

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

**ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA MECÁNICA
Y ELÉCTRICA**

*SECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E
INVESTIGACIÓN*

**METODOLOGÍA PARA LA APLICACIÓN DE
APARTARRAYOS EN LÍNEAS DE
TRANSMISIÓN PARA MEJORAR SU
CONFIABILIDAD**

T E S I S

**Que para obtener el grado de:
Maestro en Ciencias en Ingeniería Eléctrica**

PRESENTA

GABRIEL LÓPEZ RUIZ



MÉXICO, D.F.

2003



INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL
COORDINACION GENERAL DE POSGRADO E INVESTIGACION

ACTA DE REVISION DE TESIS

En la Ciudad de México, D.F. siendo las 17:00 horas del día 09 del mes de Abril del 2003 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de la E. S. I. M. E. para examinar la tesis de grado titulada:

"METODOLOGIA PARA LA APLICACION DE APARTARRAYOS EN LINEAS DE TRANSMISION PARA MEJORAR SU CONFIABILIDAD"

Presentada por el alumno:

LOPEZ

Apellido paterno

RUIZ

materno

GABRIEL

nombre(s)

Con registro:

9	9	1	2	9	0
---	---	---	---	---	---

aspirante al grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

LA COMISION REVISORA

Director de tesis

M. EN C. GILBERTO ENRIQUEZ HARPER

DR. DANIEL OLGUIN SALINAS

M. EN C. JESUS REYES GARCIA

M. EN C. CARLOS RAMIREZ PACHECO

DR. RICARDO OCTAVIO MOTA PALOMINO

DR. JAIME ROBLES GARCIA

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

DR. FLORENCIO VAREZ SILVA





DEDICATORIA



Quiero dedicar este trabajo con respeto a:

DIOS

Por darme la oportunidad de vivir y disfrutar de las cosas buenas que tiene la vida y por permitir que mis padres gocen de salud ¡gracias dios!.

MIS PADRES

CARLOS LÓPEZ ALVAREZ Y JUANA RUIZ AMADOR

Por los grandes sacrificios hechos durante esta estancia, por el cariño y las buenas vibras; y por enseñarme que la honestidad es una de las grandes virtudes que puede poseer el hombre. ¡Los quiero mucho!.

MI ESPOSA

GISELA

Por la paciencia, cariño y por soportar tiempos difíciles que gracias a su ayuda llegaron a un buen fin, pero sobre todo por el gran amor que nos tenemos. ¡Te amo more!.



AGRADECIMIENTOS

Especialmente al M. en C. Gilberto Enríquez Harper por la dirección de este trabajo de tesis.

Al Instituto Politécnico Nacional y a la Sección de Estudios de Posgrado e investigación de la Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica por las facilidades prestadas durante mi estancia en esta magna escuela.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología por el apoyo económico brindado para la realización de los estudios de Maestría en ingeniería Eléctrica.

A los profesores de la Sección de Estudios de Posgrado por el excelente nivel de enseñanza.

Al M. en C. Carlos Ramírez Pacheco por el gran apoyo brindado y las sugerencias para el desarrollo de este trabajo.

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: Antonio Aquino, Dora Luz, Gabriel Olmos, Godofredo, Jaime López, José Gómez, J. Dolores, Marco A. Carretero, Yazmín, y todos aquellos que se fueron agregando al grupo.

RESUMEN

Uno de los problemas que más afectan en la operación de las líneas de transmisión en México es el gran número de salidas de líneas en lugares con una alta densidad de descargas atmosféricas. Por lo tanto se le ha dado gran importancia a la protección de líneas de transmisión contra sobrevoltajes, debidas principalmente a descargas atmosféricas. Para ello existen métodos y dispositivos de protección destinados a resolver el problema, pero no considerar algunos conceptos básicos pueden producir diseños poco confiables, contribuyendo con esto a un aumento adicional en el costo de la construcción de la línea de transmisión.

En este trabajo se presenta en primera instancia los aspectos fundamentales de los apartarrayos como un dispositivo de protección a las líneas por efecto de sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas comúnmente conocidas como rayos. Y como objetivo principal se propone una metodología de estudio para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión mediante la simulación en el ATP / EMTP.

A través de esta metodología se adquieren los criterios para seleccionar la mejor configuración de los apartarrayos y con esto minimizar las salidas de las líneas por efecto de las descargas atmosféricas.

ABSTRACT

One of the problems that affects the operation of transmission lines in Mexico is the numerous outages of overhead transmission lines, specially in places with a high lightning strokes density, therefore the overvoltage protections applied to transmission lines have a lot of importance in electric power systems. There are approaches and devices that solve the problem but not consider basic concepts about them leads to untrustworthy designs which contributes to the increase of the cost of transmission lines.

This work has at first instance the basic aspects of transmission line surge arresters as a protection device against lightning strokes over transmission lines. This work proposes a methodology for the application of transmission line surge arresters in a suitable way through ATP/EMTP simulation.

Through this methodology, it is possible to acquire the criteria for the selection of the best configuration of the transmission lines surge arresters and therefore, minimize the number of line outages.

CONTENIDO

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
CONTENIDO	iii
INDICE DE FIGURAS	vi
INDICE DE TABLAS	vii
GLOSARIO DE TÉRMINOS	viii

CAPITULO I. INTRODUCCIÓN.

1.0. ESTADO DEL ARTE	1
1.1. ANTECEDENTES	2
1.2. OBJETIVO	2
1.3. JUSTIFICACIÓN	3
1.4. APORTACIONES	3
1.5. CONTENIDO DE LA TESIS	3

CAPITULO II. COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ANTE LA ACCIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

2.0. INTRODUCCIÓN	5
2.1. SOBRETENSIONES QUE SE PRESENTAN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.....	5
2.1.1. Sobretensiones de Frente Rápido (Rayos).....	7
2.2. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONTRA RAYOS.....	8
2.3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LAS SOBRETENSIONES Y LAS FALLAS QUE PRODUCEN.....	12
2.4. DETERMINACIÓN DE LA RUPTURA EN AIRE POR SOBRETENSIONES DE RAYO.....	13

CAPITULO III. INCORPORACIÓN DE APARTARRAYOS EN LAS LÍNEAS.

3.0. INTRODUCCIÓN	20
3.1. ORIGEN DE LOS APARTARRAYOS O SUPRESORES DE SOBRETENSIÓN	21
3.2. NECESIDAD DE APARTARRAYOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS	23
3.3. FALLAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS POR RAYO	24
3.4. CONDICIONES DE LOS APARTARRAYOS DE LÍNEAS AÉREAS	24
3.5. PARÁMETROS DEL RAYO NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE APARTARRAYOS DE LÍNEAS AÉREAS	25
3.5.1. Corrientes Picos del Rayo.....	25
3.5.2. Efectos de las Caídas Múltiples.....	26
3.6. PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE APARTARRAYOS DE LÍNEA	26
3.6.1. Principio de Operación General.....	26
3.6.1.1. Esquemas de conexión de los Apartarrayos.....	27
3.6.2. Apartarrayos de Sobretensión sin Entrehierro (Gapless).....	29
3.6.2.1. Construcción.....	29
3.6.2.2. Aplicación en Líneas Aéreas.....	29
3.6.2.3. Especificación de Parámetros.....	29
3.6.3. Apartarrayos con Entrehierro en Serie Externo (Gapped).....	30
3.6.3.1. Construcción.....	30
3.6.3.2. Aplicación en Líneas Aéreas.....	30
3.7. COMPORTAMIENTO DE LOS APARTARRAYOS EN LÍNEAS AÉREAS	31
3.7.1. Flameos Inversos.....	31
3.7.2. Fallas de Blindaje.....	31
3.7.3. Sobretensiones Inducidas.....	34

CAPITULO IV. METODOLOGÍA PROPUESTA.

4.0. INTRODUCCIÓN	35
4.1. PROTECCIÓN CON APARTARRAYOS EN SUBESTACIONES	36
4.2. METODOLOGÍA DE LA SELECCIÓN DE APARTARRAYOS	37
4.2.1. Selección de los Apartarrayos.....	38
4.2.1.1. Obtención de los parámetros del sistema.....	38

4.2.1.2. Selección de la tensión nominal de los Apartarrayos.....	40
4.3. LA FILOSOFÍA DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES.....	47
4.3.1. Punto de instalación del Apartarrayos.....	40
4.3.2. Margen de protección.....	41
4.3.3. Energía resistente del Apartarrayos.....	43
4.4. METODOLOGÍA PROPUESTA.....	44
4.5. CONSIDERACIONES GENERALES DEL MÉTODO.....	45
4.6. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	46
4.6.1. Representación de la Línea de Transmisión.....	51
4.6.2. Introducción de los datos de la línea.....	51
4.6.3. Introducción de los datos del Apartarrayos.....	53
4.6.4. Fuente de Rayo.....	55
4.7. CASOS DE ESTUDIO.....	55
4.7.1. Datos de la Línea de Transmisión.....	55
4.7.2. Simulación de una descarga atmosférica al hilo de guarda en una línea de 400 kV.....	57
4.7.3. Simulación de una descarga atmosférica a un conductor fase de una línea de 400 kV.....	61

CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

5.1. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS.....	67
REFERENCIAS.....	68
APÉNDICE A EL MODELO GEOMÉTRICO.....	71
APÉNDICE B ¿QUÉ ES EL ATP / EMTP?.....	74
APÉNDICE C DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN REPRESENTADA EN EL ATP.....	78

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Vulnerabilidad de un conductor fase con Blindaje inadecuado.....	11
Figura 2.2. Generador de Impulsos.....	13
Figura 2.3. Distribución probabilística de voltajes.....	14
Figura 2.4. Línea recta ajustada $V_{50\%}$ vs d.....	14
Figura 2.5. Curva de Distribución de voltajes.....	17
Figura 2.6. Curva de Probabilidad Acumulativa.....	17
Figura 3.1. Representación de un Explosor.....	21
Figura 3.2. Explosor de Puntas con Resistencia Ohmica.....	22
Figura 3.3. Concepto Básico de Apartarrayos de Línea de Transmisión.....	28
Figura 4.1. Curva voltaje – tiempo del aislamiento.....	36
Figura 4.2. Factor de Falla a tierra.....	39
Figura 4.3. Oscilaciones de tensión durante el rechazo de carga.....	39
Figura 4.4. Tensión resistente del aislamiento. Nivel de protección del Apartarrayos.....	41
Figura 4.5. Distancia de instalación o de protección del Apartarrayos.....	42
Figura 4.6. Energía Resistente del Apartarrayos por maniobra de interruptores.....	43
Figura 4.7. Parámetros que intervienen en la operación de maniobra.....	43
Figura 4.8. Mapa de Densidad de Rayos.....	48
Figura 4.9. Diagrama a bloques de la Metodología para la Aplicación de Apartarrayos...	50
Figura 4.10. Ventana principal del ATP con una sección de Línea de Transmisión representada.....	51
Figura 4.11. Caja de dialogo de datos del Modelo de la Línea.....	52
Figura 4.12. Datos Geométricos de la Línea.....	52
Figura 4.13. Ventana de datos de entrada del Apartarrayos.....	53
Figura 4.14. Datos de la Curva V – I del Apartarrayos.....	54
Figura 4.15. Forma de Onda de Impulso del Rayo.....	55
Figura 4.16. Descarga al Hilo de Guarda en una torre de 400 kV de tipo 4BA1.....	57
Figura 4.17. Representación de la Incidencia del rayo al Hilo de Guarda en el ATP.....	58
Figura 4.18. Voltaje en la fase A en los nodos 1,2 y 3.....	59
Figura 4.19. Voltaje de Flameo en la fase A del nodo 2.....	60

Figura 4.20. Voltaje en las fases B y C del nodo 2.....	60
Figura 4.21. Descarga al conductor fase en una torre de 400 kV de tipo 4BA1.....	61
Figura 4.22. Representación de la incidencia del rayo a un conductor fase en el ATP.....	62
Figura 4.23. Voltajes obtenidos en las fases A en los nodos 1, 2 y 3.....	63
Figura 4.24. Voltajes en los nodos 1, 2 y 3 con Apartarrayos en el nodo 2.....	64
Figura 4.25. Voltajes en los nodos 1, 2 y 3 con Apartarrayos en el nodo 3.....	64
Figura A.1. El Modelo Geométrico, definiciones de los Ángulos y distancias.....	72
Figura A.2. Definición I_m donde $R_c = 0$	73
Figura C.1. Ventana principal del ATP con una sección de la línea de transmisión Representada.....	78
Figura C.2. Representación en el ATP de la torre conectada a los hilos de guarda y fases.....	79
Figura C.3. Silueta de una torre de 400 kV de tipo 4BA1.....	80

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Expresiones para la distancia de incidencia.....	9
Tabla 3.1. Tensiones Características causadas por Rayo en Líneas Aéreas	32
Tabla 3.2. Protección Contra Sobrevoltajes o Mitigación de las Tensiones por Rayo en Líneas Aéreas.....	33
Tabla 4.1. Relación de Salidas de líneas de transmisión por falla propia.....	47
Tabla C.1. Datos de la curva característica V-I del Apartarrayos.....	81

GLOSARIO DE TÉRMINOS

ATP	Programa de Transitorios Alternativo (Alternative Transients Program).
BIL	Nivel Básico de Aislamiento al Impulso por Rayo (Basic Insulation Level)
BSL	Nivel Básico de Aislamiento al Impulso por Maniobra (Basic Switching Level).
CFE	Comisión Federal de Electricidad
CFS	Tensión Crítica de Flameo = VCS
CIGRE	Conferencia Internacional de Grandes Redes Eléctricas en Alta Tensión
EMTP	Programa de Transitorios Electromagnéticos (Electromagnetic Transients Program).
EHV	Extra Alto Voltaje (Extra High Voltage)
Gap	Entrehierro
Gapless	Sin Entrehierro.
Gapped	Con Entrehierro.
Hz	Hertz
I	Corriente de Rayo
kA	Kiloamperios.
kV	Kilovoltios.
K ₃	Constante de Configuración o de Proporcionalidad.
Kwh	Kilo-watts horas
Km	Kilómetros
m	metros
MCOV	Voltaje Máximo de Operación Continua (Maximum Continuous Over Voltage)
MOV	Varistor de Óxidos Metálicos.
MOSA	Apartarrayos de impulso de óxidos metálicos
NBI	Nivel Básico de Aislamiento al Impulso por Rayo.
NBS	Nivel Básico de Aislamiento al Impulso por Maniobra.
Ng	Densidad de Rayos a tierra
S	Distancia entre electrodos

SiC	Carburo de Silicio
SFR	Índice de Falla de blindaje (Shielding Failure Rate)
t	Temperatura.
UHV	Ultra Alto voltaje (Ultra High Voltage)
U(t)	Onda de Sobretensión.
Vref	Voltaje de referencia o voltaje de descarga del apartarrayos
V _{50%}	Voltaje con una probabilidad del 50% de flameo.
VCF	Voltaje Crítico de Flameo.
ZnO	Oxido de Zinc.
b	Presión Barométrica.
d	Distancia de Fase a tierra.
σ	Desviación Estándar.
δ	Factor de Corrección.
$\mu\text{seg.}$	microsegundos



INTRODUCCIÓN.

1.0. ESTADO DEL ARTE

Un Sistema Eléctrico de Potencia esta formado por tres partes importantes que son: generación, transmisión y finalmente distribución que en conjunto tienen la finalidad de entregar potencia eléctrica a los usuarios o consumidores. Dentro de este sistema la parte más vulnerable es la Línea de Transmisión, debido principalmente al efecto de las descargas atmosféricas que producen el mayor porcentaje de interrupciones de servicio, esto implica que las líneas pierdan continuidad en el suministro, reflejándose en los índices de confiabilidad del sistema. Debido a esto se propone una metodología para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión, con el fin de llevar a cabo un procedimiento de tal manera que se tenga una metodología de estudio para su aplicación práctica.

En los sistemas de corriente alterna, los elementos que son protegidos por apartarrayos obedecen a la necesidad que presentan los equipos o partes de la instalación de protección contra sobrevoltajes.

- Transformadores
- Reactores
- Entradas a las subestaciones (en los alimentadores de las líneas)
- Bancos de capacitores
- Máquinas eléctricas (Generadores)

Para ello existen métodos para la selección de apartarrayos en el cual se consideran algunos valores básicos, estos se refieren a los voltajes y corrientes de descarga.

Para el caso de la protección de las líneas de transmisión contra sobrevoltajes debidas principalmente a descargas atmosféricas, no existe un método elaborado el cual incluya los requerimientos y procedimientos necesarios para la ubicación de apartarrayos en las estructuras (torres) de las líneas de transmisión.

Actualmente en México la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para la protección contra descargas atmosféricas no esta normalizada, esto se debe a que existen líneas de transmisión en fase de prueba o experimentación, es decir, la metodología que existe es a base de prueba y error.[22]

1.1. ANTECEDENTES

El estudio sistemático del rayo y sus efectos se inicio en el año 1924 en Suecia, debido en primer lugar a que el rayo comenzó a perturbar a las líneas de transmisión de la época. Casualmente en esa misma fecha empezó la aplicación práctica de una de las herramientas más valiosas en su observación y medición, como lo es el osciloscopio de rayos catódicos.

Desde entonces la alta tensión dedica especial cuidado al estudio de todos los fenómenos eléctricos que en una u otra forma afectan a los sistemas de generación, transmisión y distribución de energía eléctrica.

