



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**"DIAGNÓSTICO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO
DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN
MEDIANTE EL MODELADO EN ATP/EMTP"**

TESIS

Que para obtener el grado de
**MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA**

Presenta:

ING. VICTORINO TURRUBIATES GUILLEN

Asesor de tesis:

M.C. CARLOS MORÁN RAMÍREZ



APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS



OFICIO SIEP No. 1470 /2017

ING. VICTORINO TURRUBIATES GUILLÉN
Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas
Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"DIAGNÓSTICO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN MEDIANTE EL MODELADO EN ATP/EMTP"**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de tesis al M.C. Carlos Morán Ramírez.

Sin otro particular, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

Puebla, Puebla a 21 de marzo de 2017

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
Director de la Facultad de Ingeniería

C.c.p. M.C. Carlos Morán Ramírez. Asesor Tema tesis.
C.c.p. Archivo.

ABH/GCC/dsm.

CH

Facultad
de Ingeniería

Blvd. Valsequillo y Av. San Claudio
s/n, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pue. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610



ACTA RESOLUTIVA DE IMPRESIÓN DE TESIS

Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE:

El suscrito: **M.C. Carlos Morán Ramírez**, asesor del Tema de Tesis denominado: **“DIAGNÓSTICO DE LA COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN MEDIANTE EL MODELADO EN ATP/EMTP”**, presentado por el C. VICTORINO TURRUBIATES GUILLEN, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.

Lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

Puebla, Pue., 13 de marzo de 2017



M.C. Carlos Morán Ramírez

ASESOR

c.c.p.- Exámenes Profesionales

Interesado

Archivo

CMR



DEDICATORIAS

A Dios nuestro señor, por la vida y la voluntad de seguir adelante, por ser la fuente del gran océano del conocimiento donde bebemos todos y que me ha permitido compartir esta pequeña gota.

Ha sido el Omnipotente quien ha permitido que la sabiduría dirija y guíe mis pasos. Ha sido el Todopoderoso, quien ha iluminado mi sendero cuando más oscuro ha estado. Ha sido el creador de todas las cosas, el que me ha dado fortaleza para continuar cuando a punto de caer me he encontrado; por ello con toda la humildad que de mi corazón se puede emanar dedico primeramente a Dios Padre, Dios Hijo y Dios Espíritu Santo este trabajo de tesis.

A la memoria de **mis Padres Esperanza y Blas**, porque sé que desde el cielo me han seguido bendiciendo todos los días de mi vida. Y por enseñarme en vida, que la honestidad es una de las grandes virtudes que puede poseer el hombre. ¡Los amo, siempre estarán en mi corazón!

A la memoria de **mis Hermanos Felipe y Enrique**, porque sé que desde el cielo me han seguido bendiciendo todos los días de mi vida. Y por enseñarme en vida, con su ejemplo la virtud de la perseverancia. ¡Los amo, siempre estarán en mi corazón!

A **mis Hermanas Dora y Bertha**, por su comprensión, confianza, apoyo y amistad que siempre nos hemos tenido en todo momento. Por las palabras de aliento, consejos y regaños que me ayudaron a mantenerme en la dirección correcta.

A **mi Querida Familia** y grandes amigos que me acompañaron siempre, sin los cuales esto, no hubiese sido posible.

A la Secretaria de Posgrado, de la Facultad de Ingeniería de la Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, por las facilidades prestadas durante mi estancia en esta magna escuela.



AGRADECIMIENTOS

Especialmente al **M. en C. Carlos Moran Ramírez**, por la dirección de este trabajo de tesis. Por confiar siempre en mí, por tenerme paciencia, por ayudarme, por apoyarme y motivarme para culminar mis estudios en momentos difíciles, como usted quedan pocos, fue un honor ser dirigido por usted.

Un agradecimiento muy especial al **M.I. Edgar Iram Villagrán Arroyo**, que me brindó su apoyo con la beca para la realización de los estudios de Maestría en Ingeniería, Opción Terminal en Sistemas Eléctricos de Potencia.

A todos aquellos **compañeros y amigos**, que me brindaron su apoyo y sobre todo, su amistad y con los cuales compartimos momentos agradables, especialmente los compañeros de generación: Álvaro Rodríguez, Alejandro Estrada, Carlos Eduardo Vázquez, Felipe Cruz, Ismael Barrales, Jacobo López, Javier Aguilar, Luis Ángel Coyotl, Luis Contreras, Marco Antonio Correa, Oscar Daniel Jiménez, Rogelio Marín, Víctor Manuel Morales y aquellos que iniciaron esta segunda generación.

Al **Ing. Fernando Sánchez Valdez**, muchas gracias por tu apoyo invaluable en la realización de este trabajo.



ÍNDICE

APROBACIÓN DE TEMA DE TESIS	I
ACTA RESOLUTIVA DE IMPRESIÓN DE TESIS	II
DEDICATORIAS	III
AGRADECIMIENTOS	IV
ÍNDICE.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS	VIII
ÍNDICE DE TABLAS	X
GLOSARIO DE TÉRMINOS	XI
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ESTADO DEL ARTE	2
1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.4 JUSTIFICACIÓN	8
1.5 MARCO TEÓRICO.....	8
1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	9
1.7 OBJETIVO GENERAL.....	9
CAPÍTULO II. GENERALIDADES	10
2.1 DEFINICIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN	10
2.2 CLASIFICACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN	10
2.2.1 POR NIVEL DE VOLTAJE, EHV, UHV, HVAC, HVDC	10
2.2.2 POR DISEÑO, AÉREAS Y SUBTERRÁNEAS.....	11
2.3 ELEMENTOS DE UNA LÍNEA AÉREA DE EHV Y UHV	11
2.3.1 TIPOS DE TORRES	11
2.3.2 BLINDAJE CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR HILOS DE GUARDA	15
2.3.3 TIPOS DE AISLAMIENTO DE ACUERDO CON EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN	17
2.3.4 RED DE TIERRAS A PIE DE TORRE Y CONTRAANTENAS	20
2.3.5 TIPOS DE CONDUCTORES PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS	21
CAPÍTULO III SOBRETENSIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA	25
3.1 CLASIFICACIÓN DE SOBRETENSIONES.....	25



3.2 NATURALEZA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	25
3.3 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES POR MANIOBRA.....	28
3.3.1 SOBRETENSIÓN POR ENERGIZACIÓN Y RE-CIERRE DE LÍNEAS	28
3.3.2 SOBRETENSIÓN POR FALLA.....	29
3.3.3 SOBRETENSIÓN POR CORRIENTES CAPACITIVAS O INDUCTIVAS.....	30
3.4 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES TEMPORALES	31
3.4.1 SOBRETENSIONES POR FALLA	31
3.4.2 SOBRETENSIÓN POR RECHAZO DE CARGA.....	32
3.4.3 SOBRETENSIONES POR RESONANCIA Y FERRO-RESONANCIA	33
3.5 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE LENTO, RÁPIDO Y MUY RÁPIDO	33
3.5.1 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO	33
3.5.2 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO.....	33
3.5.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO.....	33
3.6 FACTOR DE FALLA A TIERRA Y SU RELACIÓN CON LAS SOBRETENSIONES EN FASES.....	34
CAPÍTULO IV COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN, MÉTODO CÁLCULO MANUAL.....	35
4.1 CÁLCULO DE ÁNGULOS DE BLINDAJE CON HILOS DE GUARDA EN LÍNEAS AÉREA DE EHV.	35
4.2 CÁLCULO DE APARTARRAYOS PARA LÍNEAS TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN	37
4.2.1 APARTARRAYOS SIN ENTREHIERROS.....	38
4.2.2 APARTARRAYOS CON ENTREHIERROS EN PARALELO.....	39
4.2.3 APARTARRAYOS CON ENTREHIERROS EN SERIE	40
4.3 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN EHV.	42
4.3.1 NÚMERO DE AISLADORES POR CADENA DE AISLADORES, DE ACUERDO CON LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR Y NIVEL DE CONTAMINACIÓN.....	44
4.3.2 CÁLCULO DE DISTANCIAS EN AIRE DE LA POSICIÓN DE CONDUCTORES A LA VENTANA YA LA TRABE DE LA ESTRUCTURA.....	46
CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LINEAS DE TRANSMISION DE EHV, MEDIANTE EL USO DEL ATPDRAW	48
5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATPDRAW.....	48
5.1.1 RESUMEN	48
5.1.2 INTRODUCCIÓN.....	48
5.1.3 REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE.	49



5.1.4 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE SUS CAPACIDADES.....	50
5.2 MODELOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN ATPDRAW	53
5.2.1 MODELO PI	57
5.2.2 MODELO DE J. MARTÍ.....	58
5.2.3 MODELO DE TAKU NODA	60
5.2.4 MODELO BERGERON	61
5.2.5 MODELO DE SEMLYEN	62
5.3 MODELO IMPLEMENTADO EN ATP	63
5.4 MODELADO DE LA TORRE AUTOSOPORTADA EN DISPOSICIÓN HORIZONTAL, DE DOS CONDUCTORES POR FASE Y DOS HILOS DE GUARDA.	69
5.7 MODELO PARA DESCARGAS AL HILO DE GUARDA EN UNA LÍNEA DE 400 KV.	73
CONCLUSIONES.....	76
REFERENCIAS.....	77
APÉNDICE	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Torre de celosía típica utilizada en la transmisión de energía eléctrica.	13
Figura 2. Estructura de un solo poste.	14
Figura 3. Estructuras de marco tipo H.....	14
Figura 4. Diferentes tipos de estructuras tensadas.	15
Figura 5. Comparación de ángulos de protección de Whitehead-Brown y Young.	16
Figura 6. Modelo geométrico, ángulos y distancias.....	17
Figura 7. Tipos de aisladores.	18
Figura 8. Voltaje crítico de flameo por unidad de distancia de fuga en función del nivel de contaminación para aisladores cerámicos.....	19
Figura 9. Voltaje crítico de flameo por unidad de distancia de fuga en función del nivel de contaminación para aisladores no cerámicos.....	19
Figura 10. Contrantenas a pie de torre.	21
Figura 11. Diferentes configuraciones y tamaños de cables ACSR.	22
Figura 12. Configuración típica de conductores ACSR/SD.	23
Figura 13. Diferentes conductores ACSR/T2.	23
Figura 14. Conductores AAC.....	24
Figura 15. Conductores AAAC.	24
Figura 16. Se muestran los cuatro diferentes tipos de descargas atmosféricas, (a) descendente negativo, (b) ascendente negativo, (c) descendente negativo, (d) ascendente positivo.	26
Figura 17. Diagrama de la luminosidad de una descarga descendente negativa a tierra donde se muestran los tres rayos y su corriente correspondiente: (a) imagen fija, (b) secuencia en el tiempo del líder escalonado y los dos subsecuentes líderes dardo, (c) corriente de trayectoria base.	27
Figura 18. Muestra las sobretensiones producidas por un re-cierre de tres fases en la línea Eddy – Chemawa (Oregon, E.E. U.U.) a 230 kV.....	30
Figura 19. Tipos de Sobretensiones Transitorias.	34
Figura 20. Tipos de ángulos de blindaje.....	35
Figura 21. Análisis de blindaje de acuerdo a los modelos electromagnéticos.....	36
Figura 22. Apartarrayos de óxido metálico sin entrehierros.	38
Figura 23. Apartarrayos de óxido metálico con entrehierros en paralelo.....	39
Figura 24. Apartarrayos de óxido metálico con entrehierros en serie	40
Figura 25. Unidades estándar de aisladores.	45
Figura 26. Tensión crítica con probabilidad de 50% de flameo contra la distancia del espacio de aire del plano de una esfera de diferentes diámetros.....	46
Figura 27. Árbol de decisiones.	55
Figura 28. Clasificación de los modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos.	56
Figura 29. Diagrama de flujo guía de los modelos de línea apropiados [57].	57
Figura 30. Circuito equivalente del modelo de Martí en el dominio de la frecuencia.....	59
Figura 31. Circuito equivalente del modelo de T. Noda en el dominio del tiempo	61
Figura 32. Circuito equivalente del modelo Bergeron	62
Figura 33. Forma de onda de impulso del rayo y elemento Heidler type 15 en ATPDraw.....	64
Figura 34. Sección de una línea de transmisión en ATPDraw.	64
Figura 35. Representación en el ATPDraw de la torre con sus impedancias características.....	65
Figura 36. Modelo de resistencia de tipo concentrado.	67
Figura 37. Modelo de cadena de aisladores y su ventana de entrada de datos.....	68



Figura 38. Elemento en ATPDraw del voltaje de flameo representado mediante TACS.68

Figura 39. Torre tipo 400 kV.....69

Figura 40. Caja de dialogo de datos del modelo de la línea.....70

Figura 41. Datos geométricos de la línea.71

Figura 42. Secciones cónicas de la torre de 400 kV.72

Figura 43. Impedancias de la torre de 400 kV.....72

Figura 44. Representación de una descarga atmosférica en un hilo de guarda en ATPDraw.73

Figura 45. Voltajes en los aisladores de la fase A de las secciones 1, 2 y 3 de la línea con 18 unidades.74

Figura 46. Voltaje en los aisladores de las fases A, B y C de la sección 2 de la línea.74

Figura 47. Voltajes en los aisladores de la fase A de las secciones 1, 2 y 3 de la línea con 22 unidades.75



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Factores A, B, γ y γ de los diferentes modelos electrogeométricos.....	37
Tabla 2. Características eléctricas de los apartarrayos para tensiones normalizadas en México.	42
Tabla 3. Estándares de tensión Clase II.	44
Tabla 4. Resistencia de aislamiento para unidades de cadenas de aisladores según los niveles de contaminación.....	45
Tabla 5. Número de unidades estándar de aisladores en I y V requeridas por tensión del sistema y nivel de contaminación.....	45
Tabla 6. Clasificación de los rangos de frecuencia para la representación de componentes de sistemas eléctricos de potencia.	54
Tabla 7. Impedancia característica de los conos de la torre de transmisión.....	71



GLOSARIO DE TÉRMINOS

Carga no lineal: Una carga donde el trazo de su forma de onda muestra una corriente no sinusoidal incluso cuando esta es suministrada por una fuente de voltaje sinusoidal. Un dispositivo eléctrico que en funcionamiento en estado estacionario tiene una impedancia que varía durante el ciclo de la forma de onda de la tensión de entrada [61].

Modelo: Una aproximación, representación o idealización de aspectos seleccionados de una estructura, comportamiento, operación u otras características de un proceso, concepto o sistema del mundo real [62].

Resistividad del terreno: La medida de la impedancia eléctrica de una unidad de volumen de suelo. La unidad de uso común es el ohm-metro, ($\Omega \cdot m$), que se refiere a la impedancia medida entre caras opuestas de un metro cúbico de suelo [63].

Flameo inverso (Back flashover): Un flameo de aislamiento resultante de un rayo a parte de una red o instalación eléctrica que normalmente está a potencial de tierra [64].

Voltaje crítico de flameo (critical flashover voltaje, CFO): La amplitud del voltaje de una forma de onda dada que, bajo condiciones especificadas, provoca el flameo a través del medio circundante en el 50% de las aplicaciones de voltaje [48].

Resonancia: El acrecentamiento de la respuesta de un sistema físico (sistema eléctrico o circuito) a una excitación periódica cuando la frecuencia de excitación (f) es igual a una frecuencia natural del sistema. En un circuito en serie que consiste en resistencia (R), inductancia (L) y capacitancia (C), cuando los parámetros L y C son tales que la reactancia resultante se convierte en cero y la corriente alcanza el máximo, entonces el circuito está en resonancia en serie. Esto sucede cuando

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ or } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

De manera similar, en un circuito paralelo constituido por R , L y C , la admitancia es la más baja cuando $1 / X_L = 1 / X_C$, y el circuito está en resonancia paralela. Esto sucede cuando

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \text{ or } f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ [65].}$$



Ferroresonancia: El modo de funcionamiento en estado estacionario que existe cuando se aplica una tensión alterna de magnitud suficiente a un circuito que consiste en capacitancia e inductancia ferromagnética que provocan cambios en la inductancia ferromagnética que se repiten cada medio ciclo [66].

Tensión máxima de operación continua (Maximum continuous operating voltage, MCOV): El máximo valor de la media cuadrática (rms) de la tensión del sistema que puede aplicarse continuamente entre las terminales del apartarrayos [67].

Entrehierro: El espacio entre la derivación magnética y el núcleo, utilizado para establecer la reluctancia requerida de la trayectoria del flujo de derivación [66].

Efecto Ferranti: Fenómeno observado en las líneas de transmisión con largas distancias que son energizadas desde un extremo, mientras que el otro extremo está descargado o cargado ligeramente [68].



CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 INTRODUCCIÓN

Sin lugar a duda algunos de los principales problemas que afectan la calidad de la energía eléctrica son las fallas de red y las cargas no lineales, la primera de ellas genera impacto sobre la continuidad del servicio y las cargas no lineales alteran la calidad de la forma de onda suministrada por las empresas distribuidoras de energía [Baggini, 2008].

La mayoría de temas relacionados con la calidad de la energía eléctrica han sido trabajados por una gran cantidad de autores, obteniendo muy buenos resultados en la simulación de circuitos de distribución basados en modelos creados por la obtención de parámetros, pero surge la pregunta ¿Qué tan sensibles son estos modelos obtenidos en la simulación al ser incorporados en los sistemas reales? Actualmente se cuenta con modelos teóricos de los sistemas de distribución de energía eléctrica en los cuáles se presentan incertidumbres en la exactitud de sus resultados al ser contrastados con los modelos reales, por ello se hace necesario comparar los modelos teóricos con los modelos reales y verificar la eficiencia de los modelos utilizados.

Para corroborar la sensibilidad de los modelos teóricos empleados en la simulación de circuitos en sistemas de distribución se deben revisar los diferentes componentes del circuito como son las fuentes, las cargas y las líneas eléctricas. Para ello se deben revisar y validar los modelos que se están empleando en cada uno de estos componentes y de allí detectar cuál o cuáles de estos componentes están teniendo gran influencia en los circuitos para así realizar las correcciones que conlleven al mejoramiento de los modelos y con esto a la mejora en los resultados de las simulaciones cuando estas se comparan con los datos reales del circuito.

En la actualidad la representación de los circuitos en los sistemas de distribución se realiza con modelos de líneas eléctricas que son normalizados y se encuentra fácilmente en la bibliografía referente al tema, pero estos modelos no son completos al tener en cuenta ciertos factores tales como el perfil del terreno o los cables de guarda, surgiendo de aquí otra inquietud ¿Qué tanto afecta a la exactitud del modelo la no inclusión de parámetros como los mencionados? Es por ello que se hace necesario la validación del modelado de los sistemas de tal manera que el presente trabajo se centra en los modelos de líneas eléctricas empleados en la simulación de sistemas de distribución.



Los primeros modelos de líneas eléctricas empleados en la simulación de sistemas de distribución fueron muy simples, ya que estos solo tenían en cuenta sus parámetros básicos, como su configuración y el tipo de conductor [Checa, 2000]. Con el transcurso del tiempo y la necesidad de mejorar los resultados arrojados por estos modelos, se fueron realizando correcciones hasta llegar a un modelo más completo, incluyendo en este modelo parámetros importantes como la resistividad del terreno y los cables de guarda [Anderson, 1973]. Pero aún con este modelo más completo quedaron por fuera ciertos parámetros importantes en las líneas eléctricas como lo es el perfil del terreno, lo cual produce incertidumbre del efecto que éste parámetro genera en los resultados obtenidos en las simulaciones.

Para la validación de los modelos de líneas teóricos empleados en la simulación de circuitos en sistemas de distribución, en primera instancia se determinaron los modelos a trabajar, para esto se buscaron modelos ampliamente utilizados que en el momento del análisis presentan diferentes formas de solución para la obtención de los resultados, lo cual permitió trabajar con casos que fuesen diferentes. Después de definir cada uno de los modelos, se procedió a definir los parámetros que se consideraron relevantes en las líneas eléctricas y que fueron tomados algunos de una revisión bibliográfica de las líneas y otros que no están siendo incluidos en los modelos teóricos, pero pueden ser relevantes, tal como el perfil del terreno.

Para realizar la validación de cada uno de los modelos, se incluyeron en ellos los parámetros definidos y se realizaron variaciones de los mismos para así definir la importancia de cada uno de los parámetros en los diferentes modelos empleados en este trabajo y con ello buscar el mejoramiento de los modelos y la reducción de la incertidumbre.

En este trabajo se hace la descripción de las actividades realizados para cumplir con los objetivos del presente proyecto, esa descripción se encuentra estructurada de la siguiente forma: Capítulo 1: En el primer capítulo se hace una descripción detallada de la forma y solución de cada uno de los modelos de líneas con que se trabajaron en el presente proyecto. Capítulo 2: En el segundo capítulo se hace la descripción de la herramienta software empleada para realizar la simulación con la descripción de los circuitos que fueron empleados para realizar las pruebas de validación.

1.2 ESTADO DEL ARTE

P. Pinceti, M. Giannetoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 393-398, April 1999, presentan un modelo de apartarrayos de óxido metálico, derivado de un modelo recomendado por el grupo de trabajo de la IEEE 3.4.11 (IEEE W. G. 3.4.11). La principal



innovación introducida por el documento yace en la simplicidad de los criterios propuestos para la identificación de los parámetros del modelo. Estos criterios permiten calcular los parámetros del modelo directamente de los datos estándar reportados del apartarrayos con un procedimiento simple y directo. La eficacia del modelo fue probada para distintos apartarrayos de diferentes fabricantes tanto para aplicaciones en media tensión y alta tensión. Los resultados de las pruebas de descarga obtenidos por los diferentes fabricantes fueron comparados con los resultados de simulaciones realizadas con el programa para transitorios (ATP). El uso de la eficacia y sencillez hacen que el modelo propuesto sea una herramienta útil para el estudio de coordinación de aislamiento con transitorios con frentes con pendientes empinadas. [1]

S. Lam-Du, T. Tran-Quoc, "Insulation coordination study of a 220 kv cable-line", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 2082-2086, January 2000. Investiga el estudio de coordinación de aislamiento para la línea de 220 kV Nha Be - Tao Dan que se instalará en la ciudad de Ho Chi Minh, Vietnam. El objetivo principal del estudio para esta línea es determinar los niveles de sobretensión causados por una descarga atmosférica y por maniobra. Con el fin de estudiar las sobretensiones, se presenta el modelado de los componentes de este sistema, tales como líneas aéreas, cables subterráneos, apartarrayos y torres. Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando el programa EMTP. [2]

A. Goudarzi, H. Mohseni, "Accuracy evaluation of IEEE model for distribution class metal, oxide surge arrester", in Proc. 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC'04), Bristol, United Kingdom, Vol. 1, pp. 179-182, September 2004. Los apartarrayos de óxido metálico (Metal-Oxide Surge Arresters, MOSA) se utilizan ampliamente como dispositivos de protección contra sobretensiones por maniobra y descargas atmosféricas en sistemas de energía eléctrica. El modelado apropiado de sus características dinámicas es muy importante para los estudios de coordinación de aislamiento, la ubicación de los apartarrayos y la absorción de energía. El grupo de trabajo del IEEE 3.4.11 (W. G. IEEE 3.4.11) ha recomendado un modelo que se puede utilizar en el intervalo de tiempo del pico de frente de onda de 0,5 a 45 μ sec. Este modelo se ha desarrollado principalmente para los apartarrayos de clase subestación. En este trabajo la validez de la precisión del modelo aplicado para un apartarrayos de clase distribución se ha comparado con los resultados de pruebas en laboratorio. [3]

A. Ametani, T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in japan using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 867-875, April 2005. EMTP ha sido ampliamente utilizado en Japón para analizar las sobretensiones por maniobra y por descargas atmosféricas y de esta manera



diseñar centrales eléctricas y subestaciones desde la perspectiva de la coordinación del aislamiento. El estándar japonés de prueba de alto voltaje, JEC- 0102-1994, así como el diseño y coordinación de aislamiento de la línea de 1,100 kV de la Compañía Eléctrica de Tokyo se basa principalmente en simulaciones mediante EMTP. En este trabajo se presenta un método de análisis de sobretensiones por descarga atmosférica usando el EMTP como se recomienda en la norma japonesa y las guías relacionadas, y sugiere, que los trabajos se realicen con base en las discusiones sobre los límites y los problemas de los modelos recomendados aplicables. [4]

W. Pan, X. Liu, D. Nie, “Development and application of insulation coordination program for UHVDC converter stations” in Proc. Third International Conference Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT'08), Nanjing, China, pp. 2262-2266, April 2008. Ofrece un programa para mejorar la eficiencia y la precisión del cálculo de la coordinación de aislamiento para las estaciones convertidoras en sistemas UHVDC. El programa se basa en el VBA (Visual Basic for Applications) de Excel. Tiene las funciones de selección de esquema de apartarrayos, modificando y guardando los parámetros, y añadiendo las curvas características de los apartarrayos y así sucesivamente. Se aplica para calcular los niveles de coordinación de aislamiento en el sistema UHVDC Xiangjiaba-Shanghai. Se prueba que el programa es preciso, rápido y conveniente, y puede ser aplicado para las estaciones convertidoras en sistemas UHVDC. [5]

T. Pham, N. Pham, T. V. Tran, “EMTP simulation of induced overvoltage in low voltage system” in Proc. Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI'10), San Diego, CA, USA, pp. 1-4, June 2010. En este trabajo son investigadas, las sobretensiones inducidas en un sistema de baja tensión típico de las zonas rurales de Vietnam mediante la simulación en EMTP / ATP. El modelo Rusk es usado para simular la fuente actual que afecta al sistema de baja tensión. Se analizará la influencia de la resistencia del sistema de puesta a tierra en el lado de los consumidores y el tamaño de la carga. La discusión y los resultados pueden proporcionar información útil para la coordinación de aislamiento del sistema de baja tensión. [6]

P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis , “Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations”, Generation, Transmission & Distribution IET, Vol. 4, No. 12, pp. 1299-1313, December 2010. La corriente máxima de falla de protección en líneas aéreas de transmisión es un parámetro importante en la evaluación de la capacidad de blindaje de las líneas y en la coordinación de aislamiento de las subestaciones. Se presentan expresiones generales para la estimación de la



corriente máxima de falla de protección en líneas de transmisión, derivadas del empleo del análisis de protección de varios modelos acoplados a descargas atmosféricas. Una aplicación típica de 110 kV, hasta líneas aéreas de transmisión 1.150 kV muestran que existe una gran variabilidad en la corriente máxima de falla de protección entre los modelos acoplados a descargas atmosféricas. La importancia de la corriente máxima de falla de protección en la coordinación de aislamiento de las subestaciones se demuestra con la ayuda del programa de simulaciones de transitorios (ATP- EMTP). Las sobretensiones calculadas afectan a los sistemas de subestaciones aisladas en gas de 150 y 400 kV (GIS) porque la corriente máxima de falla de protección en líneas aéreas de transmisión usada para cada caso, es dependiente la corriente de falla de protección actual y varía de acuerdo con el modelo acoplado a descargas atmosféricas empleado en el análisis de protección de cada línea. La implementación del modelo electrogeométrico adoptado por el estándar IEEE Std 1243: 1997 en el análisis de protección impone altas exigencias en materia de protección de las subestaciones contra la falla de protección por sobretensiones entrantes. [7]

