



UNIVERSIDAD  
DE LOS ANDES  
MÉRIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INFLUENCIA DEL MODELADO DE LAS TORRES EN LA  
EVALUACIÓN DE LA OCURRENCIA DE BACK FLASHOVER  
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Br. Manuel Alejandro Mendez  
Albarran

Mérida, mayo, 2022



UNIVERSIDAD  
DE LOS ANDES  
MERIDA VENEZUELA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

INFLUENCIA DEL MODELADO DE LAS TORRES EN LA  
EVALUACIÓN DE LA OCURRENCIA DE BACK FLASHOVER  
EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Trabajo de Grado presentado como requisito parcial para optar al título de Ingeniero  
Electricista

Br. Manuel Alejandro Mendez  
Albarran

Tutor(es): PhD. Marisol Dávila Calderón.

Mérida, mayo, 2022

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**INFLUENCIA DEL MODELADO DE LAS TORRES EN LA  
EVALUACIÓN DE LA OCURRENCIA DE BACK FLASHOVER EN  
LÍNEAS DE TRANSMISIÓN**

Br. Manuel Alejandro Mendez Albarran

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

---

MSc. Ernesto José Mora Noguera

---

Ing. Jesús Manuel Márquez

---

PhD. Marisol Dávila Calderón

## **DEDICATORIA**

A Dios.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

A mis padres.

A Dilia.

## AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias por darme salud, sabiduría y por permitirme llegar a hasta este momento en mi carrera y en mi vida.

A mis padres, ustedes que, con su constante dedicación, apoyo, cariño y amor, me encaminaron por el sendero del bien, inculcando en mi responsabilidad y el deseo de superación, gracias.

A mi familia, Marcos, Cesar, Sthepany, Juan Pablo, Tía Francy, Tía Ramona, Tío Willmer, a ustedes, gracias por acompañarme y darme apoyo en diversas etapas de este largo camino.

A Nahomy, mi amor, a ti por tu paciencia y comprensión, por acompañarme en todo momento en esta etapa de mi vida, demostrando tu confianza en mí. Cada día entiendo aún más la calidez de tus abrazos por lo que estaré eternamente agradecido con tus gestos de apoyo y amor hacia mí, gracias.

A Kevin, a mi compañero de tantas vivencias en esta etapa de mi vida, contigo entendí que la verdadera hermandad no requiere lazos de sangre. Tu lealtad y nobleza me motivan cada día a ser mejor persona, gracias.

A mis hermanos de vida, Francisco y Sebastián, desde la adolescencia me han brindado su amistad incondicional. Gracias por su apoyo en las buenas y en las malas.

A Dilia, contigo inicio mi camino por la academia, fuiste una segunda madre para mí, sentí la intensidad de tu amor por mí en cada una de tus palabras. Espero estas orgullosas de mí, gracias.

A mi tutora, Prof. Marisol Dávila, por su asesoría y apoyo en la realización de este trabajo. Frente a las distintas dificultades siempre estuvo con la mayor dedicación y paciencia para orientarme, gracias.

A los profesores de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, que han colaborado y aportado en mi formación personal y profesional, a ustedes, todo mi agradecimiento.

A la ilustre Universidad de Los Andes, gracias por haberme permitido formarme y en ella, gracias a todas las personas que fueron partícipes en este proceso.

A la vida, que me ha dado tanto, me ha dado la marcha de mis pies, con ellos anduve por este camino el cual, si me tocara repetir, lo haría sin dudarlo un segundo.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

**Manuel Alejandro Mendez Albarran. Influencia del modelado de las torres en la evaluación de la ocurrencia de *back flashover* en líneas de transmisión.** Universidad de Los Andes. Tutor(es): PhD. Marisol Dávila Calderón. mayo de 2022.

## Resumen

En el presente trabajo de investigación se realiza un análisis de los diferentes modelos para el modelado de torres de transmisión, con el fin de determinar la influencia de su modelado en la evaluación de la ocurrencia de *back flashover*, así como la influencia que tienen las mismas en un sistema de transmisión. Por lo cual en primer lugar se seleccionan tres modelos a estudiar, modelo geométrico, multipisos y modelo multiconductor, posteriormente se analiza el comportamiento de cada uno de ellos ante la incidencia de una descarga atmosférica en la parte mas alta de la torre de transmisión, seguidamente se seleccionó el modelo con mejor respuesta para incorporarlo a un tramo de línea correspondiente a un sistema de potencia, análogamente se analiza dicho sistema ante las sobretensiones generadas por el impacto de la descarga atmosférica. Esta evaluación se realizó haciendo uso del software computacional llamado Alternative Transients Program (ATP) que permite la simulación de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética en sistemas de energía eléctrica, observándose la importancia que tiene la correcta utilización de un programa de simulación como este, con el cual se logró obtener resultados que permitieron evaluar los diferentes modelos utilizados para la torre de transmisión, consiguiéndose que el modelo mas adecuado es el multipisos por ser más sensible en cuanto a la geometría de las torres de transmisión, debido a que mostró mejores resultados en cuanto a la pérdida de potencia.

**Descriptor:** Sistemas de transmisión, Modelado de torres de transmisión, Modelado de líneas de transmisión, Descargas atmosféricas, Transitorios electromagnéticos, *Back flashover*.

## ÍNDICE GENERAL

APROBACIÓN .....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTOS .....	v
RESUMEN.....	vii
INDICE GENERAL .....	viii
INDICE DE FIGURAS .....	x
INDICE DE GRAFICAS .....	xii
INDICE DE TABLAS.....	xiii
INTRODUCCIÓN .....	1

Capítulo	pp.
<b>1. ¿POR QUÉ MODELAR UNA TORRE TRANSMISION?.....</b>	<b>3</b>
1.1 Antecedentes .....	3
1.2 Justificación .....	5
1.3 Planteamiento del Problema .....	6
1.4 Objetivos .....	7
1.4.1 Objetivos Generales .....	5
1.4.2 Objetivos Específicos .....	5
1.5 Marco Metodológico.....	7
<b>2. MARCO TEORICO .....</b>	<b>8</b>
2.1 Sistemas de transmisión .....	8
2.1.1 Líneas de transmisión .....	9
2.2 Transitorios Electromagnéticos .....	10
2.2.1 Transitorios .....	10
2.2.2 Transitorios por descargas Atmosféricas .....	12
2.2.2.1 Forma de onda de corriente de una descarga atmosférica.....	12
2.2.3 Descargas directas en conductor de fase .....	13
2.2.4 Descargas directas en conductor de guarda .....	14
2.2.5 Descargas directas en la torre.....	15
2.3 Back flashover.....	15
2.4 Modelado de torres de transmisión .....	16
2.4.1 Modelo de línea vertical sin pérdidas.....	16



2.4.2	Modelo de línea vertical multiconductora.....	
2.4.3	Modelo multipisos.....	19
2.5	Software ATP.....	24
		26
	<b>MODELADO DE LA TORRE PARA LA EVALUACIÓN DE SU</b>	
<b>3.</b>	<b>COMPORTAMIENTO.....</b>	
3.1	Modelo de la resistencia puesta a tierra.....	27
3.2	Modelo de la descarga atmosférica.....	29
3.3	Modelo de línea vertical sin pérdidas.....	29
3.4	Modelo de línea vertical multiconductora.....	30
3.5	Modelo multipisos.....	33
3.6	Caso de aplicación.....	43
3.6.1	Simulación del sistema de potencia en ATP.....	50
3.6.1.1	Modelo de fuente de generación.....	52
3.6.1.2	Modelo de aisladores.....	52
3.6.1.3	Modelo de la línea de transmisión.....	52
		53
	<b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b>	
	Conclusiones.....	59
	Recomendaciones.....	59
		61
	<b>REFERENCIAS .....</b>	
		62

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Tabla</b>		<b>pp.</b>
2.1	Torre de transmisión.....	10
2.2	Representación de transitorio tipo impulso y oscilatorio.....	11
2.3	Impulso de rayo estandarizado.....	13
2.4	Impacto directo a conductor de fase.....	14
2.5	Impacto directo a conductor de guarda.....	14
2.6	Forma de torre cilíndrica.....	17
2.7	Forma de torre cónica.....	18
2.8	Forma de torre tipo cintura.....	19
2.9	Modelo de línea vertical multiconductora.....	20
2.10	Diferentes configuraciones de los sistemas de conductores.....	22
2.11	Equivalente de torre de transmisión según el modelo multiconductor.....	23
2.12	Modelo de torre multipisos.....	24
2.13	Geometría equivalente para calcular el radio.....	25
3.1	Torre de transmisión de 230 kV.....	28
3.2	Torre de transmisión de 400 Kv.....	28
3.3	Modelado de la resistencia puesta a tierra en ATP.....	29
3.4	Modelado de la descarga atmosférica en ATP.....	29
3.5	Modelado de la impedancia característica en ATP.....	30
3.6	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada como una línea vertical sin pérdidas.....	31
3.7	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada como una línea vertical sin pérdidas.....	32
3.8	Radio Geométrico.....	35
3.9	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada mediante el modelo multiconductor.....	38
3.10	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada mediante el modelo multiconductor.....	40
3.11	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada mediante el modelo multipisos.....	46
3.12	Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada mediante el modelo multipisos.....	48
3.13	Modelo de fuente de Generación.....	52
3.14	Modelo de Aislador.....	52

3.15	Modelo de la línea de transmisión.....	53
3.16	Modelado del SEP con las torres de transmisión y la descarga atmosférica.....	54

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## ÍNDICE DE GRAFICAS

<b>Tabla</b>	<b>pp.</b>
3.1 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 230 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	31
3.2 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 400 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	32
3.3 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 230 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	39
3.4 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 400 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	41
3.5 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 230 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	47
3.6 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 400 kV con variaciones de RPT: 10Ω (a); 20Ω (b) y 30Ω (c).....	49
3.7 Voltajes de salida de la línea con la condición 1: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3(c).....	54
3.8 Voltajes de salida de la línea con la condición 2: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3(c).....	55
3.9 Voltajes de salida de la línea con la condición 3: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3(c).....	56
3.10 Voltajes de salida de la línea con la condición 4: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3(c).....	57
3.11 Voltajes de salida de la línea con la condición 4, con distancias de 10km por cada tramo.....	58

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla</b>		<b>pp.</b>
3.1	Características dimensionales de la torre de transmisión de 230 kV.....	34
3.2	Características dimensionales de la torre de transmisión de 400 kV.....	37
3.3	Parámetros para el modelado de la torre de transmisión de 400 kV por el método multiconductor.....	37
3.4	Dimensiones de la torre de transmisión de 400 kV.....	44
3.5	Parámetros para el modelado de la torre de transmisión de 400 kV por el método multipisos.....	45
3.6	Características del conductor de fase.....	51
3.7	Características del conductor de guarda.....	51
3.8	Distancias de los tramos de la línea de transmisión.....	51

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)

## INTRODUCCION

Las líneas de transmisión son uno de los elementos más importantes que conforman los sistemas eléctricos de potencia debido a que fundamentalmente cumplen la función de medio de transporte de la energía generada hacia los centros de consumo como zonas residenciales e industrias. Al ser una red de transporte ellas están soportadas por estructuras metálicas de gran altura, para así cumplir su función de traslado de energía entre grandes distancias.

Debido a que son sistemas aéreos, estos son vulnerables a fenómenos atmosféricos que pueden ocurrir a lo largo de su trayectoria. Uno de estos fenómenos son los impactos de descargas atmosféricas, los cuales pueden generar magnitudes de sobretensión tan elevados que podrían generar fallas de gran envergadura en componentes de los sistemas de transmisión y demás elementos que forman parte de un sistema eléctrico de potencia.

Las descargas atmosféricas pueden impactar en distintos lugares de la línea de transmisión, en el conductor de fase, conductor de guarda o directamente en la estructura de la torre, al presentarse el impacto en estas dos últimas, provoca que a lo largo de la torre se presente una corriente muy elevada la cual siempre deberá de llegar al sistema de puesta tierra de la torre, el cual debería tener la capacidad de diseminar esta corriente, de no ser así, la corriente retornaría por la estructura de la torre generando así el fenómeno llamado *back flashover*.

Por ello la importancia de un correcto y completo modelado de los componentes que forman parte de las líneas de transmisión, con el propósito de evaluar sus rendimientos principalmente cuando se tienen incidencias de descargas atmosféricas y la presencia del *back flashover*.

En este trabajo de investigación se propone estudiar la influencia del modelado de las torres de transmisión en la evaluación de la ocurrencia del *back flashover* en las líneas de transmisión, mediante el uso de tres modelos, el modelo geométrico, multipisos y el modelo multiconductor.

El presente escrito se compone de tres capítulos. En primer lugar, el capítulo uno, expone la problemática existente ante la ocurrencia de las descargas atmosféricas en los sistemas de transmisión y, por consiguiente, los motivos de un correcto modelado de los elementos de las líneas, específicamente las torres de transmisión. De igual forma se exponen los principales antecedentes elegidos para el desarrollo de este estudio, así como los objetivos generales y específicos de esta investigación.

En el capítulo dos, se incluyeron los conceptos básicos necesarios para poder entender que son los sistemas de transmisión y sus componentes, así como una breve descripción de los transitorios electromagnéticos y sus tipos, incluyendo la ocurrencia del *back flashover*. De igual forma se presenta una detallada exposición de los modelos a ejecutar para los modelados de las torres y una breve explicación del software computacional seleccionado para las simulaciones.

En el capítulo tres, se desarrolla el modelado de la torre para la evaluación de su comportamiento ante de la ocurrencia del *back flashover*, describiendo los diversos factores que intervienen en su formación. Como lo es la resistencia puesta a tierra, la magnitud de la descarga atmosférica, distancia entre torres e impedancia característica de la torre. Se hacen uso de dos ejemplos de torres de transmisión, una de 230 kV y otra de 400 kV, con las cuales se desarrollaron tres modelos, el geométrico, específicamente el modelo cónico, el modelo multipisos y el modelo multiconductor. Posteriormente se implementó el modelo multipisos en un sistema de potencia de 230 kV para así estudiar la influencia de la torre en un sistema completo. Del mismo modo se exponen los análisis de las gráficas resultantes de las simulaciones.

Finalmente, partiendo de los resultados obtenidos se generan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

# **CAPÍTULO I**

## **¿POR QUÉ MODELAR UNA TORRE DE TRANSMISIÓN?**

Indudablemente uno de los principales aspectos a cuidar en los sistemas eléctricos de potencia es su confiabilidad, por su gran impacto en la continuidad del servicio. Entre las diversas razones por las cuales puede verse interrumpido el servicio eléctrico se encuentra las fallas de red ocasionadas por fenómenos transitorios que pueden ser de origen interno, a raíz de operaciones de maniobra o externos, como por ejemplo las descargas atmosféricas.

Los fenómenos transitorios causados por descargas atmosféricas han sido trabajados por una gran cantidad de autores, obteniendo así diversos puntos de análisis de los efectos ocasionados por estas descargas eléctricas en los sistemas de transmisión, específicamente, en las torres de transmisión. Las torres de transmisión eléctrica tienen como propósito soportar y transportar líneas de transmisión de energía eléctrica por lo que es necesario un correcto y completo modelado, usando programas computacionales que permitan estudiar de manera precisa su comportamiento ante los fenómenos transitorios antes mencionados.

### **1.1 ANTECEDENTES**

Existen diversos trabajos de investigación dirigidos al área de fenómenos transitorios y transmisión de energía eléctrica, pues las empresas de suministro eléctrico requieren estos estudios, debido a la necesidad de contar con una variedad de datos que les permitan garantizar el rendimiento óptimo de los sistemas de transmisión mediante el diseño y análisis



eficiente de obras y estructuras, en tal sentido se hace referencia a algunas investigaciones realizadas.

Gutiérrez V. Martín, Martín P. Pedro. (2007) desarrollaron el proyecto titulado “*Análisis de flameo inverso en líneas de transmisión de 400 kV utilizando el ATP*” con el objetivo, de comprobar que el valor de resistencia del sistema puesta a tierra debe tener una magnitud tal que garantice un nivel de protección alto, frente a la ocurrencia del flameo inverso, por consiguiente simularon los efectos de la descarga atmosférica en un circuito equivalente de la torre y su sistema de puesta a tierra, realizando pruebas para magnitudes de resistencia de  $0 \Omega$ ,  $10 \Omega$ , ... ,  $50 \Omega$  [1].

Celis L. Daniel S (2009) elaboró un proyecto titulado “*Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas de transmisión, utilizando el programa EMTP/ATP*”, este proyecto es un estudio del fenómeno transitorio electromagnético que se manifiesta en líneas de transmisión por efecto de descargas atmosféricas, mediante el planteamiento de un procedimiento para su modelación y simulación utilizando el programa ATP, complementado con el método Monte Carlo para el cálculo de la tasa de *back flashover*. En este análisis se consideró que las descargas atmosféricas impactan al cable de guarda o al conductor de fase en las cercanías de la torre de transmisión [2].