Las primeras líneas de transmisión que entraron en operación comercial a los comienzos del siglo pasado, alcanzaron rápidamente extensiones considerables (más de 100 km). El rayo como es de suponer, se convirtió rápidamente en una preocupación de las mismas. En un principio no se tenían mayores conocimientos sobre este tipo de descarga, y tampoco existían los instrumentos y dispositivos adecuados para su estudio y análisis.

Casualmente también a principios del siglo pasado se desarrolló el osciloscopio de rayos catódicos. Este valiosísimo instrumento permitió el inicio de un sistemático estudio del rayo como descarga atmosférica y sus efectos sobre las líneas de transmisión de la época.

En Alemania, Suecia, Estados Unidos y otros países se procedió a la observación y registro del fenómeno no solamente en las líneas de transmisión, sino también en estructuras expuestas o específicamente construidas para tales fines. En primer lugar interesaba la forma de la onda del rayo, y luego se procedió a medir y registrar su intensidad de corriente. Uno de los destacados investigadores sobre este fenómeno fue el profesor Karl Berger, director de la estación Meteorológica del Monte de Salvatore, en Suiza, junto con Schonland a quienes se les atribuye los conocimientos actuales sobre las diferentes descargas atmosféricas.[7]

1.2. OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es desarrollar una metodología, para analizar la confiabilidad de las líneas de transmisión desde el punto de vista de salidas de líneas debidas principalmente a descargas atmosféricas, instalando apartarrayos de línea para obtener un mejor comportamiento con relación a las líneas que solo usan cables de guarda como medio de protección contra descargas atmosféricas.

1.3. JUSTIFICACIÓN

El enfoque de este trabajo es el de minimizar las salidas de líneas debidas a las descargas atmosféricas, ya que como se puede observar[5], en los índices de fallas de líneas se nota que a pesar de contar con los métodos de blindajes tradicionales por hilos de guarda con baja resistencia a tierra en algunas zonas de alta densidad de rayos, aún se presentan salidas por descargas atmosféricas.

Por lo tanto lo que se pretende en este trabajo es elaborar una metodología para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para mejorar su confiabilidad. Actualmente se cuenta con poca información referente a la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para limitar las sobretensiones por rayo y mejorar la confiabilidad de las líneas de transmisión. Este trabajo aportará la metodología de estudio para su aplicación práctica.

1.4. APORTACIONES

La propuesta de un método para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión para disminuir las salidas de líneas debidas a las descargas atmosféricas y mejorar su confiabilidad.

1.5. CONTENIDO DE LA TESIS

El contenido de este trabajo de tesis esta conformado por cinco capítulos y tres apéndices, respectivamente documentados, mismos que se describen a continuación.

En el Capitulo I se mencionan el estado del arte, antecedentes, objetivo, justificación y aportaciones del trabajo que se presenta.

En el Capitulo II se describen las características más sobresalientes acerca de la formación de las descargas atmosféricas (rayos), el comportamiento de las líneas de transmisión ante la incidencia de estas. Así como las magnitudes de corriente del rayo que pueden presentarse, su duración y formas de onda. Se presentan cuales son los métodos tradicionales de protección de las líneas ante el efecto de los rayos.

Además se realiza un análisis de las sobretensiones que presentan en las líneas de transmisión, de tal manera que se muestran los criterios utilizados para dimensionar el aislamiento de las líneas de transmisión debidas a las descargas atmosféricas.

En el Capitulo III se muestran las características de los apartarrayos desde su origen y como han evolucionado, además su construcción y funcionamiento en las líneas. Se menciona también la importancia que tienen en cuanto a la protección que proporcionan a las líneas de transmisión ante el efecto de las descargas atmosféricas directas, así como sus ventajas y desventajas.

En el Capítulo IV se propone la metodología, en la cual se describen los requerimientos necesarios para simular las condiciones en las que se encuentran las líneas de transmisión antes de sufrir descargas atmosféricas o de rayos. Se presentan casos de estudios con diferentes condiciones de operación como: Descargas a una línea en el hilo de guarda y descargas directas a un conductor fase considerando magnitudes de corriente promedio del rayo.

En el Capítulo V se presentan las conclusiones y las recomendaciones para trabajos futuros.

El Apéndice A describe el modelo geométrico el cual es el procedimiento utilizado para determinar la colocación de hilos de guarda en las líneas de transmisión y proporcionar blindaje a estas.

El Apéndice B se refiere al programa utilizado en este caso nos describe las características del EMTP / ATP.

El Apéndice C describe cada uno de los elementos utilizados para representar una línea de transmisión en el ATP, muestra además el procedimiento para determinar la curva característica $V - I$ del Apartarrayos.



COMPORTAMIENTO DE LAS LÍNEAS DE TRANSMISIÓN ANTE LA ACCIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS.

2.0. INTRODUCCIÓN.

Los sistemas de energía eléctrica, por sus características de operación, están expuestas a disturbios causados por fenómenos naturales, tales como vientos huracanados, sismos, inundaciones, desbordamiento de los ríos, tormentas eléctricas, etc. Las fallas que con mayor frecuencia se presentan, según los reportes de fallas de líneas de transmisión elaboradas por la Comisión Federal de Electricidad (CFE), son ocasionadas por la incidencia de las descargas eléctricas atmosféricas comúnmente conocidas como rayos. Los diseños de protección contra rayos normalizados, para aquellas situaciones donde se conjunta una elevada incidencia de tormentas y una alta resistividad del terreno, no siempre proporcionan la reducción esperada de los disturbios causados por este fenómeno natural. Las razones son diversas, pero una de las más importantes es que los diseños están basados sobre los parámetros más representativos del rayo, los cuales para sitios específicos muestran valores diferentes en diversas regiones geográficas por lo que el conocimiento o caracterización de los parámetros de las tormentas eléctricas y la adopción de métodos de protección contra este fenómeno constituyen dos aspectos fundamentales para reducir los disturbios ocasionados por este fenómeno.[5,6]

2.1. SOBRETENSIONES QUE SE PRESENTAN EN LOS SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA.

Las sobretensiones en los sistemas de potencia pueden generarse por eventos externos, tales como rayos; o por eventos internos tales como maniobras o fallas, incluyendo a las fallas por condiciones internas a la Ferroresonancia, rechazo de carga, pérdida de tierra, etc.; o por cualquier combinación de estas. La magnitud de estas sobretensiones puede estar por arriba de los niveles máximos permisibles, por lo tanto deben ser reducidos para proteger a los equipos contra daños y evitar operaciones del sistema no deseados.[8]

Sobretensión Temporal: Es una tensión oscilatoria de duración más larga que un periodo a la frecuencia del sistema, la cual no esta amortiguada o tiene un débil amortiguamiento. La severidad de las sobretensiones temporales está principalmente caracterizada por su amplitud y duración.

La importancia de las sobretensiones temporales en la coordinación de aislamientos tiene dos aspectos:

- Por un lado las características de las sobretensiones temporales, se tienen que considerar en la selección de los apartarrayos.
- La repetición de picos sucesivos de sobretensiones de polaridad opuesta, así como la disminución de la amplitud de algunas sobretensiones, pueden determinar el diseño del aislamiento interno de los equipos así como el aislamiento externo (superficies expuestas a contaminación).

Las sobretensiones temporales generalmente se originan debido a:

- a) Fallas a tierra.
- b) Cambios súbitos de carga
- c) Efectos de Ferroresonancia y Resonancia

Sobretensión Transitoria: Sobretensión de corta duración de pocos milisegundos, la cual puede ser oscilatoria o no oscilatoria. Usualmente altamente amortiguada. Puede estar sobrepuesta a una sobretensión temporal. Estas sobretensiones se clasifican en la forma siguiente:

- Sobretensión de Frente Lento (Maniobra). Es una sobretensión usualmente unidireccional, con una duración entre 30 y 300 μ seg. y duración menor de un periodo de la frecuencia del sistema.
- Sobretensión de Frente Rápido (Rayo). Es una sobretensión usualmente unidireccional, con una duración en el frente entre 0.1 y 30 μ seg. y duración en la cola hasta algunos cientos de microsegundos.
- Sobretensión de Frente muy Rápido. Es una sobretensión usualmente unidireccional, con una duración en el frente menor que 0.1 μ seg. y duración en la cola hasta de algunos miles de microsegundos.[14,18]

2.1.1. SOBRETENSIONES DE FRENTE RÁPIDO (RAYO).

Estas sobretensiones son causadas, ya sea por rayos directos a los conductores de fase, flameos inversos o descargas a tierra cercanas a las líneas, las cuales producen disturbios inducidos. Estas últimas generalmente causan sobretensiones menores de 400 kV en las líneas aéreas y solo se consideran en sistemas con tensiones nominales menores a esta .

Cuando una descarga atmosférica, incide en una línea aérea o directamente a tierra en la cercanía de una línea, se genera un sobrevoltaje llamado atmosférico o de rayo en los conductores fases. En el caso que una descarga incida sobre un conductor, la corriente del rayo iniciada en el punto de incidencia se dividirá en dos partes iguales, transmitidas como ondas viajeras a la velocidad de la luz en ambas direcciones del punto de incidencia.

La impedancia de estas ondas de corriente serán iguales a la impedancia de impulso del conductor ($Z = \sqrt{L/C}$) dado por su inductancia y capacitancia por metro. El valor de esta impedancia de impulso es dado por el diámetro y la altura del conductor sobre el suelo. Para líneas aéreas la impedancia de impulso no varía mucho y esta normalmente en el rango de 400-500 ohms.

Los destellos del rayo pueden ser considerados como una fuente de corriente con una alta impedancia interna (varios k ohms). El sobrevoltaje del rayo es el resultado de la corriente que choca (I), alimentado dentro de la impedancia (Z), en el punto donde incide, y el sobrevoltaje generado es el producto de la corriente y la impedancia ($I*Z$). Normalmente el valor de Z es del orden de 10 – 100 ohms, lo cual significa que la impedancia en el punto de incidencia en muchos casos es pequeño comparado a la impedancia en el canal del arco del rayo.

El resultado es que la impedancia en el punto de incidencia no tendrá mucha influencia en la amplitud de corriente y por lo tanto en aplicaciones prácticas el rayo puede ser considerado como una fuente de corriente constante.

Las descargas de rayo que producen tensiones significativas con valores mayores se limitan a las descargas directas sobre los conductores de fase, a las torres o a los hilos de guarda con el consecuente flameo inverso.

Debido al aguante elevado del aislamiento, los flameos inversos son menos importantes en la categoría II (Nivel de tensión mayor a los 300 kV) que en la categoría I (Nivel de tensión menor a 300 kV).[14,18]

La sobretensión representativa tiene la forma de onda de la sobretensión por rayo normalizada (1.2/50 μ seg.) y su amplitud corresponde a un índice de ocurrencia deseado por año. Estas dependen fuertemente de la severidad de los rayos en la región, de la construcción de la línea aérea y para subestaciones de su construcción y la configuración de su operación. Generalmente no pueden establecerse parámetros de esfuerzos validos y se deben examinar caso por caso.[8,9]

Además en la gama de tensiones menores deben considerarse los disturbios transferidos a través de los transformadores, especialmente con relaciones de vueltas elevadas cuando se encuentran conectados a máquinas rotatorias.

Las sobretensiones por rayo entre fases tienen aproximadamente las mismas amplitudes que las de fase a tierra, debido a que se considera que el efecto de la sobretensión de operación y el acoplamiento entre conductores se cancelan entre sí. Estas sobretensiones se manifiestan inicialmente sobre la línea de transmisión de la siguiente manera:

Las sobretensiones por rayo se pueden generar en las líneas aéreas de tres formas :

a) Sobrevoltajes inducidos.

- Descargas a tierra cerca de la línea.
- Descargas a los hilos de guarda o en la punta de la torre.

b) Fallas de blindaje.

Descargas al conductor fase en lugar del hilo de guarda.

c) Flameo inverso.

Descargas a las torres o hilos de guarda resultando en flameos inversos a los conductores fases, causado por la alta impedancia al pie de la torre.

Mediciones hechas muestran que la corriente del rayo varía de algunos kA a más de 100 kA con un valor medio de aproximadamente 30 kA con un tiempo de frente de la onda y a la mitad del valor de 8 / 80 μ seg. respectivamente.[9,10,13]

Las descargas directas a los conductores fases pueden generar sobrevoltajes con amplitudes de varios millones de volts. Estos altos voltajes son causados por la corriente y la impedancia de impulso del conductor fase.

Los sobrevoltajes inducidos ocurren simultáneamente en los tres conductores fases de una línea trifásica. Este tipo de sobrevoltajes también tienen una duración de aproximadamente 100 μ seg. pero la amplitud y su inclinación es mucho menor que en el caso de descargas directas al conductor fase. En raras ocasiones los sobrevoltajes inducidos exceden los 400 kV los cuales son más bien sobrevoltajes altos para equipos de 24 kV y menores.[9]

2.2. PROTECCIÓN DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN CONTRA RAYOS.

En la práctica es común proteger a las líneas aéreas contra rayos por lo menos en áreas donde se considera que sean vulnerables. La protección considera uno o más conductores a tierra que están conectados de torre a torre por encima de los conductores de fase a lo largo del derecho de vía. Estos conductores están unidos a las torres, así que ellos están a un potencial de tierra bajo condiciones normales. La intención en la disposición de estos conductores es que ellos intercepten las caídas de los rayos que podrían de otra manera terminar en los conductores de fase.

Tal protección puede extenderse a lo largo de una línea de transmisión, o puede ser confinado a unos pocos kilómetros adyacentes a la subestación o estación de maniobras. En el último de los casos la suposición es que las sobretensiones producidas por cualquier caída de rayo a la sección no protegida de la línea tendrá que ser reducida a proporciones manejables por el tiempo en que ellos alcanzan los extremos de la línea por flameos a lo largo de la línea y / o corona y otros efectos de atenuación experimentados por la sobretensión en su transcurso a lo largo de la línea.

El principal interés en esta sección es con la ubicación de los conductores de tierra (hilos de guarda), con respecto a los conductores fase. Para que ellos sean efectivos deben de ser mas atractivos al rayo que los conductores de fase.

El objetivo o propósito de este blindaje proporcionado por los hilos de guarda, es actuar como colectores de las descargas y en la medida de lo posible prevenir que terminen en uno de los conductores fase causando un flameo inverso. Sin embargo, en la práctica las descargas no pueden ser evitadas totalmente a que no lleguen al conductor fase, a menos que el conductor este completamente blindado a su alrededor (rodeado de hilos de guarda). Además resultaría antieconómico blindar al conductor para que no ocurra el flameo inverso. Por lo tanto, el objetivo debe ser localizar o colocar los hilos de guarda para que un número específico de descargas resulte en flameos.[11,12]

Existen en la literatura ecuaciones que son aproximaciones que nos permiten determinar la distancia de atracción o de caída (striking), con las cuales se pueden determinar a que distancia una corriente de rayo puede ser atraído por un punto más alto.[28,29,30.31]

Estas aproximaciones han surgido del estudio del último salto de la descarga del rayo aplicando el modelo geométrico (Ver apéndice A), para poder determinar cual es el comportamiento que tiene una descarga atmosférica ante una línea de transmisión y saber en que parte de la línea terminará.

Las aproximaciones han sido el resultado de estudios de varios investigadores que pretender entender y proponer de que manera se pueden prevenir o minimizar las descargas directas a las fases, esto se ha logrado desarrollando el modelo geométrico con el principal y único propósito de mostrar que los ángulos de blindaje deben disminuir a medida que la altura de la torre aumente. [11,15,16]

En la siguiente tabla se muestran las aproximaciones que se consideran más relevantes.

Origen	r_g a tierra o suelo		r_c a conductores fases e hilos de guarda	
	A	b	A	b
Young	27.0	10.0	γr_g^d	0.32
Brown-Whitehead	6.4	0.75	7.1	0.75
Love	10.0	0.65	10.0	0.65
IEEE-1991 T&D Committee	βr_c^a	0.65	8.0	0.65
IEEE-1992 T&D Committee	βr_c^b	0.65	10.0	0.65
Mousa and IEEE-1995 Substations Committee	8.0	0.65	8.0	0.65

Tabla 2.1. Expresiones para la distancia de incidencia (Striking distance), $r = AI^b$ [7]

Cuando una descarga o guía líder alcanza la superficie terrestre, es común experimentar que son atraídas hacia objetos altos tales como: árboles, edificios altos y estructuras de las torres de transmisión. El concepto de una distancia de caída S es introducido. Lo que esto significa es que cuando la punta de la descarga o de la guía está dentro del alcance de la distancia S de un objeto aterrizado, la probabilidad de que la guía termine en este objeto es significativamente más grande que la probabilidad de que golpee a otro objeto más alejado. Se ha observado que S es una función de la corriente y se ha propuesto por la siguiente relación:

$$S = 10I^{0.65} \quad (2.1)$$

Donde S esta dado en metros e I en kA. De esta manera, si $I = 10$ kA, $S = 44.7$ m y si $I = 50$ kA, $S = 127$ m. Siguiendo la aproximación de Anderson, se construye el diagrama mostrado en la **figura 2.1**, la cual muestra la disposición relativa de un conductor de tierra G y un conductor fase ϕ definido por el ángulo de blindaje α . Seleccionando alguna corriente I , los arcos son trazados con G y ϕ como centros y radio S correspondiente a I . La línea horizontal en la línea βS , indican que las guías que se aproximen en la cercanía de βS de la superficie de la tierra son dispuestos a terminar en la tierra en lugar de G o ϕ . De acuerdo a Anderson $\beta \approx 0.8$ para líneas de Extra Alto Voltaje (EHV) y 0.67 para líneas de Ultra Alto Voltaje (UHV). Esta línea y los dos arcos definen tres regiones, las guías con magnitud de corriente I que penetran el arco OP tenderán a terminar en el conductor de tierra, de la misma manera si la guía penetra la región QR ira a tierra. Si la guía penetra entre el arco PQ la corriente I será atraída al conductor fase y eso representa una falla de blindaje. Visto desde arriba, hay un campo desprotegido de ancho X que es paralelo a la línea de transmisión.

