

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**

### **ANÁLISIS DE LOS SOBREVOLTAJES POR IMPULSO ATMOSFÉRICO EN SISTEMAS DE TRANSMISIÓN CON DISCONTINUIDADES LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS Y CABLES AISLADOS, USANDO ATP.**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO  
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO ELÉCTRICO**

**JOSUA ORLANDO OÑA ARÁUZ**

[josua.ona@epn.edu.ec](mailto:josua.ona@epn.edu.ec)

**DIRECTOR: MBA. LUIS RUALES CORRALES**

[luis.ruales@epn.edu.ec](mailto:luis.ruales@epn.edu.ec)

**DMQ, abril-2023**

## **CERTIFICACIONES**

Yo, Josua Orlando Oña Aráuz declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.



**Josua Orlando Oña Aráuz**

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Josua Orlando Oña Aráuz, bajo mi supervisión.



---

**Luis Ruales Corrales**  
**DIRECTOR**

## **DECLARACIÓN DE AUTORÍA**

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

JOSUA ORLANDO OÑA ARÁUZ

LUIS RUALES CORRALES

## **DEDICATORIA**

*A Dios por darme la vida, salud y sabiduría para lograr este objetivo tan especial en mi vida y a la Virgen María, por interceder en todas mis peticiones.*

*A mi tía Mary Cecilia (+), este trabajo lo dedico a su memoria, por ser mi ángel de la guarda durante toda esta etapa académica.*

*A mis padres, Jorge por enseñarme desde niño esta hermosa profesión y Mariana por ser apoyo y fortaleza en mis momentos más difíciles.*

*A mi hermano Erick, por ser mi motivación para ser mejor cada día.*

## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco a Dios y la Virgen María por darme esa fortaleza espiritual para nunca rendirme y alcanzar este sueño tan anhelado.

Quiero agradecer infinitamente a mis padres Jorge y Mariana por su compañía, amor, enseñanzas y apoyo brindado en mi formación académica. Sin mis padres nada de esto sería posible. Agradezco a mi hermano Erick por creer en mí, siempre estar a mi lado brindándome su cariño, aprecio para seguir adelante y motivándome para nunca rendirme.

A mi familia, mis abuelos, tíos, tías y primos por estar siempre al pendiente de mí.

Al Ingeniero Luis Ruales, por su guía, entusiasmo, paciencia, confianza y todos los conocimientos impartidos para que este trabajo de integración curricular sea llevado a cabo de la mejor manera posible.

A la Escuela Politécnica Nacional, por su formación académica dentro de un ambiente de compañerismo y respeto. Gracias también a todos los docentes que formaron parte de este grandioso camino.

Finalmente, agradezco a mis amigos de la universidad: Jordin, Ricardo y Pablo, con quienes compartí gratos momentos, y en especial a mi amigo Luis, quien siempre fue mi apoyo a lo largo de la carrera y supo guiarme a tomar las mejores decisiones.

**¡Muchas Gracias!**

## ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIONES.....	I
DECLARACIÓN DE AUTORÍA.....	II
DEDICATORIA.....	III
AGRADECIMIENTO.....	IV
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	V
RESUMEN.....	VII
ABSTRACT.....	VIII
1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO.....	1
1.1. Objetivo general.....	2
1.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Alcance.....	2
1.4. Marco teórico.....	3
1.4.1. Sobrevoltajes.....	3
1.4.1.1. Clasificación de los sobrevoltajes.....	3
1.4.2. Descargas atmosféricas.....	5
1.4.3. Análisis de Ondas Viajeras.....	9
1.4.3.1 Ondas Viajeras.....	9
1.4.4. Limitación de descargas atmosféricas.....	15
1.4.4.1. Apantallamiento.....	15
1.4.4.2. Pararrayos.....	18
1.4.5. Cables aislados.....	18
1.4.5.1. Líneas eléctricas de transmisión subterráneas.....	19
1.4.5.2. Tipos de cables aislados.....	19
1.4.5.3. Métodos de puesta a tierra de pantallas en cables aislados.....	20
2 METODOLOGÍA.....	22
2.1 Software ATP.....	22
2.2. Descripción de los componentes utilizados.....	23
2.2.1. Líneas de transmisión.....	24
2.2.2. Corriente del rayo (Fuente de corriente de Heidler).....	25

2.2.2.1. Cálculo de la corriente del rayo para falla de apantallamiento .....	25
2.2.3. Torre de transmisión.....	27
2.2.3.1. Modelo Multipiso.....	27
2.2.4. Resistencia de pie de torre.....	29
2.2.5. Cadena de aisladores.....	29
2.2.6. Pararrayos.....	30
2.3. Modelación e implementación en el software ATP.....	31
2.3.1. Líneas de transmisión .....	31
2.3.2. Corriente del rayo (Fuente de corriente de Heidler) .....	37
2.3.2.1. Cálculo de la corriente del rayo para falla de apantallamiento .....	38
2.3.3. Torre de transmisión.....	39
2.3.4. Resistencia de pie de torre.....	41
2.3.5. Cadena de aisladores.....	41
2.3.6. Pararrayos.....	42
2.3.7. Fuente del sistema a 60 Hz.....	45
3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	47
3.1. Resultados.....	47
3.1.1. Caso Base.....	47
3.1.2. Variación en la magnitud de la corriente del rayo.....	49
3.1.3. Variación de la resistencia de pie de torre.....	50
3.1.4. Variación de la longitud del cable aislado.....	51
3.1.5. Variación en el lugar de la caída del rayo.....	53
3.1.6. Con la implementación de la fuente de 60 [Hz] .....	54
3.1.7. Descargas atmosféricas directas en conductores .....	57
3.1.8. Comentario General .....	58
3.2. Conclusiones .....	58
3.3. Recomendaciones .....	60
4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	61
5. ANEXOS.....	63

## RESUMEN

El presente componente de Trabajo de Integración Curricular (TIC) muestra un análisis de los sobrevoltajes ocasionados por impulsos atmosféricos en sistemas de transmisión con discontinuidades, líneas de transmisión aéreas y cables aislados, mediante el uso del software Alternative Transients Program (ATP).

El análisis se realiza considerando descargas atmosféricas directas en el cable de guarda o torre de transmisión, y cuando ocurre una falla del apantallamiento o descarga en el conductor de fase. Para la determinación de los voltajes en los extremos del cable aislado y analizar su potencial afectación, se ha implementado un sistema de transmisión de prueba en el cual se ha definido un Caso Base, que está compuesto por seis torres de transmisión y un cable aislado protegido en ambos extremos por pararrayos.

Para la modelación del sistema de prueba se han utilizado los componentes existentes en el programa ATP. Se detalla el procedimiento de selección de modelos y configuración en base a las recomendaciones de artículos técnicos y del mismo programa para los criterios de parametrización.

En el sistema de transmisión de prueba analizan el efecto de variar algunos parámetros que inciden en la magnitud de los voltajes tanto al ingreso del cable aislado como a la salida: la magnitud de la corriente del rayo, la resistencia de pie de torre, la longitud del cable, el lugar en donde impacta el rayo y la influencia de la presencia de la fuente de 60 Hz, con el fin de determinar la situación más crítica que puede influir en los valores máximos de sobrevoltaje en el cable aislado.

Los resultados obtenidos permiten confirmar el efecto que tienen las discontinuidades presentes entre dos componentes de un sistema eléctrico en las magnitudes de voltaje que puedan producirse en un sistema debido a descargas atmosféricas.

Este TIC busca ser un aporte hacia futuros proyectos eléctricos que puedan presentarse en el sector eléctrico en Ecuador, ya que la implementación de cables aislados es una opción cuando existen restricciones en la construcción de líneas aéreas.

**PALABRAS CLAVE:** Cable aislado, descargas atmosféricas, sobrevoltajes, ATP.

## **ABSTRACT**

This research shows an analysis of the over voltages caused by atmospheric impulses in transmission systems with discontinuities, overhead transmission lines, and insulated cables using the Alternative Transients Program (ATP) software.

The analysis is performed considering direct atmospheric discharges on the guard cable or transmission tower when a shielding or discharge failure happens in the phase conductor. In order to determine voltages in the external sides of the insulated cable and analyze its possible affectation, a test transmission system has been implemented, and Base Case has been defined; this case is formed by six transmission towers and insulated cable protected in both sides by lightning rod.

The existing components of the ATP program have been used to model the test system. The model selection, and configuration procedure is detailed based on the recommendations of technical papers and the program for the parameterization criteria.

In the test transmission system, the effect of varying some parameters that affect the magnitude of the voltages both at the input of the insulated cable and at the output is analyzed: the magnitude of the lightning current, the tower foot resistance, the length of the line, the place where the lightning strikes and the influence of the presence of the 60 Hz source, in order to determine the most critical situation that can influence the maximum overvoltage values in the insulated cable.

The results confirm the effect that the discontinuities between two components of an electrical system have on the voltage magnitudes that may occur in a system due to atmospheric discharges.

This investigation seeks to contribute to future electrical projects that may appear in the electrical sector in Ecuador, since the implementation of insulated cables is an option when there are restrictions in the construction of overhead lines.

**KEYWORDS:** Insulated cable, atmospheric discharges, surges, ATP.

## **1. DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO**

En la actualidad, debido a restricciones para las construcciones de líneas de transmisión aéreas sea por aspectos ambientales en áreas protegidas o por regulaciones establecidas por los Gobiernos Autónomos Descentralizados para áreas urbanas es necesario recurrir al uso de cables aislados, generalmente subterráneos. Esta situación puede llevar a la implementación de líneas de transmisión compuestas por secciones de líneas de transmisión aéreas y cables aislados de alto voltaje.

No obstante, al contar con este tipo de configuraciones de sistemas de transmisión en un sistema eléctrico, resulta importante conocer el comportamiento de dichas configuraciones ante sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en la línea de transmisión aérea, particularmente en los cables aislados. Las descargas atmosféricas directas en cables aislados tienen poca probabilidad de ocurrencia; sin embargo, en el presente trabajo es necesario considerar descargas directas en cable de guarda o torre de transmisión y en conductores de fase debido a los sobrevoltajes que inducen hacia el cable aislado, en base a un estudio de apantallamiento, en el cual se establecen la distancia crítica, corriente máxima del rayo y su probabilidad de ocurrencia.

En base a lo expuesto, este componente de trabajo de integración busca realizar un análisis de sobrevoltajes por impulso atmosférico, en un sistema de transmisión de prueba establecido por líneas aéreas junto con sus respectivas torres de transmisión y un cable aislado de alto voltaje, ambas líneas han sido tratadas considerando el modelo matemático J. Martí, en razón a la alta frecuencia que presenta un impulso atmosférico, además, se ha incluido como medio de protección los pararrayos encargados de controlar los sobrevoltajes ocasionados por descargas inversas en las cadenas de aisladores capaces de soportar las interrupciones causadas por las descargas atmosféricas. Dicho esto, se determinarán los parámetros necesarios para la simulación de cada componente del sistema de prueba en ATP, y posteriormente, se realizará un análisis paramétrico en función de las variables que tienen incidencia en la ocurrencia de estos fenómenos y se definirán los casos con mayor probabilidad de ocurrencia, y que permitan identificar cual es el caso más crítico a considerar en el cable aislado para que no ocurra una afectación considerada en su aislamiento.

En el software ATP, se implementarán dispositivos de medida de voltaje y corriente para monitorear las magnitudes de voltaje y corriente, actuación de los pararrayos, y el comportamiento de la cadena de aisladores, así como las magnitudes de sobrevoltaje en la entrada y salida del cable de alto voltaje.

## **1.1. Objetivo general**

Analizar mediante el uso del software ATP sobrevoltajes por impulso atmosférico que se presentan en sistemas de transmisión con secciones de líneas aéreas y de cables aislados.

## **1.2. Objetivos específicos**

1. Realizar una investigación bibliográfica acerca del fenómeno de las descargas atmosféricas en líneas de transmisión y sus implicaciones en discontinuidades con la configuración propuesta.
2. Determinar los modelos para cada uno de los componentes del sistema de transmisión de prueba y determinar los parámetros necesarios, en función de las características del fenómeno analizado.
3. Familiarizarse acerca de las funciones disponibles en ATP y realizar las simulaciones correspondientes en el sistema de prueba, con el fin de obtener los sobrevoltajes en las discontinuidades.
4. Realizar el análisis de los resultados obtenidos, en base a los cuales se establecerán las conclusiones.

## **1.3. Alcance**

Como primera fase se realizará la investigación bibliográfica del problema de ondas viajeras, sobrevoltajes por impulso atmosféricos, apantallamiento en líneas de transmisión y cables aislados, que permitirá entender de una forma clara y concisa los conceptos, así como razonar los efectos que pueden causar dichos problemas. En la segunda fase se analizará el funcionamiento del software ATP, sus capacidades, modelos de los componentes en función de la frecuencia del fenómeno estudiado, incluyendo el mecanismo de la descarga atmosférica, modos de simulación y operación. En el sistema eléctrico de prueba se ejecutarán las simulaciones de los diferentes casos, con el análisis correspondiente de los resultados obtenidos. Finalmente, se procederá a la redacción del documento en el que se presentarán las conclusiones, recomendaciones y bibliografía utilizada.

## 1.4. Marco teórico

En esta sección del documento se presenta una breve descripción de los diferentes tipos de sobrevoltajes que pueden ocurrir en un sistema eléctrico de potencia, así como su clasificación en la cual se encuentra los objetos de estudio del presente TIC que son los sobrevoltajes de frente rápido o descargas atmosféricas y su clasificación. Se describe el apantallamiento en sistemas eléctricos de transmisión con el fin de proteger al sistema de descargas atmosféricas. Se analiza la teoría de ondas viajeras. Finalmente, se hace una breve descripción de los cables aislados de alto voltaje.

### 1.4.1. Sobrevoltajes

La mayoría del tiempo, los Sistemas Eléctricos de Potencia operan en un régimen estacionario; sin embargo, es imprescindible diseñarlos para sobrellevar ciertas condiciones anormales durante un cierto período tiempo, estas condiciones pueden ser provocadas por sobrevoltajes de origen interno (por ejemplo los producidos por maniobras) o externo (por ejemplo los producidos por descargas atmosféricas), con valores de voltaje superiores al valor máximo nominal de operación del sistema [1].

#### 1.4.1.1. Clasificación de los sobrevoltajes

En la Figura 1.1, se presenta la clasificación y caracterización de los sobrevoltajes en un sistema de potencia, por categorías, baja frecuencia y transitorios [2].

Tipo	Baja frecuencia		Transitorio		
	Continua	Temporal	Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
Formas de onda de voltajes y sobrevoltajes					
Gamas de formas de onda de voltajes y sobrevoltajes	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_c \geq 3.600 \text{ s}$	$10 \text{ Hz} < f < 500 \text{ Hz}$ $0.02 \text{ s} \leq T_t \leq 3.600 \text{ s}$	$20 \mu\text{s} < T_p \leq 5.000 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0.1 \mu\text{s} < T_1 \leq 20 \mu\text{s}$ $T_2 \leq 300 \mu\text{s}$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0.3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$
Formas de onda de voltaje normalizado					*)
	$f = 50 \text{ Hz o } 60 \text{ Hz}$ $T_c$ *)	$48 \text{ Hz} \leq f \leq 62 \text{ Hz}$ $T_t = 60 \text{ s}$	$T_p = 250 \mu\text{s}$ $T_2 = 2.500 \mu\text{s}$	$T_1 = 1.2 \mu\text{s}$ $T_2 = 50 \mu\text{s}$	
Ensayo de voltaje soportado normalizado	*)	Ensayo a frecuencia industrial de corta duración	Ensayo impulso tipo maniobra	Ensayo impulso tipo rayo	*)

Figura 1.1. Clasificación de los sobrevoltajes [2].

A continuación, se describe cada sobrevoltaje cuya caracterización consta en la Figura 1.1.

### **Sobrevoltajes de baja frecuencia**

Estos voltajes son del tipo amortiguado o débilmente amortiguado a frecuencia industrial con una duración prolongada. A continuación, se detalla cada sobrevoltaje de baja frecuencia:

#### *Voltaje permanente*

Este voltaje se produce bajo condiciones normales de operación, por lo cual presenta una frecuencia igual o cercana a la nominal del sistema, con un valor eficaz constante [2].

#### *Sobrevoltajes temporales*

Las características de este tipo de sobrevoltajes constan en la Figura 1.1 y son producidos por fallas a tierra, ferorrresonancia, pérdidas de carga, resonancias [2].

### **Sobrevoltajes transitorios**

Los sobrevoltajes transitorios son de corta duración, muy amortiguados y oscilatorios o unidireccionales, clasificados de la siguiente manera:

#### *Sobrevoltajes de frente lento*

Estos sobrevoltajes son originados por descargas atmosféricas lejanas a la subestación y energización de líneas de transmisión, transformadores, reactores, banco de condensadores, o desenergización de los mismos [2].

#### *Sobrevoltajes de frente rápido*

Su caracterización consta en la Figura 1.1 y son en su mayoría de origen atmosférico, es decir, son causados por el impacto directo del rayo en las subestaciones y líneas de transmisión, o en sus proximidades; no obstante, también existe la posibilidad de que se produzcan por maniobras, solo si están a distancias cortas de los equipos e interruptores [2].

#### *Sobrevoltajes de frente muy rápido*

Son sobrevoltajes originados por maniobras de seccionadores o por fallas internas en subestaciones con SF6 denominadas GIS (Gas Insulated Substations), debido a una disrupción inmediata de los electrodos en gas y al poco amortiguamiento de las ondas ante su propagación en la subestación [2].

### **1.4.2. Descargas atmosféricas**

Un sistema eléctrico de potencia está expuesto a descargas atmosféricas, más aún en líneas de transmisión de larga distancia, debido a que atraviesan varias zonas con diferentes niveles cerámicos (cantidad de tormentas existentes en un año) [3].

#### **Clasificación de las Descargas Atmosféricas**

A continuación, se describen las diferentes formas de como las descargas atmosféricas afectan a los sistemas eléctricos:

##### *Descargas atmosféricas en la subestación*

Si bien existe la probabilidad de ocurrencia de una descarga atmosférica directamente sobre la subestación, los impactos en la misma son mínimos considerando el grado de apantallamiento de ésta. Por lo anotado, no se realizan estudios de descargas directas sobre las subestaciones [2].

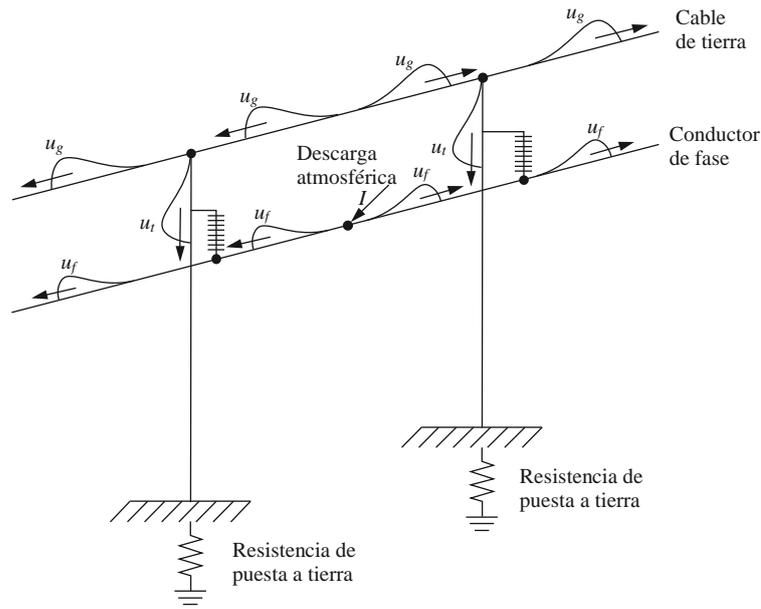
Las subestaciones son afectadas por las descargas atmosféricas en forma indirecta, a través de las ondas de sobrevoltajes que ingresan a la misma por descargas atmosféricas que impactan en las líneas de transmisión conectadas a sus barras [2].

##### *Descargas atmosféricas directas en líneas de transmisión.*

Hay distintos tipos de descargas en líneas de transmisión los cuales son expuestos a continuación:

##### *Descargas atmosféricas directas en conductores de fase*

Este tipo de descarga se origina cuando el rayo impacta directamente sobre el conductor de fase, como se presenta en la Figura 1.2, debido a una falla de apantallamiento; es muy común que el conductor impactado sea de una fase exterior o de una fase más elevada [3].



**Figura 1.2.** Descargas directas en conductores [2].

La corriente de la descarga se divide en dos ondas iguales que dan origen a dos voltajes que se propagan en ambos sentidos hasta encontrar una discontinuidad siendo el caso de estudio del presente trabajo un cable aislado [3]. El voltaje máximo que viaja por el conductor es:

$$U_{f1} = \frac{Z_c \cdot I_{max}}{2}$$

**Ecuación 1.1.** Voltaje máximo en el conductor de fase debido a una descarga atmosférica [2].

Donde  $I_{max}$  es la magnitud de la corriente de la descarga atmosférica y  $Z_c$  a la impedancia característica del conductor.