En octubre del 2014 Marcano N., Genesis D., realizó el Modelado de la Torre de Transmisión para determinar su comportamiento ante descargas atmosféricas haciendo uso de la transformada numérica de Laplace, la cual le permitió incorporar de una forma directa la dependencia frecuencial de los parámetros tanto de la línea de transmisión como de la torre [3].

F. S. Almeida, F. H. Silveira, A. De Conti, S. Visacro (2021). Publicaron un artículo titulado “*La influencia del modelado de torres en la evaluación de ocurrencia de back flashover en líneas de transmisión*” en el cual evaluaron la influencia del modelado de torres en el cálculo de tensiones a través de cadenas aislantes, corrientes críticas y porcentaje de ocurrencia del *back flashover*, haciendo uso de torres típicas de 130 kV a 500 kV, en este trabajo consideraron tres tipos de modelado de torre: Geométricos, multipisos y multiconductores [4].

## 1.2 JUSTIFICACION

Uno de los elementos más importantes del sistema de potencia, lo constituyen las líneas de transmisión, por tanto, es necesario su correcto y completo modelado, a fin de poder evaluar su rendimiento, principalmente cuando se tienen incidencias de descargas atmosféricas y presencia de *back flashover*.

Para estimar la probabilidad de ocurrencia de un *back flashover*, es necesario determinar el voltaje a través de la cadena de aisladores, el cual corresponde a la diferencia de voltaje entre la torre y la tensión inducida en el conductor de fase, por tanto la calidad de la estimación depende del método de cálculo seleccionado, el cual puede ser analítico basado en circuitos o basado en análisis de campos electromagnéticos y por supuesto también depende de la precisión en el modelado de cada uno de los elementos de la línea de transmisión incluida la torre.

Para poder realizar estas estimaciones es necesario realizar un modelado completo de las líneas de transmisión incluyendo las torres y así poder determinar su comportamiento ante la presencia de transitorios electromagnéticos como los causados por las descargas atmosféricas. Para ello se han desarrollado numerosas metodologías y muchas ellas sugieren el uso de los llamados modelos geométricos de las torres.

Estos modelos tienen como objetivo determinar la impedancia característica de la torre mediante expresiones, asumiendo la torre como un sólido geométrico equivalente. Otro modelo como el llamado multipisos, considera la división de la torre en elementos más cortos, cada uno representado con un conjunto particular de impedancias características de la torre que dependen de la altura geométrica de la misma.

De igual forma se sugiere el modelo multiconductor, que al igual que el modelo de varios pisos, también dividen la torre en secciones para luego representarlas como una línea vertical multiconductora, que puede reducirse a un solo conductor. El propósito de este trabajo es determinar la influencia de los diferentes modelos de torres sobre la estimación del rendimiento de las líneas de transmisión ante la presencia de rayos con especial atención a la ocurrencia de *back flashover*.

### 1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La infraestructura de un sistema de transmisión eléctrica es elemental para el crecimiento energético de cada país, razón por la cual unas de las tareas fundamentales a considerar al momento de fijar todos los detalles necesarios para construir una línea de transmisión, es la confiabilidad del tendido, en otras palabras, la exigencia de respaldar el correcto funcionamiento de la línea.

Existen varias razones por las cuales una línea de transmisión puede salir de servicio, estas pueden ser errores de maniobra, salidas programadas, por algún origen mecánico propio del sistema y a descargas atmosféricas, esta última representa la principal causa de las salidas de servicio debido al exceso de energía que operan en tan pequeños intervalos de tiempo logrando destruir o causar inconvenientes en los diferentes elementos del tendido.

En este sentido, conocer las sobretensiones que las descargas atmosféricas pueden causar es importante a la hora de dimensionar los aspectos básicos del tendido, como por ejemplo los equipos de protección, posición de la torre y resistencia de puesta a tierra. Igualmente es importante el análisis de los efectos que puede producir el fenómeno natural en los diferentes elementos de la torre.

Debido a esto, mediante diversos estudios se han desarrollado gran cantidad de modelos circuitales que permiten modelar los componentes del sistema de manera oportuna. El modelado de las torres de transmisión es uno de los elementos que permiten analizar los efectos causados por los sobrevoltajes y corrientes asociadas a las descargas atmosféricas, por tal razón en este trabajo se plantea realizar el modelado de dichas torres aplicando algunas de las técnicas encontradas en la literatura y de esa manera poder comparar con resultados presentados por otros autores.

## 1.4 OBJETIVOS

### 1.4.1 Objetivos Generales

Determinar la influencia del modelado de las torres en la evaluación de la ocurrencia de *back flashover* en líneas de transmisión.

### 1.4.2 Objetivos Específicos

- Estudiar y comprender los diferentes modelos de representación de las torres de potencia.
- Seleccionar un programa computacional para el modelado de la torre.
- Determinar cuál o cuáles modelos de torre son más precisos para su incorporación en el modelado de la línea de transmisión.
- Incorporar el modelo de la torre de transmisión seleccionado a un sistema de potencia y simular su comportamiento ante la presencia de descargas atmosféricas.
- Analizar el comportamiento del modelo de torre seleccionado.

## 1.5 MARCO METODOLÓGICO

La metodología a seguir es de tipo estudio teórico en donde se estudiarán los diferentes modelos establecidos para representar una torre de transmisión y luego se modelará utilizando un programa computacional adecuado que permita determinar el comportamiento de dichas torres en el sistema de potencia ante la presencia de fenómenos transitorios, los resultados obtenidos deben ser comparados con aquellos previamente obtenidos por otros autores utilizando diferentes técnicas de modelado.

## CAPÍTULO II

# LA TORRE COMO ELEMENTO DE UNA LÍNEA DE TRANSMISIÓN

El realizar una investigación implica analizar y exponer un sistema coherente de conceptos que posibilite orientar el tema en estudio mediante un conjunto de conocimientos, que sirvan de guía y permitan una conceptualización de los términos que se utilizaran. De acuerdo con el razonamiento que se ha venido realizando, a continuación, se muestra una revisión teórica de los conceptos que se utilizaran en el estudio de la “Influencia del modelado de las torres en la evaluación de la ocurrencia de *back flashover* en líneas de transmisión”, tales como: sistemas de transmisión, transitorios electromagnéticos, sobretensiones, modelado de torres de transmisión, software ATP, entre otros aspectos.

### 2.1 SISTEMAS DE TRANSMISIÓN

Los sistemas de energía eléctrica constan de varios elementos fundamentales para que la energía llegue a ciudades, industrias y comercios. La función de un sistema de transmisión es interconectar los nodos de generación con los nodos de carga, una vez generada la energía eléctrica, es necesario llevar a cabo una adecuada distribución de la energía según las necesidades de la población, esta distribución se realiza mediante nodos del sistema de potencia que están representados físicamente por las subestaciones que alimentan los circuitos de distribución primaria.

La etapa que une la distribución con los centrales generadores de energía eléctrica, son los circuitos de transmisión, representados mediante las líneas de transmisión.

### 2.1.1 Líneas de Transmisión

Una línea de transmisión es básicamente el medio de transporte de la energía generada hacia los centros de consumo como zonas residenciales, industrias. Al ser una red de transporte, las líneas de transmisión son diseñadas para ser capaces de transmitir la energía eléctrica de un punto a otro con el mínimo de pérdidas, de manera confiable y económica, dentro de las condiciones técnicas requeridas. Entre las variables a tomar en cuenta en el diseño están los valores máximos de voltajes y corrientes que pueden estar presentes en la operación de las líneas, estos valores máximos de corriente y voltaje se traducen en la máxima potencia que una línea es capaz de transmitir sin que se afecte la integridad de la misma o sin provocar perturbaciones en la operación del sistema de potencia [5].

Físicamente las líneas están constituidas por [5]:

- Los conductores, existen dos tipos que pueden aparecer en una línea, los conductores de fase que son los cables que se extienden entre dos torres o postes con la finalidad de que la corriente eléctrica fluya y los conductores o cables de guarda cuya función es proteger los conductores de fase contra descargas atmosféricas.
- Las torres de transmisión como la mostrada en la figura 2.1, son las estructuras de gran altura, normalmente construida en celosía de acero, cuya función principal es servir de soporte de los conductores eléctricos aéreos de las líneas de transmisión.
- Cadena de aisladores, cumplen la función de sujetar mecánicamente el conductor de fase manteniéndolo aislado de tierra y de otros conductores, su propósito es aislar eléctricamente el conductor de la torre, soportando la tensión en condiciones de normales y de sobretensiones.
- Resistencia de pie de tierra, debido a las sobretensiones eléctricas que se presentan por descargas atmosféricas y/o transitorios, los sistemas se conectan a tierra para limitar los efectos que ocasionan dichos fenómenos. Físicamente se pueden presentar

como una varilla o malla de metal conductora introducida en el terreno para dispersar las corrientes a tierra [5].

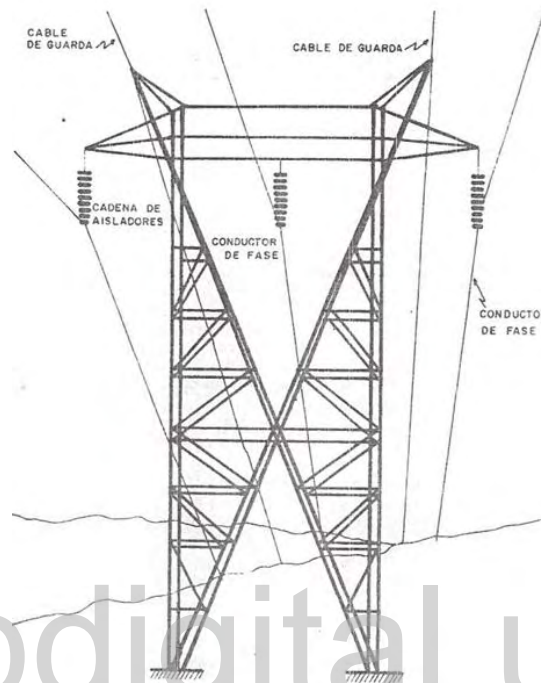


Figura. 2.1 Torre de transmisión [5].

## 2.2 TRANSITORIOS ELECTROMAGNÉTICOS

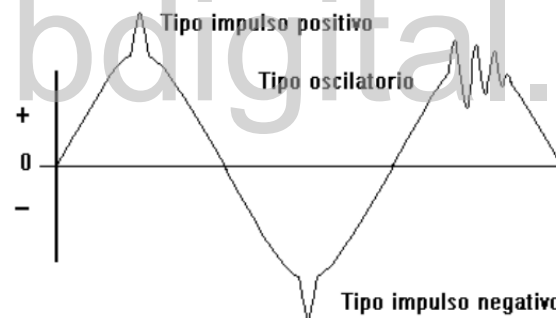
### 2.2.1 Transitorios

Los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP) están expuestos a fenómenos transitorios que a pesar de que tienen un tiempo de duración corto, presentan perturbaciones sobre las ondas de tensión y corriente que son capaces de producir daños de gran envergadura en los componentes del SEP. En general los transitorios se originan debido a cambios repentinos en las condiciones de operación o configuración de los sistemas [6].

Los fenómenos transitorios pueden ser de origen interno, a raíz de operaciones de maniobra o externos, como por ejemplo las descargas atmosféricas o rayos, siendo estos últimos un potencial peligro para los equipos que componen los SEP.

A pesar de presentarse durante un tiempo corto existen tres clasificaciones de los transitorios de acuerdo a su duración: los ultrarrápidos que están relacionados a las descargas atmosféricas, maniobras internas de conexión y desconexión de componentes del SEP, los fenómenos transitorios medianamente rápidos que se deben a cambios repentinos como cortocircuitos o aperturas de líneas y por último los transitorios lentos, que pueden presentar oscilaciones mecánicas en los rotores, cuando ocurre un cortocircuito en una línea de transmisión y no es desconectada de manera oportuna [7].

De igual forma las perturbaciones que generan los transitorios en las ondas sinusoidales de la tensión, pueden ser divididas en dos categorías, del tipo impulso y tipo oscilatorio tal como se muestra en la figura 2.2 [7].



**Figura 2.2. Representación de transitorio tipo impulso y oscilatorio [7].**

-Transitorios tipo impulso: Son transitorios de alta frecuencia, la cual es distinta a la del sistema en estado estacionario en cualquier condición de tensión o corriente. Este tipo de transitorio puede presentarse a raíz de maniobras de interrupción, elementos de electrónica de potencia y descargas atmosféricas.

-Transitorios tipo oscilatorio: Ocasionan un cambio repentino en las ondas sinusoidales de tensión o de corriente, o ambas, tanto los límites positivos como negativos de la señal, que oscila a frecuencia normal del sistema. Estos transitorios ocurren cuando se



energizan cargas inductivas o capacitivas, como un motor o banco de capacitores [7].

## 2.2.2 Transitorios por Descargas Atmosféricas

Las descargas atmosféricas son unas de las mayores causas de los fenómenos transitorios del tipo impulso. Un rayo puede generar sobrevoltajes que terminen provocando fallas en una línea de transmisión o se propague y debido a las altas frecuencias presentadas pueda provocar averías en otros equipos del SEP.

El rayo puede generar magnitudes de sobretensión tan elevadas frente a los valores de tensión nominal del sistema, que el nivel de aislamiento de componentes, selección y coordinación de protecciones se realiza tomando en cuenta el efecto de las descargas atmosféricas para así evitar el deterioro o falla en los aislamientos de los equipos del SEP como transformadores, cables, interruptores, condensadores, entre otros [8].

### 2.2.2.1 Forma de onda de corriente de una descarga atmosférica

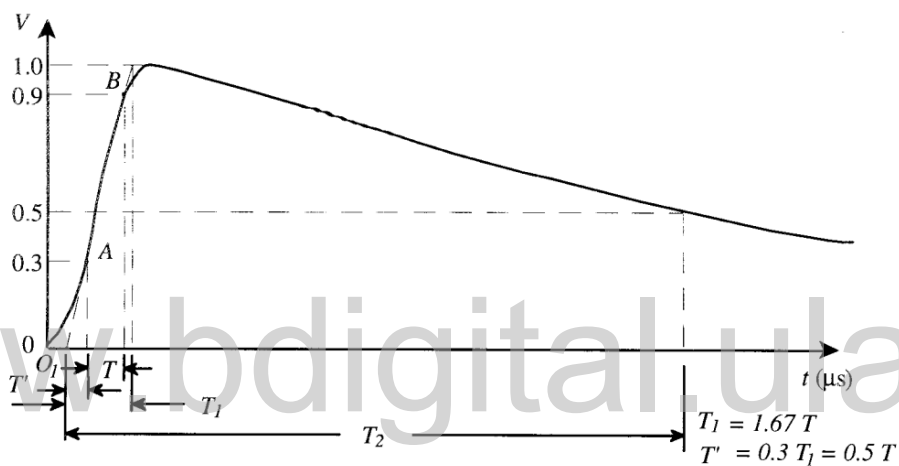
La naturaleza impredecible del rayo hace que las formas de ondas de la corriente y sus amplitudes no sean las mismas en cada descarga. Las corrientes de los rayos y sus sobrevoltajes son impulsos unipolares, que forman estímulos de un frente en rápido ascenso para luego continuar por una cola en descenso.

Ahora bien, a pesar de que las formas de ondas de las sobretensiones atmosféricas varían en amplitud y los tiempos tanto de frente como de cola de onda, se han estandarizado para poder efectuar pruebas en componentes y máquinas eléctricas. La norma ANSI/IEEE Estándar 4-1995 establece [9]:

- El tiempo inicial ( $T_I$ ) de un impulso de rayo es 1,67 veces el intervalo de tiempo entre los instantes cuando el impulso es 30% y 90% del valor pico, lo que corresponde a los puntos A y B en la figura 3.
- El origen ( $O_I$ ) de un impulso de rayo es el instante que anticipa al correspondiente al punto A en la figura 3 por un tiempo  $0.3 T_I$ . Esta es la intersección con el eje temporal

de una línea recta trazada a través de los puntos de referencia A y B en la parte delantera.

- El tiempo de valor ( $T_2$ ) de un impulso de rayo es el intervalo de tiempo entre el origen y el instante en la cola cuando el voltaje ha disminuido a la mitad de su valor pico.
- El impulso estándar del rayo es un impulso completo que tiene un tiempo inicial de  $1,2 \mu s$  y un tiempo dividido por valor de  $50 \mu s$ . Se describe como un impulso  $1.2/50$ .

