit definitions OK Cancel Help

**Figura 2.17** Ventana de datos de la curva no lineal

A continuación se muestra en la Tabla 2.1 los valores característicos de los pararrayos.

**TABLA N° 2.1 Valores característicos de los pararrayos.**

Arrester Rating $U_r$ (kV, rms)	Arrester MCOV $U_c$ (kV, rms)	Steep Current Residual Voltage (kV) Crest	Lightning Impulse Residual Voltage (kV Crest) 8/20 $\mu$ s Current Wave						Switching Impulse Residual Voltage (kV Crest) 30/60 Current Wave	
			1.5 kA	3 kA	5 kA	10 kA	20 kA	40 kA	500 A	1000 A
3	2.55	13.1	7.0	7.4	7.7	8.3	9.4	10.7	6.5	6.7
6	5.10	22.0	13.8	14.6	15.2	16.3	18.2	20.5	12.9	13.4
9	7.65	31.0	20.7	21.8	22.7	24.3	27.0	30.3	19.3	20.0
10	8.40	33.7	22.7	24.0	24.9	26.7	29.6	33.2	21.2	22.0
12	10.2	40.0	27.6	29.1	30.2	32.4	35.9	40.2	25.7	26.7
15	12.7	48.8	34.3	36.1	37.5	40.2	44.5	49.7	32.0	33.2
18	15.3	57.9	41.3	43.5	45.2	48.4	53.5	59.8	38.5	39.9
21	17.0	64.0	46.0	48.4	50.2	53.8	59.4	66.4	42.8	44.4
24	19.5	72.8	52.7	55.5	57.6	61.7	69.1	76.1	49.1	51.0
27	22.0	81.5	59.4	62.5	64.9	69.5	76.7	85.6	55.4	57.4
30	24.4	90.1	65.9	69.4	72.0	77.1	85.0	94.9	61.5	63.7
33	27.5	101	74.3	78.2	81.2	86.9	95.8	107	69.3	71.8
36	29.0	106	78.4	82.4	85.6	91.6	101	113	73.0	75.7
39	31.5	115	85.1	89.5	93.0	99.5	110	122	79.4	82.3
42	34.0	120	89.2	93.8	97.4	104	115	128	83.1	86.2
45	36.5	128	95.2	100	104	111	123	137	88.7	91.9
48	39	137	102	107	111	119	131	146	95.1	98.6
54	42	147	110	115	120	128	141	158	102	106
60	48	167	125	132	137	146	161	180	117	121
66	53	184	138	145	151	161	177	198	129	133
72	57	199	149	157	163	174	192	214	139	144
78	62	216	162	170	177	189	208	232	151	157
84	68	236	177	187	194	207	228	254	165	171
90	70	242	183	192	199	213	235	262	170	176
96	76	263	198	208	216	231	254	284	185	191
108	84	291	219	231	240	256	282	314	205	212
120	98	338	255	269	279	298	328	366	238	247
132	106	368	276	290	301	322	355	396	257	267
138	111	386	290	305	316	338	372	415	270	280
144	115	401	301	317	328	351	387	431	280	291
162	130	450	339	356	370	395	435	485	316	327
168	131	455	342	360	373	399	440	490	319	331
172	140	485	365	384	399	426	469	523	340	353
180	144	498	375	395	410	438	482	538	350	363
192	152	526	397	417	433	463	510	568	370	384
198	160	553	417	439	456	487	536	598	389	403
204	165	570	430	452	470	502	553	616	401	416
216	174	601	454	478	496	530	583	650	424	439
228	182	628	475	499	518	554	610	680	443	459
240	190	655	495	521	541	578	636	709	462	479
258	209	725	546	574	596	638	702	782	509	528
264	212	735	554	582	604	647	711	793	516	535
276	220	761	573	603	626	670	737	821	535	554
288	230	796	601	632	656	702	772	860	560	581
294	235	813	614	645	670	717	788	879	572	593
300	239	827	624	656	681	729	802	893	582	603
312	245	847	639	672	698	747	821	915	596	618

# **CAPITULO III**

## **MÉTODO DE PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 220KV CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS UTILIZANDO PARARRAYOS**

### **3.1 Introducción**

La aplicación de pararrayos para la protección contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión en un inicio no fue considerada, luego a inicios de 1930 hasta finales de 1950, tubos de expulsión o de protección fueron usados en la construcción de nuevas líneas en vez de cables aéreos de guarda. La experiencia con estos primeros pararrayos dio como resultado un buen funcionamiento de la línea; sin embargo, los excesivos costos de mantenimiento y la vida limitada de estos pararrayos, eventualmente los hizo poco atractivos. Después de discontinuar los primeros pararrayos, algunas compañías de distribución de energía eléctrica recurrieron a colocar pararrayos clase estación o clase intermedia en estructuras ubicadas en puntos críticos a lo largo de la línea.

Los aisladores de una línea de transmisión pueden ser protegida de una descarga atmosférica por cables de guarda. Sin embargo, la efectividad del apantallamiento depende de muchos factores, primordialmente del ángulo de apantallamiento y de las puestas a tierra de las estructuras. Si bien los pararrayos de línea fueron creados en un principio para la protección de aisladores en puntos críticos de la línea tales como estructuras con alta resistencia de aterrizaje, regiones con muy alto nivel cerámico, etc., pronto se iniciaron estudios para evaluar la posibilidad de emplear estos pararrayos en líneas de transmisión y que sustituyeran por completo la protección tradicional con cable de guarda, es decir, aplicar un nuevo esquema de protección empleando únicamente pararrayos.

El desarrollo de pararrayos de óxido metálico (MO), fue posible reiniciar los estudios y pruebas sobre la protección en líneas de transmisión utilizando pararrayos. Desde 1981, un programa extenso de investigación fue puesto en marcha para examinar la tecnología de aplicar pararrayos en líneas de transmisión, a fin de solucionar los problemas concernientes al contorno inverso en las cadenas de aisladores debido al impacto de rayos y que no eran

satisfactoriamente resueltos por el blindaje tradicional con cable de guarda u otros métodos. El objetivo de las investigaciones estaba centrado en explotar los medios de reducir el contorneo inverso en aisladores, en localidades expuestas donde obtener bajas resistencias de puesta a tierra no era posible. 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 rayo por año.

El porcentaje de contorneo inverso en aisladores de líneas de transmisión puede ser reducido mediante el incremento del aislamiento o por la reducción de la resistencia de puesta a tierra de cada estructura de apoyo (torre o poste); ninguno de estos métodos puede ser aplicado si las libranzas en la estructuras de apoyo están reducidas o si las líneas se encuentran en lugares montañosos de alta resistividad de suelo y no es posible tanto técnica como económicamente mejorarla. Una opción que se presenta es la instalar pararrayos de líneas en paralelo a los aisladores para suprimir el flameo en los mismos.

### **3.2 Descripción de la Metodología**

La metodología de protección de líneas de transmisión contra descargas atmosféricas utilizando pararrayos desarrollada en el presente trabajo, se enfoca en determinar la configuración de protección con pararrayos en las torres de la línea, así como el número de estructuras optimas a proteger con pararrayos; con la finalidad de evitar la producción de contorneo inverso o directo en las cadenas de aisladores de la línea de transmisión.

Haciendo uso de los modelos implementados (véase Capítulo 2) se simula en el ATPDraw el tramo de línea a estudiar, con la finalidad de determinar las sobretensiones transitorias debidas al impacto de una descarga atmosférica en diferentes puntos de la línea de transmisión; de esa manera se evalúa la disrupción eléctrica en la cadena de aisladores como consecuencia del contorneo inverso o directo en estos.

El procedimiento general para la aplicación de pararrayos en líneas de transmisión se propone a continuación:

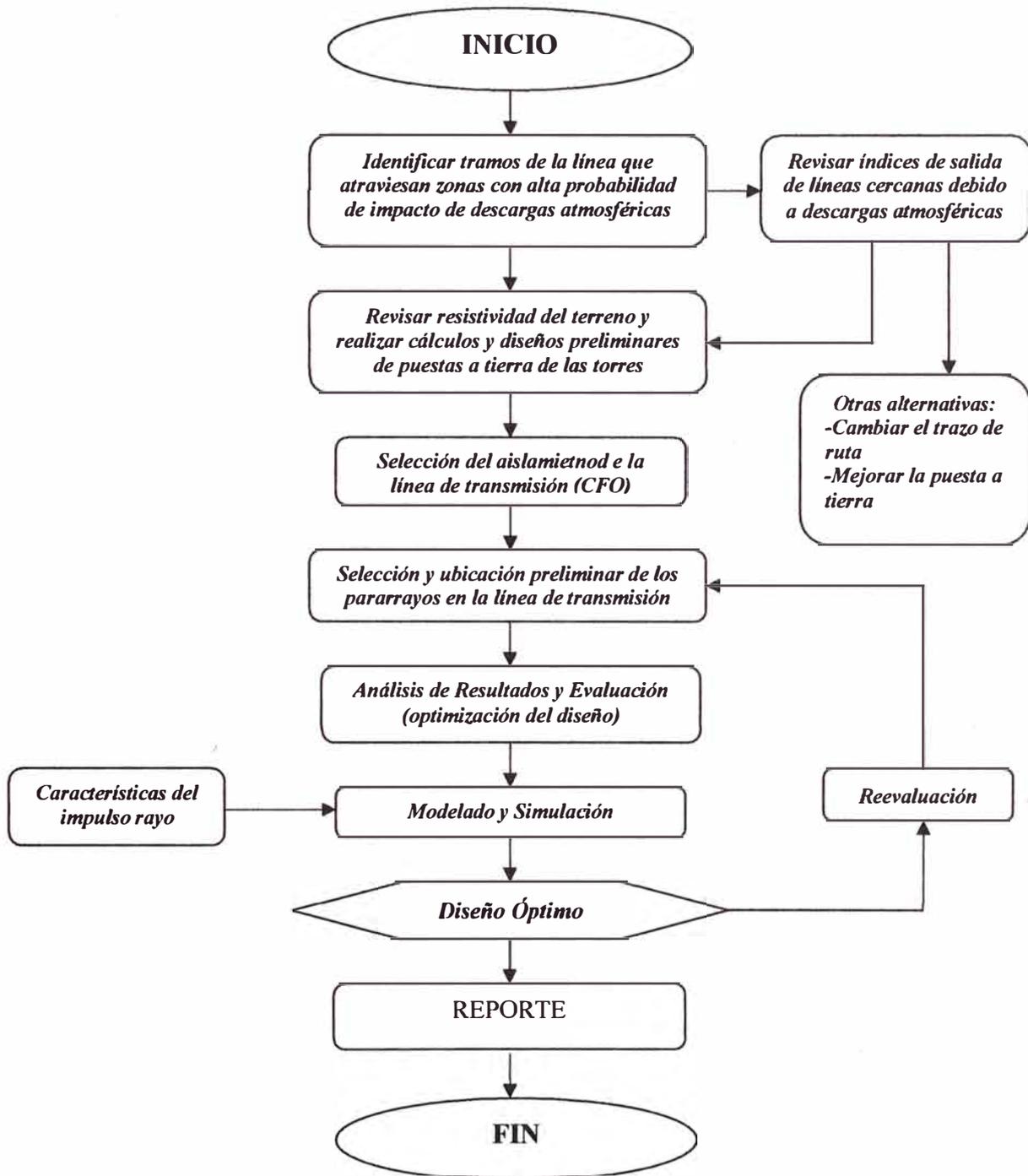
1. Identificar los tramos de líneas que atraviesen zonas con alta densidad de descargas atmosféricas, haciendo uso de mapas de densidad de rayos o niveles isoceraúnicos.
2. Revisar índices de salida de líneas cercana debido a descargas atmosféricas, ello nos ayudará a hacer un pronóstico de la salida de la línea.
3. Revisar la resistividad del suelo en la ruta al pie de las torres y realizar cálculos de puesta a tierra preliminares.

