

**Universidad Central “Marta Abreu” de  
Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica**

**Departamento de Electroenergética**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Modelación en ATPDraw del  
comportamiento ante rayos de líneas de  
subtransmisión usando las técnicas de  
Monte Carlo.**

**Autor: Edgar Johann Viciado Lamas**

**Tutor: Dr. Angel C. Valcárcel Rojas**

**Santa Clara**

**2016**

**Universidad Central “Marta Abreu” de  
Las Villas**

**Facultad de Ingeniería Eléctrica  
Departamento de Electroenergética**



**TRABAJO DE DIPLOMA**

**Modelación en ATPDraw del  
comportamiento ante rayos de líneas de  
subtransmisión usando las técnicas de  
Monte Carlo.**

**Autor: Edgar Johann Viciedo Lamas**

[evlamas@uclv.cu](mailto:evlamas@uclv.cu)

**Tutor: Dr. Angel C. Valcárcel Rojas**

[valca@uclv.edu.cu](mailto:valca@uclv.edu.cu)

**Santa Clara**

**2016**



Hago constar que el presente trabajo de diploma fue realizado en la Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas como parte de la culminación de estudios de la especialidad de Ingeniería Eléctrica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Institución, para los fines que estime conveniente, tanto de forma parcial como total y que además no podrá ser presentado en eventos, ni publicados sin autorización de la Universidad.

---

Firma del Autor

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido realizado según acuerdo de la dirección de nuestro centro y el mismo cumple con los requisitos que debe tener un trabajo de esta envergadura referido a la temática señalada.

---

Firma del Autor

---

Firma del Jefe de  
Departamento donde se  
defiende el trabajo

---

Firma del Responsable de  
Información Científico-Técnica

**PENSAMIENTO**

El modo de dar una vez en el clavo es dar cien veces en la herradura.

**DEDICATORIA**

A mi padre, que siempre me regaña más de lo que me celebra.

**AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco a todas las personas que durante seis años de mi vida me dieron su apoyo para salir adelante y vencer las dificultades.

## TAREAS TÉCNICAS

1. Evaluación de la bibliográfica existente sobre la modelación en ATPDraw del comportamiento ante rayos de líneas de subtransmisión y las técnicas de Monte Carlo.
3. Familiarización con el trabajo con el ATPDraw.
4. Implementación en ATPDraw las técnicas de Monte Carlo para la determinación de la razón de salida de líneas de subtransmisión ante descargas atmosféricas.
5. Modelación en ATPDraw líneas de subtransmisión.
6. Comparación de los resultados obtenidos con las estadísticas reales de las líneas de subtransmisión modeladas.

---

Firma del Autor

---

Firma del Tutor

**RESUMEN**

El estudio del comportamiento de las líneas de subtransmisión frente al rayo ha sido objeto de gran atención durante los últimos años, todavía existen muchos puntos sobre los que no hay un conocimiento suficientemente preciso; entre los más importantes se encuentran los principales parámetros que describen su comportamiento lo que plantea la necesidad de identificar fallas en la subtransmisión, nos planteamos como objetivo general modelar en ATPDraw, el comportamiento de líneas de subtransmisión frente descargas atmosféricas empleando el método de Monte Carlo comparando los resultados obtenidos con el modelo desarrollado con las estadísticas de falla y con los resultados de un estudio anterior de las líneas de subtransmisión modeladas. Se implementó el Método de Monte Carlo en la modelación en ATPDraw para determinar el índice de salida ante descargas atmosféricas en líneas de subtransmisión de las que se conocían las estadísticas de fallas acumuladas durante 10 años, obteniendo un error relativo inferior al de otros autores. Se sugiere el Método de Monte Carlo como herramienta estadística útil para predecir el comportamiento de las líneas de subtransmisión, futuras o ya existentes, ante descargas atmosféricas y para futuros trabajos tener en cuenta la contaminación en la zona de estudio lo que posibilitaría una mayor exactitud de los resultados.

Tabla de contenido	
PENSAMIENTO .....	i
DEDICATORIA .....	ii
AGRADECIMIENTOS.....	iii
TAREAS TÉCNICAS .....	iv
INTRODUCCIÓN .....	1
CAPITULO1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	4
CAPITULO2: MODELACIÓN EN ATPDRAW.....	13
2.1 Modelación de los elementos de las líneas .....	13
2.1.1 Introducción.....	13
2.1.2 Modelación de la línea .....	13
2.1.3 Modelación de la estructura .....	17
2.1.4 Modelación de los aisladores.....	18
2.1.5 Modelación de la resistencia de puesta a tierra.....	19
2.1.6 Modelación de las fuentes de tensión a frecuencia de potencia y de corriente de impulso tipo rayo.....	19
2.1.7 Modelos generales.....	21
2.1.8 Modelo insulexa. ....	23
2.2 Determinación del punto de impacto de la descarga .....	26
2.2.1 Modelo electrogeométrico .....	26
2.3 Criterios de coordinación para la protección de líneas de tensiones intermedias.....	29
2.3.1 Necesidad de la protección.....	30
2.3.2 Cálculo del índice de salidas por impactos directos en líneas no protegidas.....	32
2.3.3 Cálculo del índice de salidas por impactos indirectos en líneas no protegidas.....	33

2.3.4 Protección por cable protector.....	41
2.3.5 Índice de falla por impactos directos al conductor de fase. ....	42
2.3.6 Índice de salidas por impactos directos al cable de protector y/o a la estructura.....	43
2.3.7 Modelo de respuesta de la línea .....	43
2.3.8 Modelo de la línea.....	43
2.3.9 Procedimiento para obtener el índice de falla por impactos directos de rayos en el cable protector.....	45
2.3.10 Índice de falla por impactos indirectos. ....	46
2.3.11 Líneas de subtransmisión bajo estudio de la provincia Sancti Spiritus. ....	47
2.3.12 Datos constructivos de las líneas de subtransmisión. ....	48
2.4. Análisis de los resultados obtenidos .....	51
2.4.1 Evaluación de las líneas sin cable protector. ....	51
2.4.2 Evaluación de las líneas con cable protector. ....	52
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. ....	54
CONCLUSIONES.....	54
RECOMENDACIONES.....	54
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	55

## INTRODUCCIÓN

El propósito fundamental de un sistema eléctrico de potencia es abastecer de energía eléctrica a sus clientes que esperan un suministro ininterrumpido independientemente de las fluctuaciones de la demanda, este propósito no es siempre alcanzable por las fallas de origen aleatorio a las que está expuesto.

Existen muchas causas por las que se pueden originar sobretensiones en una red de potencia; por esta razón su estudio se suele realizar atendiendo al origen, al tipo de proceso transitorio y al tiempo de duración. La clasificación más aceptada distingue tres tipos de sobretensiones:

- Sobretensiones temporales

Dentro de este grupo están aquellas sobretensiones de larga duración (varios milisegundos), poco amortiguadas y de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación. Ejemplos de sobretensiones temporales son las debidas a un cortocircuito entre una fase y tierra, o a un problema de ferorresonancia.

- Sobretensiones de maniobra

Una sobretensión de este tipo es fuertemente amortiguada, de corta duración y puede presentar un rango de frecuencias que varía entre los 2 y los 10 kHz. Su origen puede estar en una maniobra de conexión o de desconexión, sin embargo puede haber otras causas que den lugar a una sobretensión de este tipo; por ejemplo, un cortocircuito puede provocar transitoriamente una sobretensión que se clasificaría dentro de este grupo.

- Sobretensiones de origen atmosférico

Son debidas a una descarga atmosférica, tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces la tensión de pico nominal.

La importancia de las sobretensiones atmosféricas crece conforme disminuye la tensión nominal de los componentes afectados por el rayo.

Las descargas atmosféricas han sido uno de los principales problemas para el diseño del aislamiento de sistemas de potencia y es todavía la causa principal de salidas de servicio no programadas en líneas de subtransmisión.

Cuando las descargas atmosféricas impactan sobre líneas de subtransmisión producen sobrevoltajes, los cuáles se calculan con mucha incertidumbre dada la naturaleza aleatoria del rayo y el conocimiento poco preciso de sus parámetros. Se entiende por sobretensión una sollicitación variable en el tiempo cuyo máximo valor es superior al valor de pico de la tensión nominal del sistema en estudio.

El valor de las sobretensiones que se pueden producir en una red de transmisión, originadas por un rayo es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de la red que tanto el nivel de aislamiento de los componentes como la selección y coordinación de protecciones se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas. En general, el nivel de las sobretensiones de origen interno es inferior o muy inferior al nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, siendo el número de averías originadas por una sobretensión de este tipo mucho más reducido que el originado por sobretensiones atmosféricas directas o inducidas por el rayo. Un rayo puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea afectada o que se propague por la línea y pueda provocar una avería en algún otro equipo. En este trabajo nos ocuparemos de la modelación de líneas de subtransmisión frente a sobretensiones de origen atmosférico.

El cálculo de sobretensiones de origen atmosférico, y por tanto la evaluación del comportamiento de líneas aéreas frente al rayo, puede realizarse con cierta precisión mediante simulación digital y el empleo de modelos matemáticos rigurosos para todos los componentes, teniendo como objetivo final determinar la tasa de contorneos en por kilómetro de línea al año. La simulación de este fenómeno puede ser fundamental no sólo en el análisis de líneas en explotación, sino también en el diseño de nuevas líneas.

En este trabajo se emplea el programa ATP (*Alternative Transients Program*), que es un programa profesional para computador digital, utilizado internacionalmente para la simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y funciones de control en sistemas de potencia polifásicos, incluyendo los transitorios asociados al efecto de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión empleando el método de Monte Carlo, una técnica cuantitativa que hace uso de la estadística y los ordenadores para imitar, mediante modelos matemáticos, el comportamiento aleatorio de sistemas reales no dinámicos.

La subtransmisión de energía eléctrica debe llevarse a cabo de forma segura y al menor costo posible, lo que plantea la necesidad de identificar fallas en la subtransmisión, nos planteamos como objetivo general modelar en ATPDraw, el comportamiento de líneas de subtransmisión de la provincia de Sancti Spiritus frente descargas atmosféricas empleando las técnicas de Monte Carlo.

Para el logro del objetivo general se trazaron los siguientes objetivos específicos:

1. Implementar en ATPDraw las técnicas de Monte Carlo para la determinación de la razón de salida de líneas de subtransmisión ante descargas atmosféricas.
2. Modelar en ATPDraw 8 líneas de subtransmisión de la provincia Sancti Spiritus, de las cuales se dispone de las estadísticas de falla acumuladas durante 9 años.
3. Comparar los resultados obtenidos con el modelo desarrollado con las estadísticas de falla reales de dichas líneas.

Para alcanzar estos objetivos se realizó una revisión técnica y bibliográfica a través de la búsqueda automatizada de información, la que permitió ampliar y actualizar los conocimientos sobre la modelación en ATPDraw del comportamiento ante rayos de líneas de subtransmisión y sobre las técnicas de Monte Carlo así como familiarizarse con el trabajo con el ATPDraw.

## **CAPITULO1: REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.**

Un sistema eléctrico de potencia está sometido a una serie de perturbaciones que alteran su estado normal de operación. El paso de un estado a otro ocasionado por una perturbación se hace en forma gradual, ya que las variables físicas como voltajes y corrientes no pueden tener cambios bruscos debido a que las leyes de la Física no lo permiten.

El estudio del estado transitorio debe hacerse en forma cuidadosa ya que las variables físicas pueden llegar a tomar valores extremos y exigir a los equipos, hasta ocasionar el deterioro de los mismos o la interrupción del suministro de energía. El conocimiento de los estados transitorios permitirá tomar decisiones para proteger adecuadamente los equipos, lo mismo que el aseguramiento de la calidad de la potencia eléctrica, con unos estándares de calidad adecuados.

Los transitorios en un sistema de potencia en forma general son de tipo eléctrico, mecánico y térmico. Los transitorios mecánicos y térmicos, a pesar de ser muy importantes, son mucho más lentos que los de tipo eléctrico. Su frecuencia está por debajo de la sincrónica (60 Hz).

Las líneas aéreas de subtransmisión de energía eléctrica se encuentran instaladas a la intemperie, por lo que están expuestas a las descargas atmosféricas. Cuando un rayo impacta una línea de subtransmisión genera un impulso de corriente, el cual a su vez ocasiona una sobretensión transitoria. Esta sobretensión dependerá de la magnitud del impulso de corriente del rayo, cuyo valor máximo esta usualmente en el intervalo de 10kA a 100kA [1], pero también de la impedancia característica de la línea y de las características de la torre de subtransmisión. Posterior al impacto de la descarga sobre la línea. Se originan ondas viajeras hacia ambos extremos del punto de impacto, las cuales serán distorsionadas y atenuadas conforme viajan como consecuencia de las pérdidas propias de la línea y la conexión de dispositivos de protección[2].Las descargas atmosféricas han sido uno de los principales problemas para el diseño del aislamiento de sistemas de potencia y es todavía la causa principal de salidas de servicio no programadas en líneas de subtransmisión [3]

En materia de fenómenos naturales y físicos; las descargas eléctricas atmosféricas más comúnmente conocidas como rayos, son uno de los fenómenos naturales con más impacto sobre la tierra, que constituyen la mayor de las perturbaciones Electromagnéticas afectando el desempeño de los sistemas e instalaciones eléctricas en todo el mundo, siendo la principal causa de salidas de líneas de subtransmisión así como de daños en redes de distribución y equipos electrónicos sensibles[4].

Un rayo produce sobre el aislamiento de una línea de subtransmisión un sobrevoltaje que depende principalmente de la magnitud de la descarga y de la resistencia de puesta a tierra. El parámetro que clásicamente ha medido dicho comportamiento es el número de salidas de la línea por cada 100 km de longitud y por cada año, parámetro que constituye un criterio de diseño del aislamiento, o una medida del desempeño para una línea que ya esté construida. El rayo es un fenómeno que origina una sobretensión de origen externo o simplemente de origen atmosférico.

Las sobretensiones de origen atmosférico son independientes de los voltajes de operación de los sistemas de potencia a diferencia de las que se presentan por maniobra, que si dependen del nivel de tensión nominal de los sistemas. La importancia relativa de las sobretensiones atmosféricas crece a medida que disminuye el nivel de tensión de los sistemas. Los sistemas de subtransmisión normalmente son diseñados con un apantallamiento con una probabilidad de falla muy pequeña. Las descargas atmosféricas que caerían en forma directa serían de muy poca probabilidad. El flameo inverso ocasionado por una descarga que cae sobre la torre o sobre el cable de guarda es la causa más común de salida de la línea. Se denomina flameo inverso porque este se presenta del neutro hacia la fase, debido al aumento del voltaje en el mismo.

Aunque los efectos de las descargas atmosféricas pueden ser muy severos, la probabilidad de ocurrencia es relativamente baja (un kilómetro cuadrado de la superficie de la tierra es impactado por una descarga atmosférica al menos una vez al año) [5]

En cualquier instante dado, casi 1,800 tormentas eléctricas están en progreso sobre la superficie de la Tierra. La intensidad media de la descarga de un rayo se estima en 31,000 amperios, pero se han detectado rayos de hasta 250,000 amperios. Las características climáticas y montañosas de cada país determinan el número y la intensidad de las tormentas que se producen, riesgo que varía dentro de un mismo país.

No existe método alguno para evitar la formación de descargas atmosféricas. Tampoco sería deseable, en vista que los rayos son responsables en gran parte de la formación de vida en el universo. El propósito entonces es tratar de protegerse contra las descargas atmosféricas, controlando el paso de la corriente de las descargas eléctricas y así prevenir daños a la propiedad [6].