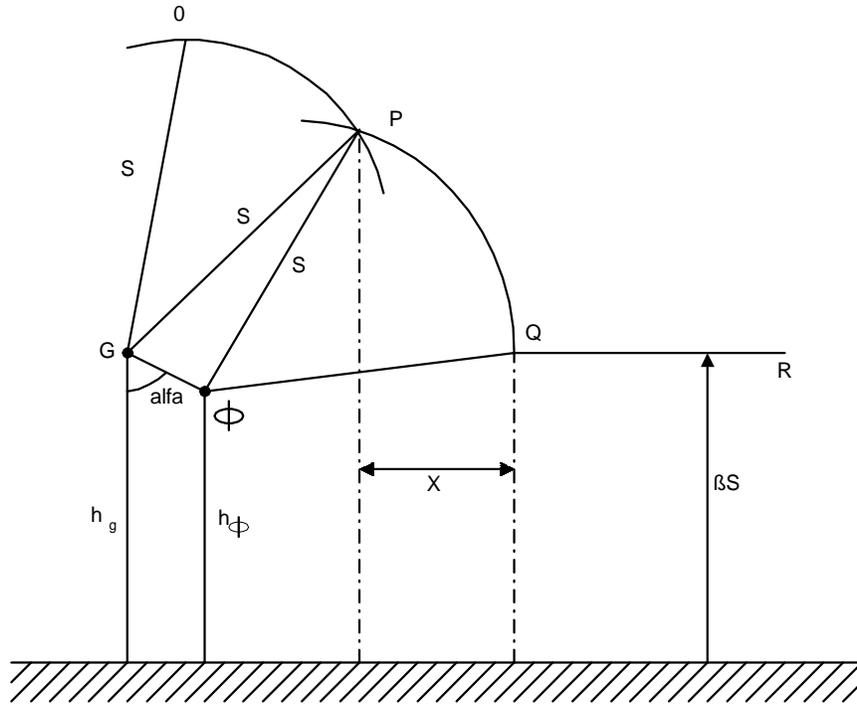


Figura 2.1. Vulnerabilidad de un conductor fase con blindaje inadecuado.

Para valores mayores de S que los mostrados en la **Figura 2.1**, correspondiendo a valores más altos de I , el arco PQ se reducirá. En algún valor de I que nosotros designamos I_{max} , los puntos P y Q coincidirán. No debe haber fallas de blindaje para magnitudes de corrientes de rayo por encima de la corriente I_{max} . Recíprocamente como S se reduce para corrientes más pequeñas que los escogidos por la **figura 2.1** el arco PQ y su proyección X incrementará. Sin embargo, hay una corriente que designamos I_{min} , bajo el cual una caída al conductor fase será de pequeña consecuencia debido a que generará un voltaje insuficiente para causar un flameo en la cadena de aisladores. En una primera aproximación este voltaje corresponde al voltaje de flameo crítico de la cadena de aisladores. De esta manera si despreciamos la impedancia del canal del rayo,

$$I_{min} = \frac{2V_{CFO}}{Z_0} \quad (2.2)$$

Donde V_{CFO} es el voltaje crítico de flameo del aislador y Z_0 es la impedancia de impulso de la línea. En esta ecuación arbitrariamente ignoramos el potencial a 60 Hz del conductor fase. El valor de X corresponde a I_{min} que llamaremos X_s .

Para que una falla de blindaje ocurra, la corriente debe estar en el rango $I_{min} < I < I_{max}$, y las caídas deben terminar dentro de una zona que designamos X_s . La probabilidad de un estado actual dentro de un rango particular se puede obtener de la distribución de probabilidad acumulativa de magnitudes de corriente. Es decir, la probabilidad $I_{min} < I < I_{max} = P_{min} - P_{max}$. [12]

2.3. ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE LAS SOBRETENSIONES Y LAS FALLAS QUE PRODUCEN.

Los sistemas eléctricos de potencia pueden estar sujetos a tres tipos de sobretensiones: las denominadas sobretensiones a la frecuencia del sistema, las debidas a descargas atmosféricas y las sobretensiones por maniobra de interruptores.

Las sobretensiones a la frecuencia del sistema son aquellas que se presentan como resultado de la variación de voltaje en condiciones normales de operación del sistema eléctrico de potencia, por ejemplo la salida brusca de cargas tienden a producir una variación del voltaje sin modificar la frecuencia del sistema.

Para el estudio de la Coordinación de Aislamiento en las instalaciones, esas sobretensiones tienen su aplicación principal en el diseño del aislamiento externo por efecto de contaminación.

Las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, también conocidas como sobretensiones por rayo, se presentan en las instalaciones eléctricas como resultado de las descargas atmosféricas (rayos). En general los rayos son corrientes cuya intensidad puede alcanzar para fines de aplicación eléctrica hasta los 200 kA [7] y es un fenómeno transitorio del orden de microsegundos. Este fenómeno es de origen natural, es decir no intervienen los sistemas eléctricos en la formación de las sobretensiones, que son producto de las diferencias de potencial entre la nube y la tierra o entre nubes y que produce la ruptura dieléctrica del aire, lo que se conoce como “canal de descarga” que es en realidad una concentración de electrones que constituyen la corriente del rayo.

Para entender los efectos de las sobretensiones por rayo sobre los equipos eléctricos y las instalaciones se reproduce la parte más representativa de la onda de sobretensión inducida en los conductores de la línea de transmisión, por medio de un equipo de laboratorio conocido como “generador de impulsos”.[11]

Las ondas de impulso por rayo aplicadas por los generadores de impulso a los objetos de prueba (cadena de aisladores, transformadores de potencia, cuchillas desconectadoras, etc.), permiten determinar información necesaria para los estudios de Coordinación de Aislamiento: Tensiones resistentes o de aguante, efecto de polaridad y variación en la forma de onda, curvas voltaje-tiempo en equipos eléctricos.

Adicionalmente el principio de dimensionamiento dieléctrico de las instalaciones con aislamiento en aire, como son las líneas de transmisión o las subestaciones convencionales, tienen su fundamento en la ruptura dieléctrica en aire para ondas de impulso.

Para determinar los valores de ruptura dieléctrica en aire, se simulan en principio condiciones de sobretensión por impulsos de rayo (para instalaciones de 300 kV o menores) o por impulso de maniobra (para instalaciones mayores de 300 kV), para configuraciones que representan el efecto de la sobretensión de fase a tierra como valores de referencia, posteriormente se hacen extensivas las pruebas a distancias entre fases.

El principio básico de estas simulaciones establece una diferencia entre ondas de frente rápido (por rayo), y ondas de frente lento (maniobra), esta diferencia no es solo en nivel de tensión, sino también en la metodología ya que para aplicar las sobretensiones a las configuraciones de electrodos en aire, se aplican métodos probabilísticos tanto en el número de eventos de prueba como en la interpretación de los resultados.[14,18]

2.4 DETERMINACIÓN DE LA RUPTURA EN AIRE POR SOBRETENSIONES DE RAYO.

Como ya se indico antes, estas pruebas se efectúan con un generador de impulsos (**figura 2.2**) ajustado al valor de la tensión de prueba requerida que se estima de acuerdo con el NBI correspondiente a la tensión nominal en prueba, es decir, si se prueba una configuración de electrodos para una instalación de 115 kV, entonces el nivel básico de aislamiento (NBI), puede ser por normas a 550 kV y a este valor le corresponde una cantidad que se puede determinar en el caso de la ruptura en aire, por medio de un concepto asociado a una distribución probabilística de Gauss (**figura 2.3**), y que se conoce como la tensión de 50% de probabilidad de flameo (V50%), también conocida como voltaje crítico de flameo.[14,18]

La prueba se desarrolla para distintas configuraciones de electrodos, pero la de referencia es la conocida como configuración punta-plano, que consiste en una varilla de bronce o cobre de ¼ de pulgada de diámetro, terminado en una punta y con una longitud de 0.5 a 1.0 m, y una placa de aluminio, cobre o bronce de 3 mm de espesor cuadrado de 60x60 cm.

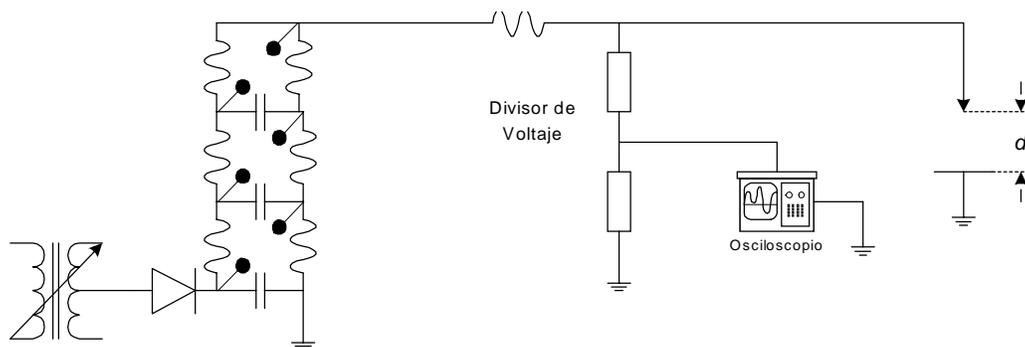


Figura. 2.2.- Generador de Impulsos.

La separación d entre electrodos se va ajustando según sea el nivel de tensión aplicado, de manera que se establece una relación de V50% para cada valor d (m) y se puede trazar una línea recta ajustada V50% vs. d , **figura 2.4**.

Durante la prueba, como es importante que la onda aplicada corresponda a la normalizada y que en la ruptura en aire se altera esta onda, entonces se acepta una cierta desviación en los tiempos de frente y de cola.

Aplicando esta onda con sus desviaciones aceptables a una configuración de electrodos punta-placa, se determina para cada valor de separación (**d**) entre electrodos el valor de V50%. Este valor tiene una cierta desviación con respecto al valor teórico y como se supone que corresponde a una distribución de Gauss, a esta desviación se le conoce como desviación estándar ($V_{50\%}$, σ), que representa un valor de tendencia central.

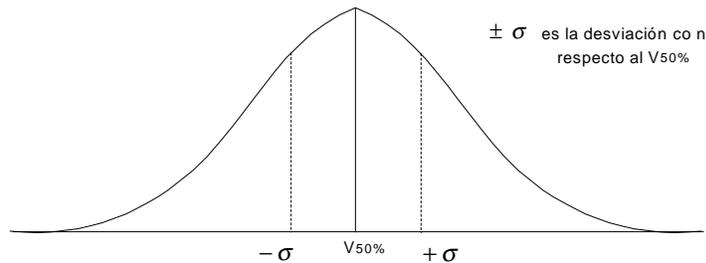


Figura 2.3.- Distribución probabilística de voltajes

El valor de $V_{50\%}$ se asocia a los aislamientos auto-recuperables con un valor que aparece en norma y que se fija como que en teoría tiene una probabilidad de falla de 10% que representa el valor de diseño, al menos en la fase inicial a este valor de tensión que da una probabilidad de falla del 10% o que tiene un valor de “tensión de aguante” de 90%, se le conoce como el nivel básico de aislamiento al impulso (NBI).

En el caso de la onda de rayo se le denomina al NBI por impulso de rayo y para cada punto se tiene una desviación de manera que se hace experimentalmente, se puede trazar una curva $V_{50\%}$ vs. **d**, que es lineal con una cierta pendiente.

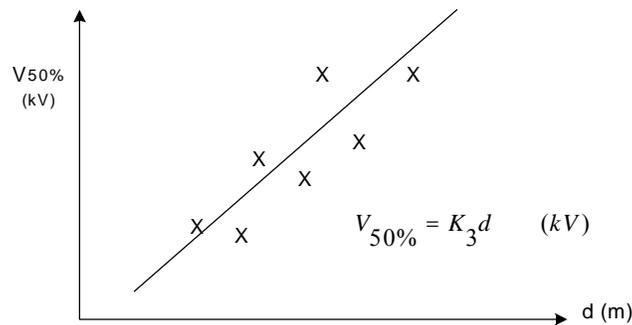


Figura 2.4.- Línea recta ajustada $V_{50\%}$ vs **d.**

El valor de la constante K_3 se ha determinado experimentalmente que esta entre 500-600 kV/m y la relación entre el $V_{50\%}$ para cada punto del experimento que da la tensión de 10% de probabilidad de falla se ha encontrado analíticamente que es:[11]

$$NBI = V_{50\%} \left(1.0 - \frac{1.28\sigma}{V_{50\%}}\right) \quad (2.3)$$

El valor de 1.28σ , tomando una $\sigma = 3\%$, corresponde al 10% de probabilidad de falla.

El valor de $\sigma = 3\%$ que es una cantidad teórica se fundamenta en la máxima desviación aceptada para los tiempos de frente y de cola de la onda de prueba. La probabilidad de flameo se obtiene de expandir la relación experimental.

$q^k = (1 - p)^k$ Donde k es el número de experimentos (impulsos).

Como este desarrollo dá un número de términos tan grande como sea el valor de k, el problema es determinar hasta que término se corta el polinomio. Para la prueba de electrodos en aire, se toma k =15 de prueba, se aceptan como valida para las siguientes relaciones de flameo:[11]

Para 2/15 pruebas	$P = q^{15} + 15pq^{14} + 105 p^2 q^{13}$
Para 3/3 pruebas	$P = q^3 + 3pq^2$
Para 3/9 pruebas	$P = q^3 + 9pq^2$

Para una $\sigma = 3\%$ la relación entre el NBI y el $V_{50\%}$ se establece como:

$$\text{NBI} = 0.961 V_{50\%} \quad (2.4)$$

Que indica en los términos de probabilidad para una curva de distribución normal, que el NBI o tensión de aguante de un aislamiento tiene una probabilidad de falla (teórica) del 10%.

Este concepto elemental se usa como referencia o base para la coordinación de aislamiento en instalaciones que usan como medio de aislamiento el aire y son menores de 300 kV, cabe aclarar que los desarrollos y experimentos se han hecho para las llamadas condiciones estándar de presión barométrica, temperatura y humedad.[14,18]

Presión barométrica 760mm de Hg (nivel del mar)

Temperatura 20°C

Humedad 11gr/m³

Estas condiciones son aplicables a pruebas de laboratorio y se hacen extensivas a los criterios de diseño de las instalaciones en aire para fines de coordinación de aislamiento. En estos casos se parte de información normalizada para sobretensiones de fase a tierra cuya ruptura dieléctrica se presenta por el efecto de descargas atmosféricas.

Para calcular el aislamiento en aire (distancia de aislamiento), se parte de la tensión nominal de la instalación y se le asocia el NBI correspondiente para después aplicar la relación de la configuración punta-placa, obtenida en forma experimental en laboratorios.

Para una instalación de 115 kV, el NBI = 550 kV y la tensión de 50% de probabilidad de flameo ($V_{50\%} = VCF$) se calcula con la relación:[18]

$$NBI = 0.961 V_{50\%} \quad (2.5)$$

$$V_{50\%} = \frac{550}{0.961} = 572.32 \text{ kV}$$

Para la configuración punta – placa se tiene que la relación entre $V_{50\%}$ y la distancia d de flameo es:

$$V_{50\%} = K_3 d \text{ (kV)} \quad (2.6)$$

donde d = distancia entre electrodos (m)

K_3 = constante de la configuración o de proporcionalidad. Cuyo valor esta dentro de 500-600 kV/m. Tomando un valor promedio de 550 kV/m.

$$d = \frac{V_{50\%}}{550} = \frac{572.32}{550} = 1.04 \text{ m}$$

Este valor corresponde a las condiciones estándar y a una probabilidad de flameo del 10% (tensión de aguante del 90%). En las aplicaciones prácticas, como en el caso de las líneas de transmisión a este valor se le incrementa un 5% de distancia por los herrajes de las cadenas de aisladores, es decir, si se tratara de una línea de transmisión que use aislador estándar de porcelana o vidrio con un diámetro de 25.4 mm y una altura de 146mm. Usando estos aisladores, para dar la distancia de 1.04 m se requerirían de:

No. De aisladores = Distancia Fase-Tierra / altura por aislador = $1040 / 146 = 7.12 \cong 7$ aisladores.

Esta distancia corresponde en teoría a una probabilidad de falla del 10%, si se redujera o se aumentara se tendría que determinar cual es la probabilidad de flameo que existirá, para esto se procede en forma contraria.

Supóngase que para este ejemplo, la distancia resulta ser 1.073 m, la correspondiente a $V_{50\%}$ es 1.04 m y a este valor le corresponde un $V_{50\%} = 572.32 \text{ kV}$. A un valor de 1.073 m le debe corresponder una probabilidad de falla menor o un valor de $V_{50\%}$ mayor.