4. Seleccionar un rango de tensiones de impulso para el NBA de la cadena de aisladores, ésto estará basado en el estudio de aislamiento de la cadena de aisladores en la estructura.
5. Selección del pararrayos y ubicación preliminar, los métodos empleados para la selección adecuada del pararrayos se describen en el Anexo A. En cuanto a la ubicación seleccionada para el estudio inicial, estos pueden configurarse de muchas maneras para ello hay que realizar el análisis de transitorios según los diferentes casos poaibles.
6. Sobretensiones/Evaluación. Se analiza según el tipo de descarga atmosférica más crítico, la magnitud y formas de onda de las sobretensiones se miden en bornes de la cadena de aisladores de la línea. Las formas de onda de estas sobretensiones normalmente no se asemejan a la forma de onda de rayo estándar sobre el cual los BILs y las resistencias de aislamiento se basan.
7. Reevaluación, si el nivel de aislamiento de la cadena de aisladores, la selección de los pararrayos, ubicación de los pararrayos y el sistema de puesta a tierra de las estructuras son los adecuados se empieza con el diseño de detalle; sino no fuera el caso hay que realizar modificaciones y volver a realizar todos los pasos anteriores hasta obtener un diseño óptimo.

### **Descripción básica del funcionamiento de protección**

Los pararrayos tiene la función de conducir la corriente de falla directamente a los conductores de fase a través del pararrayo, para de esa manera evitar que se produzca el contorno inverso en la cadena de aisladores por lo tanto se evita una falla de operación de la línea de transmisión y de esa manera sacar de servicio la línea de transmisión. Los pararrayos adyacentes tienen la función de drenar las sobretensiones que están en las fases a través de los sistemas de puesta a tierra de las torres.

Con el procedimiento explicado anteriormente se obtiene una aplicación práctica de pararrayos en líneas de transmisión para evitar la formación de contorno inverso. Esquemáticamente el procedimiento se describe en la Figura 3.1.



**Figura 3.1 Diagrama de flujo lógico de la metodología de protección en líneas de transmisión**

### 3.3 Criterios Generales

#### 3.3.1 Factor de corrección a aisladores

Por lo general el BIL se especifica para condiciones atmosféricas normales; sin embargo, las condiciones atmosféricas de laboratorio raramente son las que se dan en la realidad. Por lo tanto los factores de correlación son necesarios para determinar la tensión de impulso de cresta que se debe aplicar para que el BIL sea válido a las condiciones reales de diseño.

En un inicio se utilizaron modelos lineales para representar la densidad del aire en función de la altura sin embargo la ecuación lineal al no representar correctamente la realidad (estas se limitan a una altitud máxima de unos 2 kilómetros). Una ecuación de regresión más satisfactoria es la forma exponencial, estas se muestran en la Tabla 3.1 [1].

**TABLA N° 3.1 Ecuaciones de corrección por altura**

Condiciones	Ecuación lineal para principales valores	Ecuación exponencial para principales valores	Desviación Estándar Promedio
Densidad relativa del aire, $\delta$			
En tormenta	0.997-0.106A	1.000 e <sup>-A/8.59</sup>	0.019
Sin tormenta	1.025-0.090A	1.025 e <sup>-A/9.82</sup>	0.028
Despejado	1.023-0.103A	1.030 e <sup>-A/8.65</sup>	0.037
$\delta H_c$			
En tormenta	1.035-0.147A	1.034 e <sup>-A/6.32</sup>	0.025
Sin tormenta	1.023-0.122A	1.017 e <sup>-A/8.00</sup>	0.031
Despejado	1.025-0.132A	1.013 e <sup>-A/7.06</sup>	0.034

En resumen los factores recomendados por estándares internacionales se mencionan a continuación:

Según la norma IEC 60071-2 la ecuación recomendada es la siguiente:

$$\delta = e^{-A/8.15} \quad \dots (3.1)$$

Según la norma IEEE STD 1313.2-199 la ecuación recomendada es la siguiente:

$$\delta = e^{-A/8.6} \quad \dots (3.2)$$

Donde: A es la altura en kilómetros

#### 3.3.2 Fenómenos transitorios originados por una corriente de rayo

Los sistemas de transmisión normalmente son diseñados con “un apantallamiento perfecto” o con una probabilidad de falla del mismo muy pequeña. El contorneo inverso ocasionado por una descarga que cae sobre la torre de transmisión o sobre el cable de guarda es la causa más común de salida de la línea.

A continuación se describen los fenómenos en las líneas de transmisión que resultan de caídas de rayos, dependerá de la forma que se producen.

### **Descarga Directa en los conductores de fase**

Las descargas directas a los conductores de fase de una línea de transmisión “apantallada” son poco probables, se producen normalmente cuando una descarga atmosférica de baja magnitud (unos pocos kA) pasa a través de la zona de protección de los cables de guarda, tradicionalmente, el modelo electrogeométrico se basa en la distancia de protección, que es utilizado para determinar la máxima corriente de rayo que puede atravesar el apantallamiento e impactar directamente en los conductores de fase. Un diseño adecuado de apantallamiento puede reducir de manera significativa el número de contorneos directos originados por rayos que impactan de manera directa a los conductores de fase, ya que solo descargas con una corriente de pico muy pequeña alcanzarán estos conductores.

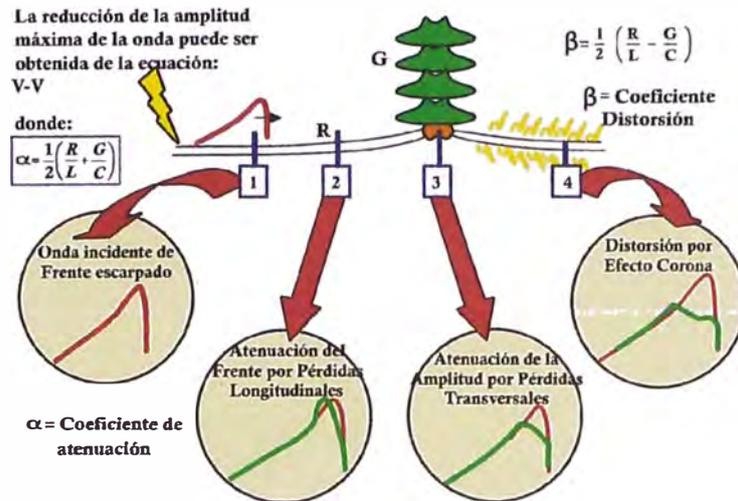
### **Contorneo Inverso**

Los contorneos inversos se producen cuando un rayo cae sobre la torre de transmisión o el cable de guarda, y la tensión en la parte superior de la torre es lo suficientemente grande como para causar descarga disruptiva en las cadenas de aisladores de la torre al conductor de fase. Cuando se produce contorneo inverso, una parte de la corriente del rayo se transfiere a los conductores de fase a través de un arco eléctrico que se propaga sobre las cadenas de aisladores. Generalmente, el contorneo inverso causa una falla temporal de línea a tierra que es despejado por un interruptor del sistema eléctrico.

El rendimiento de las líneas de transmisión se caracteriza por la tasa de salida que pueden dictar las exigencias de aislamiento de la línea. En los estudios de diseño, la corriente del rayo mínimo (es decir, la corriente crítica) que causa el contorneo inverso en las cadenas de aisladores; la probabilidad de ocurrencia de las corrientes de rayo superiores a la corriente crítica es descrita por una distribución probabilística logarítmica normal, y puede calcularse mediante el uso de cuadros básicos de probabilidad.

### **3.3.3 Despreciando el efecto corona**

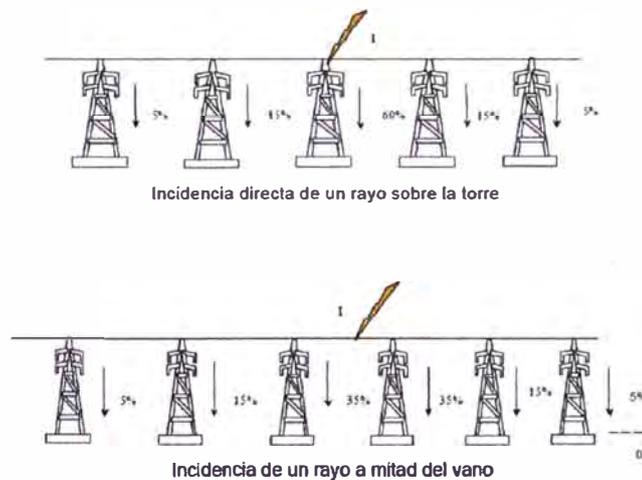
Aunque los efectos corona puede reducir el pico de sobretensiones de origen atmosférico en un 5 - 15%, en general en el análisis de sobretensiones el efecto corona se desprecia con el fin de establecer un margen de seguridad y evita la complejidad de los modelos del efecto corona y la carga asociada al tiempo de simulación en ordenador son las otras razones para tomar en cuenta este enfoque.



**Figura 3.2** Resumen de las atenuaciones y distorsiones de la onda de impulso

**3.3.4 Considerando el peor escenario**

Se considera que el impacto del rayo se da en la torre más cercana a la subestación que está completamente apantallada, debido a que por la torre se desplazaría gran parte de la onda incidente por lo tanto causando una mayor probabilidad de contorneo inverso en comparación de que la descarga atmosférica impacte sobre el cable de guarda, como se ve la Figura 3.3.



**Figura 3.3** Comparación de escenarios

**3.3.5 Probabilidad de caída de rayo**

La función de distribución acumulada permite calcular la probabilidad de que la corriente de cresta de una descarga sea igual o mayor que un valor de corriente  $I$ , y se aproxima de la siguiente forma:

$$P(I_f) = \frac{1}{1 + \left( \frac{I_f}{31} \right)^{2.6}} \dots(3.3)$$

Donde:

$P(I_f)$ : Probabilidad de caída de un rayo con magnitud  $I_f$

$I_f$ : Magnitud del rayo incidente en kA

### **3.3.6 Caídas múltiples de impulsos de rayo**

Más del 70% de los rayos que impactan en tierra tienen caídas múltiples, típicamente 3 ó 4 caídas con intervalos de tiempo entre caídas de 30 a 50 ms. Algunas veces, puede tener una separación espacial importante por ejemplo varios kilómetros. Estos efectos de caída de múltiples impulsos de rayo pueden ser considerados para el análisis de sobretensiones transitorias como un análisis de caída de un impulso por cada caso de análisis.

### **3.3.7 Reflejo de impulso rayo**

Al realizar la simulación se tiene que evitar que los impulsos debido a una descarga atmosférica revoten dentro del sistema eléctrico modelado, según la teoría de ondas viajeras una onda al encontrar un circuito abierto se refleja con el doble de la amplitud de la onda incidente, por ello para evitar esta reflexión que representaría un gran error en la simulación, debido a que en la práctica la onda de impulso sigue el camino a través de la línea de transmisión hacia la red eléctrica. Para evitar este reflejo se considera en los ramales finales de la línea de transmisión una impedancia igual a la impedancia característica de la línea de esta manera la onda ya no es reflejada.

### **3.3.8 Tiempo de paso y tiempo de simulación**

La precisión de la simulación digital puede verse afectado por el tiempo de pasos que puede ser demasiado grande o demasiado pequeño. El tiempo de paso depende de la inclinación del tiempo de cresta de la onda, la longitud mínima de viaje de la onda, además de la utilización de las distorsiones significativas debido al instante del flameo inverso y el cruce por el pararrayos. En forma general podemos considerar:

Tiempo de pasos: 1 a 20 ns , típico: 5 ns

Tiempo de simulación: 15 $\mu$ s y 200 $\mu$ s, típico 50 $\mu$ s

## **3.4 Consideraciones Generales del Método**

Para el desarrollo de la metodología se consideran los siguientes datos de entrada que permite realizar el modelado de los diferentes casos de estudio:

### **Nivel de tensión del sistema eléctrico**

Se refiere a la tensión nominal del sistema eléctrico, el cual se define como un valor nominal para designar a un sistema la categoría de tensión dado.

### **Los niveles básicos de aislamiento por rayo**

BIL: Valor cresta de un impulso de rayo estándar para el cual el aislamiento presenta un 90% de probabilidad de resistir (o un 10% de probabilidad de falla), bajo condiciones específicas aplicables para aislamientos auto-recuperables.