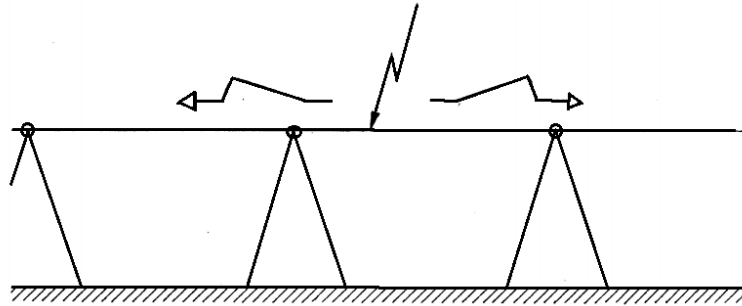


**Figura 2.3. Impulso de rayo estandarizado [9].**

Los sobrevoltajes de origen atmosférico se pueden clasificar según su lugar de impacto, que pueden ser de manera indirecta o directa. El impacto indirecto ocurre cuando la descarga cae en cercanías de la línea de transmisión, generando la posibilidad de provocar tensiones superiores al nivel de aislamiento. Se clasifica un impacto de tipo directo cuando la descarga cae sobre la estructura, cable de guarda o el conductor de fase [9].

### 2.2.3 Descargas directas en conductor de fase

Cuando los rayos impactan directamente al conductor de fase, las altas corrientes y frecuencia de la descarga causan impulsos que se dividen en dos partes iguales a partir del punto de choque, dando lugar a dos tensiones que se propagaran en ambos sentidos (Figura 2.4).



**Figura 2.4. Impacto directo a conductor de fase [10].**

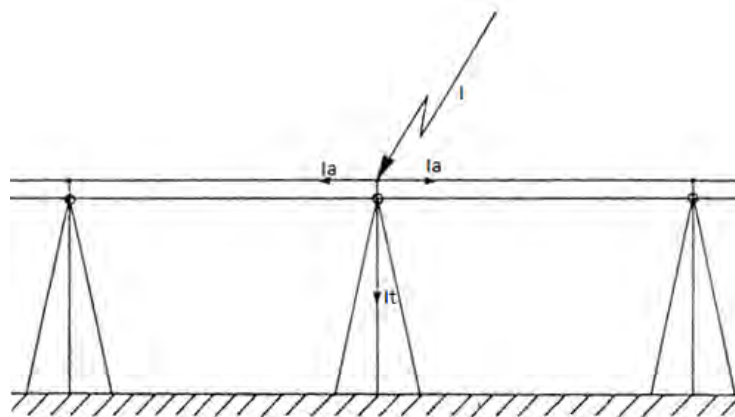
La tensión máxima originada en el conductor donde impacta el rayo vendrá dada por

$$V_{c1} = \frac{Z_c I}{2} \quad (2.1)$$

Siendo  $Z_c$  la impedancia característica del conductor en Ohm ( $\Omega$ ), y la corriente  $I$  la intensidad máxima del rayo en Amperios (A) [10].

#### 2.2.4 Descargas directas en conductor de guarda

El análisis para el impacto del rayo en el conductor de guarda es similar al impacto en el conductor de fase, las ondas de tensión producidas por la corriente,  $I_a$  viajarán por el hilo de guarda a ambos lados de la torre tocada, como muestra la figura 2.5.  $I_t$  siendo una parte de la corriente inyectada se propagará a tierra donde generará sucesivas reflexiones que pueden dar lugar a una tensión superior a la rigidez dieléctrica del aislamiento entre la torre y alguno de los conductores de fase [10].



**Figura 2.5. Impacto directo a conductor de guarda [10].**

### 2.2.5 Descargas directas en la torre

Si el impacto del rayo ocurre directamente sobre la torre, la corriente del rayo se dividirá entre una parte que viajara a tierra a través de la torre y otra se dividirá en dos partes iguales que se propagaran en ambos sentidos a través del cable de guarda. Al llegar al suelo la corriente que viaja a través de la torre y se tope con una alta resistencia ocasionando así que no encuentre un entorno adecuado para la dispersión de la corriente de manera eficiente generando un alto potencial eléctrico que al ser superior que el aislamiento de la línea provocaría una falla llamada *back flashover* [10].

### 2.3 Back Flashover

Los sistemas de líneas de transmisión son los elementos más amplios de un sistema eléctrico de potencia desde el punto de vista físico, por lo que tiene mayor exposición a ser afectado por fenómenos externos como lo son las descargas atmosféricas, que pueden perturbar su correcto funcionamiento.

Como se describía en los puntos anteriores, los impactos del rayo pueden darse en distintos lugares de las líneas de transmisión, en el conductor de fase, en el conductor de guarda o directamente en la estructura de la torre de transmisión [11].

El rayo al impactar sobre el cable de guarda o en la estructura metálica de la torre, la corriente recorre dicha estructura hasta llegar a la base de la misma, encontrando una alta resistencia de puesta a tierra, ocasionando que no encuentre un medio ideal para un correcto esparcimiento de la corriente del rayo generando así que la estructura alcance un alto potencial eléctrico hasta el punto que supera el aislamiento por el aire exterior a la cadena de aisladores presentando así el fenómeno llamado *back flashover*.

En síntesis, el *back flashover* se presenta porque la corriente del rayo en su camino a la tierra ocasiona una sobretensión entre la estructura y los aisladores, hasta el punto que sobrepasa el aislamiento que proporciona el aire a la cadena de aisladores, presentando un flameo desde el brazo de la torre hasta el punto de conexión del conductor de fase [8].

## 2.4 MODELADO DE TORRES DE TRANSMISION

Mediante múltiples estudios se han desarrollado modelos circuitales que permiten modelar los componentes del sistema de potencia de manera oportuna. El modelado de las torres de transmisión es uno de los elementos que permiten analizar los efectos causados por los sobrevoltajes y corrientes asociadas a las descargas atmosféricas.

A pesar de que el fenómeno transitorio generado por los rayos es de origen electromagnético, la representación de una torre es habitual realizarla en términos circuitales. De acuerdo a la estructura de la torre, la misma se puede representar con la ayuda de varias secciones de línea y elementos circuitales. Una de las razones por la cual se utiliza este planteamiento, es que tal representación puede ser implementada en herramientas de simulación digital como ATP-EMTP.

La representación más simple de una torre es una línea de transmisión de parámetros distribuidos sin pérdidas, caracterizada por una impedancia de sobretensión y un tiempo de viaje. Esta representación comúnmente se realiza para conocer las sobretensiones, generadas por las descargas atmosféricas, a través de aislantes ubicados a diferentes alturas sobre el nivel del suelo; esto es particularmente importante cuando dos o más líneas de transmisión con diferentes niveles de tensión comparten la misma torre.

Los modelos basados en una representación circuital de parámetros constantes se pueden clasificar en tres grupos; la torre representada como una línea vertical sin pérdidas, como una línea vertical multiconductora o como un modelo multipisos [12].

### 2.4.1 Modelo de línea vertical sin pérdidas

La teoría de campos electromagnéticos se usó para el desarrollo de los primeros modelos, representando la torre por medio de formas geométricas simples, y asumiendo un movimiento vertical a la parte superior de la torre. Wagner y Hileman utilizaron un modelo cilíndrico y concluyeron que *“la impedancia de la torre varía a medida que la ola baja hasta el suelo.”*. Por su parte, Sargent y Darveniza utilizaron un modelo cónico y sugirieron *“una forma modificada para el modelo cilíndrico”*. De igual manera, Chisholm propuso una ecuación

modificada de los modelos anteriores considerando una corriente de trazo horizontal y recomendó un nuevo modelo para las torres que tienen una forma de cintura.

– **Modelo tipo cilíndrico**

La impedancia característica, medida en ohm ( $\Omega$ ), para las formas de torre tipo cilíndricas como se muestra en la figura 2.6, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Z = 60 \cdot \left( \ln \left( 2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 1 \right) \quad (2.2)$$

Donde

$h$  es la altura de la torre en metros (m).

$r$  es el radio de la base de la torre en metros (m).

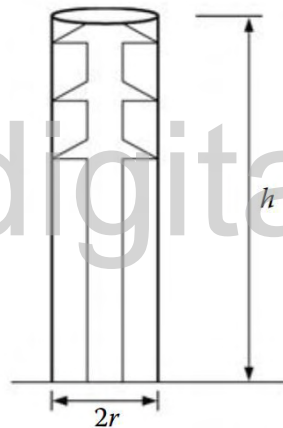


Figura 2.6 Forma de torre cilíndrica [12].

El tiempo de viaje está dado por la expresión 2.3

$$t = \frac{h}{0,85 \cdot c} \quad (2.3)$$

– **Modelo tipo cónico**

La impedancia característica, medida en ohm, para las formas de torre tipo cónica como se muestra en la figura 2.7, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Z = 60 \cdot \ln \left( \sqrt{2} \cdot \sqrt{\left( \frac{h}{r} \right)^2 + 1} \right) \quad (2.4)$$

Donde

$h$  es la altura de la torre en metros (m).

$r$  es la radio de la base de la torre en metros (m).

Si  $h > r$ , la expresión 2.4 puede ser aproximada por:

$$Z \approx 60 \cdot \ln\left(\sqrt{2} \frac{h}{r}\right) \quad (2.5)$$

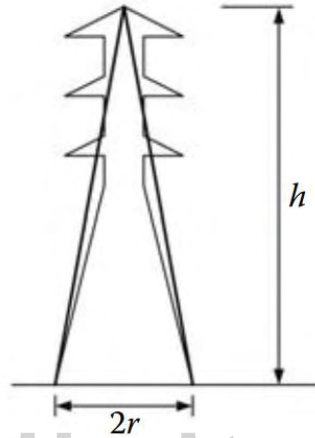


Figura 2.7 Forma de torre cónica [12].

El tiempo de viaje está dado por la expresión 2.6

$$t = \frac{h}{c} \quad (2.6)$$

Las ecuaciones descritas anteriormente son convenientes si se asume una trayectoria vertical del rayo.

#### – Modelo tipo cintura

La impedancia característica, medida en ohm, para las formas de torre tipo cintura como se muestra en la figura 2.8, se puede calcular mediante la siguiente expresión:

$$Z = \sqrt{\frac{\pi}{4}} \cdot 60 \cdot \left( \left( \ln \cot \frac{\theta}{2} \right) - \ln \sqrt{2} \right) \quad (2.7)$$

Donde  $\theta$  viene dado por:

$$\theta = \tan^{-1} \frac{r_{av}}{h} \quad (2.8)$$

Siendo  $r_{av}$  un promedio ponderado del radio de la torre, el cual se obtiene mediante la ecuación 2.9.

$$r_{av} = \frac{r_1 h_2 + r_2 h + r_3 h_1}{h} \quad (h = h_1 + h_2) \quad (2.9)$$

Donde

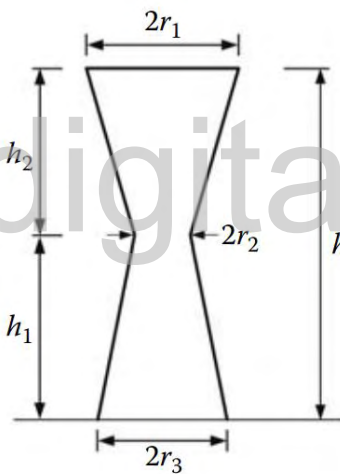
$h_1$  es la altura desde la base hasta la cintura en metros (m).

$h_2$  es la altura de la cintura a la parte superior en metros (m).

$r_1$  es el radio superior de la torre en metros (m).

$r_2$  es el radio de la torre en la cintura en metros (m).

$r_3$  es el radio de la base de la torre en metros (m).



**Figura 2.8 Forma de torre tipo cintura [12].**

El tiempo de viaje está dado por la ecuación 2.3.

#### 2.4.2 Modelo de línea vertical multiconductora

Este modelo establece que cada segmento de la torre entre crucetas, se representa como una línea vertical multiconductora, que se puede reducir a un solo conductor. El modelo de torre es entonces una línea monofásica cuya sección aumenta de arriba abajo como se muestra en la figura 2.9.



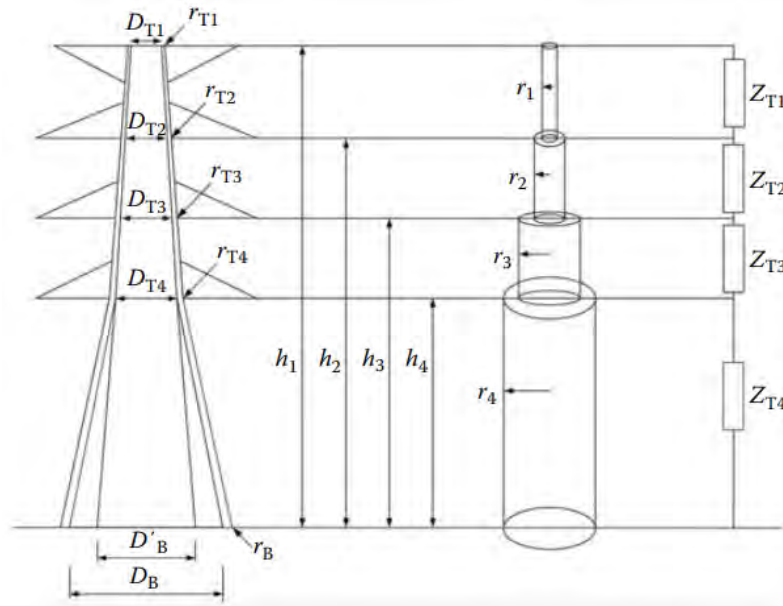


Figura 2.9 Modelo de línea vertical multiconductora [12].

El desarrollo de este modelo, propuesto por Hara y Yamamoto [12] se presenta a continuación:

1. A partir de una ecuación empírica que se utiliza para la impedancia característica de una torre tipo cilíndrica, se tiene:

$$Z_T = 60 \cdot \left( \ln \left( 2\sqrt{2} \frac{h}{r} \right) - 2 \right) \quad (2.9)$$

Donde  $h$  y  $r$  son la altura y el radio del cilindro, respectivamente.

2. La impedancia total de  $n$  cilindros paralelos está dada por la siguiente ecuación:

$$Z_n = \frac{1}{n} \cdot (Z_{11} + Z_{12} + \dots + Z_{1n} + Z_{22} + \dots + Z_{2n} + \dots) \quad (2.10)$$

Donde

$n$  es el número de conductores.

$Z_{kk}$  es la autoimpedancia del conductor  $k$ th.

$Z_{km}$  es la impedancia mutua entre la  $k$ -ésima y los conductores  $m$ th.

3. Sobre la base de la ecuación 2.9, los valores de estas impedancias se obtienen mediante las siguientes ecuaciones.

$$Z_{kk} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r} \right) - 2 \right) \quad (2.11)$$

$$Z_{km} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{d_{km}} \right) - 2 \right) \quad (2.12)$$

Donde

$h$  es la altura del conductor.

$r$  es el radio del conductor.

$d_{km}$  es la distancia entre la  $k$ -ésima y los conductores  $m$ th.

4. La impedancia característica de los sistemas multiconductores verticales paralelas que consisten en dos o más conductores, se obtiene de la siguiente manera:

$$Z_n = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h}{r_{eq}} \right) - 2 \right) \quad (2.13)$$

Donde  $r_{eq}$  es el radio equivalente, que viene dado por:

$$r_{eq} = \begin{cases} r^{1/2} \cdot D^{1/2} & n = 2 \\ r^{1/3} \cdot D^{2/3} & n = 3 \\ 2^{1/8} \cdot r^{1/4} \cdot D^{3/4} & n = 4 \end{cases} \quad (2.14)$$

Donde

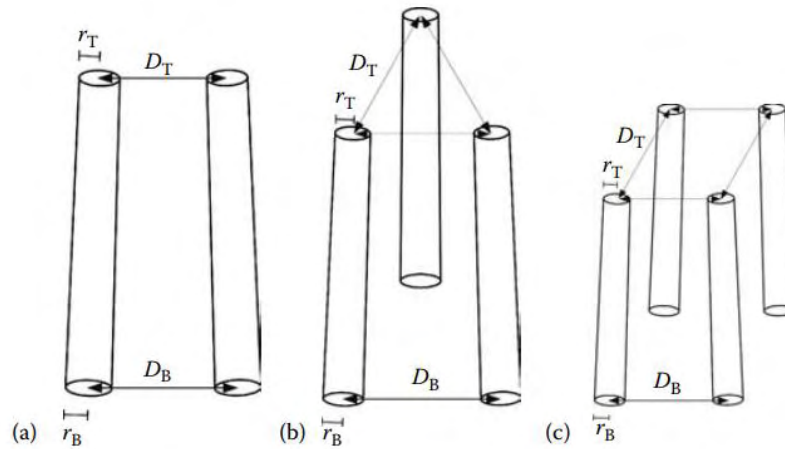
$r$  es el radio de los conductores.