Actualmente se tiene la tendencia a compactar las instalaciones que usan como medio de aislamiento el aire, esta posibilidad se basa en el concepto probabilístico de la tensión de flameo en aire pero siempre partiendo del valor obtenido experimentalmente para la tensión crítica de flameo ($V_{50\%}$).

Para un valor dado de tensión resistente, por ejemplo el correspondiente al NBI que tiene una probabilidad de flameo teórico del 10%, se puede establecer que corresponde a una variación de 1.28σ el valor de $V_{50\%}$.

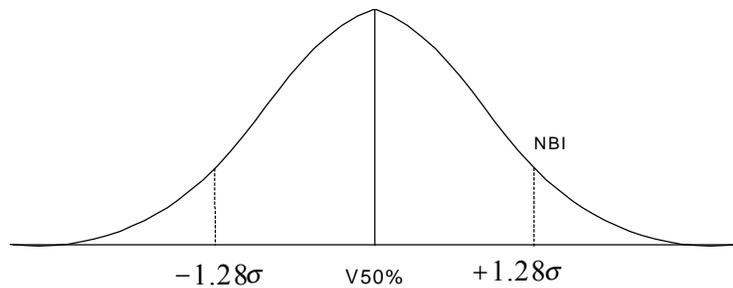


Figura 2.5.-Curva de distribución de voltajes.

Si $V_{50\%}$ es el valor de 50% de probabilidad de flameo, V_i es el valor de tensión de aguante o resistente con una probabilidad de falla distinta al 50%, pero se desea que sea menor y por lo tanto está determinada, se puede hacer uso de las curvas de probabilidad acumulativa de Gauss.

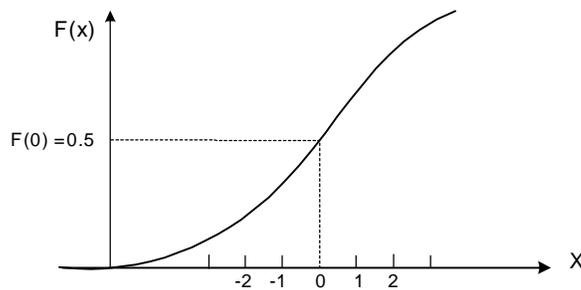


Figura 2.6.- Curva de probabilidad acumulativa.

Si σ es la desviación estándar entonces la variable normalizada se expresa como:[14]

$$Z = \frac{(X - \mu)}{\sigma} \quad (2.7)$$

Donde : X = es un valor cualquiera.

μ = es el valor medio teórico o de 50% de probabilidad.

σ = desviación estándar.

Para las variables usadas en los conceptos de aislamiento en aire o auto-recuperables. La variable normalizada

$$Z = \frac{(V_i - V_{50\%})}{\sigma} \quad (2.8)$$

Donde :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_i - V_{50\%})^2}{n-1}} \quad (2.9)$$

$$V_{50\%} = \sum_{i=1}^n \frac{V_i}{n} \quad (2.10)$$

Este procedimiento general se aplica para establecer el concepto probabilístico de tensión de aguante de diseño, de acuerdo con el ejemplo anterior se determinó que para una tensión nominal de 115 kV, NBI = 550 kV la distancia en aire de fase a tierra es 1.04 m, usando una onda de rayo. Suponiendo que en una instalación se disponga solo de 0.95 m de fase a tierra entonces cambia la probabilidad de flameo, es decir la tensión resistente.

$V_{50\%} = K_3 \mathbf{d}$; tomando $K_3 = 550 \text{ kV/m}$. Ahora con $\mathbf{d} = 0.95 \text{ m}$

$$V_{50\%} = 0.95 * 550 = 522.5 \text{ kV}$$

El valor correspondiente al original de NBI = 550 kV para la probabilidad de flameo, se determina como sigue:

Suponiendo $V_i = 550 \text{ kV}$

$$Z = \frac{(V_i - V_{50\%})}{\sigma}, \text{ para un impulso de rayo se toma } \sigma = 3\%$$

Para la onda de rayo se considera una desviación estándar de 1.28σ , es decir $\sigma = 1.28 * 15.67 = 20.05 \text{ kV}$, es decir;

$$Z = \frac{(550 - 522.5)}{20.05} = 1.3$$

La probabilidad de flameo correspondiente $P(z) = P(1.3) = 0.9 = 90\%$ de Flameo.

Para aplicaciones de diseño en coordinación de aislamiento, se manejan dos variables principalmente: las distancias en aire para instalaciones aisladas en aire y la tensión de aguante o soporte que se desea de acuerdo con un riesgo (probabilidad de falla).

Para esto se supone siempre que las tensiones disruptivas obedecen a una distribución de Gauss o normal.

El diseño del aislamiento en instalaciones se hace para valores menores de $V_{50\%}$, que tiene un valor $p(v) = 50\%$, es decir se establece un $p(v) = 0.90$ y se determina cual será $V_{50\%}$.

Una de las aplicaciones prácticas de la reducción en la tensión de aguante del aislamiento en aire se da por el efecto de la temperatura y la presión barométrica que como se sabe

cuando se modifica la presión y la temperatura la ley que gobierna el comportamiento de la ruptura dieléctrica en aire es la de los gases perfectos que llevada al concepto eléctrico se expresa por una ecuación que se denomina del factor de corrección por presión barométrica (b) y temperatura (t).

$$\delta = \frac{0.392 b}{273 + t} \quad (2.11)$$

Al nivel del mar $b = 760$ mm de Hg

A 2200 msnm, $b = 580$ mm de Hg.

Esto quiere decir que si para 115 kV de tensión nominal con NBI = 550 kV, al nivel del mar

$$V_{50\%} = 572.32 \text{ kV}$$

Es decir el aislamiento en aire flamea con un 50% de probabilidad cuando se llega a 572.32 kV con una distancia dieléctrica de 1.04 m. Con esta misma distancia, pero instalada a 2200 msnm, a una temperatura de 20°C, la tensión de probabilidad de 50% de flameo se modifica a un valor $V_{50\% \text{ No estándar}}$ que es igual:

$$V_{50\% \text{ No estándar}} = \delta_{\text{No estándar}} V_{50\%} \quad (2.12)$$



INCORPORACIÓN DE APARTARRAYOS EN LAS LÍNEAS.

3.0. INTRODUCCIÓN.

Inevitablemente los mejores esquemas de blindaje fallarán de vez en cuando, y algunas operaciones de maniobra (Switching), descargas atmosféricas y fallas podrán generar sobretensiones los cuales pueden ser potencialmente peligrosos para el aislamiento del equipo final o, para el caso de líneas de transmisión la salida de esta por flameo en la cadena de aisladores. Para proteger a los sistemas contra estas contingencias, una familia de dispositivos han sido desarrollados durante los años, diversamente conocidos como supresores de sobretensión, desviador de sobretensión y Apartarrayos (Lightning Arresters). Estos dispositivos son instalados en paralelo al objeto que será protegido y lo más cerca de este. Ellos pueden estar conectados permanentemente en ciertas situaciones o pueden entrar en operación por el flameo de un entrehierro en serie. El propósito es asegurar que bajo ninguna circunstancia el equipo protegido experimente un voltaje a través de sus terminales mayor que el que pueda soportar.

Los Apartarrayos representan hoy en día el dispositivo más utilizado para combatir los sobrevoltajes. Su nombre es de por si expresivo (Apartarrayos); comenzaron a utilizarse en los sistemas comerciales de transmisión de energía para drenar a tierra las sobretensiones debidas principalmente a las descargas atmosféricas. Posteriormente, con el surgimiento de voltajes de sistemas de operación cada vez más elevadas, se les comenzó a emplear para mandar a tierra también las sobretensiones internas, de allí que el nombre de descargadores de sobretensión sea el más adecuado (Surge Arresters).

En vista de que la función de este dispositivo en el sistema es derivar o descargar en forma rápida e inofensiva a tierra aquellas sobretensiones que ponen en peligro al aislamiento del sistema, el nombre descargador de sobretensiones se considera como el más acertado.

3.1. ORIGEN DE LOS APARTARRAYOS O SUPRESORES DE SOBRETENSIÓN.

El primer dispositivo utilizado para enviar a tierra las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión fue un simple explosor de puntas (Rod gap) **figura 3.1**, el cual presenta las siguientes desventajas.[7]

- La tensión de disparo depende en alto grado de la polaridad.
- Retraso de funcionamiento, debido al tiempo de formación del frente de la onda incidente. Para funcionar en 1 μ seg. la tensión de disparo debe ser de 1.5 a 3 veces superior al $V_{50\%}$.
- El arco no se extingue por si mismo, debido a la naturaleza capacitiva del dispositivo.

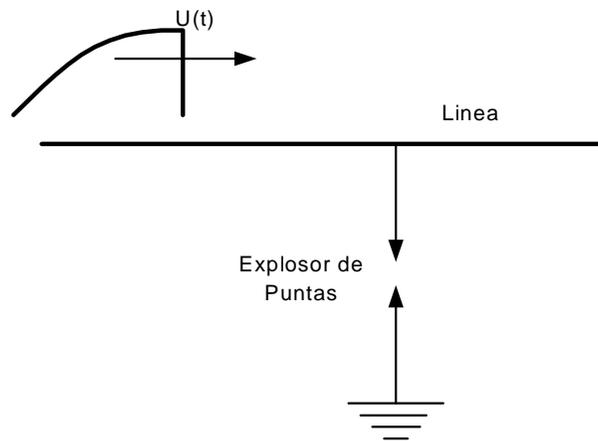


Figura 3.1. Representación de un explosor.

La operación de este dispositivo implica un cortocircuito en el sistema, el cual se ve alimentado por la corriente a 60 Hz del sistema.

Dentro de las ventajas de este dispositivo tenemos: Bajo costo y bajo valor de voltaje residual.

Debido a que este explosor sencillo como el de la **figura 3.1**, mostraba un comportamiento capacitivo, esto provocaba que la corriente de derivación cuando operaba el dispositivo se encontrará desfasada 90° con respecto al voltaje provocando las condiciones ideales para un reencendido de arco. Además la corriente no era limitada por lo tanto la corriente nominal también era derivado a tierra.

Esto motivó que al explosor se le agregará una resistencia óhmica en su extremo (**Figura 3.2**) conectado a tierra, para:

- Proporcionar al dispositivo un comportamiento óhmico-capacitivo, de manera que el desfase entre la corriente y el voltaje no llegará a 90° , eliminando con esto el re-arqueo.
- Limitar la trayectoria de la corriente nominal a tierra.

Con esto se observó un mejor comportamiento, aunque no del todo satisfactorio. Posteriormente se propuso que la resistencia no debería ser lineal, sino más bien indicar un comportamiento auto-válvular, es decir que su valor óhmico cambiara con el valor de la tensión presente entre el conductor y el dispositivo de protección. Este tipo de resistencia, se logró utilizando discos elaborados a base de Carburo de silicio.

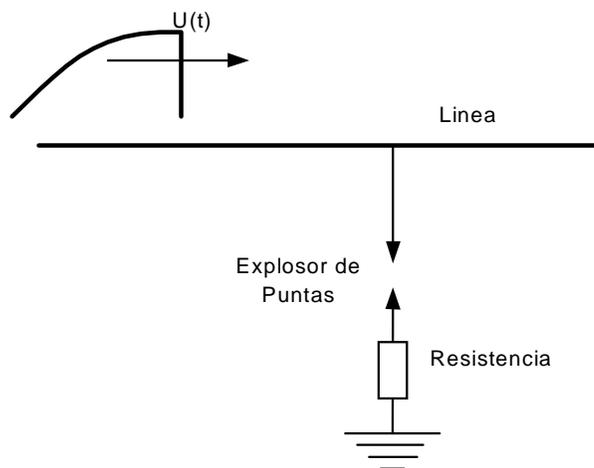


Figura 3.2. Explosor de puntas con resistencia óhmica.

Lo que se perseguía con esta nueva resistencia no lineal era que al actuar el explosor la tensión residual fuera limitada a un valor bastante bajo, pero al mismo tiempo bastante alto, de manera que el explosor pudiera extinguir el arco antes de que se restableciera la tensión pico de operación.

Además de las desventajas mencionadas anteriormente, los explosores provocan un cortocircuito al funcionar, el cual da origen a ondas de choque de frente vertical y amplitud igual al voltaje de descarga, las que entonces se propagan en ambos sentidos exponiendo innecesariamente al aislamiento próximo a fuertes esfuerzos dieléctricos.

Debido a estas características los explosores fueron desplazados paulatinamente de los sistemas de transmisión como protectores primarios. Actualmente su sitio lo ocupan los apartarrayos Auto-valvulares.

3.2.- NECESIDAD DE APARTARRAYOS EN LAS LÍNEAS AÉREAS.

Con el propósito de mejorar el comportamiento de las líneas de transmisión aéreas y disminuir las salidas debidas a rayos, las medidas para mejorar el comportamiento incluyen la disminución de la resistencia a tierra al pie de las torres usando múltiples conductores aterrizados e incrementando la resistencia de aislamiento, etc.

Sin embargo, estos métodos no son la solución final, especialmente en áreas de alta incidencia de rayos o alta resistividad del suelo.

Actualmente los apartarrayos de línea de transmisión aérea contienen elementos de óxido de Zinc (ZnO), que han sido utilizados como un método efectivo para prevenir fallas de línea debidas a rayos. Los apartarrayos de líneas de transmisión consiste de un elemento apartarrayos en paralelo con la cadena de aisladores. Este dispositivo puede actuar mejorando el comportamiento de la línea aérea ante el rayo previniendo el flameo de la cadena de aisladores.

Hay dos tipos de apartarrayos de línea: con entrehierros (Gapped) y sin entrehierros (Gapless), los cuales pueden estar contenidos en porcelana o polímeros. El uso de apartarrayos de línea alojados en polímeros es mas común.[19,20,21]

Los apartarrayos de línea requieren la siguiente capacidad:

- Los apartarrayos deben prevenir los flameos debidas a las caídas directas a las líneas aéreas.
- Los apartarrayos, con un índice de falla bajo aceptable, deben de ser capaces de resistir posibles corrientes y energías estresantes impuestas por caídas directas a las líneas aéreas.
- Un apartarrayos debe hacerle frente, así como el equipo de transmisión con respecto a la capacidad de descarga de energía del rayo, condiciones ambientales y resistencia mecánica contra atmósfera natural.
- Ya que este dispositivo es instalado en una posición por encima del suelo, se requieren consideraciones especiales en la posibilidad de explosión.

3.3. FALLAS DE LÍNEAS DE TRANSMISIÓN AÉREAS POR RAYO

En muchos países la principal causa de fallas o salidas de las líneas de transmisión son las debidas a descargas atmosféricas o rayo. En México de la estadística de 1999 dentro de la clasificación podemos identificar a las salidas de líneas por descargas atmosféricas, contaminación y quema de vegetación como las de mayor incidencia. Estas representan el 25% del total de las causas provocando aproximadamente el 78% de salidas.

La frecuencia de salidas por descargas atmosféricas fue la mayor, aunque disminuyo ligeramente en comparación con el año pasado.[5]

Varias medidas han sido investigadas con el propósito de mejorar el comportamiento de las líneas aéreas ante los rayos. Además de estos, los apartarrayos de líneas de transmisión han mostrado ser muy efectivos.

3.4 CONDICIONES DE LOS APARTARRAYOS DE LÍNEAS AÉREAS

Las condiciones requeridas por los apartarrayos de líneas aéreas son:

1. Ellos deben proteger contra las fallas en el instante de la caída del rayo y ser capaces de resistir la energía estresante con bajo riesgo de falla del apartarrayos.
2. Puedan ser instalados en las torres de las líneas de transmisión existentes.

Considerando las necesidades básicas dadas anteriormente, los apartarrayos deben tener las siguientes propiedades:

a) Desde el punto de vista Funcional.

Deben suprimir los sobrevoltajes a través del aislamiento de la línea y prevenir estos flameos en el instante de la caída del rayo. Bajo condiciones normales deben actuar como aisladores. En caso de su sobrecarga no debe constituir un cortocircuito permanente de fase a tierra.

b). Desde el punto de vista de Aplicación.

En caso de su sobrecarga no deberá causar riesgos severos para los otros equipos o personal cercano.

Debe tener las siguientes características: larga vida, resistente contra el ambiente natural, fácil de instalar en las torres, suficiente claro, libre de interferencia corona y fácil mantenimiento e inspección.

3.5. PARÁMETROS DEL RAYO NECESARIOS PARA EL DISEÑO DE APARTARRAYOS DE LÍNEAS AÉREAS

Las líneas aéreas pueden ser severamente expuestas a los efectos de las caídas del rayo. Los apartarrayos de línea están siendo instalados en líneas aéreas con el fin de disminuir el número de flameos causados por rayo, proporcionando una disminución de corrientes de rayo el cual podría producir flameos al aislamiento.

Los apartarrayos instalados a través de la cadena de aislador de líneas aéreas tienen que ser lo suficientemente fuerte para resistir la severidad de los impulsos de corriente. Los parámetros de interés son por lo tanto corriente pico, multiplicidad y continuidad de las corrientes.

Además un parámetro importante es la carga la cual es alcanzada durante la descarga, con el fin de determinar apropiadamente la capacidad de descarga de energía del apartarrayos.