En condiciones normales, existe en la atmósfera un equilibrio entre las cargas positivas y negativas, en el que la tierra está cargada más negativamente que el aire y los elementos situados sobre el suelo. Pero al formarse las nubes de tormenta se produce una polarización de las cargas: en la mayoría de los casos, la parte baja de las nubes queda cargada negativamente induciendo una carga positiva en la tierra y los elementos situados sobre ella, formándose en la atmósfera un campo eléctrico que llega a alcanzar decenas de kilovoltios.

Esta carga positiva se manifiesta especialmente en objetos metálicos, elementos terminados en punta y objetos con una buena conexión a tierra, incluyendo los árboles. Cuando el campo eléctrico es suficientemente intenso, la nube comienza a descargarse hacia tierra. El camino que forma esta descarga se denomina trazador descendente y produce una variación muy brusca del campo eléctrico, que afecta a las cargas positivas de los objetos situados sobre el suelo, produciéndose el denominado efecto corona. Uno de estos objetos será el que forme el trazador ascendente, que irá a encontrarse con el trazador descendente, quedando así ya formado el camino de la descarga entre la nube y tierra. Éste será el objeto que recibirá el impacto del rayo. Toda la carga de la nube buscará el camino más directo hacia tierra, camino que, si no está controlado, puede causar graves daños.

Cuando las descargas atmosféricas impactan sobre líneas de subtransmisión producen sobretensiones, las cuáles se calculan con mucha incertidumbre dada la naturaleza aleatoria del rayo y el conocimiento poco preciso de sus parámetros.

Se entiende por sobretensión una sollicitación variable en el tiempo cuyo máximo valor es superior al valor de pico de la tensión nominal del sistema en estudio. Existen muchas causas por las que se pueden originar sobretensiones en una red de potencia; por esta razón su estudio se suele realizar atendiendo al origen, al tipo de proceso transitorio y al tiempo de duración. La clasificación más aceptada distingue tres tipos de sobretensiones:

a) Sobretensiones temporales: Dentro de este grupo están aquellas sobretensiones de larga duración (varios milisegundos), poco amortiguadas y de frecuencia igual o próxima a la frecuencia de operación. Ejemplos de sobretensiones temporales son las debidas a un cortocircuito entre una fase y tierra, o a un problema de ferorresonancia.

b) Sobretensiones de maniobra: Una sobretensión de este tipo es fuertemente amortiguada, de corta duración y puede presentar un rango de frecuencias que varía entre los 2 y los 10 kHz. Su origen puede estar en una maniobra de conexión o de desconexión, sin embargo puede haber otras causas que den lugar a una sobretensión de este tipo; por ejemplo, un cortocircuito puede provocar transitoriamente una sobretensión que se clasificaría dentro de este grupo.

c) Sobretensiones de origen atmosférico: Son debidas a una descarga atmosférica, tienen una duración muy corta y una amplitud que puede ser varias veces la tensión de pico nominal. No existe una frontera muy clara entre un tipo y otro de sobretensión; por ejemplo, una sobretensión originada por un cortocircuito es de tipo temporal, pero transitoriamente puede ser calificada como sobretensión de maniobra. Por otra parte, la severidad que puede alcanzar cualquier sobretensión depende del tipo y, sobre todo, del nivel de tensión de la red; en redes de tensión nominal inferior a 400 kV las sobretensiones debidas al rayo son más peligrosas que las debidas a otra

causa, mientras que por encima de 400kV las sobretensiones de maniobra suelen ser las más peligrosas.

La importancia de las sobretensiones atmosféricas crece conforme disminuye la tensión nominal de los componentes afectados por el rayo. El valor de las sobretensiones que se pueden producir en una red de distribución, originadas por un rayo, es tan elevado frente al valor de la tensión nominal de la red que tanto el nivel de aislamiento de los componentes como la selección y coordinación de protecciones se realiza teniendo en cuenta el efecto de las sobretensiones atmosféricas. En general, el nivel de las sobretensiones de origen interno es inferior o muy inferior al nivel de aislamiento de los componentes de una red de distribución, siendo el número de averías originadas por una sobretensión de este tipo mucho más reducido que el originado por sobretensiones atmosféricas directas o inducidas por el rayo. Un rayo puede originar una sobretensión que termine provocando un fallo en la línea aérea dada la naturaleza del rayo, el análisis debe ser estadístico porque el número de combinaciones de las variables involucradas en el proceso de cálculo es mucho menor respecto a las que se necesitarían mediante un cálculo sistemático[7, 8].

El análisis del comportamiento de una línea aérea frente al rayo está basado en métodos estadísticos, que son los que se adaptan mejor a la naturaleza de este fenómeno, y tiene como objetivo final determinar la tasa de contorneos en una línea por kilómetro y por año. La simulación de este fenómeno puede ser fundamental no sólo en el análisis de fallas actuales, sino también en el diseño de líneas futuras.

El método más empleado actualmente en el análisis estadístico de sobretensiones en sistemas de potencia es el método de Monte Carlo. Un cálculo de sobretensiones mediante el método de Monte Carlo es un procedimiento numérico iterativo que utiliza en cada nuevo cálculo un conjunto de valores distintos que varían según la distribución de probabilidad asociada a cada una de las variables involucradas en el proceso transitorio. El uso del método de Monte Carlo como herramienta de investigación, proviene del

trabajo realizado en el desarrollo de la bomba atómica durante la segunda guerra mundial en el Laboratorio Nacional de Los Álamos en EE.UU.

En 1930 Enrico Fermi y Stanislaw Ulam desarrollaron las ideas básicas del método.

A principios de 1947 John Von Neumann envió una carta a Richtmyer a Los Álamos en la que expuso de modo exhaustivo tal vez el primer informe por escrito del método de Monte Carlo [9, 10].

Una de las primeras aplicaciones de este método a un problema determinista fue llevada a cabo en 1948 por Enrico Fermi, Ulam y Von Neumann cuando consideraron los valores singulares de la ecuación de Schrödinger [9, 10].

Para determinar la razón de salida de una línea aérea de potencia por el impacto de descargas atmosféricas, lo más recomendado en la literatura es el uso del Modelo Electrogeométrico (MEG), tanto para impactos directos [11-14], como para impactos indirectos.

El cálculo riguroso de sobretensiones de origen atmosférico es un aspecto importante en el análisis y diseño de líneas aéreas de subtransmisión. Las diferentes partes de una línea que están involucradas en las sobretensiones causadas por el rayo deben ser representadas teniendo en cuenta el rango de frecuencia de los transitorios causados por el impacto de una descarga atmosférica. Por otro lado, los procedimientos a emplear en el cálculo de sobretensiones deben ser desarrollados teniendo en cuenta la naturaleza aleatoria del rayo. Varias herramientas de cálculo han sido empleadas hasta la fecha para estimar el comportamiento de líneas aéreas de subtransmisión frente al rayo. Los procedimientos más utilizados emplean una técnica basada en el dominio del tiempo para la que se han de desarrollar y aplicar modelos adecuados de las distintas partes de una línea. Este artículo presenta un resumen del trabajo realizado por el autor para desarrollar e implantar en una herramienta de simulación tipo EMTP (ElectroMagnetic Transients Program) un procedimiento basado en el método de Monte Carlo que permita analizar el comportamiento frente al rayo de líneas aéreas de subtransmisión. Los resultados presentados en este documento se basan en 8 líneas reales cuyo

análisis permitirá ilustrar el alcance del procedimiento y el tipo de estudios que se puede realizar con el procedimiento desarrollado [11]. El programa ATP (*Electromagnetic Transients Program*), es un programa para computador digital, utilizado para la simulación de transitorios electromagnéticos, electromecánicos y funciones de control en sistemas de potencia polifásicos[15, 16].

El ATP fue desarrollado en su versión inicial por el Dr. Hermann Dommel a finales de la década del 60 en Alemania (inicialmente con el nombre de EMTP), quien posteriormente vendería los derechos a la Bonneville Power Administration (BPA) de los Estados Unidos. A pesar de ser la BPA la que coordinara la distribución del programa entre los diferentes grupos de usuarios, muchas universidades contribuyeron al desarrollo de los diferentes modelos de este programa[17]. A pesar de que el objetivo principal del programa es la obtención de la respuesta en el tiempo de las diferentes variables electromecánicas del sistema bajo estudio, también se puede obtener la respuesta en estado estacionario para un sistema alimentado con corriente alterna.

El programa ATP en el ambiente de trabajo normal viene acompañado de otros programas, como el ATPDRAW que permite realizar un diagrama de la red eléctrica a ser analizada, para posteriormente interactuar con ATP [18, 19]. Los modelos de líneas de la subtransmisión disponibles en el programa ATP son bastante flexibles y los hay para cada necesidad de simulación de transitorios. Una línea en forma general se puede simular mediante parámetros distribuidos o mediante parámetros semidistribuidos.

El programa permite la representación de resistencia e inductancias de tipo no lineal para equipos como pararrayos, núcleos magnéticos con características de saturación, resistencias no lineales, etc.

El programa ATP tiene una gama amplia de modelos de interruptores. Existen modelos de interruptores controlado por tiempo, controlados por voltaje, de corriente unidireccional (diodo), de corriente unidireccional controlado por

señales de compuerta, controladas por señal externa (por fuera de la red de potencia), interruptores de tipo estadístico, interruptores de tipo sistemático.

Los interruptores estadísticos y los sistemáticos se usan para simular el comportamiento aleatorio que tiene un interruptor en el tiempo de cierre ya que el tiempo de cierre presenta una dispersión alrededor de un tiempo promedio especificado por el fabricante.

Los interruptores controlados por tensión son utilizados para simular el comportamiento de un gap o de un aislador, el cual presenta disrupción cuando una tensión entre sus extremos es superada. En este tipo de interruptor se controla el tiempo a partir del cual puede entrar en conducción y el tiempo mínimo que debe permanecer cerrado.

El programa permite la representación de fuentes de excitación, de voltaje o de corriente que están definidas analíticamente dentro del programa.

Estas fuentes por si solas tienen un comportamiento ideal, es decir que si se requiere un modelo de la de fuente se debe agregar el correspondiente equivalente de *Thevenin* o *Norton* según sea una fuente de tensión o de corriente. Las fuentes por definición se conectan entre la tierra y un nodo.

Cuando el rayo impacta directamente la línea eléctrica, ya sea en la torre, en el vano entre torres o en los conductores de fase se habla de "impactos directos". Cuando el impacto se produce en la torre o en los conductores de blindaje en el vano entre torres puede ocurrir lo que se conoce como una "descarga inversa", provocando una circulación de la corriente de rayo que penetra en la estructura hacia los conductores de fase.

Si el impacto se produce en los conductores de fase, ocurre una "falla de blindaje", la descarga que se puede desarrollar se conoce como "descarga directa", produciéndose ésta desde los conductores de fase hacia la estructura.

En el presente trabajo se propone un método de determinación de la razón de salida de una línea de subtransmisión, aplicando las técnicas de Monte Carlo, mediante el cual generan 1420 impactos de rayo, lo cual representa lo que sucedería en una línea de 100 km de longitud, que corre por una zona con una

---

densidad de rayos a tierra de 4.375 rayos por km<sup>2</sup> al año, durante 10 años (la misma cantidad de años de los que se tiene estadísticas de las líneas modeladas).

## **CAPITULO2: MODELACIÓN EN ATPDRAW**

### **2.1 Modelación de los elementos de las líneas**

#### **2.1.1 Introducción**

Tomando como punto de partida algunos de los resultados obtenidos por John G. Anderson [20, 21] y los obtenidos por A. Valcárcel [22] se desarrolló una modelación en ATPDRAW [23] que permiten determinar la ocurrencia o no de descargas inversas o directas en líneas de subtransmisión.

Con la modelación en ATPDRAW, se pueden aprovechar las prestaciones de este programa y desarrollar los módulos necesarios para representar todos los componentes involucrados.

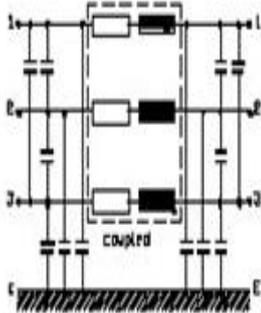
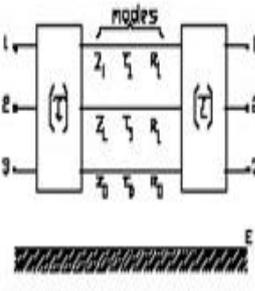
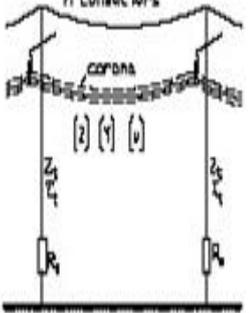
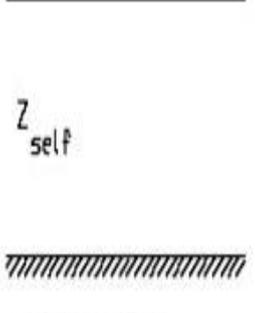
A continuación se presenta un resumen de las características y objetivos de los modelos desarrollados para llevar a cabo este tipo de cálculos.

En este caso se hace una representación de la línea, estructuras, de los aisladores, resistencia de puesta a tierra, fuentes de tensión a frecuencia de potencia y de corriente de impulso.

#### **2.1.2 Modelación de la línea**

De acuerdo con las recomendaciones del Grupo de Trabajo 33.02 de CIGRE, en el caso de sobretensiones debidas al rayo se trata de transitorios de frente rápido, por lo que la representación de una línea aérea se debe hacer, de acuerdo con la **Tabla 2.1**.

Tabla 2.1. Representación de líneas aéreas.

LÍNEAS AÉREAS		GRUPO I : 0.1 Hz ÷ 3 kHz	GRUPO II : 50/60 Hz ÷ 20 kHz	GRUPO III : 10 kHz ÷ 3 MHz	GRUPO IV : 100 kHz ÷ 50 MHz
Línea transpuesta		 <p>[R] es una matriz de 3x3 con  <math>R_{ii} = (R_0 + 2R_1)/3</math>  <math>R_{ij} = (R_0 - R_1)/3, i \neq j.</math>  <math>m = 1 \dots 5</math>                      Igual para [L] y [C].                      O igual modelo que en Grupo II.</p>	 <p>Transformación modal con [9]</p>	 <p>[Z] = matriz impedancias características                      [Y] = matriz de admitancias                      [v] = matriz de velocidades  <math>Z_t</math> = impedancia característica de la torre  <math>\tau_t</math> = tiempo de propagación de la torre  <math>R_t</math> = resistencia puesta a tierra torre</p>	 <p><math>Z_{self}</math></p> <p><math>Z_{zero} = 1/3 Z_0 + 2/3 Z_1</math></p>
Línea no transpuesta	Capacitiva	Importante	Importante	Despreciable para simulaciones monofásicas	Despreciable
	Inductiva	Importante	Despreciable para simulaciones monofásicas	Despreciable para simulaciones monofásicas	Despreciable
Parámetros dependientes de la frecuencia	Modos de tierra ( $Z_0$ )	Importante	Importante	Importante	Importante
	modos aéreos ( $Z_1$ )	Despreciable	Despreciable	Despreciable	Despreciable
Efecto corona		Importante si $U > U_c$	Despreciable	Muy importante	Despreciable

L = inductancia  
 R = resistencia  
 C = capacidad

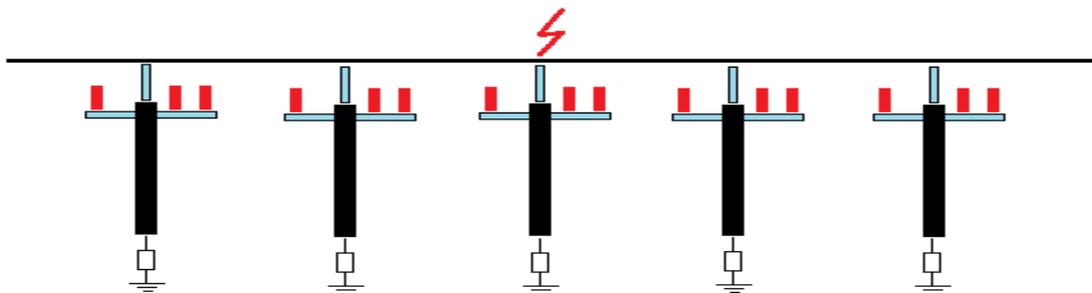
Z = impedancia característica  
 $\tau$  = tiempo de propagación  
 f = frecuencia

índice 1: sistema a secuencia positiva  
 índice 0: sistema a secuencia homopolar

La representación debe extenderse a dos o tres vanos desde el punto de impacto de la descarga atmosférica.