### **Datos de la línea de transmisión**

Número de circuitos

Número de conductores por fase, conductores del cable de guarda.

Resistencia de los conductores en corriente continua.

Radio externo e interno de los conductores.

Distancia horizontal entre conductores desde el centro del haz a una línea de referencia definido por el usuario.

Altura vertical del haz de conductores en la torre.

Altura vertical del haz a la mitad del claro.

Distancia entre conductores.

Posición Angular de un conductor del haz, medido en sentido contrario a las agujas del reloj de la línea horizontal.

Estructura de la torre de transmisión.

Nivel de aislamiento de la cadena de aisladores.

Distancia entre torres.

### **Datos de los pararrayos**

Características generales de los pararrayos ( $U_r$ , MCOV, MOV, entre otros).

Curva de tensiones residuales de los pararrayos.

### **Datos de las puestas a tierra**

Diseño de la puesta a tierra y valor de la resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión del tramo de línea en análisis.

### **Datos de la descarga eléctrica**

Tiempo de frente de onda

Magnitud del rayo

Tiempo de cola de la descarga eléctrica

### **3.5 Validación del Modelo**

#### **3.5.1 Pruebas de laboratorio**

Uno de los objetivos específicos de una investigación del EPRI fue estudiar y modelar el tipo de transitorios que se genera durante un contorno inverso en la cadena de aisladores en líneas de transmisión en las proximidades de una subestación eléctrica. El estudio del contorno que inicia una onda de frente rápido es importante para el diseño de aislamiento de la subestación en el rango de tensión de hasta 245kV. Una maqueta a escala de una tensión nominal de 115 kV (550 kV BIL) de la subestación fue construida por el Centro de Investigación de Líneas de Transmisión en Alta Tensión del EPRI (HVTRC) en Lenox, Massachusetts; para investigar el comportamiento de los impulsos de tensión no estándar en el aislamiento de la subestación. En la subestación, los espacios fase-fase y fase-tierra, cantidad y tipo de aislamiento se produjeron de acuerdo a los procedimientos de diseño estándar de una utilidad que participaron en el estudio. Los interruptores se han instalado para proporcionar reflexiones en diferentes modos de funcionamiento, así como configuraciones de equipos eléctricos en subestaciones. Otros espacios típicos de aire de la subestación (la barra-barra, un anillo de circunvalación, y el conductor de la estructura) también fueron incorporadas en el diseño de la subestación. Exámenes de combustión súbita generalizada de tensión se llevaron a cabo mediante la aplicación de la fase-tierra y los impulsos de fase a fase. Los impulsos fueron generados por la descarga de un banco de condensadores en el devanado terciario de un autotransformador de una sola fase y luego a través de una brecha pico y el condensador que resultó en un impulso que tiene una forma de  $0.2/200\mu\text{s}$  aplicado al objeto de prueba [4].

## **CAPITULO IV**

### **APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA**

#### **4.1 Caso de Estudio (Línea de Transmisión en 220 kV)**

A continuación se desarrolla el modelado de una línea de transmisión en 220 kV que proveerá de energía a una planta minera; la línea esta diseñada a una altitud de 4200 msnm (los datos que son presentados pertenecen a una ingeniería básica de diseño). El objetivo de este caso de estudio es hallar los perfiles de sobretensiones debido a descargas atmosféricas en una línea de transmisión. Para la simulación se considera que las descargas atmosféricas inciden en las torres de transmisión (como casos mas críticos).

#### **4.2 Datos del Sistema Eléctrico a Estudiar**

##### **4.2.1 Datos de la línea de transmisión**

La línea de transmisión en 220 kV de doble terna tiene instalados dos cables de guarda, el armado de las torre de transmisión se muestran en la Figura 4.1.

Los datos generales de la línea de transmisión son:

**Número de circuitos:** Doble terna.

**Número de conductores por fase:** 1 conductor por fase, conductor ACSR.

**Número de conductores de guarda:** 2 conductores.

**Resistencia de los conductores en corriente continúa:** 0.0545  $\Omega$ /km.

**Radio interno de los conductores de fase:** 0.527 cm.

**Radio externo de los conductores de fase:** 1.5825 cm.

**Distancia horizontal de los conductores:** Se muestra en la Figura 5.1.

**Altura vertical de los conductores:** Se muestra en la Figura 5.1.

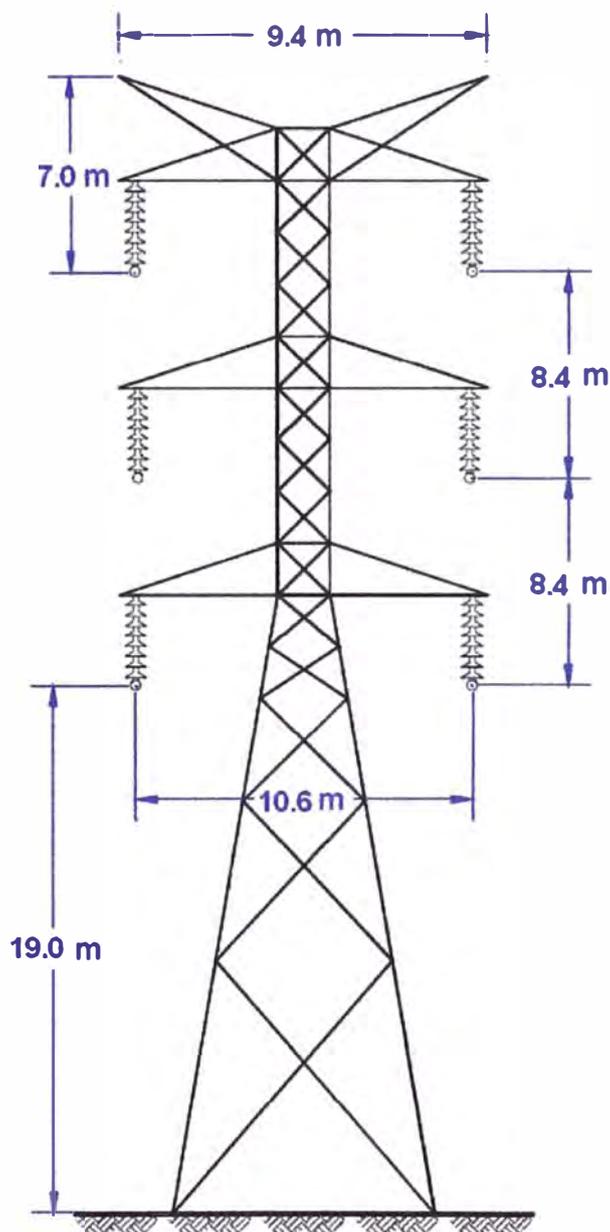
**Estructura de la torre de transmisión:** Se muestra en la figura 5.1.

**Nivel de aislamiento de las cadenas de aisladores (al nivel del mar):** 1700 kV

**Resistividad promedio del terreno:** 1150 ohm-m.

**Distancia entre torres:**

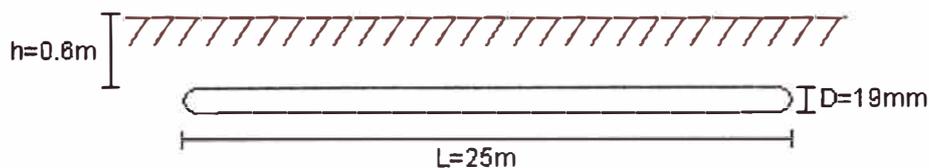
Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3	Tramo 4	Tramo 5	Tramo 6
320 m	250 m	300 m	360 m	260 m	280 m



**Figura 4.1 Estructura general de la línea de transmisión en 220kV**

#### 4.2.2 Datos de las puestas a tierra

Se consideró para el diseño de la puesta a tierra de las torre de transmisión un contrapeso de 25 m enterrada a una profundidad de 0.6 m, como se muestra en la Figura 4.2, el valor de la resistencia de la puesta a tierra es de 80 ohms (considerando un terreno de resistividad homogéneo de 1200 Ohm-m). Para el caso de estudio la puesta a tierra en cada torre será considerada igual.



**Figura 4.2 Puesta a tierra de las torres de transmisión**

### 4.2.3 Datos de los pararrayos

Para los pararrayos de entrada en la subestación se tiene las siguientes características de catálogo, estos datos se utilizan para modelar la curva característica del pararrayo:

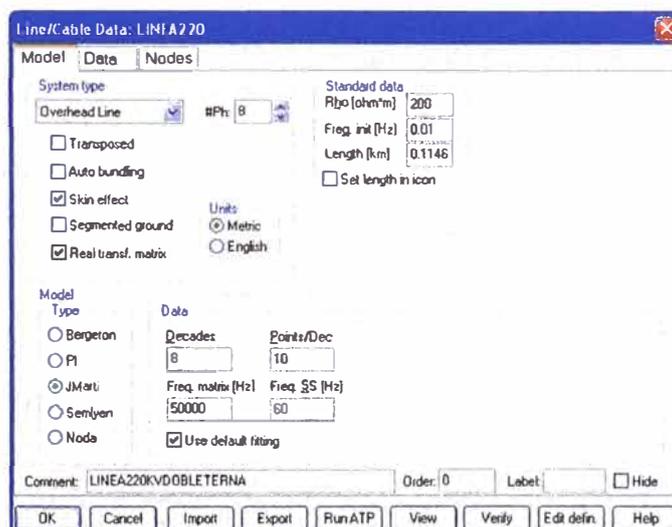
- Tensión nominal 198 kV

I (kA)	V residual (kV)
5	428
10	451
20	494
40	541

### 4.3 Aplicación de la Metodología

Para el caso de estudio desarrollado en este trabajo, se tendrá en cuenta para la simulación todos los modelos desarrollados en el Capítulo 2, así como también se tendrá en cuenta todos los procedimientos y criterios básicos de modelado y simulación descritos en el Capítulo 3. A continuación se mencionará todos los modelos de acuerdo a los datos del sistema a estudiar.

La línea de transmisión se modela en el ATP de acuerdo a sus características, quedando finalmente los datos como se muestra en las figuras 4.3 y 4.4.



**Figura 4.3 Caja de diálogo de datos del modelo de la línea**

#	Phno.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
1	1	0.527	1.5825	0.0545	5.3124	35.8	35.8
2	2	0.527	1.5825	0.0545	6.3124	27.4	27.4
3	3	0.527	1.5825	0.0545	5.3124	19	19
4	4	0.527	1.5825	0.0545	-5.3124	35.8	35.8
5	5	0.527	1.5825	0.0545	-6.3124	27.4	27.4
6	6	0.527	1.5825	0.0545	-5.3124	19	19
7	7	0.475	0.74	0.403	4.7	42.8	42.8
8	8	0	0.4572	4.04513	-4.7	42.8	42.8

**Figura 4.4 Datos geométricos de la línea**

Se modela la torre de transmisión hallando su impedancia característica según la ecuación:

$$U_{CW} = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right] \quad \dots (4.1)$$

Donde:  $h = 42$  m y  $r = 4.5$  m

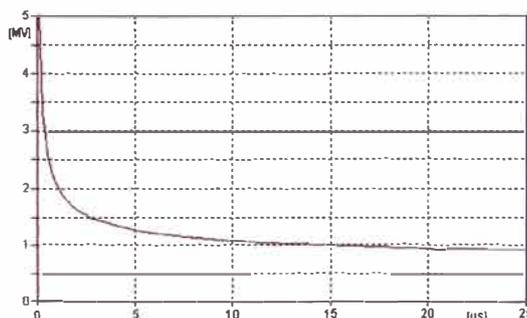
Por lo tanto los parámetros de la torre sería:

$$Z = 155.15 \text{ ohms}$$

$$V = 255\,000 \text{ km/s}$$

Se desprecia el efecto corona porque para este caso de estudio no se consideran distancias grandes de línea.