3.5.1. Corrientes Picos del Rayo

La función de probabilidad de la corriente pico del rayo han sido presentados en diferentes referencias, para esto es importante notar que muchas distribuciones muestran valores de corrientes picos medios del orden de 30-40 kA.[10,13]

La distribución estadística de la corriente pico (x) es representada por una aproximación normal – logarítmica definida como:

$$f(x) = \frac{1}{(2\pi)^{1/2} \beta X} e^{-(z^2/2)} \quad (3.1)$$

$$z = \frac{\ln(x/M)}{\beta} \quad (3.2)$$

Donde M es el parámetro del valor mediano y β es el parámetro de la pendiente o desviación estándar logarítmica.[8]

Siguiendo la caída del rayo a una línea de potencia, la corriente del rayo puede estar distribuida en diferentes formas a través de diferentes porciones de la línea dependiendo del punto de incidencia. En primera instancia, una caída del rayo que penetra el sistema de blindaje y termina en un conductor fase, provocaría dos ondas viajeras de corriente de la misma magnitud y polaridad, propagándose en direcciones opuestas. Cuando una de estas ondas llega a una torre, puede flamear al aislamiento y viajar a tierra. Dependiendo de la impedancia de impulso y de la resistencia al pie de la torre, algunas corrientes pueden continuar su viaje más allá de la torre a lo largo del conductor. Si un apartarrayos de impulso es conectado a través del aislamiento, los flameos en las torres son evitados y la protección de todas las fases con apartarrayos de línea pueden asegurar contra los rayos.

Si por el otro lado, el rayo cae en un conductor de guarda, esta se va a tierra cuando llega a la torre pero puede involucrar también varias torres en el proceso. Si la potencia alcanzada en la punta de la torre debida a la impedancia de impulso de la torre y tierra, excede el nivel de aislamiento de las fases ocurre un flameo inverso. Nuevamente esto puede ser evitado instalando apartarrayos de línea. Para este caso particular los conductores inferiores son más probables a flamear debido al reducido acoplamiento con los conductores de tierra.

De las discusiones anteriores, la corriente involucrada en la operación del apartarrayos es generalmente mucho menor que la corriente en el canal del rayo. De cualquier modo, la corriente pico del apartarrayos, para líneas sin hilo de guarda con una alta resistencia al pie de la torre, puede ser algunas veces la mayor parte de la corriente del rayo total.

Las prácticas de Coordinación de aislamiento consideran a los apartarrayos con corrientes de rayo de descarga nominales que dependen del voltaje del sistema. En cualquier caso, tales corrientes no exceden los 20 kA, el cual parece estar en línea con algunas observaciones en líneas prácticas y con simulaciones analíticas, para que los fabricantes no produzcan apartarrayos con altas corrientes de descarga nominal, a menos que sea una necesidad especial.[10]

3.5.2. Efectos de las Caídas Múltiples.

Más del 70% de los rayos a tierra tienen caídas múltiples, típicamente 3 o 4 caídas con intervalos de tiempo entre caídas de 30 a 50 ms, mucho más pequeño que el tiempo térmico constante de los apartarrayos, el cual puede estar en el orden de minutos y hasta horas. Algunas veces, puede tener una separación espacial importante por ejemplo varios kilómetros, entre caídas dentro de un rayo tal que no toda la energía disponible del rayo puede ser absorbida por un solo apartarrayos. Pueden imponerse tensiones adicionales en el apartarrayos después de la ocurrencia del rayo causando un flameo inverso en el aislamiento, seguido por operaciones de maniobra para eliminar con éxito la falla.

3.6. PRINCIPIO DE OPERACIÓN Y ANÁLISIS DE APARTARRAYOS DE LÍNEA.

3.6.1. Principio De Operación General

En líneas de transmisión con apartarrayos de línea, la corriente del rayo fluye a través de los apartarrayos debido al incremento en el voltaje entre las terminales del apartarrayos causado por la caída del rayo a la torre, a los hilos de guarda o a las fases.

Los apartarrayos contienen elementos de óxido de zinc los cuales tienen excelentes características $V - I$ no lineales. Cuando un voltaje aplicado es bajo, solo una corriente muy pequeña fluye a través del elemento debida a su alta resistencia. Con un incremento de voltaje aplicado, los elementos del apartarrayos conducen una gran corriente debido a su resistencia reducida. Como resultado el voltaje a través del apartarrayos no llega al rompimiento y no ocurre el flameo.

El elemento esencial de los apartarrayos de impulso es la alta no linealidad del voltaje ya que depende del resistor llamado varistor. Los elementos varistores están conectados juntos en serie así es que ellos tienen un alta impedancia al voltaje nominal del sistema, pero para sobrevoltajes la impedancia es mucho menor.

En el pasado los elementos del varistor fueron hechos de SiC. Los elementos de ZnO, llamados varistores de óxidos metálicos (MOV), muestran una mayor no linealidad que los elementos SiC y han reemplazado considerablemente a los elementos de SiC en apartarrayos más modernos.

Los principales límites de la aplicación de apartarrayos de impulso de ZnO (MOSA) son:

- La operación del voltaje máximo continuo del sistema al cual está conectado.
- Los sobrevoltajes máximos temporales del sistema al cual está conectado.
- El nivel de protección que tiene el apartarrayos para proporcionar al equipo que está siendo protegido.
- La amplitud de la corriente de descarga y la energía absorbida en el apartarrayos causando el calentamiento.
- La estabilidad térmica del apartarrayos.

Se han desarrollado dos tipos de apartarrayos para manejar los parámetros limitantes. Un tipo es el apartarrayos con un gap externo llamado Gapped. El otro tipo es un apartarrayos sin gap, llamado Gapless, sin ningún entrehierro externo en serie o paralelo

3.6.1.1. Esquemas de Conexión de los Apartarrayos

Los apartarrayos con entrehierro (Gapped) son utilizados para proteger a la línea solo contra descargas atmosféricas. El entrehierro en serie es ajustado para que flamee antes que la cadena de aisladores ante una sobretensión atmosférica, pero no para las sobretensiones de maniobra que alcancen la línea de transmisión. Los voltajes residuales son más bajos que en los apartarrayos sin entrehierro (Gapless), haciéndolo viable para la Coordinación de Aislamiento con menos cadenas de aisladores.

El entrehierro previene la degradación de los bloques de óxido de zinc (ZnO), debido al flujo continuo de corriente a 60 Hz y permite que el servicio de mantenimiento en línea viva sea fácil y seguro. Este arreglo es prescrito también para líneas que atraviesan áreas contaminadas.

Los apartarrayos sin entrehierros (Gapless) pueden ser utilizados para controlar tanto sobrevoltajes de maniobra como por rayo a lo largo de la línea de transmisión. Esta conexión asegura la distribución de la energía del rayo entre varios apartarrayos instalados en la misma sección de línea sin ningún tiempo de retraso significativo.

Esta característica es importante para el trabajo severo impuesto en los apartarrayos durante las tormentas de nube por tal fenómeno como descargas múltiples o descargas en los conductores de la línea sin blindaje. La energía dividida entre los apartarrayos distribuidos a lo largo de la línea también es asegurado para sobrevoltajes de maniobra.

Los apartarrayos sin entrehierro tienen la ventaja de ser identificables visualmente en caso de falla de la unidad al usar dispositivos de desconexión de línea. El mantenimiento en línea viva puede ser hecho sin peligro con herramientas de desconexión apropiadas.

Los esquemas de puesta del apartarrayos deben tomar en cuenta las fallas de blindaje y flameos inversos.

Cuando el ángulo de blindaje es deficiente o cuando no hay hilos de guarda, las fases más vulnerables a las descargas son normalmente las más convenientes para la instalación de apartarrayos (es decir, las fases inferiores para un conductor con arreglo vertical y las fases externas para una disposición del conductor horizontal).

Para el conductor vertical la protección contra flameos inversos es más efectivo cuando los apartarrayos son instalados en la fase inferior, debido a que el aislador de esta fase esta sujeta a tensiones más altas debido al débil acoplamiento entre los hilos de guarda y los conductores fases en esta posición.

La construcción fundamental de estos dos tipos de apartarrayos de línea se muestran a continuación.

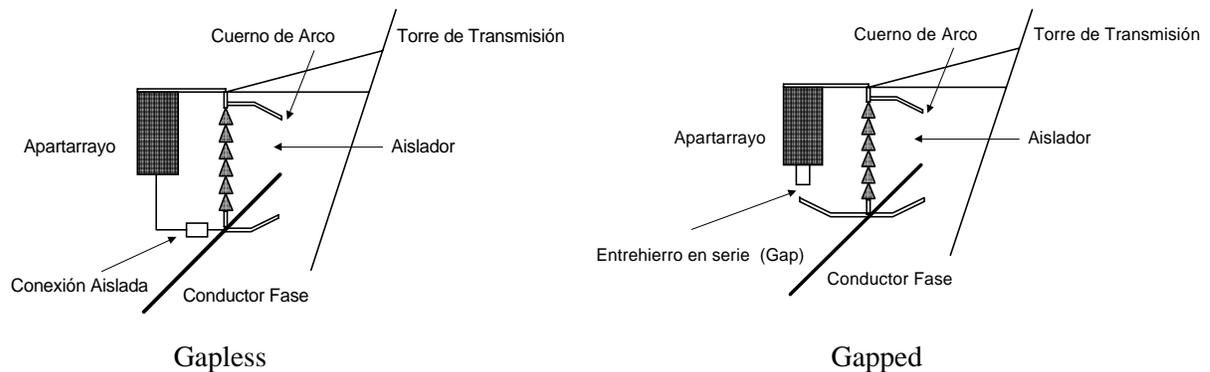


Figura 3.3. Concepto básico de Apartarrayos de Línea de Transmisión

Los requisitos esenciales del alojamiento del apartarrayos son: contener un elemento de óxido de Zinc y mantener un mecanismo de presión de alivio para la seguridad en el instante de la falla debida al mal funcionamiento de un apartarrayos, además esta debe tener suficiente resistencia mecánica considerando los esfuerzos mecánicos durante la operación.

El sobrecalentamiento de un elemento de óxido de zinc puede causar una falla disruptiva. Esto es necesario para controlar la explosión de un apartarrayos dentro de sus límites de seguridad.

El elemento de ZnO es sensible a la humedad por lo tanto es necesario tener buenos sellos, especialmente contra el ingreso de aire. Es necesario proporcionar buenos contactos sobre el lado del elemento de ZnO, tomando en cuenta la expansión térmica.

3.6.2. Apartarrayos de sobretensión sin entrehierro (Gapless).

3.6.2.1. Construcción.

El apartarrayos contiene uno o más elementos de ZnO en un contenedor resistente al ambiente, el cual puede ser fabricado de porcelana, polímero u otro material aislante, conteniendo y soportando los elementos. Las dimensiones del contenedor deben tenerse en cuenta para los efectos de contaminación y enfriamiento (refrigeración). La construcción generalmente proporciona sellos empaquetados para prevenir el ingreso de humedad, y orificios de presión de alivio en caso de falla.[19,20,21]

Se han desarrollado dos tipos de construcción. Uno es un contenedor de barra larga conteniendo elementos de ZnO. Este tipo de apartarrayos es diseñado para ser instalados en paralelo con una cadena de aisladores. El otro tipo es un apartarrayos de línea tipo suspensión que hace las funciones eléctricas y mecánicas de un aislador.

3.6.2.2. Aplicación en Líneas Aéreas.

La ventaja de los apartarrayos sin entrehierros (Gapless), incluyen una rápida respuesta a los sobrevoltajes sin ningún tiempo de descarga atrasado asociado a los entrehierros aún en condiciones de clima adverso.[22]

Un apartarrayos sin entrehierro está continuamente energizado conduciendo pequeñas corrientes aún en voltajes de operación nominal. El sistema de potencia está continuamente expuesto a la falla del apartarrayos. Un cortocircuito debido a la falla del apartarrayos causará una salida de la línea. Por lo tanto se requiere de un dispositivo de desconexión automática para proporcionar la desconexión del apartarrayos del sistema.

3.6.2.3. Especificación de Parámetros.

Las especificaciones requeridas de los apartarrayos de sobretensión sin entrehierros son las siguientes:

- a). Un voltaje de operación máximo continuo (MCOV).
- b). Nivel de voltaje.
- c). Corriente de descarga nominal.
- d). Capacidad de resistencia a la corriente de impulso (Por maniobra, rayo).
- e). Corriente de presión de alivio.

- f). Voltaje resistivo del alojamiento aislante (incluyendo contaminación).
- g). Voltaje residual de los elementos de oxido de zinc.
- h). Características $i - t$ de la desconexión del apartarrayos.
- i). Especificación mecánica del alojamiento.

3.6.3. Apartarrayos con Entrehierro en Serie Externo (Gapped).

3.6.3.1. Construcción.

Un apartarrayos con entrehierro en serie externo es básicamente un apartarrayos sin entrehierro en serie con un entrehierro externo. Los apartarrayos pueden tener un nivel bajo de energía así como los apartarrayos de subestación, debido a esto no están expuestos a impulsos de maniobra o sobrevoltajes temporales, ocasionando que estos sobrevoltajes no inicien el flameo. Además, debido a que los elementos del apartarrayos no están energizados permanentemente no es necesario un dispositivo automático de aislamiento, para desconectar el apartarrayos fallado del sistema. El apartarrayos es montado sobre la torre o la cruceta de la estructura de la línea.[19,20,21]

El entrehierro externo esta entre el extremo del apartarrayos y el conductor de la línea. Cuernos de arcos convenientes previenen daños a las terminales del apartarrayos o el conductor. En apartarrayos muy grandes suspendidos por encima de un conductor de una cruceta y sujeto a la desviación por el viento, el cuerno de arco en el conductor puede ser instalado para mantener un entrehierro constante. Es necesario un método para ajustar el entrehierro de acuerdo al voltaje de flameo deseado.

3.6.3.2. Aplicación en Líneas Aéreas.

Los apartarrayos de sobretensión con entrehierro externo son apropiados para reducir los flameos del aislamiento de la línea. El entrehierro externo puede ser coordinado con el nivel de aguante al impulso de rayo y maniobra del aislamiento de la línea.

Con el propósito de asegurar la fuerza del aislamiento del apartarrayos de línea los siguientes elementos deben ser considerados:

- a). Características de Coordinación de Aislamiento para un entrehierro en serie y un cuerno de arco.
- b). Coordinación de un voltaje residual de un elemento apartarrayos y las características de flameo de un cuerno de arco.
- c). Coordinación del voltaje total que aparece a través de la combinación del entrehierro serie y un apartarrayos con las características de flameo de la cadena de aisladores con sus hornos de arcos posibles.

3.7. COMPORTAMIENTO DE LOS APARTARRAYOS EN LÍNEAS AÉREAS.

Considerando las tensiones en los apartarrayos de sobretensión de óxidos metálicos instalados en líneas aéreas, las siguientes categorías son requeridas:

- 1). Flameo inverso de un conductor fase a un conductor de tierra o torre golpeado directamente por un rayo.
- 2). Choques directos a conductores fases, incluyendo fallas de blindaje en líneas blindadas por conductores de tierra.
- 3). Sobretensiones inducidas causadas por choques de rayos a otros objetos o la tierra en la cercanía de la línea.

Es útil considerar varias categorías de líneas aéreas para que el apartarrayos de línea pueda ser considerado. La tabla 3.1 muestra las tensiones características causadas por rayo en las líneas aéreas. Por otra parte, la tabla 3.2 muestra la protección contra sobrevoltajes o la mitigación de las tensiones del rayo en las líneas aéreas.[10,23]

3.7.1. Flameos Inversos

La caída de un rayo a un conductor de blindaje o a la torre se descargará a tierra a través de la resistencia al pie de las estructuras. Si la resistencia de la base o la corriente del rayo o ambas son altas, el potencial en la punta de la torre puede ser lo suficientemente alto para exceder el nivel de aislamiento de la línea e iniciar el flameo inverso en los conductores fase. Normalmente el flameo se interrumpiría sacando a la línea fuera de servicio, interrumpiendo el suministro.

La instalación de los apartarrayos de línea permite a las torres descargar en los conductores de fase sin interrumpir el suministro. La sobretensión inyectada en los conductores fase pueden ser descargados en las torres adyacentes, además se ajusta con el apartarrayos de línea a lo largo del sistema para proteger convenientemente el equipo final. De esta manera el flameo inverso se prevendrá y no tendrá ninguna interrupción en el suministro.

No siempre es necesario instalar apartarrayos de línea en todas las estructuras. Los grandes beneficios son derivados de la instalación de apartarrayos en las estructuras con mayor probabilidad de sufrir flameos inversos, comúnmente debido a la alta resistencia en la base. Sin embargo es una práctica normal instalar apartarrayos en las tres fases, de otra manera los flameos inversos en las líneas desprotegidas resultarán en una interrupción del suministro y frustraría el objetivo de los apartarrayos instalados en las otras fases.

3.7.2. Fallas de Blindaje

Una falla de blindaje ocurre cuando un rayo cae en el conductor fase en lugar del conductor de blindaje. Los apartarrayos de línea instalados en las estructuras desvían la corriente de sobretensión a tierra sin flamear el aislamiento de la línea. Los apartarrayos deben ser instalados generalmente en todas las estructuras, de lo contrario los flameos en estructuras desprotegidas pueden causar interrupciones en las que los apartarrayos están proyectados para prevenir.