S. Bedoui, A. Bayadi, A. M. Haddad, “Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of an HV 220kV double circuit line“, in Proc. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC’10), Cardiff, Wales, pp. 1-6, September 2010. Estudia y evalúa la protección de la línea de transmisión con apartarrayos de óxido metálico, cuando una descarga atmosférica golpea el hilo de guarda. En este trabajo se estudia la contribución que brindan los apartarrayos de óxido metálico en la protección por descargas atmosféricas de la línea aérea de transmisión de doble circuito a 220 kV en condiciones de servicio, usando el programa ATP/EMTP. Todos los modelos usados son extensivamente verificados a través de una comparación de las simulaciones y los resultados experimentales. [8]

J. Sardi, J. O. C. Chian, “Evaluation of surge arrester requirement for overhead transmission line using Electromagnetic Transient Program“, in Proc. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon’10), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 958-988, December 2010. En este trabajo se generaliza el modelado del diseño de una línea de transmisión de 132 kV simulando los efectos del backflashover utilizando el Programa de Transitorios Electromagnéticos PSCAD, Diseño de Sistemas de Potencia Asistido por Computadora (Power System Computer Aided Design). El muestreo de datos de la línea de transmisión fue tomado de la compañía eléctrica Tenaga National Berhad (TNB) para utilizarlo en la simulación hecha en PSCAD. Parte fundamental de los estudios incluyen el modelo de componentes de la línea de transmisión, tales como la coordinación de aislamiento, modelo de las torres, modelo de pie de torre y apartarrayos. Esta



investigación se centrará en el efecto de las diferentes posiciones donde se colocará el apartarrayos de la línea de transmisión para obtener una tasa de valor del backflashover. Se implementa un modelo de apartarrayos que se encuentra a través de la línea de aislamiento, para prevenir descargas disruptivas mediante el software PSCAD. Es investigada la capacidad del apartarrayos para reducir la tasa de backflashover y así poder seleccionar el apartarrayos adecuado para las exigencias de cada sistema. Los resultados fueron analizados y se discutió la influencia que tiene la posición del apartarrayos en la línea de transmisión en referencia a la tasa de incidencia de backflashover sobre la línea. Los resultados de esta investigación pueden ser una guía de modelos significativos para los diseñadores de líneas de transmisión o para otros investigadores en la mejora del rendimiento de las líneas aéreas de transmisión en términos de reducción de la tasa de backflashover. [9]

E. Babaei, S. Golabi, J. Jafarzadeh, Z. Golabi, "Comprehensive analysis of insertion elements in circuit breaker to reduce switching overvoltages", in Proc. 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE'11), Niagaras Falls, ON, Canada, pp. 239-242, May 2011. Uno de los métodos de reducción de sobretensiones por maniobra en líneas de transmisión de ultra alto voltaje (UHV) es utilizar una resistencia de pre-inserción en el interruptor de circuito. No hay referencias generales y^o específicas relativas a la resistencia de pre-inserción. En este trabajo, se estudia la reducción de las sobretensiones por maniobra utilizando la resistencia de preinserción. Además, se estudió exhaustivamente la instalación de un inductor y condensador en paralelo con el interruptor automático. También se comparan las ventajas de utilizar la resistencia en paralelo con el interruptor de circuito en lugar de la bobina y el condensador. Los análisis se verificaron mediante simulaciones en una línea de transmisión real de 400 kV perteneciente a la red ubicada en la provincia de Azerbaiyán en Irán, usando los softwares ATPDraw y EMTP. [10]

H. Tailor, S. Joshi, "Designing insulation coordination for Ultra High Voltage AC system by analyzing over voltages using frequency dependent line modeling" in Proc. Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE'13), Ahmedabad, India, pp. 1-6, November 2013. La coordinación de aislamiento es uno de los criterios más importantes para el diseño de sistemas de Ultra Alta Tensión. El método para diseñar la coordinación de aislamiento de cualquier sistema de Ultra Alta Tensión necesita del análisis de tensión y su comparación con la resistencia de diseño del equipo. En este documento se analizan diferentes tipos de sobretensiones en sistemas de Ultra Alta Tensión, el proceso de coordinación de aislamiento, modelado línea dependiente de la frecuencia y la simulación utilizando el programa EMTP y se presenta el diseño de coordinación de aislamiento de una línea de transmisión de 1.200 KV CA. Se examina la técnica sugerida de uso de



apartarrayos para reducir la tensión en la línea. [11]

Z. G. Datsios, P.N. Mikropoulos, "Implementation of leader development models in ATP-EMTP Using a type-94 circuit component" in Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP'14), Shanghai, China, pp. 979-985, October 2014. La evaluación de la rigidez dieléctrica del aislamiento de la línea de transmisión sometida a sobretensiones de frente rápido es de gran importancia para la coordinación de aislamiento de las líneas aéreas y las subestaciones conectadas. Entre los modelos propuestos en la literatura para la predicción del comportamiento dieléctrico de espacios de aire y aislantes, los modelos de desarrollo tipo líder o también llamados modelos de progresión líder tienen un mayor significado físico. En este estudio se implementan varios modelos de desarrollo tipo líder (arco) en un nuevo modelo en el programa ATP-EMTP utilizando la función MODELS (modelos) de este. El nuevo modelo se resuelve simultáneamente con el resto del sistema simulado interactuando con él como un elemento de circuito; esto se logra mediante el uso del modelo con un componente de circuito de tipo-94. El modelo desarrollado se verifica contra los datos de la literatura que se refieren a la tensión de rotura de los espacios de aire. Las simulaciones de falla de blindaje y flameo inverso son realizadas para una línea de transmisión de 150 a 400 KV para demostrar los efectos del modelado de la predescarga de corriente (corona inception), streamer (arqueo inicial del espacio en aire) y la propagación del arco (leader) de la fase con las corrientes críticas estimadas. [12]

N. Triruttanapiruk, P. Yutthagowith, "A simple surge arrester model extracted from experimental results" in Proc International Conference on Lightning Protection (ICLP'14), Shanghai, China, pp. 1616-1620, October 2014. Presentan un modelo simplificado de apartarrayos de óxido de zinc obtenido mediante resultados experimentales. Los parámetros en el modelo propuesto se estiman a partir de los resultados experimentales. El circuito de generación de corriente está incluido en el algoritmo para la estimación de parámetros. El circuito de generación se compone de un condensador de carga y un inductor asociado para producir la forma de onda de la corriente estándar del impulso de la descarga atmosférica de 8/20 μ s. El experimento del circuito de generación se llevó a cabo en un laboratorio de Alta Tensión real. En este documento se experimentan y comparan las intensidades inyectadas y las tensiones residuales calculados por el IEEE, las modificadas por el IEEE, y el modelo propuesto. A partir de la comparación de los resultados, el modelo propuesto muestra una mayor precisión que los otros modelos. Es más simple, más rápido en el cálculo, y cuenta con más precisión que los otros modelos. A partir de este logro, el modelo preciso de sobretensiones se puede aplicar fácilmente en un simulador de diseño de coordinación de aislamiento en circuitos. [13]



1.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Uno de los aspectos más importantes en la operación de los sistemas eléctricos de potencia es mantener la continuidad del servicio de energía eléctrica. La continuidad del servicio de energía eléctrica, se ve afectada por varias causas entre otras por fallas en la “coordinación de los aislamientos” de líneas de transmisión de alta tensión.

La importancia del correcto dimensionamiento de una red eléctrica respecto a la coordinación del aislamiento radica en:

1.- Asegurar la continuidad del suministro de energía eléctrica que en cierta forma es una medida de la calidad del servicio, la cual se determina por la duración y frecuencia de las interrupciones por falla de funcionamiento del sistema y sus componentes. Una de las fallas más comunes es la ruptura dieléctrica de las cadenas de aislamiento en líneas de transmisión de alta tensión.

2.- Considerar el aumento de tensiones nominales de operación del sistema eléctrico, fundamentado en razones técnico – económicas de utilización óptima de materiales y espacio, ante el crecimiento ininterrumpido de la demanda y el necesario transporte de elevados bloques de potencia. La incidencia de los aislamientos en el costo de un equipo o instalación de alta tensión se hace más notable a mayores tensiones de servicio, de tal modo que tiende a transformarse en uno de los factores económicos limitativos más importante. Por ello es primordial dimensionar los aislamientos de equipos e instalaciones en la forma más ajustada posible, para lo cual se requiere un cabal conocimiento y sus condiciones de uso.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Actualmente en los sistemas eléctricos de potencia, se pierde la continuidad del servicio eléctrico por innumerables causas entre las que se encuentra la falta o mala coordinación de los aislamientos en las líneas de transmisión.

En este trabajo, se empleará el modelado ATP/EMTP para diagnosticar, si la coordinación de aislamiento en líneas de transmisión de alta tensión, es correcta y que también nos ayude a detectar áreas vulnerables para hacer las mejoras necesarias, antes de que ocurran fallas, evitando de esta manera las interrupciones en el suministro de energía eléctrica a miles de usuarios de este servicio y cuantiosas pérdidas económicas.

1.5 MARCO TEÓRICO

En esta tesis, la idea es conocer con softwares de simulación existentes, como el ATP/EMTP, el estado en que se encuentra la coordinación de aislamiento en



líneas de transmisión de alta tensión.

1.6 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

La metodología empleada en este trabajo es del tipo predictiva, es decir, consiste en predecir o diagnosticar el estado de la coordinación de los aislamientos en una línea de transmisión de alta tensión, haciendo uso del modelado ATP/EMTP.

1.7 OBJETIVO GENERAL

Modelar la coordinación de aislamiento de líneas de transmisión de alta tensión mediante el software ATP / EMTP.



CAPÍTULO II. GENERALIDADES

2.1 DEFINICIÓN DE LÍNEA DE TRANSMISIÓN

Una línea de transmisión es aquella que transporta grandes cantidades de energía eléctrica desde las plantas de generación hasta las subestaciones ubicadas cerca de los centros de demanda.

La definición del *American National Standards Institute*, de una línea de transmisión es: “Típicamente, un par uniforme de conductores, formando una trayectoria continua desde una fuente de energía eléctrica a un receptor, para dirigir (conducir) la transmisión de la energía electromagnética a lo largo de esta trayectoria [14].”

2.2 CLASIFICACIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN

Las líneas de transmisión se pueden clasificar principalmente por su nivel de voltaje y por su diseño.

2.2.1 POR NIVEL DE VOLTAJE, EHV, UHV, HVAC, HVDC

Las líneas de transmisión operan en diferentes niveles de voltaje, y se pueden clasificar en:

Alto Voltaje en Corriente Alterna (HVAC por sus siglas en inglés, *High Voltage Alternating Current*): es mayor de 34.5 kV y hasta 230 kV [2]. Generalmente es utilizado en niveles de subtransmisión.

Extra Alto Voltaje (EHV por sus siglas en inglés, *Extra High Voltage*): es mayor a 230 kV y menor a 1000 kV[3]. Este nivel de voltaje es el que predomina en la actualidad en los sistemas de transmisión alrededor del mundo.

En el caso de la normativa mexicana nos indica un rango 230 kV hasta 400 kV para definir el nivel de Extra Alto Voltaje [15], porque es el máximo voltaje nominal al cual opera la Red Nacional de Transmisión (RNT) en México.

Ultra Alto Voltaje (UHV por sus siglas en inglés, *Ultra High Voltage*): es igual o mayor a 1000 kV [16]. Las primeras líneas de transmisión en el rango de 1000 – 1200 kV fueron construidas en Rusia (la antigua U.R.R.S.) y Japón, pero la línea rusa después de unos años de operar a su voltaje de diseño de 1150 kV, bajó a un nivel de 500 kV, mientras que la línea japonesa de 1000 kV desde un inicio ha sido operada en un nivel de 500 kV [17].

Actualmente en China se encuentra en operación la línea Jindongnan –Nanyang –Jingmende 640 km. a 1000 kV [18].



Alto Voltaje en Corriente Directa (HVDC por sus siglas en inglés, *High Voltage Direct Current*): es la transmisión de energía eléctrica en corriente directa en voltajes de ± 100 kV y superiores. En la actualidad existen líneas que operan hasta niveles de ± 800 kV [19], [20].

La primera línea comercial fue puesta en operación en el año de 1954 y cubría el trayecto de Suecia – Gotland con una capacidad de 20 MW y a un voltaje de ± 100 kV [20].

2.2.2 POR DISEÑO, AÉREAS Y SUBTERRÁNEAS

El diseño de las líneas de transmisión se divide en aéreas y subterráneas.

Líneas aéreas: son aquellas que a través de conductores suspendidos en el aire mediante estructuras transportan energía eléctrica de un punto a otro.

Líneas subterráneas: al igual que las líneas aéreas estas conducen la energía eléctrica, pero utilizan conductores aislados que pueden ir en ductos o directamente enterrados dependiendo del tipo de aislamiento. Los costos de construcción son de 4 a 14 veces mayores que para una línea aérea de la misma longitud y voltaje, debido a esto únicamente se utilizan cuando la transmisión aérea no es una opción [21].

2.3 ELEMENTOS DE UNA LÍNEA AÉREA DE EHV Y UHV

Los principales elementos constitutivos de una línea aérea son:

Soportes: estos pueden ser de madera, hormigón o metálicos, se componen de la estructura de soporte y la cimentación.

Conductores: estos son principalmente de aluminio reforzado con acero y son utilizados para los conductores de fase.

Los hilos de guarda: utilizan cables de acero de distintos calibres y se usan para el blindaje de la línea contra descargas atmosféricas.

Aisladores: sujetan a los conductores para mantenerlos separados de los soportes y proporcionan la rigidez dieléctrica necesaria para evitar la derivación de la corriente de línea a tierra. Los aisladores son fabricados en porcelana, vidrio y polímeros.

2.3.1 TIPOS DE TORRES

Las torres de transmisión son estructuras de gran altura que se utilizan como soporte para los conductores eléctricos aéreos en las líneas de transmisión, normalmente son construidas en acero. Pueden clasificarse de la siguiente manera:



-Por su función, que se determina por el lugar que ocupan a lo largo de la línea, por el ángulo entre los conductores y la estructura y por la configuración de los aisladores.

Por su diseño, este se determina en base al peso y modo de la carga y a su cimentación.

Por su función.

- 1 Suspensión: son la que se encuentran en una sección de línea entre una torre de deflexión o de remate. Los conductores son soportados mediante aisladores suspendidos que permiten una igualación de las tensiones en los conductores en una dirección longitudinal. Los ángulos de la línea en este tipo de estructuras son muy ligeros y normalmente este tipo de estructuras son las más usadas a lo largo de la línea.
- 2 Deflexión: en estas estructuras los conductores se terminan y se unen a ambos lados de la estructura, donde los aisladores están mecánicamente en serie con los conductores y por lo tanto llevan las tensiones totales de los conductores. Estas estructuras normalmente se diseñan para tener carga en ambos lados y se utilizan para ángulos en la línea de moderados a prominentes, donde existen fuertes tensiones debidas al viento o para separar segmentos de línea.
- 3 Remate: estas estructuras son utilizadas en las terminaciones de las líneas y están diseñadas para tener carga en un solo lado. Por lo tanto, son las más costosas, pesadas y menos comunes en las líneas.

Por su diseño.

1. Torres de celosía (Figura 1): esencialmente son estructuras de cuatro patas fijadas al suelo. Las cargas de la cimentación consisten en compresión vertical y esfuerzos horizontales.

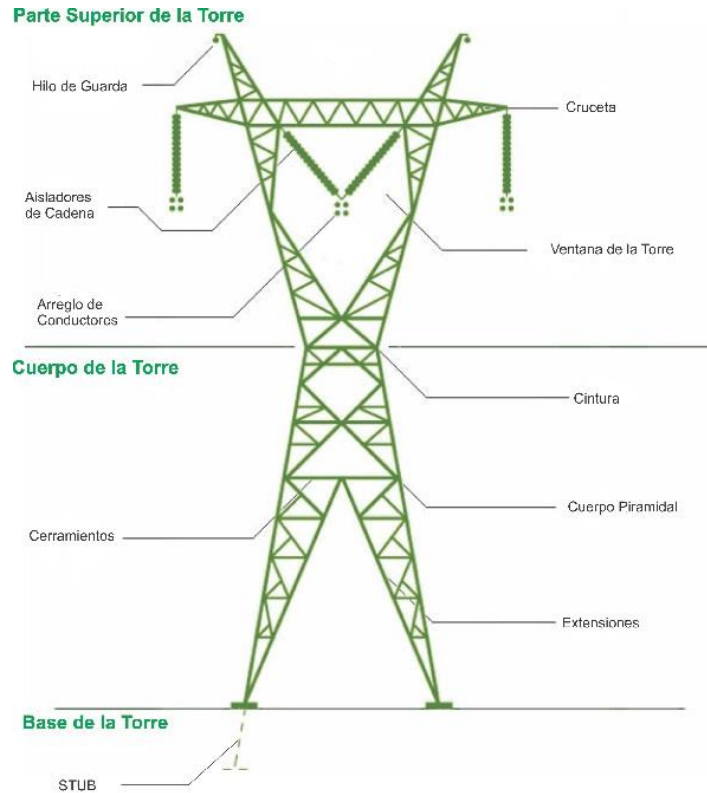


Figura 1[22]. Torre de celosía típica utilizada en la transmisión de energía eléctrica.

2. Postes individuales (Figura 2): los ejes simples o estructuras de postes son elementos simples, que tienen una sola cimentación diseñada para cargas verticales y horizontales y momentos de torsión.

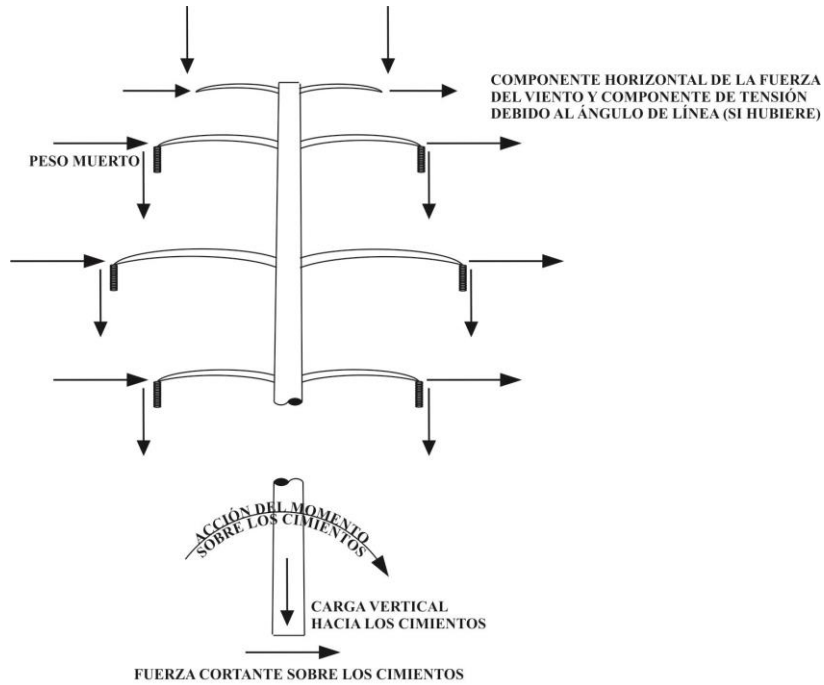


Figura 2 [23]. Estructura de un solo poste.

3. Marcos (Figura 3): las estructuras de marco derivan su estabilidad de la capacidad de resistir al momento por medio de una o más de sus juntas o uniones. Los cimientos son diseñados para cargas verticales y horizontales. Las estructuras de marco más comunes son las de tipo H.

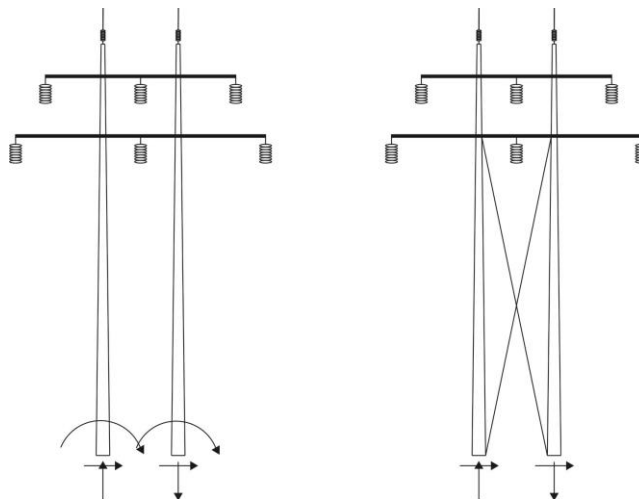


Figura 3 [23]. Estructuras de marco tipo H.

4. Estructuras tensadas (Figura 4): se estabilizan mediante cables de retención de apoyo de uno más ejes rígidos estructurales. La cimentación de las estructuras se diseña únicamente para compresión y cargas horizontales. La cimentación de los cables tensados debe soportar tensiones axiales [9].

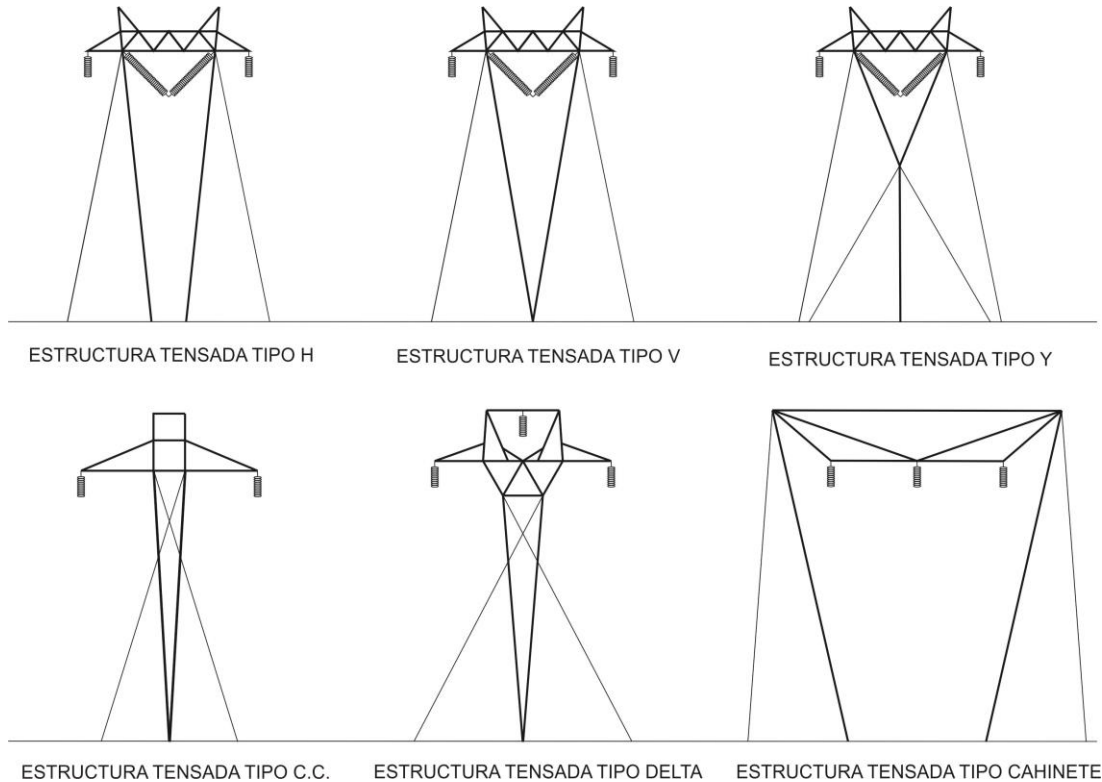


Figura 4 [23]. Diferentes tipos de estructuras tensadas.

2.3.2 BLINDAJE CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS POR HILOS DE GUARDA

Los hilos de guarda son cables paralelos a los conductores de fase, situados encima de ellos y eléctricamente conectados a la red de tierras a pie de torre, son generalmente fabricados en acero galvanizado o aluminio recubierto. Constituyen una protección eficaz contra las descargas atmosféricas sobre las líneas aéreas al captar las descargas y evitar en mayor medida que los rayos incidan directamente sobre los conductores de fase. Un ejemplo de una tasa de protección contra rayos (SFFOR por sus siglas en inglés, Shielding Failure Flashover Rate) sería de 0.05 descargas sobre los conductores de fase por 100 km al año [24].

El modelo geométrico fue desarrollado por Wagner y posteriormente por Young, con el propósito de demostrar que el ángulo de protección de los hilos de guarda sobre los

conductores de fase puede disminuir conforme incrementa la altura de la torre, estos estudios tuvieron un pobre desempeño en alturas del rango de 46 m. Posteriormente Brown y Whitehead continuaron con el desarrollo del modelo geométrico lo cual les llevo a modificar el gradiente de ruptura, el ángulo del rayo (Young consideraba rayos verticales) y se compararon sus resultados con los de Young (Fig. 5).

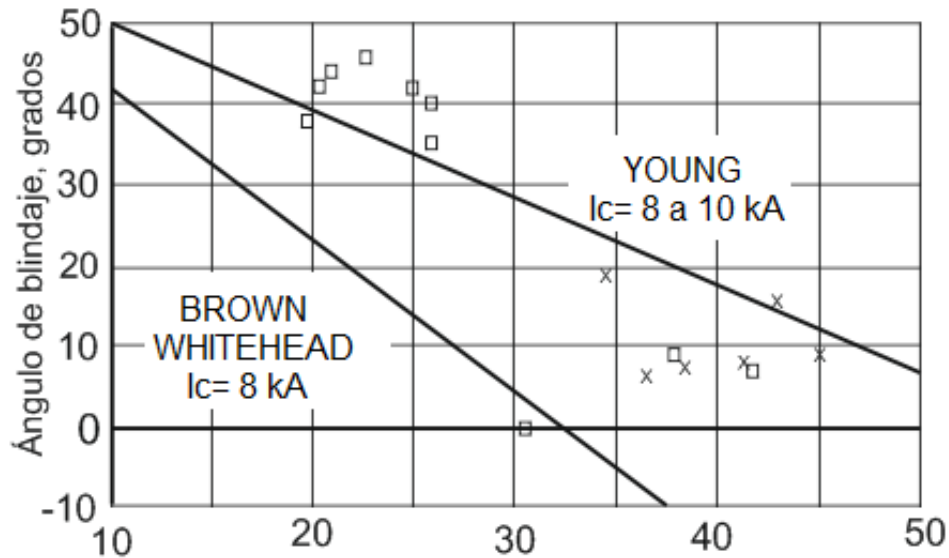


Figura 5 [24]. Comparación de ángulos de protección de Whitehead-Brown y Young.

Considerando el modelo geométrico mostrado en la figura 6, los arcos del radio r_c dibujados desde los conductores de fase y los hilos de guarda, así como la línea horizontal de altura r_g desde la superficie de la tierra forman las intersecciones A, B y C. Los rayos que llegan entre los arcos que forman A y B terminaran impactando al conductor de fase, los que llegan entre los arcos B y C terminaran en el hilo de guarda y aquellos que impacten más allá de A terminaran directamente en la superficie de la tierra.