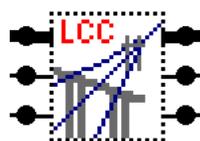
- Se debe incluir la representación de las estructuras y de sus impedancias de puesta tierra.
- Es necesario desarrollar un modelo que evite reflexiones de ondas en cualquiera de los extremos del tramo de línea representado; esto se puede conseguir adaptando la línea en los dos extremos mediante la instalación de una matriz de resistencias de valor igual a la impedancia característica, o haciendo que las dos secciones de los extremos tengan una longitud tal que, con el tiempo de simulación escogido, ninguna onda reflejada en los extremos abiertos alcance la parte de la línea que es de interés.
- El modelo será, evidentemente, el de una línea no transpuesta pues se analizará solo un tramo de la línea en estudio de entre 5 y 7 estructuras.
- Es aconsejable incluir el efecto de la tensión a frecuencia de operación.

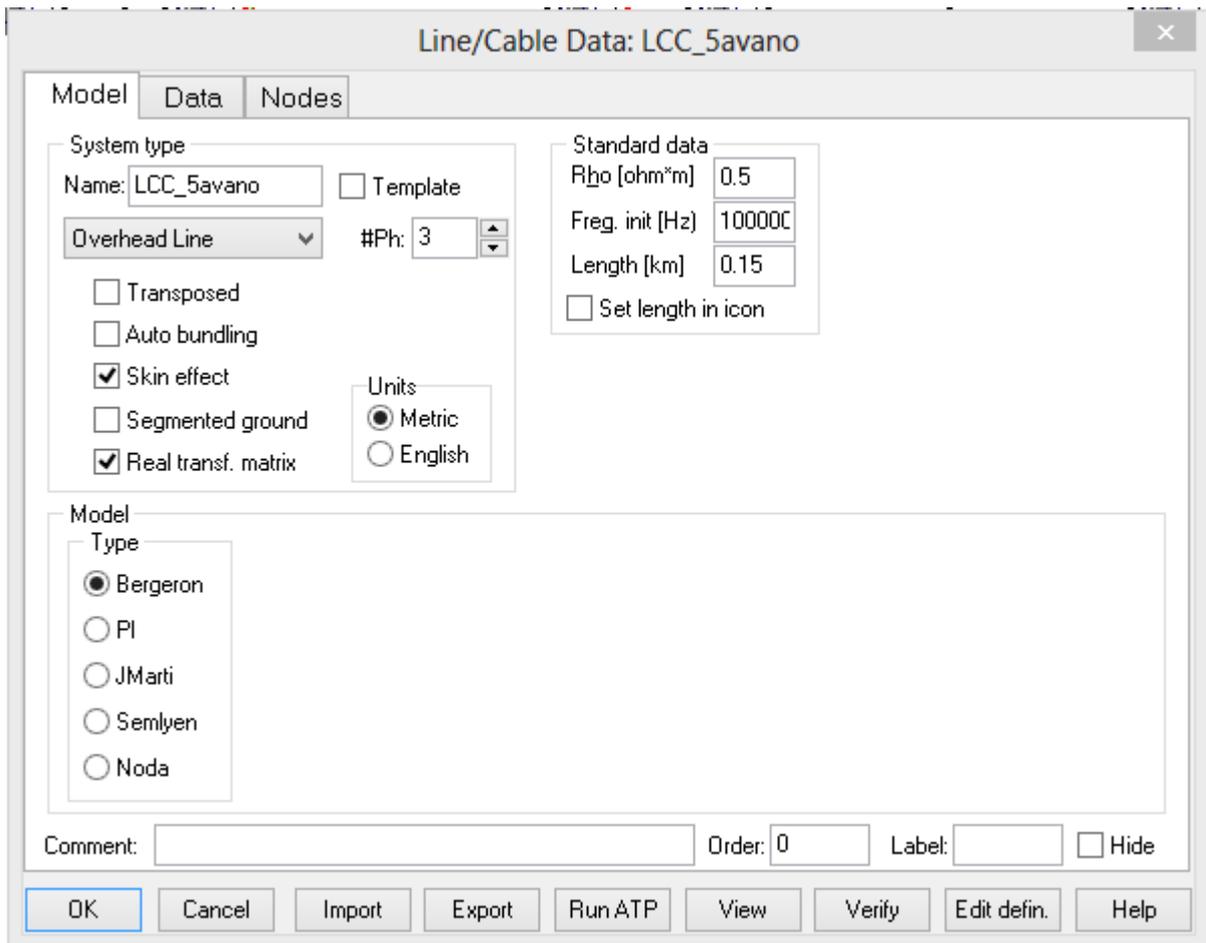
Puesto que las tensiones más elevadas se producirán en el punto de impacto, sólo será necesario considerar los apoyos cercanos a este punto. La **Figura 2.1** muestra la representación escogida para la línea en ATPDRAW.



**Figura 2.1.** Modelo que considera dos torres adyacentes más un tramo de línea lo suficientemente grande como para que las reflexiones en los extremos no afecten el análisis.

El modelo de línea utilizado en ATPDRAW se muestra en la **Figura 2.2**.





**Figura 2.2.** Modelo del ATPDRAW utilizado para representar los tramos de línea entre estructuras.

### 2.1.3 Modelación de la estructura

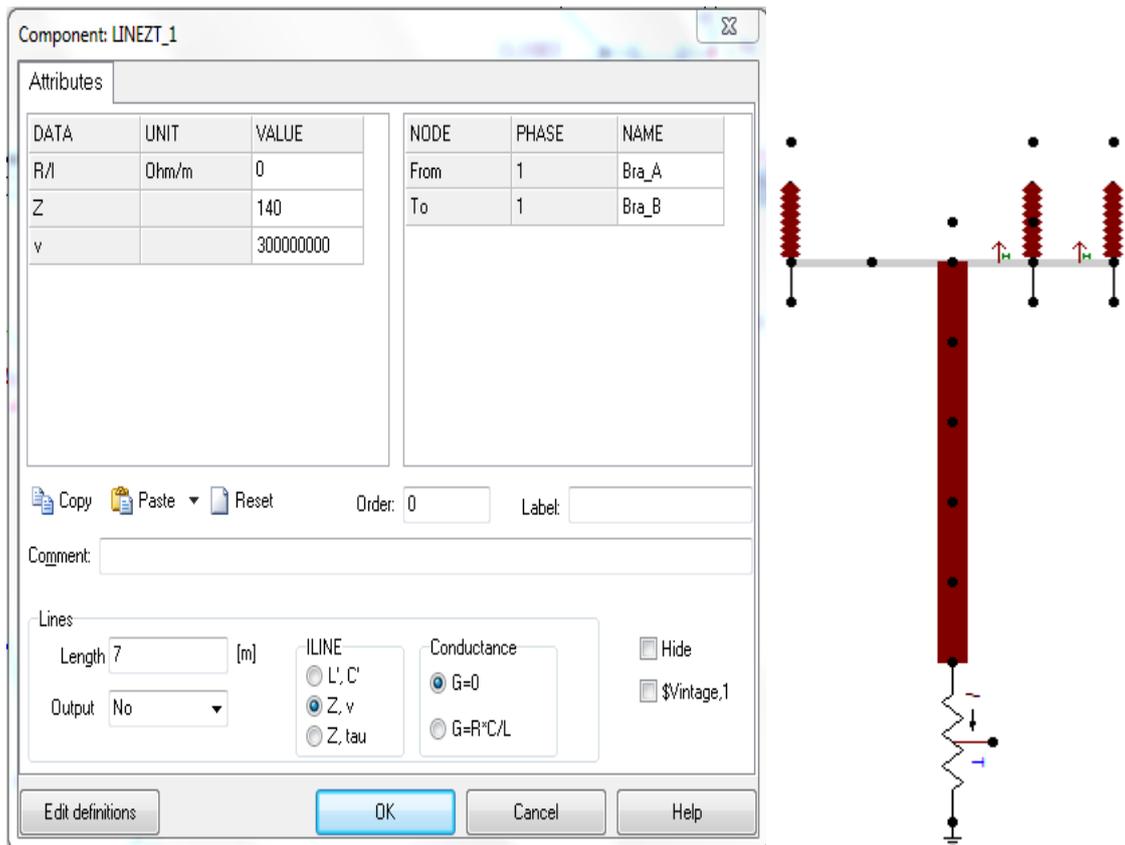
Se puede suponer que la estructura es una simple línea corta de transmisión con una impedancia transitoria constante, aterrada mediante su resistencia de aterramiento a la base. Las estructuras convencionales (poste con cruceta de acero), poseen una impedancia transitoria, ampliamente aceptada por la literatura, que se expresa mediante la ecuación (2.1).

$$Z_i = 30 \ln 2 \left( 1 + \frac{h^2}{r^2} \right) \quad \Omega \quad (2.1)$$

dónde h y r son la altura y el radio equivalente (significa la periferia dividida por  $2\pi$ ) de la estructura.

En el desarrollo de este trabajo el autor adopta las formulaciones desarrolladas por Sargen y Darveniza [25] por considerar que tienen una mayor validación práctica que el resto de las formulaciones dada la extensa bibliografía en que son mencionados.

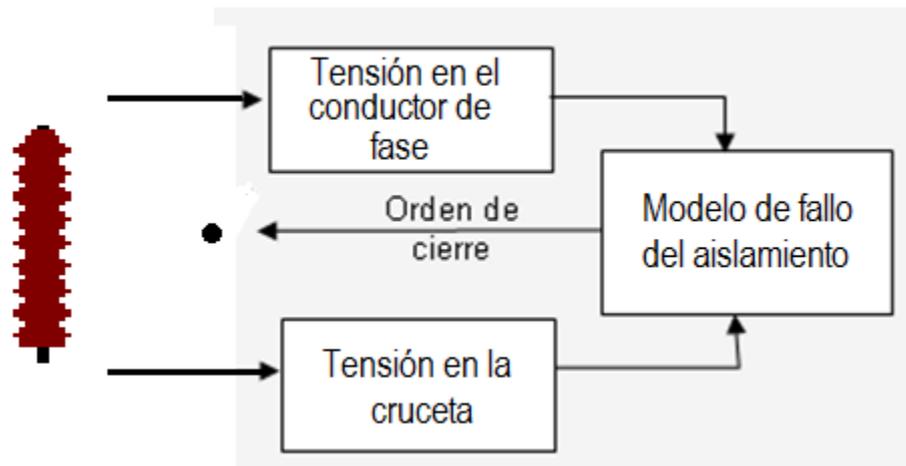
Con esta expresión de impedancia transitoria, se desarrolló un modelo de la estructura en ATPDRAW, véase la **Figura 2.3**.



**Figura 2.3.** Representación de la estructura en el ATPDRAW.

### 2.1.4 Modelación de los aisladores

Los aisladores se representan mediante interruptores controlados como se puede ver en la **Figura 2.4**.



**Figura 2.4.** Representación de la cadena de aisladores en el ATPDRAW.

### 2.1.5 Modelación de la resistencia de puesta a tierra

La resistencia de puesta a tierra se puede modelar [28, 29] por una resistencia constante e igual a la resistencia de estado estable [30] o por una resistencia variable [31] con la corriente que penetra en el terreno, mostrado en la **Figura 2.5**.

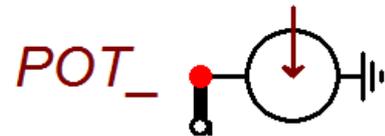
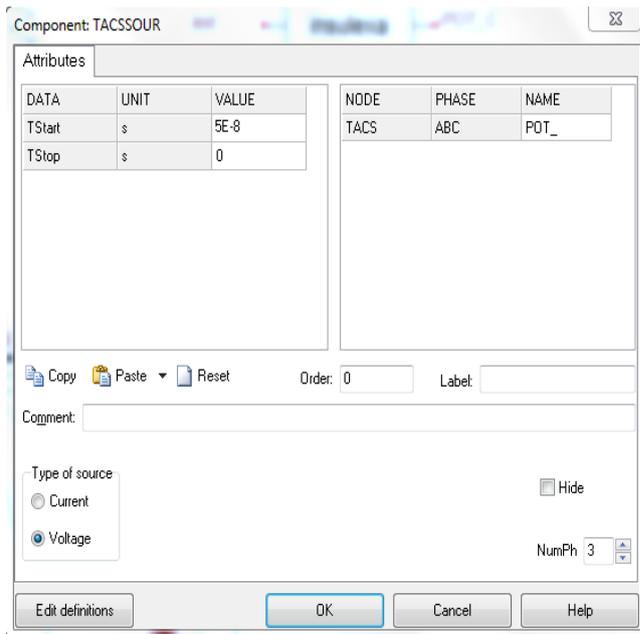


**Figura 2.5.** Representación de la resistencia de puesta a tierra en el ATPDRAW.

Resistencia aleatoria generada por el modelo.

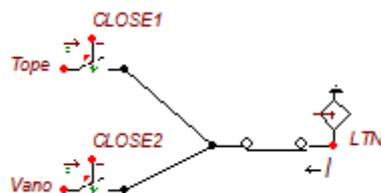
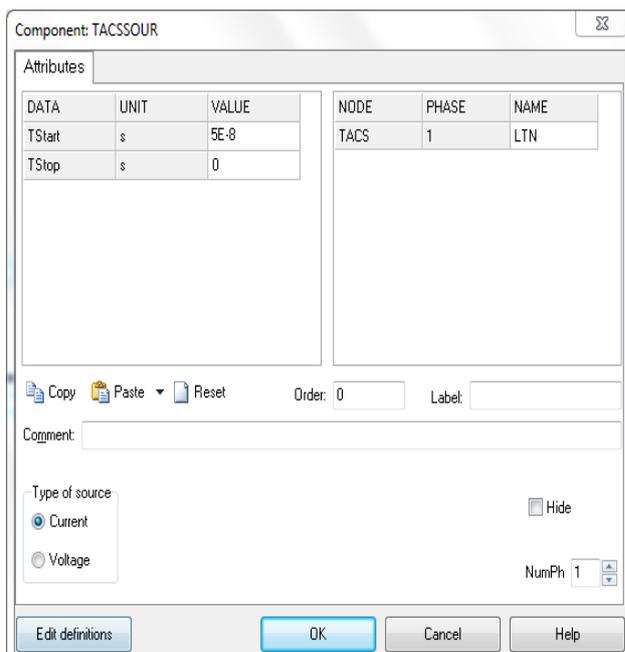
### 2.1.6 Modelación de las fuentes de tensión a frecuencia de potencia y de corriente de impulso tipo rayo.