$D$  es la distancia entre dos conductores vecinos.

5. Para una geometría como se muestra en la figura 2.10, las expresiones de las impedancias características continúan siendo válidas y pueden ser utilizadas después de sustituir  $r$  y  $D$  por las siguientes expresiones:

$$r = \sqrt[3]{r_T \cdot r_B^2} \quad (2.15)$$

$$D = \sqrt[3]{D_T \cdot D_B^2} \quad (2.16)$$



**Figura 2.10 Diferentes configuraciones de los sistemas de conductores. (a) dos conductores (b) tres conductores, (c) cuatro conductores [12].**

Donde

$r_T$  y  $r_B$  son los radios en la parte superior y la base de los conductores, respectivamente.

$D_T$  y  $D_B$  corresponden, en su orden, a las distancias entre dos conductores adyacentes en la parte superior y la de la base.

6. El modelo de torre mostrado en la figura 2.9, se puede dividir en varias secciones (cuatro en este caso), siendo la impedancia característica de cada sección como la expresa la ecuación 2.17.

$$Z_{Tk} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h_k}{r_{ek}} \right) - 2 \right) \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.17)$$

Donde

$$r_{ek} = 2^{1/8} \cdot \left( \sqrt[3]{r_{Tk} \cdot r_B^2} \right)^{1/4} \cdot \left( \sqrt[3]{D_{Tk} \cdot D_B^2} \right)^{3/4} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.18)$$

En las que  $h_k$ ,  $r_{tk}$ ,  $D_{Tk}$ ,  $r_B$  y  $D_B$  son de la geometría representada en la figura 2.9 y 2.10.

Según los autores, estas ecuaciones son aplicables a torres fabricadas con componentes tubulares. Por lo que, cuando la torre esté construida con secciones angulares, los valores de  $r_T$  y  $r_B$  deberán sustituirse por la mitad de la longitud lateral de la sección angular [12].

7. Los resultados medidos por los autores, mostraron que la impedancia de característica de los conductores se reduce alrededor del 10% mediante la adición de los refuerzos a las principales piernas. Este rendimiento se representa añadiendo en paralelo a la línea que corresponde a cada sección de torre, otra línea de la misma longitud y con la siguiente impedancia de sobretensión.

$$Z_{LK} = 9 \cdot Z_{Tk} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.19)$$

8. Finalmente, las crucetas están representadas por las secciones de línea ramificadas en los puntos de unión, por lo que la impedancia característica para cada cruceta se obtiene a partir de la expresión de un conductor horizontal convencional.

$$Z_{Ak} = 60 \cdot \ln \frac{2h_{Ak}}{r_{Ak}} \quad (k = 1, 2, 3, 4) \quad (2.20)$$

Donde  $h_{Ak}$  y  $r_{Ak}$  corresponden a la altura y al radio equivalente de la cruceta de orden  $k$ , respectivamente. El modelo multiconductor de la torre de transmisión desarrollado se muestra en la figura 2.11 [13].

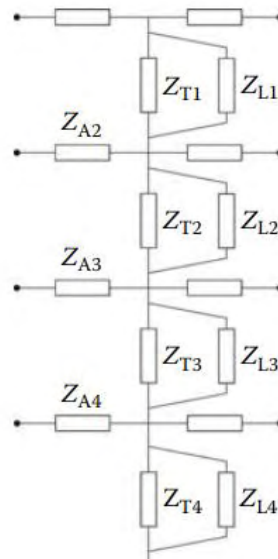


Figura 2.11 Equivalente de torre de transmisión según el modelo multiconductor [12].

### 2.4.3 Modelo multipisos

El modelo multipisos, también llamado modelo de varios pisos, se compone de cuatro secciones que representan las secciones de la torre entre crucetas. Cada sección consta de una línea sin pérdidas en serie con un circuito R-L paralelo, incluido para la atenuación de las ondas de desplazamiento.

La impedancia característica de cada sección de línea se obtiene mediante el procedimiento del modelo multiconductor, mientras que la velocidad de propagación es la de la luz. Sin incluir representación de las crucetas, el modelo multipisos es como se muestra en la figura 2.12 [12].

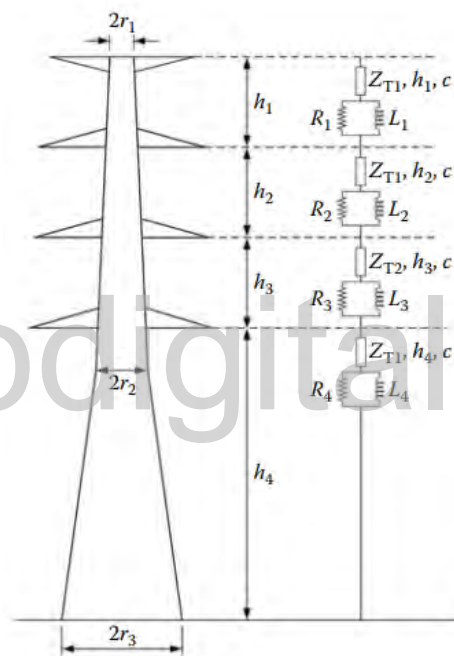


Figura 2.12 Modelo de torre multipisos [12].

Las resistencias de amortiguación e inductancia se obtienen de acuerdo a las ecuaciones 2.21, 2.22 y 2.23.

$$R_i = \frac{-2 \cdot Z_{T1} \cdot \ln \sqrt{\gamma}}{h_1 + h_2 + h_3} h_i \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2.21)$$

$$R_4 = -2 \cdot Z_{T2} \cdot \ln \sqrt{\gamma} \quad (2.22)$$

$$L_i = \alpha \cdot R_i \cdot \frac{2h}{c} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2.23)$$

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 la torre.

$\gamma$  es el coeficiente de atenuación el cual oscila entre 0,7 y 0,8.

$\alpha$  es el coeficiente de amortiguamiento que está asociado a la unidad y que equivale a 1.

$c$  es la velocidad de la luz.

Por otro lado, una investigación más experimental encontró que un cálculo adecuado tanto para  $Z_{T1}$  como para  $Z_{T2}$  podría basarse en la fórmula de Jordan descrita en la siguiente ecuación:

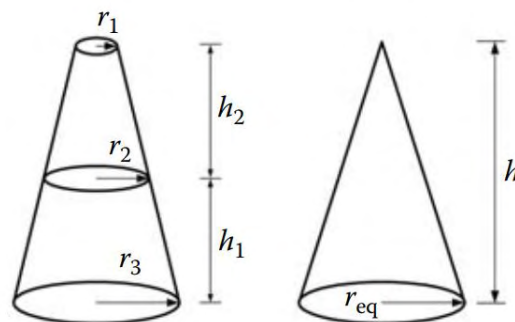
$$Z = 60 \cdot \left( \ln \left( \frac{h}{r_{eq}} \right) - 1 \right) \quad (2.24)$$

$$r_{eq} = \frac{r_1 \cdot h_2 + r_2 \cdot h + r_3 \cdot h_1}{2 \cdot h} \quad (h = h_1 + h_2) \quad (2.25)$$

Donde

$h$  es la altura de la torre.

$r_{eq}$  es el radio equivalente obtenido a partir de la geometría mostrada en la figura 2.13.



**Figura 2.13 Geometría equivalente para calcular el radio [12].**

De acuerdo a diversos estudios, el modelo de torre para torres más cortas puede ser más simple que el asumido por el modelo multipisos; es decir, una sola línea sin pérdida para cada sección de torre, cuya impedancia característica se calculó a partir de las ecuaciones 2.24 y 2.25 [12].

## 2.5 Software ATP

El ATP es uno de los sistemas de programas universales más utilizados para la simulación digital de fenómenos transitorios de naturaleza electromagnética y electromecánica en sistemas de energía eléctrica. Con este programa digital se pueden simular redes complejas y sistemas de control de estructura arbitraria.

ATP tiene muchos modelos incluyendo máquinas rotativas, transformadores, pararrayos, líneas de transmisión y cables. La capacidad de interfaz con los módulos de programa TACS (*Transient Analysis of Control Systems*) y MODELS (un lenguaje de simulación) permite modelar sistemas de control y componentes con características no lineales.

ATP se utiliza en todo el mundo para el análisis de sobretensiones y conmutación, coordinación del aislamiento, modelado de relés protectores, estudios de calidad armónica y de potencia, modelado HVDC y FACTS. Los estudios típicos de EMTP son:

1. Transitorio de maniobra.
2. Impulsos atmosféricos.
  - a. *Back flashover*.
  - b. Impulsos inducidos.
  - c. Ingresos de impulsos atmosféricos a subestaciones.
3. Coordinación de aislamiento,
4. Solicitaciones torsionales de ejes
5. Análisis armónicos
6. Arranque de motores.

Los estudios que hacen uso de este software, definen como objetivo central dos categorías. Una es el diseño, la cual incluye dimensionamiento de equipos, especificación de equipos de protección, diseño de los sistemas de control, coordinación de aislamiento, entre otros. La otra categoría es la solución de problemas de operación, tales como análisis de falla en los sistemas y análisis de los transitorios que habitualmente ocurren en la operación del sistema [13].

## CAPÍTULO III

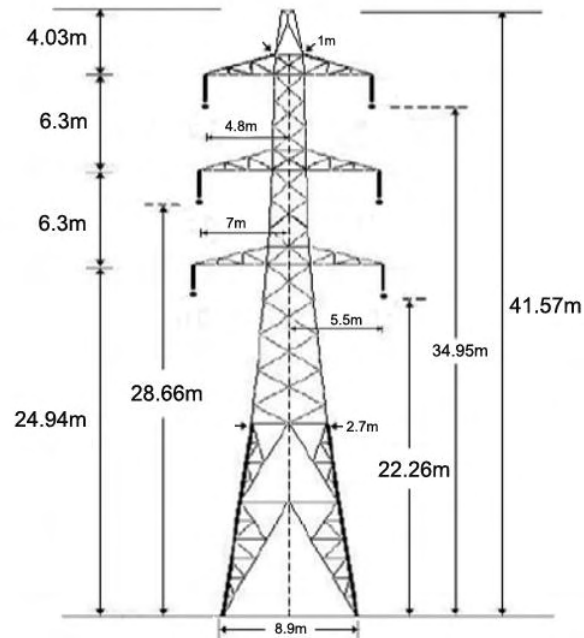
# MODELADO DE LA TORRE PARA LA EVALUACIÓN DE SU COMPORTAMIENTO

En la ocurrencia del *back flashover* en las torres de transmisión existen diversos factores que intervienen en su formación. Ejemplo de ello es la Resistencia Puesta a Tierra (RPT), magnitud de descarga atmosférica, punto de incidencia de la descarga, distancia entre torres e impedancia característica de la torre, por tanto, es necesario conocer cómo se comportan cada uno de estos aspectos durante el proceso, por lo que es preciso aplicar modelos que permitan evaluar su comportamiento y así obtener los datos necesarios para un correcto dimensionamiento.

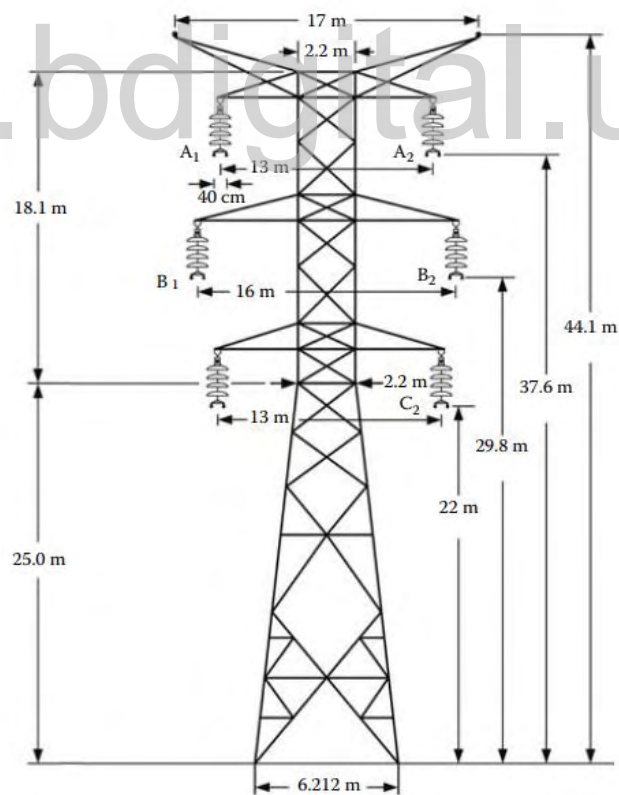
En el presente capítulo se desarrollan tres (3) de los modelos detallados en el capítulo anterior: el modelo cónico, el multipisos y el modelo de línea vertical multiconductora en dos ejemplos de torres de transmisión, de doscientos treinta kilovoltios (230 kV) y cuatrocientos kilovoltios (400 kV) mostradas en la figura 3.1 y 3.2 respectivamente. El modelado de dichas torres se realiza el software digital de simulación ATP. A cada una de las torres empleadas en el modelado se le inyecta una descarga en el límite superior de su estructura y se estudia el comportamiento del voltaje a lo largo de la torre.

Ya validados los modelos de las torres, se incorporan en un sistema de potencia, representado por una sección de línea de transmisión dividida en varios segmentos al cual se le aplica la descarga atmosférica con la intención de estudiar la distribución del voltaje en cada tramo de la línea de transmisión.





**Figura 3.1 Torre de transmisión de 230 kV.**



**Figura 3.2 Torre de transmisión de 400 kV.**

### 3.1 Modelo de la resistencia puesta a tierra

Está representado por un elemento resistor, y aterrizado como se muestra en la figura 3.4, que estará en serie con la impedancia característica de la estructura de la torre de transmisión. Más adelante, este valor de resistencia variará para diferentes pruebas.



Figura 3.3 Modelado de la resistencia puesta a tierra en ATP.

### 3.2 Modelo de la descarga atmosférica

Para este estudio se considera el modelo de descarga atmosférica disponible en el ATP, llamado Heidler Type 15, el cual está conformado por una fuente de voltaje tipo Heidler y una resistencia en paralelo, como se muestra en la figura 3.3, con un valor definido que permita al momento de la descarga que generará la fuente, la corriente vaya directo a la línea o estructura de la torre, evitando así una caída de tensión afectada por la resistencia puesta en paralelo.

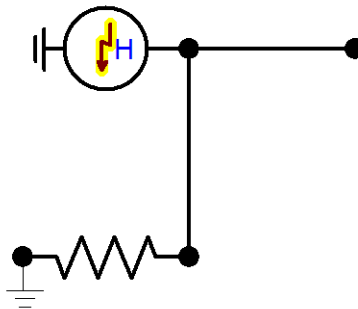


Figura 3.4 Modelado de la descarga atmosférica en ATP.

Para el análisis se estimará un impulso de rayo, de forma de onda estandarizada con un tiempo inicial de  $1,2 \mu s$  y un tiempo dividido por valor de  $50 \mu s$ , con una magnitud de 50 kA.

### 3.3 Modelo de línea vertical sin pérdidas

De los tres modelos que contempla a la torre de transmisión como una línea vertical sin pérdidas, se empleara el modelo cónico expuesto en el capítulo anterior. Para el desarrollo de este modelo se hará uso de la ecuación (2.5)

$$Z \approx 60 \cdot \ln\left(\sqrt{2} \frac{h}{r}\right)$$

Donde, en el caso de la torre de transmisión de 230 kV la altura  $h$  y el radio  $r$ , tienen un valor 41,57 m y 4,45 m respectivamente, quedando la ecuación de la siguiente manera:

$$Z = 60 \cdot \ln\left(\sqrt{2} \frac{41,57}{4,45}\right)$$

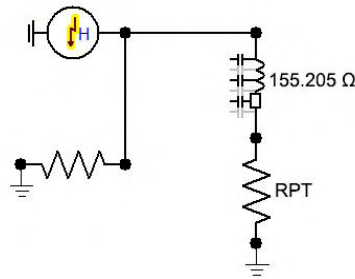
$$Z = 155,205 \Omega$$

Siendo  $Z$  la impedancia característica, que representa en el circuito equivalente mostrado en la figura 3.4, el modelado de la torre de transmisión en estudio.