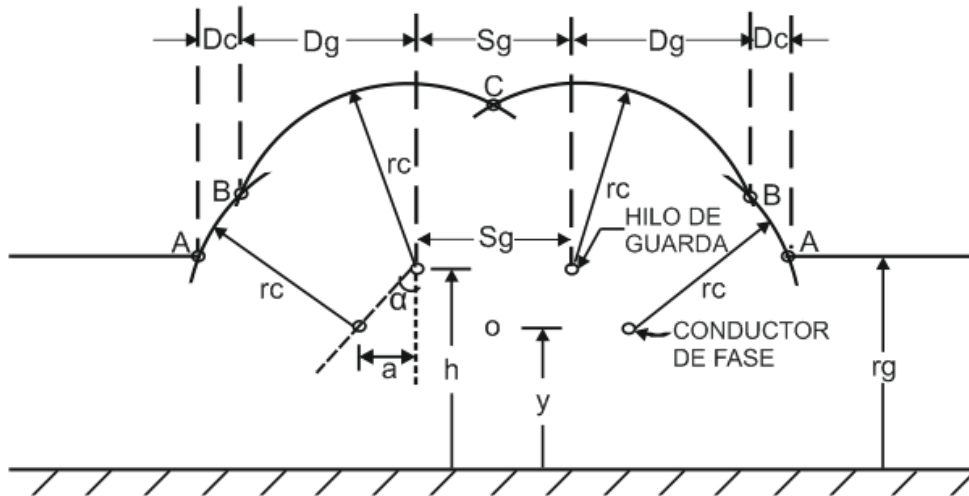


Figura 6 [24]. Modelo geométrico, ángulos y distancias.

Para calcular las descargas al año por km de línea que inciden sobre los conductores de fase (SFFOR por sus siglas en inglés, Shielding Failure Flashover Rate) se utiliza la siguiente fórmula del método simplificado de J. C. Anderson.

$$SFFOR = 2N_g L \frac{D_{cc}}{2} [P_c - P_m] \quad (1)$$

Donde:

N_g = Cantidad de descargas [$\text{km}^2/\text{año}$]

L = Distancia de la línea [km]

D_{cc} = Área máxima desprotegida [m^2]

P_c = Probabilidad de que el rayo exceda la corriente mínima I_c

P_m = Probabilidad de que el rayo exceda la corriente máxima I_m

2.3.3 TIPOS DE AISLAMIENTO DE ACUERDO CON EL NIVEL DE CONTAMINACIÓN

Para las líneas de transmisión el nivel de contaminación nos indica el tipo y longitud del aislamiento. En algunas áreas contaminadas la longitud del aislamiento puede exceder la requerida por cálculos de sobretensiones y descargas atmosféricas, y el diseño final del aislamiento se basa en los niveles de contaminación [25].

Para que ocurra una falla por contaminación se deben conjuntar dos aspectos: (1) un grado de contaminante suficiente compuesto de sal soluble iónica depositado en la superficie del aislador y (2) una ligera lluvia o niebla que humedezca la superficie sin crear un efecto de lavado. El contaminante en si no es el problema sino la mezcla de este con la humedad, que produce una película conductora por la cual se conduce la corriente de falla. El desempeño de los aisladores no cerámicos en áreas contaminadas es significativamente mejor que los aisladores de porcelana o vidrio [26].

Existen diferentes métodos para determinar la contaminación en los aisladores.

1. La experiencia de líneas existentes en los lugares contaminados;
2. La medición de un parámetro representativo de un nivel de contaminación que se puede correlacionar con el desempeño esperado del aislador.

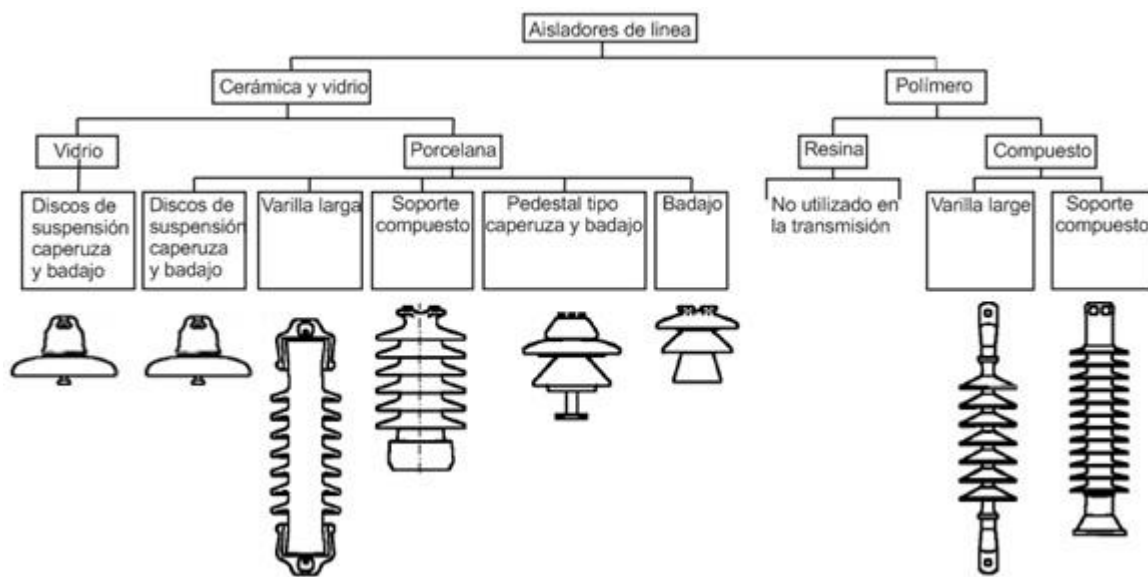


Figura 7 [27]. Tipos de aisladores.

Las figuras 8 y 9 nos proporcionan orientación para la apropiada selección de la distancia de fuga en aisladores cerámicos y no cerámicos respectivamente, con relación a su nivel de contaminación.

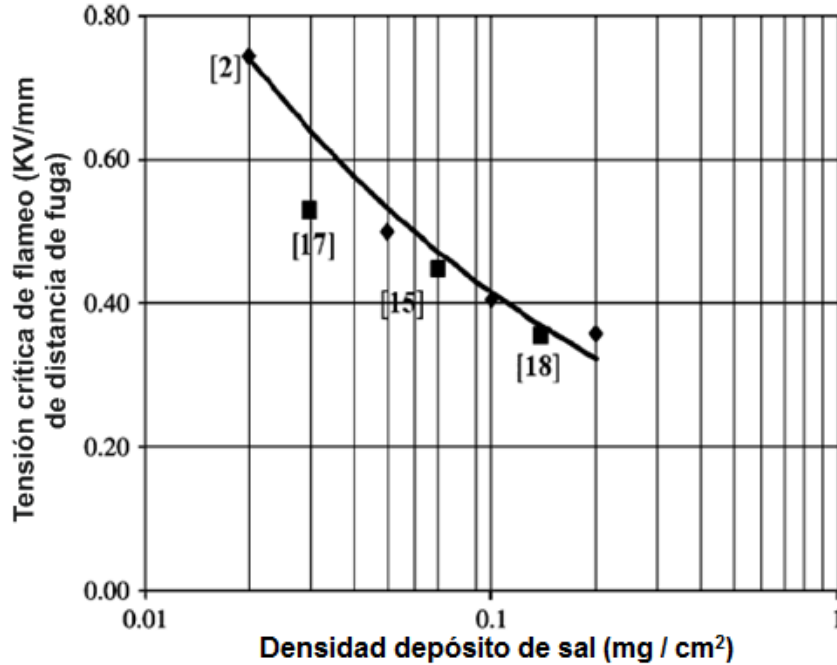


Figura 8 [26]. Voltaje crítico de flameo por unidad de distancia de fuga en función del nivel de contaminación para aisladores cerámicos.

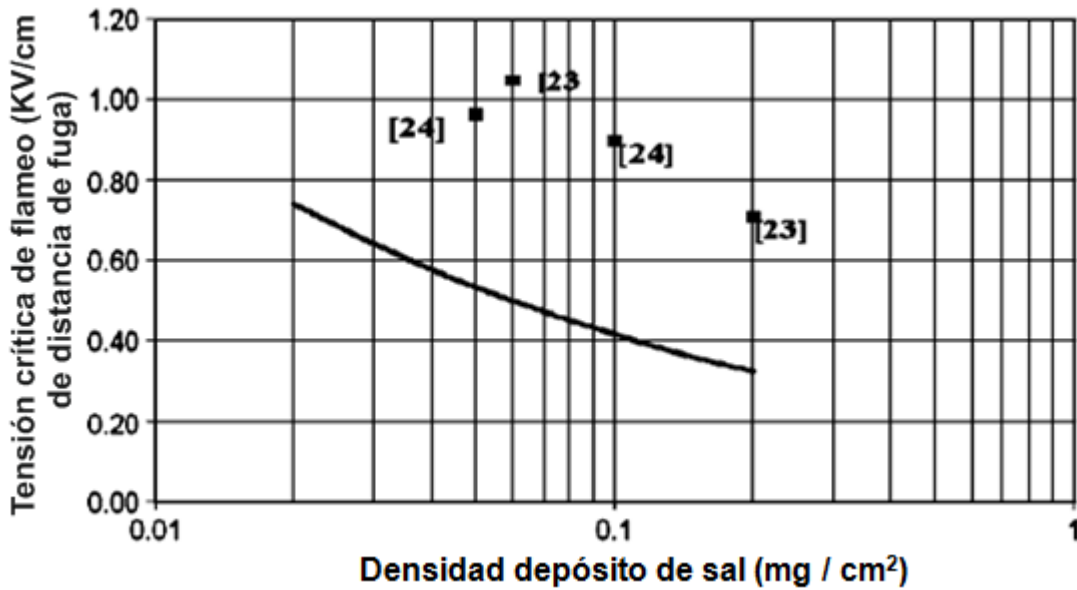


Figura 9 [26]. Voltaje crítico de flameo por unidad de distancia de fuga en función del nivel de contaminación para aisladores no cerámicos.

2.3.4 RED DE TIERRAS A PIE DE TORRE Y CONTRAANTENAS

La red de tierras a pie de torre es de gran importancia para el desempeño de las líneas aéreas durante las descargas atmosféricas. Cuando un rayo impacta directamente sobre la torre o el hilo de guarda, la amplitud de la sobretensión en lo alto de la torre es influenciada directamente por la resistencia de la red de tierras a pie de torre debido a las reflexiones desde la parte inferior de la torre, siendo por lo tanto un factor decisivo en la probabilidad de que ocurra un flameo inverso a los conductores de fase [28].

La resistencia de la red de tierras depende de las características del electrodo de tierra y la resistividad del suelo, generalmente para el caso de terrenos con una resistividad relativamente baja, se utilizan diferentes configuraciones de varillas enterradas verticalmente y la resistencia a pie de torre está dada por la siguiente expresión [29]:

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot g} \ln \left(\frac{11.8 \cdot g^2}{A} \right) [\Omega] \quad (2)$$

Donde:

ρ = resistividad del terreno en (Ω -m)

g = suma geométrica de la longitud, ancho y profundidad del electrodo, $\sqrt{r_x^2 + r_y^2 + r_z^2}$ (m)

A = el área de la superficie del electrodo (m^2)

El valor de la resistividad del terreno ρ , se obtiene mediante mediciones de manera que una vez definida la trayectoria de la línea se muestra el terreno y se localizan los puntos a medir.

En el caso de los suelos con alta resistividad se utilizan contraantenas, que son conductores de acero, aluminio o cobre tendidos horizontalmente y conectados a la torre para obtener una mayor superficie de contacto con la tierra y reducir la resistencia a pie de torre [30,31].

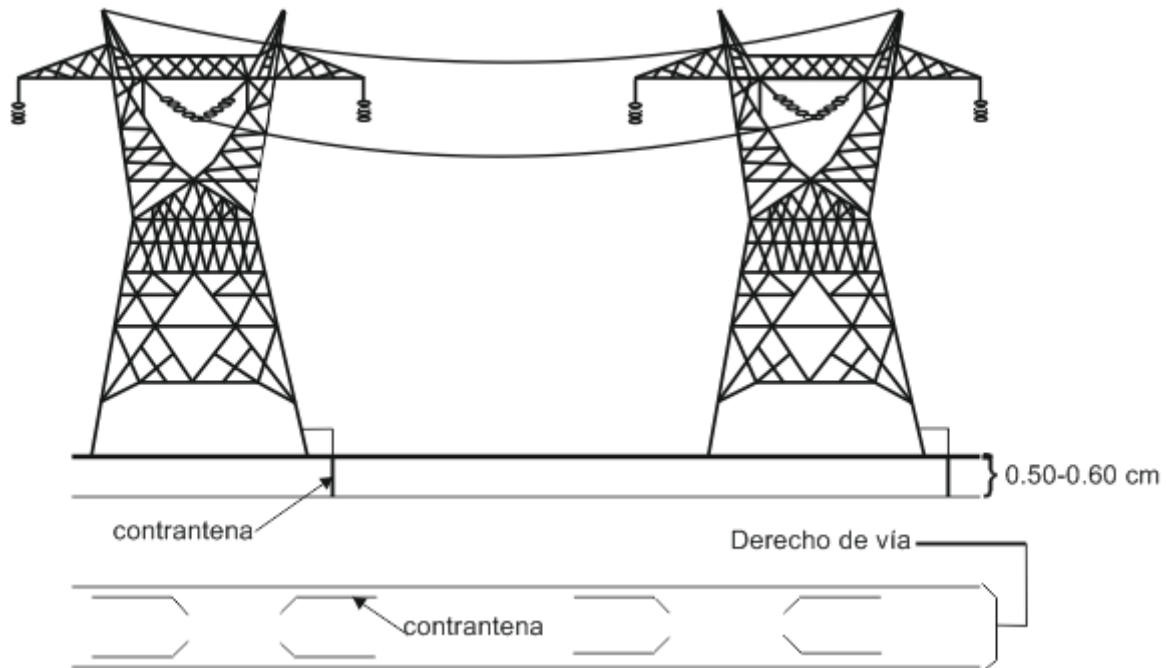


Figura 10. Contrantenas a pie de torre.

La resistividad del terreno para el caso de contraantenas se calcula con la expresión [29]:

$$R = \frac{\rho}{\pi \cdot L} \left(\ln \frac{2 \cdot L}{\sqrt{4 \cdot a \cdot d}} - 1 \right) \quad (3)$$

Donde:

L = longitud total de la contraantena (m)

ρ = resistividad del terreno en ($\Omega \cdot m$)

d = profundidad a la cual se entierra la contraantena

a = radio del conductor de la contraantena

2.3.5 TIPOS DE CONDUCTORES PARA LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS

En las líneas de transmisión aéreas se utilizan diferentes tamaños y tipos de conductores, aunque en su gran mayoría son utilizados conductores con un diámetro mínimo de 25 mm y fabricados en aluminio. Debido a que el aluminio es altamente conductor y tiene una densidad tres veces menor que el cobre [32].

Las características principales que conciernen a este tipo de conductores son la

resistencia eléctrica en función de la temperatura y la corriente, la máxima temperatura de operación permitida y el gradiente de superficie.

Los diferentes tipos de conductores para transmisión eléctrica son los siguientes:

Conductor de Aluminio Reforzado con Acero (ACSR por sus siglas en inglés, *Aluminum Conductor Steel Reinforced*) (Figura 11): está conformado por una o más capas de cableado concéntrico de aluminio con un núcleo de uno o más hilos de acero.

El aluminio proporciona un peso bajo y el núcleo de acero lo provee para soportar tensión mecánica mayores a otro tipo de conductores. El núcleo de acero se encuentra galvanizado para protegerlo de la corrosión, pero un mayor grosor del galvanizado resulta en la reducción de las tensiones soportadas para un diámetro de núcleo dado. Son utilizados en líneas aéreas de distribución y transmisión

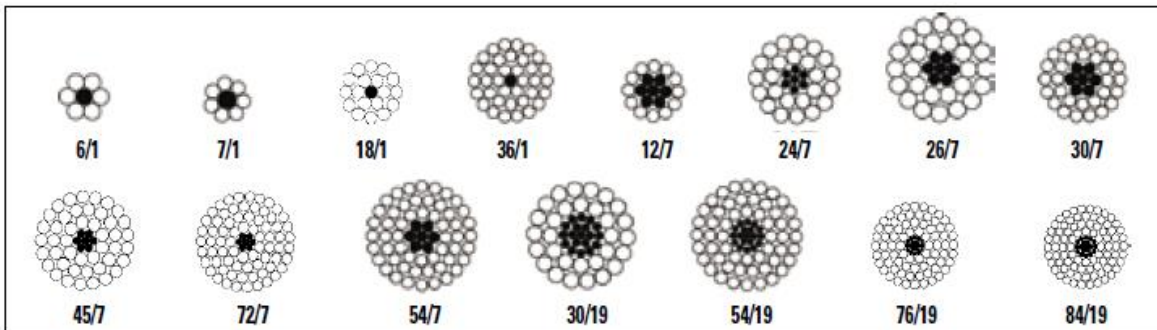


Figura 11 [33]. Diferentes configuraciones y tamaños de cables ACSR.

Conductor Auto-Amortiguado (SDC por sus siglas en inglés, *Self-Damping Conductor*) (Figura 12): también se conoce como ACSR/SD y consiste en dos capas concéntricas de alambre de aluminio trapezoidal alrededor de uno o más hilos de acero galvanizado puede o no tener una capa exterior de hilos de aluminio.

Las capas trapezoidales de aluminio están separadas una de otra y del núcleo de acero por unos espacios anulares lo que brinda al conductor de un auto-amortiguamiento para controlar las vibraciones eólicas y así evitar el uso de amortiguadores contra vibraciones [34].

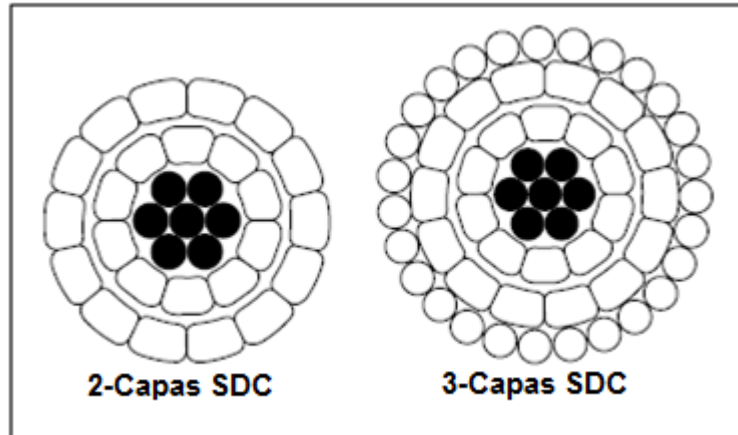


Figura 12 [33]. Configuración típica de conductores ACSR/SD.

Conductor ACSR/T2 (Figura 13): es un par de conductores ACSR de iguales características trenzados mutuamente. Se utilizan en líneas aéreas que están sujetas a daños ocasionados por movimientos debidos al viento.

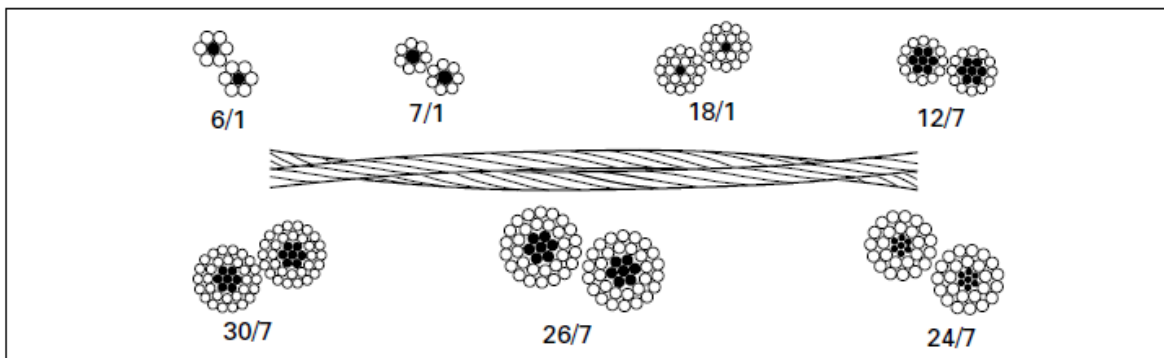


Figura 13 [33]. Diferentes conductores ACSR/T2.

Conductor Completamente de Aluminio (AAC por sus siglas en inglés, All Aluminun Conductor) (Figura 14): consta de una o más capas de cableado concéntrico alrededor de un solo hilo central, todos estos construidos en aluminio.

Se utiliza cuando el diseño de los parámetros de líneas aéreas no conlleva altas tensiones mecánicas y elevadas temperaturas.

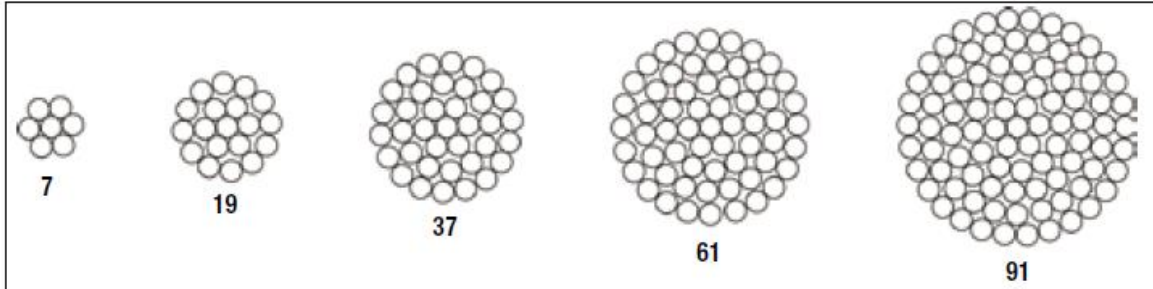


Figura 14 [33]: Conductores AAC.

Conductor Completamente de Aleación de Aluminio (AAAC por sus siglas en inglés, *All Aluminum Alloy Conductor*) (Fig. 15): es similar en construcción y apariencia al conductor ACC, pero éste se fabrica de una aleación de aluminio que contiene cobre, acero, silicón, manganeso, magnesio, zinc, cromo, boro y en menor medida otros elementos [35].

Se utiliza en líneas aéreas de transmisión y distribución en zonas costeras donde pueda haber problemas por corrosión del núcleo de acero en conductores ACSR.

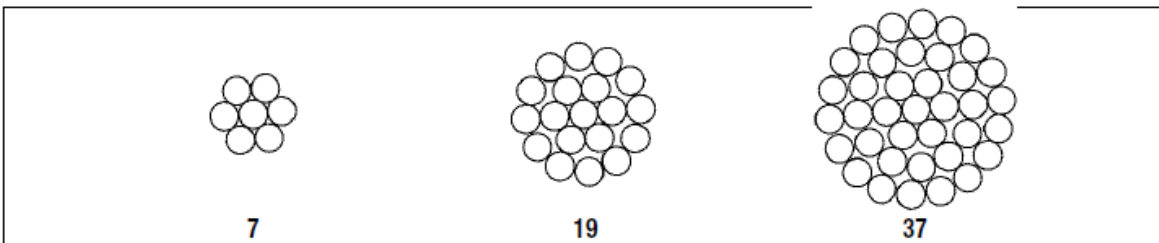


Figura 15 [33]: Conductores AAAC.



CAPÍTULO III SOBRETENSIONES EN EL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA

3.1 CLASIFICACIÓN DE SOBRETENSIONES

Las sobretensiones son un voltaje entre una fase y tierra o entre dos fases, que tiene un valor de cresta superior a la cresta correspondiente de valor máximo del sistema. Las sobretensiones pueden ser clasificadas por su forma y duración, ya sean temporales o transitorias [36].

- Sobretensiones transitorias: son sobretensiones oscilatorias o no oscilatorias de corta duración y altamente amortiguadas, tienen una duración de pocos milisegundos. Las sobretensiones transitorias se clasifican en los siguientes tipos: por descarga atmosférica, por maniobra, de frente rápido y de corta duración [36].
- Sobretensiones temporales: son sobretensiones oscilatorias de fase a tierra o de fase a fase en una ubicación dada de relativamente larga duración (segundos o incluso minutos) y no están amortiguadas o lo están ligeramente. Estas sobretensiones son originadas por operaciones de maniobra o fallas (por ejemplo: rechazo de carga, fallas monofásicas, fallas en un sistema con alta resistencia a tierra o sin conexión a tierra), o de no linealidades (efectos de ferro-resonancia o armónicos), se caracterizan por la amplitud, las frecuencias de oscilación, la duración total o el decremento [36].

3.2 NATURALEZA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Las descargas atmosféricas que se producen entre una nube y la tierra, referidas como descargas atmosféricas de nube a tierra que están compuestas por un líder seguido inmediatamente del retorno, se clasifican basadas en la polaridad de la carga efectivamente transferida y por la dirección inicial del líder, en cuatro tipos. Estos son descendente negativo, ascendente negativo, descendente positivo y ascendente positivo. El líder crea una trayectoria conductora entre la nube cargada y la tierra, depositando la carga a lo largo de esta trayectoria. Aproximadamente el 90% de las descargas atmosféricas son del tipo líder descendente negativo, el otro 10% corresponde a las descargas de líder descendente positivo, mientras que las descargas del tipo ascendente, se producen desde objetos de gran altura de 100 m. o más, o desde objetos de altura moderada localizados en lo alto de las montañas [38].

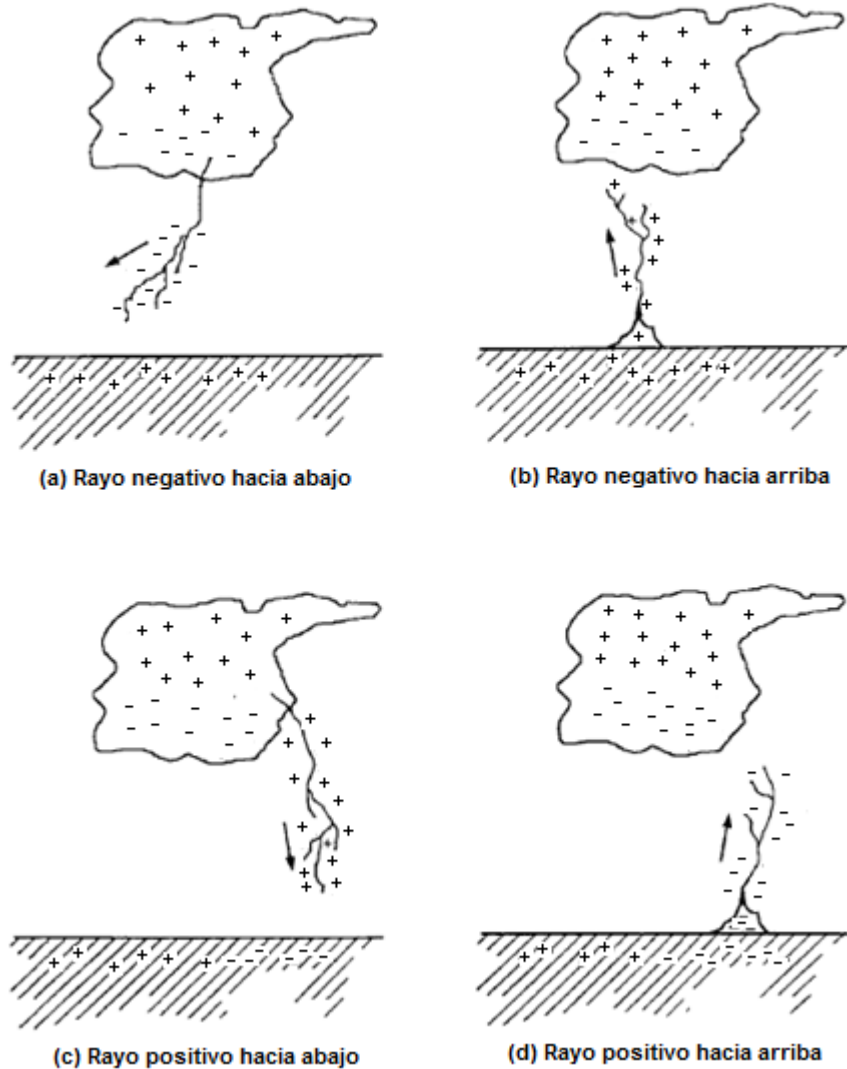


Figura 16 [37]. Se muestran los cuatro diferentes tipos de descargas atmosféricas, (a) descendente negativo, (b) ascendente negativo, (c) descendente positivo, (d) ascendente positivo.