Para el caso de las fases restantes, también existen sobrevoltajes por un acoplamiento  $K$  entre dos fases, por lo cual, el voltaje máximo inducido en las fases restantes es:

$$U_{f2} = K \cdot U_{f1}$$

**Ecuación 1.2.** Voltaje máximo en los conductores de fase restantes [2].

#### *Descargas atmosféricas directas en cables de guarda o torres*

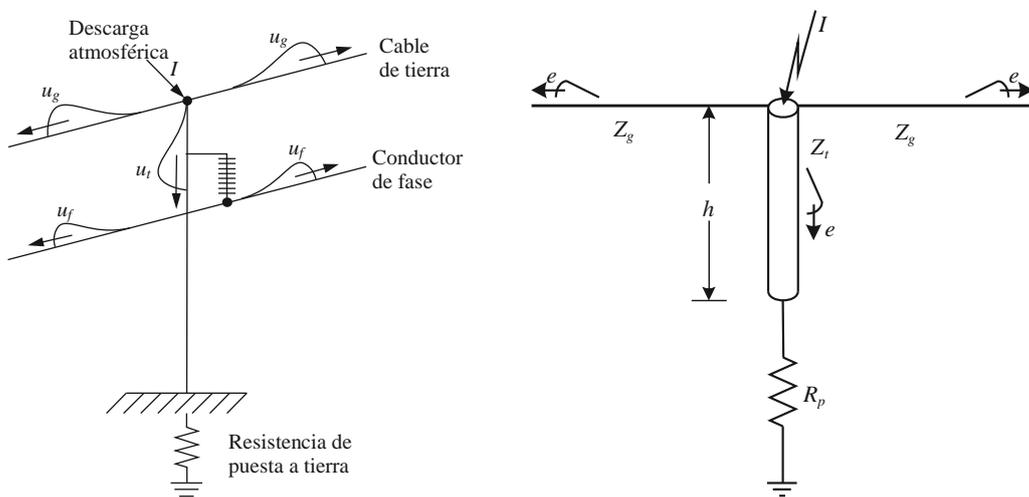
Como se indica en la Figura 1.3, cuando el rayo impacta directamente en la estructura metálica de la torre de transmisión, propaga ondas de corriente que da origen a un incremento en el potencial de la estructura, el cual también depende de la impedancia característica de la torre, resistencia de puesta a tierra, cables de guarda y de la manera

en que se propague por la torre y sus adyacentes [3]. El voltaje ( $e$ ) se encuentra definido a continuación:

$$e = \frac{Z_t \cdot \frac{Z_g}{2}}{Z_t + \frac{Z_g}{2}} \cdot I = \frac{Z_g \cdot Z_t}{2 \cdot Z_t + Z_g} \cdot I$$

**Ecuación 1.3.** Voltaje máximo en la torre de transmisión debido a una descarga atmosférica [2].

Siendo la corriente de la descarga atmosférica  $I$ , la impedancia característica del cable de guarda  $Z_g$ , la impedancia característica de la torre  $Z_t$ , la impedancia característica de la resistencia de pie de torre  $R_p$  y la altura de la torre  $h$ .



**Figura 1.3.** Descargas directas en la torre de transmisión [2].

Cuando el rayo impacta en el cable de guarda como se muestra en la Figura 1.4, trae como consecuencia dos ondas de corriente que se propagan en sentidos contrarios hacia las torres más cercanas. Si el impacto se origina en medio del vano, el voltaje ocasionado en el cable de guarda y en el conductor de fase es igual a:

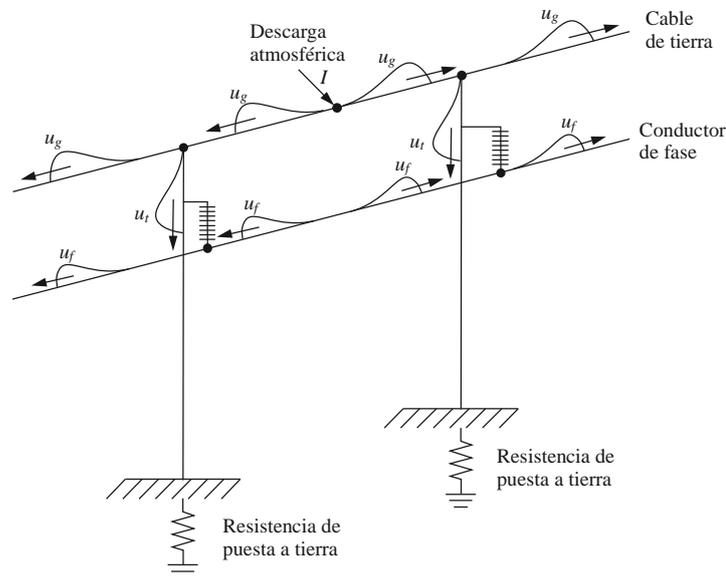
$$U_{guarda} = \frac{Z_g \cdot I_{max}}{2}$$

**Ecuación 1.4.** Voltaje máximo del cable de guarda debido a una descarga atmosférica [2].

$$U_{fase} = K \cdot U_{guarda}$$

**Ecuación 1.5.** Voltaje máximo de conductor de fase debido a una descarga en el cable de guarda [2].

Donde  $I_{max}$  es la corriente de la descarga atmosférica,  $Z_g$  es la impedancia característica del cable de guarda y  $K$  es el coeficiente de acoplamiento entre el cable de guarda y el conductor.



**Figura 1.4.** Descargas directas en el cable de guarda [2].

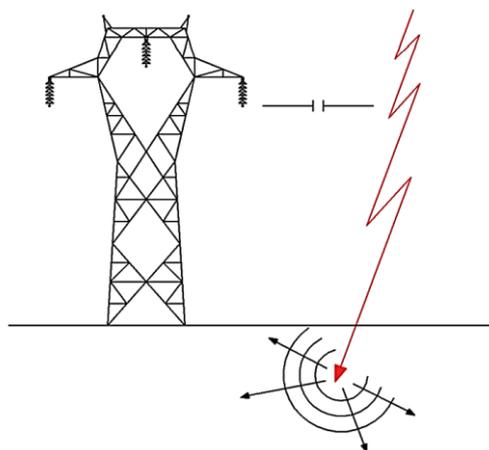
Cabe mencionar que si la descarga llega a la base de la torre (suelo) y se encuentra con una resistencia de puesta a tierra de la torre de transmisión da origen a una onda de voltaje reflejada, la cual provoca un incremento en el diferencial de potencial, entre la estructura (brazo de la torre) y la fase del conductor capaz de sobrepasar el aislamiento crítico a impulso tipo rayo (CFO Critical Flash Over) de la cadena de aisladores y conllevar a su disrupción [3].

La descarga inversa únicamente se produce en la cadena de aisladores, puesto que presenta la distancia más corta entre la torre de transmisión y conductor de fase [3].

#### *Descargas atmosféricas indirectas*

Se producen cuando existen descargas eléctricas a tierra cercanas a las líneas de transmisión, como se indica en la Figura 1.5. Debido al nivel de aislamiento y a la longitud de las líneas de transmisión, los sobrevoltajes provocados por una descarga atmosférica indirecta no originan ningún contorneo en la cadena de aisladores [3].

Las descargas indirectas se dan por lo general en sistemas de subtransmisión y distribución, por lo cual, resulta importante tomar en cuenta siempre este efecto [3].



**Figura 1.5.** Descargas indirectas [1].

*Descargas atmosféricas en cables aislados de sistemas de transmisión.*

En este caso, no existe la posibilidad de que una descarga atmosférica caiga directamente, puesto que al estar enterrados bajo tierra se encuentra bien apantallado; sin embargo, presenta un sobrevoltaje inducido bajo debido a las descargas que puedan originarse en las líneas aéreas.

### 1.4.3. Análisis de Ondas Viajeras

Las descargas eléctricas o rayos como ya se había mencionado anteriormente son siempre un peligro para los equipos de un sistema eléctrico de potencia, dado que aparecen ondas de corriente y voltaje de gran magnitud o también conocidas como ondas viajeras [1].

#### 1.4.3.1 Ondas Viajeras

Estas ondas, viajan por las líneas de transmisión aéreas a una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz hasta alcanzar un punto de discontinuidad, es decir, un cambio en la impedancia del circuito, en donde surgen ondas incidentes (voltaje y corriente) que van hacia adelante de la línea y ondas reflejadas (voltaje y corriente) que regresan por la misma línea y sobreponen las ondas principales, pero debido a las pérdidas de la línea son atenuadas y van desapareciendo conforme transcurren algunas reflexiones [1]. Por otra parte, para la ecuación de la onda viajera, mediante la Figura 1.6, se parte de la caída de voltaje a lo largo de la línea:

$$\Delta v = i \cdot (R \cdot \Delta x) + (L \cdot \Delta x) \cdot \frac{\partial i}{\partial t}$$

$$\frac{\partial v}{\partial x} \cdot \Delta x = - \left( i \cdot R + L \cdot \frac{\partial i}{\partial t} \right) \cdot \Delta x$$

**Ecuación 1.6.** Caída de voltaje a lo largo de una línea [1].

En donde, el signo es negativo porque  $\frac{\partial v}{\partial x} \Delta x$  debe ser menor que  $v$  para valores positivos de  $i$  y  $\frac{\partial i}{\partial t}$ .

Similarmente, se tiene para la corriente,

$$\frac{\partial i}{\partial x} \cdot \Delta x = - \left( G \cdot v + C \cdot \frac{\partial v}{\partial t} \right) \cdot \Delta x$$

**Ecuación 1.7.** Variación de corriente a lo largo de una línea [1].

Al despejar la Ecuación 1.6 y 1.7, y considerando una línea de transmisión sin pérdidas, se tiene que:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = \frac{1}{L \cdot C} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial x^2}$$

**Ecuación 1.8.** Ondas viajeras para una línea de transmisión sin pérdidas [4].

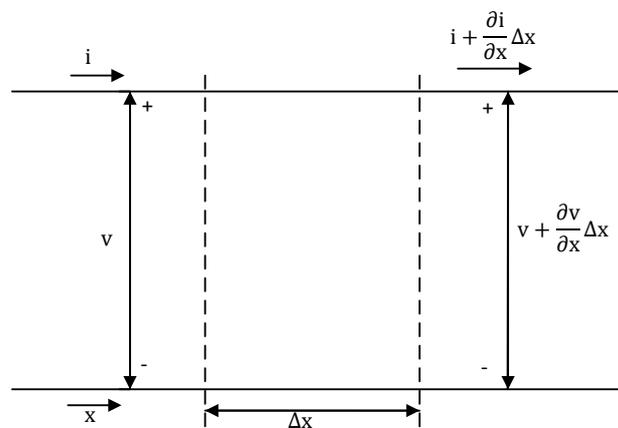
La solución general de la Ecuación 1.8 para la ocurrencia simultanea de uno y otro lado de una línea de transmisión es igual a:

$$V = Z_0 \cdot f_1(x - vt) + Z_0 \cdot f_2(x + vt)$$

$$I = f_1(x - vt) + f_2(x + vt)$$

**Ecuación 1.9.** Solución de ondas viajeras [4].

Donde  $V$  es el voltaje de ondas viajeras,  $I$  es la corriente de ondas viajeras,  $x$  la distancia,  $v$  la velocidad de propagación relacionada con  $\frac{1}{\sqrt{L \cdot C}}$  y  $Z_0$  la impedancia característica de la línea.



**Figura 1.6.** Diagrama esquemático de un tramo de línea de transmisión [4].

### Reflexión y refracción de ondas viajeras

Las ondas reflejadas, incidentes y transmitidas se producen cuando existen discontinuidades. De acuerdo con la Figura 1.7 y considerando a  $Z_2 < Z_1$ , se tiene una onda de voltaje que se propaga a lo largo de una línea con una impedancia característica  $Z_1$ , la cual al encontrarse con una línea con impedancia característica  $Z_2$ , las ondas reflejadas y transmitidas están dadas por [1]:

$$\frac{V_i}{i_i} = Z_1; \frac{V_r}{i_r} = -Z_1$$

$$\frac{V_t}{i_t} = Z_2$$

**Ecuación 1.10.** Impedancias características de las líneas [1].

Donde (*i*) es la onda incidente, (*r*) la onda reflejada, (*t*) la onda transmitida

$$V_t = V_i + V_r$$

$$V_t = \frac{2 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i = \alpha \cdot V_i$$

$$V_r = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i = \beta \cdot V_i$$

**Ecuación 1.11.** Voltaje transmitido y reflejado [1].

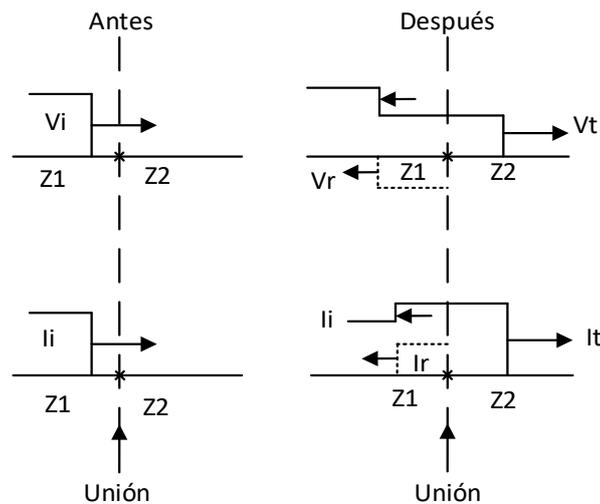
Cabe señalar que  $\alpha$  es el coeficiente de transmisión y  $\beta$  es el coeficiente de reflexión

$$i_t = i_i + i_r$$

$$i_t = \frac{2}{Z_1 + Z_2} \cdot V_i$$

$$i_r = \frac{V_i}{Z_1} \cdot \frac{Z_1 - Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

**Ecuación 1.12.** Corriente transmitida y reflejada [1].



**Figura 1.7.** Ondas de corrientes y voltajes reflejadas, incidentes y transmitidas en líneas de impedancia  $Z_1$  y  $Z_2$  [1].

### *Impedancia Característica*

La caída de una descarga atmosférica en un conductor provoca cambios repentinos que dan origen a ondas viajeras de voltaje y corriente, las cuales viajan a lo largo del conductor a una velocidad similar a la de la luz y están relacionadas mediante la denominada impedancia característica [5].

La impedancia característica se encuentra representada para circuitos con parámetros distribuidos mediante la inductancia y capacitancia, tal y como se evidencia a continuación:

$$Z = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

**Ecuación 1.13.** Impedancia característica [5].

- *Impedancia característica en líneas aéreas*

Para una línea aérea, con conductor de radio  $r$ , espaciamiento entre conductores  $d$  y considerando una concatenación de flujo interna despreciable, la inductancia y la capacitancia son:

$$L = 2 \times 10^{-7} * \ln\left(\frac{d}{r}\right) [H/m]$$

**Ecuación 1.14.** Inductancia en líneas aéreas [6].

$$C = \frac{2\pi * \epsilon_0}{\ln\left(\frac{d}{r}\right)} [F/m]$$

**Ecuación 1.15.** Capacitancia en líneas aéreas [6].

Donde  $\epsilon_0$  es la permitividad del espacio libre igual a  $8.85 \times 10^{-12} \left[ \frac{F}{m} \right]$ .

Por tanto,

$$Z = 60 \ln\left(\frac{d}{r}\right) [\Omega]$$

**Ecuación 1.16.** Impedancia característica en líneas aéreas [6].

Es conveniente indicar que, los valores de impedancia característica de las líneas de transmisión aéreas se encuentran alrededor de los 400  $[\Omega]$  [5].

- *Impedancia característica en cables aislados*

La velocidad de propagación varía inversamente con la raíz cuadrada de la permitividad del medio. De tal modo, la impedancia característica y la velocidad de propagación son:

$$Z = \frac{60}{\sqrt{k}} \ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right) [\Omega]$$

**Ecuación 1.17.** Impedancia característica en cables aislados [5].

$$v = \frac{300}{\sqrt{k}} \left[ \frac{m}{\mu s} \right]$$

**Ecuación 1.18.** Velocidad de propagación en cables aislados [5].

Siendo para cables aislados una permitividad  $k$  variable de 2,4 a 4,0.

A diferencia de las líneas aéreas de transmisión que tienen valores de impedancia característica de alrededor de 400  $[\Omega]$ , los cables aislados presentan valores de impedancia característica entre los 30 y 60  $[\Omega]$  [5].

- *Impedancia característica de la torre*

Al impactar el rayo en la torre, al presentar esta una impedancia característica  $Z_T$ , provoca un voltaje a través de la cadena de aisladores o también llamado voltaje de la torre a la fase. Esa impedancia característica  $Z_T$  se calcula con la siguiente ecuación [3]:

$$Z_T = 60 \cdot \ln \sqrt{2} \cdot \frac{2h}{r}$$

**Ecuación 1.19.** Impedancia característica de la torre de transmisión [3].

Donde ( $r$ ) es el radio de la torre de transmisión y ( $h$ ) la altura de la torre.

En el caso de una torre en forma de cilindro, se tiene que:

$$Z_T = 60 \cdot \left( \ln \sqrt{2} \cdot \frac{2h}{r} - 1 \right)$$

**Ecuación 1.20.** Impedancia característica de una torre de transmisión cilíndrica [3].

Mientras que, para algunos casos como la torre tipo H, en donde se tiene dos cables de guarda, la impedancia característica se encuentra establecida como:

$$Z'_T = \frac{Z_M + Z_T}{2}$$

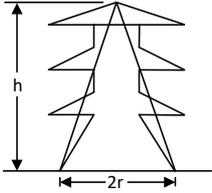
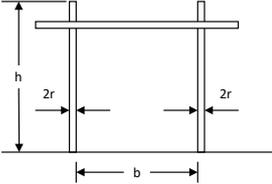
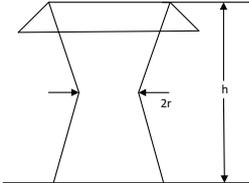
**Ecuación 1.21.** Impedancia característica de una torre tipo H [3].

Definiendo a la impedancia mutua como

$$Z_M = 60 \cdot \left( \ln \sqrt{2} \cdot \frac{2h}{b} - 1 \right)$$

**Ecuación 1.22.** Impedancia mutua [3].

Donde  $b$  es la distancia entre postes. Al existir varias formas de torres de transmisión, a continuación, en la Figura 1.8, se presenta de manera resumida cada una de sus impedancias características:

Caso 1	Caso 2	Caso 3
$Z_T = 30 \ln \left[ \frac{2(h^2 + r^2)}{r^2} \right]$	$Z'_T = \frac{Z_T + Z_M}{2}$	$Z_T = 60 \left[ \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 1 \right]$
		

**Figura 1.8.** Tipos de torres con sus impedancias características [3].

#### 1.4.4. Limitación de descargas atmosféricas

La protección contra sobrevoltajes por descargas atmosféricas puede darse mediante dos formas complementarias entre sí: la implementación del apantallamiento y el uso de descargadores de sobrevoltajes (pararrayos).

##### 1.4.4.1. Apantallamiento

El apantallamiento resulta primordial en líneas áreas de transmisión y distribución del sistema eléctrico, puesto que son propensas a la caída de rayos (descargas atmosféricas) y requieren de una protección que ante este impacto deriven a tierra y garanticen una reducción del número de interrupciones. En líneas de transmisión y subestaciones, el apantallamiento se basa en la implementación de uno o dos cables de guarda, de puntas Franklin o un método mixto [2].

##### *Apantallamiento de líneas*

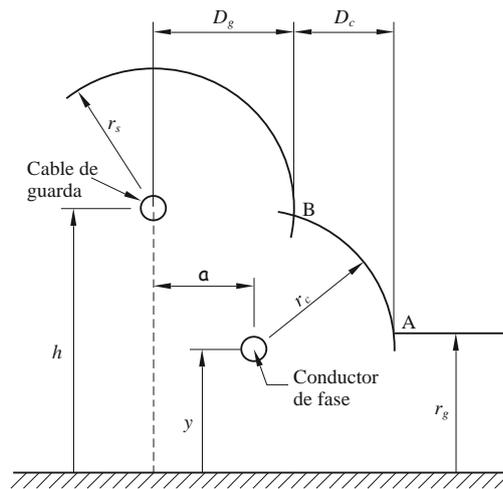
El método general para el diseño o análisis del comportamiento de un apantallamiento se basa en el modelo electrogeométrico. Cuando un rayo se aproxima a una línea o tierra a una distancia de arqueo  $r_c$ , la descarga puede caer en el conductor de fase, en el cable de guarda o en la tierra [2]. Esta distancia de arqueo  $r_c$  está en función de la corriente y su representación es la siguiente:

$$r_c = \alpha \cdot I^\gamma$$

**Ecuación 1.23.** Distancia de arqueo [2].

Donde  $\alpha$ ,  $\gamma$  son factores de los autores como Young, CIGRE y Love,  $I$  es la corriente del rayo en  $kA$  y  $r_c$  es la distancia de arqueo en metros.