Para la modelación de la fuente de alimentación se utilizó un modelo trifásico a la cual se le genera aleatoriamente el ángulo al cual se produce el impacto, tal como muestra la **Figura 2.6**.

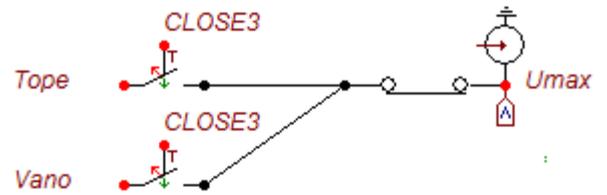
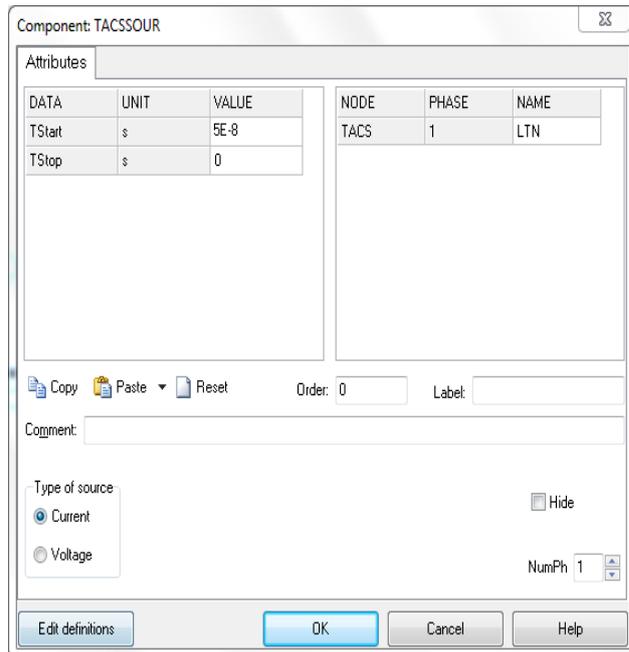


**Figura 2.6.** Fuente de tensión a frecuencia de potencia.

La fuente de impulso se representa mediante una fuente controlada por el modelo insulexa, a la cual se le genera la onda de corriente aleatoriamente tanto en valor máximo como en tiempo de frente, además el modelo determina si el impacto se produce en el tope de la estructura, en el vano entre estructuras o en tierra y cierra los interruptores Close1 (Tope), Close2 (Vano) o Close 3 (Tierra), ver las **Figuras 2.7** y **Figura 2.8.**



**Figura 2.7.** Fuente de corriente de impulso.



**Figura 2.8.** Fuente de tensión inducida por impacto a tierra en las cercanías de la línea.

### 2.1.7 Modelos generales

Para la representación de la línea sin cable protector y con cable protector se utilizan los modelos de las **Figura 2.9** y **Figura 2.10**.

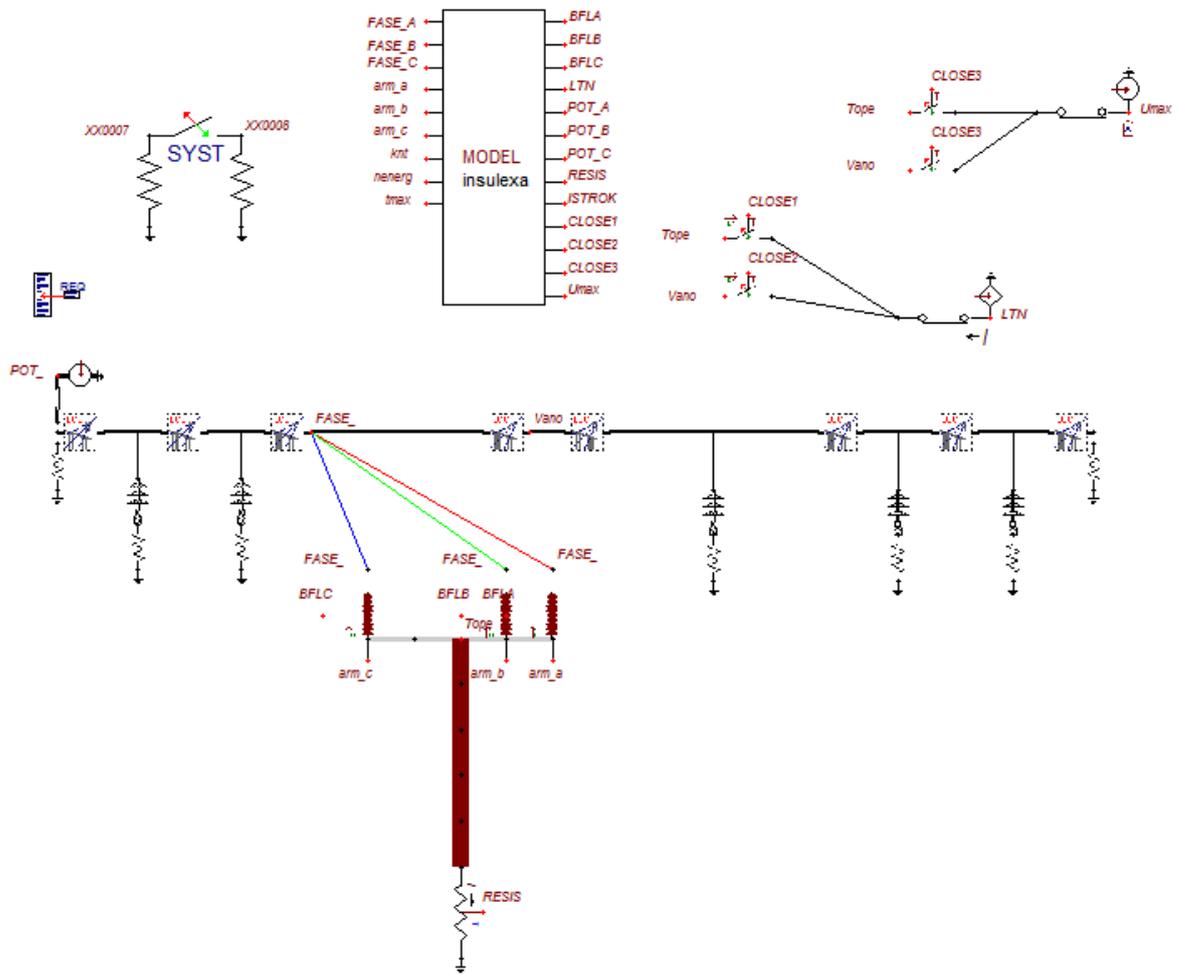


Figura 2.9. Modelo para para línea sin cable protector.

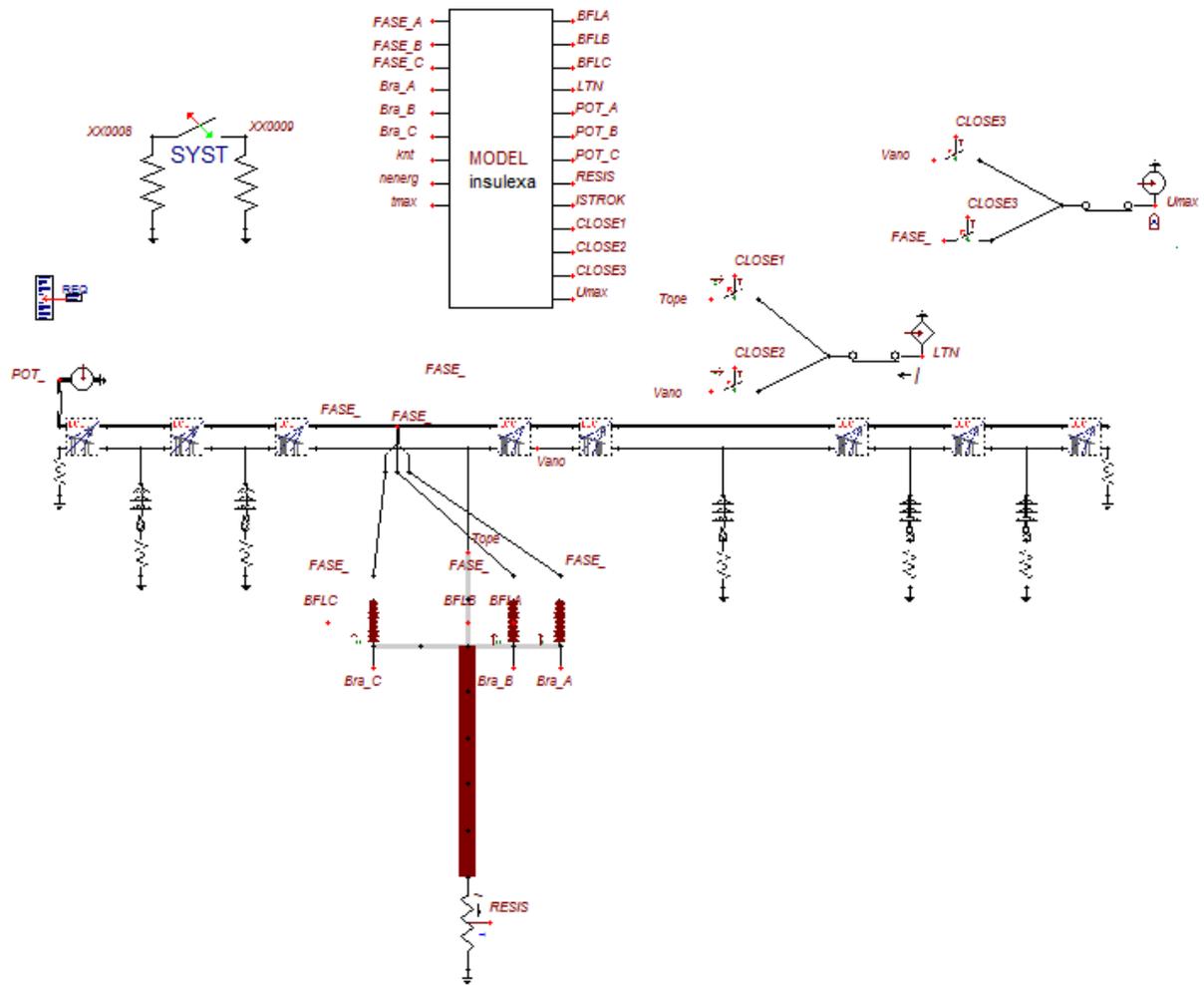


Figura 2.10. Modelo para para línea con cable protector.

### 2.1.8 Modelo insulexa.

El método de Monte Carlos se implementa en el modelo insulexa de la **Figura 2.11**.

Los datos de entrada del modelo son:

**Td:** días tormenta al año

**tower\_h:** altura de los hilos de guarda m

**shw\_sep:** separación entre los hilos de guarda

**clearance:** distancia de la cadena de aisladores

**sigma\_str:**  
**imean mean:**  
**sigma\_gap:**  
**front\_st:**  
**tstart:**  
**tail:**  
**ksm:**

} datos de la onda del rayo

**Lv:** distancia entre las estructuras

#### **Entradas:**

**vph\_a:** tensión en el conductor de la fase A

**vph\_b:** tensión en el conductor de la fase B

**vph\_c:** tensión en el conductor de la fase C

**arm\_a:**  
**arm\_b:**  
**arm\_c:**

} tensión en la estructura

**knt:** número de descargas atmosféricas

**tmax:** tiempo de muestreo

**vsh\_h:** tensión en el tope

#### **Salidas:**

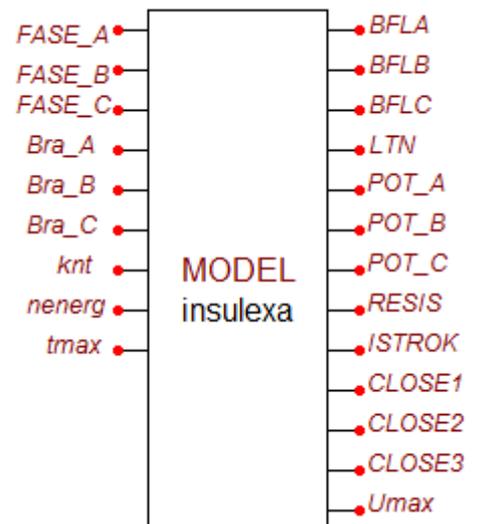
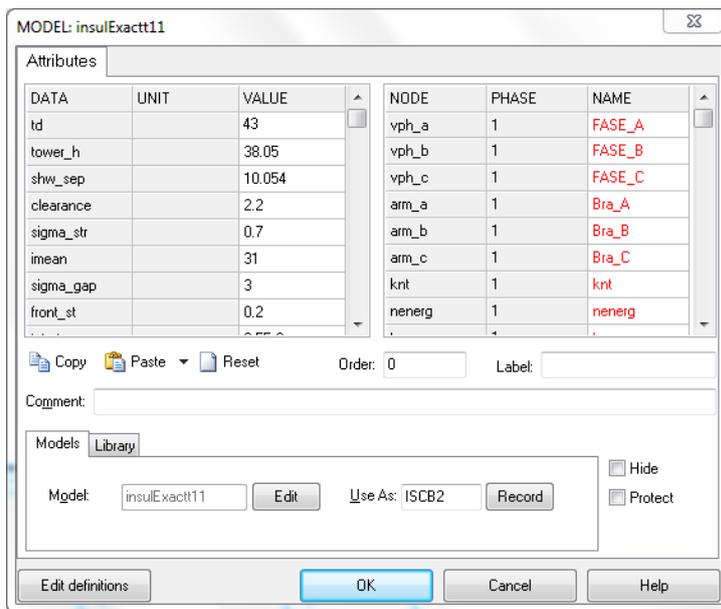
**bfla:** }  
**bflb:** } determina cuál de las fases falla  
**bflc:** }

**ltn:** onda de la corriente del rayo

**pot\_a:** }  
**pot\_b:** } tensión en las fases  
**pot\_c:** }

**resis:** resistencia de puesta a tierra de la estructura

**istrok:** valor máximo de onda del rayo



**Figura 2.11.** Modelo insulexa

## 2.2 Determinación del punto de impacto de la descarga

### 2.2.1 Modelo electrogeométrico

Basado en el modelo electrogeométrico (MEG), el ancho del área de atracción de una línea aérea viene dado como se muestra en la **Figura 2.12** y por las ecuaciones (2.2) y (2.3) por [32]:

$$A = b + 2x \quad (\text{m}) \quad (2.2)$$

o lo que es lo mismo:

$$A = b + 2\sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2} \quad (\text{m}) \quad (2.3)$$

Siendo:

$$r_s = 8 \cdot I_s^{0.65} \quad (\text{m}) \quad (2.4)$$

$$r_{sg} = k_{sg} \cdot r_s \quad (\text{m}) \quad (2.5)$$

$r_s$  = Distancia de impacto (m)

$r_{sg}$  = Distancia de impacto al plano de tierra (m)

$I_s$  = Corriente de retorno (kA)

$k_{sg}$  = Entre 0.6 y 1 según el criterio de diferentes autores dependiendo del nivel de tensión y la altura de la línea.

$h$  = Altura de los cables protectores de la línea en caso de que esté desprotegida.