En cualquier momento dado se están produciendo aproximadamente 2000 tormentas eléctricas alrededor de la atmósfera terrestre y estas golpean a la tierra con relámpagos cerca de 100 veces por segundo [39]. Algunos de estos relámpagos inciden directamente sobre las líneas de transmisión lo que causa que se origine una sobretensión transitoria.

Se describirán únicamente las descargas descendentes negativas, ya que son las de mayor proporción y por lo tanto las que mayormente inciden sobre las líneas de transmisión. Estas descargas típicamente contienen de tres a cinco rayos, cada uno de estos rayos está compuesto de un proceso de movimiento descendente denominado líder y de un proceso de movimiento ascendente denominado retorno. El

líder crea una trayectoria conductora entre la nube cargada que es la fuente y la tierra, depositando la carga negativa a lo largo de esta trayectoria. El rayo de retorno atraviesa la trayectoria del líder en un movimiento ascendente desde la tierra a la nube cargada y neutraliza la carga negativa del líder. Así, los procesos del líder y del retorno contribuyen a transportar la carga negativa de la nube a la tierra. El líder que da inicio al primer retorno se desarrolla en un aire virgen y parece ser un proceso ópticamente intermitente. Por lo tanto, es denominado “líder escalonado”. El líder escalonado está compuesto de intermitencias o ramas que tienen un movimiento descendente, lo que indica que el líder escalonado (y la descarga) inicia en la nube y se desarrolla a la baja. Los líderes que dan inicio a los dos subsecuentes retornos que se muestran en la Fig. 17, siguen una trayectoria continua que se muestra como un movimiento rápido descendente, esta trayectoria esta pre-acondicionada por el retorno o retornos precedentes. Por consiguiente, estos líderes son denominados “líderes dardo” [38].

El tiempo que dura el proceso del líder escalonado es típicamente de algunas decenas de milisegundos y el promedio de la corriente que circula es de algunos cientos de amperes.

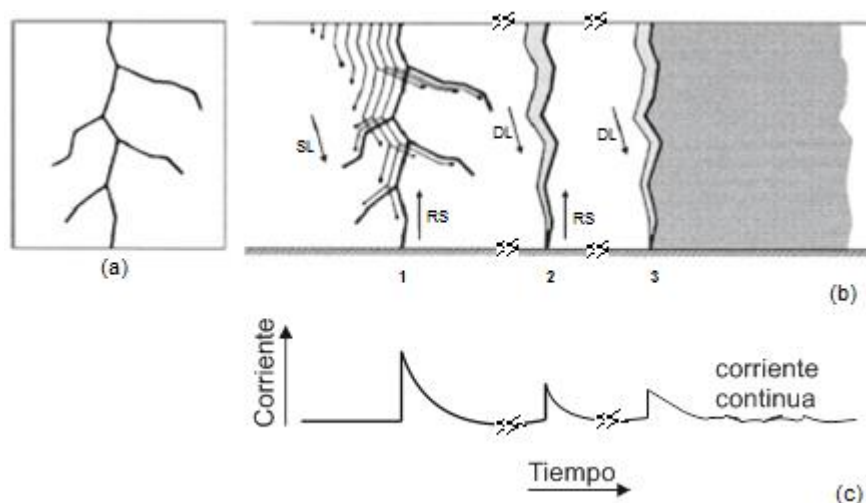


Figura 17 [38]. Diagrama de la luminosidad de una descarga descendente negativa a tierra donde se muestran los tres rayos y su corriente correspondiente: (a) imagen fija, (b) secuencia en el tiempo del líder escalonado y los dos subsecuentes líderes dardo, (c) corriente de trayectoria base.



3.3 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES POR MANIOBRA

Las sobretensiones por maniobra en los sistemas de potencia son causadas por la operación de interruptores y seccionadores, generalmente tienen tiempos a la cresta de 20-5,000 μ s y duración de menos de 20,000 μ s y son un resultado de las siguientes maniobras:

- Energización de líneas.
- Fallas y despejes de fallas.
- Rechazos de carga.
- Maniobras en corrientes capacitivas o inductivas.

En general el tiempo a la cresta (frente de onda o *wavefront*) es de más importancia, ya que la tensión de descarga crítica (CFO por sus siglas en inglés, *Critical Flashover Voltage*) es una función del frente de onda. La mínima tensión de descarga crítica se produce en el frente de onda crítico (CWF por sus siglas en inglés, *Critical Wavefront*), el cual en μ s es alrededor de 50 veces la distancia disruptiva (*strike distance*) en metros (m) [40,41].

3.3.1 SOBRETENSIÓN POR ENERGIZACIÓN Y RE-CIERRE DE LÍNEAS

En la mayoría de los casos la energización o re-cierre de una línea de transmisión de tres fases produce sobretensiones por maniobra en las tres fases. La causa de la sobretensión depende del interruptor de circuito; algunos interruptores pueden no generar sobretensiones. Un ejemplo típico es cuando el interruptor cierra justo en el momento en que la tensión a través del contacto es cero.

En el peor de los casos cada operación por maniobra produce tres sobretensiones de fase a tierra y tres sobretensiones de fase a fase. Se utilizan dos métodos para caracterizar la función de la distribución de probabilidad de sobretensión; el método de caso-pico y el método de caso-fase se describen a continuación:

- Método de caso-pico: De cada operación por maniobra se selecciona la cresta de sobretensión más alta de las tres fases y se incluye en la distribución de probabilidad. Este método se basa en la observación de que los otros dos valores no afectan significativamente la probabilidad de que ocurra una descarga. Estos resultados se utilizan para calcular la probabilidad de que ocurra una descarga por sobretensión en el caso de una operación por maniobra en tres fases.
- Método caso-fase: De cada operación por maniobra se selecciona la cresta de sobretensión más alta de cada una de las tres fases y se incluyen en la distribución de probabilidad. Cada operación contribuye con tres valores de cresta para la distribución de probabilidad. Esto resulta en una distribución por fase de sobretensiones que se

puede utilizar para calcular la probabilidad de que ocurra una descarga por sobretensión en cada fase.

Las sobretensiones por la energización se pueden reducir mediante el uso de:

- a) Resistencias de pre-inserción en los interruptores.
- b) Control del cierre de los interruptores.
- c) Utilizando apartarrayos.

Las resistencias de pre-inserción y el control del cierre de los interruptores reducen la sobretensión a lo largo de toda la línea, los apartarrayos sólo reducen la sobretensión cerca de donde este está instalado.

3.3.2 SOBRETENSIÓN POR FALLA

Durante el inicio y despeje de una falla de fase a tierra se producen una sobretensión con una forma de onda similar a la de energización y re-cierre de líneas. Unas estimaciones conservadoras de la sobretensión máxima se muestran en las siguientes ecuaciones:

$$\text{Inicio de Falla: máxima} = (2k - 1)pu \quad (4)$$

$$\text{Despeje de Falla: máxima} = 2.0 pu \quad (5)$$

donde

k es el factor de falla a tierra en pu de una máxima tensión de fase a tierra del sistema.

Ambos eventos únicamente producen sobretensiones de fase a tierra.

- Sobretensión por Rechazo de Carga.

Los rechazos de carga producen un tipo de sobretensión por maniobra. Este evento puede incrementar el estrés en la tensión longitudinal a través de los dispositivos de maniobra, el estrés en los aisladores de fase a tierra y la energía descargada por los apartarrayos. Si los apartarrayos se utilizan para limitar la sobretensión por energización y re-cierres debajo de $2 pu$, la disipación de energía en el apartarrayos deberá ser analizada, especialmente cuando están presentes generadores, transformadores, líneas de transmisión de longitudes considerables o capacitores en serie.

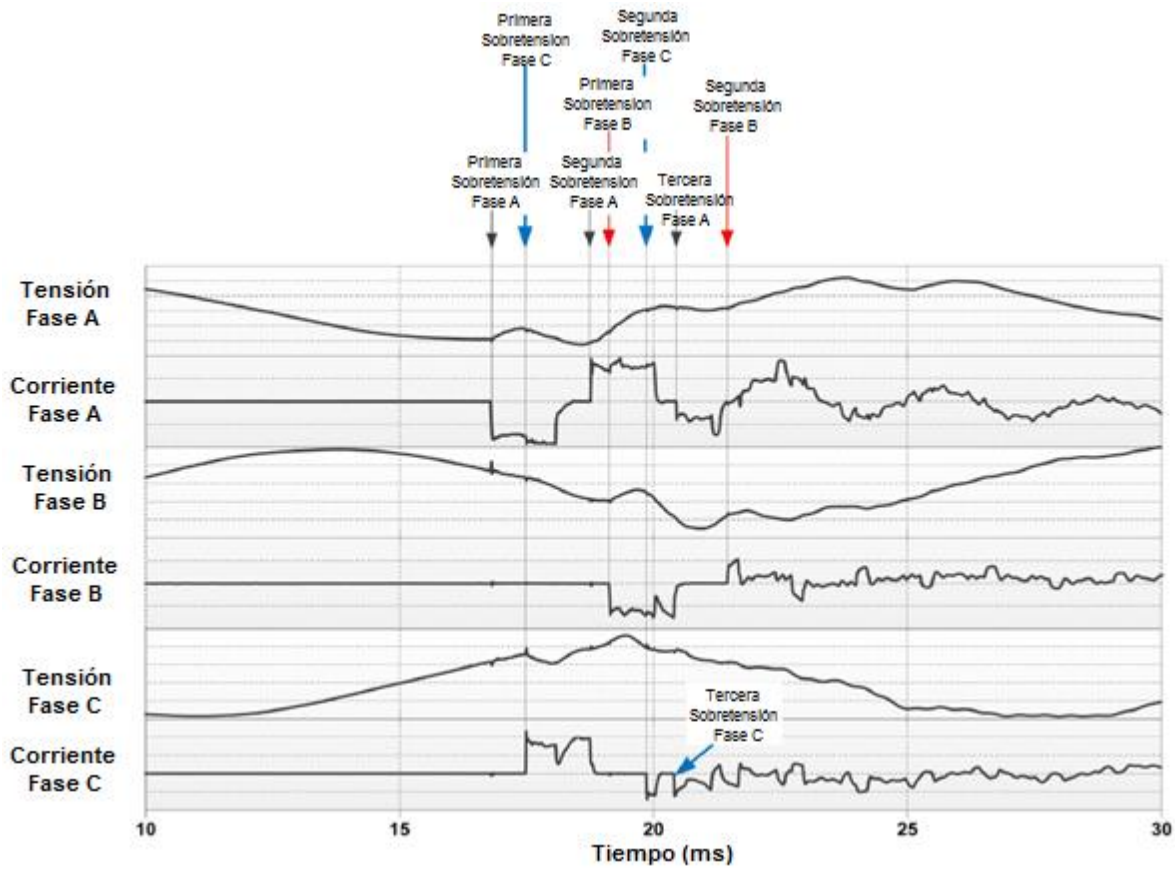


Figura 18 [41]. Muestra las sobretensiones producidas por un re-cierre de tres fases en la línea Eddy – Chemawa (Oregon, E.E. U.U.) a 230 kV.

3.3.3 SOBRETENSIÓN POR CORRIENTES CAPACITIVAS O INDUCTIVAS

Las operaciones por maniobra donde estén involucradas corrientes capacitivas o inductivas pueden causar sobretensiones. En particular las siguientes operaciones deben ser consideradas:

- Interrupción de corrientes de arranque de motores.
- Interrupción de corrientes de magnetización de un transformador o un reactor.
- Maniobras en hornos de arco eléctrico y sus transformadores.
- Maniobras en cables sin carga y bancos de capacitores.
- Interrupción de corrientes por medio de fusibles de alta tensión.

Las sobretensiones debidas al re-encendido del arco en un interruptor o seccionador durante la interrupción de corrientes capacitivas (desconexión de líneas sin carga, cables o bancos de capacitores) pueden producir sobretensiones extremadamente altas. Cuando se energizan bancos de capacitores, especialmente aquellos que no se



encuentran puestos a tierra, las sobretensiones de fase a fase deben ser evaluadas.

La energización de bancos de capacitores produce sobretensiones en donde se encuentran los capacitores, en la terminación de la línea, en el transformador, en bancos de capacitores remotos y en los cables. Los transitorios por la energización deben ser menores de $2.0 pu$ en el caso de fase a tierra y menores de $3.0 pu$ en el caso de fase a fase. Los transitorios de fase a fase en la terminación de la línea pueden llegar hasta $4.0 pu$ esto debido a las reflexiones de la onda viajera. Este tipo de sobretensiones más grandes están asociadas principalmente a la energización de bancos de capacitores no puestos a tierra [40].

3.4 ORIGEN DE LAS SOBRETENSIONES TEMPORALES

Las sobretensiones temporales se caracterizan por su amplitud, la forma de onda de la tensión y su duración. Todos los parámetros dependen del origen de las sobretensiones, y las amplitudes y las formas pueden variar mientras se mantenga la sobretensión.

Para los propósitos de la coordinación de aislamiento se considera que la sobretensión temporal representativa tiene la forma y la duración estándar corta (1 min.) de la tensión a la frecuencia del sistema de potencia. Esta amplitud se debe definir por un valor (el máximo asumido), un conjunto de valores pico o una distribución estadística completa de valores pico. La amplitud seleccionada de la sobretensión temporal representativa debe tomar en cuenta [41,42]:

- La amplitud y duración de la actual sobretensión en servicio
- La amplitud/duración de la frecuencia del sistema que soporte el aislamiento considerado.

Las sobretensiones temporales son causadas por:

- Fallas.
- Rechazo de carga.
- Condiciones de resonancia y ferro-resonancia.

3.4.1 SOBRETENSIONES POR FALLA

Las fallas producen sobretensiones temporales de fase a tierra en las fases sin falla. Normalmente no ocurren sobretensiones entre fases o a través del aislamiento longitudinal. La magnitud de la sobretensión depende del sistema de puesta a tierra y de la localización de la falla. Dependiendo de la configuración del sistema, durante el despeje de la falla algunas secciones separadas del sistema pueden quedar no

puestas a tierra. Una falla a tierra en las secciones separadas del sistema puede producir altas sobretensiones, las cuales pueden ser contraladas mediante una rápida puesta a tierra de los puntos neutros o mediante la adecuada aplicación de apartarrayos que corto-circuitan el punto neutro cuando la falla ocurre.

En sistemas puestos a tierra efectivamente una sobretensión temporal es aproximadamente de $1.3 pu$ y la duración de la sobretensión, considerando el despeje de la falla es generalmente menor a 1 s. En sistemas en condiciones de resonancia y puestos a tierra la sobretensión es aproximadamente de $1.73 pu$ o mayor y tomando en cuenta el despeje de la falla la duración generalmente es menor a 10 s.

3.4.2 SOBRETENSIÓN POR RECHAZO DE CARGA

Las sobretensiones temporales causadas por el rechazo de carga están en función de la carga rechazada, del diseño o topología del sistema después de la desconexión y de las características de las fuentes, es decir, potencia de cortocircuito en la subestación, regulación de velocidad y tensión de los generadores, etc. Estas sobretensiones son especialmente importantes en el caso de rechazo de carga en el extremo remoto de una línea larga debido al efecto *Ferranti*. Ante todo, esto afecta a los aparatos de la subestación conectados en el lado de la línea del interruptor remoto.

En un sistema de potencia simétrico de tres fases las mismas sobretensiones relativas ocurren en fase a tierra y en fase a fase. Las sobretensiones temporales longitudinales dependen en si la oposición de fase es posible. La oposición de fase puede ocurrir cuando los voltajes en ambos lados del dispositivo de operación no se encuentran sincronizados.

A continuación, se muestra una descripción el grado y duración de una sobretensión longitudinal y de fase a tierra, para dos tipos de subestaciones:

- *Sistema de Subestación:* En sistemas moderadamente extensos, par un rechazo de carga completa, la sobretensión temporal es usualmente menor a $1.2 pu$. La duración depende del control de operación de la tensión y puede ser de hasta varios minutos. En sistemas extensos la sobretensión puede llegar a $1.5 pu$ o incluso más cuando existe resonancia o el efecto *Ferranti*. La duración puede estar en el orden de los segundos.
- *Estación de Generación:* Para un rechazo de carga completa la sobretensión en la subestación puede alcanzar hasta $1.5 pu$. La duración puede ser de hasta 3 s dependiendo del control y las características y control del generador.

Los reactores en paralelo, los compensadores estáticos de VAR y los apartarrayos



especiales agrupados pueden controlar estas sobretensiones.

3.4.3 SOBRETENSIONES POR RESONANCIA Y FERRO-RESONANCIA

Las sobretensiones temporales debidas a estas causas, generalmente se originan cuando grandes elementos capacitivos (líneas, cables, capacitores en serie) y elementos inductivos (transformadores, reactores en paralelo) son energizados y estos tienen características de magnetización no-lineales.

Las sobretensiones temporales debidas al fenómeno de la resonancia pueden alcanzar valores extremadamente altos. Estos deben ser eliminados cambiando la configuración del sistema o mediante filtros de armónicos [40,42].

3.5 SOBRETENSIONES TRANSITORIAS DE FRENTE LENTO, RÁPIDO Y MUY RÁPIDO

Las sobretensiones transitorias se presentan en forma de impulsos de voltaje de corta duración, superpuestos en la señal de alimentación y frecuentemente intermitentes, con una duración menor a dos milisegundos. Los impulsos pueden tener su origen en las descargas atmosféricas, en maniobra de interruptores y al conectar y desconectar capacitores para la corrección del factor de potencia.

Las sobretensiones transitorias no presentan una indicación clara de su existencia, que pueda detectarse visualmente. Sin embargo, dado su nivel pueden alcanzar valores de hasta 5 veces o más del voltaje nominal, su efecto consiste en aplicar esfuerzos excesivos al aislamiento de diversos equipos [43].

3.5.1 SOBRETENSIONES DE FRENTE LENTO

Estas sobretensiones son debidas principalmente a modificaciones en la configuración de la red (maniobras o disparo de líneas) que producen complejos regímenes transitorios, usualmente son unidireccionales con duración en el frente entre 20 μ s y 5000 μ s y duración menor de un periodo de la frecuencia del sistema.

3.5.2 SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO

Estas sobretensiones en su mayoría son ocasionadas por descargas atmosféricas, son unidireccionales con una duración en el frente entre 0.1 μ s y 20 μ s.

3.5.3 SOBRETENSIONES DE FRENTE MUY RÁPIDO

Estas sobretensiones generalmente se originan por fallas y maniobras en subestaciones aisladas en SF₆ su duración es de pocos microsegundos, y su frecuencia es generalmente superior a 1 MHz.

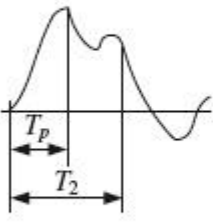
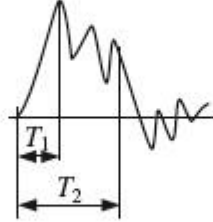
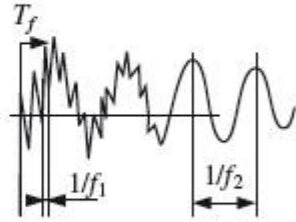
Transitorio		
Frente lento	Frente rápido	Frente muy rápido
		
$20 \mu s < T_p \leq 5.000 \mu s$ $T_2 \leq 20 \text{ ms}$	$0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$ $T_2 \leq 300 \mu s$	$T_f \leq 100 \text{ ns}$ $0,3 \text{ MHz} < f_1 < 100 \text{ MHz}$ $30 \text{ kHz} < f_2 < 300 \text{ kHz}$

Figura 19 [44]. Tipos de Sobretensiones Transitorias.

3.6 FACTOR DE FALLA A TIERRA Y SU RELACIÓN CON LAS SOBRETENSIONES EN FASES

El factor de falla a tierra es la relación entre la mayor tensión línea – tierra de una fase sana durante una falla fase – tierra y la tensión línea – tierra que se tendría en el punto si la falla no existiera, expresado en porcentaje.

El factor de falla a tierra se calcula utilizando las impedancias complejas del sistema, Z_1 y Z_0 de las secuencias positiva y cero, tomando en cuenta la resistencia de falla.

CAPÍTULO IV COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN, MÉTODO CÁLCULO MANUAL

4.1 CÁLCULO DE ÁNGULOS DE BLINDAJE CON HILOS DE GUARDA EN LÍNEAS AÉREA DE EHV.

El blindaje contra descargas atmosféricas en las líneas aéreas de transmisión mayormente se realiza mediante un hilo de guarda, este método consiste en interceptar las descargas atmosféricas y conducir las a tierra mediante una trayectoria efectiva. El hilo de guarda se ubica en lo alto de las torres y suelen de acero de alta o extra alta resistencia con una sección transversal menor a los conductores de fase.

La colocación adecuada de los hilos de guarda alrededor de los conductores de fase se define por el ángulo de blindaje. El ángulo de blindaje es positivo si los hilos de guarda se encuentran instalados horizontalmente dentro de los conductores de fase y negativo si se encuentran fuera [45].

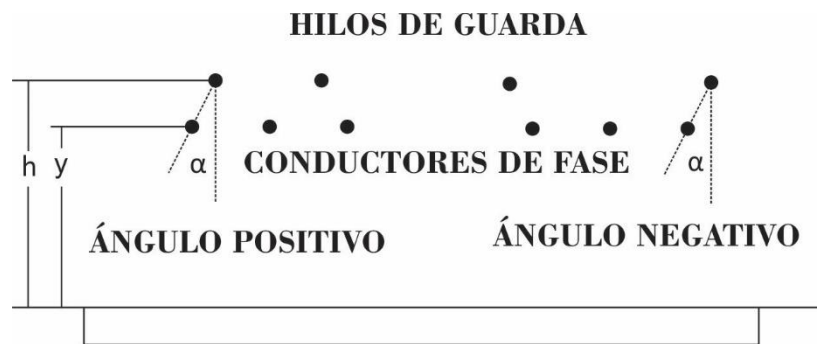


Figura 20 [45]. Tipos de ángulos de blindaje.

El diseño para proteger a las líneas aéreas de transmisión contra las descargas atmosféricas directas, es la apropiada posición de los hilos de guarda con respecto a los conductores de fase y esto se puede lograr mediante la implementación de modelos electrogeométricos.

Un ángulo de blindaje perfecto se logra cuando los rayos con un pico de corriente mayor que la corriente mínima causante de flameo del aislador son interceptados [46].

Históricamente los modelos electromagnéticos han sido utilizados para diseñar la protección de las líneas aéreas de transmisión, estos han provisto un blindaje aceptable sobre los conductores de fase contra los rayos y aun actualmente son ampliamente utilizados. El análisis de blindaje se realiza de acuerdo al modelo electrogeométrico representado en la Fig. 21. La distancia de ruptura a los conductores, S , se busca que se relacione a la corriente pico probable del rayo, I puede ser asociada a la distancia de ruptura a la superficie de la tierra, D mediante el

uso de un factor γ , como se muestra en la siguiente ecuación:

$$S = AI^B = \gamma D \quad (6)$$

Donde:

A , B y γ = Factores dados por la Tabla 1,

I = Corriente pico del rayo [kA],

A = Distancia de ruptura a conductores [m],

D = Distancia de ruptura a superficie de la tierra [m].

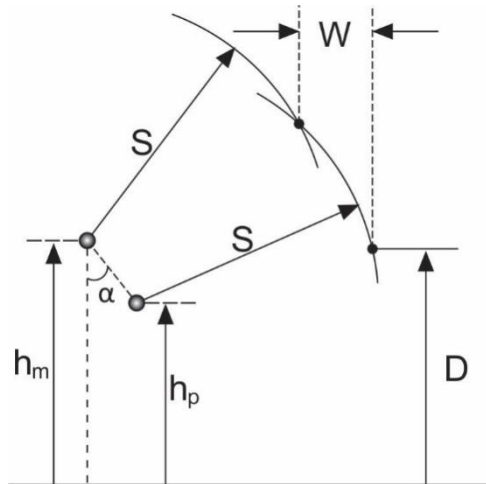


Figura 21 [46]. Análisis de blindaje de acuerdo a los modelos electromagnéticos.

Donde:

h_m = Altura del hilo de guarda [m],

h_p = Altura del conductor de fase [m],

α = Ángulo de protección [°],

W = Arco de falla de blindaje [m].

Para un diseño donde la corriente pico del rayo sea igual a la corriente mínima causante de flameo del aislamiento, I_c , esta última puede ser calculada tomando en cuenta las características geométricas y eléctricas de la línea de transmisión, un rayo con líder descendente impactara en el conductor de fase cuando este alcance el arco definido entre M y N ; por lo tanto, se le llama arco de falla de blindaje, W , y se

muestra en la Fig. 21. Con la disminución del ángulo de blindaje α , W disminuye, así que hay un ángulo de blindaje crítico el cual corresponde a $W = 0$, en adelante denominado ángulo de blindaje perfecto, α_p . La siguiente ecuación representa un análisis geométrico para aproximar el ángulo de blindaje perfecto [46]:

$$\alpha_p = \sin^{-1} \left(\frac{1}{\gamma} - \frac{h_m + h_p}{2AI_c^B} \right) \quad (7)$$

Donde:

I_c = Corriente mínima causante de flameo del aislamiento [kA].

TABLA I
FACTORES A, B Y γ

Modelo Electromagnético	A	B	γ
Wagner & Hileman	14.20	0.42	1
Young et al.	27 γ	0.32	1 para $h < 18$ m $\frac{444}{462-h}$ para $h > 18$ m h: altura del hilo de guarda
Amstrong & Whitehead	6.72	0.80	1.11
Bronw & Whitehead	7.10	0.75	1.11
Love	10.00	0.65	1
Whitehead	9.40	0.67	1
Anderson and IEEE WG	8.00	0.65	$1/\beta^*$
IEEE Std 123	10.00	0.65	$1/\beta^{**}$

* $\beta=0.64$ para líneas de Ultra Alto Voltaje, 0.8 para líneas de Extra Alto Voltaje, y 1 para otras líneas
** $\beta=0.36+0.17\ln(43-h)$ para $h < 40$ m, $\beta=0.55$ para $h > 40$ m donde h es la altura del conductor de fase

Tabla 1. Factores A, B, y γ de los diferentes modelos electrogeométricos.