El modelo electrogeométrico permite encontrar la magnitud de la corriente máxima de una descarga atmosférica que puede provocar una falla de apantallamiento, mediante el cálculo de la distancia de arqueo máxima, la cual está definida en base a un estudio en la geometría de la torre como muestra la Figura 1.9 [2].



**Figura 1.9.** Distancias críticas del cable de guarda, conductor de fase y tierra [2].

### *Apantallamiento de subestaciones*

Tiene como finalidad proteger contra la caída de rayos mediante la implementación de cables de guarda o pórticos y mástiles puestos a tierra, y obtener una probabilidad de falla más baja en comparación con líneas aéreas, puesto que un daño en una subestación representa mayor cantidad de gastos económicos [2]. A continuación, se detalla las diferentes formas de apantallar una subestación:

### *Apantallamiento mediante cables de guarda*

Establece una zona protegida para todos los equipos a una corriente máxima de rayo mediante el siguiente procedimiento:

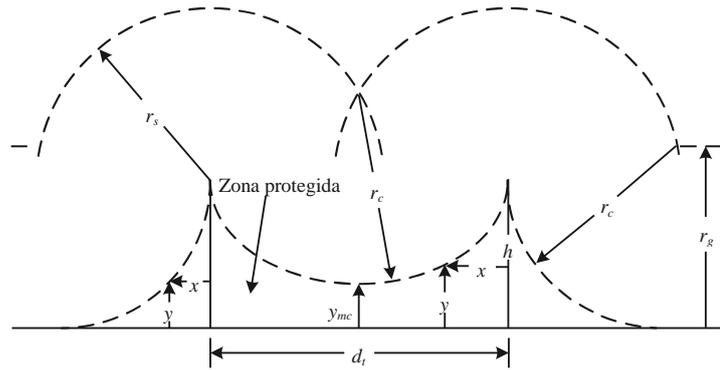
1. A una altura  $r_g$ , trazar una línea paralela al suelo.
2. Con centro en los cables de guarda, trazar dos arcos cuyo radio es  $r_s$ .
3. Tomando como referencia los puntos de intersección, trazar dos arcos cuyo radio es  $r_c$ .

De acuerdo con la norma IEEE Std 998-2012 [2], es recomendable implementar la siguiente ecuación para determinar las distancias de atracción:

$$r_g = r_s = r_c = 8 \cdot I^{0.65}$$

### **Ecuación 1.24.** Distancias de atracción [2].

Donde  $I$  es igual al valor máximo de corriente del rayo en  $kA$  y  $r_g, r_s, r_c$  son las distancias o radios en metros.



**Figura 1.10.** Apantallamiento de una subestación mediante cables de guarda [2].

La zona de protección es posible anular o reducir si se disminuye la separación entre cables de guarda; sin embargo, existen ciertos casos como el que muestra la Figura 1.10, en donde inclusive manteniendo una separación entre cables debido a un incremento de la corriente máxima del rayo es necesario cubrir toda la zona ubicada entre los cables de guarda.

Un equipo está totalmente protegido, solo si está situado entre los cables de guarda a una altura máxima ( $y$ ) con respecto del suelo y con una distancia respecto a cualquier cable de guarda menor al valor calculado en base a la siguiente ecuación:

$$x_i = \frac{d_t}{2} - \sqrt{r_c^2 - \left[ h - y + \sqrt{r_s^2 - \left( \frac{d_t}{2} \right)^2} \right]^2}$$

**Ecuación 1.25.** Distancia referencial respecto a cualquier cable de guarda [2].

#### *Apantallamiento mediante mástiles*

Este al igual que en los casos anteriores utiliza el modelo electrogeométrico con un mástil de altura  $h$  y una zona de protección circular alrededor del mástil de radio máximo igual a:

$$R = \sqrt{r_c^2 - [r_g - y]^2}$$

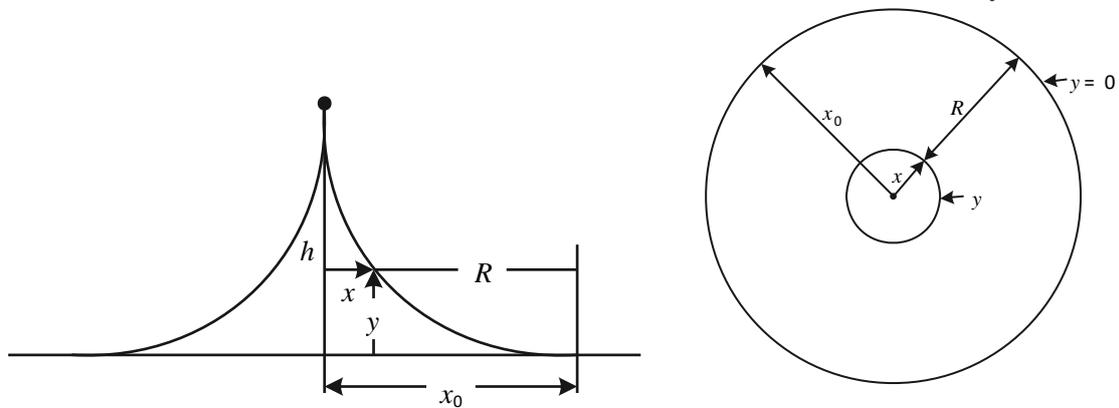
**Ecuación 1.26.** Radio de la zona de protección circular [2].

Un equipo está protegido solo si está a una altura máxima ( $y$ ) sobre el suelo y con una distancia, respecto al mástil, menor al valor calculado en base a la siguiente ecuación:

$$x = R - \sqrt{r_s^2 - [r_g - h]^2}$$

**Ecuación 1.27.** Distancia referencial respecto al mástil [2].

Donde las distancias  $r_g, r_s, r_c$  pueden calcularse de la misma manera que el diseño de apantallamiento mediante cables guarda.



**Figura 1.11.** Apantallamiento de una subestación mediante un mástil [2].

De acuerdo con la Figura 1.11, el diseño del apantallamiento mediante mástiles resulta muy similar al caso anterior, es decir, fija la corriente máxima y establece la altura máxima de cada mástil [2].

#### 1.4.4.2. Pararrayos

Los pararrayos son dispositivos que ante la presencia de sobrevoltajes derivan a tierra la sobrecorriente asociada y limitan a valores que puedan soportar la aparatura de los sistemas donde están instalados [2].

En la actualidad, el pararrayos más utilizado en sistemas eléctricos es el de óxidos metálicos, dado que cumple con dos funciones: mantener una resistencia alta en voltajes nominales y reducir su resistencia durante sobrevoltajes transitorios elevados a tal punto de que permita conducir la corriente libremente sin provocar falla y dando como resultado un funcionamiento adecuado del sistema sin la presencia de contorneo o pérdida del suministro. El nivel de protección del pararrayos se encuentra definido por el valor del voltaje entre sus terminales, la longitud de los cables de conexión del pararrayos y la distancia a la que se encuentre el pararrayos del equipo a proteger, puesto que, mientras mayor sea la distancia entre el equipo a proteger y el pararrayos, menor va a ser su protección [2].

#### 1.4.5. Cables aislados

Son utilizados en redes subterráneas; sin embargo, existe la posibilidad de que también puedan implementarse sobre el terreno.

#### **1.4.5.1. Líneas eléctricas de transmisión subterráneas**

Los cables subterráneos presentan distintos requerimientos técnicos y su impacto ambiental es menor que las líneas de transmisión aéreas. Generalmente, la transmisión subterránea, aunque su proceso de obtención de permisos es inmediato, a menudo, más barato y con menor dificultad, posee un mayor costo de inversión en comparación con las líneas aéreas debido a que su costo de instalación es entre 3 a 10 veces mayor que una línea de transmisión aérea [7].

Entre sus principales desafíos técnicos se encuentran suministrar suficiente aislamiento para que los cables no hagan contacto con tierra y para disipar el calor producido al funcionar los cables eléctricos. A diferencia de las líneas aéreas, los conductores no están separados entre sí y no contienen aire, el cual pueda circular entre y alrededor de los conductores para lograr enfriar los cables y en tal manera disipar el calor eficientemente [7].

Una característica fundamental de líneas de transmisión conformadas por cables aislados es que el aislamiento antes referido no es autorecuperante, por tanto, deberá darse especial atención a su dimensionamiento.

#### **1.4.5.2. Tipos de cables aislados**

Existen distintos tipos de cables los cuales son detallados a continuación:

##### *Cable sólido, capa extruida de polietileno (PE)*

Es un polímero semicristalino con algunas propiedades eléctricas como la baja constante dieléctrica, baja pérdida dieléctrica, alta resistencia de ruptura junto con otras propiedades beneficiosas como la dureza mecánica y flexibilidad, buena resistencia a químicos, fácil procesamiento y bajo costo [8].

Este tipo de cable presenta como desventaja una baja temperatura de fusión, lo cual implica una restricción para la temperatura máxima de operación a 75°C; sin embargo, existe una solución a través de la reticulación para convertirlo en un tipo XLPE [8].

##### *Cable sólido, polietileno reticulado (XLPE)*

A menudo son denominados cables dieléctricos sólidos que en su mayoría son aplicados en redes de alto (HV) y extra alto voltaje (EHV). Entre las principales ventajas del tipo XLPE se tiene una capacitancia disminuida (lo cual implica una corriente de carga en estado estacionario más baja), mayor capacidad de carga, menos pérdidas, ausencia de líquidos aislante y costos de mantenimiento bajos [9].

### *Cable caucho de etileno-propileno (EPR)*

Son utilizados como material aislante para cables eléctricos de medio y alto voltaje debido a que presentan una alta rigidez dieléctrica. El EPR presenta varias propiedades como una excelente resistencia al ozono, oxidación, calor, intemperie, agua y solventes polares [8].

Entre sus principales ventajas se encuentran su alta resistencia a la corona, alta eficiencia a grandes temperaturas y mayor flexibilidad [8].

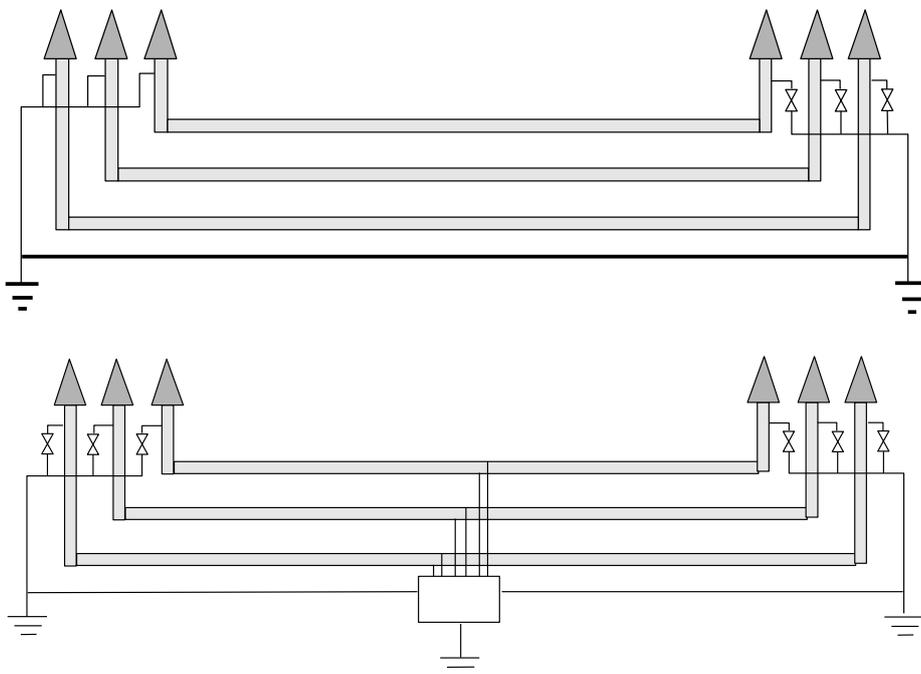
#### **1.4.5.3. Métodos de puesta a tierra de pantallas en cables aislados**

En los cables aislados es importante que sus pantallas se encuentren conectadas a tierra en al menos un punto a lo largo del cable y cuenten con un método de conexión apropiado para garantizar una protección adecuada contra descargas atmosféricas [9].

A continuación, se realiza una breve descripción de los métodos más comunes:

##### *Pantallas conectadas a tierra en un solo punto (Single Point Bonding)*

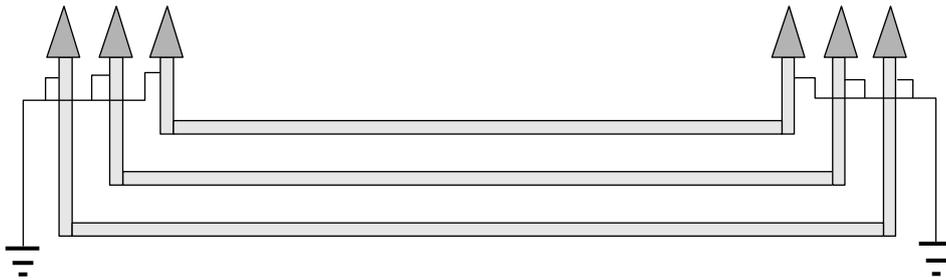
Es la forma más simple de conexión de pantallas, en donde las pantallas de los tres cables aislados se conectan entre sí y van a tierra en un punto (suele estar en uno de los dos terminales o en el medio de los cables) a lo largo de la longitud del cable, además, cuenta con un conductor paralelo, conectado a tierra en ambos extremos de la longitud del cable, e instalado cerca a los conductores del cable, para transportar la corriente de falla durante fallas a tierra y para limitar el aumento de voltaje de la pantalla a un nivel aceptable [9].



**Figura 1.12.** *Single Point Bonding* [10].

### Conexión rígida a tierra (Solid Bonding)

En este caso, la pantalla está conectada en ambos extremos del cable, por lo cual no es necesario implementar un cable de puesta a tierra de pantallas como en el anterior caso [10]. La desventaja de este método de conexión es que el calor causado por las corrientes circulantes en las pantallas del cable reduce la capacidad de carga del cable [9].

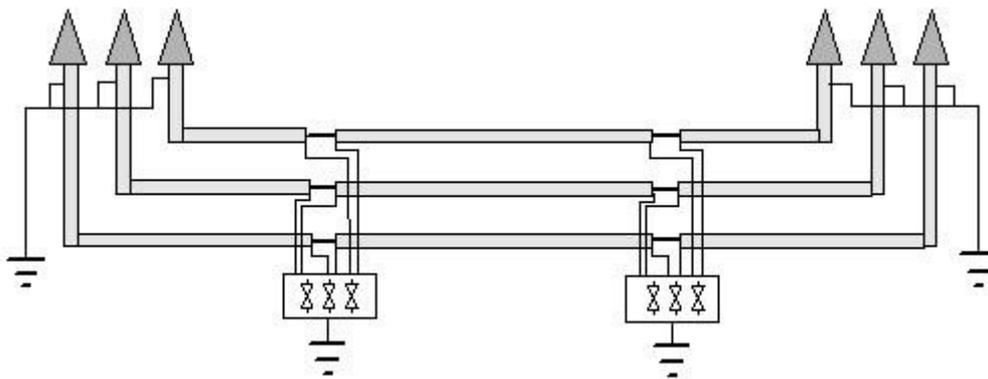


**Figura 1.13.** *Solid Bonding* [10].

### Transposición de pantallas (Cross bonded)

Consiste en dividir el cable en tres secciones menores de igual longitud y transponer las pantallas en cada sección menor, luego, unir las pantallas del principio y final de cada sección principal (equivalente a tres secciones menores) y conectarlas a tierra [10].

Este método de conexión minimiza la corriente circulante y las pérdidas en las pantallas de los cables, y permiten una mayor separación entre cables, lo cual implica menor sobrecalentamiento de cada cable [9].



**Figura 1.14.** *Cross bonded* [10].

## 2 METODOLOGÍA

Para realizar un análisis acerca de los sobrevoltajes por impulso atmosférico en sistemas de transmisión con discontinuidades se ha propuesto una metodología de análisis usando el software ATP. La estructura de este capítulo consta de todos los requerimientos necesarios para poder cumplir los objetivos del trabajo. Primero, se describe en que consiste el programa ATP y sus aplicaciones, luego, se detalla cada componente a utilizarse en el sistema de prueba.

La forma en cómo implementar sistemas de transmisión con discontinuidades y descargas atmosféricas, constituye la parte principal del presente capítulo, para lo cual se describirá el proceso de modelación en el software ATP.

### 2.1 Software ATP

El ATP es una de las herramientas computacionales más utilizadas a nivel mundial para simulaciones de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica en sistemas eléctricos de potencia. Este programa permite encontrar las variables de interés dentro de los sistemas eléctricos implementados al presentarse alguna perturbación mediante la regla trapezoidal de integración, la cual se usa para resolver ecuaciones diferenciales de los diferentes componentes del sistema que están en el dominio del tiempo. En cuanto a su simulación, posee algunos programas con la finalidad de obtener una mayor interacción y mejor visualización como lo son ATPDraw y PLOTXY o TOP [11].

#### *Aplicaciones del ATP*

ATP es utilizado principalmente para el análisis de fenómenos transitorios, por lo cual, a continuación, se presentan algunas de las aplicaciones más utilizadas por los usuarios:

- Análisis de sobrevoltajes de tipo maniobra
- Análisis de sobrevoltajes de impulsos atmosféricos
- Análisis de sobrevoltajes muy rápidos en GIS y puestas a tierra
- Análisis estadísticos y sistemáticos de sobrevoltajes
- Modelación de maquinas
- Ferroresonancia
- Aplicaciones de electrónica de potencia
- Análisis de armónicos y resonancias de la red

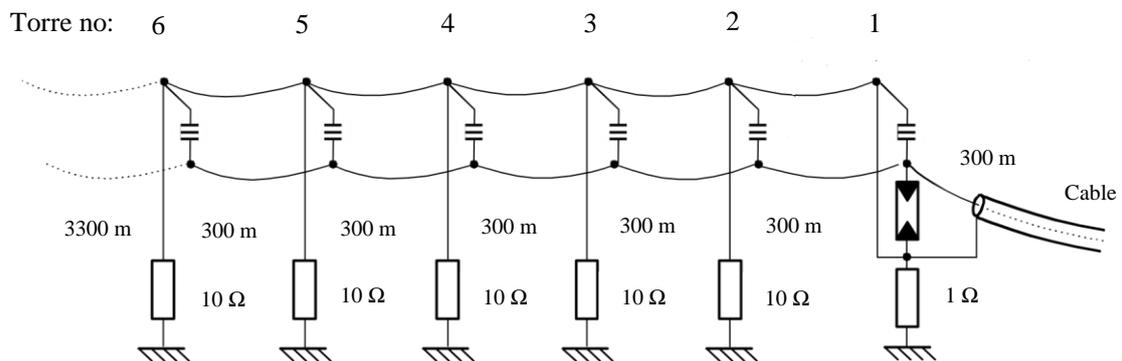
- Pruebas en dispositivos de protección
- Coordinación de aislamientos
- Dispositivos FACTS: modelado de STATCOM, SVC, UPFC, TCSC [11].

### ATPDraw

Es una interfaz gráfica, en donde el usuario puede ir modelando su sistema eléctrico mediante una paleta de herramientas, es decir, el usuario selecciona un ícono de la paleta que representa algún componente del sistema, y lo arrastra hasta la hoja de trabajo. La barra de menú cuenta con nueve opciones: Help, Web, Windows, Tools, Library, ATP, View, Edit y File [11].