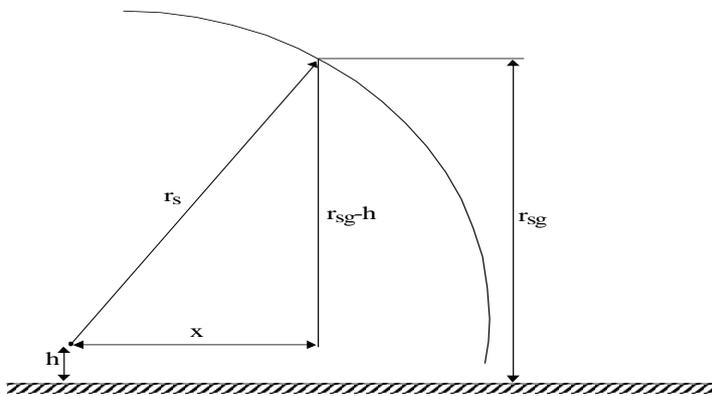
$b$  = Separación entre los cables protectores para una línea protegida con dos cables o la separación entre las fases extremas de una línea desprotegida e igual a cero para una línea protegida con un solo cable protector.

La razón de salida total de la línea es la suma de las salidas por impactos en la torre, por impactos en el vano entre torres y por fallas de blindaje.

Según lo planteado anteriormente, el área total de impacto en una línea está dado por la ecuación (2.6).

$$A_{total} = \frac{A}{1000} L \quad (\text{km}^2) \quad (2.6)$$

Donde:  $L$  = longitud de la línea (km)



**Figura 2.12.** Área de atracción a ambos lados de la línea.

El área de impacto en las estructuras esta dada por la ecuación (2.7), según la **Figura 2.13**:

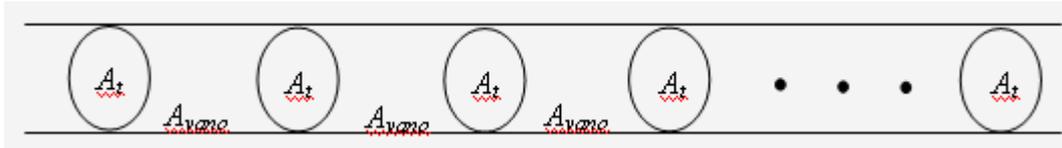
$$A_{torres} = A_t N_t \quad (\text{km}^2) \quad (2.7)$$

Donde:  $A_t$  = área de atracción de una torre ( $\text{km}^2$ )

$N_t$  = número de torres de la línea

$$A_t = \frac{\pi A x}{2} \quad (\text{km}^2) \quad (2.8)$$

$$x = \sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2} \quad (\text{km}) \quad (2.9)$$



**Figura 2.13.** Áreas de impacto en una línea.

El área de impacto en el vano entre torres se determina como la diferencia entre el área total ( $A_{total}$ ) y el área de las torres ( $A_{torres}$ ) como muestra la ecuación (2.10).

$$A_{vano} = A_{total} - A_{torres} \quad (\text{km}^2) \quad (2.10)$$

Una situación especial se presenta para valores de corriente de rayo donde las áreas de atracción de las estructuras se solapan, la **Figura 2.14** muestra esta situación; en este caso, al área de las estructuras, calculada anteriormente, se le resta las áreas de solapamiento como muestra la ecuación (2.11).

$$A_{torres2} = A_{torres1} - (N_t - 1) A_{solapamiento} \quad (\text{km}^2) \quad (2.11)$$

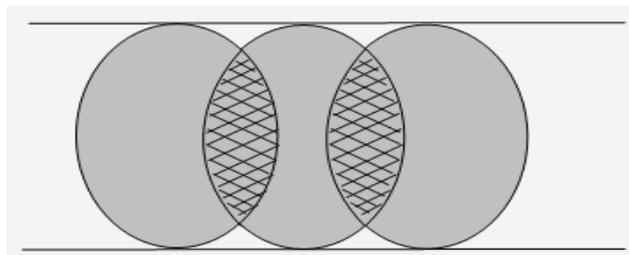
Donde:  $A_{torres1}$  = área de las torres sin solapamiento ( $\text{km}^2$ )

$A_{torres2}$  = área de las torres con solapamiento ( $\text{km}^2$ )

Además:

$$A_{solapamiento} = \frac{1}{8} \left[ -2L_v \sqrt{A^2 \left( 4 - \frac{L_v^2}{r_s^2} \right) + \left( 4L_v^2 + A^2 \left( 4 - \frac{L_v^2}{r_s^2} \right) \right)} \text{ArcTan} \left( \frac{\sqrt{A^2 \left( 1 - \frac{L_v^2}{4r_s^2} \right)}}{L_v} \right) \right] \quad (2.12)$$

Donde:  $L_v$  = longitud del vano entre torres (km)



**Figura 2.14.** Solapamiento del área de atracción de las torres.

### **2.3 Criterios de coordinación para la protección de líneas de tensiones intermedias.**

Durante muchos años el estudio del comportamiento ante rayos de las líneas eléctricas ha sido enfocado a las líneas de transmisión que como elementos de enlace entre las estaciones generadoras y entre estas y el resto de los componentes de los sistemas eléctricos de potencias, transportan grandes bloques de energía y sus salidas elevan el tiempo promedio anual de interrupción al usuario y, por tanto, el costo por concepto de energía dejada de servir de manera significativa e influyen de manera importante en la confiabilidad y calidad del suministro eléctrico.

Diferentes factores inciden en que en las últimas décadas del siglo pasado comience a tener el auge el estudio del comportamiento ante rayos de líneas de tensiones intermedias. Entre ellos, se pueden citar, el mejor conocimiento de los parámetros del rayo que permite estudiar con mejor exactitud el efecto de las descargas cercanas y su influencia significativa en la salida de este tipo de líneas, la sustitución de los postes de madera como fenómeno mundial (debido al costo), por estructuras metálicas o de hormigón armado lo que disminuye el nivel básico de aislamiento a impulsos tipo rayo de la línea compuesto en ese caso por la combinación de la madera y la porcelana, y reducido ahora, al del aislador, el surgimiento de dispositivos electrónicos que abarcan hoy muchas ramas de la actividad del hombre y que son muy sensibles a los cambios bruscos de tensión que se originan por el fenómeno del

rayo transferidos a los circuitos secundarios aún y cuando el evento de la sobretensión transitoria termine en una operación exitosa del interruptor de recierre automático.

Y en última instancia, la compresión de que este tipo de líneas constituyen, en cualquier sistema eléctrico, una parte muy importante del total de km de línea y sus afectaciones tanto en daños a equipos como en falta de continuidad del servicio tiene un peso definitivo en el comportamiento ante rayos del sistema en su conjunto.

En la actualidad los medios que más se utilizan para la protección de líneas contra las descargas eléctricas atmosféricas son:

1. Protección por sobreaislamiento.
2. Protección por pararrayos de óxido de zinc.
3. Protección por cable protector.
4. Protección por entrehierros con limitadores de corriente.

Los criterios para la utilización de uno u otro, e incluso de cómo emplear uno de ellos, son diversos y se discuten hoy día ampliamente en la literatura según resultados de investigaciones analíticas o experimentales. En realidad la utilización de uno u otro debe decidirse con un criterio técnico económico, factores como la densidad de rayos a tierra en la región, importancia de la línea, grado de protección natural, entre otros, han de tenerse en cuenta.

### **2.3.1 Necesidad de la protección.**

La decisión de la protección de una línea eléctrica contra el fenómeno del rayo se basa en el criterio de comportamiento. El criterio de comportamiento corresponde a una tasa de fallos o defectos que se considera aceptable para la configuración y contingencia que se analice. En el caso de comportamiento ante rayos de las líneas eléctricas en general el criterio de comportamiento se basa, regularmente, en el número de salidas por cada 100 km al año, este indicador acostumbra a llamarse índice de salidas.

La norma IEC 71-2 define para las líneas eléctricas, como criterio general, que un índice de salidas de 0.1 a 20 por 100 km al año, indicando el número mayor para

líneas de distribución se considera como un comportamiento adecuado. Verdaderamente, dentro de este rango, el criterio adoptar queda en mucho a la experiencia del diseñador y en el conocimiento de aspectos tales como la densidad de rayos a tierra y la importancia de la línea, entre otros factores.

Aunque la coordinación de aislamiento es una tarea a resolver en el diseño de la línea, es decir la necesidad o no de la protección de la línea contra descargas atmosféricas debe quedar resuelta en su diseño cuando se analizan las sobretensiones representativas y los medios de limitación, estudios para mejorar el comportamiento de líneas en operación pueden ser necesarios.

Si se trata de una línea en operación, el criterio de comportamiento adoptado debe ser comparado con el índice de salidas que reporta la línea del estudio de su estadística de fallas ante este fenómeno para la toma de una decisión sobre su protección. Si se trata de líneas de nuevo diseño debe realizarse un estudio predictivo del índices de salidas que tendrá la línea sin protección, comparar con el criterio de comportamiento y tomar la decisión.

Una secuencia general de pasos para evaluar la necesidad de la protección en líneas de nuevo diseño es la siguiente:

1. Establecer el criterio del comportamiento de la línea no protegida.
2. Calcular el índice de salidas por impactos directos de la línea no protegida.
3. Cálculo del índice de salidas por impactos cercanos de la línea no protegida.
4. Cálculo del índice total salidas de la línea no protegida.
5. Comparar del índice total con el criterio de comportamiento.

La literatura sobre el tema recoge diversos métodos y modelos para el cálculo del índice de salidas por rayo de las líneas tanto protegidas como no protegidas, en dependencia de las suposiciones que se realizan para representar los efectos que se involucran en el problema. En lo adelante se explican cómo calcular estos índices, tomando para cada caso los que la autora considera como más adecuados.

Como modelo de incidencia para los impactos directos se selecciona el Modelo de Inserción del Líder Positivo, para los impactos directos, la teoría Electrogeométrica debido al relativo bajo nivel de aislamiento que presentan las líneas de distribución se considera que cualquier rayo que la impacte, tiene un 100% de probabilidad de producir su salida.

### **2.3.2 Cálculo del índice de salidas por impactos directos en líneas no protegidas.**

La expresión para calcular el número de impactos a la línea eléctrica en el modelo de Inserción de Líder Positivo se establece para líneas al descampado. Los objetos cercanos a las líneas de distribución (árboles, edificios y otros) interceptan un número considerable de rayos, efecto que se conoce como protección natural de la línea. Dada la sensibilidad que introducen los objetos cercanos en la estimación del número de impactos directos, resulta razonable afectar el número de impactos directos a la línea obtenido por este modelo, por un llamado factor de apantallamiento que representa el porcentaje de rayos directos que son interceptados por estos objetos.

El factor de apantallamiento se determina considerando la altura y distancia del objeto a la línea, según se muestra en la **Figura 2.15**. En la misma se representa las alturas de la línea ( $h$  en m), del objeto cercano ( $H$  en m) y la distancia de separación entre ambas ( $X$  en m). El índice de fallas por impactos directos considerando la influencia de los objetos cercanos ( $N_s$ ) se calcula por la ecuación (2.13).

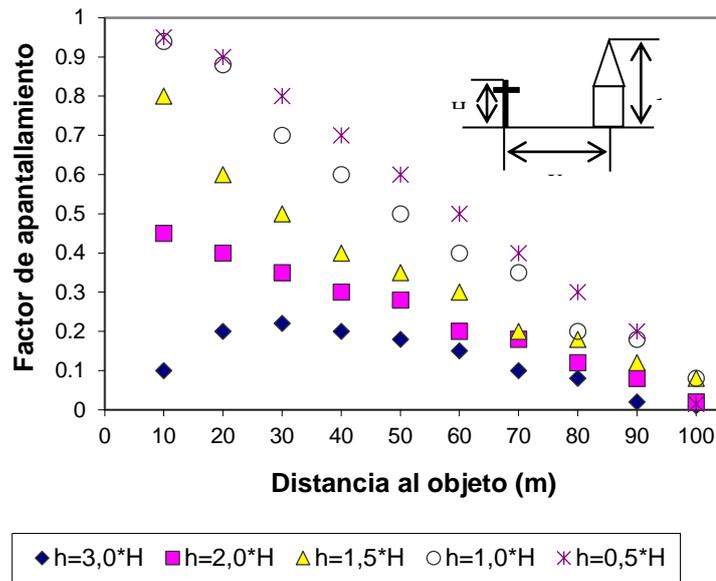


Figura 2.15. Factor de apantallamiento.

$$N_s = N_r \cdot (1 - S_f) \tag{2.13}$$

El índice de salidas por impactos directos teniendo  $N_s$  se determina a través del uso de la ecuación (2.14).

$$I_{f_{NP}}^{ID} = N_s \tag{2.14}$$

Donde:

$I_{f_{NP}}^{ID}$  : Índice de falla por impactos directos línea no protegida, en fallas/ 100 km/ año.

### 2.3.3 Cálculo del índice de salidas por impactos indirectos en líneas no protegidas.

A diferencia de los impactos directos, los impactos cercanos no tienen 100% de probabilidad de producir fallas en el aislamiento, por tanto es necesario establecer modelos y métodos que permitan determinar la tensión inducida, la probabilidad de falla y el índice de salidas por impactos cercanos.

Un modelo lo suficientemente exacto, para calcular la tensión inducida por impactos cercanos del rayo en líneas de tensiones intermedias es el debido a Voislav Jankov. Las simplificaciones que adopta este modelo son:

1. El canal de la descarga atmosférica se modela como una antena vertical.
2. Para el cálculo del campo electromagnético radiado se supone que la tierra es un conductor perfecto.
3. La línea se representa como un monoconductor sin pérdidas.
4. El diámetro del conductor es de 1 cm.
5. La longitud de la línea se asume infinita para evitar la influencia que tiene los terminales de la misma.

Las suposiciones que realiza de los aspectos que se involucran en el problema, corriente en el canal base, campo electromagnético radiado y modelo de acoplamiento son:

1. Utiliza como modelo de descarga de la corriente principal el modelo de Fuente de Corriente Viajera (Modelo TCS, siglas de término en inglés Traveling Current Source); que considera la distribución espacial y temporal de la descarga.
2. Utiliza como modelo del campo electromagnético que irradia la descarga el LEMP (Lightning Electro Magnetic Pulse)
3. Utiliza como modelo de acoplamiento el propuesto por Agrawal que considera la influencia del campo eléctrico vertical y horizontal que incide en la línea por los impactos cercanos.

El modelo TCS, modela el canal base de la corriente como un canal vertical, con una onda ascendente que se atenúa exponencialmente en función de una altura arbitraria  $z'$ . Supone que esta corriente se determina por la ecuación (2.15)

$$i(0,t) = \frac{I_0}{\eta} \cdot \frac{\left(\frac{t}{t_f}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{t_f}\right)^2} \cdot \exp\left(\frac{-t}{t_c}\right) \quad (2.15)$$

Donde:

$I_0$ : Magnitud de la corriente de retorno del rayo (kA).