4.2 CÁLCULO DE APARTARRAYOS PARA LÍNEAS TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN

Los apartarrayos son dispositivos que limitan las sobretensiones en los equipos mediante la descarga o la desviación de la corriente de la sobretensión, esto limita el flujo de potencia a través de la descarga de esta a tierra.

El apartarrayos tiene la característica de que, en condiciones normales de operación en un sistema de C. A., este funcione como un aislador y en el momento en que una sobretensión lo haga funcionar su comportamiento se vuelve el de un conductor que envía la onda de corriente producida por la onda de sobretensión a tierra y al desaparecer la sobretensión el apartarrayos debe ser capaz de interrumpir la corriente [47].

Actualmente en las líneas de transmisión los apartarrays de óxido metálico son los más ampliamente usados y caen dentro de tres categorías de diseño las cuales son: apartarrays sin entre hierro, apartarrays con entrehierro en paralelo y apartarrays con entrehierro en serie.

4.2.1 APARTARRAYOS SIN ENTREHIERROS.

Los apartarrays sin entrehierro están constituidos por una, dos o más columnas apiladas en paralelo de elementos valvulares de óxido metálico como se muestra esquemáticamente en la figura 22(a), en la figura 22(b) se ilustra la característica en volt-amperes típica para este tipo de apartarrays. Por encima de la rodilla que se forma en la curva volt-ampere los elementos de óxido metálico presenta un comportamiento altamente no lineal que se puede representar mediante la relación $I = kV^\alpha$. Alfa (α) es el número de válvulas que varía normalmente de 10 a 50 dependiendo de la formulación de óxido metálico y el rango de corriente. Típicamente entre mayor sea el nivel de corriente la cantidad de elementos valvulares será menor [48].

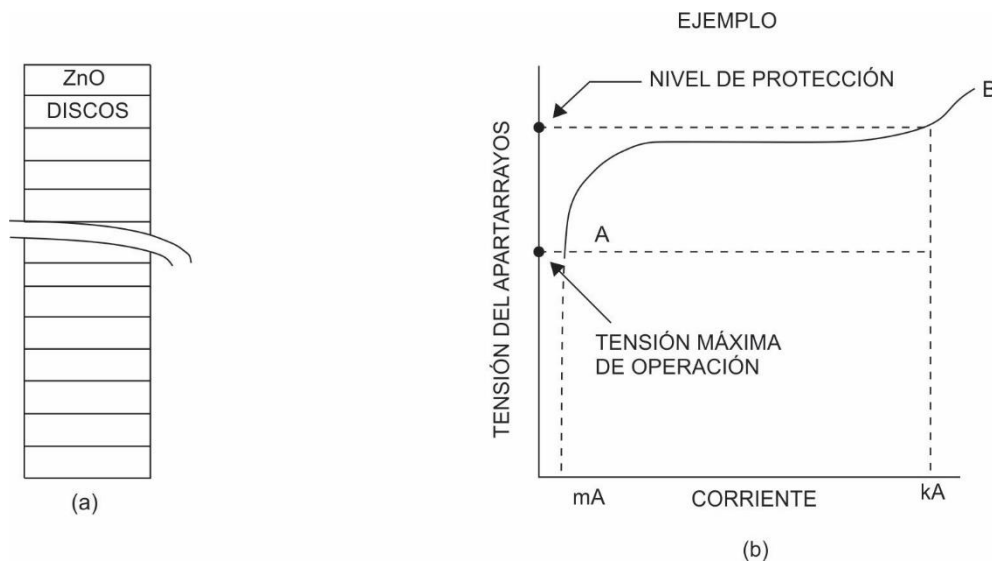


Figura 22. Apartarrays de óxido metálico sin entrehierros.

4.2.2 APARTARRAYOS CON ENTREHIERROS EN PARALELO

Para ondas de corriente por encima de cierta magnitud, la descarga de sobretensión de una columna o columnas de elementos valvulares de óxido metálico puede reducirse poniendo en paralelo una parte de los elementos. Este es el principio básico de los apartarrayos con entrehierro en paralelo mostrado en la figura 23(a). La característica típica en volt-amperes se ilustra en la figura 23(b). Cuando se presenta una sobretensión, la tensión del apartarrayos inicialmente aumenta al aumentar la magnitud de la corriente de acuerdo a la característica volt-amperes A-B. Cuando la magnitud de corriente por sobretensión alcanza de 250 A a 500 A (rango B a C) la descarga disruptiva de un entrehierro eléctricamente conectado con unos cuantos elementos valvulares de óxido metálico resulta en una derivación de la corriente por sobretensión en torno a estos elementos valvulares, con lo que proporcionalmente disminuye la descarga (en el rango D a E). En incrementos mayores de la magnitud de corriente por sobretensión, la tensión aumenta de acuerdo a la característica E-F. A medida que la corriente decrece, la tensión del apartarrayos también siguiendo la característica F-C, hasta que los entrehierros en paralelo extinguen la corriente de un nivel bajo. Después de que la corriente se extingue, el punto de operación del apartarrayos vuelve a A [48].

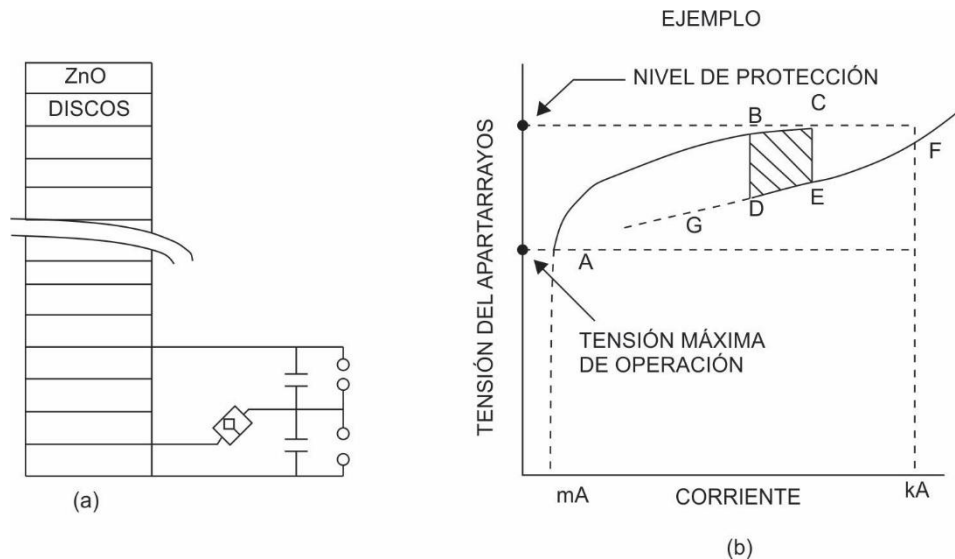


Figura 23. Apartarrayos de óxido metálico con entrehierros en paralelo.

4.2.3 APARTARRAYOS CON ENTREHIERROS EN SERIE

Otro enfoque para obtener una descarga de tensión inferior (mayor margen de protección) es el uso de un menor número de elementos valvulares en conjunto con entrehierros conectados en serie como se muestra en la figura 24(a). Los entrehierros en serie se desvían por una impedancia de red con características tales que la tensión aplicada se divide entre la impedancia de red y los elementos de óxido metálico. Una característica volt-amperes típica es ilustrada en la figura 24(b). A la llegada de una sobretensión, la tensión del apartarrayos comienza a subir (A-B), la tensión total es la suma vectorial de las tensiones de los elementos de óxido metálico y la impedancia de red de los entrehierros en serie. En un nivel de corriente en el entorno de 1 A (dependiendo de la velocidad de aumento en el rango de B a C) la descarga disruptiva del entrehierro y la tensión del apartarrayos se reduce únicamente a la tensión de descarga de los elementos de óxido metálico. Para incrementos en la corriente de sobretensión la tensión aumenta de acuerdo a la característica D-E-F. A medida que la corriente disminuye, la tensión de apartarrayos disminuye en consecuencia siguiendo la característica F-G hasta que los entrehierros en serie extinguen por completo la corriente de baja magnitud [48].

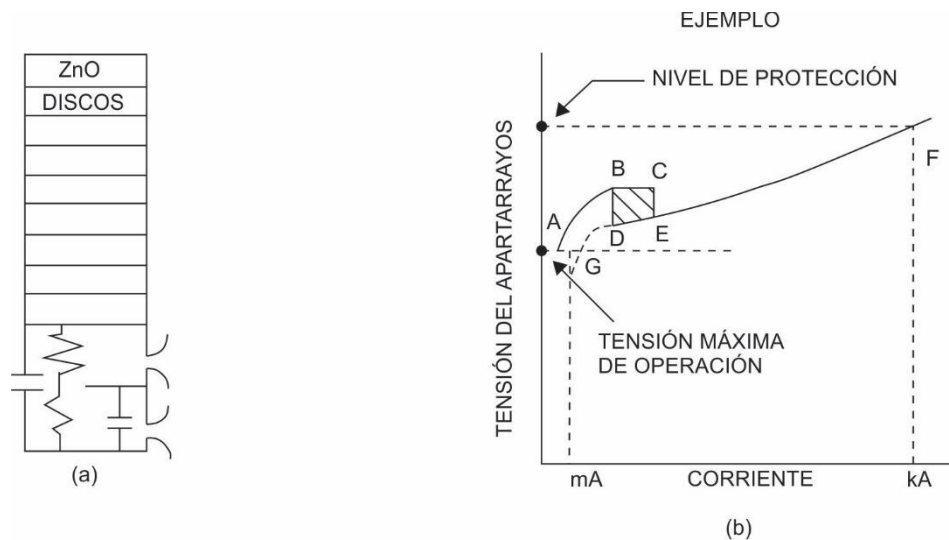


Figura 24. Apartarrayos de óxido metálico con entrehierros en serie

El nivel de protección de un apartarrayos es la máxima cresta de voltaje que aparece a través del apartarrayos bajo condiciones específicas de operación. Para apartarrayos de óxido metálico sin entrehierros el nivel de protección es la descarga del apartarrayos para una descarga de corriente específica. Para apartarrayos con entrehierros (en serie o paralelo) el nivel de protección es la mayor tensión de la descarga disruptiva del entrehierro o la tensión de descarga.

Un procedimiento general para la selección de apartarrayos en líneas de transmisión



se describe a continuación:

- Determinar la tensión de operación continua;
- Determinar la tensión nominal de apartarrayos con respecto a la máxima sobretensión temporal;
- Estimar la magnitud y probabilidades de corriente por rayo esperadas, a través del apartarrayos [49].

La máxima sobretensión temporal que se puede presentar en un sistema debe ser considerada debido a que el apartarrayos no debe operar cuando se presentan sobretensiones temporales, ya que estas pueden llegar a dañarlo. La máxima sobretensión temporal se calcula de la siguiente manera:

$$V_t = (k + 0.05)V_n \quad (8)$$

Donde:

V_t = Máxima sobretensión temporal;

V_n = Tensión nominal del sistema;

k = Constante con respecto a la falla, para sistema con neutro aterrizado es 0.75 y para sistemas con neutro flotante es 1.0, el valor de 0.05 se aplica para la tolerancia por variaciones de tensión.

La tensión máxima de operación continua del apartarrayos se calcula de la siguiente manera:

$$V_{oc} = \frac{V_n}{\sqrt{3}}(k + 0.05) \quad (9)$$

Donde:

V_{oc} = Tensión máxima de operación continua.



Tensión nominal del sistema U_n	Tensión nominal del apartarrayos U_r	Tensión de operación continua U_c	Tensiones residuales máximas, kV cresta					
			Al impulso de corriente por maniobra, 30 / 60 μ s		Al impulso de corriente de rayo con la corriente nominal de descarga del apartarrayos, 8 / 20 μ s		Al impulso de corriente escarpado con la corriente nominal de descarga del apartarrayos, 1 / 20 μ s	
kV (rnc)	kV (rnc)	kV (rnc)	Clase 2	Clase 3	Clase 2	Clase 3	Clase 2	Clase 3
161	120	98	295	-	365	-	410	-
	132	106	325	-	400	-	450	-
	144	115	355	-	440	-	495	-
230	180	144	440	415	550	505	615	570
	192	154	470	440	585	535	655	605
400	312	250	-	715	-	875	-	985
	336	269	-	770	-	940	-	1060
	350	288	-	805	-	980	-	1100

Tabla 2 [50]. Características eléctricas de los apartarrayos para tensiones normalizadas en México.

4.3 COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE ALTA TENSIÓN EHV.

El nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BIL) y el nivel básico de aislamiento al impulso por maniobra (BSL), para la auto-restauración del aislamiento está definido estadísticamente como el valor cresta de la tensión del impulso por rayo o maniobra tiene 90% de probabilidades de no causar flameo.

La coordinación de aislamiento asume que las magnitudes de las sobretensiones son conocidas en los lugares donde se ubican los equipos. Por consiguiente, las características eléctricas de aislamiento de los equipos y las características de los elementos de protección también son conocidas. En algunos casos la experiencia con sistemas comparables se puede utilizar para determinar las características del equipo de aislamiento.

El procedimiento de la coordinación de aislamiento consiste en:

1. Determinar los esfuerzos de sobretensiones,
2. Seleccionar la resistencia de aislamiento que logre minimizar la probabilidad de flameo.



Los esfuerzos por sobretensiones se pueden minimizar mediante la aplicación de dispositivos de protección contra sobretensiones, como: controladores de cierre, hilos de guarda, mejoras en el sistema de tierra, etc.

Para determinar la forma de onda, la amplitud y la duración de los esfuerzos por sobretensiones, se debe realizar un análisis de transitorios.

Los esfuerzos por sobretensiones se deben caracterizar ya sea por:

- Los máximos valores de cresta, o ;
- Una distribución estadística de los valores de cresta, o ;
- Un valor de sobretensión estadístico [esta es una sobretensión generada por un evento específico sobre el sistema con un valor de cresta que tenga 2% de probabilidad de ser excedido].

Los resultados de un análisis de transitorios deben proveer los esfuerzos de tensión para las siguientes clases de sobretensiones:

- Sobretensiones temporales (fase a tierra y fase a fase);
- Sobretensiones por maniobra (fase a tierra y fase a fase);
- Sobretensiones por rayo (fase a tierra y fase a fase);
- Sobretensiones longitudinales (una combinación instantánea de sobretensiones por rayo y maniobra)

El nivel de aislamiento estándar de un equipo es generalmente dado mediante dos estándares de tensiones:

Para equipos de Clase I (1-242 kV), el nivel de aislamiento estándar es dado por:

- Resistencia a la tensión de corta duración en baja frecuencia;
- Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BIL).

Para equipos de Clase II (>242 kV), el nivel de aislamiento estándar es dado por:

- Nivel básico de aislamiento al impulso por maniobra (BSL);
- Nivel básico de aislamiento al impulso por rayo (BIL).



Tensión máxima del sistema (fase a fase) V_m kV, rms	Nivel basico de aislamiento al impulso de rayo (fase a tierra) BIL kV, pico	Nivel basico de aislamiento al impulso por maniobra (fase a tierra) BSL kV, pico
362	900 975 1050 1175 1300	650 750 825 900 975 1050
550	1300 1425 1550 1675 1800	1175 1300 1425 1550
800	1800 1925 2050	1300 1425 1550 1675 1800

Tabla 3 [51]. Estándares de tensión Clase II.

4.3.1 NÚMERO DE AISLADORES POR CADENA DE AISLADORES, DE ACUERDO CON LA ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR Y NIVEL DE CONTAMINACIÓN.

La resistencia de aislamiento (kV/m) se define como la relación de la tensión soportada con la longitud de conexión. La tensión soportada se determina por el método de ensayo de niebla limpia. La Tabla 4 nos muestra la resistencia de aislamiento para aisladores de cadena en varios niveles de contaminación. El aislador de suspensión estándar [Fig. 25 -146 mm (5-3/4”) x 254 mm (10”)] tiene una distancia de fuga de 292 mm. La Tabla 5 nos muestra el número de unidades estándar de aisladores requeridos para sistemas con tensiones nominales de operación desde 138 kV – 765 kV.

Clasificación	Severidad, mg/cm ²	Unidades estándar (kV/m) 5 3/4" x 10"		Distancia de fuga / unidad
		Cadena de aisladores en "I"	Cadena de aisladores en "V"	
Muy ligera	0.03	86.90	98.60	91-99
Ligera	0.06	67.50	82.00	74-88
Moderada	0.10	59.30	74.80	64-82
Alta	0.40	49.30	66.00	56-73

Tabla 4 [52]. Resistencia de aislamiento para unidades de cadenas de aisladores según los niveles de contaminación.

Tensión del sistema, kV	Número de unidades estándar para los niveles de contaminación para cadena de aisladores en "I"/"V"			
	Muy ligera	Ligera	Moderada	Alta
138	6/6	8/7	9/7	11/8
161	7/7	10/8	11/9	13/10
230	11/10	14/12	16/13	19/15
345	16/15	21/17	24/19	29/22
500	25/22	32/27	37/29	44/33
765	36/32	47/39	53/42	64/48

Tabla 5 [52]. Número de unidades estándar de aisladores en I y V requeridas por tensión del sistema y nivel de contaminación

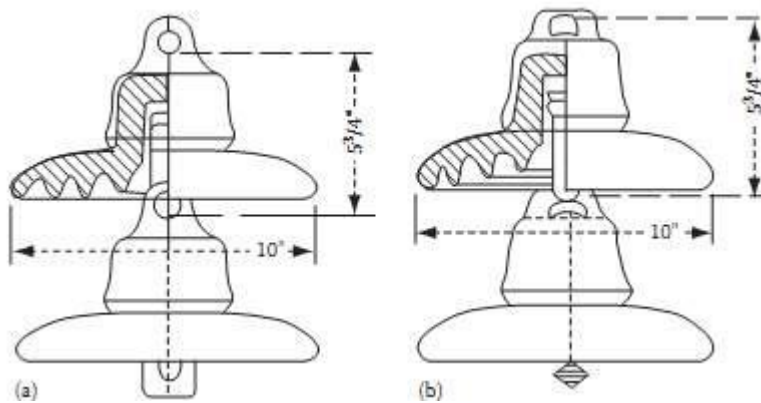


Figura 25. Unidades estándar de aisladores.

4.3.2 CÁLCULO DE DISTANCIAS EN AIRE DE LA POSICIÓN DE CONDUCTORES A LA VENTANA YA LA TRABE DE LA ESTRUCTURA

El espacio entre el conductor y la torre es de gran importancia para el diseño de la torre. La ventana de la torre en donde la estructura rodea al conductor de fase es generalmente el elemento más débil de aislamiento de la línea y el más importante.

La tensión crítica con probabilidad de 50% de flameo entre la ventana de la torre y los conductores se presenta en la Fig. 26 y se deriva de varios investigadores (Rohlf s et al. 1963; Kalb 1963; Yasui and Muruo ke 1988; Kimet al. 2000) [53].

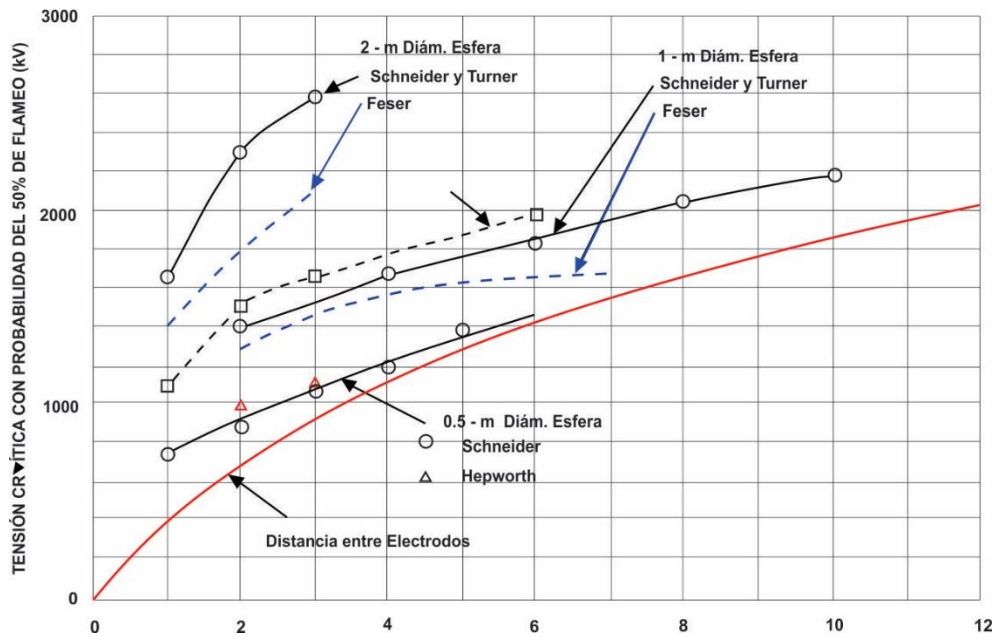


Figura 26. Tensión crítica con probabilidad de 50% de flameo contra la distancia del espacio de aire del plano de una esfera de diferentes diámetros.

Las ventanas de la torre tienen un factor de distancia en aire que es aproximadamente 1.2 y la ecuación que representa las curvas de la Fig. 7 es la siguiente [53]:

$$V_{50 \text{ crit.}} = 1.2[1080 \cdot \ln(0.46 \cdot L + 1)] \quad (10)$$

Donde:

$V_{50 \text{ crit.}}$ = Tensión crítica con probabilidad de 50% de flameo [kV];

L = Distancia de espacio de aire [m]

La altura del conductor de fase tiene una mínima influencia sobre los espacios de aire



en la ventana de la torre.

La resistencia a las sobretensiones del espacio de aire entre conductores de fase de los extremos y la torre con aisladores en V, es generalmente mayor que la resistencia de los espacios de aire en la ventana de la torre con la misma distancia de separación. El incremento de la resistencia depende de la geometría, particularmente del tamaño de la cruceta de la torre y del tamaño del cuerpo de la torre. Si los conductores de los extremos tienen la misma distancia a la cruceta de la torre y al cuerpo de la torre y si la cruceta y el cuerpo tienen la misma anchura que la ventana cuadrada de la torre, entonces la resistencia del espacio de aire de los conductores extremos es aproximadamente 6% mayor que el espacio de air de la ventana de la torre para distancias menores de 5 m. Para distancias de 7 m. o más, la resistencia es mayor de 2~3%.



CAPÍTULO V. METODOLOGÍA DE COORDINACIÓN DE AISLAMIENTO EN LINEAS DE TRANSMISION DE EHV, MEDIANTE EL USO DEL ATPDRAW

5.1 DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA ATPDRAW

5.1.1 RESUMEN

Ante la necesidad de contar con información detallada relativa al comportamiento de los sistemas eléctricos de potencia, han surgido herramientas computacionales y métodos numéricos que permiten analizar prácticamente cualquier evento en el sistema eléctrico.

A inicios de los años 60's, el profesor Hermann Dommel inicia la creación del Electromagnetic Transients Program, posteriormente diversas empresas y universidades incorporaron nuevos modelos al programa, lo que lo convierte en la actualidad en el mejor programa para el análisis de transitorios electromagnéticos.

5.1.2 INTRODUCCIÓN

Inicialmente para el análisis de sistemas eléctricos ante eventos transitorios se disponía de los TNA (Transient Network Analyzer), los cuales básicamente permitían un análisis analógico de transitorios electromagnéticos mediante la interconexión de dispositivos a escala para simular la red eléctrica real.

La necesidad de contar con información más detallada acerca del comportamiento del equipo y del sistema ante eventos transitorios electromagnéticos llevo al desarrollo de algoritmos sofisticados que permiten obtener de manera precisa la solución de problemas complejos, esta necesidad se conjugó con el gran avance en el desarrollo de los elementos de estado sólido, lo cual nos permite contar en la actualidad con microprocesadores rápidos y con gran capacidad de manejo en la información además de ser portátiles tales como el 80486 de Intel. El resultado de lo anterior ha sido la creación de herramientas para el análisis de eventos transitorios electromagnéticos a través de simulación digital, el mejor ejemplo de estas herramientas lo constituye el ATP (Alternative Transients Program) del EMTP (Electromagnetic Transients Program), mediante el cual se pueden interconectar a través de ecuaciones un gran número de modelos matemáticos de los componentes del sistema.

Originalmente el desarrollo de esta herramienta estuvo a cargo del profesor Hermann Dommel; sin embargo, rápidamente la industria americana se dio cuenta de su tremendo potencial y no solo contrató a través de una entidad oficial a su



iniciador, sino que asigno a otras personas a trabajar en el desarrollo del EMTP, debido a su gran potencial y utilidad, y bajo la dirección de Boneville Power Administration (BPA), rápidamente sale de los Estados Unidos y aparece en el Japón y en Europa; en Latinoamérica Perú y México son los primeros en detectar su gran utilidad.

Diversas características hacen del EMTP un programa único en el análisis de transitorios, una de estas es la cantidad de elementos de red preprogramados a través de sus modelos matemáticos entre los cuales se encuentran Líneas de Transmisión, Máquinas Síncronas y Asíncronas, Transformadores, los cuales han sido razonablemente validados con pruebas de campo. Una segunda característica es su capacidad de modelar redes híbridas, esto es, combinar redes eléctricas con sistemas de control en forma interactiva a través del uso del Transients Analysis of Control System (TACS) o bien a través de programación estructurada, MODELS. Otra característica de gran relevancia es que se cuenta con un gran grupo de usuarios a nivel mundial.

Algunos modelos han sido desarrollados dentro de BPA, pero otros han sido desarrollados por universidades o por otras empresas, ejemplos de estos casos son los modelos de lineales dependientes de la frecuencia.

Los métodos computacionales digitales no pueden simular los fenómenos transitorios en forma continua, en su lugar se emplean secuencias de solución a intervalos discretos de tiempo de magnitud. La discretización causa errores de truncación los cuales ocasionan inestabilidad numérica pudiendo causar divergencia sobre la solución correcta. Para eliminar esta inestabilidad los modelos empleados en el EMTP usan el método de la regla trapezoidal para la solución de las ecuaciones diferenciales. Este método es numéricamente estable, aunque también presenta ciertas oscilaciones numéricas, recientemente se han realizado estudios para corregir estas deficiencias.

5.1.3 REQUERIMIENTOS DE HARDWARE Y SOFTWARE.

El EMTP cuenta con varias versiones dependiendo del Hardware y Software con que se cuente, la más versátil de sus versiones por cuestiones de transportabilidad y costos de los equipos es la versión para computadoras personales con microprocesadores Pentium; el hardware y software requerido para esta versión:

- Microprocesador Pentium II o superior.
- Sistema operativo Windows 95 o superior.



- Memoria 16 MB o superior.
- Disco duro de 40 MB.

La versión del EMTP utilizada en este trabajo es la versión para Windows 5.7.