## 2.2. Descripción de los componentes utilizados

Cuando ocurre una descarga atmosférica en una torre de transmisión, ocasiona un disturbio en la torre impactada y en las torres adyacentes. La onda de corriente originada por este fenómeno viaja hacia los dos lados de la línea provocando sobrevoltajes en los vanos y torres más cercanas. La descarga no afecta a toda la línea de transmisión, puesto que a medida que viajan sus ondas, su efecto es cada vez menor, por lo que establecer un número de seis vanos resulta adecuado. Adicionalmente, se incluye un segmento de línea de transmisión de 3.3 km para asegurar que las reflexiones de la onda viajera durante su simulación no incidan en el resultado. El sistema de prueba implementado en el presente trabajo es el siguiente:



**Figura 2.1.** Sistema de prueba.

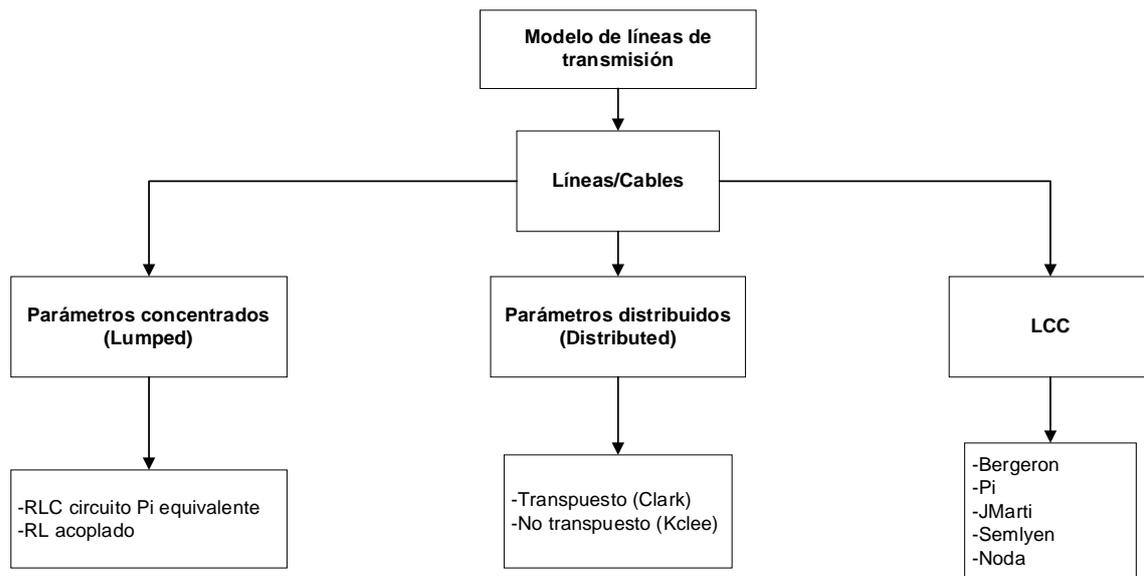
Como se puede visualizar en la Figura 2.1 el sistema de prueba consta de líneas de transmisión aéreas y subterráneas de simple circuito, torres de transmisión, resistencias

de pie de torre, cadena de aisladores y pararrayos. Además, se tendrá la representación de un impulso atmosférico como una fuente de corriente.

A continuación, se describe cada componente mencionado anteriormente:

### 2.2.1. Líneas de transmisión

Para entender el comportamiento de las descargas atmosféricas es necesario conocer los diferentes modelos de líneas de transmisión disponibles en ATP. Por tanto, mediante la Figura 2.2, se muestra cada modelo:



**Figura 2.2.** Modelos de línea de transmisión [12].

En el presente trabajo, se utilizará el modelo matemático J. Martí, puesto que es el más adecuado para fenómenos de alta frecuencia como lo son las descargas atmosféricas y sus parámetros son variables y dependen de la frecuencia. La impedancia característica y la constante de propagación se definen como:

$$Z_c(\omega) = \sqrt{\frac{R'(\omega) + j \cdot \omega \cdot L'(\omega)}{G'(\omega) + j \cdot \omega \cdot C'(\omega)}}$$

**Ecuación 2.1.** Impedancia característica de la línea de transmisión [13].

$$\gamma(\omega) = \sqrt{(R'(\omega) + j \cdot \omega \cdot L'(\omega)) \cdot (G'(\omega) + j \cdot \omega \cdot C'(\omega))}$$

**Ecuación 2.2.** Constante de propagación [13].

### 2.2.2. Corriente del rayo (Fuente de corriente de Heidler)

De acuerdo con la norma IEC 62305-1, el modelo de onda que más se ajusta a la representación de una descarga atmosférica sobre una línea de transmisión es el de Heidler. Este modelo es más exacto y se aproxima bastante a mediciones de campo debido a que no presenta una discontinuidad en su tiempo derivativo  $t=0$  [14]. La fuente de corriente de Heidler se define como:

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n}{\left(\frac{t}{\tau_1}\right)^n + 1} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}$$

**Ecuación 2.3.** Fuente de corriente de Heidler [14].

Donde  $\eta$  es el factor de corrección de amplitud y se encuentra representado de la siguiente forma:

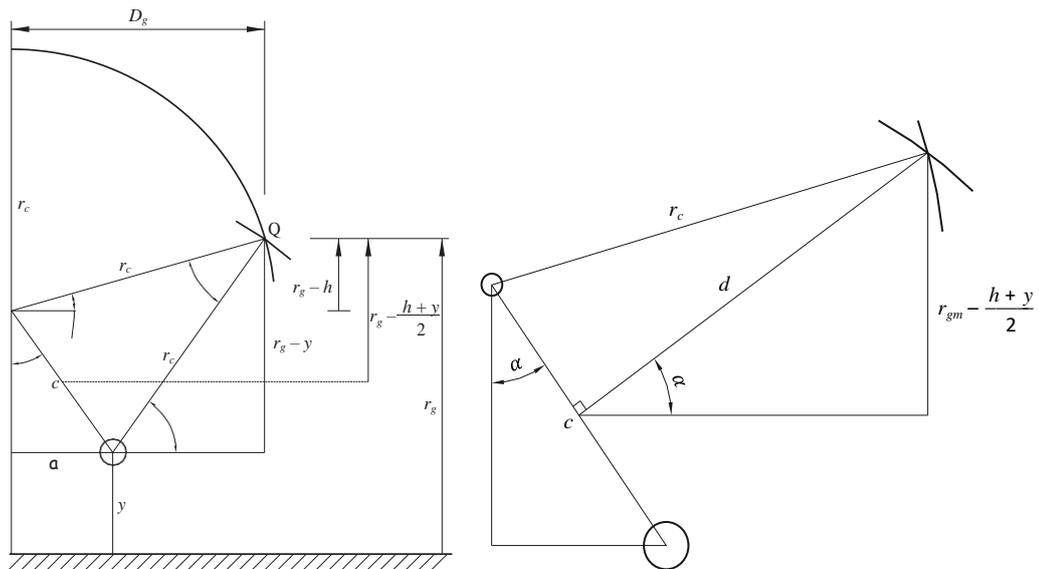
$$\eta = e^{\left[-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right) \cdot \left(\frac{n \cdot \tau_1}{\tau_2}\right)^{\left(\frac{1}{n}\right)}\right]}$$

**Ecuación 2.4.** Factor de corrección de amplitud [14].

Siendo  $I_0$  el valor de cresta de la corriente de la descarga atmosférica,  $\tau_1$  la constante de tiempo de subida de la descarga atmosférica,  $\tau_2$  la constante proporcional al tiempo de duración de la descarga (intervalo entre  $t=0$  y el punto de la cola donde la amplitud de la función se ha caído al 50% del valor pico) y  $n$  el factor que influye en el crecimiento de la función [14].

#### 2.2.2.1. Cálculo de la corriente del rayo para falla de apantallamiento

En el presente trabajo, se considerará para los casos de estudio una falla de apantallamiento, por lo cual, como se mencionó anteriormente en el marco teórico, resultado imprescindible primero encontrar una distancia de arqueo en base a la geometría del sistema de prueba como muestra la Figura 2.3 y luego establecer la corriente máxima del rayo mediante la Ecuación 1.24.



**Figura 2.3.** Geometría para encontrar la corriente máxima del rayo y el ángulo de apantallamiento perfecto [2].

Para realizar todos los cálculos, es necesario conocer el ángulo del sistema:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{a}{h - y}$$

**Ecuación 2.5.** Ángulo de apantallamiento [2].

Y definir la distancia crítica por la geometría del sistema como se muestra a continuación:

$$r_{gm} = \frac{\frac{h + y}{2}}{1 - \gamma \cdot \sin \alpha}$$

**Ecuación 2.6.** Distancia crítica definida para el sistema de prueba [2].

Donde  $\gamma$  es la relación  $r_c/r_g$ .

Para realizar un estudio de apantallamiento adecuado, es importante conocer su probabilidad de ocurrencia, por lo cual, se establece que la probabilidad de que una corriente de pico sea menor que un valor de corriente  $I_o$  está aproximada en base a una función de distribución fraccional definida en la siguiente ecuación:

$$F(I < I_o) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{I_{50}}\right)^{n_c}}$$

**Ecuación 2.7.** Probabilidad de que la corriente máxima sea menor a  $I_o$  [2].

Siendo  $I_{50}$  igual a 31 kA y  $n_c$  igual 2.6 valores recomendados por la norma IEEE Std 1410-1997 [2].

### 2.2.3. Torre de transmisión

La representación de una torre de transmisión se la realiza mediante varias secciones y componentes de circuitos, dependiendo del tipo de estructura. El problema de utilizar estos modelos es que la impedancia característica de la torre varía a medida que la onda viaja desde la punta hacia tierra debido a los detalles de la estructura como su enrejado [15]. Existen tres grupos en los que se clasifican los modelos de las torres:

- Modelo de una línea vertical sin pérdidas.
- Modelo de línea vertical multiconductor.
- Modelo multipiso.

En el presente trabajo, se escogerá el modelo multipiso, en razón a su semejanza con la torre de transmisión escogida, es decir, está compuesto de cuatro tramos que representan las secciones de la torre entre crucetas [15].

#### 2.2.3.1. Modelo Multipiso

Cada sección consta de una línea sin pérdidas en serie con un circuito paralelo resistencia-inductancia, incluido para la atenuación de las ondas viajeras [15].

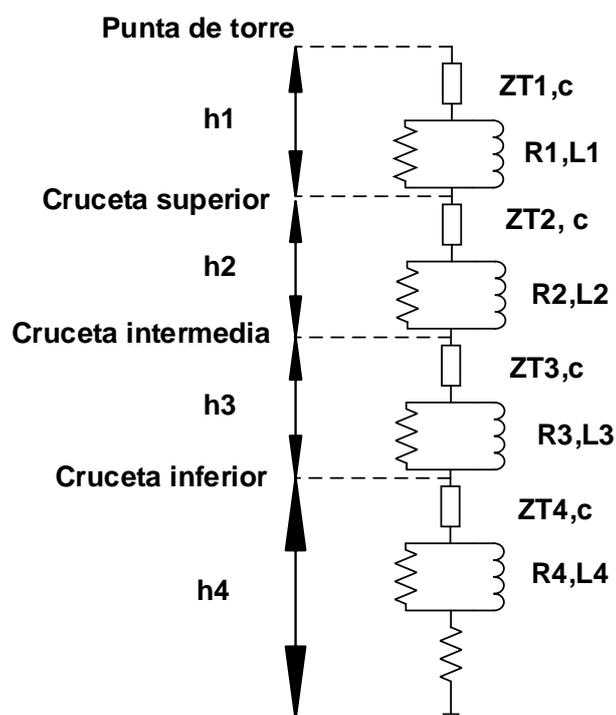


Figura 2.4. Modelo multipiso [13].

Los parámetros de este modelo fueron deducidos en base a resultados experimentales. A continuación, se muestran las siguientes ecuaciones derivadas de los experimentos:

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} \cdot h_i \quad (i = 1,2,3)$$

**Ecuación 2.8.** Resistencias de amortiguamiento de las secciones superiores de la torre [15].

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma}$$

**Ecuación 2.9.** Resistencia de amortiguamiento de la sección inferior de la torre [15].

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1,2,3,4)$$

**Ecuación 2.10.** Inductancias de cada sección de la torre [15].

Donde  $Z_{T1}$  es la impedancia característica de las tres secciones superiores de la torre,  $Z_{T2}$  es la impedancia característica de la sección inferior de la torre,  $h_i$  es la altura de cada sección de torre,  $\gamma$  es el coeficiente de atenuación y  $\alpha$  es el coeficiente de amortiguamiento [15].

En el presente documento, se considera a la velocidad de propagación igual a la velocidad de la luz, el coeficiente de amortiguamiento igual a la unidad y el coeficiente de atenuación igual a 0.75.

Una investigación experimental encontró que un cálculo adecuado para  $Z_{T1}$  y  $Z_{T2}$  es en base a la fórmula de Jordan definida como:

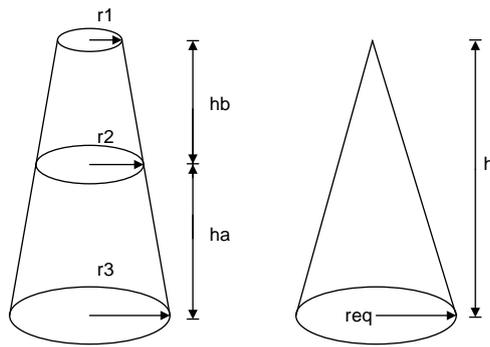
$$Z = 60 \cdot \left( \ln \left( \frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right)$$

**Ecuación 2.11.** Impedancia característica de cada sección [15].

Donde  $h$  es la altura de la torre y  $r_{eq}$  es el radio equivalente obtenido de la geometría de la torre:

$$r_{eq} = \frac{r_1 \cdot h_b + r_2 \cdot h + r_3 \cdot h_a}{2 \cdot h} \quad (h = h_a + h_b)$$

**Ecuación 2.12.** Radio equivalente de la torre de transmisión [15].



**Figura 2.5.** Geometría para el cálculo del radio equivalente [13].

#### 2.2.4. Resistencia de pie de torre

La resistencia de pie de torre es un componente importante en el análisis del presente trabajo, puesto que, su objetivo es conducir el sobrevoltaje ocasionado por la descarga atmosférica con seguridad al terreno, es decir, influye en la magnitud del voltaje producido por la descarga atmosférica, en razón a que la reflexión del pie de torre puede llegar en menor tiempo a la punta de la torre que las reflexiones de las torres adyacentes [6].

Este componente, es dependiente del terreno, la resistividad del suelo, el área de la torre o del conductor de puesta a tierra [13].

#### 2.2.5. Cadena de aisladores

Se encuentran ubicados entre la estructura de la línea de transmisión y los conductores de fase con el propósito de soportar esfuerzos mecánicos y eléctricos ante alguna condición anormal como en este caso una descarga atmosférica. Los aisladores deben ser diseñados para que operen correctamente bajo condiciones climáticas desfavorables, como las variaciones de temperatura, humedad y gases industriales [13].

Según la curva normalizada de CIGRE para flameos en cadena de aisladores de líneas de transmisión, es recomendable calcular el voltaje crítico de flameo mediante la siguiente ecuación:

$$V_{ft} = \left( 400 + \frac{710}{t^{0.75}} \right) \cdot W$$

**Ecuación 2.13.** Voltaje crítico de flameo [16].

Siendo  $t$  el tiempo de flameo en microsegundos y  $W$  la longitud de la cadena de aisladores en metros.

### 2.2.6. Pararrayos

Como se mencionó en el marco teórico, el pararrayos debe cumplir con dos funciones, la de conducir corriente sin ocasionar una falla durante la descarga y la del no conducir para voltajes nominales del sistema. Por lo cual, es necesario implementar una resistencia con característica no lineal:

Para elegir un adecuado pararrayos, es necesario definir algunas características como son:

- **Voltaje máximo del sistema ( $U_s$ ).**
- **Voltaje nominal ( $U_r$ ):** es el valor rms máximo de voltaje a frecuencia industrial permitido en el pararrayos.
- **Voltaje de operación continua ( $U_c$ ):** es el valor rms máximo de voltaje a frecuencia industrial que puede soportar el pararrayos permanentemente [17].
- **Capacidad del pararrayos frente a sobrevoltajes temporales ( $TOV_c$ ):** es el valor rms máximo de sobrevoltaje temporal a frecuencia industrial que puede soportar el pararrayos transcurrido un cierto tiempo (por lo general 10 s) [17].
- **Corriente nominal de descarga ( $I_n$ ):** es el valor pico del impulso de corriente tipo impulso atmosférico que se ocupa para establecer el pararrayos; para la clase de descarga, es preciso mencionar que al incrementar la clase incrementa la capacidad de disipación de energía, pero el costo del equipo es elevado [17].

Si el pararrayos se encuentra conectado entre fase y tierra, es importante que el  $U_c$  sea tan elevado como el voltaje fase-tierra del sistema; es decir:

$$U_c \geq \frac{U_s}{\sqrt{3}}$$

**Ecuación 2.14.** Voltaje de operación continua [17].

De acuerdo con la norma IEC el estándar del voltaje máximo del sistema para una línea de transmisión de 230 kV es 245 kV; mientras que para la norma IEEE es 242 kV.

El  $TOV_c$  a los 10 segundos, se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$TOV_{10} = TOV_c \cdot \left(\frac{t}{10}\right)^m$$

**Ecuación 2.15.** Capacidad del pararrayos frente a sobrevoltajes temporales para 10 segundos [15].

Donde  $t$  es el tiempo de duración del sobrevoltaje,  $m$  es un factor, para el cual se recomienda el valor de 0.02 y  $TOV_C$  está definido de la siguiente forma:

$$TOV_C = K \cdot U_c$$

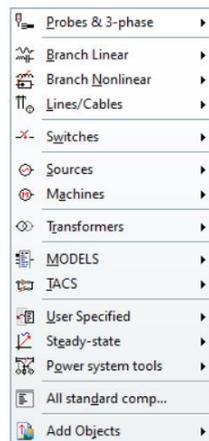
**Ecuación 2.16.** Capacidad del pararrayos frente a sobrevoltajes temporales [15].

Siendo  $K$  el factor de fallas a tierra.

### 2.3. Modelación e implementación en el software ATP

ATP presenta varios modelos de sumo interés para el presente estudio como líneas de transmisión aéreas, pararrayos, cadena de aisladores, torres de transmisión, resistencia de pie de torre, cables aislados, y cuenta con la posibilidad de que las perturbaciones simétricas o asimétricas, como sobrevoltajes por rayos puedan ser simuladas.

Para ingresar cada componente del sistema de prueba en el software, es necesario seleccionar en la hoja de trabajo para desplegar la ventana principal:

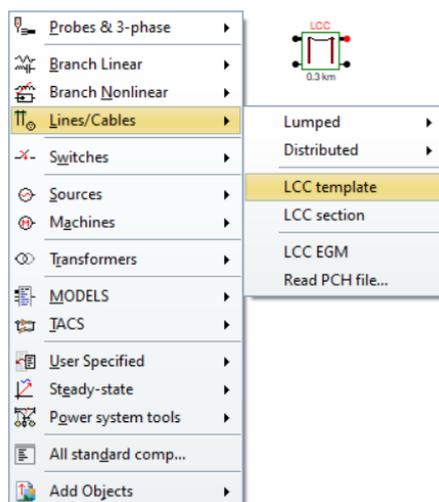


**Figura 2.6.** Menú de componentes.

A continuación, se describe detalladamente el proceso de como modelar e ingresar cada componente:

#### 2.3.1. Líneas de transmisión

ATP permite representar las líneas de transmisión mediante la componente Lines/Cables, LCC template de la siguiente forma:

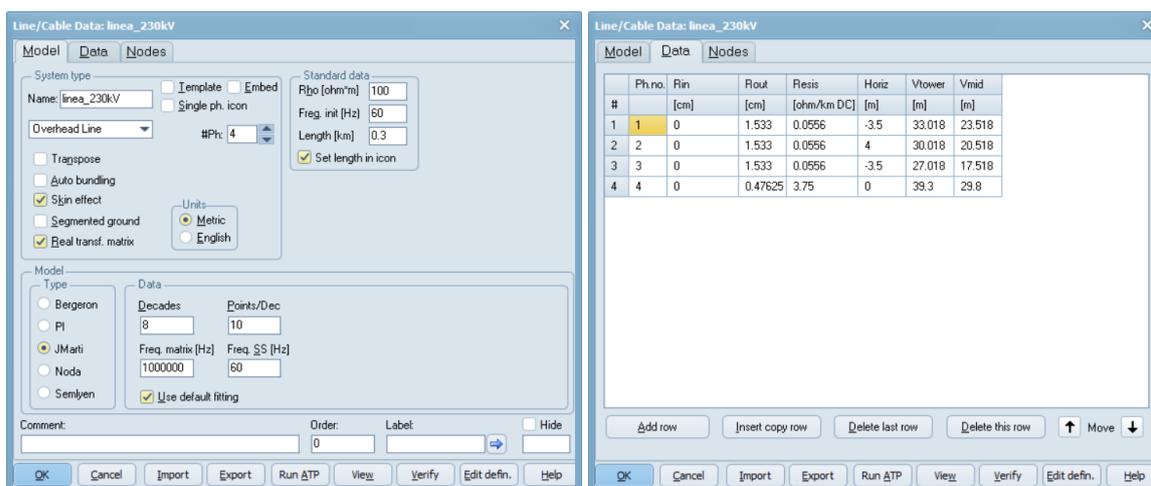


**Figura 2.7.** Menú de líneas y cables.

Como se muestra en la Figura 2.8, en la modelación de líneas de transmisión es importante seleccionar los datos generales del sistema como el tipo de línea de transmisión, el sistema de unidades y el número de fases.