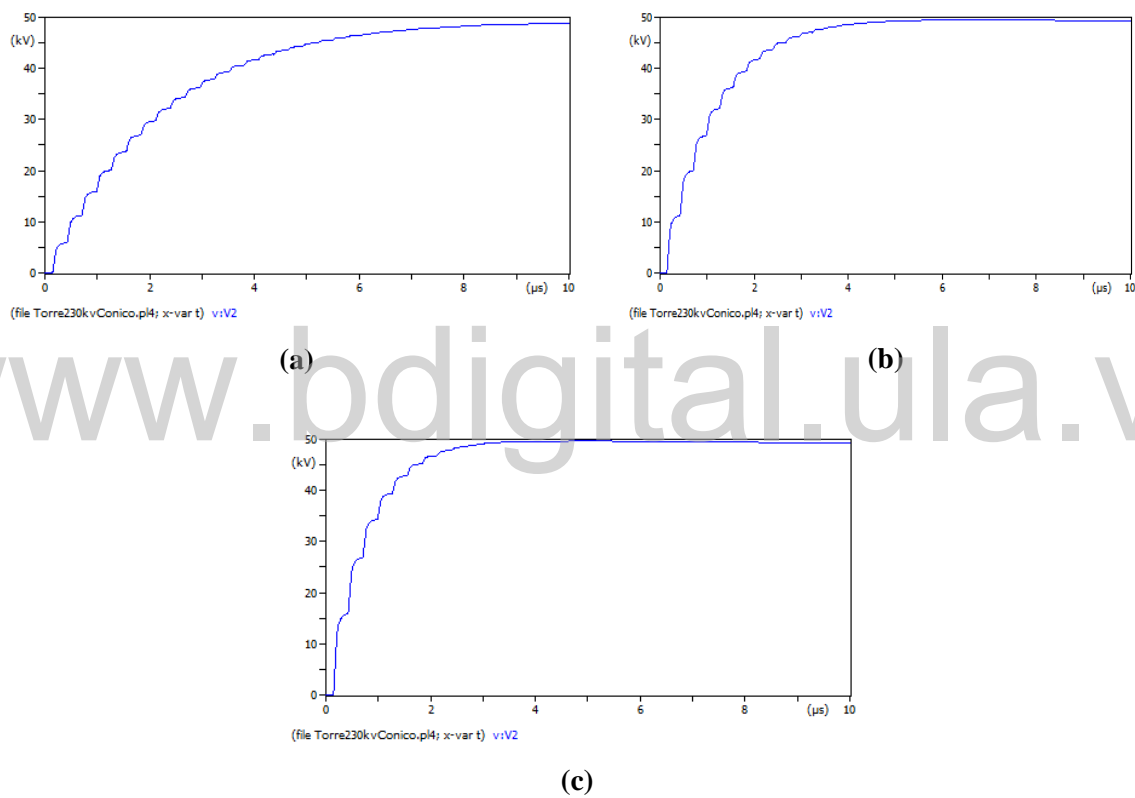


**Figura 3.5 Modelado de la impedancia característica en ATP.**

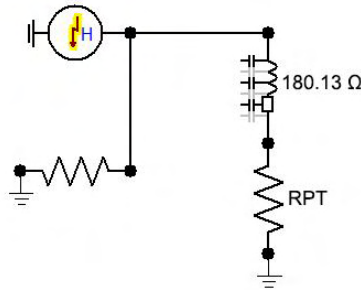
Para la torre de transmisión de 400 kV, donde la altura  $h$  es 44,1 m y el radio  $r$  es 3,106 m, el procedimiento es análogo al ya explicado. Una vez obtenidos los parámetros se procede a inyectar una descarga en la cima de las torres de transmisión, realizando variaciones del valor de RPT (10  $\Omega$ , 20  $\Omega$  y 30  $\Omega$ ), con la finalidad de estudiar las tensiones que se generan a lo largo de ellas. Seguidamente se muestran los resultados y gráficos obtenidos del modelado implementado en el ATP.



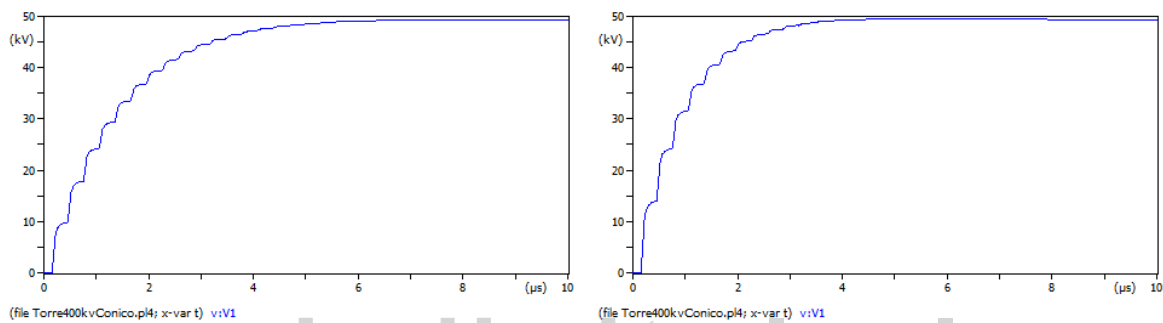
**Figura 3.6 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada como una línea vertical sin pérdidas.**



**Grafica 3.1 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 230 kV con variaciones de RPT: 10 Ω (a); 20 Ω (b) y 30 Ω (c).**

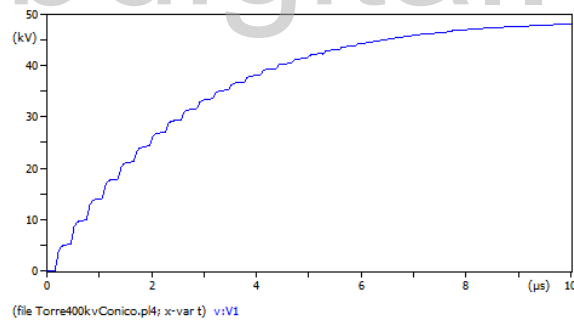


**Figura 3.7 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada como una línea vertical sin pérdidas.**



(a)

(b)



(c)

**Grafica 3.2 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 400 kV con variaciones de RPT: 10  $\Omega$  (a); 20  $\Omega$  (b) y 30  $\Omega$  (c).**

En las gráficas 3 y 3.1, en los casos A, B y C que se estudian mediante las variaciones de la RPT, se observa la presencia de oscilaciones en el voltaje que se hace presente en el recorrido de la torre de transmisión, en este caso del modelado de la torre como línea vertical sin pérdidas, específicamente el modelo cónico, una impedancia representa todo el cuerpo de la

torre por lo que las gráficas resultantes no muestran con exactitud las pérdidas que podrían generarse en el trayecto de la torre de transmisión. De igual forma es notable la mejora en los valores de voltaje al variar la resistencia puesta tierra, presentando menor pérdida de voltaje con la RPT de  $30 \Omega$ .

### 3.4 Modelo de línea vertical multiconductora

El modelo de línea vertical multiconductora establece que cada segmento de la torre entre crucetas, se puede reducir a un solo conductor, por lo que se considera el modelo de la torre como una línea monofásica cuya sección aumenta de arriba abajo. Para el desarrollo de este modelo se hará uso de las ecuaciones descritas en el capítulo 2.4.2.

En este modelo la torre de transmisión de 230 kV mostrada en la figura 3.1, se dividirá en tres secciones, donde la impedancia característica de cada sección se calculará mediante la ecuación 2.17.

$$Z_{Tk} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2h_k}{r_{ek}} \right) - 2 \right) \quad (k = 1, 2, 3, 4)$$

Donde

$$r_{ek} = 2^{1/8} \cdot \left( \sqrt[3]{r_{Tk} \cdot r_B^2} \right)^{1/4} \cdot \left( \sqrt[3]{D_{Tk} \cdot D_B^2} \right)^{3/4} \quad (k = 1, 2, 3, 4)$$

En las que  $h_k$ ,  $r_{tk}$ ,  $D_{Tk}$ ,  $r_B$  y  $D_B$  son características dimensionales pertenecientes a la torre en estudio, cuyos valores se muestran en la tabla 3.1.

**Tabla 3.1 Características dimensionales  
de la torre de transmisión de 230 kV.**

Características dimensionales (m)					
$r_B$	0,16	$D_B$	8,9	$h_1$	41,57
$r_{T1}$	0,13	$D_{T1}$	1	$h_2$	34,95
$r_{T2}$	0,13	$D_{T2}$	1	$h_3$	28,66
$r_{T3}$	0,14	$D_{T3}$	1	$h_4$	22,26
$r_{T4}$	0,14	$D_{T4}$	1		

Para  $K = 1$  se tiene un radio equivalente dado por la siguiente expresión

$$r_{e1} = 2^{\frac{1}{8}} \cdot \left( \sqrt[3]{0,13 \cdot 0,13^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt[3]{12 \cdot 12^4}$$

$$r_{e1} = 0,655$$

$$Z_{T1} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2 \cdot 41,57}{0,6548} \right) - 2 \right)$$

$$Z_{T1} = 191,43 \Omega$$

Ahora, tal como se mencionó en el capítulo anterior, según los resultados de los autores la impedancia característica de los conductores se reduce alrededor del 10% debido a la edición de los refuerzos de las principales piernas de la torre, por lo que representaron ese rendimiento con una impedancia de sobretensión paralela a la línea que corresponde a cada sección de la torre, la cual está representada por la ecuación 2.19

$$Z_{L1} = 9 \cdot Z_{T1} \qquad Z_{L1} = 9 \cdot 191,43 \Omega$$

$$Z_{L1} = 1722,88 \Omega$$

La impedancia característica que representa las crucetas de la torre se obtiene a partir de la ecuación 2.20.

$$Z_{Ak} = 60 \cdot \ln \frac{2h_{Ak}}{r_{Ak}}$$

Donde  $h_{Ak}$  es la altura que corresponde a la sección o tipo de cruceta, sea de conductor de fase o de guarda, y  $r_{Ak}$  es el radio de la base de la estructura (figura 3.7), el cual se obtendrá de haciendo uso de la ecuación de Pitágoras.

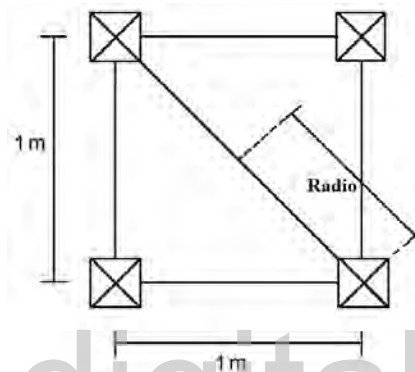


Figura 3.8 Radio Geométrico.

$$r_{A1} = \frac{\sqrt{1^2 + 1^2}}{2}$$

$$r_{A1} = 0,7071 \text{ m}$$

Quedando la expresión 2.20 de la siguiente manera

$$Z_{A1} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 41,57}{0,7071} \quad Z_{A1} = 286,02 \Omega$$

Para  $K = 2$

$$r_{e2} = 2^{\frac{1}{8}} \cdot \left( \sqrt[3]{0,13 \cdot 0,14^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \sqrt[3]{1^2 \cdot 1^2} \right)^{\frac{3}{4}} \quad r_{e2} = 0,659$$

$$Z_{T2} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2 \cdot 34,95}{0,6629} \right) - 2 \right) \quad Z_{T2} = 180,65 \Omega$$



$$Z_{L2} = 9 \cdot 180,286 \Omega$$

$$Z_{L2} = 1625,87 \Omega$$

$$Z_{A2} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 34,95}{0,7071}$$

$$Z_{A2} = 275,618 \Omega$$

Para K = 3

$$r_{e3} = 2^{\frac{1}{8}} \cdot \left( \sqrt[3]{0,14 \cdot 0,14^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \sqrt[3]{1^2 \cdot 1^2} \right)^{\frac{3}{4}} \quad r_{e3} = 0,6670$$

$$Z_{T3} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2 \cdot 28,66}{0,6670} \right) - 2 \right) \quad Z_{T3} = 168,01 \Omega$$

$$Z_{L3} = 9 \cdot 167,74 \Omega$$

$$Z_{L3} = 1512,06 \Omega$$

$$Z_{A3} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 28,66}{0,7071}$$

$$Z_{A3} = 263,713 \Omega$$

Para K = 4

$$r_{e4} = 2^{\frac{1}{8}} \cdot \left( \sqrt[3]{0,14 \cdot 0,16^2} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left( \sqrt[3]{1^2 \cdot 1^2} \right)^{\frac{3}{4}} \quad r_{e4} = 2,022$$

$$Z_{T4} = 60 \cdot \left( \ln \left( \sqrt{2} \frac{2 \cdot 22,26}{2,0347} \right) - 2 \right) \quad Z_{T4} = 86,30 \Omega$$

$$Z_{L4} = 9 \cdot 85,92 \Omega$$

$$Z_{L4} = 776,68 \Omega$$

$$Z_{A4} = 60 \cdot \ln \frac{2 \cdot 22,26}{0,7071}$$

$$Z_{A4} = 248,551 \Omega$$

Para el desarrollo con la torre de transmisión de 400 kV el procedimiento es análogo al ya realizado. En las tablas 3.2 y 3.3 se presentan las dimensiones de la torre y los parámetros ya calculados.

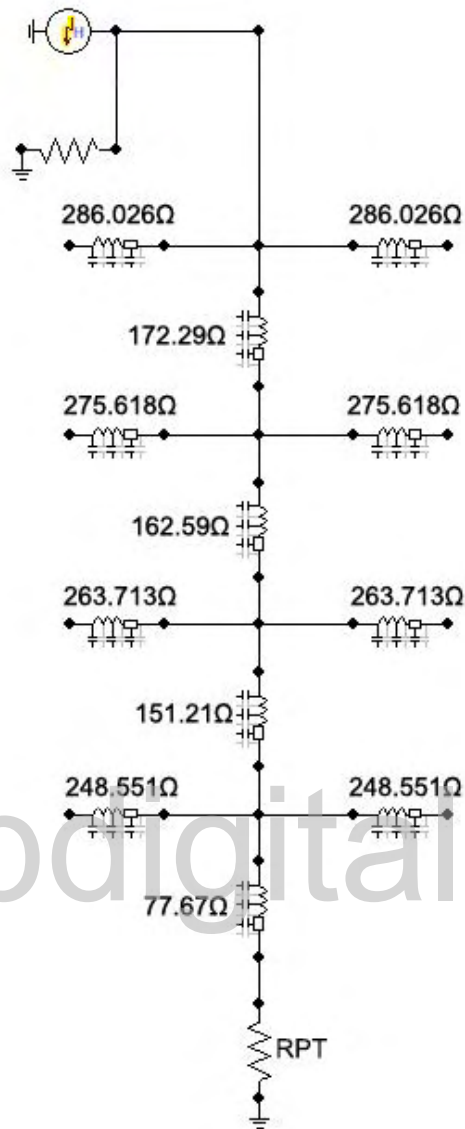
**Tabla 3.2 Características dimensionales de la torre de transmisión de 400 kV.**

Características dimensionales (m)					
$r_B$	0,18	$D_B$	6,212	$h_1$	41,57
$r_{T1}$	0,15	$D_{T1}$	2,2	$h_2$	34,95
$r_{T2}$	0,15	$D_{T2}$	2,2	$h_3$	28,66
$r_{T3}$	0,15	$D_{T3}$	2,2	$h_4$	22,26
$r_{T4}$	0,16	$D_{T4}$	2,2		

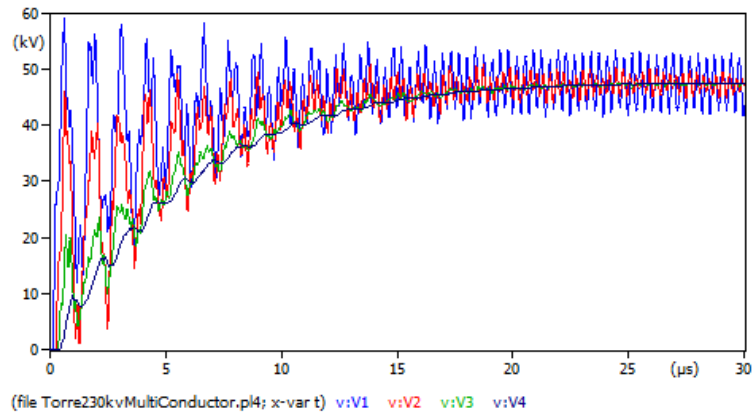
**Tabla 3.3 Parámetros para el modelado de la torre de transmisión de 400 kV por el método multiconductor.**

Parámetros ( $\Omega$ )					
$Z_{T1}$	157,35	$Z_{L1}$	1416,14	$Z_{A1}$	247,98
$Z_{T2}$	147,782	$Z_{L2}$	1330,03	$Z_{A2}$	238,415
$Z_{T3}$	133,51	$Z_{L3}$	1201,58	$Z_{A3}$	224,46
$Z_{T4}$	82,66	$Z_{L4}$	743,93	$Z_{A4}$	206,257

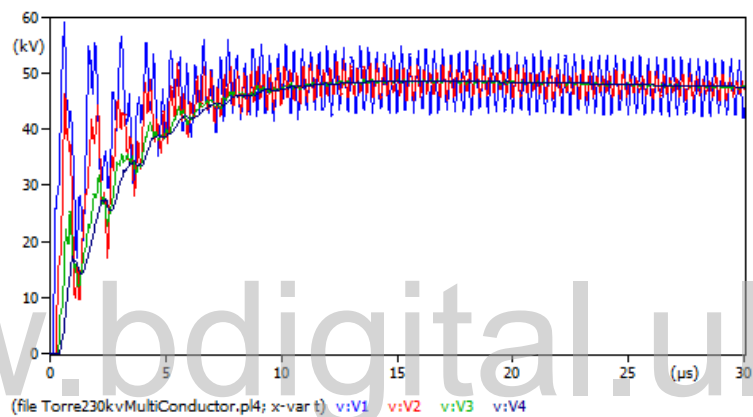
Ahora que se han calculado los parámetros se inyectara una descarga en la cima de las torres de transmisión, realizando variaciones del valor de RPT (10  $\Omega$ , 20  $\Omega$  y 30  $\Omega$ ), con la intención de estudiar las tensiones que se generan a lo largo de ellas. Con el fin de simplificar el circuito con el que se modelan las torres de transmisión de 230 kV y 400 kV, las impedancias  $Z_T$  y  $Z_L$  que se encuentran en paralelo, se calcularon las impedancias combinadas de cada una. A continuación, se muestran los resultados y gráficos obtenidos del modelado implementado en el ATP.