Tabla 3.2. Protección contra sobrevoltajes o mitigación de las tensiones por rayo en Líneas Aéreas.[10]

Esfuerzos o Tensiones	Mitigación con Apartarrayos	Factores críticos	Procesos de mitigación alternativa.
Altas energías por descargas directas a líneas sin hilos de guarda.	Colocar apartarrayos en la fase (es) más expuesta de las estructuras más expuestas. Colocar apartarrayos en las otras fases adyacentes si la alta resistencia al pie de la torre provoca flameos inversos desde la fase golpeada.	Los apartarrayos deberán resistir energía de la descarga y altas corrientes del rayo. La gran variedad de resistencia al pie de la torre pueden estresar excesivamente algunos apartarrayos.	Instalar hilos de guarda para interceptar las descargas.
Baja energía de una descarga directa originada por falla de blindaje, también ocurren en líneas sin blindaje.	Colocación de apartarrayos en las fases donde se espera una falla por blindaje. (alto riesgo de rayo, alta resistencia al pie de la torre)	Ángulo de blindaje.	Recalibrar hilos de guarda o instalar más para mejorar la eficiencia del blindaje.
Flameo inverso. Baja inyección de energía en la fase de la estructura.	Colocación de apartarrayos en estructuras expuestas en donde las fases probablemente sufran flameos inversos.	La baja energía es adecuada debido a que la mayor energía se descarga en los hilos de guarda aterrizados.	Reducir la resistencia al pie de la torre mejora la resistividad aumentando el aislamiento en las fases.
Sobretensiones inducidas > aislamiento de la línea.	Instalar apartarrayos en todas las fases de cada estructura que estén expuestas a altas sobretensiones inducidas (es decir líneas que atraviesan entre árboles y estén blindadas por descargas directas pero que experimenten altas inducciones).	La baja energía es adecuada debido a que la descarga se divide por varios apartarrayos y estructuras.	Incrementar el aislamiento de la fase por encima del nivel de las sobretensiones inducidas.
Sobretensiones inducidas < aislamiento de la línea.	Instalar apartarrayos en equipos asociados para protegerlos contra daños por sobretensiones que entran.	Si el aislamiento de la línea >> aislamiento clasificado del equipo, los efectos de descargas directas remotas pueden presentar tensiones altas en el equipo final.	Reducir el aislamiento de la línea a valores solo por arriba de las sobretensiones inducidas para limitar altos impulsos causados por descargas directas.

Si se espera que la falla de blindaje solo afecte uno o dos conductores fases es necesario ajustar los apartarrayos a aquellas fases solamente protegiendo a la línea contra el efecto de falla de blindaje.

En una línea sin blindaje todas las caídas que terminen en la línea pueden ser considerados como falla de blindaje a menos de que los apartarrayos estén instalados en los conductores fases afectados y el conductor afectado es colocado para proteger las otras fases. Frecuentemente las líneas sin blindaje existen en sistemas de distribución.

La principal diferencia entre los apartarrayos en líneas con blindaje y sin blindaje es:

- La falla de blindaje en líneas blindadas es asociado con corrientes de rayo bajo, imponiendo bajas tensiones en los apartarrayos.
- Los choques a las líneas sin blindaje son de un rango total de probabilidad de corrientes picos de rayo, imponiendo altas tensiones en los apartarrayos.

3.7.3. Sobretensiones Inducidas.

Las caídas de rayos a tierra cercanos a las líneas inducen voltajes en los conductores fases. En líneas desprotegidas con niveles de voltaje por debajo de 50 kV y en líneas blindadas con niveles de voltaje menor que 20 kV, la cercanía de los rayos induce voltajes en los conductores fases comparables con el nivel de impulso del aislamiento de la línea y pueden causar flameos.

Generalmente, los apartarrayos de línea pueden proteger a los sistemas de voltajes inducidos de la misma forma como en fallas de blindaje y caídas directas [24]. Sin embargo, si los niveles de aislamiento de todas las líneas son de 300 kV o más para sistemas aterrizados efectivamente se espera que las sobretensiones inducidas no causen flameos en el aislamiento de la línea y los apartarrayos no podrán mejorar la respuesta de una línea más allá de las sobretensiones inducidas.

Tabla 3.1. Tensiones características causadas por rayo en líneas aéreas.[10]

Aislamiento Característico	Con blindaje o sin blindaje	Ejemplos Típicos	Comportamiento del rayo	Tensiones
Nivel de resistencia al impulso clasificado. BIL < Voltajes inducidos	Con blindaje BIL < 100 kV	Línea de 10 – 12 kV Blindado BIL = 75 kV	Las Sobretensiones inducidas pueden causar flameos. La mayoría de las caídas a los hilos de guarda causan flameos inversos. Las caídas directas por falla de blindaje también provocan flameos inversos.	Sobretensiones frecuentes suficientes para causar flameos. Flameos probables en más de una estructura. Cada flameo se asocia con una energía relativamente baja.
	Sin blindaje BIL < 300 kV	Línea de 20 – 24 kV Sin blindaje BIL = 125 kV	Las Sobretensiones inducidas pueden causar flameos. Todas las caídas del rayo a la línea son directas a los conductores fases.	Altas energías asociadas con las caídas directas a las líneas. Probabilidad de flameos en más de una estructura.
BIL > Voltajes inducidos. Los sobrevoltajes por maniobra no son significativos.	Con blindaje BIL > 100 kV	Línea de 20 – 24 kV Blindado BIL = 125 kV o Una línea de 145 kV BIL = 650 kV	Las Sobretensiones inducidas no son significativas. La resistencia al pie de la torre (TFR), tiene un factor significativo en el flameo inverso. Las caídas directas por falla de blindaje dependen del ángulo de blindaje, pero las corrientes que caen normalmente son bajas.	La energía inyectada en los conductores fase es relativamente baja.
	Sin blindaje BIL > 300 kV	Línea de 20 – 24 kV Sin blindaje BIL = 300 kV o Una línea de 69 kV BIL = 450 kV	Las Sobretensiones inducidas no son significativas. Todas las caídas a las líneas son directas a los conductores fases. Los flameos a las estructuras donde caen los rayos directamente a la línea pueden estar seguidos por flameos inversos a las otras fases si TFR es alto, causando fallas de varias fases.	Se asocian altas energías con las caídas directas a las líneas.
Nivel de aislamiento determinado por sobrevoltajes de maniobra y rayo.	Con blindaje BIL > 300 kV	Línea de 400 kV Blindado BIL = 1200 kV	Una alta resistencia al pie de las torres en algunas estructuras puede resultar en flameos inversos.	La energía inyectada en los conductores fases es relativamente baja.
	Sin Blindaje		Todas las caídas del rayo a la línea son directas a los conductores fases. Los flameos son probables en las torres a pesar del alto nivel de aislamiento.	Altas energías asociadas por las caídas directas a las líneas.



METODOLOGÍA PROPUESTA.

4.0 INTRODUCCIÓN.

Todo sistema de potencia tiene la función de entregar energía eléctrica a los usuarios de una manera continua y confiable, para esto se cuentan con métodos de tal manera que el suministro sea continuo. Esto se logra evitando en lo posible los disturbios más probables que se presentan dentro del sistema mediante la coordinación de aislamiento.

Normalmente uno de los disturbios inevitables y ajeno al sistema son las sobretensiones debidas a las descargas atmosféricas, ya que el sistema por sus características de operación se encuentra expuesta a estos disturbios. Para estos casos los métodos tradicionales que se encargan de disminuir el efecto son los hilos de guarda y la disminución de la resistencia al pie de la torre.

Tomando como referencia los reportes de líneas de transmisión elaborados por la Comisión Federal de Electricidad (CFE) [5], las líneas de transmisión presentan un mayor índice de salidas (fallas * km²/año), debidas a las descargas atmosféricas a pesar de contar con sus sistemas tradicionales de protección. Una alternativa de solución a los altos índices de salidas de líneas es la colocación de apartarrayos de óxidos de zinc en las torres de las líneas de transmisión los cuales presentan ciertas características para soportar grandes cantidades de energía, debidas a las sobretensiones por rayo que se presentan en las líneas,[25,26,27] por tal motivo en este capítulo se propone una metodología para la aplicación de apartarrayos de línea, el cual desarrollará los criterios que se deben seleccionar de manera adecuada para proponer configuraciones en la disposición de apartarrayos y minimizar las salidas de líneas debidas a descargas atmosféricas.

Actualmente en México no existe ninguna metodología elaborada para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión, el cual indique cuales son los criterios y procedimientos necesarios para la ubicación de apartarrayos en las estructuras de las líneas de transmisión.

En México se tienen líneas de transmisión protegidas con apartarrayos pero en fase de observación y de prueba con el objetivo de analizar el comportamiento de las líneas bajo diferentes condiciones de operación.[22]

4.1. PROTECCIÓN CON APARTARRAYOS EN SUBESTACIONES.

La instalación de los apartarrayos obedece a la necesidad que presentan los equipos o partes de la instalación de protección contra sobretensiones.

Normalmente el uso de apartarrayos se presenta en las subestaciones para proteger equipos en sistemas de C.A. como: transformadores, reactores, entradas a las subestaciones (en los alimentadores de las líneas), bancos de capacitores, máquinas eléctricas (generadores), o en sistemas de C.D. como: válvulas del sistema de rectificación, entradas de líneas, filtros de los reactores, reactores de amortiguamiento, puente de rectificación.

Para la selección de un apartarrayos se consideran algunos valores como básicos, estos se refieren a los voltajes y corrientes de descarga.

Voltajes en el sistema	Características a considerar en el Apartarrayos.
-------------------------------	---

- | | |
|---|---|
| * Tensión máxima en el sistema a 60 Hz. | * Máxima tensión de operación continúa. |
| * Tensión transitoria de frente rápido (rayo) | * Tensión transitoria de frente rápido. |
| * Tensión transitoria de frente lento (maniobra) | * Energía. |
| * Corriente de descarga (Onda de 8/20 μ seg.) | * Sobrepresión |

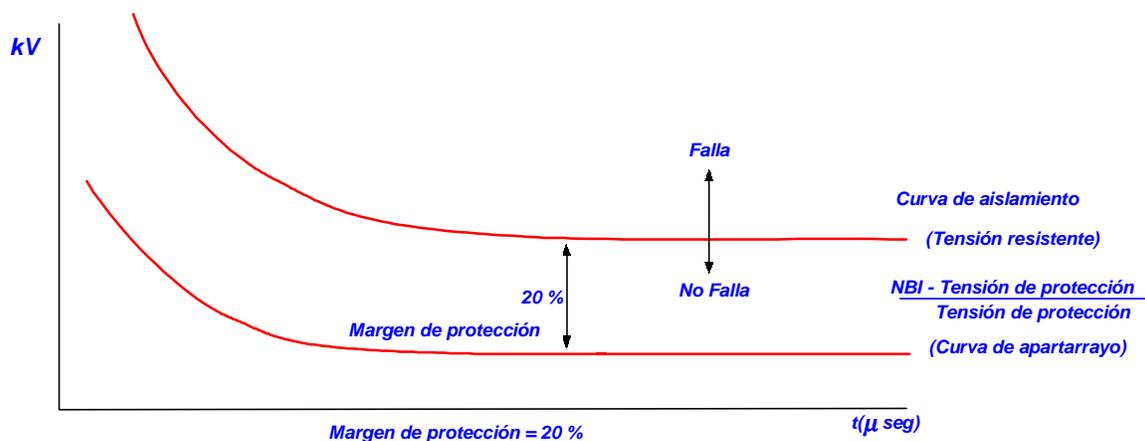


Figura 4.1. Curva voltaje-tiempo del aislamiento.

En la gráfica de la curva (figura 4.1) voltaje-tiempo, se tiene la curva del aislamiento y en la misma la del apartarrayos, lo que determina el límite crítico de la tensión resistente del aislamiento es una curva voltaje-tiempo, cualquier valor de tensión por arriba de esta curva produce falla, cualquier valor por debajo de esta curva, pero en las inmediaciones tiene una cierta probabilidad de falla.

La función del apartarrayos es la de reducir esta cierta probabilidad de falla mediante lo que se conoce como “ el margen de protección “ que lo determina la curva “ Voltaje-tiempo” del apartarrayos. Existe un valor de norma recomendado para el margen de protección, expresado como un porcentaje mínimo con respecto al aislamiento por proteger y que es del orden del 20% .[14]

4.2. METODOLOGÍA DE LA SELECCIÓN DE APARTARRAYOS.

Los apartarrayos constituyen el elemento base para la coordinación de aislamiento en las protecciones de subestaciones y equipo eléctrico que la constituyen. La selección de estos resulta determinante para una adecuada protección. La selección de las características nominales del apartarrayos resulta un compromiso entre el nivel de protección y su capacidad de soportar sobretensiones.

Si en la selección de un apartarrayos se incrementa su tensión nominal con respecto al valor requerido (calculado), entonces se presenta la siguiente condición:

Se incrementa la capacidad del apartarrayos para soportar tensiones temporales es decir, es la máxima tensión de operación continua, produce menor conducción de corriente, aumentando la vida del apartarrayos, se reduce el margen de protección.

La selección de tensiones nominales inferiores a los valores calculados, presenta condiciones opuestas a las anteriores y en el caso particular de aumento en el margen de protección, que representa una “aparente” ventaja, se debe ser cuidadoso, ya que conduce con mayor frecuencia a la máxima tensión de operación continua, lo cual reduce su vida, esta solución se aplica solo en aquellos casos en que se conozcan muy bien que variaciones de voltaje tiene el sistema y la efectividad de la conexión a tierra.

El no estar seguro de estos factores, aumenta el número de fallas del apartarrayos ya que reduce su tiempo de vida.

En general se puede adoptar el criterio de que la selección de la tensión nominal de un apartarrayos, se hace tomando como referencia la forma de conexión a tierra de los neutros de la instalación.

$$V_n = k V_{max} \quad (4.1)$$

La forma más común de conexión es el neutro sólidamente aterrizado, para el cual

$$k = 0.8 \quad (4.2)$$

4.2.1. Selección de los apartarrayos.

La selección de los apartarrayos se hace de acuerdo a los siguientes pasos:

- **Obtener los parámetros del sistema.**

Máxima tensión de operación continua.

Forma de conexión a tierra de los neutros.

Los voltajes que aparecen en los nodos por fallas de la línea a tierra, estos se comparan con las máximas tensiones de operación continua.

- **Como parámetros complementarios:**

El nivel céraunico en el punto de la instalación o densidad de rayos a tierra (DRT).

La probabilidad de la corriente del rayo y su valor.

La pendiente de la corriente del rayo

La Impedancia característica de la línea.

- **Verificación de las condiciones normales de operación del sistema.**

Máxima tensión que aparece durante los rechazos de carga.

Voltajes que aparecen en la red en condiciones de contingencia.

* Pérdida de carga.

* Pérdida de transmisión

* Pérdida de generación

- **Selección de la tensión nominal.**

4.2.1.1. Obtención de los parámetros del sistema.

1.- La máxima tensión de operación continua.

Este es un valor que se reporta de la experiencia de operación del sistema, pero con frecuencia se desconoce en cada punto de la red, ante esta situación generalmente se recomienda suponer este valor con un 5% ó 10% superior a la tensión nominal.[8]

2.- Condiciones durante la falla a tierra.

El disturbio más común en un sistema eléctrico de potencia, lo representa la falla de línea a tierra, la magnitud de tensión transitoria que se presenta en las dos fases no falladas durante la falla a tierra, depende de la forma de conexión de los neutros a tierra y de los elementos capacitivos instalados en la red. Estos valores se expresan en términos de la relación $R0/X1$ y $X0/X1$. [14]

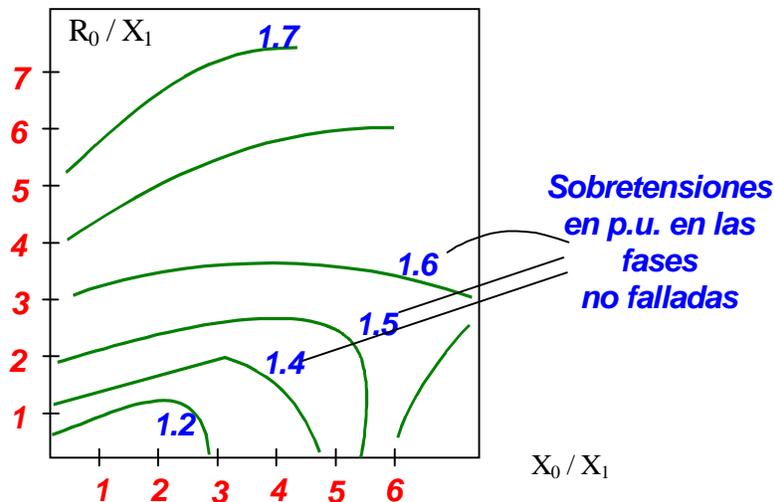


Figura 4.2. Factor de falla a tierra.

En los sistemas con neutros sólidamente conectado a tierra, la sobretensión que aparece de fase a neutro en las fases no falladas es 80% de la tensión de fase a fase, siempre que la duración del disturbio no exceda de 3 segundos.

En los sistemas con neutros flotantes o neutro resonante, el factor de sobretensión se toma como el 100%.

Los valores anteriores se deben verificar para cambios en la forma de conexión a tierra, por ejemplo, desconexión de neutro a tierra ó bien neutros de transformadores con terciarios aterrizados a través de reactancias.