$\eta$ : Factor de corrección de la magnitud  $I_0$ , se determina con la ecuación (2.16).

tf: Tiempo de frente de la onda de corriente de retorno ( $\mu\text{s}$ ).

tc: Tiempo de cola de la onda de corriente de retorno ( $\mu\text{s}$ ).

$$\eta = \exp\left(-\sqrt{\frac{2 * tf}{tc}}\right) \quad (2.16)$$

El cálculo del campo electromagnético de la corriente de la descarga principal se realiza a partir de la transformada discreta de Fourier de la corriente a lo largo del canal. Se obtiene a partir de las ecuaciones en el dominio de la frecuencia, con las ecuaciones planteadas por Uman, ecuaciones (2.17) (2.18) y (2.19), en el año 1995, donde se supone un canal vertical de la descarga y un terreno ideal con la geometría de la **Figura 2.16**.

$$B_{\varphi}(r, \varphi, z, t) = \frac{\mu_0 dz'}{4\pi} \left[ \frac{r}{cR^2} \cdot \frac{\partial i(z, t - \frac{R}{c})}{\partial t} + \frac{r}{R^3} \cdot i(z', t - \frac{R}{c}) \right] \quad (2.17)$$

$$E_{\rho}(r, \varphi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\pi_0} \left[ \frac{3r(z-z')}{R^5} \int_0^t i(z', t - \frac{R}{c}) dt + \frac{3r(z-z')}{cR^4} i(z', t - \frac{R}{c}) + \frac{r(z-z')}{c^2R^3} \cdot \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \quad (2.18)$$

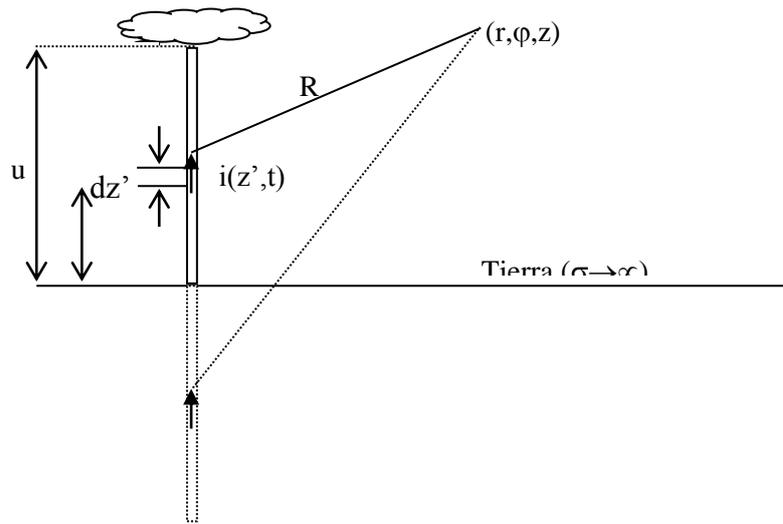
$$E_z(r, \varphi, z, t) = \frac{dz'}{4\pi\pi_0} \left[ \frac{2(z-z')^2 - r^2}{R^5} \int_0^t i(z', t - \frac{R}{c}) dt + \frac{2(z-z')^2}{cR^4} i(z', t - \frac{R}{c}) - \frac{r^2}{c^2R^3} \cdot \frac{\partial i(z', t - \frac{R}{c})}{\partial t} \right] \quad (2.19)$$

Donde:

$\mu_0$ : Permeabilidad del aire o vacío.

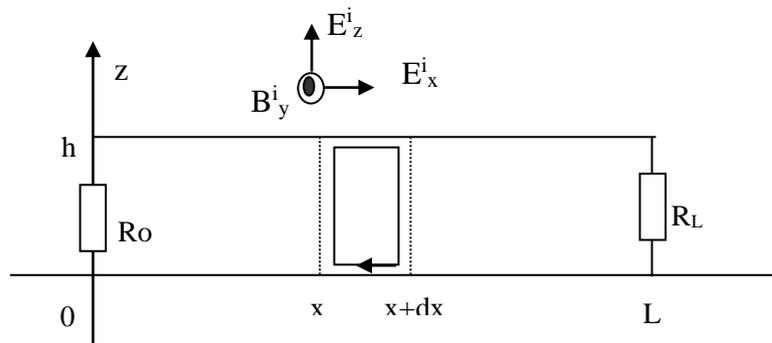
R: Resistencia de los conductores de fase en  $\Omega/\text{m}$ .

$\epsilon_0$  : Permitividad del aire o vacío



**Figura 2.16.** Geometría de las ecuaciones de Uman

El modelo de acoplamiento debido a Agrawal se obtiene de la integración de las ecuaciones de Maxwell y se expresa en términos de la tensión escalar, según se muestra en la **Figura 2.17**. Su formulación se presenta en las ecuaciones (2.20) y (2.21).



**Figura 2.17.** Geometría usada por el modelo de Agrawal

$$\frac{\partial u^s(x,t)}{\partial x} + L' \frac{\partial i(x,t)}{\partial t} = E_x^i(x,h,t) \tag{2.20}$$

$$\frac{\partial i(x,t)}{\partial x} + C' \frac{\partial u^s(x,t)}{\partial t} = 0 \tag{2.21}$$

Donde:

$$u^s(x, t) = -\int_0^h E_z^s(x, z, t) dz \quad : \text{ Tensión escalar.}$$

$L' = \mu_0 \text{Ln}(4h/d)/(2\pi)$ : Inductancia por unidad de la línea, en H/m.

$C' = 2\pi\epsilon_0/\text{Ln}(4h/d)$ : Capacitancia por unidad de la línea, en F/m

$E_x^i$ : Componente horizontal del campo eléctrico incidente en la línea a lo largo del eje x a la altura del conductor.

H: Altura promedio de la línea, en m.

d: Diámetro del conductor ajustado a 1 cm.

La tensión escalar  $u^s(x, t)$  es relacionada con la tensión total de la línea  $u(x, t)$  por la ecuación (2.22).

$$u(x, t) = u^s(x, t) + u^i(x, t) \quad (2.22)$$

Las condiciones de frontera de la tensión escalar se expresan mediante las ecuaciones (2.23) y (2.24).

$$u^s(0, t) = -R_0 i(0, t) - u^i(x, t) \quad (2.23)$$

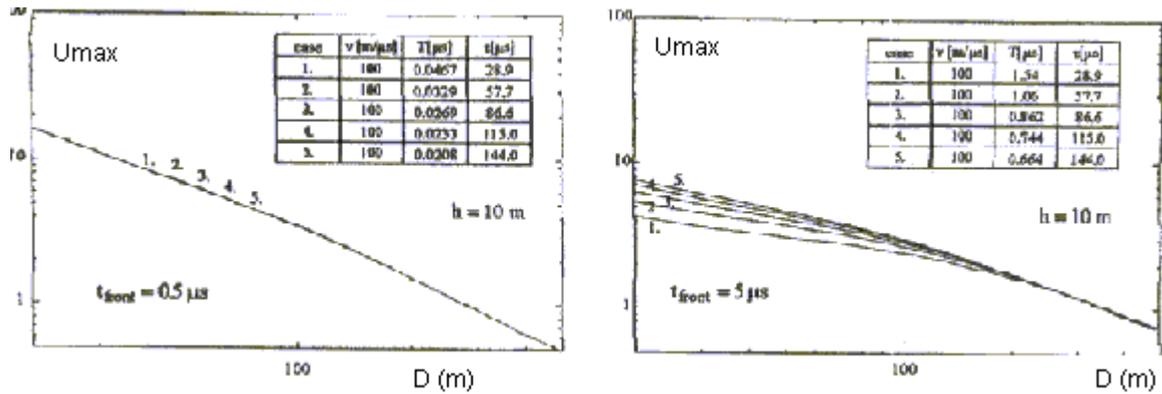
$$u^s(L, t) = R_L i(L, t) - u^i(L, t) \quad (2.24)$$

Como se observa la tensión escalar inducida, determinada por el modelo de Agrawal, es función de los campos eléctricos, horizontal  $E_x^i$  y vertical  $E_z^i$ , incidentes a lo largo y al final de la línea, respectivamente.

La tensión inducida máxima en la línea por el impacto cercano de un rayo es una función de los siguientes parámetros:

1. La corriente pico del rayo.
2. El tiempo de frente y cola de la onda de corriente.
3. La distancia D entre la línea y el punto del impacto.
4. La altura promedio de la línea h.
5. La velocidad de la corriente de retorno v.

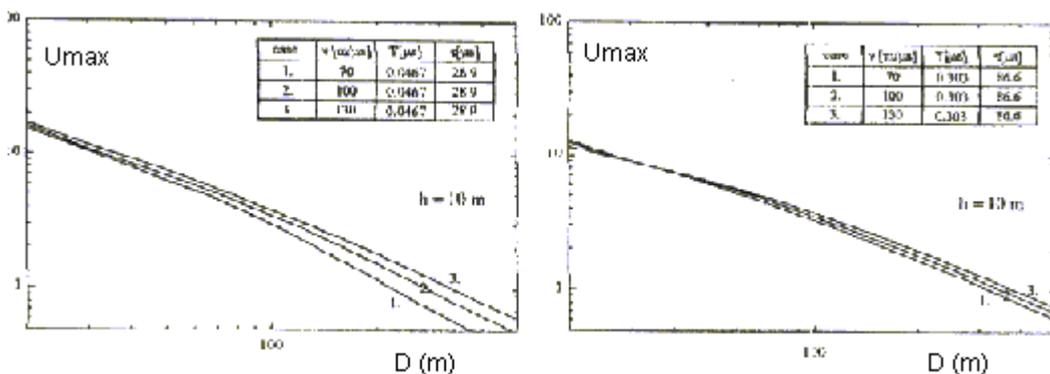
La **Figura 2.18** muestra la influencia que tienen el tiempo de frente y cola, en la función de la tensión inducida máxima ( $U_{max}$ ) para diferentes distancias, con corriente de retorno del rayo de 1 kA y altura de la línea de 10 m.



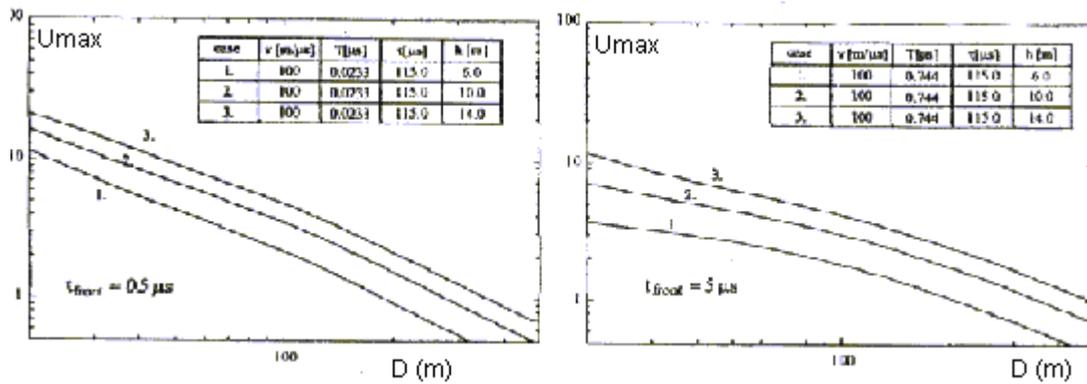
**Figura 2.18.** Efecto del tiempo de frente y cola en la función  $U_{max}(D)$ .

Se observa que para valores muy pequeños del tiempo de frente, alrededor de los 0.5  $\mu s$ , la tensión inducida no varía significativamente. Para tiempos de frente mayores la influencia de este parámetro es notoria para distancia de impactos de la línea menores a 200 m. En conclusión, la magnitud de tensión inducida es mayor cuando ocurren impactos cercanos del rayo de gran duración y a pequeñas distancias.

Para las mismas condiciones, la **Figura 2.19** muestra la influencia de la velocidad de la corriente de retorno y la **Figura 2.20** la de la altura de la línea. En general, la tensión inducida se incrementa a medida que la velocidad de la descarga de retorno aumenta. Esta influencia es más marcada a medida que la distancia de la línea al impacto es mayor. Par alturas entre 6 m y 14 m los valores de las sobretensiones inducidas se mueven en un pequeño margen.



**Figura 2.19.** Efecto de la velocidad de la corriente de retorno en la función  $U_{max}(D)$ .



**Figura 2.20.** Efecto de la altura de la línea en la función  $U_{max}(D)$ .

La tensión inducida ( $U_{max}$ ) se calcula en el modelo, con una exactitud razonable, por la ecuación (2.25)

$$U_{max} = k_u \cdot I_0 \cdot \exp(k_0 + k_1 \cdot \ln y + k_5 \cdot \ln^5 y) \tag{2.25}$$

Los coeficientes  $k_0$ ,  $k_1$  y  $k_5$  se obtienen por ajustes del tiempo de frente, tiempo de cola, altura de la línea, distancia entre la línea y el punto de impacto y la velocidad de propagación de la descarga de retorno usando el método de los mínimos cuadrados. Las expresiones para determinar estos coeficientes se muestran en las ecuaciones (2.26) (2.27) (2.28) y (2.29).

$$k_0 = 2.25 + 3.25 \cdot \exp\left(-\frac{|t_f - 0.1|^{1.45}}{0.55}\right) \tag{2.26}$$

$$k_1 = -\frac{k_0 - \sqrt{k_0}}{3.45} \tag{2.27}$$

$$10^4 \cdot k_5 = 0.7 \cdot \exp\left(-\frac{|t_f - 0.19|^{1.4}}{0.19}\right) + 0.18 \left(1 - 0.667 \frac{t_c - 28.85}{28.85}\right) - 1.15, \quad t_f > 0.1 \mu. \tag{2.28}$$

$$10^4 \cdot k_5 = -0.9 + 7.5 \cdot (t_f - 0.02), \quad t_f \leq 0.1 \mu. \tag{2.29}$$

Las ecuaciones anteriores introducen un error no simétrico al momento de determinar la tensión inducida. Para disminuir este error se utiliza un cuarto coeficiente ( $k_u$ ) que se determina por la ecuación (2.30).

$$k_u = \frac{h}{10} \left[ 1 - 0.1875 \cdot (t_f - 0.8) - 3.333 \cdot 10^{-4} \cdot \frac{4}{h^{0.6}} t_c \right] \tag{2.30}$$

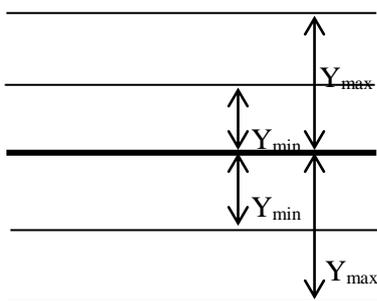
De acuerdo a lo explicado en el Capítulo 5, un modelo lo suficientemente exacto, para calcular el índice de salidas por impactos indirectos del rayo en líneas de tensiones intermedias es el debido a Chowdhuri.

En este método se proponen dos distribuciones de corriente del rayo, una para valores de corriente menor a 20 kA y otra para valores superiores a este, con medias y desviaciones típicas de: 61.1kA, 0.553; 33.3kA, 0.605, respectivamente. De acuerdo a conocimientos más actuales se recomienda, el uso una distribución de probabilidades de ocurrencia de la corriente del rayo que represente las características de la región en la cual se ubica la línea.