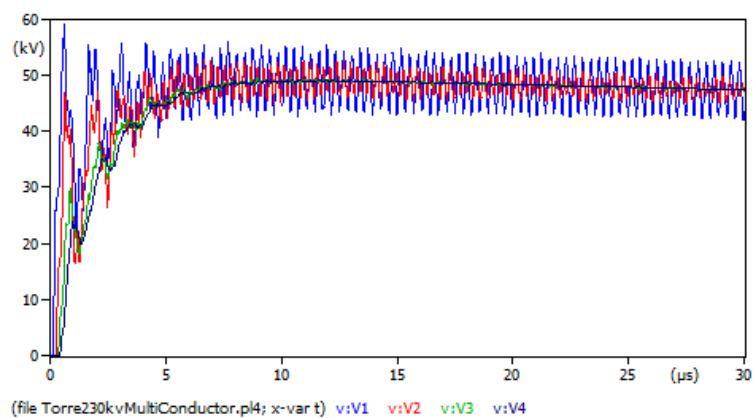
**Figura 3.9 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada mediante el modelo multiconductor.**



(a)

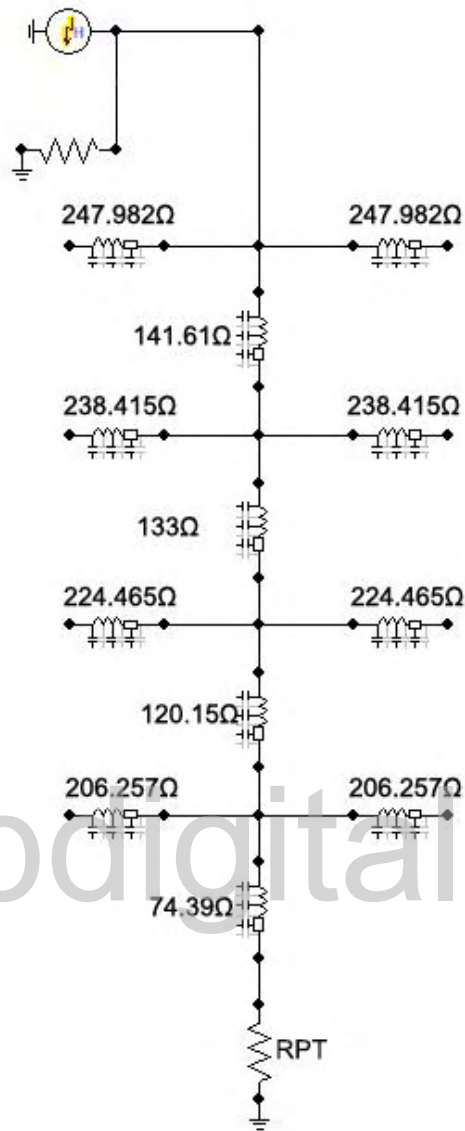


(b)

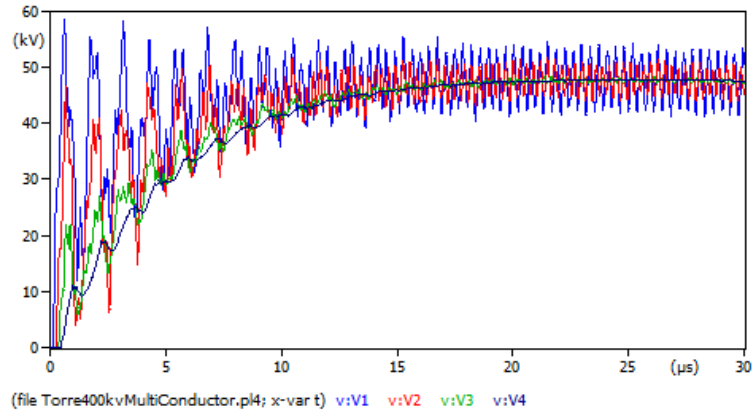


(c)

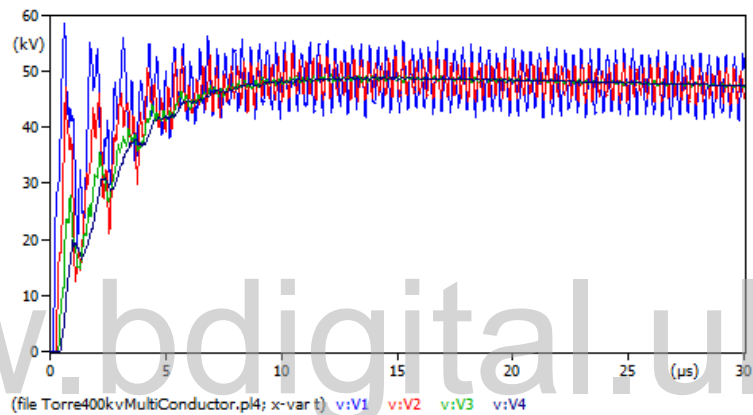
**Grafica 3.3 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 230 kV con variaciones de RPT:  $10\Omega$  (a);  $20\Omega$  (b) y  $30\Omega$  (c).**



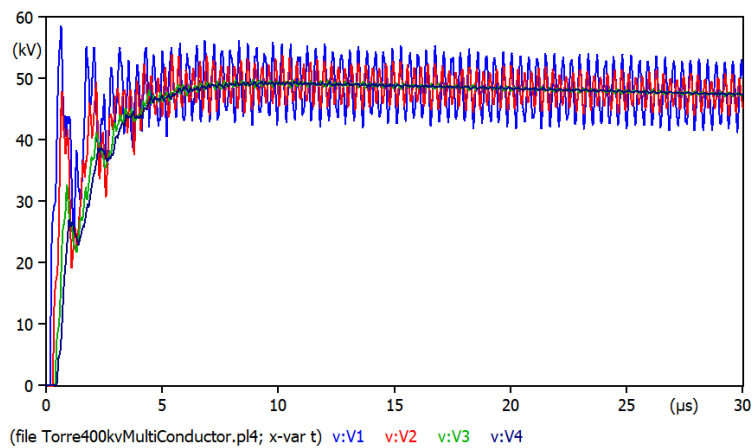
**Figura 3.10 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada mediante el modelo multiconductor.**



(a)



(b)



(c)

**Grafica 3.4 Tensiones ante una descarga atmosférica en la torre de transmisión de 400 kV con variaciones de RPT: 10  $\Omega$  (a); 20  $\Omega$  (b) y 30  $\Omega$  (c).**

De acuerdo a lo expuesto en el capítulo 2.4.2, el modelo de línea multiconductora segmenta la torre de transmisión por tramos entre crucetas, las cuales también están representadas impedancias en los puntos de unión de las secciones. En otras palabras, en este modelo no solo el cuerpo de la torre está representado sino también las crucetas de la misma.

La inyección de corriente generada por la descarga atmosférica que se modelo, al igual que en el caso anterior, con un tiempo inicial de  $1,2 \mu\text{s}$  y un tiempo dividido por valor de  $50 \mu\text{s}$ , con una magnitud de  $50 \text{ kA}$ , género en ambas torres de transmisión diferentes sobrevoltajes a lo largo de la estructura como se puede observar en las gráficas 3.2 y 3.3, mostrando con mayor exactitud las posibles pérdidas que ocurren a lo largo de la torre.

Comparado con el modelo anterior, se puede notar la influencia que existe entre los diferentes modelados, ya que simular la ocurrencia un fenómeno transitorio de esta naturaleza las torres de transmisión presentaron gran diferencia en las oscilaciones de voltaje. De tal comparación resulta necesario decir en el modelado multiconductor, las variaciones de la RPT mostraron ligeras mejoras en los sobrevoltajes presentados tanto como en la torre de transmisión de  $230 \text{ kV}$ , así como la de  $400 \text{ kV}$ .

### 3.5 Modelo multipisos

De acuerdo a lo mencionado anteriormente en el capítulo 2.4.3, el modelo multipisos, también llamado modelo de varios pisos, representa a la torre como un conjunto de secciones cortas compuestas de líneas de transmisión monofásicas sin pérdidas. Para el cálculo de los parámetros necesarios para modelar la torre de transmisión en estudio, se usará la ecuación 2.24 y 2.25 que hacen referencia al cálculo de la impedancia característica.

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

$$r_{\text{eq}} = \frac{r_1 \cdot h_2 + r_2 \cdot h + r_3 \cdot h_1}{2 \cdot h} \quad (h = h_1 + h_2)$$

Donde la torre de  $230 \text{ kV}$  tiene las siguientes dimensiones,  $h = 41,57 \text{ m}$ ,  $h_1 = 24,94 \text{ m}$ ,  $h_2 = 16,63 \text{ m}$ ,  $r_1 = 0,5 \text{ m}$ ,  $r_2 = 1,35 \text{ m}$ ,  $r_3 = 4,45 \text{ m}$ , quedando las expresiones de la siguiente manera

$$r_{eq} = \frac{0,5 \cdot 24,94 + 1,35 \cdot 41,57 + 4,45 \cdot 24,94}{2 \cdot 41,57}$$

$$r_{eq} = 2,11 \Omega$$

$$Z = 60 \cdot \left( \ln \left( \frac{41,57}{2,11} \right) - 1 \right)$$

$$Z = 118,84 \Omega$$

Ya con los valores de la impedancia de cada sección de la torre, se procede a calcular los circuitos R-L incluidos en el modelo para la atenuación de las ondas de desplazamiento, con un coeficiente de atenuación de 0,8, coeficiente de amortiguamiento de 1 y alturas entre crucetas  $h_1, h_2, h_3, h_4$  con unos valores de 4,03m, 6,30m, 6,30m, 26,49m respectivamente.

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

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

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

Para  $R_1$  queda la ecuación de la siguiente manera

$$R_1 = \frac{-2 \cdot 118,84 \cdot \ln \sqrt{0,8}}{4,03 + 6,30 + 6,30} 4,03$$

$$R_1 = 6,42 \Omega$$

El cálculo para obtener los valores de  $R_2$  y  $R_3$  se realiza con la misma ecuación usada para  $R_1$ , dando como resultado unas resistencias de 10,03  $\Omega$  para  $R_2$  y  $R_3$ .

Para  $R_4$  se hace uso de la ecuación 2.22 como se muestra a continuación

$$R_4 = -2 \cdot 118,84 \cdot \ln \sqrt{0,8}$$

$$R_4 = 26,49 \Omega$$



Ahora bien, una vez obtenidos los valores de las resistencias de los circuitos R-L, se procede a calcular las inductancias correspondientes con la ecuación 2.23.

$$L_1 = 1 \cdot 6,42 \cdot \frac{2 \cdot 41,57}{3 \cdot 10^8}$$

$$L_1 = 2 \mu\text{H}$$

Las inductancias  $L_2$ ,  $L_3$  y  $L_4$  se obtienen de manera análoga al procedimiento anterior, en consecuencia, se obtienen inductancias de  $3 \mu\text{H}$ ,  $3 \mu\text{H}$  y  $7 \mu\text{H}$  respectivamente.

Para llevar a cabo este modelo multipisos con la torre de transmisión de 400 kV, el proceso es idéntico al anterior. En la tabla 3.1 y 3.2 se muestran los datos necesarios para realizar los cálculos y sus respectivos resultados.

**Tabla 3.4 Dimensiones de la torre de transmisión de 400 kV.**

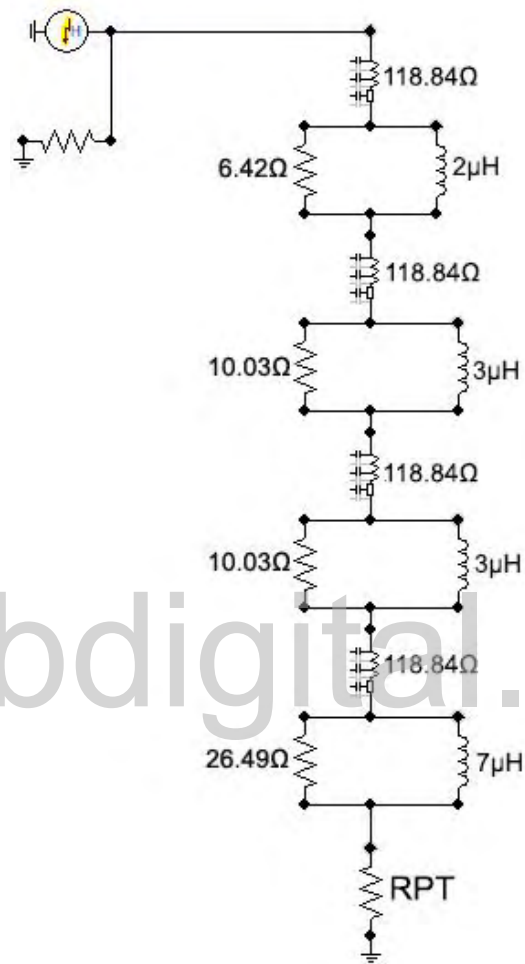
Dimensiones Generales (m)									
$H_1$	$H_2$	$H_3$	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$r_1$	$r_2$	$r_3$
44,1	25	19,1	2,9	7,80	7,80	25	1,1	1,1	3,106

**Tabla 3.5 Parámetros para el modelado de la torre de transmisión de 400 kV por el método multipisos.**

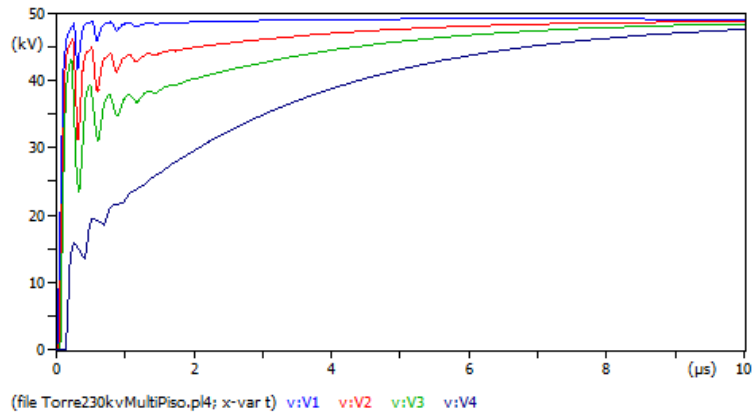
<b>Impedancias (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>Z_1</math></b>	<b><math>Z_2</math></b>	<b><math>Z_3</math></b>	<b><math>Z_4</math></b>
	136,47	136,47	136,47	136,47
<b>Resistencias (<math>\Omega</math>)</b>	<b><math>R_1</math></b>	<b><math>R_2</math></b>	<b><math>R_3</math></b>	<b><math>R_4</math></b>
	4,75	12,82	12,82	30,416
<b>Inductancias (<math>\mu\text{H}</math>)</b>	<b><math>L_1</math></b>	<b><math>L_2</math></b>	<b><math>L_3</math></b>	<b><math>L_4</math></b>
	1	4	4	9

Ya conseguidos los parámetros necesarios para modelar las torres de transmisión mediante el método de multipisos, se procede a inyectar una descarga en la cima de las torres,

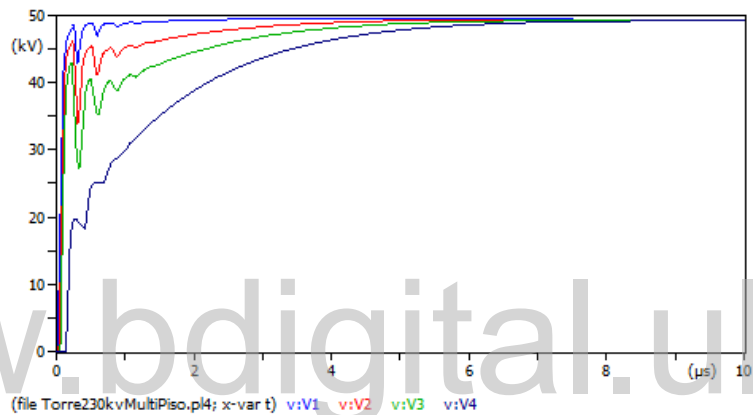
realizando variaciones del valor de RPT ( $10\ \Omega$ ,  $20\ \Omega$  y  $30\ \Omega$ ), con la finalidad de estudiar las tensiones que se generan a lo largo de ellas. A continuación, se muestran los resultados y gráficos obtenidos del modelado implementado en el ATP.