5.1.4 DESCRIPCIÓN BÁSICA DE SUS CAPACIDADES.

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

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

El ATPDraw actualmente mantiene aproximadamente 70 componentes estándar y 28 objetos TACS. Además, el usuario puede crear sus propios objetos de circuito usando el módulo de base de datos y la opción \$INCLUDE del ATP. Circuitos monofásicos y trifásicos pueden ser construidos. Múltiples ventanas del circuito pueden mantenerse para trabajar en varios circuitos simultáneamente y copiar información entre ellos.

El ATPDraw es muy valioso para los nuevos usuarios del ATP y es una excelente herramienta para propósitos educativos. Se espera, sin embargo, que incluso los usuarios experimentados del ATP encuentren el programa útil para documentación de circuitos e intercambio de los datos de casos con otros usuarios. La posibilidad de construir bibliotecas de circuitos y subcircuitos hace del ATPDraw una herramienta poderosa en el análisis de transitorios de sistemas eléctricos de potencia.

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

El ATP es considerado como uno de los programas más ampliamente utilizado para la simulación digital de fenómenos transitorios electromagnéticos, así como de naturaleza electromecánica en sistemas eléctricos de potencia. Esto ha sido desarrollado continuamente a través de contribuciones internacionales sobre los



pasados 20 años, coordinado por el grupo de usuarios del EMTP Canadiense/Americano.

El programa ATP calcula variables de interés dentro de las redes de potencia eléctrica como función del tiempo, típicamente iniciado por algunos disturbios. Básicamente, la regla trapezoidal de integración es utilizada para resolver las ecuaciones diferenciales de las componentes del sistema en el dominio del tiempo.

El ATP tiene muchos modelos incluyendo maquinas rotatorias, transformadores, apartarrayos, líneas de transmisión y cables. Con este programa digital, redes complejas de estructura arbitraria pueden ser simuladas. Análisis de sistemas de control, equipos electrónicos de potencia y componentes con características no lineales tales como arcos y coronas también son posibles.

Disturbios simétricos y asimétricos son permitidos, tales como fallas, descargas atmosféricas, cualquier tipo de operaciones de maniobra incluyendo conmutación de válvulas.

Lo que incluye el ATP actualmente consiste de los siguientes componentes:

- Elementos Lineales acoplados y desacoplados.
- Líneas de transmisión y cables con parámetros distribuidos y dependientes de la frecuencia.
- Elementos No lineales: transformadores que incluyen la saturación e histéresis, apartarrayos de impulso, arcos.
- Interruptores ordinarios, interruptores dependientes del voltaje y del tiempo, interruptores estadísticos.
- Válvulas (diodos y tiristores)
- Máquinas síncronas trifásicas, máquina universal.
- Modelos y TACS (Transient Análisis of Control Systems).

Los Modelos en el ATP están descritos en un lenguaje de propósito general apoyados por un amplio juego de herramientas de simulación para la representación y estudio de sistemas variantes en el tiempo. Los modelos permiten la descripción de componentes arbitrarios de circuito y control definidos por el usuario, proporcionando una simple conexión a otros programas / modelos.



Como un propósito general de la herramienta programable, los Modelos pueden utilizarse para procesar los resultados de la simulación en el dominio del tiempo o de la frecuencia.

Las siguientes rutinas de apoyo se encuentran disponibles en el ATP:

- LINE CONSTANTS, CABLE CONSTANTS y CABLE PARAMETERS para el cálculo de parámetros eléctricos de líneas de transmisión y cables.
- Generación de datos de entrada de modelos de línea dependientes de la frecuencia:

Arreglo J. MARTI, Arreglo SEMLYEN y Arreglo NODA.

- Calculo de datos ejemplares para transformadores (XFORMER y BCTRAN).
- Conversión de curvas de histéresis y saturación.
- Modulación de base de datos. [54]

Con el programa de Transitorios Alternativos (ATP) se pueden simular, redes complejas y sistemas de control de estructura arbitraria. ATP tiene una amplia capacidad de modelación y características adicionales importantes, además del cálculo de los transitorios.

El Programa de Transitorios Electromagnéticos (EMTP) se desarrolló para el dominio público en el Bonneville Power Administration (BPA) de Portland, Oregón antes de la iniciativa comercial que en 1984 se desarrolló por el Grupo de Coordinación EMTP y el Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) de Palo Alto, California. El nacimiento de la ATP se remonta a principios de 1984, cuando los Dres. Meyer y Liu no aprobaban la propuesta de comercialización del EMTP por la BPA y el Dr. Meyer, usando su tiempo personal propio, comenzó un nuevo programa a partir de una copia de dominio público del EMTP de la BPA. Desde entonces el programa ATP se ha desarrollado de forma continua a través de contribuciones internacionales por los Dres. W. De Scott Meyer y Tsu-Huei Liu, los co-presidentes del Grupo de Usuarios EMTP canadiense / estadounidense. Varios expertos de todo el mundo han contribuido a EMTP a partir de 1975 y más tarde a ATP en estrecha colaboración con los desarrolladores de programas en Portland, EE.UU. Pese a que los trabajos de la BPA en el EMTP permanecen bajo dominio público por la ley estadounidense, el ATP requiere de una licencia antes de conceder el acceso a los materiales. Sin embargo, las concesiones de licencias están libres de cargo y disponible para cualquier persona alrededor del mundo



que no haya participado voluntariamente en la venta o intento de venta de cualquier programa de transitorios electromagnéticos [55].

5.2 MÓDELOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN EN ATPDRAW

El estudio del fenómeno transitorio en sistemas de potencia, es en esencia, el estudio de la distribución de energía electromecánica y electromagnética entre los elementos que componen al sistema. En operación de estado estable el intercambio de energía no necesita ser modelado explícitamente y se puede representar por fasores de tensión y corriente en el dominio de la frecuencia. En el estado transitorio, en cambio, el intercambio de energía entre los componentes del sistema estará afectado por los disturbios generados interna o externamente creando corrientes y tensiones excesivas. La predicción de los niveles de intensidad y tensión elevados es el principal objetivo de la creación de modelos para simulación de fenómenos transitorios.

La clasificación de los transitorios electromagnéticos está ligada al tipo de modelo utilizado para la representación de los elementos componentes del sistema. No existe un modelo apropiado para todos los tipos de análisis de transitorios y este se determina por el tipo de estudio que se está realizando. La manera más común de clasificar a los transitorios electromagnéticos es por medio del rango de tiempo del estudio, el cual está relacionado con el fenómeno bajo investigación. La clave en el análisis de fenómenos transitorios está en la modelación de cada uno de los componentes de manera que represente el sistema físico de manera realista bajo el rango de tiempo de interés.

Los disturbios relacionados con descargas atmosféricas, requieren de la simulación en la región de los nano y micro segundos; como es obvio los elementos de control no son capaces de actuar en tal rango de tiempo por lo que las características inherentes del sistema y sus componentes serán las que ejercerán mayor influencia en el comportamiento del sistema. Para los fenómenos debidos a maniobra, tales como conmutación de interruptores, el rango de tiempo para el cuál será simulado el sistema depende del tipo de estudio y de la información accesible, si la preocupación principal es la coordinación de aislamiento el rango será de milisegundos.

Existen diferentes parámetros que tienen influencia en la correcta representación de las líneas de transmisión y en los componentes de los sistemas eléctricos de potencia; en general el modelo depende del rango de frecuencia y en la duración del fenómeno transitorio de interés. En la tabla 6 se muestra la clasificación de los rangos de frecuencia para la modelación de componentes de potencia:

Rango de frecuencia	Característica en el dominio del tiempo	Utilidad de la representación
0.1 Hz - 3 KHz	Oscilaciones de baja frecuencia	Sobretensiones temporales
50 Hz - 20 KHz	Fallas con frente de onda cortos	Sobretensiones por maniobra
10 KHz - 3 MHz	Fallas con frente de onda rápido	Sobretensiones por rayo
100 KHz - 50 MHz	Fallas de frente de onda muy rapido	Sobretensiones re-incidentes

Tabla 6. Clasificación de los rangos de frecuencia para la representación de componentes de sistemas eléctricos de potencia.

Los transitorios de una línea de transmisión sin pérdidas con parámetros distribuidos constantes se calcula generalmente utilizando métodos derivados de la teoría de ondas, uno de estos es el método de Bergeron el cuál se basa en la solución del dominio del tiempo de las ecuaciones diferenciales de la línea. Este método se presentará más adelante.

La selección de modelo de línea de transmisión a utilizar, como se mencionó anteriormente, puede ser resumida en un árbol de decisiones como el que se presenta en la figura 27 a continuación:

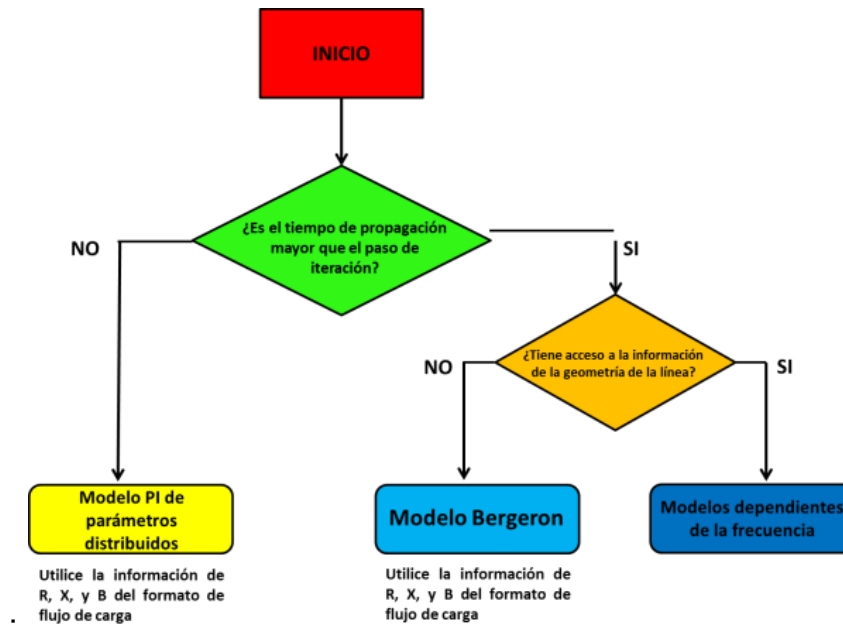


Figura 27. Árbol de decisiones.

Existen muchos modelos de circuito PI, el circuito PI nominal y el de parámetros distribuidos son los más conocidos, sin embargo, como ya se mencionó estos modelos solamente son adecuados para estudios del estado estable donde se considera solamente la frecuencia fundamental.

Es bastante obvio que los problemas de fenómenos transitorios no pueden ser resueltos a mano, excepto en los casos más simples con un pequeño número de elementos aplicando la transformada de Laplace. Uno de los primeros métodos utilizados para la simulación de transitorios son los TNA's (Transient Network Analyzer), sin embargo, debido al alto costo de estos no es fácil tener acceso a los mismos. A finales de los años 60 H.W. Dommel publicó el artículo "Digital computer solution of electromagnetic transients in single and multi-phase networks", con el cuál se introdujo el método de simulación digital, el cual se sigue utilizando hasta hoy en día. La idea general es utilizar métodos numéricos aplicados directamente en el dominio del tiempo para computar transitorios electromagnéticos en circuitos constituidos por elementos RLC o elementos "discretizados".

Una función continua puede ser simulada por medio de la sustitución de una fórmula numérica de integración en la ecuación diferencial y re-arreglando la función de manera apropiada. Para seleccionar el integrador adecuado se debe tomar en cuenta el error dado a los términos truncados, sus propiedades como diferenciador, el error de propagación y su respuesta en frecuencia. El método

NIS constituye la base del método de solución implementado por H. W. Dommel en el EMTP, el cuál es el método más utilizado para la solución y se implementa en el EMTP y en EMTDC por nombrar algunos [56].

En los sistemas de potencia, y en general en las líneas de transmisión, se presentan fenómenos transitorios tales como: sobrevoltajes temporales, sobrevoltajes por maniobra y sobrevoltajes por descargas atmosféricas, aunque estos fenómenos tienen un tiempo de duración muy corto, pueden producir daños de gran consideración en los componentes del sistema. La comprensión del comportamiento de estos fenómenos permite realizar la coordinación de aislamiento del sistema y determinar los tiempos requeridos para el ajuste de las protecciones de sus equipos. El estudio de los modelos de línea permite entender el comportamiento de estos fenómenos por medio de modelos matemáticos que son suficientemente exactos para un rango específico de frecuencia.

En este trabajo se hace referencia a algunos modelos de parámetros concentrados constantes, modelos de parámetros distribuidos constantes y modelos de parámetros distribuidos dependientes de la frecuencia desarrollados en el dominio modal y en el dominio de la fase. La clasificación de estos modelos se ilustra en la Figura 28.

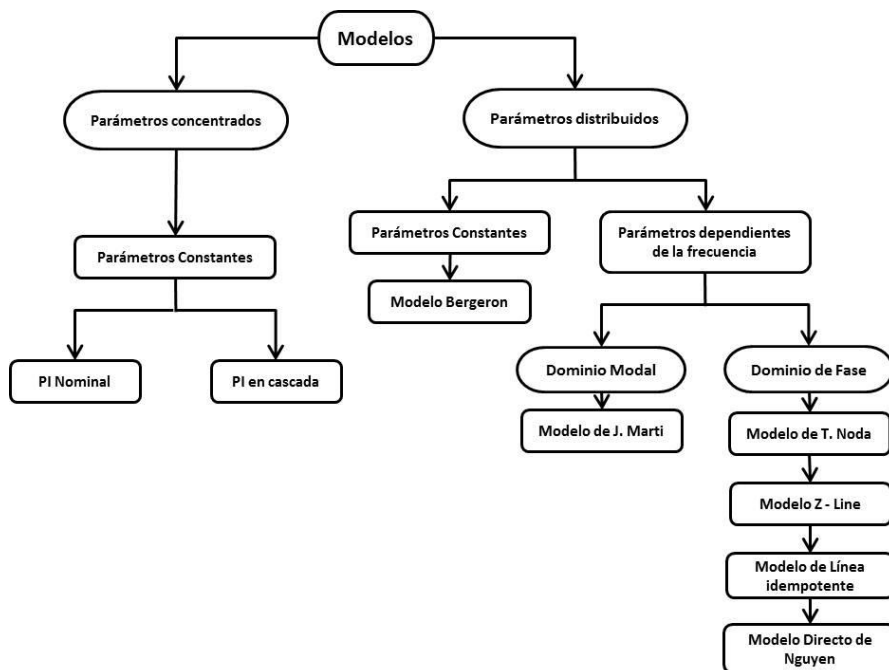


Figura 28. Clasificación de los modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos.

Aunque se han dedicado muchos esfuerzos para el desarrollo de modelos que

permitan simular fenómenos transitorios, no hay un acuerdo sobre cuál es el más adecuado. Por consiguiente, el diagrama de decisiones guía de los modelos, se presenta en la Figura 29, permite elegir el de línea apropiado según las necesidades del usuario, como por ejemplo que tan rápido o que tan exacto se quieren los resultados finales. [57].

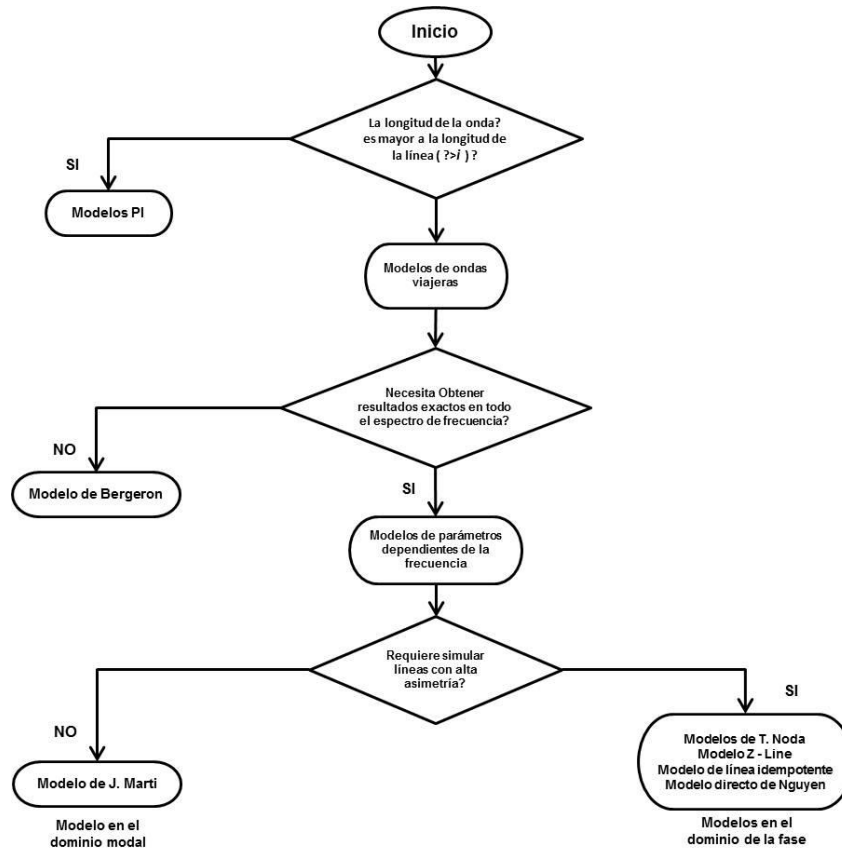


Figura 29. Diagrama de flujo guía de los modelos de línea apropiados [57].

5.2.1 MODELO PI

El modelo nominal PI nominal es bastante exacto y es el modelo para usar en simulaciones de estado estacionario de líneas cortas, a la frecuencia de la red. Este modelo es la base para el estudio del modelo de línea de circuitos PI nominales en cascada que no se tratan este trabajo. En la figura 29 se representa el circuito PI nominal para una línea de transmisión. Las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones (11) y (12):

$$V_k = \left[\frac{ZY}{2} + 1 \right] V_m + Z_{im} \quad (11)$$

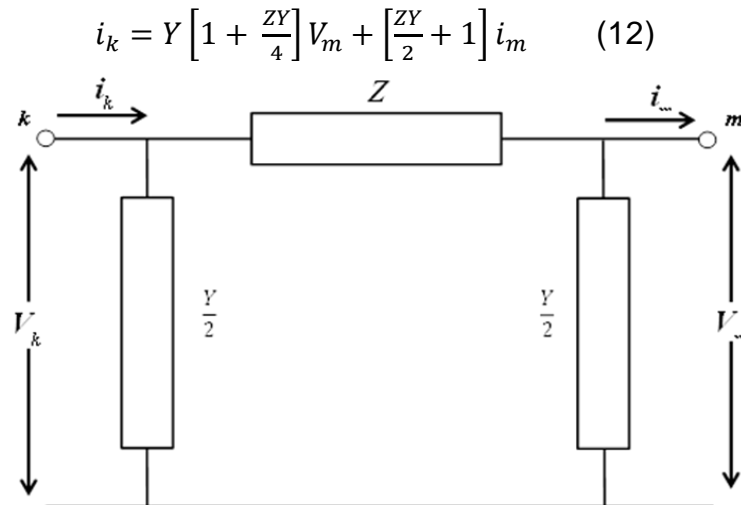


Figura 29. Circuito equivalente del modelo PI nominal.

Dónde:

V_k = Voltaje en el nodo k

$$Z = I(R' + j\omega L') \quad (13)$$

$$\frac{Y}{2} = \frac{I}{2}(G' + j\omega C') \quad (14)$$

i_k = Corriente en el nodo k

v_m = Voltaje en el nodo m

R' = Resistencia por unidad de longitud [Ω/km]

L' = Inductancia por unidad de longitud [H/km]

C' = Capacitancia por unidad de longitud [F/km]

G' = Conductancia por unidad de longitud [S/km]

I = Longitud de la línea [km]

Z = Impedancia serie de la línea de transmisión

Y = Admitancia en derivación de la línea de transmisión

5.2.2 MODELO DE J. MARTÍ

El modelo de J. Martí utiliza matrices de transformación constantes reales para la descomposición Fase-Modo; por lo tanto, también presenta inconvenientes de exactitud para líneas desbalanceadas.

Debido a la naturaleza distribuida de las pérdidas y a la dependencia en frecuencia de los parámetros, es más conveniente desarrollar las ecuaciones de línea en el dominio de la frecuencia, como se ilustra en las ecuaciones (15) y (16):

$$V_k(w) = Z_c(w)I_k(w) + E_{mh}(w) \quad (15)$$

$$V_m(w) = Z_c(w)I_m(w) + E_{kh}(w) \quad (16)$$

Dónde:

$$E_{mh} = A(w)F_{pk} = [V_k(w) + Z_c(w)I_k(w)]e^{-\varphi(w)l} \quad (17)$$

$$E_{kh} = A(w)F_{pm} = [V_m(w) + Z_c(w)I_m(w)]e^{-\varphi(w)l} \quad (18)$$

Son las fuentes historiales de voltaje en los nodos k y m. La impedancia característica Z_c y la constante de propagación φ de las ecuaciones (15) y (16), se ilustran en las ecuaciones (17) y (18):

$$Z_c(w) = \sqrt{\frac{R'(w)+jwL'(w)}{G'(w)+jwC'(w)}} \quad (19)$$

$$\gamma(w) = \sqrt{\left(R'(w) + jwL'(w)\right)\left(G'(w) + jwC'(w)\right)} \quad (20)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones (19) y (20) en el dominio de la frecuencia, se ilustra en la Figura 30.

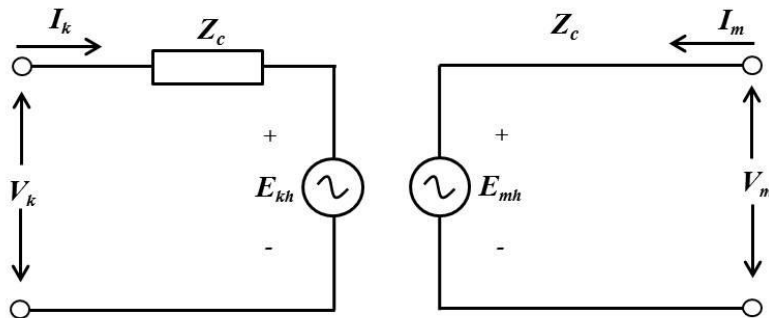


Figura 30. Circuito equivalente del modelo de Martí en el dominio de la frecuencia

Transformando las ecuaciones (19) y (20) al dominio del tiempo, se obtienen las ecuaciones (21) y (22):

$$V_k(t) = Z_c * i_k(t) + [V_m(t) + Z_c * i_m(t)] * a(t) \quad (21)$$

$$V_m(t) = Z_c * i_m(t) + [V_k(t) + Z_c * i_k(t)] * a(t) \quad (22)$$

En las ecuaciones (21) y (22) la evaluación numérica de la convolución dada por el símbolo * para el cálculo de transitorios, es lenta. Para acelerar este proceso, es necesario sintetizar los elementos involucrados en la convolución, como son la impedancia característica Z_c y la función de propagación A , debido a la naturaleza irracional de γ y Z_c . La síntesis por medio de funciones racionales

permite que la evaluación numérica de la convolución se vuelva más rápida, ya que se obtienen exponenciales en el dominio del tiempo, aplicando así las técnicas de convolución recursiva. El método de aproximación usado por el autor es el procedimiento de trazado asintótico de Bode, donde el principio básico es aproximar la curva dada o la curva original por segmentos de línea recta de los cuales son horizontales o tienen una pendiente de 20 dB/década. Los puntos donde la pendiente cambia, definen los polos y los ceros de la función racional. El modelo de J. Martí no es muy exacto en bajas frecuencias y para secciones de línea muy cortas, debido a las imprecisiones presentes para los cálculos en el dominio del tiempo. [57]

5.2.3 MODELO DE TAKU NODA

El modelo de T. Noda toma en cuenta la dependencia de la frecuencia en los parámetros de la línea de transmisión. Además, es desarrollado en el dominio de la fase para evitarse los problemas asociados con las matrices de transformación dependientes de la frecuencia. Su eficiencia se basa en la utilización de un modelo matemático llamado ARMA (Autoregressive Moving Average) que reemplaza las convoluciones en el dominio del tiempo, para reducir los tiempos de cálculo. Las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones (23) y (24):

$$I_k(w) = Y_c(w)V_k(w) - e^{-jwT} H^T(w)\{Y_c(w)V_m(w) + I_m(w)\} \quad (23)$$

$$I_m(w) = Y_c(w)V_m(w) - e^{-jwT} H^T(w)\{Y_c(w)V_k(w) + I_k(w)\} \quad (24)$$

Transformando las ecuaciones (23) y (24) en el dominio del tiempo, se obtienen las ecuaciones (25) y (26):

$$I_k(t) = y_c(t)^* v_k(t) - i_k(t) \quad (25)$$

$$I_m(t) = y_c(t)^* v_m(t) - i_m(t) \quad (26)$$

Dónde:

$$I_k(t) = h^T(t)^* \{y_c(t)^* v_m(t-T) + i_m(t - T)\} \quad (27)$$

$$I_m(t) = h^T(t)^* \{y_c(t)^* v_k(t-T) + i_k(t - T)\} \quad (28)$$

El circuito equivalente de las ecuaciones (25) y (26) se ilustra en la Figura 31:

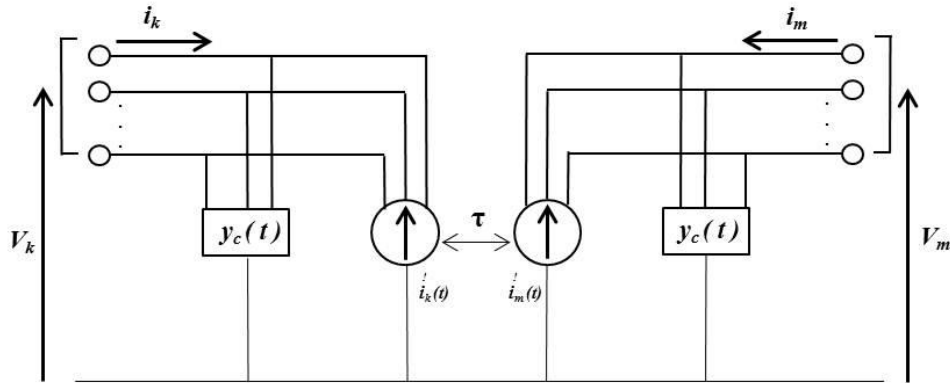


Figura 31. Circuito equivalente del modelo de T. Noda en el dominio del tiempo

Para modelar la admitancia $y_c(w)$ con los modelos ARMA, la operación de convolución $y_c(t)*v(t)$ se representa por medio de la ecuación (28):

$$Y_c(t)*v(t) = y_{c0}v(t) + y_{c1}(t)* v(t-\Delta t) \quad (28)$$

Donde y_{c0} es una Matriz constante. Debido a que en el modelo desarrollado por Taku Noda se aproxima la admitancia característica y la matriz de propagación por medio de la transformada z , el modelo depende del paso de tiempo ($\Delta t= 1/10f_{max}$) y no se puede aplicar directamente un paso de tiempo arbitrario. [57]

5.2.4 MODELO BERGERON

Este modelo adaptado y desarrollado por Hermann Dommel, está basado en la propagación de las ondas en una línea de transmisión sin pérdidas, y con parámetros L' y C' constantes distribuidos a través de la línea de transmisión. La Figura 32 representa el modelo de Bergeron para una línea de transmisión, donde las ecuaciones que relacionan los voltajes y corrientes en los extremos de la línea están representadas por las ecuaciones (29) y (30):

$$i_k(t) = \frac{1}{Z_c} v_k(t) + i_{kh}(t) \quad (29)$$

$$i_m(t) = \frac{1}{Z_c} v_m(t) + i_{mh}(t) \quad (30)$$

Dónde:

$$i_{kh} = \frac{1}{Z_c} v_k(t - \tau) + i_m(t - \tau) \quad (31)$$

$$i_{mh} = \frac{1}{Z_c} v_k(t - \tau) - i_k(t - \tau) \quad (32)$$

τ = Tiempo de desplazamiento de la onda viajera.