Los datos normalizados como la resistividad del terreno ( $Rho$ ) en  $[\Omega \cdot m]$ , la frecuencia industrial (Freq int) en [Hz] y la longitud de la línea de transmisión en [km].

Y, el modelo JMarti con su configuración por defecto; es decir, el número de décadas en escala logarítmica (Decades), el número de puntos de frecuencia por cada década (Points/Dec), la frecuencia fundamental del caso de estudio (Freq. SS) y la frecuencia en la que trabaja el fenómeno (Freq. Matrix), ambas en [Hz].



**Figura 2.8.** Configuración para líneas aéreas.

Existen tres opciones de líneas de transmisión, tal es el caso de las líneas aéreas (Overhead Line) y líneas subterráneas como las construidas mediante una tubería con un

fluido o gas bombeado a través y alrededor del cable (Enclosing Pipe) y el otro mediante un cable dieléctrico sólido (Single Core Cable).

Para el presente sistema de prueba, se escogió las líneas Overhead Line y Single Core Cable:

#### *Líneas aéreas (Overhead Line)*

En esta opción, es necesario considerar el efecto piel y la matriz de transformación para que sea real y aparezca en los resultados.

Los parámetros de las líneas de transmisión de 230 [kV] fueron calculados para el modelo J. Martí y utilizando los catálogos [18] [3] para los conductores de fase y cable de guarda.

Los conductores utilizados en la línea de transmisión aérea son, para las fases ACAR 1100 kcmil y para el cable de guarda, acero galvanizado de 7 hilos y 3/8" HS. A continuación, se presentan sus características.

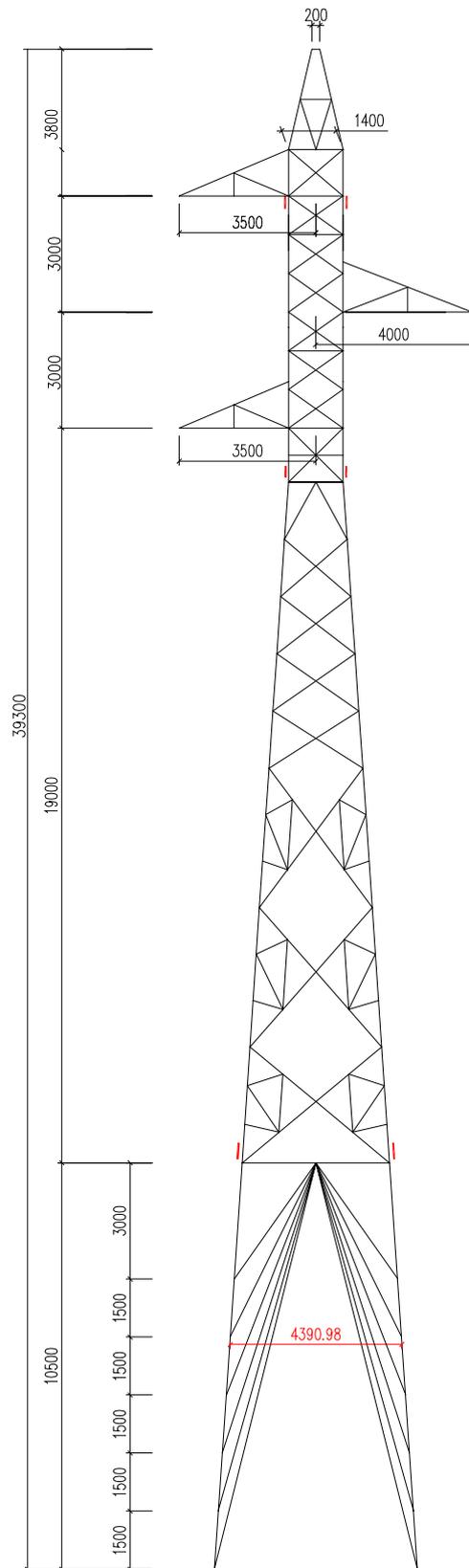
**Tabla 2.1.** Valores de parametrización de los conductores de fase.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Resistencia del conductor en DC (Resis)	0.0556 [ $\Omega$ /km]
Radio externo del conductor (Rout)	1.533 [cm]
Radio interno del conductor (Rin)	0 [cm]

**Tabla 2.2.** Valores de parametrización del cable de guarda.

<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Resistencia del conductor en DC (Resis)	3.75 [ $\Omega$ /km]
Radio externo del conductor (Rout)	0.47625[cm]
Radio interno del conductor (Rin)	0 [cm]

Una configuración general para una torre con voltaje 230 [kV] es la suspensión ligera SL1, la cual se ilustra en la Figura 2.9, donde se indican las posiciones de los conductores y cable de guarda.



**Figura 2.9.** Torre de suspensión ligera.

**Tabla 2.3.** Coordenadas de los conductores de fase y cable de guarda.

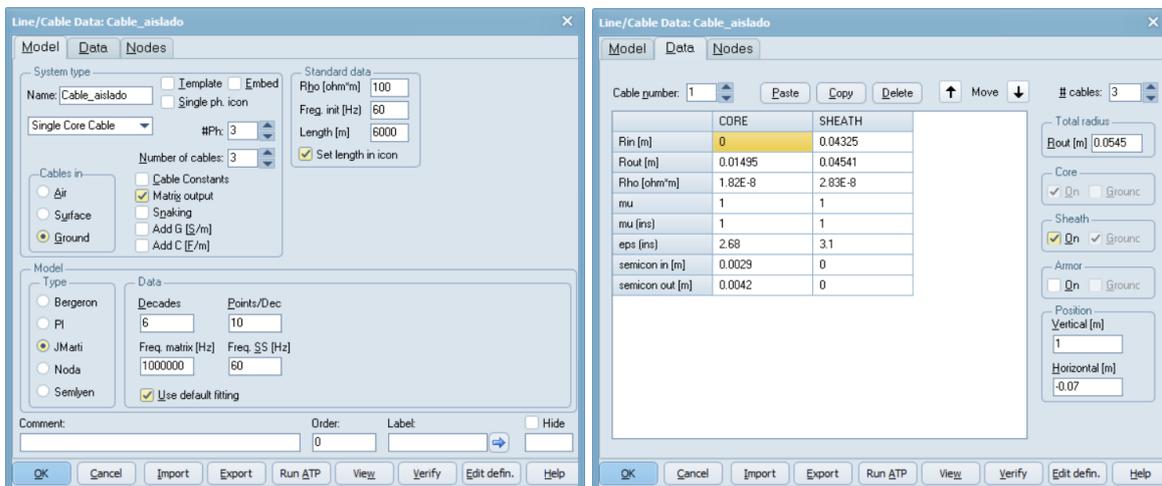
Conductor	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]
Fase A	-3.5	33.018	23.51.8
Fase B	4	30.018	20.518
Fase C	-3.5	27.018	17.518
Guarda	0	39.3	29.8

Donde Horiz es la distancia horizontal del conductor en la torre, Vtower es la altura vertical del conductor en la torre y Vmid es la altura vertical del conductor a medio vano.

Para calcular el Vmid, se consideró una flecha de 9.5 metros, práctica usada por CELEC EP Transelectric en la construcción de líneas de este voltaje.

### Single Core Cable

Para este caso, se consideró a los cables ubicados bajo el terreno mediante la opción Cables in, Ground, y la matriz de salida (Matrix output) para visualizar los datos de la matriz de impedancia y admitancia ( $R, \omega \cdot L, \omega \cdot C$ ).



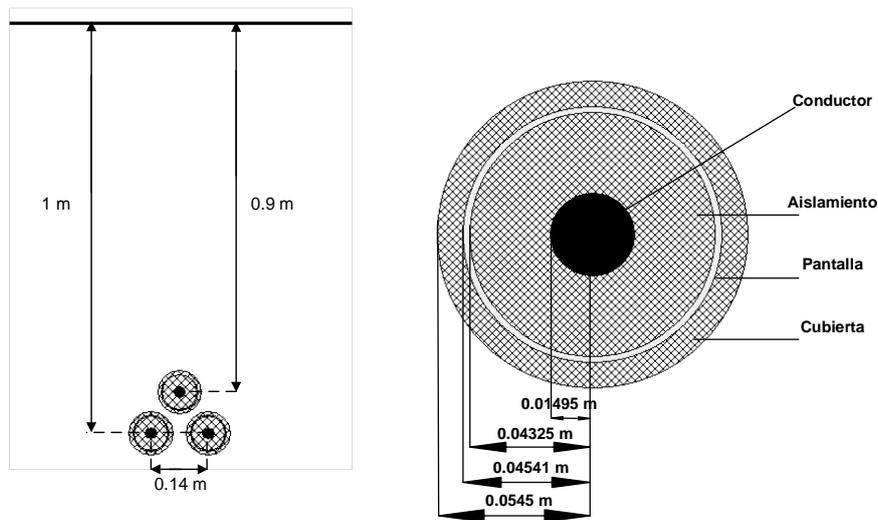
**Figura 2.10.** Configuración para cables aislados.

En cuanto a la parametrización de la línea de transmisión subterránea, se utilizará los datos del cable aislado tipo XLPE de  $630 \text{ mm}^2$  de la referencia [19] y considerando a las pantallas (sheath) conectadas a tierra establecidas por defecto del programa ATP.

**Tabla 2.4.** Valores de parametrización del cable aislado.

Parámetro	Conductor	Pantalla
Radio interno del conductor (Rin)	0 [m]	0.04325 [m]
Radio externo del conductor (Rout)	0.01495 [m]	0.04541 [m]
Resistividad del material conductor (Rho)	$1.82 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$	$2.83 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$
Permeabilidad relativa del material del conductor (mu)	1	1
Permeabilidad relativa del material fuera del conductor (mu [ins])	1	1
Permitividad relativa del material fuera del conductor (eps [ins])	2.68	3.1
Espesor de la capa semiconductor interna (Semicon in)	0.0029 [m]	0 [m]
Espesor de la capa semiconductor exterior (Semicon out)	0.0042 [m]	0 [m]
Radio total del conductor	0.0545 [m]	

En donde los valores de permeabilidad y permitividad se tomaron de la referencia [20], en tanto el valor de resistividad del material conductor, al ser un conductor de cobre, es de  $1.82 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$  y la pantalla es de  $2.83 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$ . En cuanto a los valores de espesor en la pantalla, toman el valor de cero como sugerencia del programa ATP.



**Figura 2.11.** Visualización de cables aislados.

De acuerdo con la Figura 2.11, se indican las posiciones de los conductores enterrados bajo el terreno y con sus pantallas conectadas a tierra.

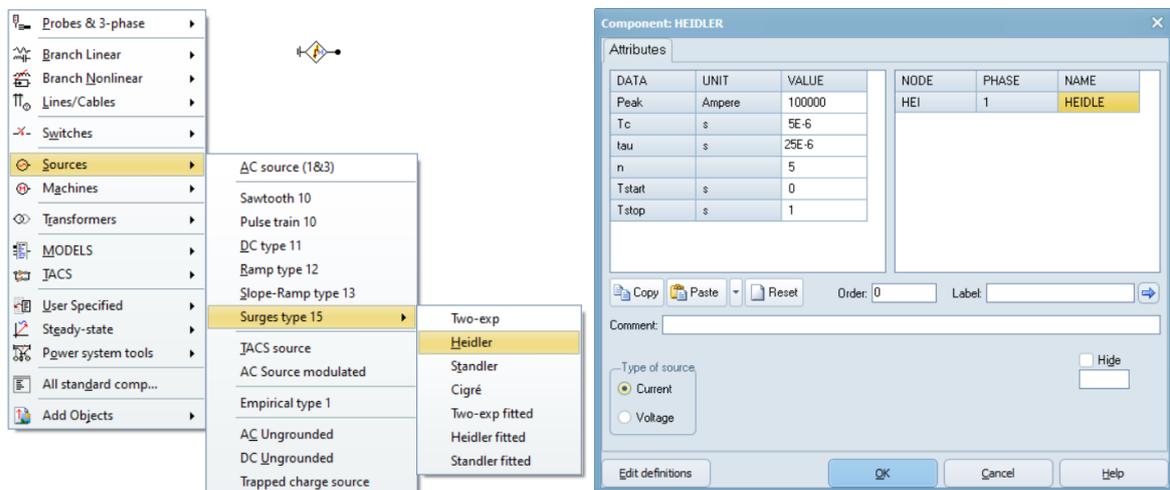
**Tabla 2.5.** Coordenadas de los conductores de fase.

Conductor	Vertical [m]	Horizontal [m]
Fase A	1	-0.07
Fase B	0.9	0
Fase C	1	0.07

### 2.3.2. Corriente del rayo (Fuente de corriente de Heidler)

En la caída de un rayo, los parámetros que establecen su forma de onda son de naturaleza aleatoria. Sin embargo, en el presente documento los parámetros son en algunos casos extremos y en otros casos esperados, pero se mantienen constantes, aplicados al modelo de fuente de corriente de Heidler incorporado en ATP.

Para su implementación en el software ATP, existe la opción Sources, Surges type 15, seguido de la opción Heidler.



**Figura 2.12.** Menú de fuentes de corriente (tipo Heidler).

Al estar en el cuadro de diálogo de la fuente, se debe ingresar los siguientes parámetros tomando en cuenta que los tiempos están referenciados a partir de un tiempo de inicio igual a cero y un tiempo de parada igual a 1 segundo [21].

**Tabla 2.6.** Valores de parametrización de corriente del rayo.

Parámetro	Valor
Valor pico (Peak)	100000 [A]
Tiempo de cresta o pico (Tc)	0.000005 [s]
Duración de la descarga (tau)	0.000025 [s]
Factor de influencia de la tasa de crecimiento (n)	5
Tiempo de inicio (Tstart)	0 [s]
Tiempo de parada (Tstop)	1[s]

Estos valores ingresados son tomados de la referencia [21] considerando para el valor de (tau) el intervalo entre el tiempo de inicio y el punto en la cola, donde la amplitud de la función se ha disminuido al 37% de su valor pico.

Conforme se ha anotado previamente se simularán descargas atmosféricas sobre conductores de guarda o torres y descargas atmosféricas en conductores de fase. En este último caso será usada la magnitud calculada de la corriente de descarga que produce la falla de apantallamiento.

### 2.3.2.1. Cálculo de la corriente del rayo para falla de apantallamiento

En primera instancia, se encontrará el ángulo del sistema mediante la Ecuación 2.5:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{3.5}{39.3 - 33.018} = 29.12 [^\circ]$$

Luego, la distancia crítica para la corriente máxima del rayo definida en la Ecuación 2.6:

$$r_{gm} = \frac{\frac{39.3 + 33.018}{2}}{1 - 1 \cdot \sin(29.12)} = 70.436 [m]$$

Siendo  $\gamma$  igual a 1 en base a la norma IEEE Std 998-2012.

Por lo tanto, la corriente máxima del rayo, según la Ecuación 1.24, es

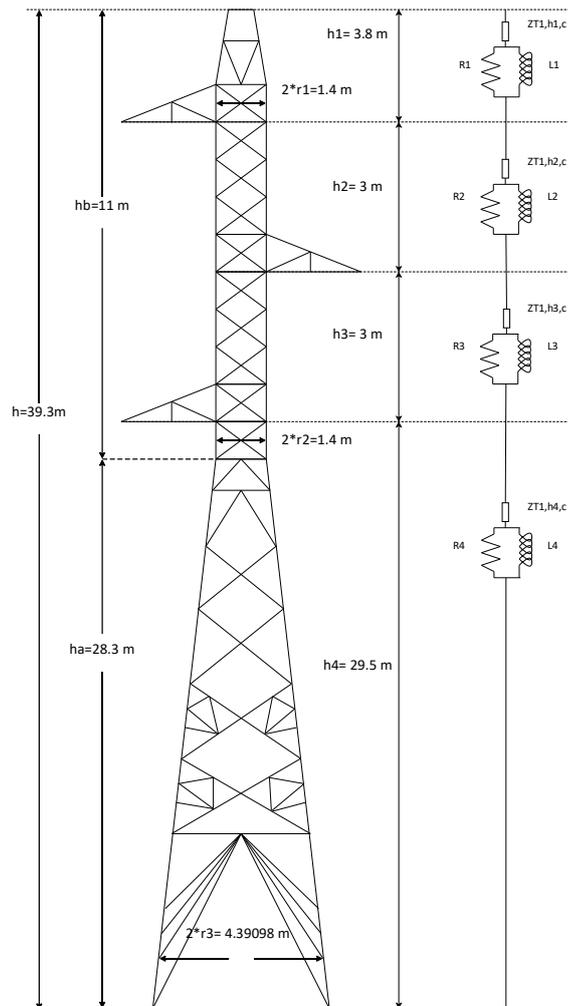
$$I_m = \left( \frac{r_{gm}}{8} \right)^{\frac{1}{0.65}} = \left( \frac{70.436}{8} \right)^{\frac{1}{0.65}} = 28.4048 [kA]$$

De acuerdo con la Ecuación 2.7, la probabilidad de que la corriente de impulso atmosférico sea menor que 28.4048 es:

$$P(I < 28.4048 \text{ kA}) = \left( 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{28.4048}{31}\right)^{2.6}} \right) \cdot 100 = 44.34\%$$

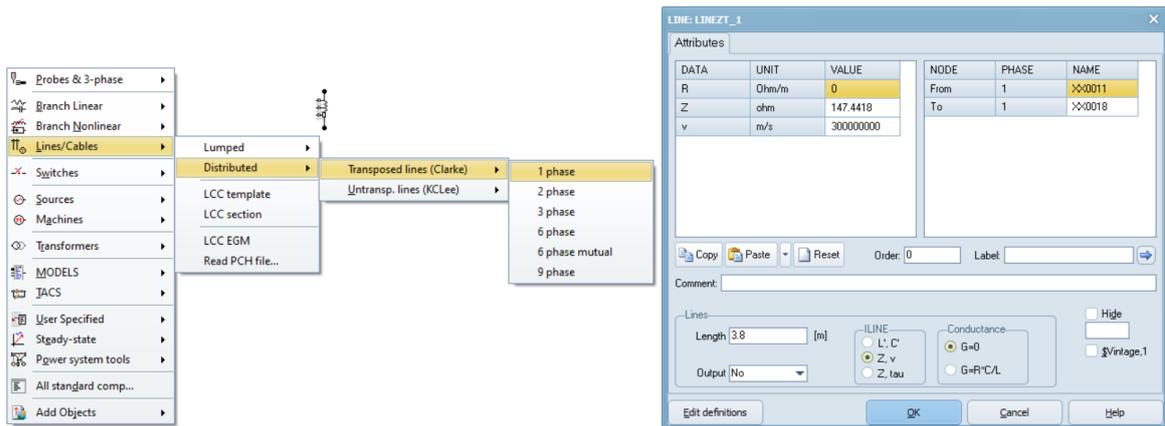
### 2.3.3. Torre de transmisión

En base a las Ecuaciones 2.11, 2.12 y la geometría de la torre como indica la Figura 2.13, se obtiene la impedancia característica igual a 147.4418  $[\Omega]$ .



**Figura 2.13.** Resultados del modelo de torre SL1 de 230 [kV].

En el software ATP, la impedancia característica puede ser ingresada junto con la velocidad de propagación mediante una línea de parámetros distribuidos transpuesta de una fase como se ilustra a continuación:



**Figura 2.14.** Selección de la impedancia característica.

Mediante las Ecuaciones 2.8, 2.9 y 2.10, se encontrará los siguientes parámetros distribuidos:

**Tabla 2.7.** Valores de parametrización de torre de transmisión de 230 kV.

Parámetro	Valor
R1	16.447161[Ω]
R2	12.9846 [Ω]
R3	12.9846 [Ω]
R4	42.4163 [Ω]
L1	0.0043091 [mH]
L2	0.0034019 [mH]
L3	0.0034019 [mH]
L4	0.0111113 [mH]

La Figura 2.15 muestra la opción Branch Linear, RLC, la cual permite ingresar los valores de resistencia e inductancia calculados en la Tabla 2.7.