3.- Voltajes que aparecen por fallas del sistema.

El rechazo de carga es una condición que se presenta en forma normal durante pruebas de puesta en servicio de las unidades generadoras o bien cuando operan las protecciones de disparo automático de generación, dependiendo del valor de carga al cual se presenta esta condición existirá una elevación de tensión a la frecuencia del sistema, que puede ser mayor o igual a la máxima tensión de operación continua.

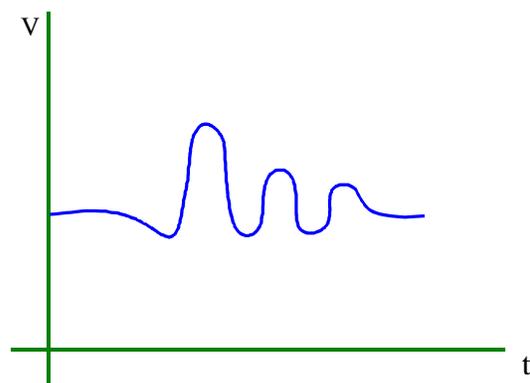


Figura 4.3. Oscilaciones de tensión durante el rechazo de carga.

4.2.1.2. Selección de la tensión nominal de los apartarrayos.

El primer paso es la determinación de la máxima tensión continua que se puede hacer de acuerdo a dos reglas:

- 1) Tomar como máxima tensión de operación continua (MTOC) al valor de tensión máxima de diseño del equipo.

$$MTOC_{FF} = V_{\max F-F} \quad (4.3)$$

$$V_{nFF} = KeV_{\max F-T} \quad (4.4)$$

- 2) Tomar como máxima tensión de operación continua (MTOC) al rango 5% - 10% sobre la tensión nominal del sistema.

4.3. LA FILOSOFÍA DE LA PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES.

En la actualidad el uso de apartarrayos de óxidos metálicos constituye el principal medio de protección contra sobretensiones de frente rápido y de frente lento en los sistemas eléctricos de potencia, sin embargo la protección de la subestación contra estas sobretensiones, no es solo una cuestión de seleccionar el apartarrayos. Es necesario considerar algunos otros factores como:

- Punto de instalación del apartarrayos (consideración de la longitud del cable de conexión).
- El margen de protección considerando la posibilidad de una redacción en los niveles de aislamiento.
- En el caso de ondas de frente rápido, la cercanía de la descarga o sobretensión.
- La pendiente del frente de onda de la corriente del rayo.
- El efecto de energía con ondas de frente lento.

4.3.1. Punto de instalación del apartarrayos.

El punto de instalación del apartarrayos para la protección del equipo eléctrico en una subestación queda determinado por dos factores:

- El criterio del margen de protección adoptado.
- La disposición física del equipo.

En un principio un apartarrayos debe proteger en primer término a los equipos con aislamiento no recuperable y mientras más cerca del equipo se instalen mayor es la protección que proporcionan, ya que se considera prácticamente la caída de tensión del propio apartarrayos, en tanto que a mayor distancia influye esta caída de tensión, la longitud del cable de conexión del apartarrayos al equipo protegido, este concepto es más notorio en los apartarrayos tipo autovalvular que opera con valores determinados de pendiente de frente de onda.

4.3.2. Margen de protección.

El margen de protección se define como la diferencia entre la tensión resistente de un aislamiento y el nivel de protección del apartarrayos.

Este valor de acuerdo a normas se puede expresar en por ciento referido al nivel de protección del apartarrayos.

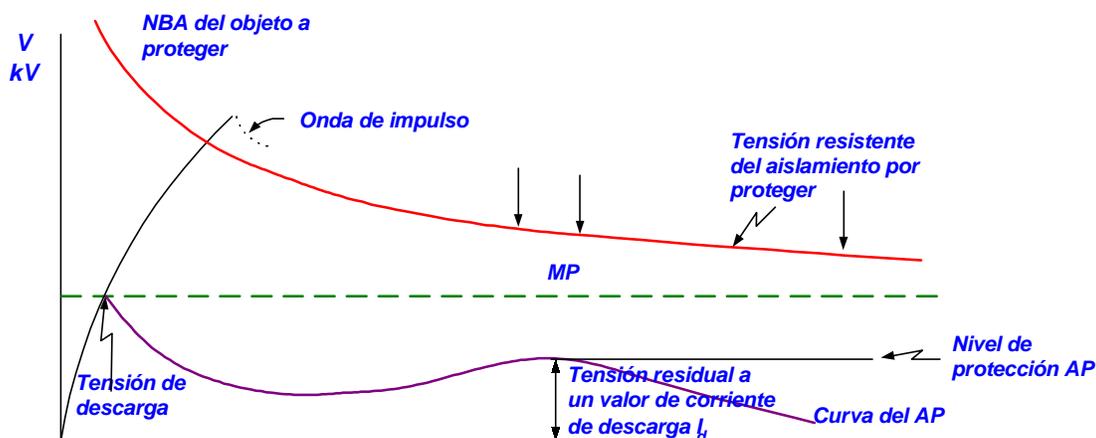


Figura 4.4. Tensión resistente del aislamiento.
Nivel de protección del apartarrayos.

(MP) Margen de protección

$$MP = \frac{NBA - \text{Tensión de protección}}{\text{Tensión de protección}} * 100$$

El margen de protección se asocia a la distancia de instalación o de protección del apartarrayos. El concepto básico establece que el margen de protección mayor se obtiene a la menor distancia con respecto al objeto protegido y el problema es entonces encontrar la distancia óptima considerando la disposición del equipo en la subestación y los equipos por proteger.

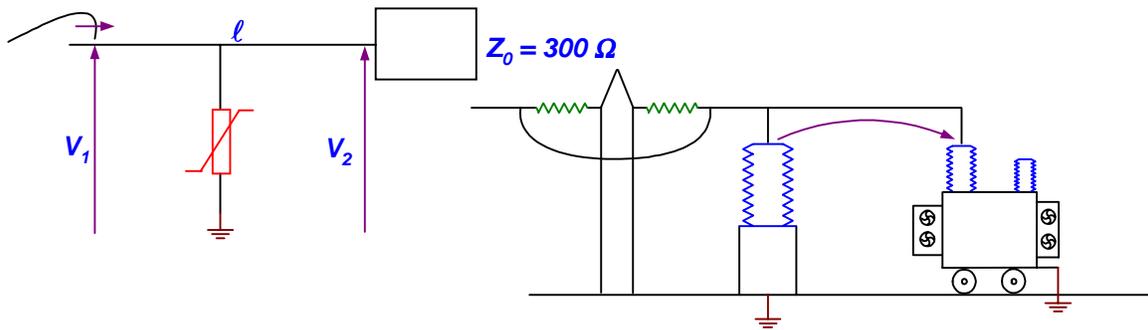


Figura 4.5. Distancia de instalación o de protección del apartarrayos.

L = distancia del AP al objeto protegido.

V_1 = Tensión residual del AP

V_2 = Esfuerzo de tensión o tensión aplicada que se obtiene en el objeto protegido.

$V_2 = V_1 + \frac{2SI}{v}$: v : Velocidad de propagación de la onda en $m/\mu s$, en el caso de líneas aéreas es igual a la velocidad de la luz ($300 m/\mu seg.$)

S : pendiente del frente de onda expresada en kV/ms

Su rango se encuentra $1000-2000 kV/ms$

4.3.3. Energía resistente del apartarrayos.

Un aspecto importante a considerar en la aplicación de los apartarrayos es su capacidad para absorber energía con ondas de frente lento (manobra o recierre de interruptores) que se debe principalmente a la energía acumulada en el circuito en el cual se encuentran instalados y a efectos internos de los interruptores como es el fenómeno de arqueo o re-encebado de arco entre contactos de un polo de interrupción.

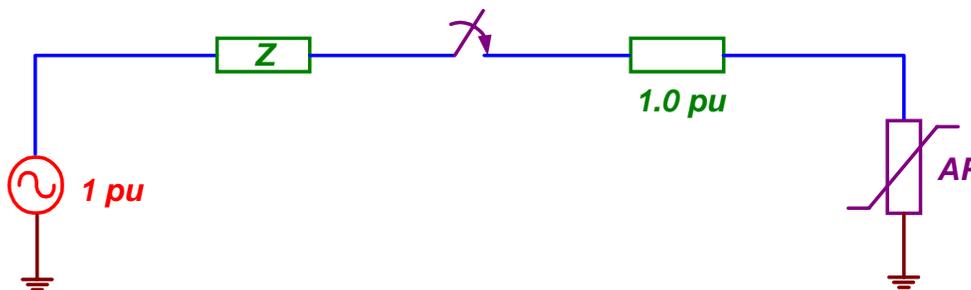


Figura 4.6. Energía resistente del apartarrayos por maniobra de interruptores.

Se supone que el interruptor se cierra en el valor cresta de la onda senoidal, el tiempo de recorrido de la onda es rápido comparativamente con el de cierre del interruptor que además del propio tiempo del interruptor, maneja una onda senoidal de baja frecuencia. Los parámetros que intervienen en la operación de maniobra que afectan al apartarrayos se muestran en la figura 4.7.

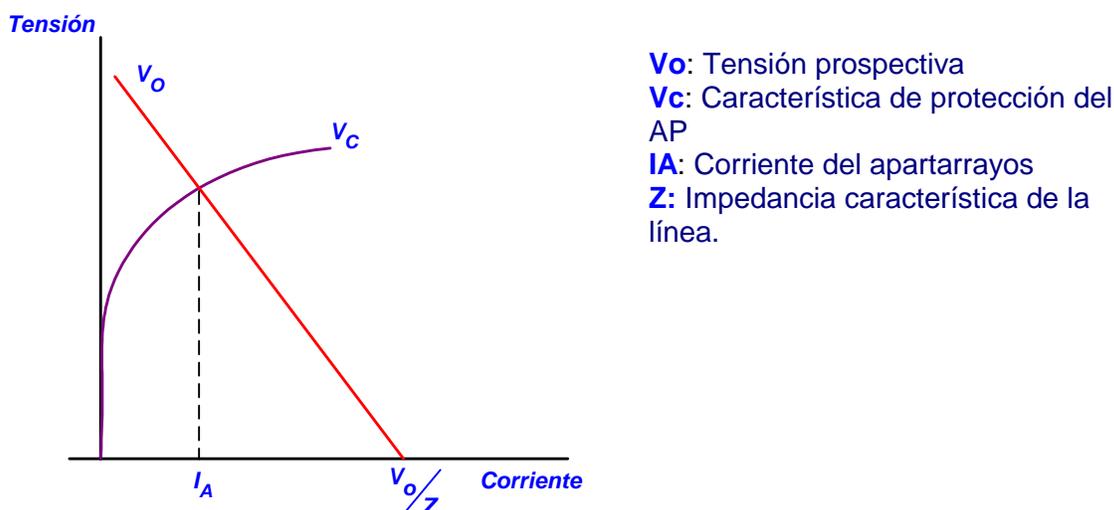


Figura 4.7. Parámetros que intervienen en la operación de maniobra.

La tensión prospectiva se refiere al valor en por unidad de la sobretensión que se puede presentar. Algunos valores típicos para ciertas tensiones nominales. Se refieren a las cantidades a que se limitan.

Tensión del sistema (rangos nominales)	Impedancia característica (Z) ²	Sobretensión prospectiva sin apartarrayos (Vo)
Kv	(Ω)	Kv
< 145	420	2.6
145 - 245	380	2.6
262 – 420	350	2.0

En un sistema de 420 kV, una sobretensión prospectiva de 2.0 pu equivale a:

$$V_o = \frac{420 * \sqrt{2} * 2}{\sqrt{3}} = 686 \text{ kV}$$

El valor de capacidad de energía que puede soportar un apartarrayos, se refiere al efecto térmico que se produce cada vez que descarga o tiene varias descargas sucesivas sin que exista enfriamiento entre estas. Se calcula entonces a partir de los siguientes factores.

- La sobretensión prospectiva del sistema (V.)
- La impedancia característica de la línea en que se conecta el apartarrayos (Z)
- El tiempo recorrido de la onda en la línea (T) que es el cociente de la longitud de la línea entre la velocidad de propagación de la onda.
- El número de descargas consecutivas (n) sin enfriamiento.

La metodología para la selección de apartarrayos mostrada anteriormente se toma como base para proponer la metodología en este trabajo, considerando que en este caso el apartarrayos será utilizado para proteger el aislamiento (NBI) proporcionado por la cadena de aisladores de aquellas líneas que tienen el problema de mayor número de salidas de líneas por descargas atmosféricas.

4.4. METODOLOGÍA PROPUESTA.

La metodología que se empleará para la aplicación de apartarrayos en líneas de transmisión propone los siguientes pasos:

1. Identificar a las líneas más importantes que atraviesen por zonas con densidad de rayos a tierra es decir, zonas con actividad de rayos y expuestas a descargas atmosféricas, mediante mapas de densidad de rayos.[6]

2. Revisar sus índices de salidas de líneas debidas principalmente a descargas atmosféricas. (Fallas * Km² / año).[5]
3. Si los índices de salidas son altos, se revisan cuales son los valores que se tienen de la resistividad del terreno o suelo y al pie de la torre de la línea.
4. Por otro lado si los índices de salidas son bajos, se propone realizar ajustes tanto a los ángulos de blindaje así, como la disminución de la resistencia al pie de la torre.
5. Revisar la resistividad del terreno considerando la densidad de rayos a tierra (DRT).
6. Simulación mediante la ayuda del ATP/EMTP de la línea bajo distintas condiciones de operación.
7. Propuesta de esquemas de protección de líneas de transmisión con apartarrayos de impulso.

4.5. CONSIDERACIONES GENERALES DEL MÉTODO.

Para el desarrollo de la metodología se consideran los siguientes puntos:

Datos geométricos de la línea.

- Número de conductores fase.
- Resistencia del conductor en C.D. (con efecto piel) o a Frecuencia inicial (sin efecto piel).
- Reactancia independiente de la frecuencia por unidad de distancia (metros / pie).
- Radio externo (cm o pulgadas) de un conductor.
- Radio interno de un conductor.
- Distancia horizontal entre conductores (m o pie) desde el centro del haz a una línea de referencia definido por el usuario.
- Altura vertical del haz de conductores en la torre (m o pies).
- Altura vertical del haz a la mitad del claro (m o pies).
- Distancia entre conductores en un haz (cm o pulgada)
- Posición Angular de un conductor del haz, medido en sentido contrario a las agujas del reloj de la línea horizontal.
- Número de conductores en un haz.

Nivel de tensión de la línea.

Se refiere al voltaje Nominal del sistema, el cual se define como un valor nominal para designar a un sistema la categoría de voltaje dado.[8]

Los niveles básicos de aislamiento por rayo o maniobra.

BIL: Valor cresta de un impulso de rayo estándar para el cual el aislamiento presenta un 90% de probabilidad de resistir (o un 10% de probabilidad de falla), bajo condiciones especificas aplicables para aislamientos auto-recuperables.[11]

BSL: Valor cresta de un impulso de maniobra o interrupción (Switching) estándar para el cual el aislamiento exhibe un 90% de probabilidad de resistir (o un 10% de probabilidad de falla), bajo condiciones específicas.[11]

Disposición de conductores.

Normalmente en los sistemas trifásicos, las líneas muestran tres disposiciones básicas de los conductores.

Disposición Horizontal: Esta disposición de conductores minimiza la altura, tiene un mayor ancho y en consecuencia mayor derecho de vía; se utiliza en altas tensiones y grandes vanos (las torres bajas son requerida por menor momento y son de menor tamaño y peso que con otras disposiciones).

Es el diseño natural en sistemas de circuito simple, si se requiere doble se hacen dos líneas independientes.

Disposición Vertical: Esta disposición da una máxima altura, se utiliza para derechos de vía estrechos dando por resultado torres más altas, presentando un impacto visual alto.

Como ventaja permite circuitos dobles en una torre (doble terna), considerando estrictamente que en esta disposición no es equivalente a dos líneas, ya que la probabilidad de que ambos circuitos fallen es mayor que cuando se tienen estructuras independientes.

Disposición Triangular: Con esta disposición las alturas son intermedias, los derechos de vía son un poco más anchos, las alturas ligeramente menores que para el caso anterior.

Distancia entre torres

La distancia que existe entre torres de una línea de transmisión.

Número de circuitos

Normalmente el número de los circuitos dependen de las disposiciones de los conductores en las torres. Pudiendo ser circuitos sencillos de tres conductores y circuitos dobles formado por dos circuitos sencillos independientes.

4.6. DESCRIPCIÓN DE LA METODOLOGÍA.

En esta sección se muestra paso a paso la metodología desarrollada, como primer paso de la metodología se identifican cuales son las líneas que atraviesan por zonas con actividad de rayos, mediante los mapas de densidad de rayos a tierra elaborados por la CFE-IIE, figura 4.8. [6]

La densidad de rayos a tierra es un parámetro muy importante ya que es determinante en el diseño del blindaje de las líneas de transmisión, debido a que si la línea se encuentra en una zona con alta densidad de rayos indica que la línea experimentará una mayor cantidad de rayos aumentando con esto la probabilidad de falla de línea.