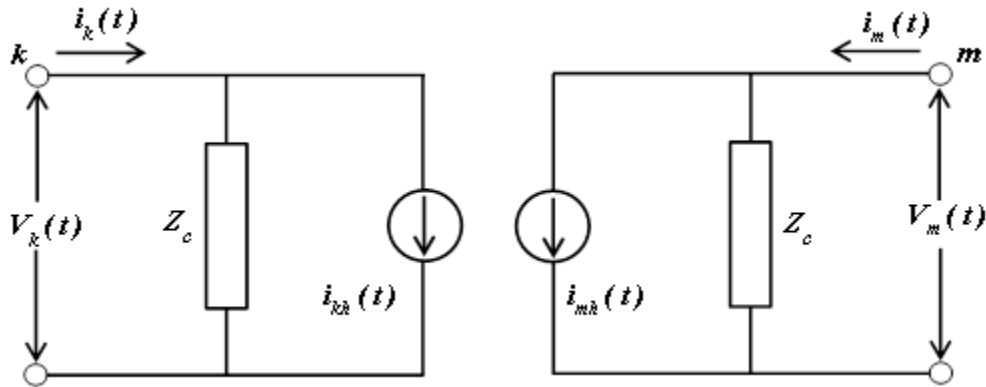


Figura 32. Circuito equivalente del modelo Bergeron

La impedancia característica Z_c se representa mediante la ecuación (33):

$$Z_c = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (33)$$

Para sistemas M-fasicos, las líneas se desacoplan por medio del Método de descomposición Modal para estudiar cada modo como una línea monofásica. Esta descomposición se realiza por medio de matrices de transformación constantes con componentes reales, dando resultados exactos para líneas balanceadas. Para líneas desbalanceadas el modelo no es útil, ya que la suposición de que la matriz de transformación sea constante no es válida, porque las matrices son dependientes de la frecuencia.

Debido a que en las líneas de transmisión se presentan fenómenos como el efecto piel, y el efecto de retorno a tierra a medida que aumenta la frecuencia, es necesario considerar la dependencia en frecuencia de los parámetros, para tener resultados más exactos. [57]

5.2.5 MODELO DE SEMLYEN

Este modelo aproxima la impedancia característica y la constante de propagación de cada modo mediante dos exponenciales, si bien no fue el primer modelo de parámetros variables con la frecuencia, es el más antiguo que todavía subsiste en el ATP. La sencillez de las ecuaciones hace que aun cuando los parámetros de la línea no presenten discontinuidades, la aproximación sea insuficiente por lo que este modelo está cayendo en desuso y es posible que se descontinúe su inclusión en el ATP, como ha sucedido con WEIGHTING y HAUER SETUP. [58]

5.3 MODELO IMPLEMENTADO EN ATP

El ATP (Alternative Transients Program) o más conocido como EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) es el programa más extensamente utilizado en el mundo para la simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y sistemas de control en sistemas eléctricos de potencia, programa que fue desarrollado por la Boneville Power Administration. [55]

Cada elemento involucrado en los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas debe ser representado por un componente en ATP. Los elementos a ser representados son los siguientes:

- Descarga atmosférica
- Línea de transmisión
- Torre de transmisión
- Resistencia de pie de torre
- Cadena de aisladores

DESCARGA ATMOSFÉRICA

Como se mencionó anteriormente una descarga atmosférica está caracterizada por la presencia de una onda de corriente de alta magnitud y corta duración. En el presente trabajo la descarga atmosférica es representada por una fuente de corriente. El ATP dispone de varios modelos de fuentes para la simulación de transitorios. Para el caso de la simulación de la corriente del rayo se utilizará la fuente de corriente Heidler type 15 pues es la fuente que se ajusta con mayor exactitud a la forma de onda de corriente propuesta por la norma IEC 61-1, Figura 33.

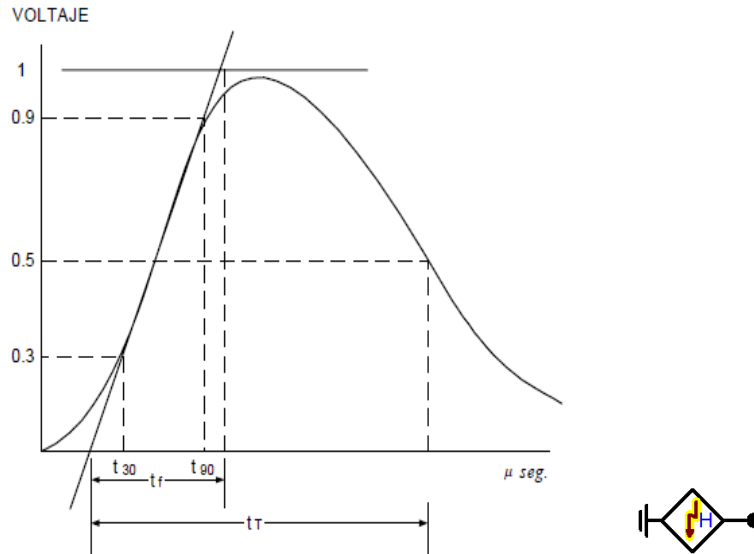


Figura 33. Forma de onda de impulso del rayo y elemento Heidler type 15 en ATPDraw.

LÍNEA DE TRANSMISIÓN.

Para realizar la simulación debemos seleccionar el modelo de la línea de transmisión ya que aquí se determinan los valores de está: el arreglo de los conductores de fase y de guarda, el número de estos, las alturas, las distancias, la resistencia, el diámetro de los conductores, la longitud de la línea, la impedancia, la frecuencia, etc. El elemento en ATPDraw se llama LINE/CABLE y se muestra en la figura 34.



Figura 34. Sección de una línea de transmisión en ATPDraw.

TORRE DE TRANSMISIÓN.

La torre de transmisión debe considerarse como una impedancia de impulso que varía a lo largo de la torre en cuya base se encuentra conectada la resistencia de pie de torre. La torre puede ser representada como una línea de transmisión monofásica de parámetros distribuidos con una impedancia de impulso y una velocidad de propagación de onda igual a la de la luz.

Son varios los modelos que se han propuesto para determinar la impedancia de impulso de las torres de transmisión. Uno de los modelos propuestos es el cónico que proporciona una impedancia constante para la torre de transmisión. La impedancia de impulso para descargas verticales está dada por:

$$Z_T = 60 \ln \left(\frac{2h\sqrt{2}}{r_b} \right) \quad (37)$$

Donde h es la altura de la torre y r_b el radio en la base. Las torres de transmisión o estructuras, proporcionan el soporte mecánico a las líneas de transmisión. Las torres que se usan son las torres auto soportadas en celosía metálica. Su nombre se debe a que, mecánicamente, no requieren de apoyos adicionales para trabajar, como elementos sujetos a los esfuerzos de tensión y compresión debido a cargas de conductores, aisladores y elementos externos como presión de viento, carga por hielo, etc., además del tensionado normal para montaje. [60]

En la Figura 35 se muestra la representación de la torre de transmisión, donde cada rectángulo marcado con "LINE Z", representa la impedancia de la torre en secciones divididas marcadas por un número, el cual indica la distancia por tramos de la torre.

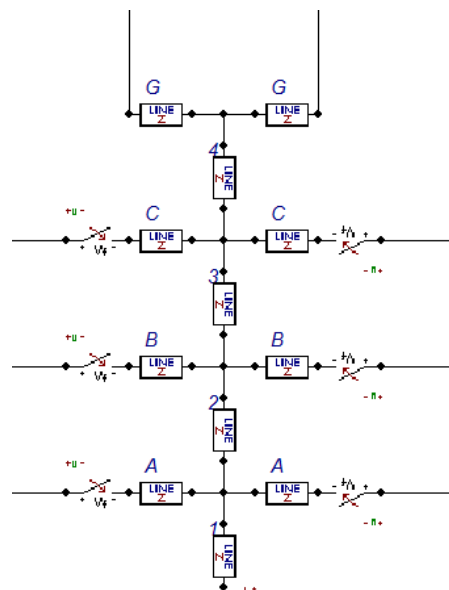


Figura 35. Representación en el ATPDraw de la torre con sus impedancias características.



RESISTENCIA DE PIE DE TORRE.

El valor pico del sobrevoltaje que aparece sobre la torre está determinado principalmente por la impedancia de pie de torre aparente en el momento de la descarga, debido a que la reflexión de la base de la torre puede llegar mucho más rápido al tope de la torre que las reflexiones de las torres adyacentes. La influencia de la resistencia de pie de torre aparente sobre la tensión en el tope de la torre es la determinada por su respuesta que depende de la corriente y el tiempo. La respuesta del tiempo es importante solo cuando los contrapesos instalados superan los 30 metros de longitud de la base de la torre.

La respuesta del tiempo es generalmente despreciada y la impedancia es determinada por su dependencia de la corriente del rayo mediante la siguiente expresión planteada por Martínez y Ferley (2004):

$$R_T = \frac{R_0}{\sqrt{1 + \frac{l}{I_g}}} \quad (38)$$

Dónde:

R_0 = la resistencia al pie de torre medida a baja corriente y baja frecuencia (Ω).

R_T = es la resistencia de puesta a tierra aparente en el momento de la descarga (Ω).

I_g = es la corriente limitante para inicializar una ionización suficiente del suelo (A).

l = es la corriente de la descarga atmosférica a través de la resistencia de pie de torre (kA).

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

$$I_g = \frac{E_0 * \rho}{2\pi R_0^2} \quad (39)$$

Donde:

ρ = es la resistividad del suelo (Ω/m).

E_0 = es el gradiente de ionización del suelo (300 kV/m).

Como se puede ver, en las expresiones anteriores la resistencia de pie de torre no es constante, su valor es dependiente de la corriente, por lo que, para la resistencia de pie de torre, se utiliza una resistencia con característica no lineal, dependiente de la corriente.

La resistencia de puesta a tierra se modela por un elemento resistor mediante un comportamiento estático (figura 36), con el valor correspondiente obtenido a RT . [60]

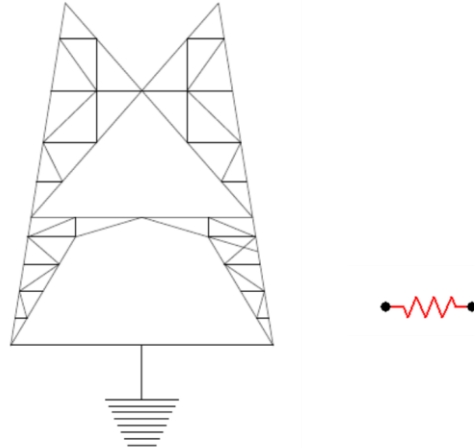


Figura 36. Modelo de resistencia de tipo concentrado.

CADENA DE AISLADORES.

El comportamiento del aislamiento se determina mediante la longitud de la cadena y el tiempo que dura la sobretensión según la ecuación (40):

$$V_{flameo} = \left(0.4 + \frac{0.71}{t^{0.75}}\right) \times d \text{ [MV]} \quad (40)$$

Donde:

t = tiempo (μseg)

d = distancia longitudinal de la cadena de aisladores (m)

La cadena de aisladores se simula mediante un interruptor tipo gap controlado por voltaje. El nombre de este elemento en ATPdraw se denomina SWITCHVC, figura 37.

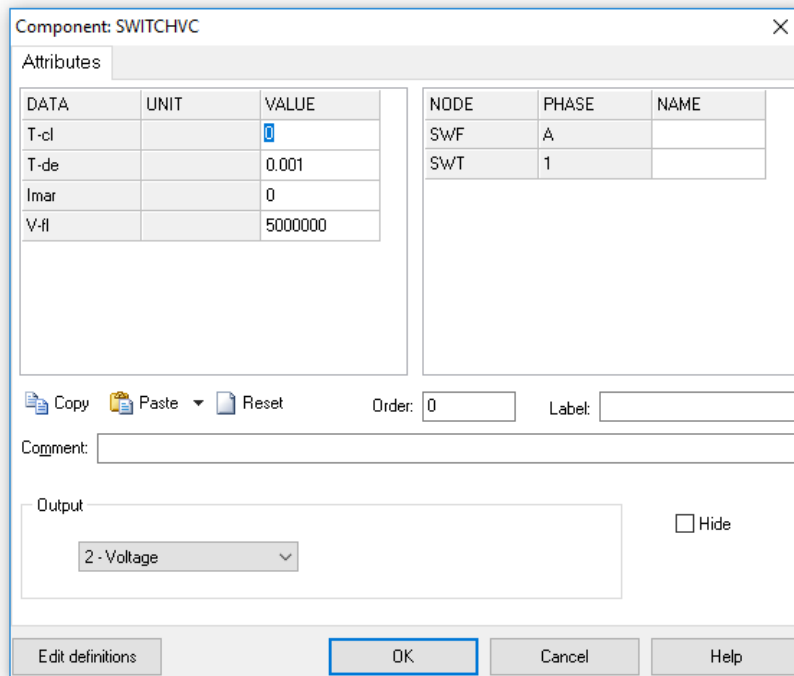
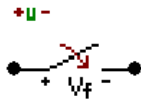


Figura 37. Modelo de cadena de aisladores y su ventana de entrada de datos.

La respuesta del aislamiento se simula mediante la opción de los TACS del ATPDraw, los cuales nos permiten implementar fórmulas matemáticas

$$V_{flameo} = \left(0.4 + \frac{0.71}{t \times 10^6^{0.75}} \right) \times \text{Núm. de aisladores} \times \text{long. del aislador (m)} \times 10^6 \quad (40)$$

La longitud de las unidades estándar de aisladores en de 5 ¾” (figura 25) y en metros es igual a 0.146.

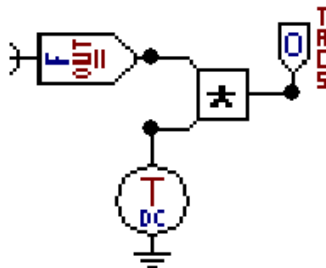


Figura 38. Elemento en ATPDraw del voltaje de flameo representado mediante TACS.

5.4 MODELADO DE LA TORRE AUTOSOPORTADA EN DISPOSICIÓN HORIZONTAL, DE DOS CONDUCTORES POR FASE Y DOS HILOS DE GUARDA.

En la figura 39 se muestran las dimensiones de la torre de 400 kV a modelar.

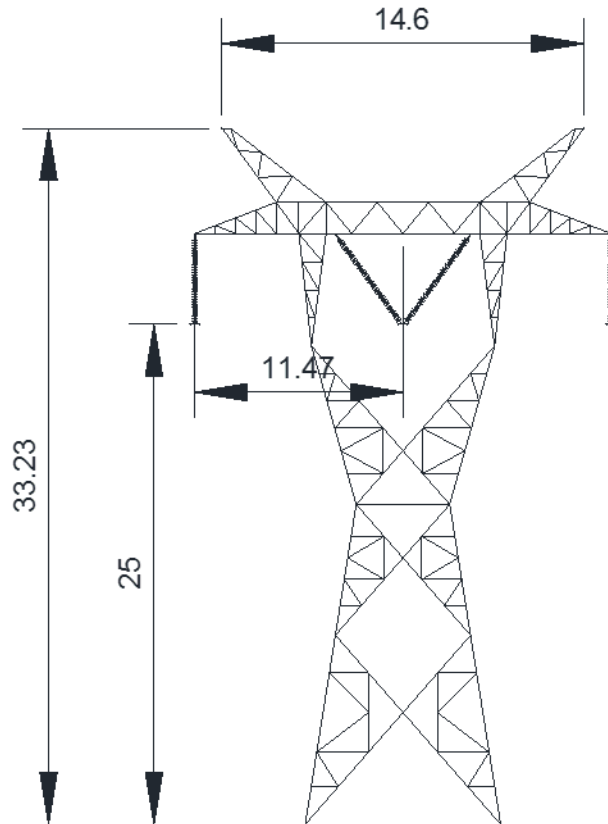


Figura 39. Torre tipo 400 kV.

Datos de la línea:

Radio interno del conductor de fase: 0.5985 cm.

Radio externo del conductor de fase: 1.599 cm.

Resistencia del conductor de fase: 0.0513 ohm/km DC

Radio externo del hilo de guarda: 0.489 cm

Resistencia del hilo de guarda: 1.463 ohm/km DC

En la Figura 40 se muestra una ventana cuyos datos corresponden al modelo de la línea de transmisión que será utilizada. En este caso el modelo de la línea utilizado y recomendado para estudios de transitorios es el J. Martí debido a que el modelo es dependiente de la frecuencia es decir que la matriz es de transformación constante y varía con la frecuencia. Así como la longitud de la línea y algunas consideraciones para el estudio como el efecto piel y el muestreo.

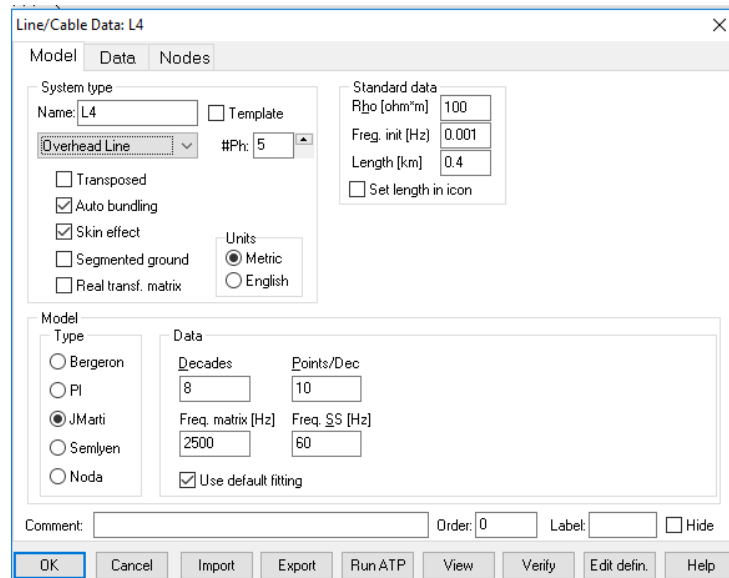
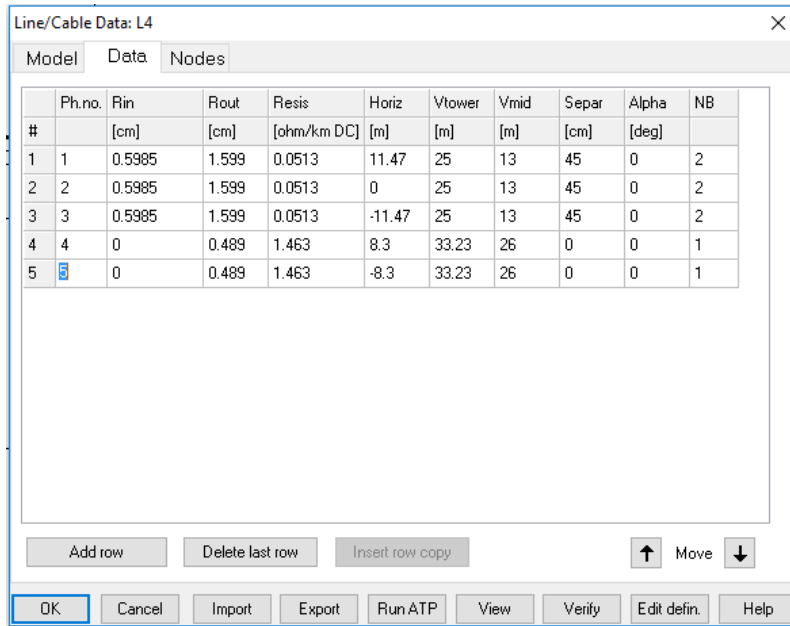


Figura 40. Caja de dialogo de datos del modelo de la línea.

En la Figura 41, se muestra la caja de dialogo de entrada que corresponde a los datos geométricos de la línea, como son la disposición de los conductores, número de hilos por fase, radio interno y externo del conductor, altura de la torre, etc.



#	Ph.no.	Rin [cm]	Rout [cm]	Resis [ohm/km DC]	Horiz [m]	Vtower [m]	Vmid [m]	Separ [cm]	Alpha [deg]	NB
1	1	0.5985	1.599	0.0513	11.47	25	13	45	0	2
2	2	0.5985	1.599	0.0513	0	25	13	45	0	2
3	3	0.5985	1.599	0.0513	-11.47	25	13	45	0	2
4	4	0	0.489	1.463	8.3	33.23	26	0	0	1
5	5	0	0.489	1.463	-8.3	33.23	26	0	0	1

Figura 41. Datos geométricos de la línea.

Para el cálculo de impedancias de la torre se aplicó la ecuación 37 y los resultados son mostrados en la Tabla 7. La torre de transmisión representando las secciones cónicas es mostrada en la figura 40.

CARACTERÍSTICAS DE LOS CONOS			
Nombre	Altura (m)	Radio (m)	Impedancia (Z)
1	15.37	3.4	153
2	13	1.125	209
3	13	1.125	209
C1	11.47	0.75	226
C2	11.47	0.75	226
H1	3.55	1.2	127
H2	3.55	1.2	127

Tabla 7. Impedancia característica de los conos de la torre de transmisión.

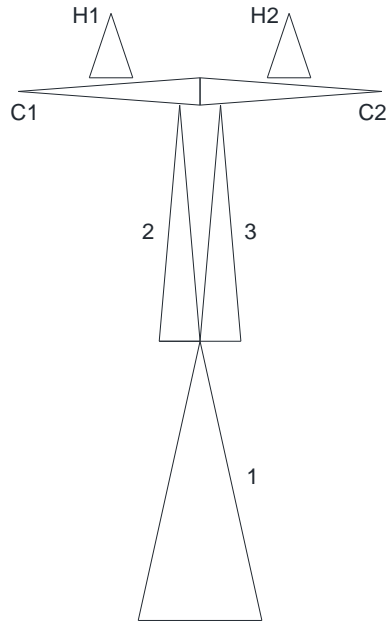


Figura 42. Secciones cónicas de la torre de 400 kV.

El modelo de la torre representado en ATPDraw por medio de componentes LINE Z se muestra en la figura 43.

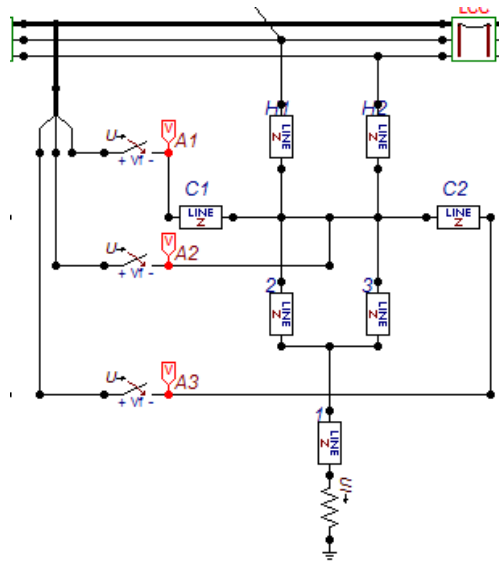


Figura 43. Impedancias de la torre de 400 kV.

5.7 MODELO PARA DESCARGAS AL HILO DE GUARDA EN UNA LÍNEA DE 400 KV.

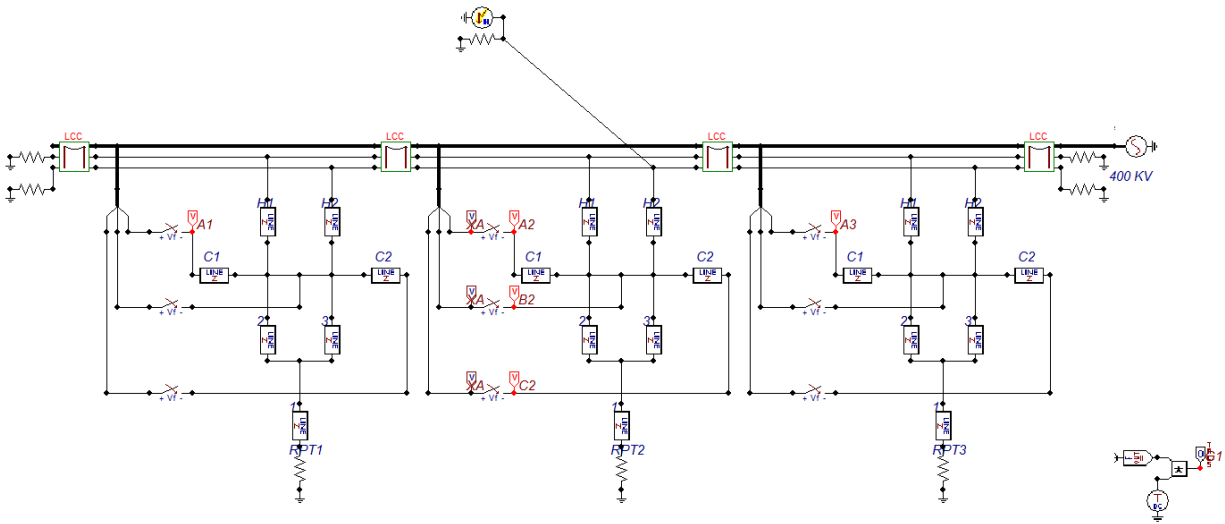


Figura 44. Representación de una descarga atmosférica en un hilo de guarda en ATPDraw.

La figura 44 simula la descarga de un rayo sobre el hilo de guarda 2 en el segundo tramo de la línea de 400 kV los valores del modelo son los siguientes:

Corriente del rayo: 30 kA.