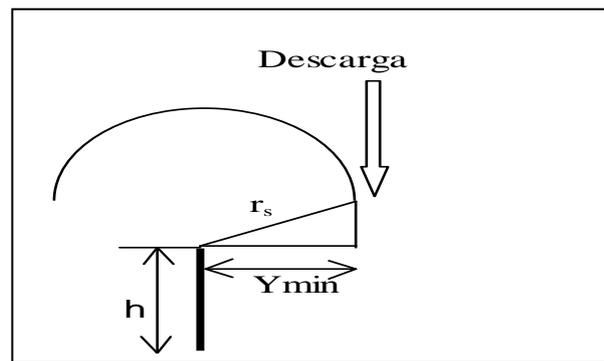
El método utiliza la Teoría Electrogeométrica y propone la relación  $R_s = 8 \cdot (I_0)^{0.65}$  para la distancia de atracción de la línea. El modelo más aceptado es el propuesto por Love, es decir,  $A = 10$  y  $b = 0.65$ . El procedimiento para determinar el índice de falla por impactos indirectos propuesto por este modelo es el siguiente:

1. Determinar la distancia mínima perpendicular ( $Y_{min}$ ) para la cual el rayo no golpea la línea. Esta distancia se determina a partir de  $r_s$ , con el uso de la ecuación (2.31), tal y como se muestra en la **Figura 2.21** y **Figura 2.22**.

$$Y_{min}^2 = r_s^2 - (r_s - h)^2 \quad (2.31)$$



**Figura 2.21.** Vista superior.



**Figura 2.22.** Vista frontal.

2. Determinar, a intervalos de 1 m, la distancia máxima horizontal ( $Y_{max}$ ), a partir del cual la tensión inducida no supere la tensión crítica de polaridad negativa del aislamiento de la línea.

3. Determinar el índice de falla por impactos cercanos con la ecuación (2.32) donde el valor medio y la desviación típica del tiempo de frente (tf) son, 3.83  $\mu$ s y 0.553, respectivamente.

$$I_{NP}^{IC} = 0.2 * \sum_{I_0=3kA}^{200kA} \sum_{t_f=0.5\mu}^{10.5\mu} P(I_0) * P(t_f) * \Delta I_0 * \Delta t_f * (Y_{max} - Y_{min}) \quad (2.32)$$

Donde:

$I_{NP}^{IC}$ : Índice de falla por impactos indirectos a la línea no protegida en salidas/ 100 km/ año.

$P(t_f)$ : Distribución de probabilidad del tiempo de frente de la corriente de la descarga en  $\mu$ s.

$\Delta I_0$ : Intervalo de variación de la corriente de la descarga de 1kA.

$\Delta t_f$ : Intervalo de variación del tiempo de frente de la descarga de 0.5  $\mu$ s.

$P(I_0)$ : Distribución de probabilidad de la magnitud de la corriente del rayo

$$P(I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_r}{I_m}\right)^b}$$

Donde:

$P(I_0)$  - Probabilidad de que cualquier rayo exceda la magnitud de corriente  $I_r$ .

$I_r$ - Magnitud de la corriente del rayo en kA.

$I_m = 30$  kA (Mediana de la distribución).

$b = 2.6$

### 2.3.4 Protección por cable protector.

El cable protector como medio de protección de las líneas de tensiones intermedias brinda protección contra las sobretensiones debidas a los impactos directos e indirectos del rayo. Su efectividad depende, en mucho, de un valor adecuado de su resistencia de puesta a tierra. Aunque esto es válido para cualquier nivel de tensión, en tensiones intermedias, este requerimiento se convierte en esencial, debido al relativo bajo aislamiento de estas líneas respecto a las líneas de transmisión y, por tanto, a la alta probabilidad de ocurrencia de las descargas inversas. Generalmente, su uso en distribución requiere su puesta a tierra en cada estructura. La disminución de las sobretensiones inducidas se realiza por el efecto del acoplamiento mutuo entre

el cable protector y los conductores de fase. El efecto de la disminución se realiza a lo largo de toda la línea.

### 2.3.5 Índice de falla por impactos directos al conductor de fase.

Aplicando el Modelo de Inserción del Líder positivo el número de impactos en los conductores de fase de una línea protegida por un cable de protector (Nfa) se calcula en función de la distribución de la corriente del rayo ( $P(I_0)$ ), la densidad de rayos a tierra ( $N_g$ ), las alturas de los conductores de fase ( $h$ ) y el cable de protector ( $h_g$ ) y las distancia horizontal entre ambos conductores ( $W/2$ ), según la ecuación (2.33).

$$Nfa = \frac{N_g}{1000} * \int_{I_c}^{I_m} \left[ Da(I_0, h_c) - Da(I_0, h_g) + \frac{W}{2} \right] * P(I_0) * dI_0 \quad (2.33)$$

Donde:

$I_m$ : Corriente máxima de la función de distribución de corrientes del rayo utilizada, en

kA.  $I_c$ : Corriente crítica del aislamiento de la línea, en kA.

La Función  $Da(I, h)$  se determina para estructuras de altura promedio entre 10 y 50 m con la ecuación (2.34).

$$Da(I, h) = 1.57 * I^{0.69} * h^{0.45} \quad (2.34)$$

El índice de falla por impactos directos en los conductores de fase se determina con la ecuación (2.35).

$$I_{f^{D_{CF}}} = Nfa \quad (2.35)$$

Donde:

$I_{f^{D_{CF}}}$ : Índice de falla por impactos directos a los conductores de fase en líneas protegidas con cable de guarda en salidas/ 100 km/ año,

### 2.3.6 Índice de salidas por impactos directos al cable de protector y/o a la estructura.

Para determinar el índice de falla por impactos directos a la estructura cable de guarda se calcula, del número total de rayos que inciden sobre estos elementos, cuales producen descargas inversas. El método más utilizado en la literatura es el Método de los dos Puntos. El mismo consiste en verificar a los 2 y los 6  $\mu$ s, en las característica U-t del aislamiento, si el valor de la sobretensión supera o no, el nivel de aislamiento de la línea.

El número de impactos totales a la línea eléctrica se determina por el Modelo de Inserción del Líder Positivo. El número al cable protector y la estructura se determina a partir del número total y las fallas de apantallamiento, como muestra la ecuación (2.36).

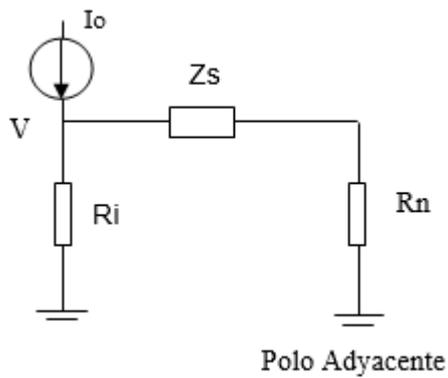
$$N_{dc} = N_r - N_{fa} \quad (2.36)$$

### 2.3.7 Modelo de respuesta de la línea

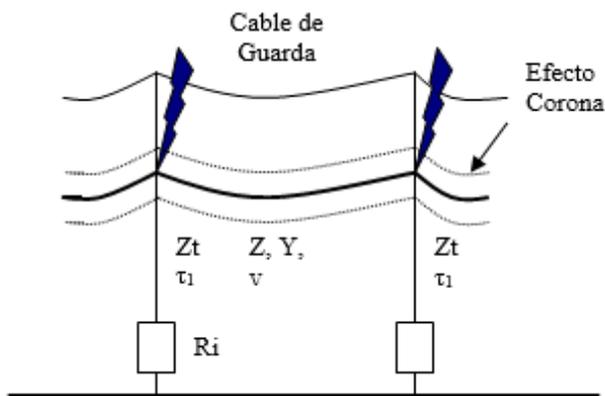
El modelo de respuesta de las líneas eléctricas o representación de cada uno de los parámetros que intervienen en su comportamiento ante el suceso de una descarga inversa juega un papel muy importante en la exactitud de los resultados de su evaluación. En los siguientes ítems se describen los modelos adecuados para representar: la línea, impedancia de los conductores de fase y de guarda, influencia del efecto corona a impulso, las estructuras y la resistencia de puesta a tierra.

### 2.3.8 Modelo de la línea

En las líneas de tensiones intermedias, en dependencia del tipo de poste y sus características, el cable protector puede ser puesto a tierra a través de la estructura o mediante bajantes a tierras. Los circuitos equivalentes para representar estas dos condiciones se muestran en las **Figura 2.23** y **Figura 2.24**, donde  $R_i$  representa la resistencia de puesta a tierra dinámica,  $Z_s$  la impedancia del cable protector con corona,  $R_n$  la impedancia resultante del paralelo de las dos estructuras adyacentes (esta variable considera su resistencia de puesta a tierra y del cable de guarda) y  $Z_t$  la impedancia dinámica de las estructuras.



**Figura 2.23.** Modelo de línea cuando el cable protector es puesto a tierra a través de una impedancia.



**Figura 2.24.** Modelo de línea cuando el cable protector es puesto a tierra a través de la estructura.

El paralelo de las dos estructuras adyacentes se calcula por la ecuación (2.37).

$$R_n = \frac{Z_s * R_i}{2 * (Z_s + R_i)} \quad (2.37)$$

### 2.3.9 Procedimiento para obtener el índice de falla por impactos directos de rayos en el cable protector.

La aplicación del método de los dos puntos se realiza de la siguiente forma:

1. Se determina el número de impactos directos al cable de guarda.
2. Se determina el radio corona del conductor de fase y el cable de guarda con corona a impulso.
3. Se determina la impedancia propia del conductor de fase, del cable de guarda y el factor de acoplamiento mutuo con corona a impulso.
4. Se determina el nivel de aislamiento de la línea, con la curva U-t del aislamiento, a los 2 y 6  $\mu$ s.
5. Se determina para frecuencia de conexión a tierra de: todas las estructuras, cada dos, tres, cuatro, cinco y ocho estructuras, la tensión que aparece en el aislamiento, según las ecuaciones (2.38) (2.39) (2.40) (2.41) y (2.42) para valores de corriente del rayo desde 3kA hasta 200kA, en intervalos de 1kA.

$$U_{cp} = (1 - K) * \left[ \frac{I_0}{2} t \left[ Z_i - \frac{Z_w(1 - \Psi^N)}{1 - \Psi} \right] + I_0 \tau Z_w \left[ \frac{(1 - \Psi^N)}{(1 - \Psi)^2} - \frac{N \Psi^N}{1 - \Psi} \right] \right] \quad (2.38)$$

$$Z_w = \frac{2 * R_i^2 * Z_{cp} * (Z_{cp} - R_n)}{(Z_{cp} + R_i)^2 * (Z_{cp} + R_n)} \quad (2.39)$$

$$Z_i = \frac{R_i * Z_{cp}}{Z_{cp} + R_i} \quad (2.40)$$

$$\Psi = \frac{(Z_{cp} - R_i) * (Z_{cp} - R_n)}{(Z_{cp} + R_i) * (Z_{cp} + R_n)} \quad (2.41)$$

$$\tau = \frac{L_{cp}}{0.9 * c} \quad (2.42)$$

6. Se compara los valores de tensión obtenidos en el paso 5 con los del paso 4 a los 2 y 6  $\mu$ s.
7. Se calcula el Índice de falla como el producto del número de impactos directos al cable de guarda por la probabilidad obtenida en el paso 6, ecuación (2.43).

$$I_f^{ID_{CP}} = N_{dc} * P(I_0)$$

$$(2.43)$$

Donde:

Zw: Impedancia de la onda ( $\Omega$ ).

Zi: Impedancia equivalente ( $\Omega$ ).

$\psi$ : Constante de amortiguamiento para las ondas de tensión.

N: Mayor número entero menor o igual que  $t/2\tau$ .

Lcp: Distancia entre puntos de conexión a tierra (m).

c: Velocidad de la luz (300000 km/s)

$I_{f^{D_{CP}}}$ : Índice de falla por impacto directo al cable de guarda (fallas/ 100 km/ año)

### 2.3.10 Índice de falla por impactos indirectos.

Un modelo lo suficientemente exacto para determinar el índice de falla por impactos cercanos en líneas protegidas por cables de guarda es el descrito por Yokoyama, en 1980. Este autor demuestra, en forma experimental, que la tensión inducida en una línea por los impactos cercanos disminuye, con respecto a la línea sin protección, en función del radio de protección del conductor (RP). Este radio es una función de la impedancia propia del cable de guarda, la mutua con los conductores de fase, de la altura promedio de estos y de la resistencia de conexión a tierra del cable de guarda, ecuación (2.44).

$$RP = 1 - \frac{Z_{fg}}{2 * R_{CA} + Z_{imp}} * \frac{hg}{h}$$

(2.44)

Donde:

Zfg: Impedancia de acoplamiento mutuo entre el conductor de fase y el cable de guarda con corona a impulso ( $\Omega$ ).

Zimp: Impedancia propia del cable de guarda con corona a impulso ( $\Omega$ ).

La tensión inducida por impactos cercanos en la línea de distribución se determina entonces en función de la tensión inducida sin cable de guarda y el radio de protección, según la ecuación (2.45).

$$U_{iCP} = RP * U_{max}$$

(2.45)

Donde:

$U_{max}$ : Tensión inducida por impactos indirectos en el líneas de distribución en kV.

$U_{ICP}$ : Tensión inducida por impactos indirectos en el líneas de distribución con cables de guarda (kV).

Una vez determinado la tension inducida, para obtener el índice de fallas por impactos cercanos ( $I_{fCP}^C$ ) se repite el procedimiento descrito para líneas sin protección.

El índice de falla en líneas protegidas con cable de guarda se determina como la suma algebraica de los índices de falla por impactos directos al cable de guarda, a los conductores de fase y por impactos cercanos, ecuación (2.46).

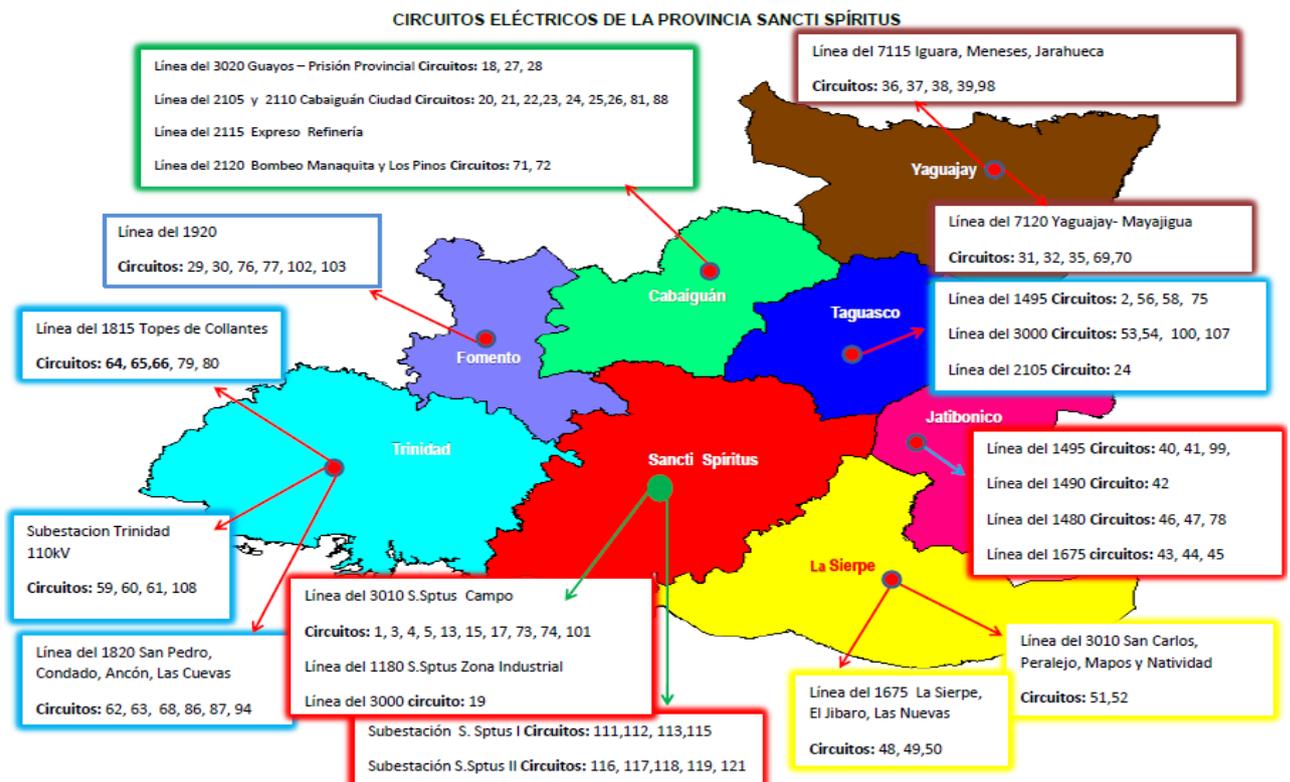
$$I_{fCP} = I_{fCP}^D + I_{fCF}^D + I_{fCP}^C \quad (2.46)$$

Donde:

$I_{fCP}$ : Índice de falla total de la línea protegida con cable de guarda.