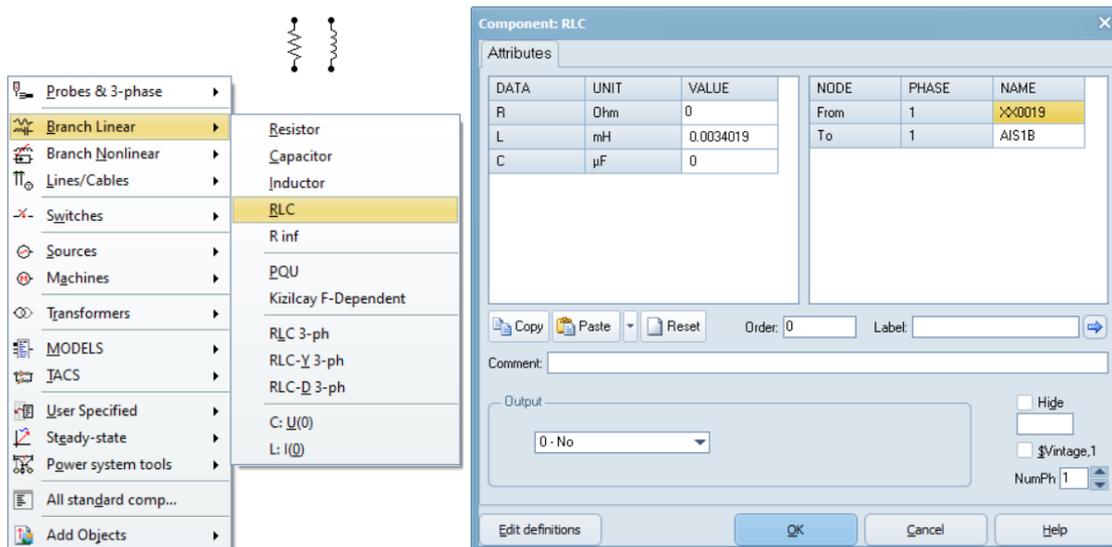


Figura 2.15. Selección de los parámetros de la torre.

### 2.3.4. Resistencia de pie de torre

En la práctica, el valor de la resistencia de pie de torre tiene un rango de valores, correspondientes a una distribución estadística, que dependen de la ubicación de la torre. Si la torre está ubicada en suelos pantanosos o que contengan humedad, la resistencia de pie de torre será menor que la resistencia que poseerá una torre ubicada en suelos rocosos [13]. Sin embargo, en este trabajo se utilizan valores constantes. Conforme a la práctica de CELEC EP Transelectric aplicada en el país para este tipo de líneas se considera una resistencia de puesta a tierra igual a 10 [Ω].

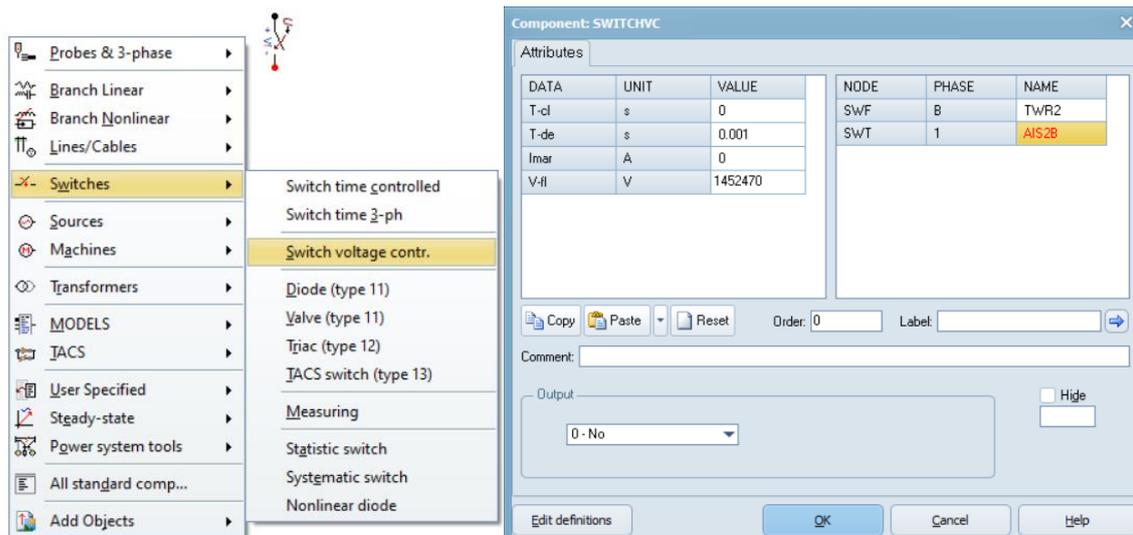
### 2.3.5. Cadena de aisladores

Está representada mediante interruptores controlados por voltaje, los cuales al estar cerrados indicarán que ocurrió una descarga inversa y al estar abiertos implicará que el voltaje entre el conductor de fase y la cruceta de la torre no supera el valor de voltaje calculado mediante la Ecuación 2.13.

$$V_{fl} = \left( 400 + \frac{710}{6^{0.75}} \right) \cdot 7 \times 2.482$$

$$V_{fl} = 1452470 \text{ V} = 1452.470 \text{ [kV]}$$

Para acceder al interruptor controlado por voltaje en ATP, es necesario elegir a la opción Switches, Switch voltage contr., como se aprecia en la Figura 2.16.



**Figura 2.16.** Interruptor controlado por voltaje.

Al implementar los parámetros, cabe mencionar que el tiempo de cierre del interruptor, se tomará igual a 6 microsegundos debido a la curva de CIGRE y la cantidad de cadena de aisladores será de 17 unidades ANSI 52-3 para torres de suspensión y ANSI 52-5 para torres de retención tomados como referencia de CELEC EP Transelectric. La altura de cada uno de estos tipos de aisladores se ha tomado del catálogo [22].

**Tabla 2.8.** Valores de parametrización de la cadena de aisladores.

Parámetro	Valor
Tiempo de cierre del interruptor ( $T_{cl}$ )	0 [s]
Tiempo mínimo que el interruptor debe estar cerrado ( $T_{de}$ )	0.001 [s]
Corriente marginal ( $I_{mar}$ )	0 [A]
Voltaje crítico de flameo ( $V_{fl}$ )	1452470 [V]

Para obtener resultados coherentes, se tomará un tiempo de cierre igual a cero, tiempo mínimo igual a 0.001 para garantizar que el interruptor no se abra durante el tiempo de simulación, así como una corriente marginal igual a cero porque el interruptor abre cuando pasa por cero.

### 2.3.6. Pararrayos

Para el presente sistema de prueba, en base a la norma IEC, se escogerá el voltaje máximo del sistema igual a 245 [kV], por lo tanto, al reemplazar en las Ecuaciones 2.14, 2.15 y 2.16, se tendrá que:

Voltaje de operación continua:

$$U_c = \frac{245}{\sqrt{3}} = 141.45 \text{ [kV]}$$

Capacidad del descargador frente a sobrevoltajes temporales:

$$TOV_c = 1.4 \cdot \frac{245}{\sqrt{3}} = 198 \text{ [kV]}$$

Capacidad del descargador frente a sobrevoltajes temporales a los 10 segundos:

$$TOV_{10} = 1.4 \cdot \frac{245}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{1}{10}\right)^{0.02} = 189.1 \text{ [kV]}$$

Teniendo en cuenta que el factor de falla a tierra, en este caso, toma el valor de 1.4, debido a que se tiene un tipo de conexión de neutro rígido a tierra.

Dicho esto, se definirá el valor  $U_r$  al inmediato superior del catálogo; es decir;

$$U_r = 192 \text{ [kV]}$$

La descripción de los parámetros que hacen referencia al pararrayos se coloca de la siguiente forma:

**Tabla 2.9.** Valores de parametrización del pararrayos.

Parámetro	Valor
Voltaje de referencia (Vref)	300000 [V]
Voltaje de descarga (Vflash)	-1 [pu]
Voltaje inicial (Vzero)	0 [V]
Número de columnas del pararrayos (#COL)	1
Número de bloques en serie de cada rama (#SER)	1
Tolerancia adecuada (ErrLim)	0.05 [pu]
La característica se supone lineal por debajo de esta corriente (Ilim)	0.001 [A]

Para la selección de los parámetros, el voltaje de referencia se tomó igual a 300 [kV] ya que es un valor alrededor al nominal  $U_r$  (conforme a la recomendación de manual de ATPDraw), el voltaje de descarga igual a un valor negativo debido a que el pararrayos de

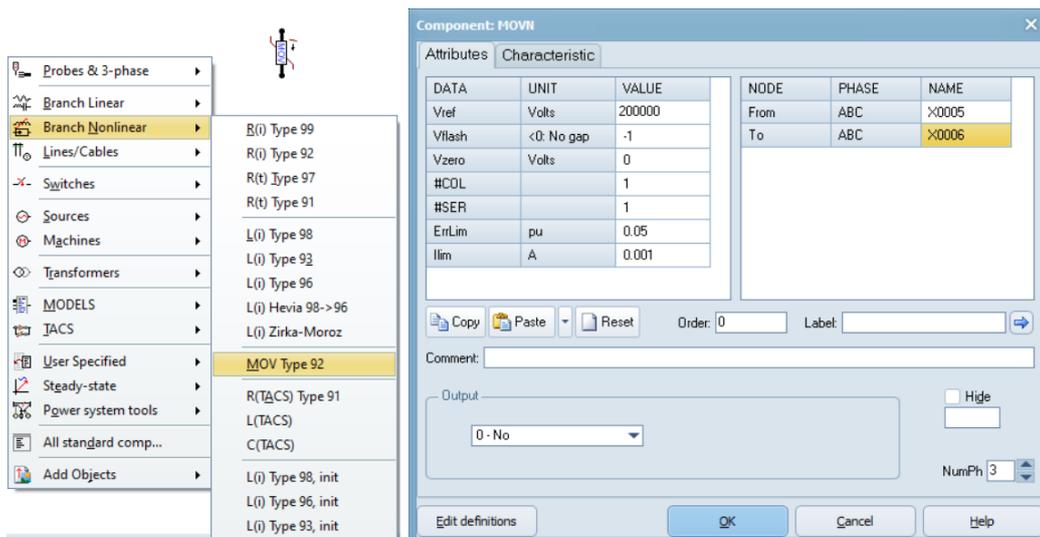
óxido metálico utilizado no se cuenta con un gap (espaciamiento), el número columnas de pararrayos y número de bloques en serie igual a uno al ser simple rama de bloque, y la tolerancia junto con el Ilim igual a los valores establecidos por el ATP.

La característica voltaje-corriente de un pararrayos se encuentra definido por la pendiente del impulso atmosférico. Por lo cual, el pararrayos debe ser modelado tomando como referencia el voltaje obtenido de 192 [kV] y utilizando la característica de operación para impulsos atmosféricos (8/20 [μs]) obtenida del catálogo del fabricante para Clase 3, con una corriente de nominal de descarga de 10 [kA].

**Tabla 2.10.** Característica Corriente vs Voltaje del pararrayos.

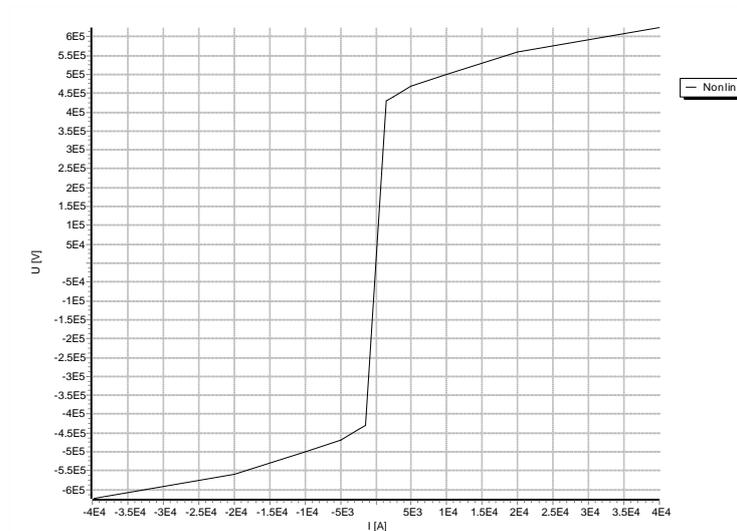
Corriente [A]	Voltaje [V]
1500	430000
2500	439000
5000	469000
10000	500000
20000	560000
40000	624000

La Figura 2.17 muestra la representación de los pararrayos en el software ATP mediante el componente no lineal Branch Nonlinear, MOV Type 92 y los parámetros previamente definidos.



**Figura 2.17.** Representación de una resistencia no lineal.

El modelo MOV Type 92 permite ingresar la característica voltaje-corriente definida previamente en la Tabla 2.10.



**Figura 2.18.** Curva Corriente vs Voltaje del pararrayos en ATP.

Cabe mencionar que, el cable de conexión del pararrayos (alrededor de 8 [m]) es simulado conforme a [15], con  $1 [\mu H/m]$ , además, se implementa una resistencia igual a  $1 [\Omega]$  para representar un sistema de puesta a tierra.

### 2.3.7. Fuente del sistema a 60 Hz

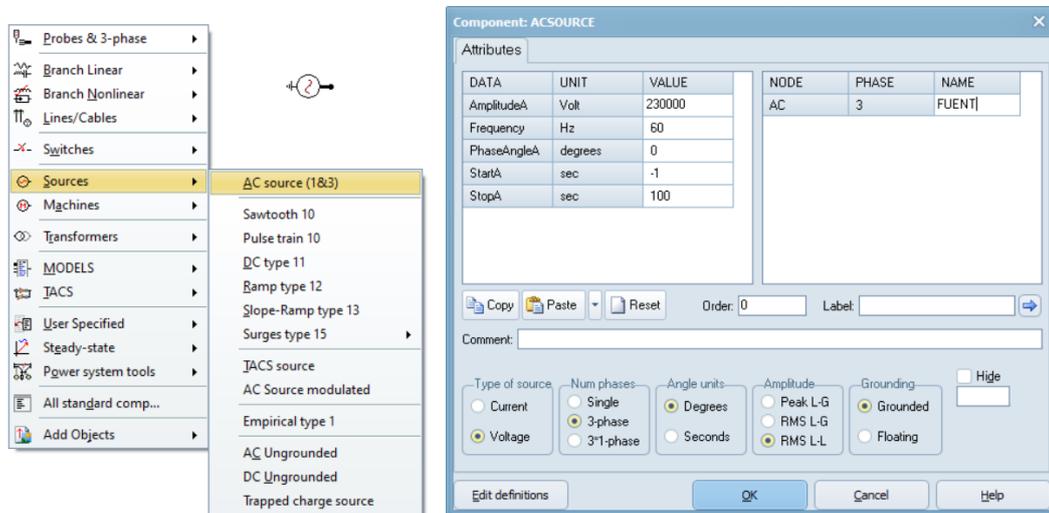
La fuente ocupada para los casos de estudio establecidos más adelante será de tipo sinusoidal trifásica, constante y balanceada, en la cual, se puede ingresar los siguientes parámetros:

**Tabla 2.11.** Valores de parametrización de la fuente del sistema.

Parámetro	Valor
Amplitud (AmplitudeA)	230000 [V]
Frecuencia (Frequency)	60 [Hz]
Angulo de fase (PhaseAngleA)	0 [°]
Tiempo de inicio (Start A)	-1[s]
Tiempo de finalización (Stop B)	100 [s]

En donde la amplitud y frecuencia tomaran los valores de acuerdo con el sistema de prueba, el ángulo de fase A será igual a  $0^\circ$ , el tiempo de inicio será de -1, indicando que está en operación previo al inicio de la del tiempo de simulación y el tiempo de finalización será igual a 100 segundos.

Para acceder a una fuente trifásica en ATP, se seleccionará en la opción Sources, AC source (1&3) para elegir una fuente de tipo 14 como indica la Figura 2.19.



**Figura 2.19.** Representación de la fuente equivalente del sistema.

En la fuente, también se debe especificar el tipo de fuente (voltaje), número de fases (3), la unidad de medida del ángulo de fase (grados), amplitud con valor RMS línea-línea (RMS L-L) y la presencia de una conexión a tierra (grounded).

## **3. RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **3.1. Resultados**

Con el sistema de prueba definido, es necesario establecer los distintos casos que serán simulados y analizados.

En el presente trabajo, se consideran los siguientes casos de estudio:

- Descargas atmosféricas directas en cables de guarda o torres
- Descargas atmosféricas directas en conductores

El evento con mayor probabilidad de ocurrencia es el impacto de un rayo en el cable de guarda y el de menor probabilidad, el impacto en una fase.

#### **3.1.1. Caso Base**

Corresponde a la simulación del sistema de prueba de la Figura 2.1 y del Anexo I, con las siguientes consideraciones:

##### **Descargas atmosféricas directas en cables de guarda o torres**

Impacto de la descarga en la segunda torre del sistema, cercana al cable, con una magnitud de 100 [kA].

##### **Consideración de la fuente de 60 [Hz]**

No se considera la fuente de 60 [Hz] porque su aporte incrementando la diferencia de potencial a través de la cadena de aisladores se da cuando la descarga atmosférica se produce en el momento en que la onda de voltaje sinusoidal de la fuente pasa por un pico de polaridad contraria a la polaridad de la onda de la descarga atmosférica. Evento cuya probabilidad es baja.

Debe considerarse que en otras circunstancias su presencia contribuye a disminuir la diferencia de potencial en la cadena (cuando las dos ondas tienen la misma polaridad) y por lo tanto hasta podría disminuir la probabilidad de un flameo.

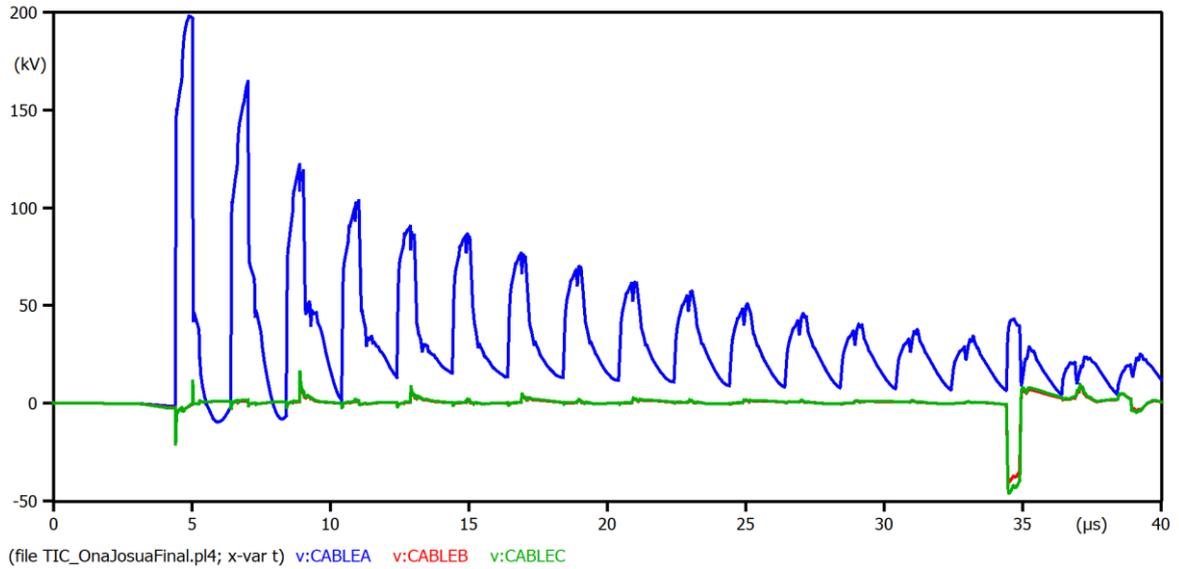
##### **Longitud del cable**

El cable aislado de 230 [kV] está simulado con una longitud de 6000 [m].

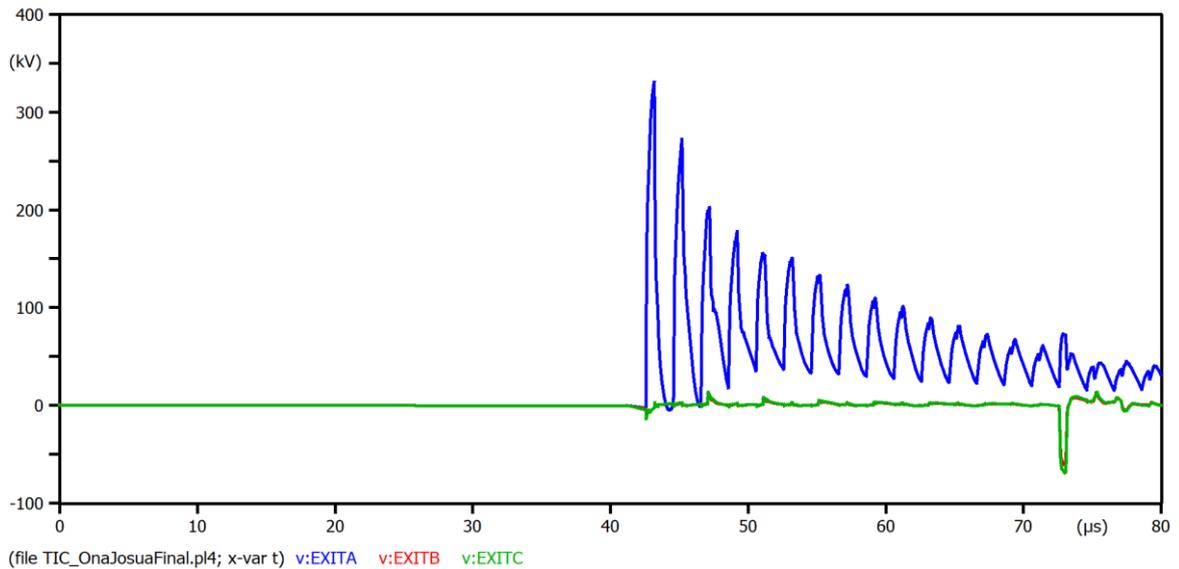
### Resistencia de puesta a tierra de las torres

Se considera una resistencia de puesta a tierra en la torre cercana al cable de  $1 [\Omega]$ , debido a que con este valor la probabilidad que se produzca una descarga inversa es muy reducida, y en las torres restantes de  $10 [\Omega]$ .