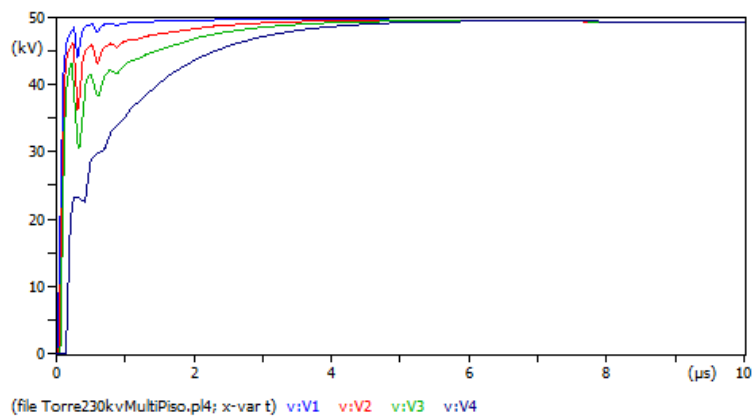
**Figura 3.11 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 230 kV representada mediante el modelo multipisos.**



(a)

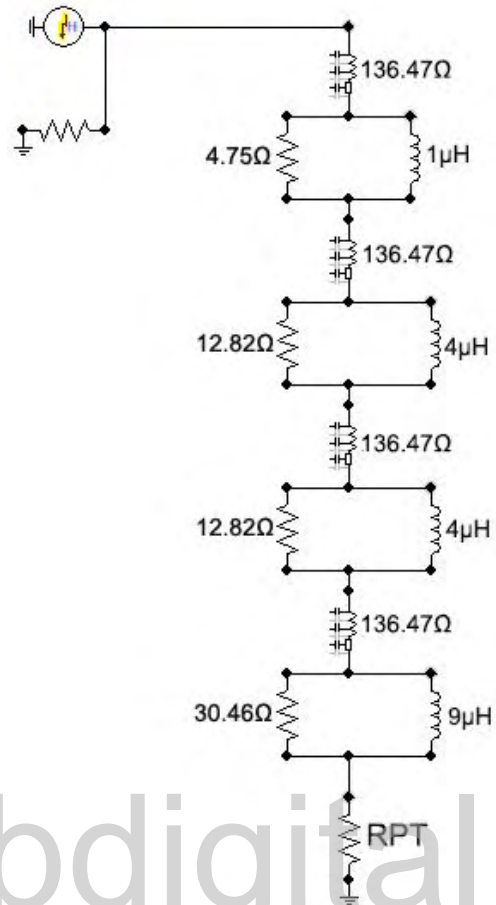


(b)



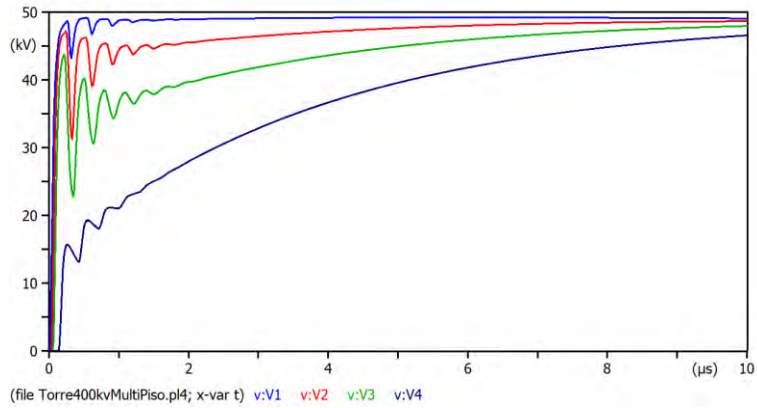
(c)

**Grafica 3.5 Tensiones ante una descarga atmosférica  
en la torre de transmisión de 230 kV  
con variaciones de RPT: 10  $\Omega$  (a); 20  $\Omega$  (b) y 30  $\Omega$  (c).**

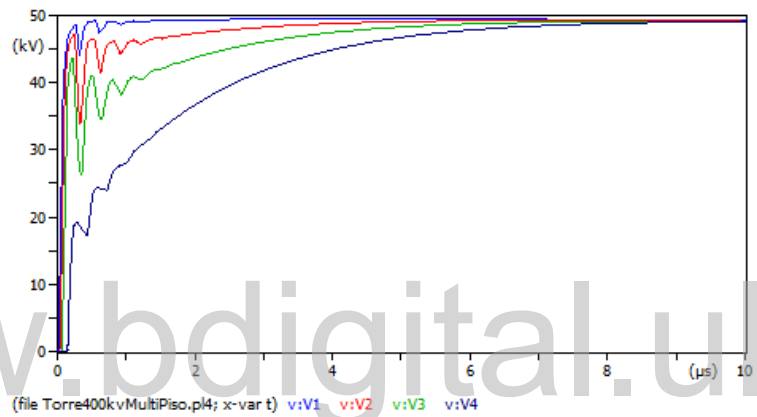


**Figura 3.12 Modelado de la descarga atmosférica en la torre de 400 kV representada mediante el modelo multipisos.**

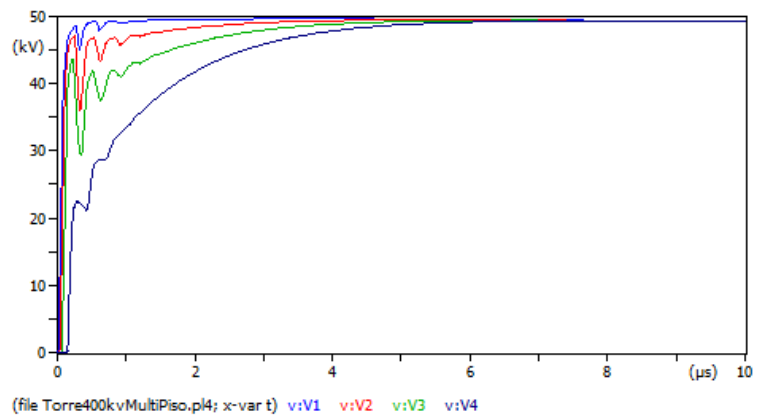
[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)



(a)



(b)



(c)

**Grafica 3.6 Tensiones ante una descarga atmosférica  
en la torre de transmisión de 400 kV  
con variaciones de RPT: 10  $\Omega$  (a); 20  $\Omega$  (b) y 30  $\Omega$  (c).**

Lo ya citado en el capítulo 2.4.3, expresa que el modelado por el método multipisos divide a la torre de transmisión por secciones, las cuales representan las secciones de la torre entre las crucetas. En las gráficas A, B y C mostradas en las gráficas 3.4 y 3.5 se puede observar la influencia del modelo de la torre ya que se aprecian mayores oscilaciones de los voltajes que se hacen presentes en el recorrido que realiza la corriente de la descarga atmosférica por la estructura de la torre.

Asimismo, se puede notar la importancia de la resistencia puesta tierra ya que, en las variaciones de su valor realizadas en la simulación, se aprecia que a mayor valor de la RPT se disminuyen las distorsiones en los voltajes, en otros términos, se reducen las pérdidas que ocurren en el transitorio ocasionado por el impacto la descarga atmosférica.

### **3.6 Caso de Aplicación**

Una vez analizado de manera individual el comportamiento del modelado de las torres de transmisión, se incorporará uno de ellos, específicamente el modelo multipisos, a un sistema de potencia y posteriormente se le aplica una descarga atmosférica con los mismos parámetros ya aplicados anteriormente.

#### **Datos del Sistema de Potencia**

Para el análisis del modelado de la torre de transmisión incorporado a un sistema de potencia, se emplearán tres tramos de una línea, con torres de 230 kV con las mismas dimensiones generales de la usada en la sección 3.5, con conductores de fase y cable de guarda del tipo ACAR 1000 MCM (18/19) y ALUMOWELD 7#8 AWG respectivamente, cuyas características técnicas se muestran en las tablas 3.6 y 3.7.

**Tabla 3.6 Características del conductor de fase.**

<b>Tipo</b>	ACAR 18/19
<b>Calibre</b>	1000 kcmil
<b>Radio Interno</b>	4,18 mm
<b>Diámetro</b>	29,23 mm
<b>Peso Unitario</b>	1394 kg/km
<b>Resistividad DC 20 °C</b>	0,0612 $\Omega$ /km

**Tabla 3.7 Características del conductor de guarda.**

<b>Tipo</b>	ALUMOWELD
<b>Calibre</b>	7#8 AWG
<b>Sección</b>	58,56 mm <sup>2</sup>
<b>Diámetro</b>	9,78 mm
<b>Peso Unitario</b>	390 kg/km
<b>Resistividad DC 20 °C</b>	1,463 $\Omega$ /km

Para la simulación del sistema de potencia, se consideraron las ultimas cuatro torres de transmisión de llegada a la subestación, divididas en tres tramos con las distancias se exponen en la tabla 3.8

**Tabla 3.8 Distancias de los tramos de la línea de transmisión.**

<b>Tramos de la línea</b>	<b>Longitud (m)</b>
<b>Tramo 1</b>	433
<b>Tramo 2</b>	247
<b>Tramo 3</b>	157

### 3.6.1 Simulación del Sistema de Potencia en ATP

Para realizar la simulación del SEP en el software ATP se hará uso de diversas herramientas ya mostradas anteriormente como lo son las resistencias, impedancias características, fuente de voltaje tipo Heidler y otras herramientas que se mostraran a continuación.

#### 3.6.1.1 Modelo de Fuente de Generación.

La fuente de generación de voltaje se representará mediante la herramienta disponible en ATP llamada *AC source* mostrada en la figura 3.13, implementada con una amplitud de 230 kV, frecuencia de 60 Hz, tiempo de inicio y fin de  $-1$  s y 100 s respectivamente.



Figura 3.13 Modelo de fuente de Generación.

#### 3.6.1.2 Modelo de Aisladores.

El software ATP incluye en su catálogo una herramienta para representar los aisladores, pero para su uso se deben de tener ciertas consideraciones que no son relevantes en este trabajo de investigación por lo que en busca de simplificar el modelado de los aisladores se hará uso de un capacitor, mostrado en la figura 3.14, con un valor 100 pF.

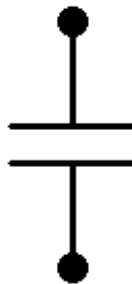
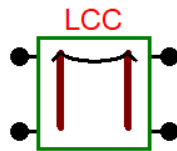


Figura 3.14 Modelo de Aislador.



### 3.6.1.3 Modelo de la Línea de transmisión.

El modelo de la línea estará representado por el elemento LCC, mostrado en la figura 3.14, con un modelo J. Marti. Los conductores de fase y guarda se emplearán con sus magnitudes en valores de centímetros para los radios geométricos de los conductores y en  $\Omega/\text{km}$  para la resistividad en CD, además dentro del modelo se dimensionarán las distancias de separación de cada conductor, conforme al modelo de la torre de transmisión de 230 kV ya expuesta anteriormente.



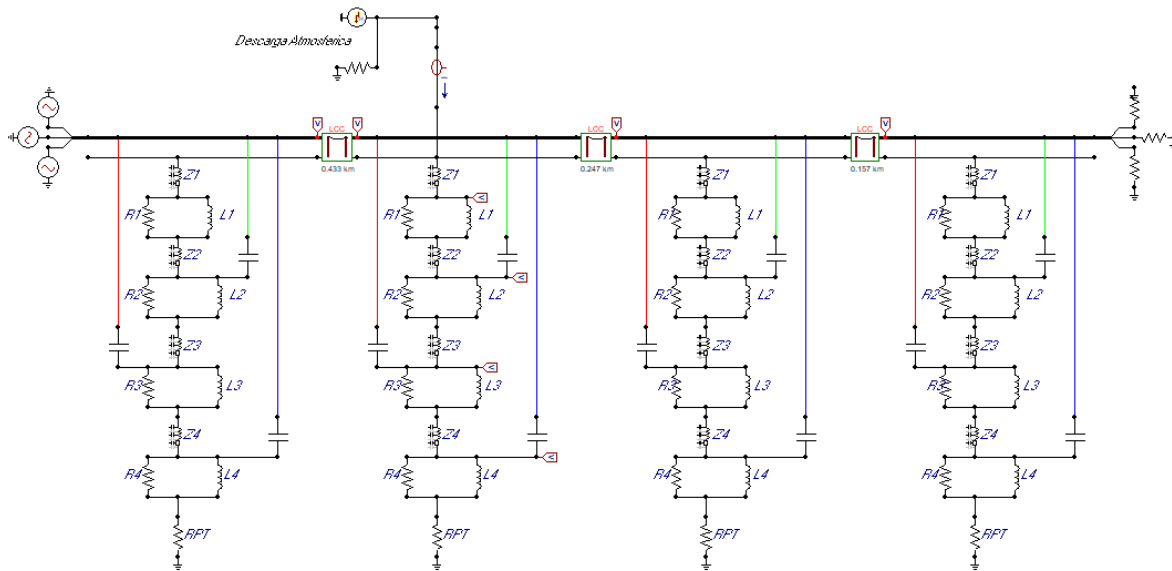
**Figura 3.15 Modelo de la línea de transmisión.**

Ya conocidos los datos del SEP y las herramientas para su modelado, se procede a realizar las respectivas simulaciones con la finalidad de obtener los niveles de sobretensión que se generan a lo largo del tramo de la línea de transmisión, considerando la inyección de una descarga atmosférica en el un punto alto de la torre.

Para el estudio se consideran cuatro condiciones de las líneas de transmisión del SEP:

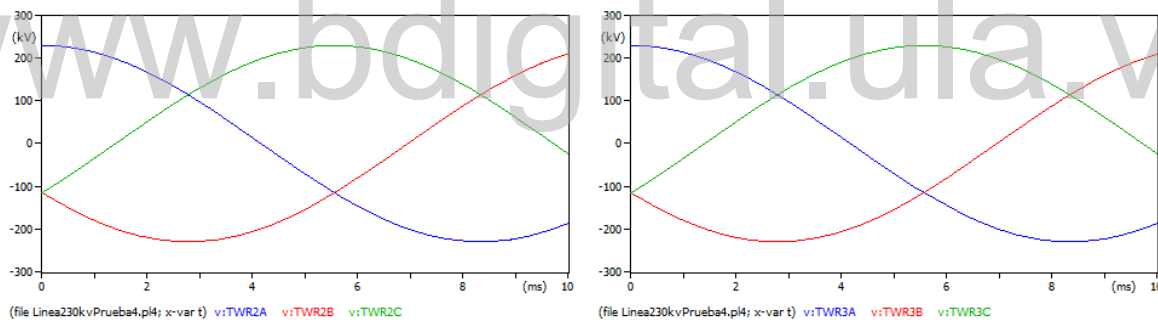
1. Sin las torres de transmisión, sin la descarga atmosférica.
2. Con las torres de transmisión, sin la descarga atmosférica.
3. Sin las torres de transmisión, con la descarga atmosférica.
4. Con las torres de transmisión, con la descarga atmosférica.

De igual forma se considerará una carga de  $100 \Omega$  para las cuatro condiciones ya mencionadas. A continuación, se muestran los resultados y gráficos obtenidos del modelado implementado en el ATP.