RPT1: 20 Ω

RPT2: 100 Ω

RPT3: 20 Ω

Núm. de unidades de aisladores: 18

Voltaje de flameo de la cadena de aisladores: 1050000 V (Ecuación 40)

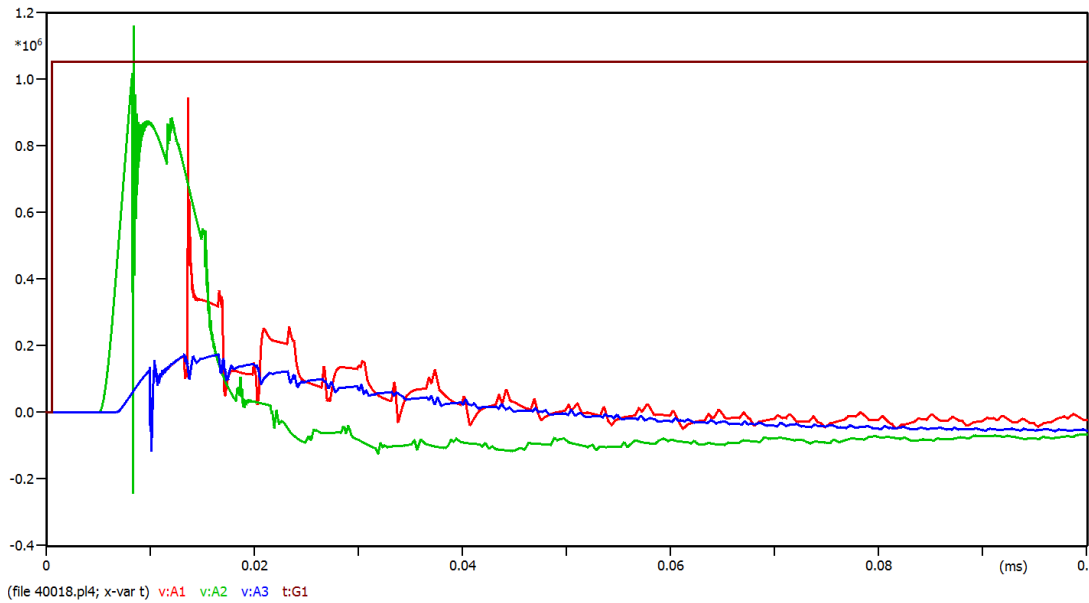


Figura 45. Voltajes en los aisladores de la fase A de las secciones 1, 2 y 3 de la línea con 18 unidades.

La figura 45 nos muestra los voltajes en los aisladores de la fase A de las tres secciones de la línea, se puede observar que en la sección 2 de la línea se presenta un flameo inverso debido a la descarga atmosférica ya que el valor del voltaje supera los 1050 kV.

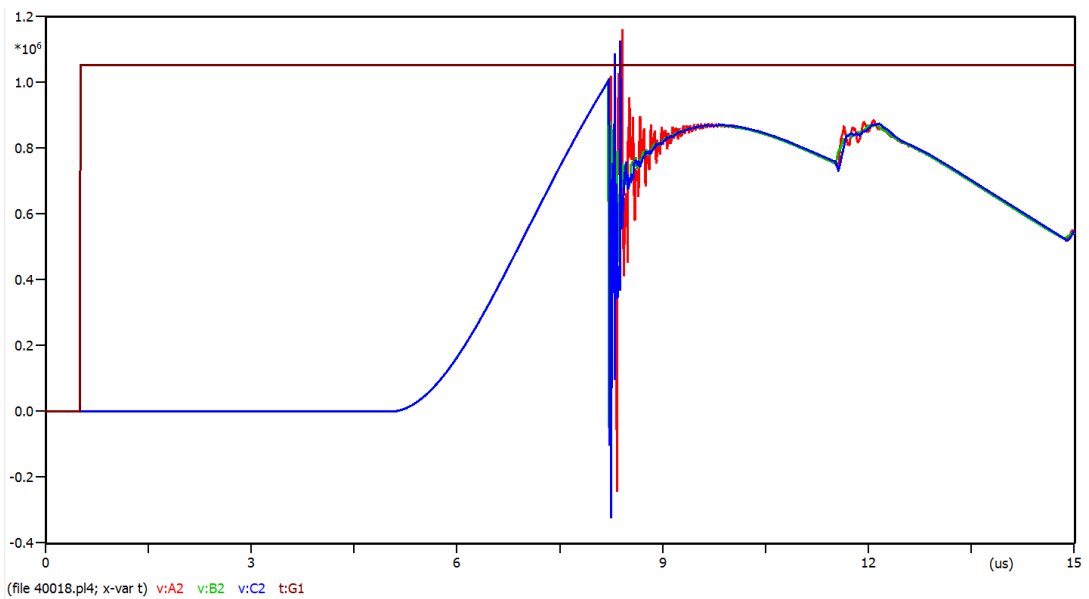


Figura 46. Voltaje en los aisladores de las fases A, B y C de la sección 2 de la línea.

En la figura 46 se puede observar que las fases A y C de la sección 2 presentan falla por flameo inverso.

Siguiendo con el ejemplo anterior el rayo impacta en el mismo punto, pero ahora aumentaremos el número de unidades de aisladores para que el nivel de protección de la línea sea mayor, entonces tenemos los siguientes valores:

Corriente del rayo: 30 kA.

RPT1: 20 Ω

RPT2: 100 Ω

RPT3: 20 Ω

Núm. de unidades de aisladores: 22

Voltaje de flameo de la cadena de aisladores: 1286000 V (Ecuación 40)

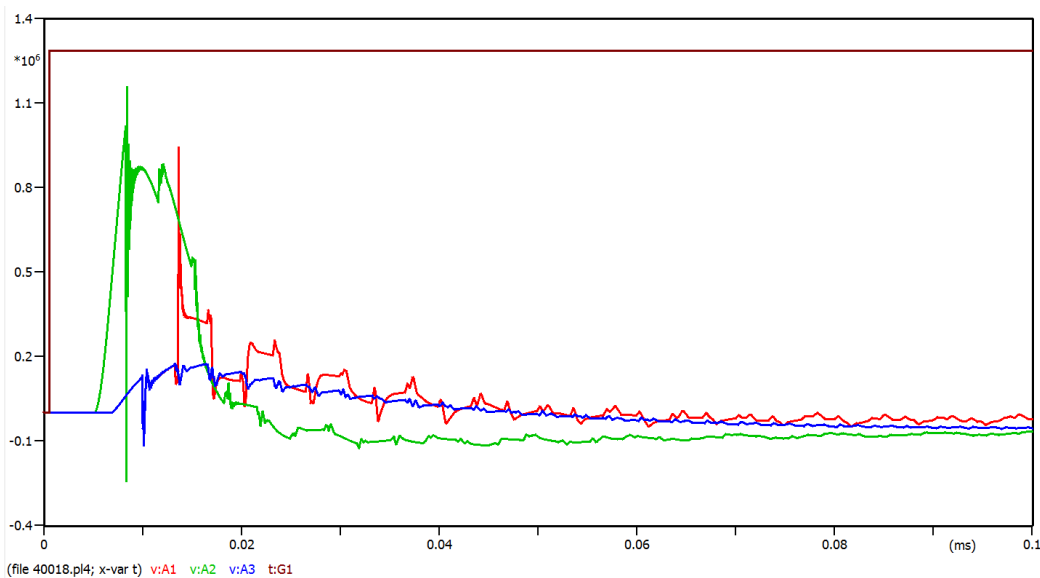


Figura 47. Voltajes en los aisladores de la fase A de las secciones 1, 2 y 3 de la línea con 22 unidades.

En la figura 47 se puede observar que no se presenta falla por flameo inverso en ninguna de las tres secciones de la línea ya que el voltaje de flameo de la cadena de aisladores es mayor entonces nuestra línea está protegida para una descarga atmosférica de 30 kA.



CONCLUSIONES.

En esta tesis se propone un método para el diagnóstico de la coordinación de aislamiento y así poder determinar la longitud de la cadena de aisladores por su número de unidades, evitando en lo mayormente posible salidas de la línea por fallas de flameo inverso.

Se realizó el modelo geométrico para una torre de 400 kV utilizando el método de las secciones cónicas para determinar las impedancias de la torre y se simuló mediante el programa de transitorios ATPDraw una línea de transmisión utilizando el modelo JMarti para las secciones de línea modeladas y así poder determinar las sobretensiones transitorias que se presentan en las torres cuando incide un rayo sobre ellas.

El flameo inverso se presenta cuando la resistencia al pie de torre es considerablemente alta y existen descargas atmosféricas que inciden en el hilo de guarda o directamente en la torre, para evitar que estas descargas provoquen la salida de la línea, se debe determinar el número de unidades de aisladores para que el voltaje que se presente en la cadena de aisladores no sea mayor al voltaje de flameo que esta tenga y tener una correcta coordinación de aislamiento.

Para este caso se analizó una cadena de aisladores con 18 unidades y una resistencia a pie de torre de 100 Ω , de acuerdo a los resultados arrojados por la simulación, se diagnosticó que eran insuficientes para evitar la falla con una descarga atmosférica de 30 kA, así que se decidió aumentar el número de unidades a 22 para elevar el nivel de protección en la línea y evitar la falla por flameo inverso.

Hay que tomar en cuenta que se debe analizar cada caso individualmente, porque todas las líneas presentan sus características propias y la solución para una línea puede no servir para otras.



REFERENCIAS.

- [1] P. Pinceti, M. Giannetoni, "A simplified model for zinc oxide surge arresters" IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 14, No. 2, pp. 393-398, April 1999.
- [2] S. Lam-Du, T. Tran-Quoc, "Insulation coordination study of a 220 kv cable-line", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 3, pp. 2082-2086, January 2000.
- [3] A. Goudarzi, H. Mohseni, "Accuracy evaluation of IEEE model for distribution class metal, oxide surge arrester", in Proc. 39th International Universities Power Engineering Conference (UPEC'04), Bristol, United Kingdom, Vol. 1, pp. 179-182, September 2004.
- [4] A. Ametani, T. Kawamura, "A method of a lightning surge analysis recommended in japan using EMTP", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 20, No. 2, pp. 867-875, April 2005.
- [5] W. Pan, X. Liu, D. Nie, "Development and application of insulation coordination program for UHVDC converter stations" in Proc. Third International Conference Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies (DRPT'08), Nanjing, China, pp. 2262-2266, April 2008.
- [6] T. Pham, N. Pham, T. V. Tran, "EMTP simulation of induced overvoltage in low voltage system" in Proc. Conference Record of the 2010 IEEE International Symposium on Electrical Insulation (ISEI'10), San Diego, CA, USA, pp. 1-4, June 2010.
- [7] P. N. Mikropoulos, T. E. Tsovilis , "Lightning attachment models and maximum shielding failure current of overhead transmission lines: implications in insulation coordination of substations", Generation, Transmission & Distribution IET, Vol. 4, No. 12, pp. 1299-1313, December 2010.
- [8] S. Bedoui, A. Bayadi, A. M. Haddad, "Analysis of lightning protection with transmission line arrester using ATP/EMTP: Case of an HV 220kV double circuit line", in Proc. 45th International Universities Power Engineering Conference (UPEC'10), Cardiff, Wales, pp. 1-6, September 2010.
- [9] J. Sardi, J. O. C. Chian, "Evaluation of surge arrester requirement for overhead transmission line using Electromagnetic Transient Program", in Proc. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon'10), Kuala Lumpur, Malaysia, pp. 958-988, December 2010.



[10] E. Babaei, S. Golabi, J. Jafarzadeh, Z. Golabi, “Comprehensive analysis of insertion elements in circuit breaker to reduce switching overvoltages”, in Proc. 24th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE’11), Niagaras Falls, ON, Canada, pp. 239-242, May 2011.

[11] H. Tailor, S. Joshi, “Designing insulation coordination for Ultra High Voltage AC system by analyzing over voltages using frequency dependent line modeling” in Proc. Nirma University International Conference on Engineering (NUiCONE’13), Ahmedabad, India, pp. 1-6, November 2013.

[12] Z. G. Datsios, P.N. Mikropoulos, “Implementation of leader development models in ATP-EMTP Using a type-94 circuit component” in Proc. International Conference on Lightning Protection (ICLP’14), Shangai, China, pp. 979-985, October 2014.

[13] N. Triruttanapiruk, P. Yutthagowith, “A simple surge arrester model extracted from experimental results” in Proc International Conference on Lightning Protection (ICLP’14), Shangai, China, pp. 1616-1620, October 2014.

[14] *American National Standard Dictionary of Electromagnetic Compatibility (EMC) Including Electromagnetical Environmental Effects (E3)*, ANSI C63.14, 2014.

[15] *Sistemas Eléctricos de Potencia – Suministro – Tensiones Eléctricas Normalizadas*, NMX-J-098-ANCE-1999.

[16] *IEEE Standard Preferred Voltage Ratings for Alternating-Current Electrical Systems and Equipment Operating at Voltages Above 230 kV Nominal*, IEEE Standard 1312, 1993.

[17] R. Lings et al., “Overview of Transmission Lines Above 700 kV,” in *Inaugural IEEE PES 2005 Conference and Exposition in Africa*, Durban, South Africa, 2005, pp. 33–43.

[18] State Grid Corporation of China (2010, Diciembre 11). *1000kV Jindongnan-Nanyang-Jingmen UHV AC Pilot Project*. [En línea]. Disponible: <http://www.sgcc.com.cn/ywlm/projects/brief/12/237188.shtml>

[19] State Grid Corporation of China (2010, Octubre 25). *Xiangjiaba-Shanghai +/-800 kV UHV DC Transmission Pilot Project*. [En línea]. Disponible:



<http://www.sgcc.com.cn/ywlm/projects/brief/10/237089.shtml>

[20] W. F. Long and W. Litzenberger, "Fundamental Concepts in High-Voltage Direct-Current Power Transmission," in *Proc. 2012 IEEE Transmission and Distribution Conference and Exposition*, pp. 1-2.

[21] Public Service Commission of Wisconsin (2011, Mayo). *Underground Electric Transmission Lines*. [En línea]. Disponible: <https://psc.wi.gov/thelibrary/publications/electric/electric11.pdf>

[22] HydroQuébec. *Power Transmisión. Towers*. [En línea]. Disponible: <http://www.hydroquebec.com/learning/transport/types-pylones.html>

[23] *IEEE Guide to Instalation of Foundations for Transmission Line Structures*, IEEE Standard 977, 1991.

[24] Andrew R. Hileman "Shielding of Transmission Lines" in *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 1999, ch. 7, pp. 241-274.

[25] Andrew R. Hileman "Contamination" in *Insulation Coordination for Power Systems*, CRC Ed. Boca Raton, FL: Taylor & Francis, 1999, ch. 2, pp. 701-732.

[26] A. C. Baker et al., "Insulator Selection for AC Overhead Lines With Respect to Contamination," in *IEEE Tansactions on Power Delivery*, Vol. 24, No. 3, July 2009, pp. 1633-1641.

[27] *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above*, 3ed Ed., Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 2005, ch. 4, pp.5.

[28] A. Holdyk and B. Gustavsen, "Inclusion of Field Solver-Based Tower Footing Grounding Models in Electromagnetic Transient Program" in *IEEE Transacción on Industry Applications*, Vol. PP, Issue: 99, March 2015, pp.

[29] *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above*, 3ed Ed., Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 2005, ch. 6, pp. 65-67.

[30] L. V. Bewley, "Theory and Test of the Counterpoise" August 1934, pp. 1163-1172.

[31] H. Jinliang, "Effective length of Counterpoise Wire Under Lightning Current" in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 20, No. 2, April 2005, pp. 1585-1591.

[32] *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above*, 3ed Ed.,



Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 2005, ch. 2, pp. 1-2.

[33] *Overhead Conductors*, General Cable, 2013, pp. 71-176.

[34] *Concentric-Lay-Stranded Self-Damping Aluminum Conductors, Steel Reinforced ACSR/SD*, ASTM B 701/B 701M, 2000.

[35] *Aluminum-Alloy 6201-T81 Wire for Electrical Purposes*, ASTM B 398/B 398M, 2002.

[36] *IEEE Standard for Insulation Coordination – Definitions, Principles and Rules*, IEEE Standard 1313.1, 1996.

[37] Vladimir A. Rakov and Martin A. Uman, “Introduction” in *Lightning Physics and Effects*, United Kingdom: Cambridge University Press, 2003, ch. 1, pp. 1-12.

[38] H. D. Betz et al., “Present Understanding of the Lightning Return Stroke” in *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Moderns Lightning Research*: Springer Science & Business Media, 2009, ch. 1, pp. 1 – 22.

[39] Vernon Cooray, “Lightning and Humans: The Early Days” in *An Introduction to Lightning*: Springer Science & Business Media, 2015, ch. 1, pp. 1-5.

[40] *IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination*, IEEE Standard 1313.2, 1999.

[41] J. A. Martinez et al., “Switching Overvoltages Measurements and Simulations – Part I: Field Test Overvoltage Measurements,” in *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 29, No. 6, December 2014, pp. 2502 – 2509.

[42] *IEC Insulation Coordination Part 2: Application Guide*, IEC Standard 60071-2, 1996.

[43] Gilberto E. Harper, “Introducción a los Problemas de Calidad en el Suministro Eléctrico” en *El ABC de la Calidad de la Energía Eléctrico*, Ed. Limusa, 1999, ch. 1, pp. 24-25.

[44] Juan A. Martínez. “Introducción” en *Coordinación de Aislamiento en Redes Eléctricas de Alta Tensión*, Ed. McGraw Hill, 2007, ch. 1, pp. 7.

[45] *IEEE Guide for Improving the Lightning Performance of Transmission Lines*, IEEE Standard 1243, 1997.

[46] P. N. Mikropoulos et al., “Lightning Attachment Models and Perfect Shielding Angle



of Transmission Lines” in *Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, 2009.

[47] V. R. Marín V. “*Protección Contra Descargas Atmosféricas en Líneas de Transmisión*”, UV, Xalapa, Ver. 2010.

[48] *IEEE Guide for the Application of Metal-Oxide Surge Arresters for Alternating-Current Systems*, IEEE Standard C62.22, 2009.

[49] I. A. Lugo N. “*Simulación de la Operación de Apartarrayos en Líneas de Transmisión Utilizando el Programa ATP / EMTP*”, UNAM, México D.F., 2008.

[50] *Apartarrayos Para Líneas Aéreas de Transmisión de Corriente Alterna de 161 kV A 400 kV*, NRF-045-CFE, 2007.

[51] *IEEE Standard for Insulation Coordination—Definitions, Principles, and Rules*, IEEE Standard 1313.1, 1996.

[52] *IEEE Guide for the Application of Insulation Coordination*, IEEE Standard 1313.2, 1999.

[53] *EPRI AC Transmission Line Reference Book – 200 kV and Above*, 3ed Ed., Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA., 2005, ch. 5, pp. 16-19.

[54] Gabriel López Ruiz, “*Metodología para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para mejorar su confiabilidad*”, M.C. tesis, Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, México D.F., 2003

[55] Dr. M. Kizilcay (2015, Enero). *Alternative Transients Program Features* [En Línea]. Disponible: <http://www.emtp.org>

[56] Luigi Vanfretti, “*Modelos matemáticos y herramientas de software para la simulación de líneas de transmisión en estado dinámico*”, presentado en el XXIII Congreso de Estudiantes de Centroamérica y Panamá (CONESCAPAN XXIII) de la IEEE Sección 9, Guatemala, Guatemala, 2004.

[57] Luis H-Restrepo Gladys Caicedo Delgado Ferley Castro-Aranda “*Modelos de línea de transmisión para transitorios electromagnéticos en sistemas de potencia*” Escuela de Ingeniería Eléctrica y electrónica Universidad del valle, Cali, Colombia, *Revista Energía y Computación Vol. 16 No. 1 Junio de 2008 p. 21 - 32.*

[58] Anderson Arboleda Correa, “*Localización de fallas de alta impedancia en líneas de transmisión para un estudio de caso mediante redes neuronales*”, I.E. tesis, Universidad Nacional de Colombia, Medellín Colombia, 2010.



- [59] A. Villa R., G. Carrasco H. “*Lightning rod simulation of Edelca 115 and 400 kv tension lines*”, C.V.G. Electrificación del Caroní, C.A. (EDELCA), División de Ingeniería de Sistemas Eléctricos, *Revista Ciencia e Ingeniería*. Vol. 22 No. 1. 2001.
- [60] Zailuz José Gómez González, “*Estudio de los sistemas de protección contra descargas atmosféricas y puesta a tierra de la línea san Gerónimo “A” - Santa Teresa N°2 a 400 KV*”, I.E. tesis, Universidad de Oriente Núcleo de Anzoátegui, Escuela de Ingeniería y Ciencias Aplicadas Departamento de Electricidad, Barcelona España, 2009.
- [61] *IEEE Guide for Identifying and Improving Voltage Quality in Power Systems*, IEEE Standard 1250, 2011.
- [62] *IEEE Recommended Practice for Validation of Computational Electromagnetics Computer Modeling and Simulations*, IEEE Standard 1597.2, 2010.
- [63] *IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault*, IEEE Standard 367, 2012.
- [64] *IEEE Application Guide for Surge Protection of Electric Generating Plants*, IEEE Standard C62.22, 1995.
- [65] *IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE Standard 142, 2007.
- [66] *IEEE Standard for Ferroresonant Voltage Regulators*, IEEE Standard 449, 1998.
- [67] *IEEE Standard for Metal-Oxide Surge Arresters for AC Power Circuits (>1 kV)*, IEEE Standard C62.11, 2012.
- [68] G. Chavan et al., “*Application of Static Synchronous Series Compensators in mitigating Ferranti Effect*,” in IEEE Power and Energy Society General Meeting (PESGM), 2016.

APÉNDICE

En este apéndice se describen cada uno de los elementos utilizados en el ATPDraw para representar a la línea de transmisión, indicando cuales son los datos necesarios para considerar cada parte del sistema representado.

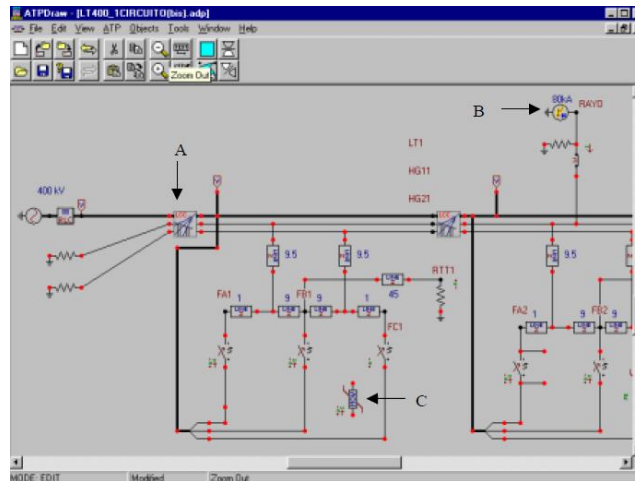


Figura A.1. Ventana principal del ATP con una sección de la línea de transmisión representada.

En la figura A.1 se ilustra un cuadro (indicado por la letra A), el cual representa una extensión de la línea de transmisión, en esta parte se especifican los datos del sistema, es decir si se trata de una línea aérea o cable, frecuencia del sistema, distancia de la línea, disposición de conductores incluyendo los hilos de guarda y datos geométricos de los conductores, además el modelo utilizado para representar a la línea de transmisión, encontrándose los siguientes modelos:

Bergeron: Modelos KCLee o Clark de parámetros constantes.

PI: Modelo equivalente PI Nominal (líneas cortas).

JMarti: Modelo dependiente de la frecuencia con matriz de transformación constante.

Noda: Modelo dependiente de la frecuencia.

Semlyen: Modelo dependiente de la frecuencia.

Los modelos Jmati, Noda y Semlyen son aptos en un rango de frecuencias específico con el número de décadas de la frecuencia inicial y el número de puntos de muestreo por década.

Los modelos Jmarti y Semlyen también requieren una frecuencia donde se calcule la matriz de transformación y una frecuencia para el cálculo de la condición en estado estable del sistema. De estos modelos el recomendado para estudios de fenómenos transitorios como descargas atmosféricas es el Jmarti.

En la Figura A.2. se muestra la representación de la torre de transmisión, donde cada rectángulo marcado con “LINE Z”, representa la impedancia de la torre en secciones divididas marcadas por un número, el cual indica la distancia por tramos de la torre; y los interruptores representan a cada una de las cadenas de aisladores por fase.

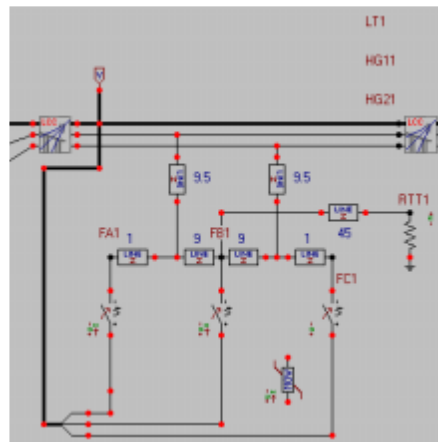
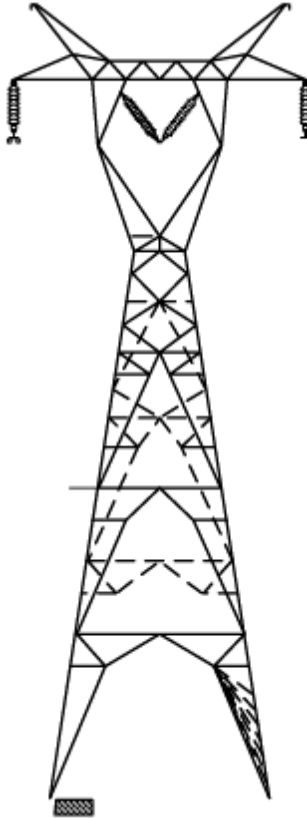


Figura A.2. Representación en el ATP de la torre conectada a los hilos de guarda y fases.

En esta figura la línea más pronunciada (LT1), representa a los tres conductores que forman el circuito de la línea de transmisión, las dos líneas tenues (HG11 y HG21), representan a los hilos de guarda y la resistencia conectada en el nodo RTT1 representa la resistencia al pie de la torre.



La letra B mostrada en la figura A.1. representa la descarga atmosférica como una fuente de corriente incidiendo directamente en el sistema.

Los datos que se utilizan para representar el rayo son la magnitud de la corriente del rayo en amperios y la forma de onda del impulso (8/20 μ seg. estándar).

En la figura A.1. La letra C indica la representación del apartarrayos. Para modelar el comportamiento del apartarrayos se realizó mediante la obtención de su curva característica $V - I$ el cual se obtiene de la siguiente manera:

Con la ecuación {1} mostrada en 4.5 primero obtenemos el voltaje de referencia

$$V_{ref} = 1.39\sqrt{2}V_n$$

Donde V_n indica el voltaje nominal del apartarrayos que se obtiene mediante tablas proporcionada por fabricantes, considerando el voltaje máximo de operación continua eficaz o RMS (MTOC), el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$MTOC = \frac{V_{max.del sistema}}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242.49 \text{ KV}$$

De las tablas de apartarrayos se busca en la columna de MTOCRMS el valor calculado y se obtiene el voltaje nominal del apartarrayos (V_n). De esta manera se obtiene el voltaje de referencia. Para este caso el Voltaje nominal del apartarrayos es de 300 kV.

$$V_{ref} = 1.39\sqrt{2} \text{ 300KV} = 589.72$$

Después de haber determinado el voltaje de descarga del apartarrayos, se obtiene la curva característica V-I del apartarrayos.

Con la Ecuación 3 mostrada en 4.5 se proponen valores de corriente de rayo promedio obteniéndose lo siguiente:

$$V = V_{ref} \left[\frac{V}{2500} \right]^{\frac{1}{26}}$$

I (amperes)	V (voltios)
100	521000
300	543500
500	554300
10000	622000
20000	638800

Tabla A.1. Datos de la curva característica V-I del Apartarrayos.