### Resultados obtenidos



**Figura 3.1.** Voltaje a la entrada del cable aislado.



**Figura 3.2.** Voltaje a la salida del cable aislado.

La Figura 3.1 y 3.2 muestran como las ondas de voltaje al inicio presentan un incremento en su magnitud debido a la caída del rayo; sin embargo, luego empiezan a decrecer conforme transcurre el tiempo de cola del impulso atmosférico.

La onda de la fase A se puede observar que tiene una mayor afectación en comparación con las otras fases, es decir, al ocurrir una descarga en el cable de guarda presenta bastantes oscilaciones, un mayor sobrevoltaje inducido por ser la fase más elevada y un mayor tiempo para lograr su estabilidad.

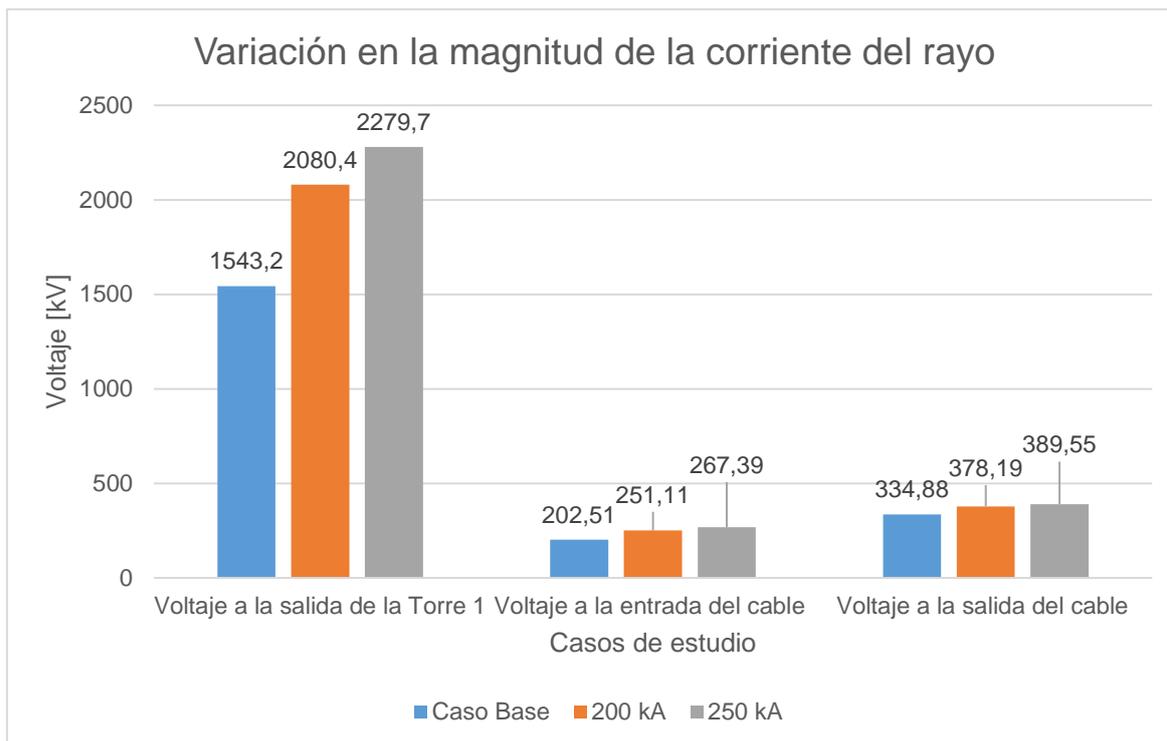
En el caso base es importante mencionar que al existir una descarga atmosférica con un valor de corriente de 100 [kA] ocurren descargas inversas y se producen sobrevoltajes; sin embargo, su efecto no es tan considerable a la entrada del cable aislado, puesto que no causan la operación del pararrayos implementado, conforme a su característica de operación simulada.

La magnitud del voltaje obtenido en el terminal remoto del cable es mayor que el obtenido a la entrada del mismo debido a la condición de vacío en la que se encuentra el cable.

Además, se logra observar que existe un mayor tiempo hasta alcanzar el pico en los voltajes a la salida del cable, en razón al tiempo de viaje de las ondas originadas por la descarga atmosférica.

### **3.1.2. Variación en la magnitud de la corriente del rayo**

El presente caso de estudio corresponde a una comparación entre la magnitud de corriente del rayo definida en el Caso Base y las magnitudes de corriente de 200 y 250 [kA].



**Figura 3.3.** Resultados de voltajes obtenidos en la variación en la magnitud de la corriente del rayo.

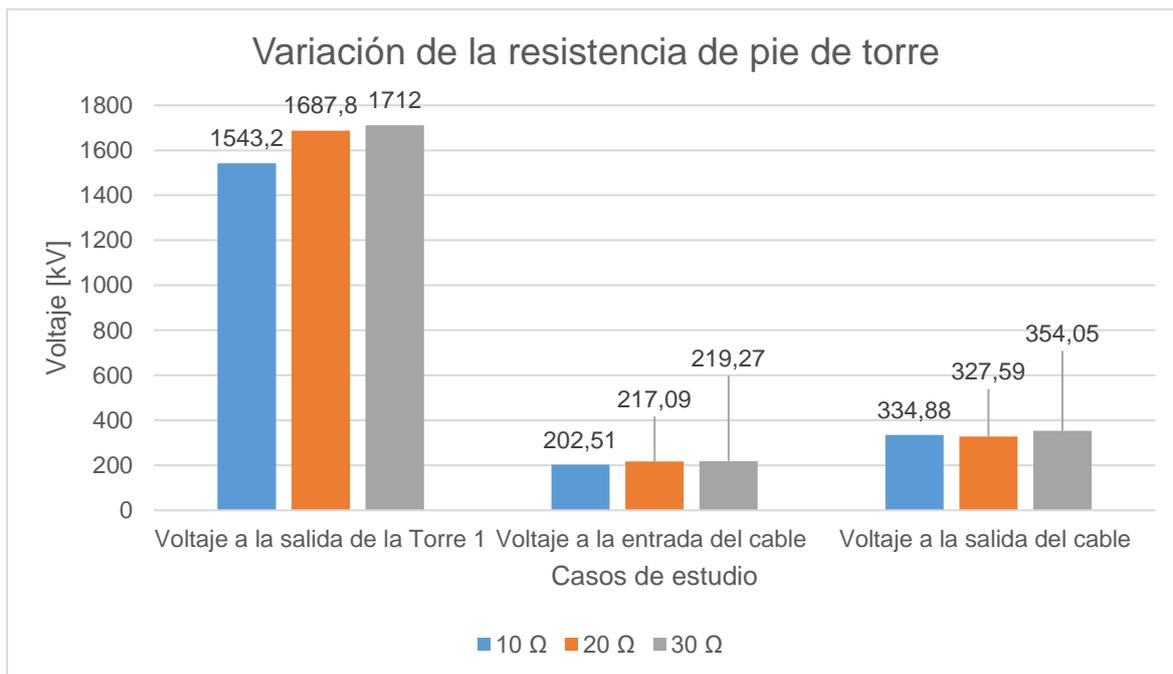
Se puede observar en la Figura 3.3 la relación que existe entre los sobrevoltajes y la magnitud de la corriente de descarga, es decir, al ocurrir un incremento en la corriente de descarga implica que los voltajes también presenten un aumento y por lo tanto exista una mayor afectación a la entrada del cable aislado.

En la Figura 3.3, se puede evidenciar como el voltaje a la salida de la primera torre de transmisión es mucho mayor en comparación con el voltaje de entrada del cable, lo cual hace referencia a que existe una variación en sus impedancias características y por lo tanto corrobora lo mencionado en la sección 1.4.3.1, es decir, la impedancia característica que presenta la línea aérea y cable aislado guardan una relación aproximada de 10 a 1.

En todos los casos, si existe descarga inversa; sin embargo, para estas corrientes de rayo, los voltajes obtenidos no provocan la actuación de los pararrayos conforme a su curva de caracterización Corriente vs Voltaje de operación.

### 3.1.3. Variación de la resistencia de pie de torre

Los valores de resistencia de pie de torre se considerarán entre 10 y 30  $[\Omega]$  en la torre impactada por el rayo definida en el Caso Base. La Figura 3.4 presenta los resultados obtenidos en este caso de estudio.



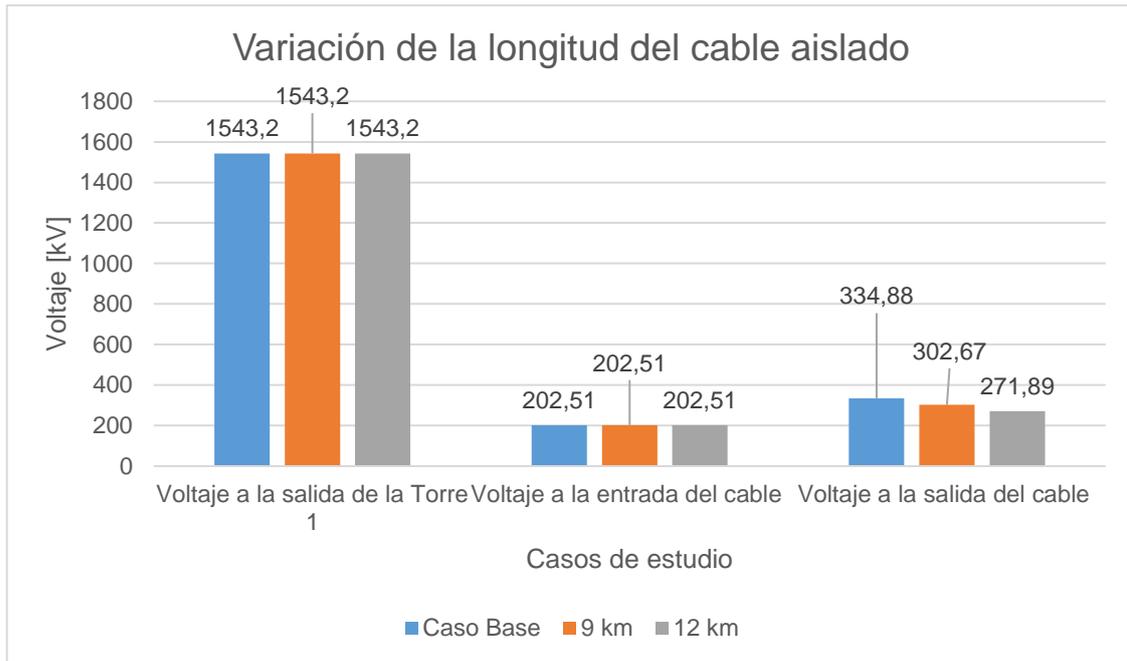
**Figura 3.4.** Resultados de voltajes obtenidos en la variación de la resistencia de pie de torre.

Se puede observar en la Figura 3.4 que las ondas viajeras originadas por la descarga atmosférica al llegar a la base de la torre y encontrarse con una discontinuidad (resistencia de pie de torre) provoca ondas incidentes y reflejadas, las cuales varían como indica la Ecuación 1.7 de acuerdo con el valor que tome la resistencia de pie de torre, es decir, a mayor resistencia de pie de torre incrementan los coeficientes de transmisión, reflexión y por ende los voltajes transmitido y reflejado. Adicionalmente a estos voltajes, se sumará el efecto de las ondas de torres adyacentes lo cual implica un incremento en el diferencial de potencial entre el brazo de la torre y la fase del conductor y por lo tanto una disrupción en la cadena de aisladores; siendo el caso, más crítico la resistencia de 30 Ω, en donde ocurren 8 descargas inversas en las fases A y B de las torres más cercanas como son la 1, 2, 3 y 4.

Cada torre de transmisión puede tener un cierto control mediante la resistencia de pie de torre; es decir, los sobrevoltajes producidos en cada torre pueden ser menores a menor resistencia de pie de torre. Dicho esto, se logra evidenciar que los voltajes a la entrada y salida del cable aislado también se ven afectados por esta variación, puesto que existe un incremento en sus valores máximos.

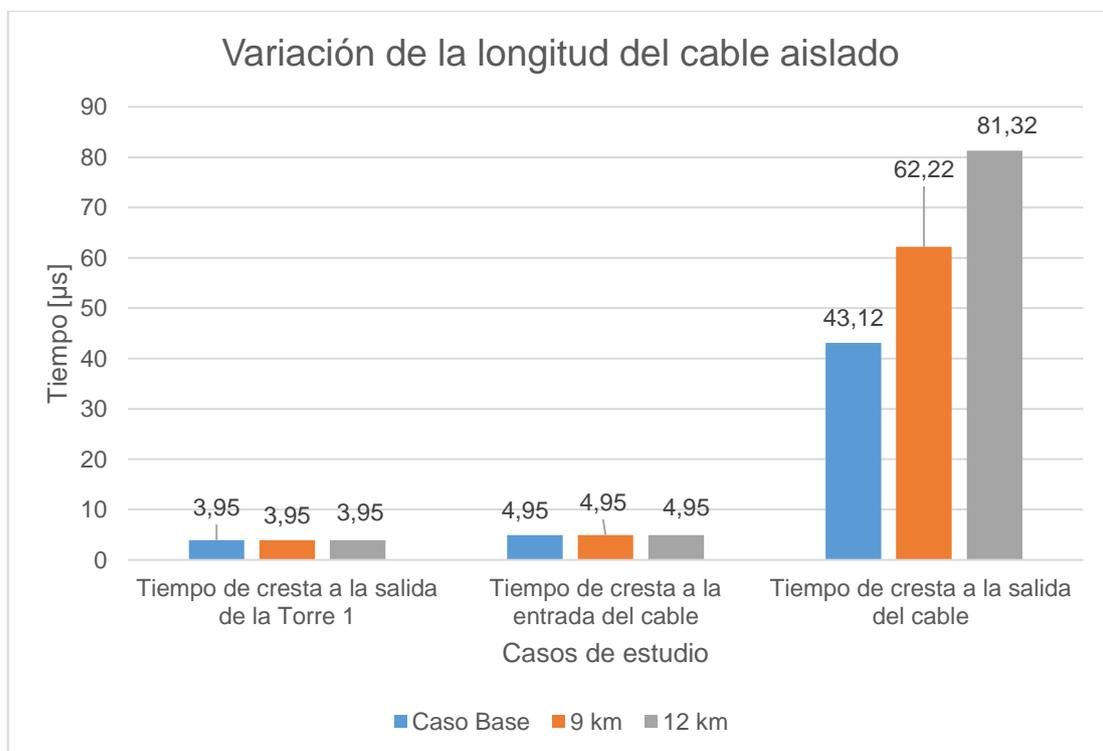
### 3.1.4. Variación de la longitud del cable aislado

La longitud del cable aislado toma valores entre 6 y 12 km. La Figura 3.5 presenta los resultados obtenidos a la entrada y salida del cable aislado al momento de impactar el rayo.



**Figura 3.5.** Resultados de voltajes obtenidos en la variación del cable aislado.

Se puede apreciar en la Figura 3.5 que al incrementar la longitud del cable el voltaje a la entrada del cable se mantiene constante y el voltaje a la salida del cable disminuye, esto último en razón a la relación que existe entre la caída de voltaje y la longitud del cable; ya que a mayor longitud mayor caída de voltaje.

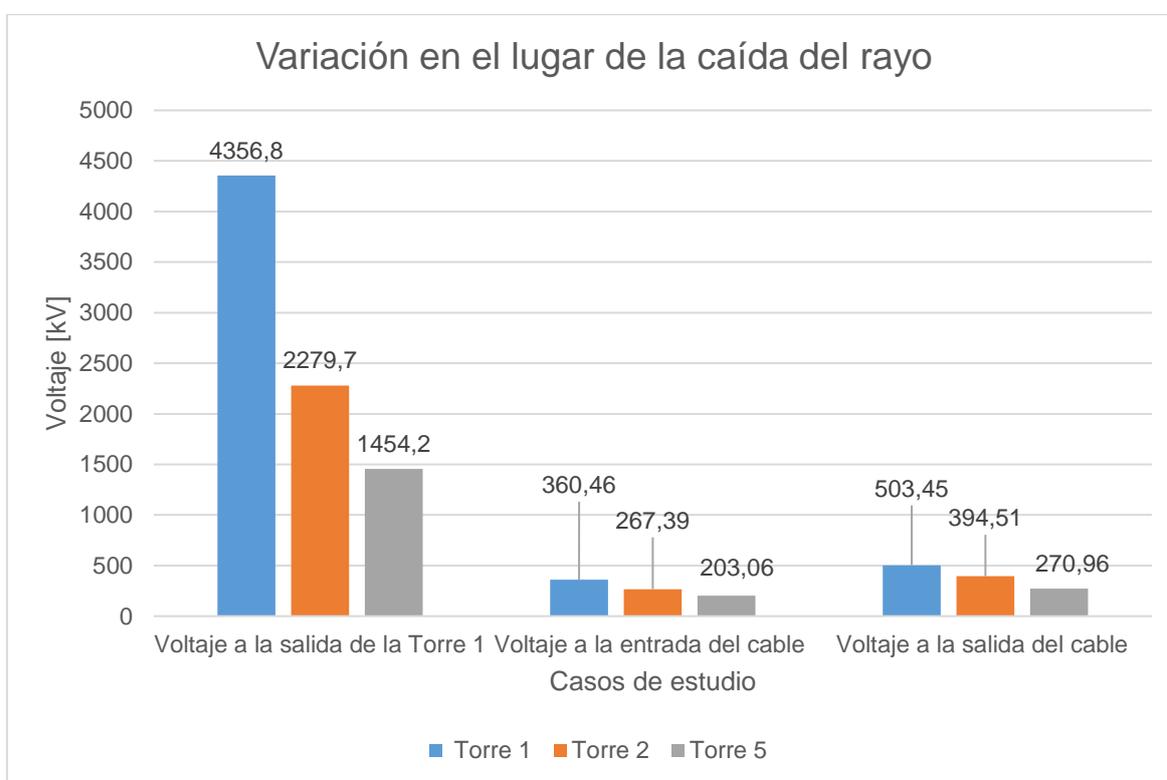


**Figura 3.6.** Tiempos obtenidos en la variación de la longitud del cable aislado.

En la Figura 3.6, se logra observar que existe un mayor tiempo hasta alcanzar el pico en los voltajes a la salida del cable de mayor longitud, puesto que, al tener una mayor distancia de recorrido mayor será el tiempo que tarden en llegar las ondas viajeras originadas por la descarga atmosférica a la salida del cable aislado.

### 3.1.5. Variación en el lugar de la caída del rayo

Para este caso, se considerará una descarga atmosférica de 250 [kA] en la torre más cercana, una torre más alejada, así como en su Caso Base (segunda torre). La Figura 3.7 presenta los resultados obtenidos a la entrada y salida del cable aislado al momento de impactar el rayo.



**Figura 3.7.** Resultados de voltajes obtenidos en la variación del lugar de la caída del rayo.

La Figura 3.7 realiza una comparación de la caída de un rayo en distintos puntos de la línea de transmisión, se puede distinguir que cuando la descarga ocurre en la torre más cercana al cable aislado es cuando el voltaje en la entrada al cable es mayor, siempre y cuando ocurra la descarga inversa; caso contrario que cuando la descarga ocurre en la torre más lejana, en donde el voltaje a la entrada del cable es bastante bajo.

En este caso, se muestra que los pararrayos a la entrada del cable actúan solo en la fase A, mientras que los pararrayos a la salida del cable actúan en las fases A y B al producirse

una descarga en la torre cercana al cable, lo cual demuestra que el coeficiente de acoplamiento entre cable de guarda y el conductor señalado en la Ecuación 1.5 varía de acuerdo a la cercanía que exista entre ambas. Dicho esto, se evidencia la importancia del pararrayos en algunos casos, puesto que al no contar con pararrayos permitirá un solo camino en donde pueda circular la corriente y por lo tanto habrá un impacto casi directo en el cable. Por esta razón, el fin de la utilización de los pararrayos es el de cortar los picos de los sobrevoltajes originados por las descargas atmosféricas y no sobrepasar el nivel básico de aislamiento (BIL) del cable aislado.