La cadena de aisladores es simulada mediante un interruptor accionado por un controlador que cerrará el circuito en caso de que el valor de la sobretensión en bornes de la cadena de aisladores exceda a la curva característica V-t en función de un BIL corregido por altura cuya magnitud aproximadamente es 1050kV, ver Figura 4.5. Adicionalmente este interruptor estará conectado en paralelo con un capacitor de 30 pF.



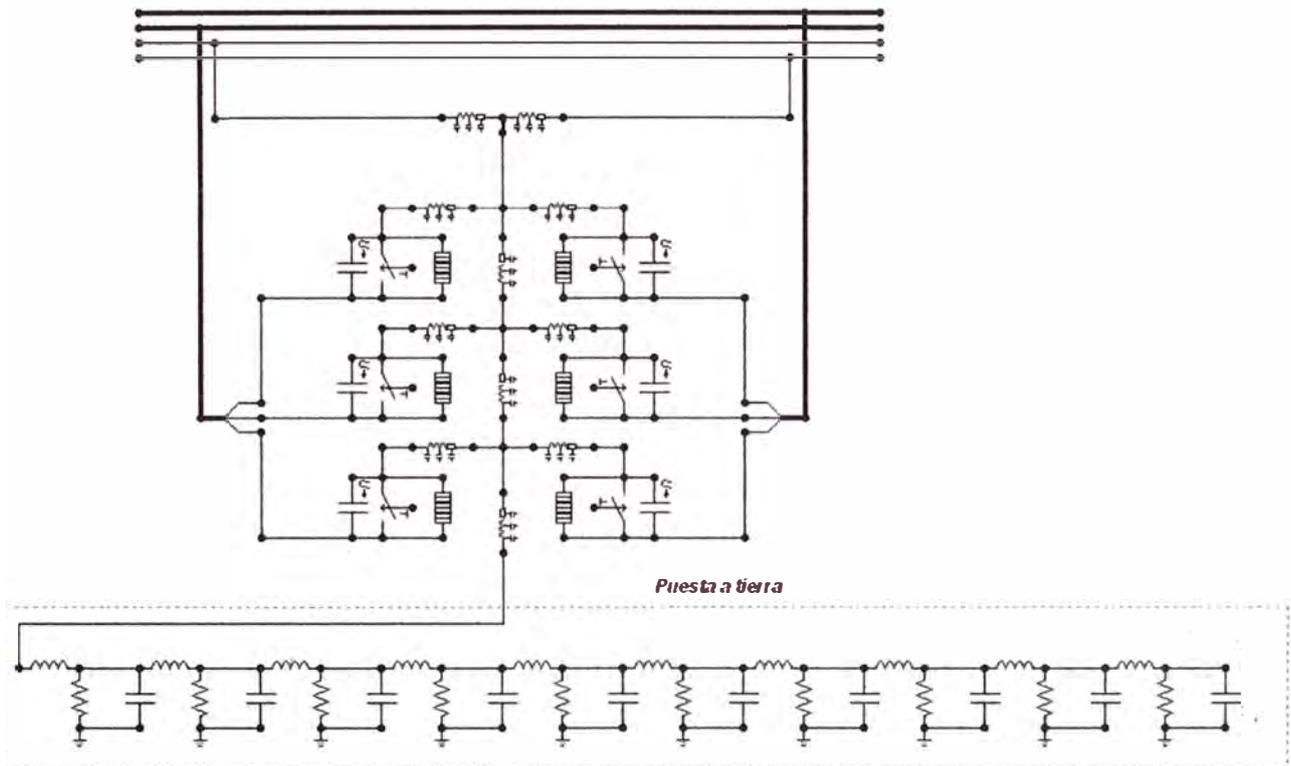
**Figura 4.5 Curva V-t de la cadena de aisladores**

La puesta a tierra de las torres se modela de acuerdo al modelo de parámetros distribuidos. Estos son:

$R = 80 \text{ Ohms}$ ,  $L = 26.175 \text{ uH}$ ,  $C = 1.328 \text{ nF}$ , dividido en 10 segmentos sería:

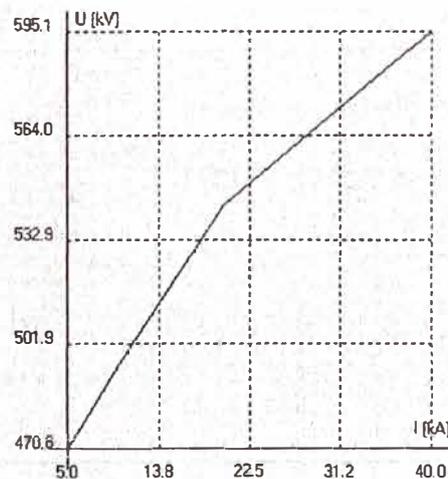
$R = 800 \text{ Ohm}$ ,  $L = 2.618 \text{ uH}$ ,  $C = 0.133 \text{ nF}$

Por lo tanto el modelo final sería:



**Figura 4.6 Modelo de la torre de transmisión en el ATPDraw**

Para el modelo del pararrayo se consideraron las curvas características, como se puede ver en la Figura 4.7,



**Figura 4.7 Curva característica de los pararrayos**

La curva característica del pararrayo que se muestra en la Figura 4.7 está basada en parámetros no lineales como se muestran en la siguiente tabla:

I (kA)	V residual (kV)	U (V)
5	451	470800
10	475	496100
20	513	543400
40	561	595100

#### 4.4 Modelado y Simulación

Utilizando los modelos anteriores se procede a simular diferentes casos de estudio en base a la metodología y criterios planteados (véase Capítulo 3), para de esa manera determinar la mejor alternativa de protección contra descargas atmosféricas en líneas de transmisión.

En este estudio el rayo impacta en una de las torres de la línea de transmisión en la zona límite de incidencia de rayos, evaluando los perfiles de sobretensiones transitorias obtenidos para diferentes magnitudes de impulso de rayo y para cada caso de estudio, se tiene los siguientes tres casos de estudio:

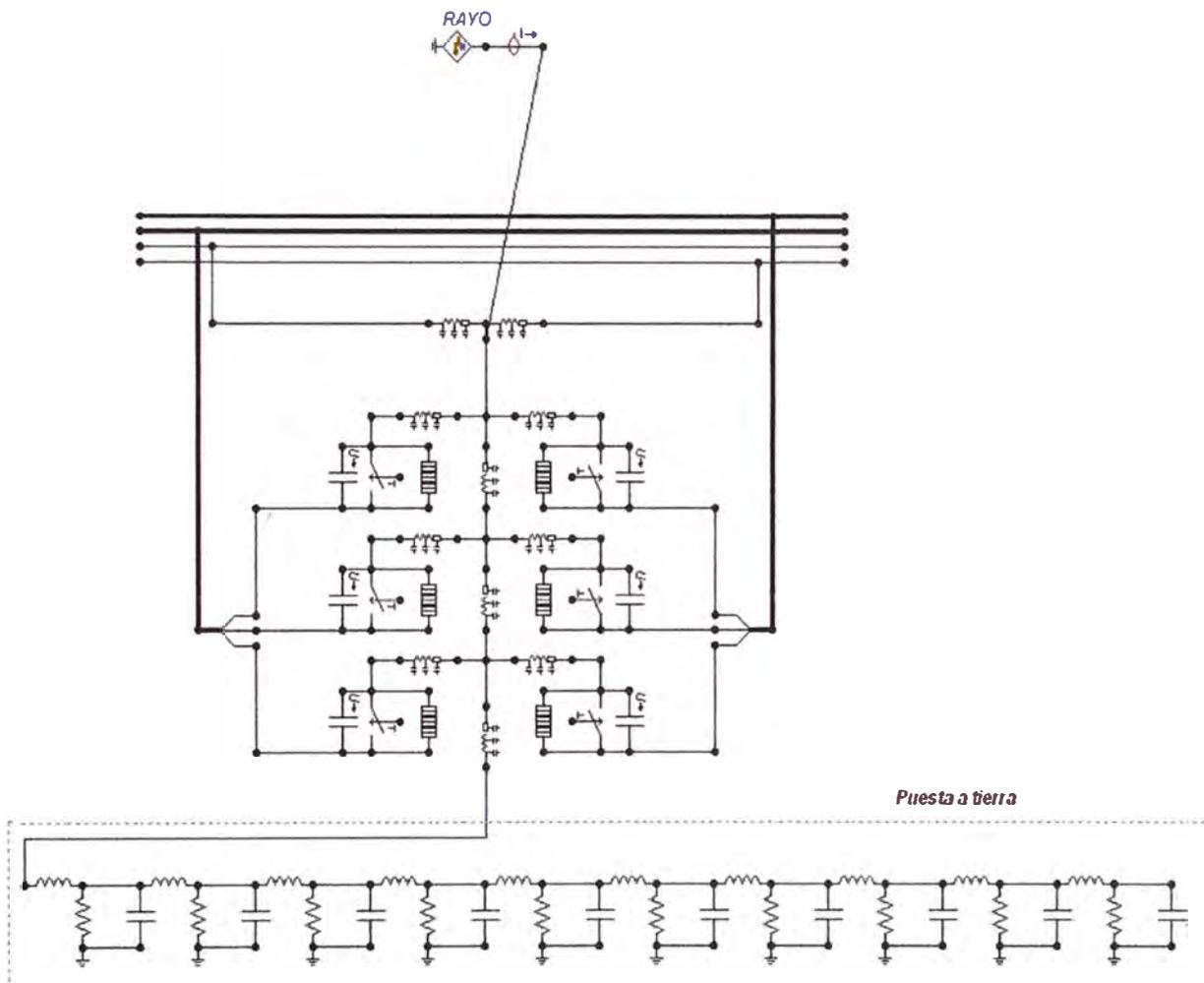
- a) **Sin pararrayos de línea:** En este escenario se evalúa los perfiles de sobretensión considerando que en la línea de transmisión no están instalados pararrayos de línea. El objetivo de este caso de estudio es determinar la necesidad de implementar pararrayos en la torre de transmisión según la magnitud de corriente rayo que impacta en la torre.
- b) **Con pararrayos de línea en torre adyacente:** En este escenario se evalúa los perfiles de sobretensión transitoria considerando que en una torre de transmisión adyacente a la zona protegida también están instalados pararrayos de línea. El objetivo de este caso de estudio consiste en evaluar la implementación de pararrayos de línea en las torres de transmisión adyacente para evitar que se produzcan contorneo directo en la línea de transmisión.
- c) **Pararrayos de línea en las torres necesarias:** En este escenario se evalúa los perfiles de sobretensiones transitorias considerando un determinado número de torres las cuales tiene instalados pararrayos de línea, adyacente a la zona de protección. El objetivo de este caso de estudio consiste en evaluar la implementación de pararrayos en las torres adyacentes para que no se produzca contorneo directo en la línea de transmisión.

## 4.5 Simulación y Resultados

A continuación se muestran los resultados obtenidos por cada caso de estudio detallado anteriormente.

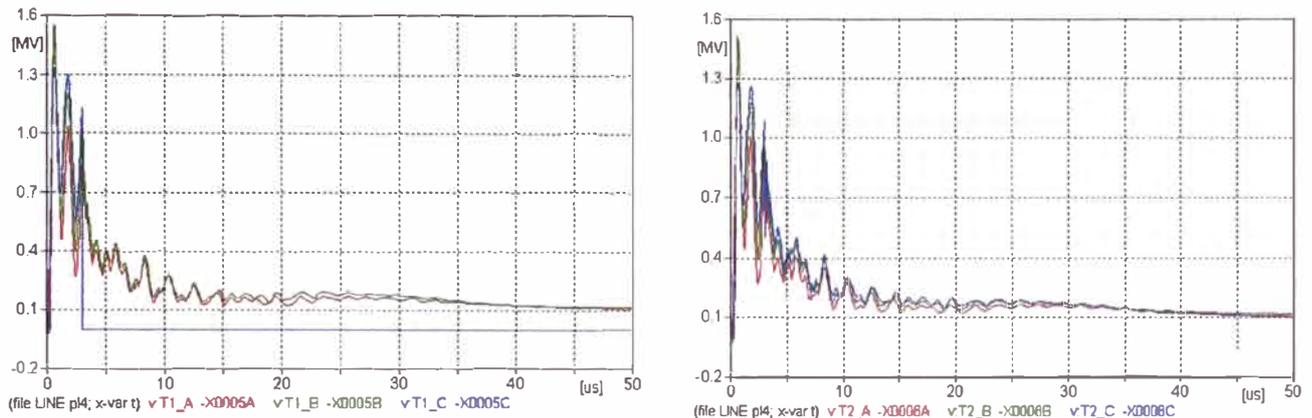
### 4.5.1 Caso de Estudio 1: Sin pararrayos de línea

Como se muestra en la Figura 4.8 se modela y simula el impacto de un rayo en una torre de transmisión (T1) sin protección de pararrayos de línea, donde se evalúa las magnitudes de las sobretensiones en las cadenas de aisladores.