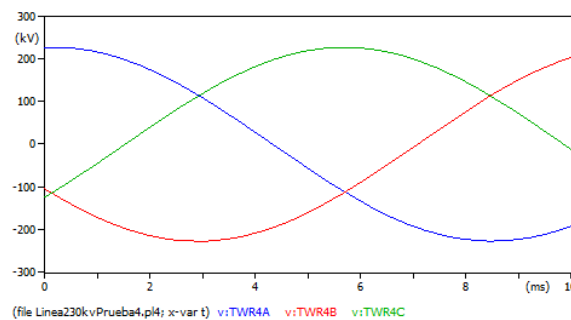
**Figura 3.16 Modelado del SEP  
con las torres de transmisión y la descarga atmosférica.**

1. Sin las torres de transmisión, sin la descarga atmosférica.



(a)

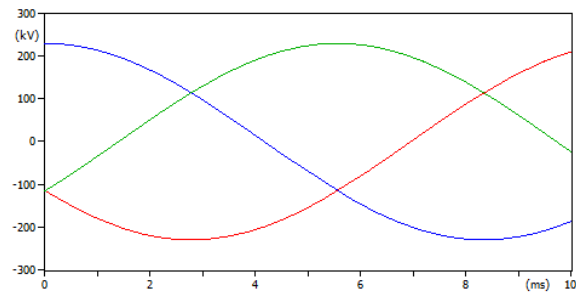
(b)



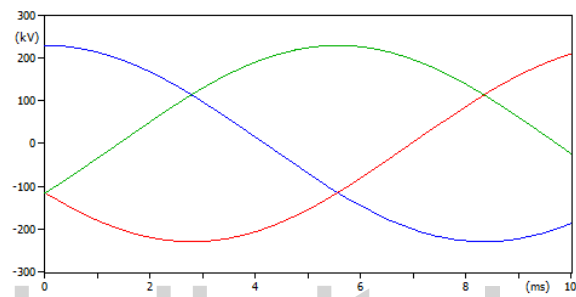
(c)

**Grafica 3.7 Voltajes de salida de la línea  
con la condición 1: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c).**

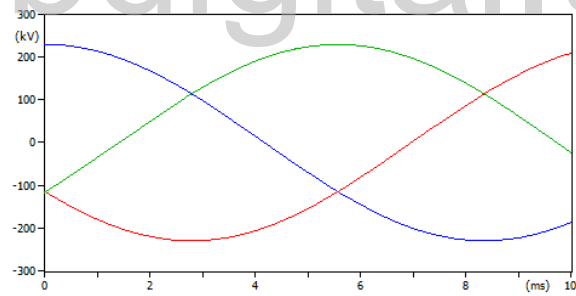
2. Con las torres de transmisión, sin la descarga atmosférica.



(a)



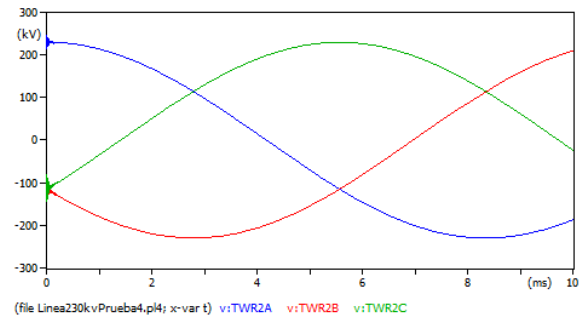
(b)



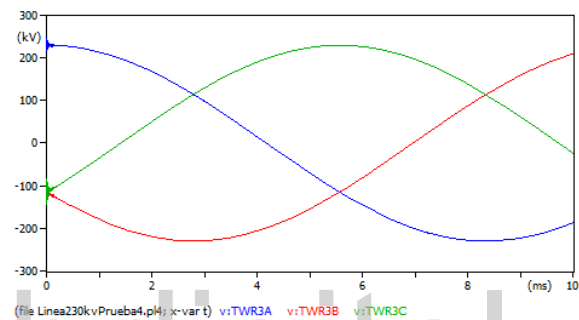
(c)

**Grafica 3.8 Voltajes de salida de la línea con la condición 2: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c).**

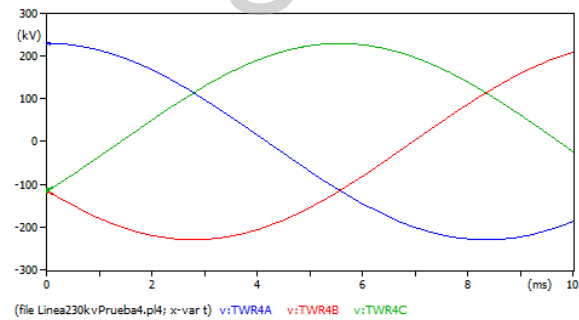
3. Sin las torres de transmisión, con la descarga atmosférica.



(a)



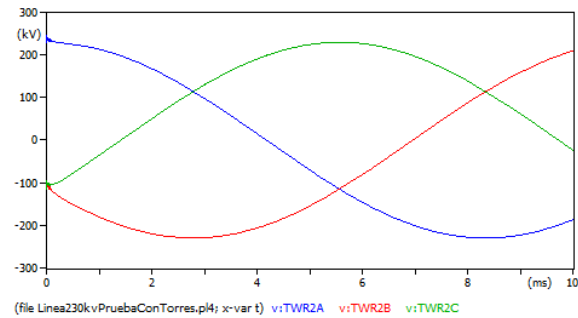
(b)



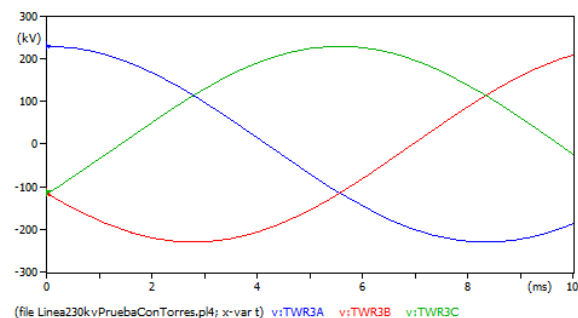
(c)

**Grafica 3.9 Voltajes de salida de la línea  
con la condición 3: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c).**

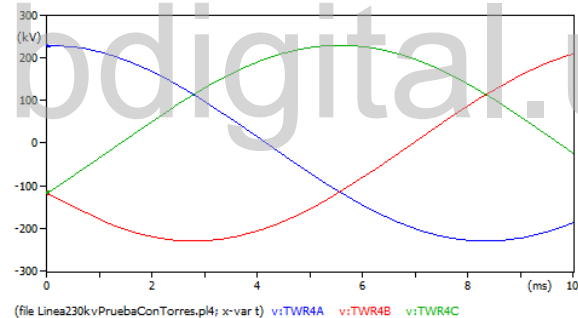
4. Con las torres de transmisión, con la descarga atmosférica.



(a)



(b)

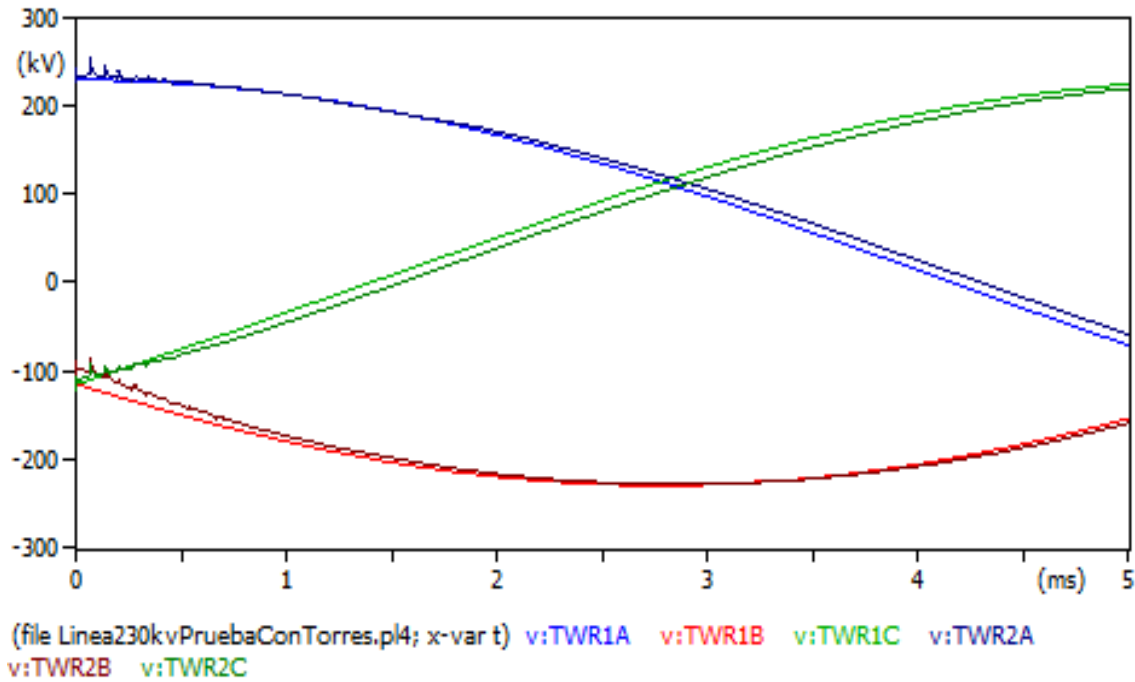


(c)

**Grafica 3.10 Voltajes de salida de la línea**

**con la condición 4: Tramo 1 (a), Tramo 2 (b), Tramo 3 (c).**

De acuerdo a lo mostrado en las gráficas expuestas se puede visualizar un correcto funcionamiento de las líneas de transmisión, en cada una de las condiciones, pero debido a las cortas distancias entre los tramos estudiados, no se pueden apreciar los diversos comportamientos de las tensiones en la línea, por lo que se realizó una última simulación asumiendo distancias entre tramos de 10 km cada uno, por lo que en la gráfica 3.11 se muestra con mayor detalle la influencia del modelado de la torre ante la presencia del *back flashover*.



**Gráfica 3.11 Voltajes de salida de la línea con la condición 4, con distancias de 10km por cada tramo.**

La gráfica 3.11 muestra el voltaje de entrada (TWR1) y salida (TWR2) del tramo uno, y como se mencionaba anteriormente se puede apreciar con más detalle la disminución de voltaje al incorporar de la torre de transmisión a la línea, de igual forma se puede distinguir los diferentes sobrevoltajes ocasionados por el impacto de la descarga atmosférica en el punto alto de la torre. Del mismo modo se confirma la influencia del modelado de las torres de transmisión ante transitorios del tipo atmosférico ya que en las simulaciones sin las torres se observan sobrevoltajes con mayor amplitud en comparación a los sobrevoltajes con las torres agregadas a las líneas.

Conocer estos niveles de sobrevoltajes, permite la correcta toma de decisiones al momento de seleccionar los sistemas de protecciones ante descargas atmosféricas, para que la energía originada por ese impacto pueda disiparse de manera oportuna evitando así niveles de tensión tan altos que puedan generar daños en la torre, trayendo como consecuencias fallas en el sistema de transmisión.

# CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

## CONCLUSIONES

Uno de los factores a estudiar en las líneas de transmisión son los sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas, por lo que contar con los modelos que permitan determinar las magnitudes de estos voltajes de manera mucho más precisa dependerá de la utilización de herramientas adecuadas y de que los elementos físicos implicados en el fenómeno sean representados mediante un modelado de tal forma que simulen los efectos mas cercanos a la realidad.

Por lo que en el presente estudio se implementaron tres modelos para la representación de las torres de transmisión, el modelo cónico perteneciente a los modelos geométricos, el modelo multipisos y el modelo multiconductor. Una vez obtenidos los parámetros de cada uno de los modelos, aplicados en torres de transmisión de 230 kV y 400 kV, se dispuso a inyectar una descarga atmosférica en el punto más alto de las mismas, para así conocer su influencia en la evaluación de la ocurrencia de *back flashover*, presentando resultados de gran utilidad en cada uno de los casos.

En el modelo cónico, el cual representa el cuerpo de la torre mediante una única impedancia característica, se evidenciaron niveles de sobrevoltajes ocasionados por el impacto del rayo, asimismo se concluyó que este modelo no muestra con precisión las pérdidas que podrían generarse debido a su falta de semejanza con el modelo físico de la torre. De igual forma se ejecutó el modelado mediante el modelo multiconductor, el cual su implementación fue más compleja en comparación al modelado anterior ya que dicho modelo no solo representa el cuerpo de la torre sino también las crucetas de la misma. De manera similar se evidenciaron oscilaciones de voltaje a causa de la descarga atmosférica, pero en este caso de mayor amplitud.

Posteriormente se implementó el modelo multipisos, el cual divide a la torre de transmisión por secciones, las cuales representa las secciones de la torre entre las crucetas. Al inyectar la descarga atmosférica en el punto mas alto de la torre se demostró de igual forma la presencia sobrevoltajes a lo largo del cuerpo de la torre de transmisión. Asimismo, se concluyó que el modelo multipisos demostró ser más sensible en cuanto a la geometría de las torres de transmisión, debido a que mostros mejores resultados en cuanto a la pérdida de potencia.

En los tres modelos se encontró un factor en común, la importancia de la resistencia puesta tierra, al comprobarse que a mayor valor de la RPT se disminuyen las distorsiones en los voltajes, es decir, se reducen las pérdidas de potencia que ocurren en el transitorio ocasionado por la descarga atmosférica.

Finalmente, se incluyó en un sistema de potencia el modelado de la torre de transmisión de 230 kV haciendo uso del modelo multipisos, tomando en cuenta diversas condiciones de funcionamiento, se evidenció la influencia del modelado ya que se aprecia una leve disminución de voltaje al ser incorporada la torre en las líneas de transmisión. Se evidenciaron los sobrevoltajes ocasionados por el impacto del rayo y la influencia del modelado de las torres debido a que se simuló una condición de funcionamiento en la cual se presentaba la descarga atmosférica, pero sin incluir las torres en las líneas de transmisión demostrando mayores niveles de sobrevoltajes en comparación a los sobrevoltajes con las torres agregadas a las líneas.

Del mismo modo se determinó que el modelado mediante simulaciones y análisis realizados en el presente trabajo permite expresar que el estudio de los fenómenos transitorios que afectan a los sistemas eléctricos de potencia, facilita determinar ciertos parámetros para el diseño y operación de los mismos, por esta razón el uso de software computacionales como el ATP adquiere gran importancia en el dimensionamiento de estos sistemas.



## RECOMENDACIONES

Dado que en este trabajo se analizó de manera específica solo la influencia del modelado de torres de transmisión, para estudiar su comportamiento y su interacción con la red ante la ocurrencia del fenómeno *back flashover* ocasionado por el impacto de las descargas atmosféricas, se deja abierta la posibilidad de continuidad de estudios centrados en otras variables en la ocurrencia de este fenómeno.

Se recomienda darle continuidad a este trabajo de investigación mediante estudios enfocados en análisis de probabilidades de la ocurrencia del *back flashover*, análisis para conocer con mayor detalle la influencia de los aisladores ante estos niveles de sobretensión, de igual forma se pudiese evaluar la tasa de salidas forzadas, por descargas atmosféricas, de líneas de transmisión.

www.bdigital.ula.ve

## REFERENCIAS

- [1] Gutiérrez V. Martín, Martín P. Pedro. Análisis de flameo inverso en líneas de transmisión de 400 kV utilizando el ATP. Tesis de Grado. Diciembre 2007.
- [2] Celis L. Daniel S. (2009) Análisis de sobretensiones de origen atmosférico en líneas de transmisión, utilizando el programa EMTP/ATP. Tesis de Grado. Marzo 2009.
- [3] Marcano N. Genesis D. Modelado de la torre de transmisión para determinar su comportamiento ante descargas atmosféricas. Tesis de Grado. Octubre 2014.
- [4] F. S. Almeida, F. H. Silveira, A. De Conti, S. Visacro. *Influence of Tower Modeling on the Assessment of Back flashover Occurrence on Transmission Lines*. Artículo. Mayo 2021.
- [5] Briceño Hildemaro. Teoría de líneas aéreas transmisoras de potencia eléctrica. Guía Académica. Septiembre 1995.
- [6] John J. Grainger., William D. Stevenson Jr. (1996). Análisis de sistemas de potencia. Mc Graw Hill.
- [7] Abreu A. Calidad de Redes de Potencia Eléctrica en Redes de Distribución. Manual de ENEIVEN. Junio 2005.
- [8] González M., Francisco. Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo. Tesis Doctoral. Octubre 2001.

- [9] IEEE Std 4-1995. *IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing*. 1995.
- [10] Giraldo C. Diaz H., Zuñiga G. Santos. Diseño del apantallamiento de las líneas de subtransmisión de 34.5 kV del sistema EMCALI. Tesis de Grado. Octubre 1995.
- [11] G. Radhika<sup>1</sup>, M. Suryakalavathi. *Back flashover analysis improvement of a 220 kV double circuit transmission line*. Artículo. Junio 2014.
- [12] Martinez-Velasco J. (2010). *Power system Transients*, CRC Press.
- [13] Hans K. Høidalen., László P., Francisco P. (2019) Users' Manual ATP.

[www.bdigital.ula.ve](http://www.bdigital.ula.ve)