El nivel de protección de los pararrayos, también resultan dependientes de la longitud de sus cables de conexión, por lo cual, al tener una longitud alrededor de 8 m implica un aumento en el voltaje de entrada del cable aislado.

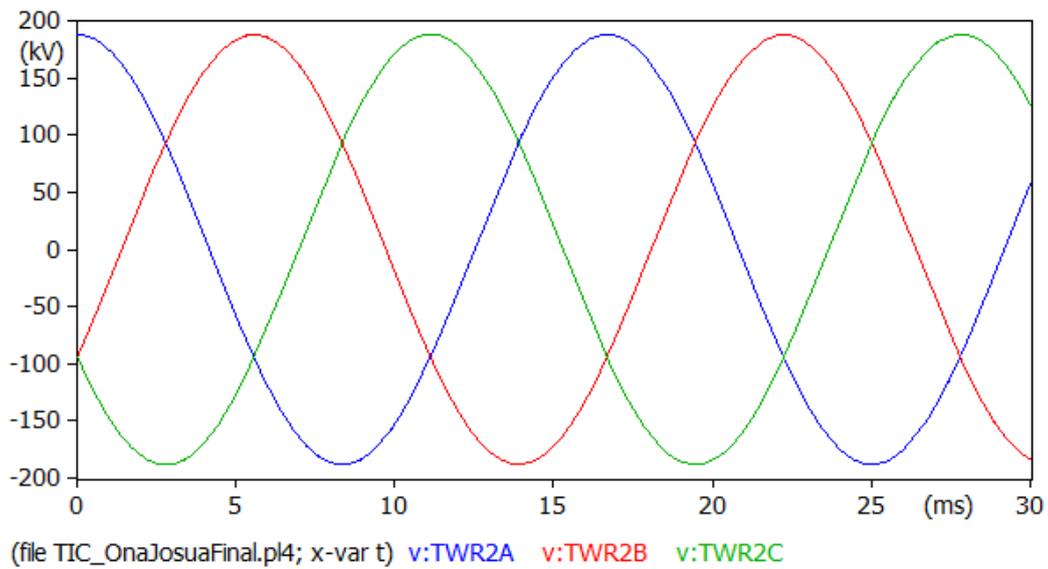
### **3.1.6. Con la implementación de la fuente de 60 [Hz]**

Se considera una fuente de voltaje a una frecuencia de 60 [Hz] para analizar los efectos que puede causar una descarga en un sistema operando a 230 [kV].

En este caso, se tomarán en cuenta dos posibilidades; es decir, la primera, al coincidir la polaridad positiva de la descarga atmosférica con el semiciclo negativo de las ondas de voltaje que están en el lugar de descarga en estado estacionario y la segunda, al coincidir la polaridad positiva de la descarga atmosférica con el semiciclo positivo de las ondas de voltaje que están en el lugar de descarga en estado estacionario.

Dicho esto, se define los tiempos de inicio de la fuente de corriente del impulso atmosférico de la siguiente forma:

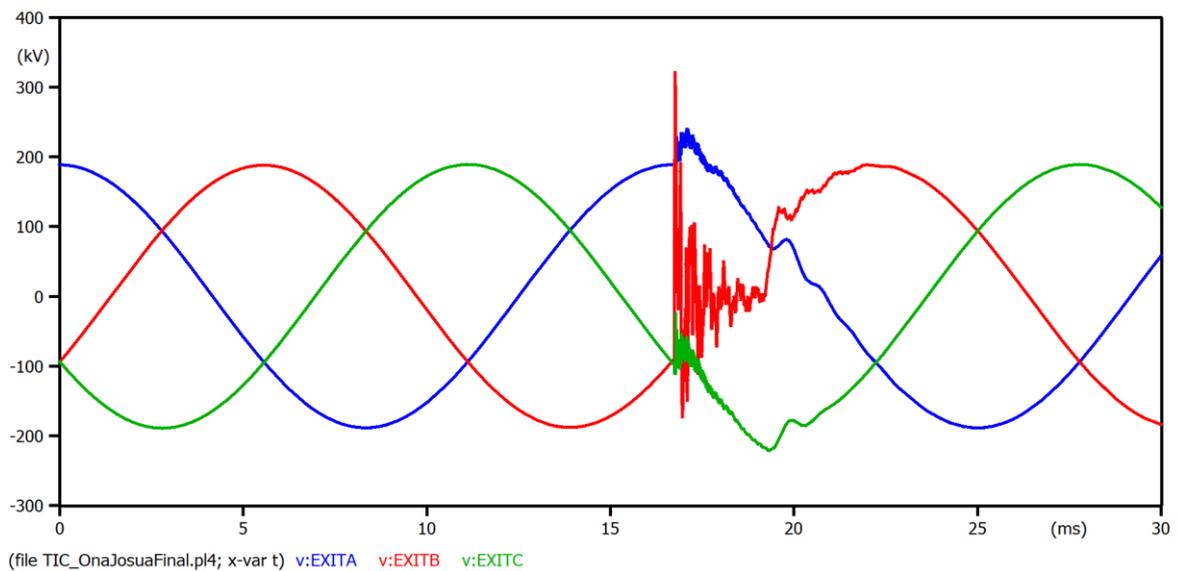
- Caso 1: 0.01666 [s]
- Caso 2: 0.00833 [s]



**Figura 3.8.** Voltaje a frecuencia industrial en la línea de transmisión.

*Descarga atmosférica en el Caso 1*

Al iniciar la descarga atmosférica, las ondas de voltaje que van a entrar al cable serán la suma o resta de las ondas viajeras ocasionadas por la descarga y las ondas originadas por la fuente de 60 Hz.



**Figura 3.9.** Resultados de voltajes obtenidos a la salida del cable cuando ocurre una descarga atmosférica a los 16.66 milisegundos.

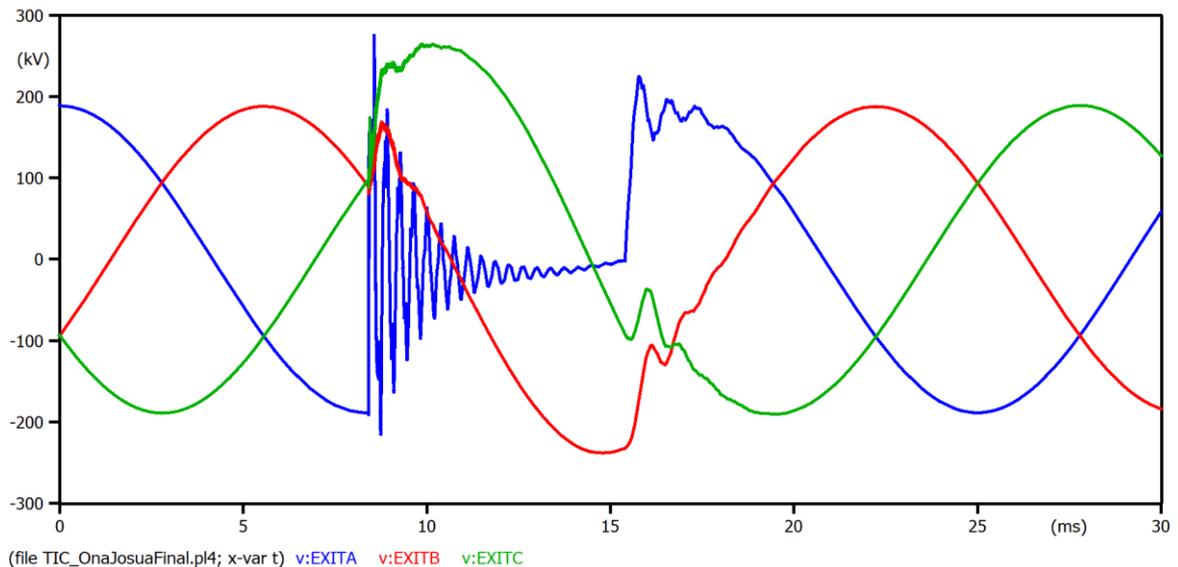
Como indica la Figura 3.9, la onda de voltaje de la fase B presenta una mayor afectación en comparación con las demás fases, es decir, presenta un sobrevoltaje con mayor amplitud, una gran cantidad de oscilaciones y tarda un mayor tiempo en estabilizarse (5

milisegundos aproximadamente), debido a que en el instante de la descarga la onda de la fuente en esa fase, como muestra la Figura 3.8, empieza en un semiciclo negativo y va creciendo conforme transcurre el tiempo, lo cual implica a que su onda se suma a la onda viajeras originadas por la caída del rayo; caso contrario ocurre con la fase C que empieza en un semiciclo negativo, pero va decreciendo conforme transcurre el tiempo.

En la onda de voltaje de la fase A se evidencia que la afectación es mínima, puesto que la onda de la fuente empieza en un semiciclo positivo y va decreciendo, conllevando a que su onda se vaya restando con la onda viajera producida por la caída del rayo.

#### *Descarga atmosférica en el Caso 2*

En este caso, ocurrirá algo similar al caso anterior; sin embargo, es importante considerar que la descarga atmosférica iniciará en otro instante de tiempo.



**Figura 3.10.** Resultados de voltaje obtenidos a la salida del cable cuando ocurre una descarga a los 8.33 milisegundos.

Como indica la Figura 3.10, las formas de onda presentan una cierta afectación durante un instante de tiempo; sin embargo, luego logran estabilizarse a partir de los 20 milisegundos debido a la actuación de los pararrayos.

La onda de la fase A será la más crítica en este caso debido a que la onda que viene de la fuente en esa misma fase, como indica la Figura 3.8, empieza en un semiciclo negativo y va creciendo conforme transcurre el tiempo, lo cual provoca que su onda se vaya sumando a las ondas viajeras originadas por la caída del rayo. En el resto de las fases ocurrirá lo contrario, es decir, en la fase B dado que la onda proveniente de la fuente en esa fase

empieza en un semiciclo positivo y va decreciendo conforme transcurre el tiempo, origina que su onda sea restada a las ondas viajeras originadas por la caída del rayo, al igual que en la fase C que su onda proveniente de la fuente empieza en un semiciclo positivo, pero va creciendo conforme transcurre el tiempo hasta alcanzar su pico, lo cual implica que ocurre una sumatoria con las ondas viajeras de la descarga durante un tiempo y luego una resta con las mismas.

### 3.1.7. Descargas atmosféricas directas en conductores

Los sobrevoltajes originados en líneas de transmisión por descargas directas en conductores de fase ponen en riesgo a todo el sistema. Por lo cual, es importante conocer cuáles son los efectos al ocurrir una descarga directa en el conductor de la fase A con una corriente máxima de fallo de apantallamiento igual a 28,4 [kA] como se muestra a continuación en la siguiente tabla:

**Tabla 3.1.** Resultados obtenidos al producirse una descarga directa en la fase A de magnitud igual a 28 [kA].

<b>Voltajes en la torre cercana al impacto de rayo [kV]</b>				
<b>Tope</b>	<b>Fase A</b>	<b>Fase B</b>	<b>Fase C</b>	<b>Cadena de aisladores de la Fase A</b>
693.6	1558.7	345.52	391.05	1474.5

La descarga en un conductor de fase conlleva a que las ondas viajeras se dividan en dos ondas iguales y se propaguen en ambos sentidos hasta encontrar el cable aislado. De esta forma, se puede observar cómo existe un sobrevoltaje en todas las fases, siendo en la fase A el más crítico, perceptiblemente por su impacto directo y provocando una descarga inversa en su cadena de aisladores.

Para descargas directas en el conductor de fase se considera en base a las simulaciones realizadas que la línea de transmisión a 230 [kV] se encuentra aislada para impulsos atmosféricos con magnitudes de corriente de hasta 6.2 [kA], es decir, valores entre 6.2 y 28 [kA] puede existir una falla del aislamiento y por lo tanto descargas inversas. En la Tabla 3.2, en base a la Ecuación 2.7 se muestra la probabilidad de que ocurra una descarga entre esos valores.

**Tabla 3.2.** Probabilidad de que la corriente de pico sea menor a estas corrientes.

<b>Corriente [kA]</b>	<b>Probabilidad [%]</b>
6.2	1.50
6.5	1.69
9	3.85
11.5	7.055
14	11.236
16.5	16.25
19	21.87
21.5	27.86
24	33.95
26.5	39.94
28	43.422

En la Tabla 3.2, se logra evidenciar que la probabilidad de ocurrencia incrementa conforme aumenta la magnitud de corriente del rayo; siendo este el factor más determinante en este tipo de descargas, puesto que a comparación de los casos anteriores no afecta la longitud del cable aislado o resistencia de pie de torre.

### **3.1.8. Comentario General**

Del análisis realizado se puede observar que, de todos los casos, el voltaje máximo obtenido a la entrada del cable es de 360,46 [kV] y el voltaje máximo obtenido a la salida del cable es de 503.45 [kV], siendo de acuerdo con las normas IEC, el nivel básico de aislamiento (BIL) de un cable de 230 [kV], 750 [kV], se puede apreciar que no existe afectación al aislamiento del cable.

La diferencia en las impedancias características de la línea aérea y del cable aislado tiene un efecto determinante en las magnitudes de voltaje en el cable aislado.

Cabe mencionar que, todos los resultados obtenidos previamente fueron válidos en base a la referencia [23].

## **3.2. Conclusiones**

- La diferencia de magnitud de la impedancia característica de la línea aérea y de la impedancia característica del cable aislado de alto voltaje, origen de la discontinuidad, determinan los sobrevoltajes que se obtienen en el sistema. La relación de impedancias características produce un coeficiente de transmisión de

la onda incidente que reduce la magnitud del voltaje a la que se somete el cable aislado.

- En los resultados obtenidos se puede concluir que la magnitud de la corriente del impulso atmosférico que cae en la torre o en el cable de guarda, es el parámetro que mayor incide en los valores máximos de sobrevoltajes, es decir, a una mayor magnitud de corriente mayor será el sobrevoltaje en el cable aislado.
- Las descargas atmosféricas, siempre y cuando su magnitud produzca descarga inversa a través de la cadena de aisladores, que caen en la torre de la línea de transmisión cercana al cable, producen mayores sobrevoltajes que aquellas descargas atmosféricas que caen en las torres más alejadas del cable y producen descargas inversas en las cadenas de esa torre.
- Las magnitudes de los sobrevoltajes producidos en el terminal remoto del cable aislado disminuyen conforme se incrementa la longitud del cable aislado.
- Mientras más baja es la resistencia de pie de torre de las torres de la línea de transmisión, la probabilidad de que se puedan producir descargas inversas a través de las cadenas de aisladores por efecto de descargas atmosféricas que golpean el cable de guarda o la torre es más baja.
- En los casos en los que se produce falla de apantallamiento (el impulso atmosférico impacta en el conductor de fase, por lo general en la fase más elevada), dependiendo de la magnitud del impulso atmosférico, es probable que se produzca la descarga desde el conductor de fase hacia la torre, a través de la cadena de aisladores, siendo necesario conocer hasta qué magnitud de corriente de la descarga atmosférica, no existen descargas inversas, de tal forma que se pueda realizar una correcta coordinación de aislamientos para que el cable aislado no se vea afectado.
- Al considerar la presencia de la fuente de 60 Hz, se concluye que el caso más crítico resulta cuando la descarga inversa originada por el impulso atmosférico coincide con los picos de ondas de voltaje del semiciclo negativo de la fuente, aunque su probabilidad de ocurrencia de este evento es muy baja. En consecuencia, el aporte de la presencia de la fuente de 60 Hz se puede considerar no relevante.
- Debido a la relación de las impedancias características de la línea de transmisión aérea y el cable aislado, las magnitudes de voltaje obtenidos en los dos extremos del cable aislado no son considerables como para que afecten la integridad del

mismo, por lo que en algunas aplicaciones se ha llegado a eliminar el pararrayos ubicado en el ingreso del cable.

- Considerando el estudio, diseño e instalación de líneas subterráneas, se concluye que la implementación de cables aislados resulta una alternativa aceptable en lugares donde existen restricciones para líneas aéreas, puesto que el dimensionar correctamente el cable y establecer una adecuada protección, son garantía de que el sistema eléctrico opere correctamente al ocurrir un impulso atmosférico.

### **3.3. Recomendaciones**

- En el presente trabajo se ha considerado el comportamiento del esquema de transmisión ante descargas atmosférica, para trabajos futuros, se recomienda analizar las protecciones eléctricas con el fin de garantizar una protección del sistema eléctrico y los equipos que lo conforman, minimizando, mitigando y reduciendo los riesgos.
- Existen algunas variables aleatorias (magnitud de la corriente de rayo, su frente de onda, lugar de la descarga, punto de la onda de la fuente de 60 Hz, etc.) en el desarrollo del fenómeno analizado y que en el presente trabajo se han considerado constantes y en algunos casos extremas, por lo que se recomienda realizar el análisis de estos fenómenos mediante simulaciones estocásticas.
- Se recomienda probar la metodología propuesta en sistemas eléctricos reales y analizar la validez de los resultados y los tiempos de cómputo que presenta el software ATP.

## 4. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] K. Sailema, X. Proaño y L. Ruales, «Análisis de sobrevoltajes a frecuencia industrial y por maniobra en líneas de transmisión a nivel de 500 kV,» Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2010.
- [2] J. A. M. Velasco, Coordinación de aislamiento en redes eléctricas de alta tensión, Madrid: McGRAW-HILL/INTERAMERICANA DE ESPAÑA, S. L., 2008.
- [3] E. J. Camacho Vargas, Cálculo de sobrevoltajes por descargas atmosféricas en subestación de 500 kV utilizando el ATP (Alternative Transients Program) aplicado a la subestación El Inga (antes Pifo) de 500 kV, Quito: EPN, 2014.
- [4] J. J. Grainger y W. D. S. Jr., Análisis de Sistemas de Potencia, 1996.
- [5] A. R. Hileman, Insulation Coordination for Power Systems, New York: CRC Press, 2018.
- [6] O. V. K. Sebastián, «Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP aplicado a la línea de transmisión Santa Rosa - Pomasqui a 230 kV,» EPN, Quito, 2003.
- [7] E. C. (Rusty), B. III y V. D. Antoniello, «Underground power cable considerations: Alternatives to overhead.,» Electrical Consulting Engineers, P.C., New York, 2011.
- [8] V. Vahedy, «Polymer Insulated High Voltage Cables,» 2006.
- [9] D. A. Tziouvaras, «Protection of High-Voltage AC Cables,» Schweitzer Engineering Laboratories, Inc., 2006.
- [10] C. T. B. No.531, Cable Systems Electrical Characteristics, Working Group B1.30, 2013.
- [11] L. P. F. P. Hans Kristian Høidalen, «ATPDRAW version 7.3 for Windows,» Mayo 2021.
- [12] L. Pilca y J. Yuquilema, Guía para el desarrollo de modelos de simulación en ATP para estudios de coordinación de aislamiento en sistemas tipo II, Quito, 2022.

- [13] P. X. P. Montalvo, Determinación de sobrevoltajes en el aislamiento de torres de transmisión considerando la variación aleatoria simultánea de los parámetros de las descargas atmosféricas, Quito, 2017.
- [14] A. G. Cruz, Análisis de la respuesta transitoria de Sistemas de Puesta a Tierra, Santa Clara: Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2012.
- [15] J. A. Martinez-Velasco, Power System Transients, CRC Press, 2017.
- [16] G. A. V. Cedeño, Diseño eléctrico de la línea de transmisión San Francisco–Culebra–Shushufindi, a 230 kV, basado en una baja tasa de fallo: sobrevoltajes por descargas atmosféricas, Quito: EPN, 2021.
- [17] E. Cuenca, Análisis y selección de modelos de descargadores para estudios de sobrevoltajes utilizando ATP, Quito, 2013.
- [18] Catálogo de productos, «Procables,» Enero 2021. [En línea]. Available: <https://www.nalelectricos.com.co/archivos/catalogo-procables.pdf>.
- [19] Phelps Dodge International Corp, «High-Extra High Voltage Power Cables,» Febrero 2016. [En línea]. Available: <https://www.pdcable.com/products/1.EHV-HV/Catalog%20HV.pdf>.
- [20] A. Ametani, T. Ohno y N. Nagaoka, Cable system transients, 2015.
- [21] O. P. Hevia, Fuentes Impulso en el ATP, Santa fe: CAUE-Comité Argentino de Usuarios del EMTP.
- [22] L. TCI Insulator., «Aislador TCI CATALOGUE,» 9 Abril 2020. [En línea]. Available: <https://es.dcinsulator.com/phoenix/admin/download?fileId=qJfUKpzBTkEj&dp=GvUApKfKKUAU>.
- [23] CIGRE 268, «Transient Voltages Affecting Long Cables,» *Working Group B1.05*, Abril 2005.

## 5. ANEXOS

### ANEXO I: SISTEMA DE PRUEBA