**Figura 4.8 Modelado de la torre de transmisión donde no están instalados pararrayos de línea**

En la Figuras 4.9 se muestra los perfiles de sobretensiones transitorias que se miden en bornes de las cadenas de aisladores de la línea de transmisión en las fases A, B y C de cada una de las ternas, obtenidas por el impacto de un rayo de una magnitud de 50 kA en la torre de transmisión. Se observa que solo se produjo un contorneo inverso en la fase C de la terna 1.



**Figura 4.9 Sobretensiones producidas en las cadenas de aisladores**

Por lo tanto un rayo con una magnitud de 50 kA puede causar una falla monofásica en la línea y en consecuencia salir de operación por apertura de las protecciones en la línea de transmisión.

Mediante simulaciones se determinó que el rayo con una amplitud de 43 kA (que tiene una probabilidad aproximada de ocurrencia de 30%) puede producir un contorneo inverso en la cadena de aisladores. Por lo tanto se considera la protección de la torre de transmisión en la zona lime de rayos con pararrayos de línea.

A continuación se determina la necesidad de implementar pararrayos en las fases de la línea según la magnitud de rayo que impacte en la torre de transmisión.

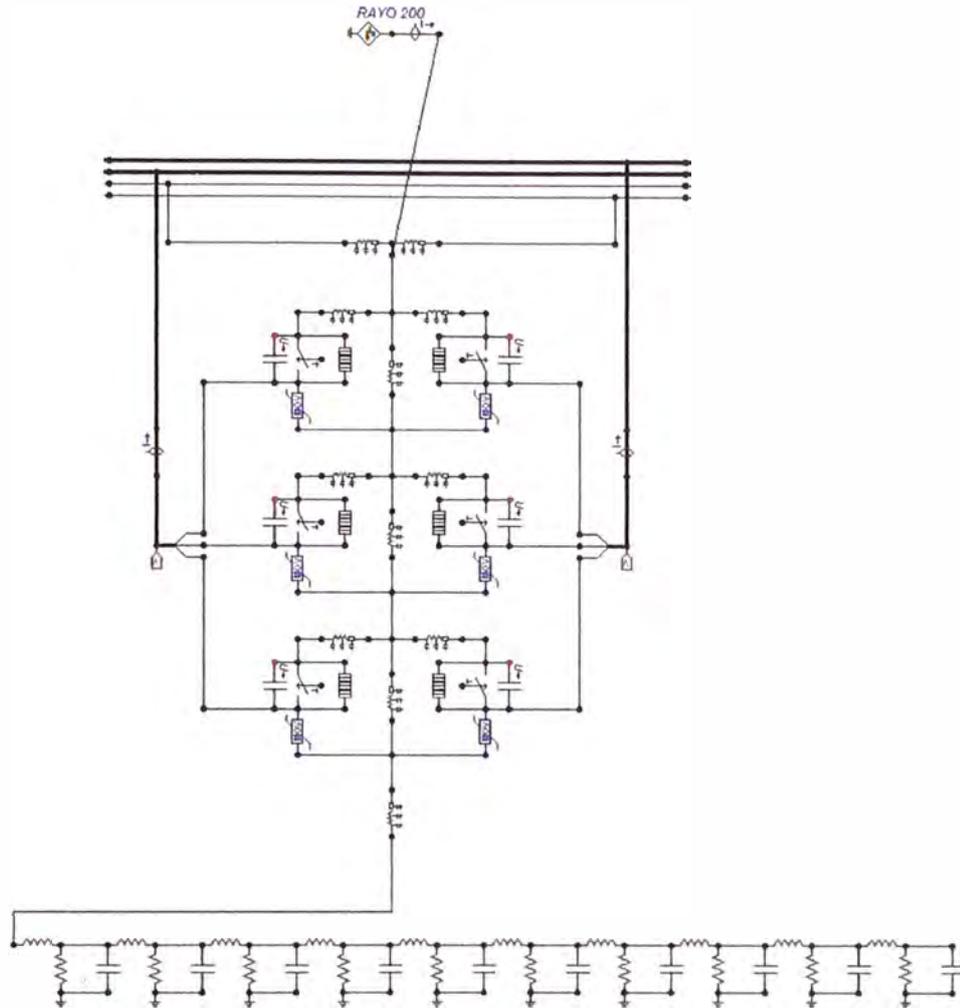
Al colocar solo pararrayos en la fase inferior (fase C) se protege a la torre de transmisión contra contorneo inverso hasta una cierta magnitud de corriente de rayo, el cual se determinó a través de la simulación aproximadamente de 100 kA; un rayo con mayor magnitud causaría un contorneo inverso en la fase superior siguiente (fase B).

De igual manera al colocar pararrayos en la fase C y B este protege hasta una cierta magnitud de rayo, aproximadamente 140 kA en caso de exceder este valor se producirá un contorneo inverso en la fase A.

Para proteger a los aisladores de la línea contra contorneo inverso, frente a cualquier valor de corriente de rayo, se puede instalar pararrayos de línea en todas las fases y de esa manera garantizar la continua operación de la línea.

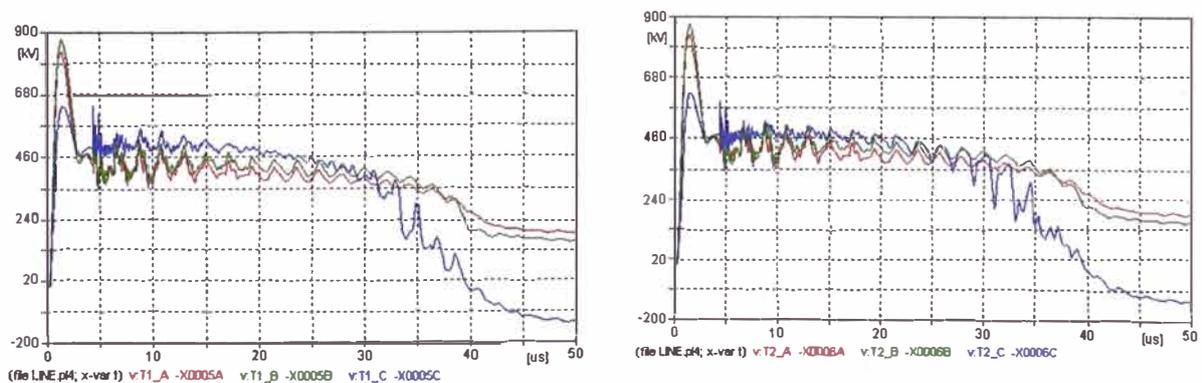
**Observacion:**

La fase A representa el conductor superior en la línea de transmisión (equivalente a la fase T), la fase B representa el conductor que se encuentra en el medio de las otras fases (equivalente a la fase S) y por último la fase C representa el conductor inferior en la línea de transmisión (equivalente a la fase R).



**Figura 4.10 Modelado de la torre de transmisión donde están instalados pararrayos de línea**

En la Figura 4.11 se muestra los perfiles de sobretensión en las cadenas de aisladores frente a una descarga atmosférica de 200 kA; se puede apreciar en la gráfica que no se produce contorneo inverso, por lo tanto la línea continúa operando sin que se vea afectado el servicio eléctrico.

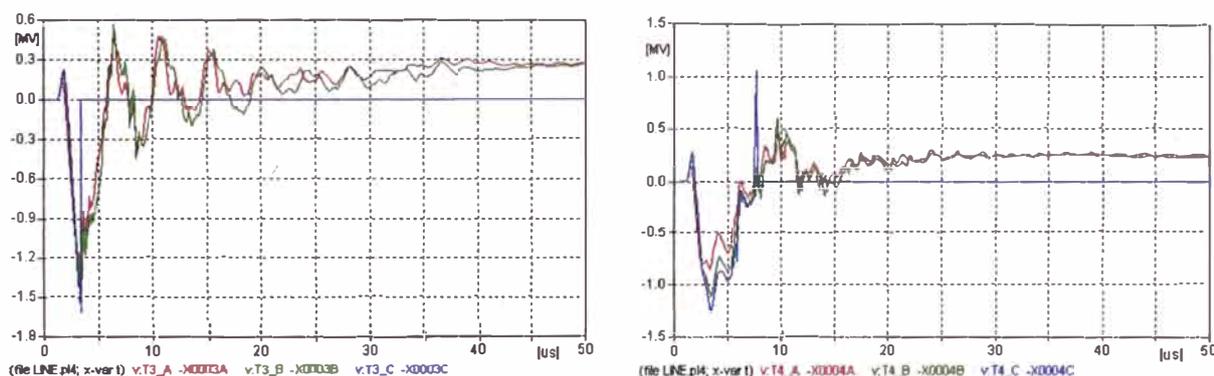


**Figura 4.11 Sobretensiones producidas en las cadenas de aisladores**

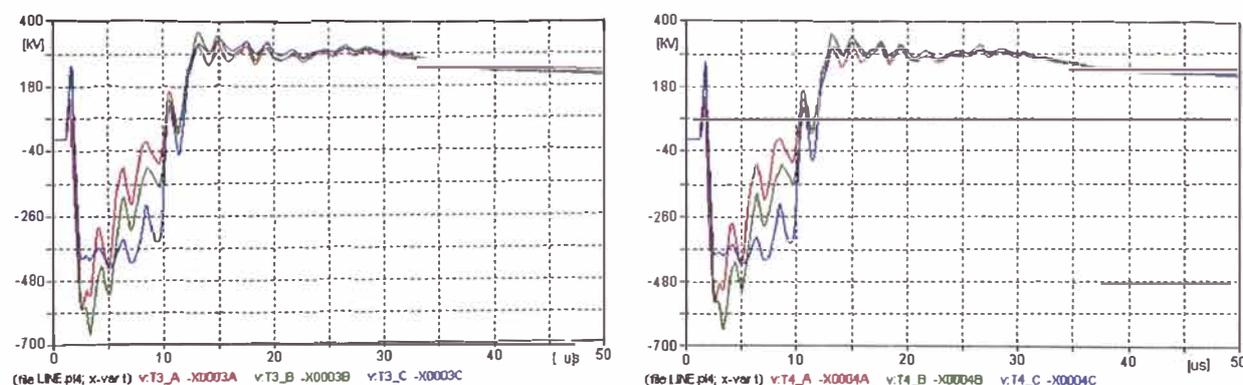
#### 4.5.2 Caso de Estudio 2: Pararrayos de línea en torre adyacente

En el caso anterior se analizó las sobretensiones en la torre de transmisión donde impactó el rayo, sin embargo la onda transitoria se propaga por las fases a ambos lados de la torre donde impacta el rayo, por lo tanto es importante analizar las sobretensiones en las torres adyacentes para observar si se produce o no un contorneo inverso en la torre adyacente.

Para un rayo de 100 kA se obtienen los valores de sobretensión en la cadena de aisladores, como se muestra en la Figura 4.12, donde se observa que se produce un contorneo directo en la cadena de aisladores, los cuales no se han protegido con pararrayos de línea. Por lo tanto para evitar el contorneo directo por propagación de la sobretensión por las fases se coloca pararrayos de línea en la fase C donde se obtienen los perfiles de sobretensiones como se muestra en la Figura 4.13. De la misma manera para corrientes de rayo mayores a 100 kA se debe evaluar la necesidad de pararrayos tanto en la fase B como en la fase A.