### **2.3.11 Líneas de subtransmision bajo estudio de la provincia Sancti Spiritus.**

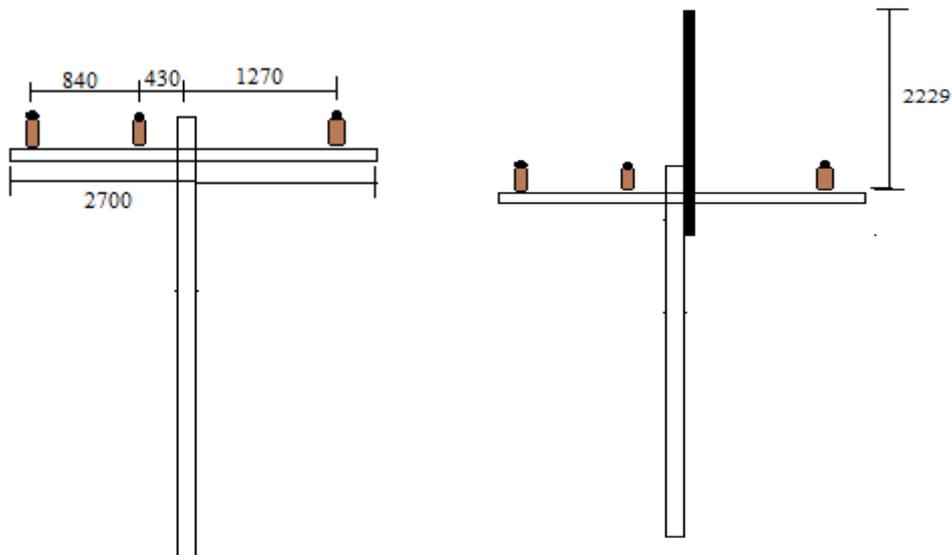
Para el análisis del comportamiento ante rayos se seleccionaron varias líneas de la provincia de Sancti Spiritus, la **Figura 2.25** muestra la ubicación de estas líneas y los circuitos que le corresponden.



**Figura 2.25.** Líneas de subtransmisión.

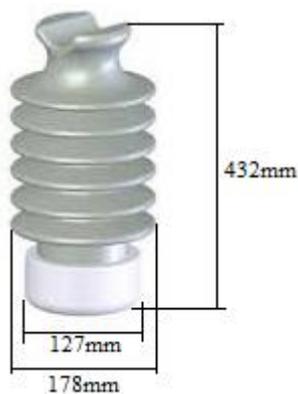
### 2.3.12 Datos constructivos de las líneas de subtransmisión.

La altura de los postes oscila entre 9150mm, 8400mm y 10700mm, la altura a la cruceta se busca restando la altura del poste menos la distancia que hay de la cruceta al cable protector, todo está en mm, ver **Figura 2.16**.



**Figura 2.26.** Estructura de las líneas de subtransmisión.

En líneas de 34.5kV se utiliza el aislador de pedestal de porcelana o de polímero, la altura varía según el año de fabricación, la norma etc, los datos del aislador de pedestal usado para el estudio se muestran en la **Figura 2.27**.



Longitud de fuga(mm)	Distancia de arco (mm)	Fuerza en voladizo (kN)	Tensión de ruptura			
			Baja frecuencia		Impulso	
			Seco	Humedo	+	-
1115	368	9	150	125	255	340

**Figura 2.27.** Aislador de pedestal de 34.5 kV.

En las construcciones se ha estandarizado la utilización de los siguientes conductores.

- AAC 85 mm<sup>2</sup> para líneas secundarias.
- AAAC 78 y 158 mm<sup>2</sup> para líneas primarias hasta 34.5kV.
- AAAC 199.9 y 240 mm<sup>2</sup> para líneas de 110 kV.

La **Tabla 2.2** muestra las características de las líneas bajo estudio y la **Tabla 2.3** las estadísticas de falla de estas líneas durante 9 años.

**Tabla 2.2.** Datos característicos de las líneas seleccionadas para el estudio.

<b>Línea</b>	<b>Altura en m</b>	<b>Impedancia Característica en <math>\Omega</math></b>	<b>Longitud en km</b>
<b>1680</b>	10.7	140	4,28
<b>1495</b>	10.7	140	14,561
<b>1485</b>	10.7	140	5,933
<b>1480</b>	10.7	140	13,847
<b>1180</b>	10.7	140	12,445
<b>1490</b>	10.7	140	2,782
<b>3020</b>	10.7	140	12,417
<b>3010</b>	10.7	140	12,417

**Tabla 2.3.** Estadísticas de falla por descargas atmosféricas de las líneas seleccionadas para el estudio.

LÍNEA	AÑOS									Salidas. Totales	Índice de Salidas Estadístico
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015		
1680	0	0	0	0	0	1	3	3	1	8	1
1495	12	1	2	2	3	3	3	2	4	32	4
1485	3	3	2	0	2	3	1	1	1	16	2
1480	13	1	6	0	1	2	0	0	1	24	3
1180	5	5	0	4	3	0	0	3	2	22	3
1490	1	0	0	2	1	1	1	1	2	9	1
3020	2	7	2	0	0	0	3	6	2	22	3
3010	3	4	5	4	5	4	4	1	6	36	4

## 2.4. Análisis de los resultados obtenidos

Actualmente prácticamente todas las líneas de subtransmisión del país o su gran mayoría para no ser absolutos están desprotegidas contra descargas atmosféricas, las ocho líneas seleccionadas para este estudio no son una excepción, por se dividió el análisis para dos condiciones, líneas sin protección y líneas protegidas con cable protector.

### 2.4.1 Evaluación de las líneas sin cable protector.

La **Tabla 2.4** muestra el comportamiento modelado en ATPDraw, para lo cual se supuso un área de impacto de 32.71 km<sup>2</sup>, de una línea de 100 km de longitud, un ancho de 327 m, para una densidad de rayos a tierra de 4.3 rayos/km<sup>2</sup>, lo cual da un total de 1400 impacto de rayos para un estudio válido para 10 años.

**Tabla 2.4.** Comportamiento ante rayos de líneas de subtransmisión sin cable protector usando el método de Monte Carlo.

Impactos en el vano	Fallas por impacto en el vano	Impactos en la estructura	Fallas por impacto en la estructura	Impactos en la tierra	Fallas por impacto en la tierra	Fallas en la fase A	Fallas en la fase B	Fallas en la fase C
386	6	377	26	637	457	34	438	17

El índice de salida de las líneas se calcula a través de la implementación del método de Monte Carlo en el modelo propuesto.

Para la validación del modelo propuesto se hace una comparación de las estadísticas de falla reales de las 8 líneas seleccionadas con los resultados obtenidos. La **Tabla 2.5** muestra los resultados de esta comparación, donde se puede apreciar que en solo dos líneas aparecen errores de -25 y 33.3 %, por lo que estos dos puntos extremos pueden ser desechados del análisis, considerando que en las restantes seis líneas el error es cero, podemos concluir que el modelo desarrollado es válido.

**Tabla 2.5.** Comparación entre las estadísticas de falla reales y el índice de falla calculado.

LÍNEA	Índice de Salidas Estadístico real.	Índice de Salidas Calculado	Error (%)
1680	1	1	0
1495	4	4	0
1485	2	2	0
1480	3	4	33.3
1180	3	3	0
1490	1	1	0
3020	3	3	0
3010	4	3	-25

#### 2.4.2 Evaluación de las líneas con cable protector.

Si las líneas tuvieran su cable protector, como ocurría hace algunos años atrás, los resultados de la modelación serían los que muestran la **Tabla 2.4**

**Tabla 2.4.** Comportamiento ante rayos de líneas de subtransmisión con cable protector usando el método de Monte Carlo.

Impactos en el vano	Fallas por impacto en el vano	Impactos en la estructura	Fallas por impacto en la estructura	Impactos en la tierra	Fallas por impacto en la tierra	Fallas en la fase A	Fallas en la fase B	Fallas en la fase C
380	9	371	26	649	17	31	4	17

Los índices de falla obtenidos para cada línea son los que se muestran en la **Tabla 2.5.**

**Tabla 2.5.** Índice de fallas calculado para las líneas con cable protector.

<b>LÍNEA</b>	<b>Índice de Salidas Calculado</b>
<b>1680</b>	<b>0.091</b>
<b>1495</b>	<b>0.309</b>
<b>1485</b>	<b>0.126</b>
<b>1480</b>	<b>0.294</b>
<b>1180</b>	<b>0.264</b>
<b>1490</b>	<b>0.059</b>
<b>3020</b>	<b>0.263</b>
<b>3010</b>	<b>0.263</b>

Como se puede apreciar el índice de salida se reduce prácticamente a cero, lo cual evidencia lo efectivo que resulta la protección con cable protector de este tipo de líneas, al reducir no solo las salidas por impactos directos sino también las salidas por tensiones inducidas por impactos indirectos.

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.**

### **CONCLUSIONES.**

1. La modelación realizada tiene una gran coincidencia con las estadísticas reales de falla de las líneas seleccionadas, lo cual da validación al modelo propuesto.
2. La evaluación del comportamiento de las líneas con la utilización del cable protector demostró la efectividad de este método de protección para este nivel de voltaje.

### **RECOMENDACIONES.**

1. Dar a conocer los resultados del trabajo a la autoridades de la Unió Eléctrica, para que tomen conciencia de la necesidad de proteger con cable protector las líneas de subtransmisión, cosa que se dejó de hacer a partir del periodo especial.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] I. S. 4. (1978 Modificación de la Norma IEEE Técnicas de Pruebas de alta tensión.
- [2] T. I. U. García Lagos. FA, "Estudio estadístico de sobretensiones transitorias debidas a descargas atmosféricas en líneas de transmisión. ," 2012.
- [3] Y. F. Ruales L. Cálculo del Comportamiento de una Línea de Transmisión frente al Flameo Inverso basado en el Método Montecarlo. .
- [4] M. J. Grisales Garcia V. (2013, Diseño de un sistema de protección contra descargas eléctricas atmosféricas: caso bloque e de la universidad tecnológica de Pereira. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología. .
- [5] Available: <http://vmwl1.iie.org.mx/sitioIIE/sitio/indice.php>
- [6] M. G. L. Angeles Sánchez JM. (2010, Implementación del método de volumen de colección para la protección contra descargas eléctricas atmosféricas en la TDGL Poza Rica
- [7] G. M. F., "Evaluación estadística del comportamiento de líneas aéreas de distribución frente a sobretensiones de origen externo. ," Tesis doctoral.
- , Barcelona. , Barcelona. , Barcelona. , 2001.
- [8] A. S. F., "Fenómeno del rayo. Gestión de riesgos. ."
- [9] Y. G. FG. (2010, Cálculo del comportamiento de una línea de transmisión frente al flameo inverso basado en el método de Monte Carlo. .
- [10] G. P. G. Fuentes Rodríguez M, "Método de Monte Carlo. ," 2010.
- [11] C.-A. F. Martínez-Velasco JA, "Implantación en EMTP de un procedimiento basado en el método de Monte Carlo para analizar el comportamiento de líneas de transmisión frente al rayo Revista chilena de ingeniería.," vol. vol. 16 N° 1, pp. 169-180 2008.
- [12] R. B. a. A. J. E. Anderson, "Lightning parameters for engineering applications," 1980.
- [13] F. Elizarraraz R., VillalobosR., A., "Ensayo alternativo de tensión de perforación para aisladores de vidrio y porcelana," 2002.
- [14] D. Qi-Bin Zhou, Y., "Using EMTP for evaluation of surge current distribution in metallic gridlike structures," 2005.
- [15] C. C.L. (1995). *Teoría y práctica con el ATP. .*
- [16] R. C. L. Vázquez O. K, "Cálculo de sobrevoltajes originados por descargas atmosféricas en líneas de transmisión utilizando el ATP (Alternative transients program) aplicado a la línea de transmisión Santa Rosa- Pomasqui a 220kV. ," 2005.
- [17] A. Br. Bande, "Estudio de las sobretensiones por descargas atmosféricas directas en las líneas aéreas de distribución de 13.8kV de os distritos Múcura y san Tomé de PDVSA. Maracay. ," 2008.
- [18] H. H. Prikler L. ( 1998 ATPDraw for Windows 3.1x/95/NT version 1.0.
- [19] G. C. H. A. Villa R, "Simulación con ATP de pararrayos para las líneas a 115 y 400 kVde Edelca. Rev Ciencia e Ingeniería. ," No 1., vol. Vol 22, 2001.
- [20] A. J. G., "Transmission Line Reference Book," pp. Pag 545–595, 1987.
- [21] J. G. a. T. A. S. Anderson, "Algorithms for calculation of lightning induced voltages on distribution lines", presented at the 1992 summer power meeting for publication in the IEEE Trans. on Power Delivery," 1992.
- [22] M. A. Sargent, "The Frequency Distribution of Current Magnitudes of Lightning Strokes to Tall Structures", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems
- Volume PAS-91," 1972.
- [23] T. M. Mekhaldi A, "Algorithm for pollution flashover calculation," 1996.

- [24] B. K. Gautam, Ito, M., Marungsri, B., Matsuoka, R., Ito, S., Arakawa, K, "Contamination flashover, performance of hydrophobic polymer insulators with different core diameters," 2004.
- [25] J. Mrazek, "Physics of natural and artificial lightning discharges", , " 2002.
- [26] K. F. Portella, Piazza F., Inone, P. C., Ribeiro S., Cabussú, M. S, Pedreira C. D., Da Silva Ch. C, "Atmosferic pollution (coastal and industrial) effects on electric energy distribution insulators in Salvador, Brazil, metropolitan region," 2008.
- [27] S. C. L.A., "Alta tensión y sistemas de transmisión," 1989.
- [28] C. Fierro, J. L., Tapia, O. O y Arbiol, A. M. A., "Comportamiento de la tensión de flameo en 60 Hz de diferentes tipos de aisladores a una altitud de 2600 m," 2001.
- [29] IEEE, "Guide for the application of insulation coordination," 1999.
- [30] J. D. Ramírez, Martínez, M. L., "Influencia de las sobretensiones por descargas atmosféricas y comportamiento de los sistemas de puesta a tierra en líneas aéreas de transmisión y distribución," 2004.
- [31] T. E. McDermott, T.A. Short, J.G. Anderson, "Lightning Protection of Distribution Lines", IEEE Trans. on Power Delivery," 1994.
- [32] CFE-LAPEM, "Curso de coordinación de aislamiento," 2001.
- [33] C.F.E., "Estadísticas de falla de líneas de transmisión," 1993-2002.
- [34] A. R. RAMÍREZ, "ANÁLISIS DEL COMPORTAMIENTO DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN DE 115 KV ANTE DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.  
," 2008.