**Figura 4.12 Sobretensiones producidas en las cadenas de aisladores de la torre adyacente**

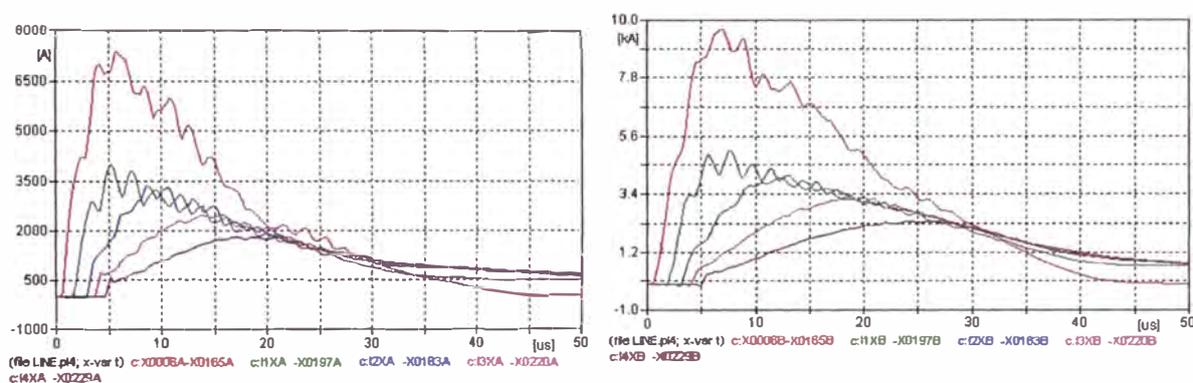


**Figura 4.13 Sobretensiones producidas en las cadenas de aisladores de la torre adyacente con pararrayos en la fase C**

### 4.5.3 Caso de Estudio 3: Pararrayos de línea en las torres necesarias

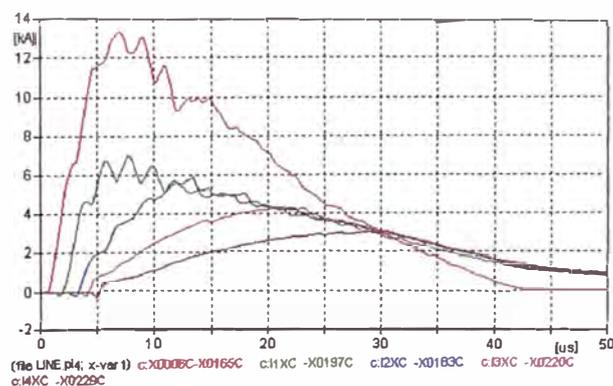
En este caso de estudio se instala pararrayos a lo largo de un tramo de línea, para garantizar el correcto drenaje de la corriente de rayo a tierra por parte de los pararrayos hacia tierra. Por lo tanto hay que determinar el número necesario de torres de transmisión donde van a ser instalados los pararrayos de línea.

En la Figura 4.14, se muestra el recorrido de la corriente transitoria debido a una descarga atmosférica de 200kA de amplitud por cada fase y como se va atenuando para cada punto de conexión a la torre de transmisión.



**En la fase A**

**En la fase B**

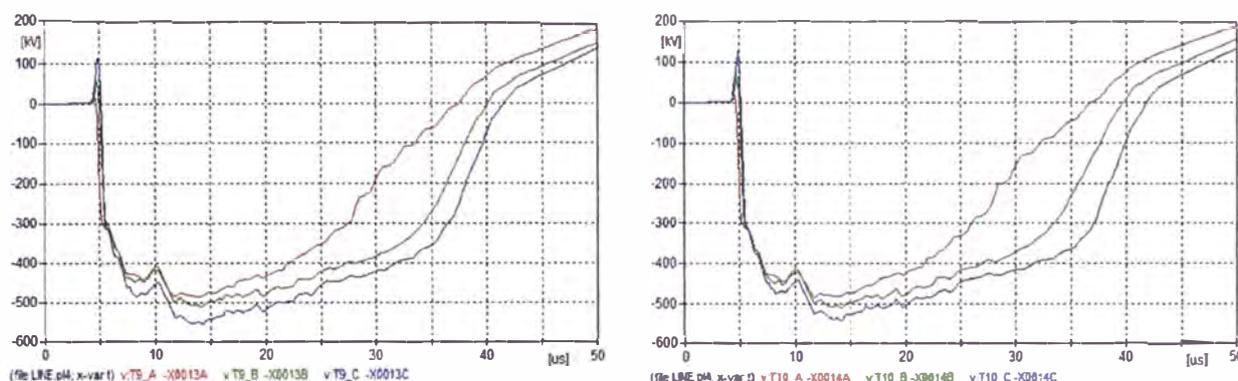


**En la fase C**

**Figura 4.14 Valores de corrientes de propagación en las fases de la línea de transmisión en la torre donde impacta el rayo**

Del análisis del caso de estudio se puede concluir, que se necesita en 4 torres de transmisión pararrayos de línea para garantizar un adecuado drenaje de la corriente de rayo a tierra y de esa manera limitar la posibilidad de contorneo directo en las cadenas de aisladores de la línea. En la Figura 4.15 se puede ver que las sobretensiones transitorias en

la 5° torre adyacente a la torre donde impacta el rayo, no causa ningún contorneo directo en sus cadenas de aisladores.



**Figura 4.15 Sobretensiones producidas en las cadenas de aisladores en la 5° torre adyacente sin pararrayos de línea**

#### 4.5.4 Observaciones

En el caso de estudio 3 se puede visualizar que el impulso que se propaga por la línea de transmisión llega aun valor que no produce contorneo inverso desde la torre donde impacto el rayo.

De tal manera que una solución para proporcionar protección contra descargas atmosféricas a la línea de transmisión seria colocar pararrayos en zonas confinadas de la línea de transmisión donde se presenta mayor número de salidas de líneas colocando pararrayos en las fases, (evaluar en que pararrayos se conviene más).

Gracias a la facilidad de simulación del ATPDraw se puede considerar condiciones de operación en el sistema en estudio y en base al análisis de estos resultados se puede obtener esquemas de protección buscando aquel que sea más óptimo.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los resultados obtenidos depende en gran medida de la precisión de los modelos y parámetros de cada uno de los componentes utilizados en la representación de la línea de transmisión.
2. Determinar el número adecuado de estructuras a proteger con pararrayos es un factor importante para diseñar adecuadamente la protección de la línea con pararrayos para evitar el contorneo directo.
3. El modelado de la puesta a tierra de las torres de transmisión es un factor predominante en el modelado y este debe ser evaluado cuidadosamente. Para este fin el modelo de parámetros distribuidos representa mejor el comportamiento del contrapeso ante transitorios de frente de onda rápida.
4. Cada proyecto de protección de líneas de transmisión de pararrayos tiene sus características propias que deben ser analizadas independientemente.
5. En la actualidad no existen muchas metodologías de aplicación de pararrayos en líneas de transmisión, este trabajo puede ser utilizado para la planeación de nuevas líneas de transmisión existentes como nuevas, donde se desee o se requiera reducir el índice de salidas por año debido a descargas atmosféricas.
6. No siempre se necesitará protección en todas las fases de los conductores, ya que existen fases con poca probabilidad de que se produzca un contorneo directo, por lo tanto esto tiene que ser evaluado y analizado.

**ANEXO A**  
**SELECCIÓN ADECUADA DE PARARRAYOS**

## **A.1 Resumen**

Los pararrayos son dispositivos limitadores de sobretensiones que constituyen la principal protección contra sobretensiones transitorias de frente de onda rápido. Por general se conectan en paralelo con el equipo a proteger y está conformado por elementos activos (bloques de ZnO) y los descargadores de sobretensiones están fabricados con un material de resistencia cerámico.

Estos equipos están diseñados para no operar con sobretensiones temporales (fallas), condición en la cual deben comportarse como aislante.

En este anexo se describen los niveles de protección del pararrayo y luego se muestra una metodología sencilla para la selección de los pararrayos, que fue utilizado para el caso real que se desarrolla en el presente trabajo.

## **A.2 Introducción**

Durante la operación en estado estacionario, a través de los pararrayos solo circula una pequeña corriente denominada corriente de fuga (del orden de unos pocos miliamperios). Sin embargo, cuando aparece una sobretensión en el sistema, los pararrayos derivan a tierra las sobrecorrientes asociadas, limitando la tensión a valores que pueda soportar el equipo protegido, es por ello que la selección de los pararrayos tiene especial interés y cuidado para el estudio de transitorios electromagnéticos. Se orienta a la selección de los pararrayo de Óxido de Zinc (ZnO) debido a que este tipo de pararrayos es comúnmente utilizado en la actualidad y viene reemplazando a los fabricados de Carburo de silicio (SiC). Normalmente, en la selección del pararrayo, se utilizan factores conservadores dado por los fabricantes, que dependen de la topología de la red, tensión máxima del sistema, potencia e impedancias de cortocircuito, etc. y se emplean hojas de cálculo dadas por los fabricantes que cumplen las recomendaciones de la norma IEC 60099-5.

## **A.3 Definiciones**

Estas definiciones están basadas en las normas IEC 60099-4 y ANSI 62.11.

### **Tensión de trabajo continuo (Us)**

Es la tensión de frecuencia industrial eficaz máxima admisible que se puede aplicar de forma continua entre los terminales del descargador. Esta tensión se define de distintas formas (se verifica con diferentes procedimientos de prueba) en IEC y ANSI.

### **Tensión máxima de trabajo continuo (COV)**

Es la tensión máxima eficaz a frecuencia industrial que puede aplicarse de forma continua entre los bornes de un pararrayo. La tensión de funcionamiento continuo debe ser mayor o igual a la tensión máxima del sistema por fase.

### **Tensión máxima de trabajo continuo (MCOV)**

ANSI establece la tensión de trabajo continuo máxima (MCOV) para todas las características nominales de descargador utilizadas en una tabla. El valor es utilizado en todas las pruebas especificadas por ANSI.

### **Sobretensiones temporales (TOV)**

Las sobretensiones temporales, a diferencia de las sobretensiones instantáneas, son sobretensiones de frecuencia industrial oscilantes de duración relativamente larga (entre algunos ciclos y varias horas). La forma más habitual de sobretensión temporal se produce en las fases sanas de una red, durante una pérdida a tierra en una o varias fases. Otras fuentes de sobretensión temporal son el rechazo de carga, la energización de líneas descargadas, etc.

### **Tensión nominal o asignada (Urated)**

Es la máxima tensión eficaz a frecuencia industrial admisible entre sus bornes para la cual está previsto un funcionamiento correcto en condiciones de sobretensiones temporales de 10 segundos de duración. La tensión asignada se utiliza como un parámetro de referencia para la especificación de las características de funcionamiento.

### **Tensión residual o tensión de descarga (Vres)**

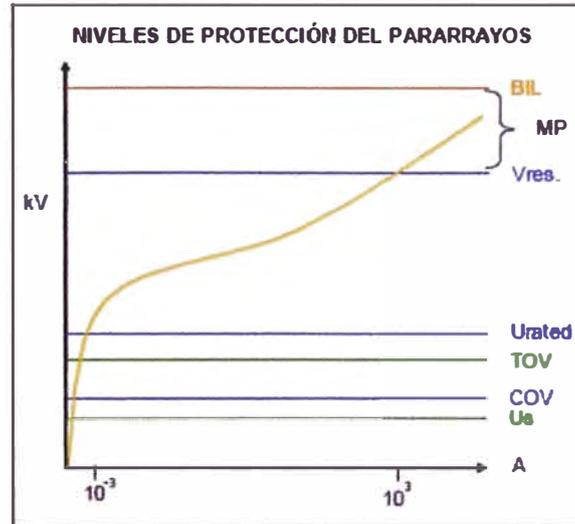
Éste es el valor máximo de la tensión, que aparece entre los terminales de un descargador cuando pasa por éste la corriente de descarga. La tensión residual depende de la magnitud y la forma de onda de la corriente de descarga. Las características de tensión y corriente de los descargadores se indican en los catálogos del fabricante.

### **Corriente nominal de descarga (In)**

Valor pico del impulso de corriente de descarga que se usa para designar un pararrayo.

### **Margen de protección**

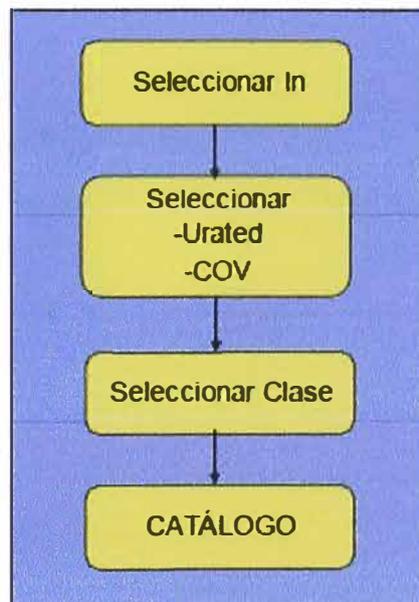
Es la relación entre BIL o BSL del equipo y el nivel de protección al impulso rayo del pararrayo.



**Figura A.1: Principales características de un pararrayos**

#### A.4 Metodología de Selección de un Pararrayo

La figura a continuación muestra el algoritmo general para seleccionar un pararrayo en la línea basado en la norma IEC 60099-5, de manera similar se procedería a seleccionar un pararrayo según ANSI.



**Figura A.2: Diagrama de flujo para selección de pararrayos**

La corriente nominal de descarga se puede obtener de la siguiente tabla dado por la IEC:

**Tabla D.1: Diagrama de flujo para selección de pararrayos**

Tensión nominal del sistema (Un)	Tensión máxima del sistema (Us)	5 kA	10 kA			20 kA	
			C 1	C 2	C 3	C 4	C 5
Un ≤ 66 kV	Us ≤ 72.5 kV	■	■	■			
36 kV < Un ≤ 220 kV	72.5 kV < Us ≤ 245 kV			■	■		
220 kV < Un ≤ 380 kV	245 kV < Us ≤ 420 kV				■	■	
Un > 380 kV	Us > 420 kV					■	■

La siguiente secuencia de cálculo es general y algunas variables dependen del criterio de diseño del fabricante.

Tensión continua de operación, COV (conexión fase-tierra).

$$\text{COV} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{3}} \quad \dots(\text{A.1})$$

Donde:  $U_{\max}$  corresponde a la máxima tensión del equipo.

Sobretensión temporal, TOV.

$$\text{TOV} = K_e \cdot \text{COV} \quad \dots(\text{A.2})$$

Donde  $K_e$  es el factor de tierra, el cual es de 1,4 para sistemas sólidamente puestos a tierra y 1,73 para sistemas con neutro aislado.

La tensión nominal ( $U_{\text{rated}}$ ) del descargador de sobretensiones, donde  $R$  es el mayor valor entre  $R_o$  y  $R_e$ .

$$R_o = \frac{\text{COV}}{K_o} \quad \dots(\text{A.3})$$

$K_o$  es el factor de diseño del descargador de sobretensiones, el cual varía según el fabricante. Un valor típico es 0,8 (ABB y Siemens).

$$R_e = \frac{\text{TOV}}{K_t} \quad \dots(\text{A.4})$$

$K_t$  es la relación de la TOV respecto de la tensión nominal  $U_r$  y depende del tiempo de duración de la sobretensión temporal. Así para pararrayos ABB, considerando un

segundo,  $K_t = 1,15$ ; 10 segundos,  $K_t = 1,06$  y dos horas,  $K_t = 0,95$  (valores aproximados); para Siemens  $K_t$  es 1.075 considerando 10 segundos.

Se puede prever un margen extra de 10% para sistemas con tensiones inferiores a 100 kV y 5% para sistemas con tensiones mayores de 100 kV, encontrándose así la tensión nominal del descargador de sobretensiones (R).

Se debe verificar que la tensión asignada ( $U_r$ ) del descargador de la subestación sea muy similar o superior al valor calculado de R. Una vez verificado el descargador de su catálogo se deben tomar los valores indicados como NPM (nivel de protección a la maniobra) y el NPR (nivel de protección al rayo), los cuales son fundamentales para iniciar la secuencia de cálculo del aislamiento y se definen como  $U_{ps}$  y  $U_{pl}$  según la recomendación IEC.

Para determinar la capacidad de absorción de energía y por tanto la clase del pararrayo se emplean relaciones de energía especificadas en las normas.

### A.5 Aplicativo

Para el caso de la selección del pararrayo en el caso aplicativo del trabajo presente, se tienen:

**Tabla D.2: Cuadros de selección de pararrayos**

Sistema		Estrella	Estrella	Delta	Estrella
Tensión Nominal	Un.	220 kV	138 kV	22.9 kV	22.9 kV
$U_m$	kV	245.00	145.00	24.00	24.00
$COV = U_m / \text{raiz}(3)$	kV	141.45	83.72	13.86	13.86
$K_e$		1.40	1.40	1.73	1.40
$TOV = K_e \cdot COV$	kV	198.03	117.20	23.97	19.40
$K_o$		0.80	0.80	0.80	1.80
$R_o = COV/K_o$	kV	176.81	104.64	17.32	7.70
$K_t$		1.15	1.15	1.06	1.15
$R_e = TOV/K_t$	kV	172.20	101.91	22.61	16.87
$R^* = \max(R_o, R_e)$	kV	176.81	104.64	22.61	16.87
$F_s$		1.05	1.05	1.10	1.10
$R = R^* \cdot F_s$	kV	185.65	109.88	24.88	18.56
$U_r$	kV	192.00	120.00	25.00	19.00
Energía en maniobra	kJ	768.44	11.51	0.01	0.01
Energía en lightning	kJ	0.51	0.22	0.04	0.04

Sistema		Estrella	Estrella	Delta	Estrella
<b>Tensión Nominal</b>	<b>Un.</b>	<b>220 kV</b>	<b>138 kV</b>	<b>22.9 kV</b>	<b>22.9 kV</b>
Um	kV	245.00	145.00	24.00	24.00
m		0.58	0.58	1.00	0.58
COV = Um * m	kV	141.45	83.72	24.00	13.86
Ke		1.40	1.40		1.40
TOV = Ke . COV	kV	198.03	117.20		19.40
Ko		0.80	0.80	0.80	0.80
Ro = COV/Ko	kV	176.81	104.64	30.00	17.32
Kt		1.075	1.075	1.075	1.075
Re = TOV/Kt	kV	184.22	109.03		18.05
R* = max(Ro,Re)	kV	184.22	109.03	30.00	18.05
Fs		1.00	1.00	1.00	1.00
R = R* . Fs	kV	184.22	109.03	30.00	18.05
Ur	kV	192.00	120.00	30.00	19.00
Energía en maniobra	kJ	768.44	11.51	0.01	0.01
Energía en lighting	kJ	0.51	0.22	0.04	0.04

## A.6 Conclusiones y Recomendaciones

- El pararrayo se escoge de manera que no opere cuando por sus terminales existe una sobretensión temporal mayor a su nominal.
- Se puede verificar mediante simulaciones en ATPDraw la selección de los pararrayos empleando metodologías propuestas por los fabricantes basados en normas.
- La mayor causa de falla de un pararrayo se debe a una condición del sistema que origina sobretensiones temporales mayores que la tensión nominal del pararrayo.

**ANEXO B**  
**MODELADO DINÁMICO DEL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA**  
**APROXIMADO A LÍNEA DE TRANSMISIÓN**

## **B.1 Modelado del Electrodo de puesta a tierra**

El cálculo correcto de los parámetros del electrodo por unidad (p.u.) de longitud es esencial para la mejor aproximación de los resultados, aplicando la Teoría de Campos Electromagnéticos y la Teoría de Líneas de Transmisión se ha desarrollado las fórmulas de cálculo.

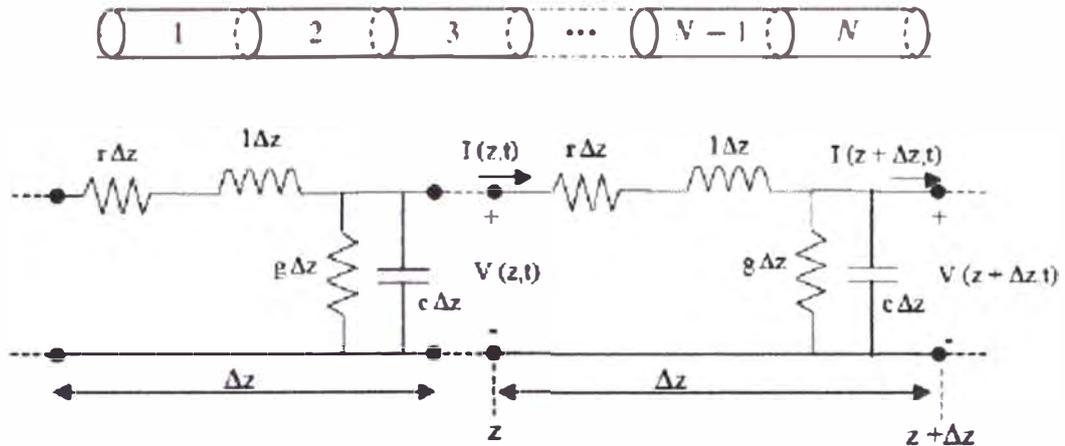
### **Modelado de electrodo de PT como circuito para análisis transitorio**

Como muestra la literatura en frecuencias bajas y/o estado estacionario, la Impedancia de un electrodo de PT puede ser representada por una Resistencia sola, mientras que en altas frecuencias por un circuito R-L-C de elementos concentrados o distribuidos en secciones incrementales a lo largo del electrodo. La literatura existente muestra para la Impedancia de una PT en alta frecuencia, tres juegos de expresiones para los parámetros del modelo de circuito PI considerando la Resistencia (R), Inductancia (L), Conductancia (G) y Capacitancia (C).

Los electrodos de PT están conformados por conductores horizontales enterrados y varillas o picas verticales, solos o asociados en diversas configuraciones o armados que se pueden obtener; para lograr disipar la energía por los impulsos en el suelo en tiempos muy cortos, evitando sobretensiones en el sistema eléctrico y gradientes peligrosos en los aislamientos.

En el proceso de análisis del comportamiento dinámico de la PT, corresponde analizar el modelado con los parámetros a utilizar, lo cual fue abordado en los capítulos 3 y 4 de esta Tesis; la base del modelado corresponde obtener los parámetros de la PT aproximado a la LT como impedancia distribuida, ante la excitación mediante corrientes de impulso, el problema consiste en calcular la respuesta transitoria de tensión en la cima de las torres o en los conductores de blindaje (cables de guarda) producido por las ondas viajeras.

El modelo de impedancia distribuida considera al electrodo dividido en secciones pequeñas y cada sección esta representada por un circuito PI; de ese modo el electrodo de PT estará representado por un conjunto de circuitos PI conectados en cascada, criterio originalmente desarrollado por E.D. Sunde, como se muestra en la figura E.1.



**Fig. E.1 Modelo del electrodo de PT aproximado a Línea de Transmisión con Impedancia PI distribuida.**

## B.2 Expresión de los Modelos de Electrodo de Puesta a Tierra

A continuación presentamos las ecuaciones matemáticas de los modelados del electrodo de PT (enterrados en el suelo), más utilizados internacionalmente para el estudio de esta materia. No me corresponde descartar alguna formulación de investigaciones anteriores.

### Electrodo de Puesta a Tierra tipo Varilla Vertical

a) **R. Rudenberg** en [14] desarrolló las ecuaciones matemáticas aplicadas a un electrodo de PT tipo varilla o barra vertical en estado transitorio, dado por:

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} * \text{Ln}\left(\frac{2\ell}{a}\right), \quad C = 2\pi\epsilon\ell * \left[\text{Ln}\left(\frac{2\ell}{a}\right)\right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} * \text{Ln}\left(\frac{2\ell}{a}\right) \quad \dots(\text{B.1})$$

b) **E.D. Sunde** en [12] desarrolló las ecuaciones para el cálculo de los parámetros del electrodo de PT tipo varilla vertical en estado transitorio, dado por la expresión siguiente.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} * \left[\text{Ln}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1\right], \quad C = 2\pi\epsilon\ell * \left[\text{Ln}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1\right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} * \left[\text{Ln}\left(\frac{4\ell}{\alpha}\right) - 1\right]$$

Donde “  $\alpha = \sqrt{2 * a * h}$  “ es el radio equivalente del electrodo, “a” es el radio del conductor, “l” es la longitud del electrodo y “h” es la profundidad de enterramiento, si h=0,  $\alpha = a$ . La unidad de los parámetros están dados en R(Ohm), L (H), C (F), G (mho).

### Electrodo de Puesta a Tierra tipo Conductor Horizontal

- a) **E.D. Sunde** [12] desarrolló las expresiones matemáticas para el cálculo de los parámetros de PT en estado transitorio, utilizando electrodo horizontal dado por las siguientes expresiones.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right], \quad C = 2\pi\epsilon\ell * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right]^{-1}, \quad L = \frac{\mu_0\ell}{2\pi} * \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) - 1 \right]$$

Donde “  $\alpha = \sqrt{2 * a * h}$  ” es el radio equivalente del electrodo, “a” es el radio del conductor, “l” es la longitud del electrodo y “h” es la profundidad de enterramiento, si  $h=0$ ,  $\alpha = a$ . La unidad de los parámetros están dados en R(Ohm), L (H), C (F), G (mho).

- b) **H.B. Dwight** [10] ha desarrollado las ecuaciones matemáticas para el electrodo de PT en estado transitorio, para conductor horizontal, las cuales pueden ser usadas para calcular la conductancia G y los demás parámetros; según expresiones.

$$R = G^{-1} = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[ \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{\alpha} \right) + \text{Ln} \left( \frac{2\ell}{s} \right) - 2 + \frac{s}{\ell} - \frac{s^2}{16 * (0.5\ell)^2} + \frac{s^4}{512 * (0.5\ell)^4} \right]$$

Donde:  $s = 2h$ , “ $\alpha$ ” es el radio equivalente del conductor.

Los valores de L, C pueden ser calculados por las expresiones siguientes.

$$L = \frac{\ell * G^{-1}}{c_0^2 * \epsilon_0 \rho} = \frac{\mu_0}{2\pi} \left[ \right], \quad C = \frac{\rho * \epsilon}{\ell * G^{-1}} = 2\pi\epsilon \left[ \right]$$

Donde:

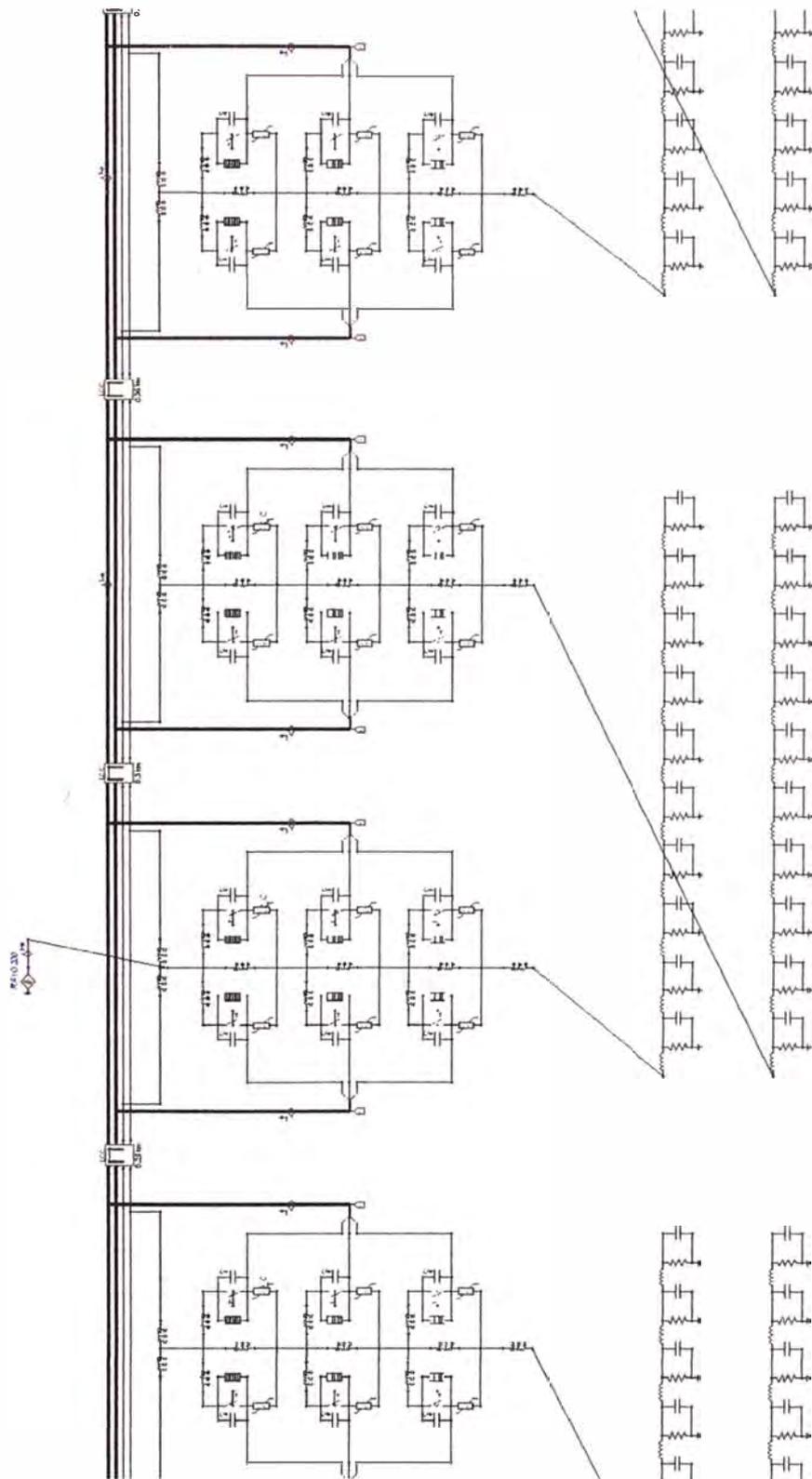
$$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} : \text{velocidad de la luz en vacío}$$

Las unidades de los parámetros del circuito R-L-C distribuidos están dados como: R(ohm), G (mho), C(F/m), L(H/m).

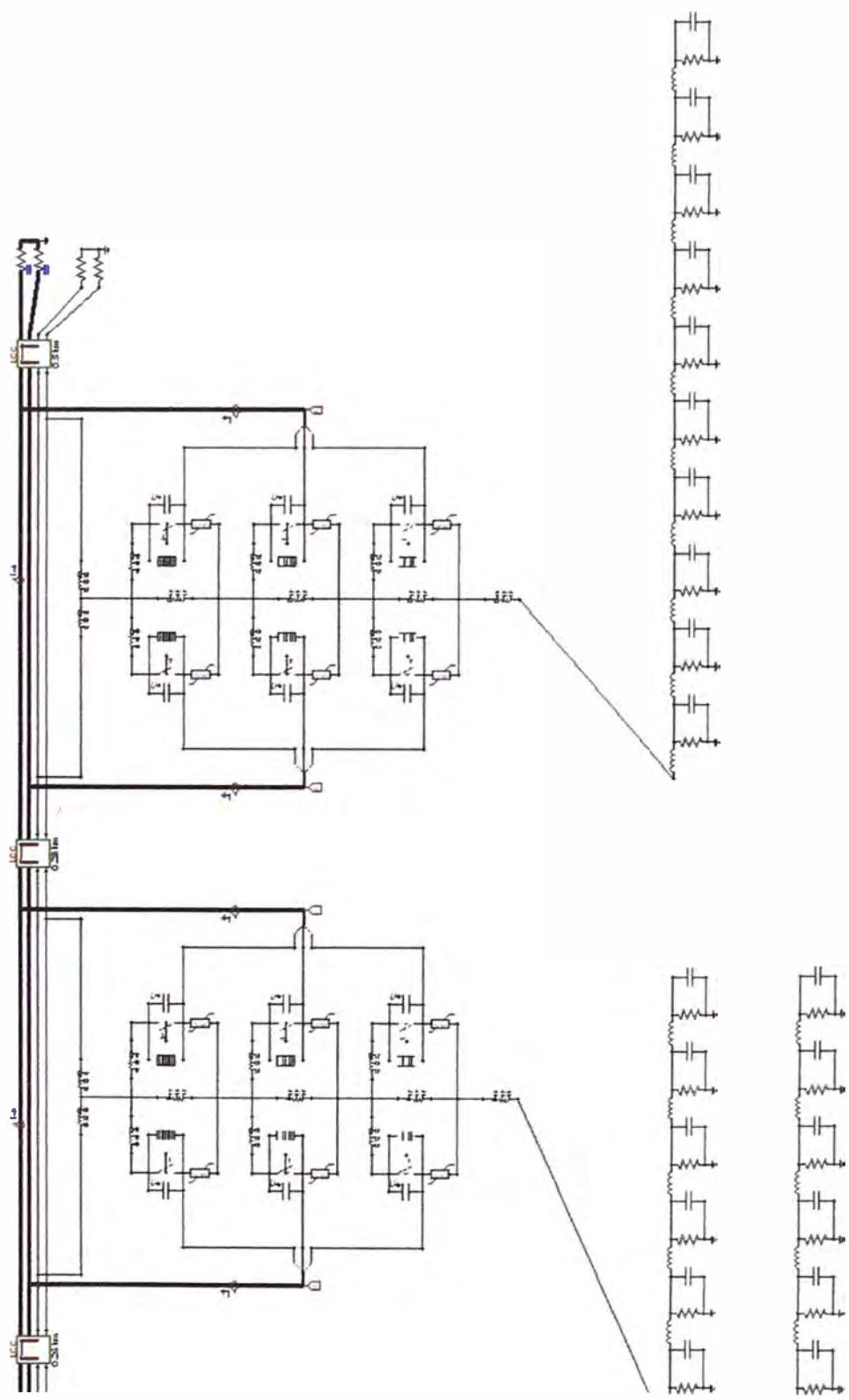
Los modelados más utilizados y recomendados en la literatura especializada, son las ecuaciones de Sunde, formulación utilizada para el cálculo de los parámetros de PT de este trabajo.

## **ANEXO C**

### **DIAGRAMA DE SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN ESTUDIO**



**Figura C.1: Gráfica de Simulación en ATPDraw, Parte I**



**Figura C.2: Gráfica de Simulación en ATPDraw, Parte II**

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Andrew R. Hileman, “Insulation Coordination for Power System”, Taylor & Francis Group, New York, 1st ed., 1999.
- [2] Allan Greenwood, “Electrical Transients in Power Systems”, John Wiley & Sons, INC., New York, 2<sup>st</sup> ed., 1998.
- [3] Tsu-huei Liu and W. Scott Meyer, Electro-Magnetic Transients Program (EMTP) Theory Book, Bonneville Power Administration, Oregon, 2st ed., 1995.
- [4] Electric Power Research Institute (EPRI), “EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above”, Electric Power Research Institute, Inc., Palo Alto, 3st ed., 2005.
- [5] Juan A. Martinez-Velasco, “Power System Transients Parameter Determinations”; Taylor & Francis Group, Natick, 1st ed., 2010.
- [6] Fast Front Transients Task Force of the IEEE Modeling and Analysis of System Transients Working Group, “Modeling Guidelines for fast Front Transients”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol 11, No. 1, January 1996.
- [7] IEC 60099-4-5, Pararrayos de óxido metálico sin explosores para sistemas de corriente alterna, Madrid, 1rd ed., 1991.
- [8] IEEE Std C62.22-1997, Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems, Madrid, 1rd ed., 2000.