Como segundo punto se revisan los índices de salidas de líneas (Fallas x Km² / año) debidas a descargas atmosféricas de aquellas líneas que sean de mayor importancia y a las que se desee disminuir las salidas. Para esto es necesario contar con registros de salidas de líneas de transmisión, en la siguiente tabla 4.1 se muestra una parte de algunos registros de líneas con mayor índice de salidas debidas a descargas atmosféricas principalmente.[5]

No.	LINEA	DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	KMS	IFLT
1	TULA-POZA RICA II	11	203.00	5.42
2	TAPEIXTLES-MAZAMITLA	10	180.00	5.56
3	POLYUC-XUL HA	10	152.00	6.58
4	LERMA-MERIDA	9	174.00	5.17
5	VALLADOLID-P. DEL CARMEN	5	166.00	3.01

TABLA 4.1. Relación de salidas de líneas de transmisión por falla propia.

Donde IFLT es el índice de falla de la línea de transmisión y se determina con la siguiente expresión:

$$IFLT = \frac{No.de fallas \times 100}{Km de línea} \quad (4.5)$$

Como tercer paso si los índices de salidas son altos, se revisan los valores de resistividad del suelo y se muestran dos casos considerando la densidad de rayos a tierra (DRT) alta y baja. De normas [36], se especifica que un valor de resistividad del suelo adecuado debe ser menor que 100 Ω.m, ya que para valores mayores a esta aumenta la probabilidad de falla por flameo de la cadena de aisladores debido a la alta resistencia al pie de la torre.

Esto se muestra con la siguiente expresión que determina la resistencia al pie de la torre.

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{a}\right) \text{ ohms} \quad (4.6)$$

donde:

ρ = Resistividad del terreno (Ω.m)

l = longitud del electrodo (m)

a = radio del electrodo (m)

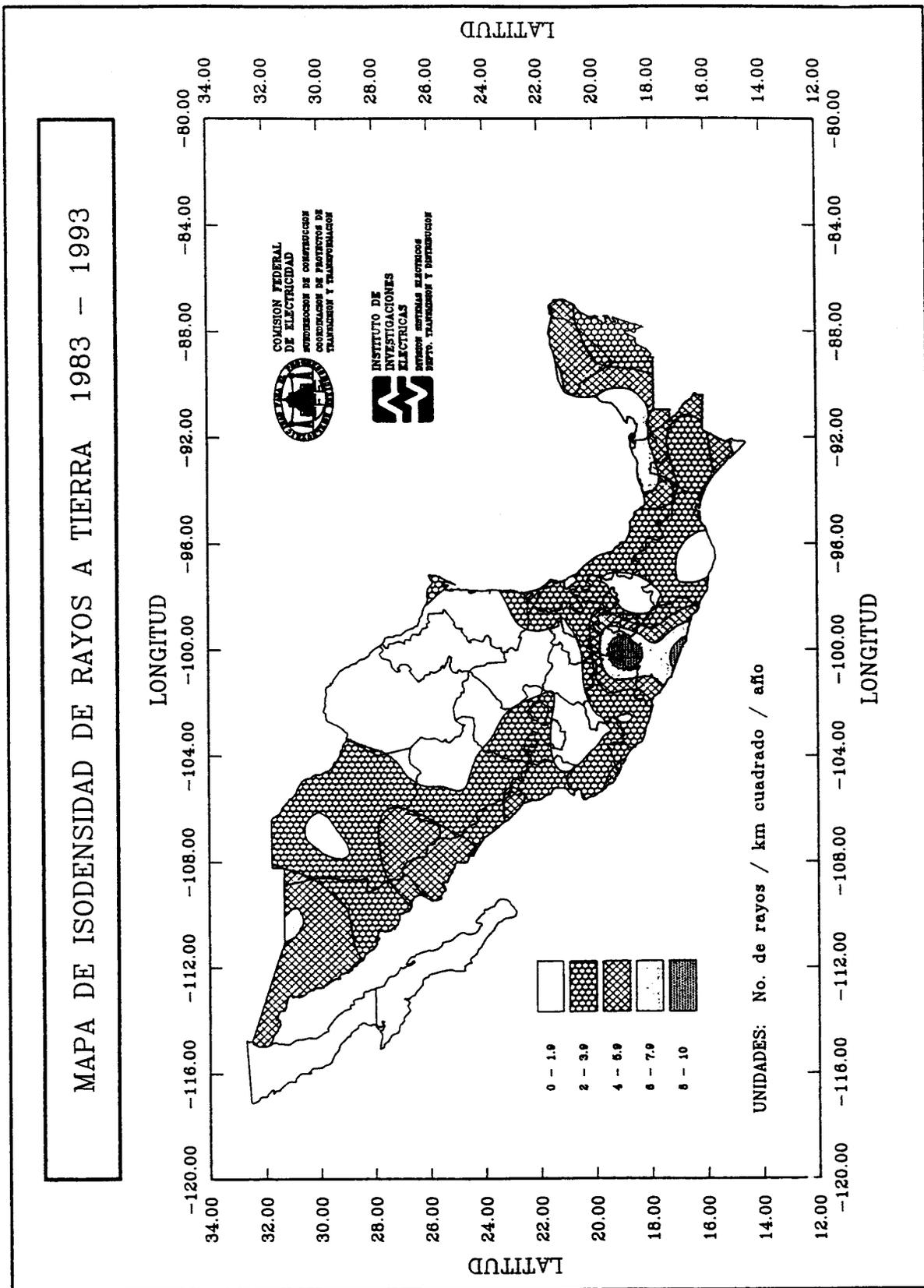


Figura 4.8. Mapa de densidad de rayos.

Cuando se utilizan dos o mas electrodos en paralelo la expresi3n de la resistencia al pie de la torre cambia de la siguiente forma:

$$R_t = \frac{\rho}{2\pi l} \ln\left(\frac{2l}{A}\right) \quad (4.7)$$

donde:

$$A = \sqrt{a \cdot d} \quad (2 \text{ electrodos en paralelo})$$

$$A = \sqrt[3]{a \cdot d^2} \quad (3 \text{ electrodos en paralelo})$$

$$A = \sqrt[4]{a \cdot d^2 \cdot \sqrt{2}} \quad (4 \text{ electrodos en paralelo})$$

En el cuarto paso si el 3ndice de salidas es bajo, una soluci3n para mejorar o disminuir las salidas es ajustar los 3ngulos de blindaje y disminuir la resistencia al pie de la torre.

Como quinto paso se revisa la resistividad del terreno considerando la densidad de rayos a tierra present3ndose los siguientes puntos.

Si la resistividad del suelo es menor a 100 $\Omega \cdot m$, se considera la DRT, si esta es baja la probabilidad de flameos de la l3nea tambi3n lo es, esto debido a que la zona es de baja actividad de rayos por lo tanto con baja resistividad del suelo, la resistencia que se puede obtener al pie de la torre es lo suficientemente bajo para soportar y mandar a tierra una descarga al hilo de guarda.

Por el contrario si la zona es de alta actividad de rayos la probabilidad de flameos es media debido a la cantidad de rayos que pueden caer sobre las fases m3s expuestas de la l3nea de transmisi3n.

Por otro lado si la resistividad del suelo es mayor 100 $\Omega \cdot m$, se considera nuevamente la DRT, si esta es baja la probabilidad de flameos es media debido a la alta resistividad del suelo lo cual provoca que la resistencia al pie de la torre sea alta pudiendo presentarse un flameo inverso.

En el caso extremo si la DRT es alta asociado con una alta resistividad del suelo, la probabilidad flameos es alta.

Una vez revisado los puntos anteriores se procede con la representaci3n de la l3nea de transmisi3n mediante el programa ATP/EMTP. Los datos necesarios para este an3lisis son los datos geom3tricos de la l3nea, la resistencia al pie de la torres, separaci3n entre torres de la l3nea, impedancia caracter3stica de la torre.

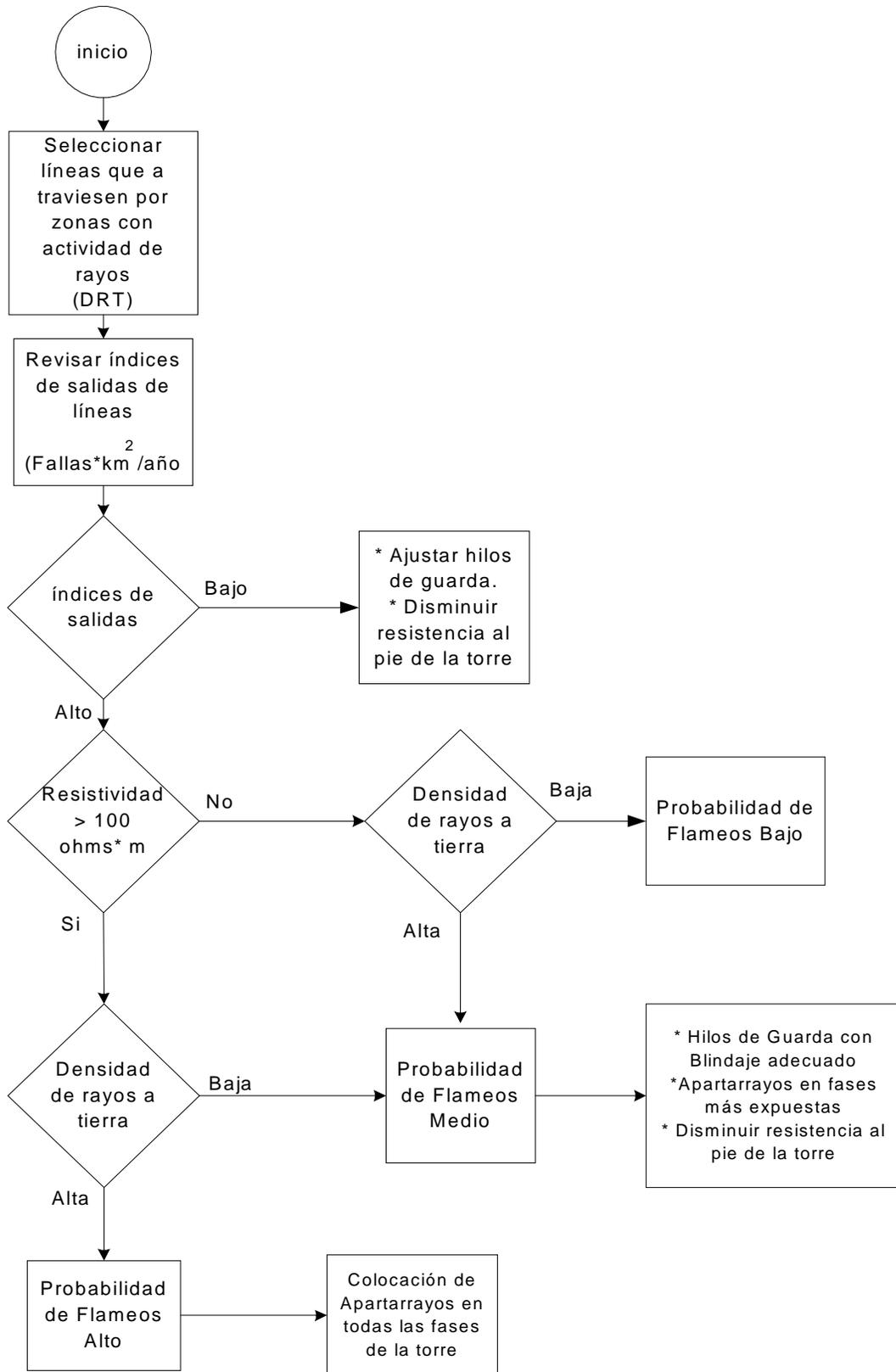


Figura 4.9. Diagrama a bloques de la metodología para la aplicación de apartarrayos.

4.6.1. Representación de la línea de transmisión.

En la figura 4.10 se muestra la representación de la línea de transmisión en el ATP/EMTP.

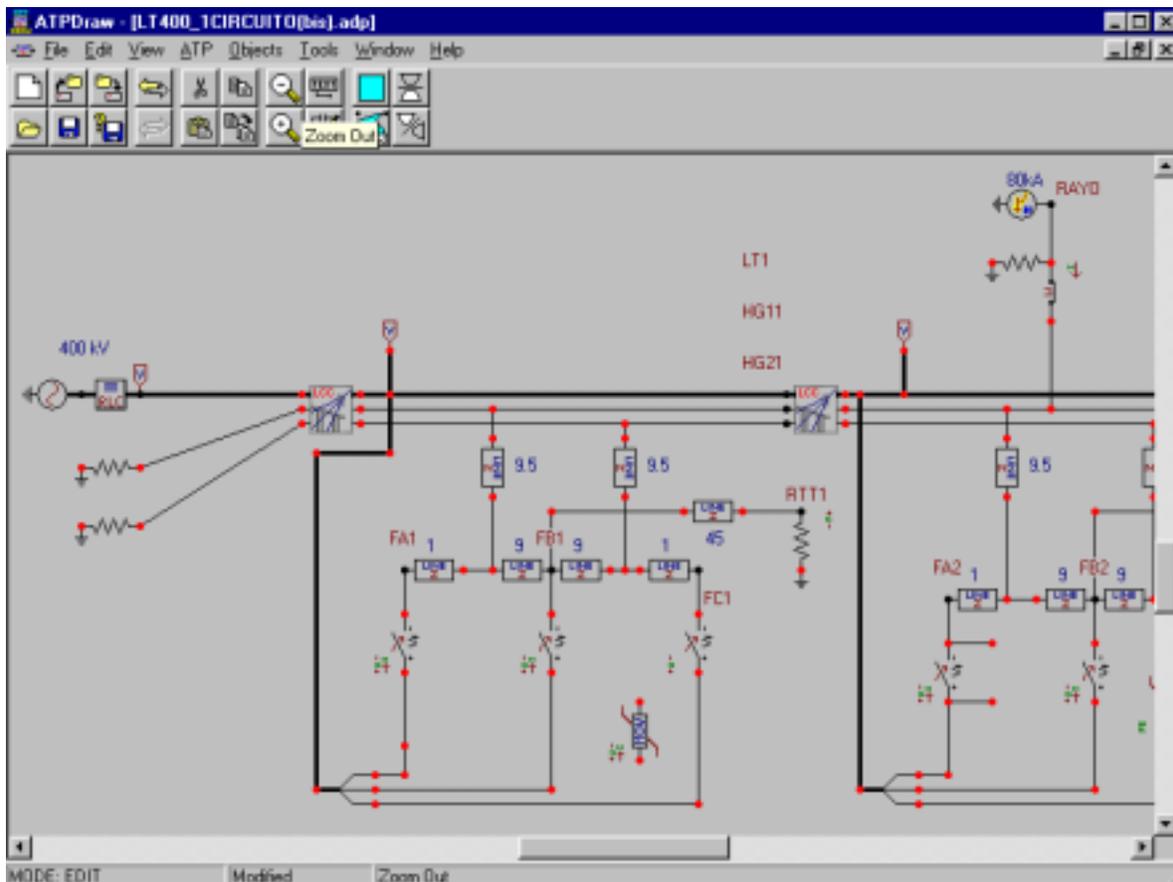


Figura 4.10. Ventana principal del ATP con una sección de línea de transmisión representada.

En el Apéndice C se explica cada uno de los elementos mostrados en la figura 4.10

4.6.2. Introducción de los Datos de la Línea.

En la Figura 4.11 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. Marti debido a que el modelo es dependiente de la frecuencia es decir que la matriz es de transformación constante y varía con la frecuencia.[32] Así como la longitud de la línea y algunas consideraciones para el estudio como el efecto piel y el muestreo.

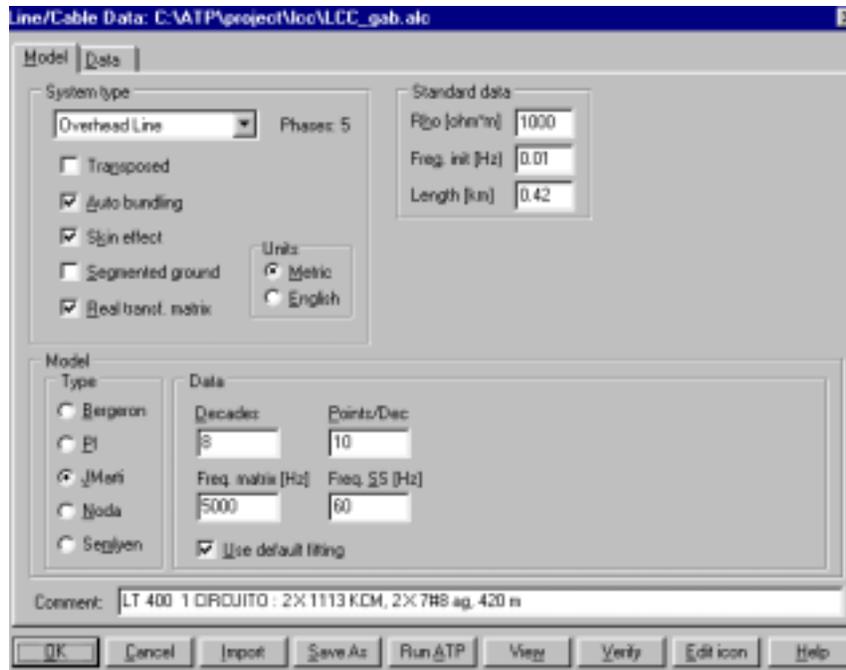


Figura 4.11.- Caja de dialogo de datos del modelo de la línea.

En la Figura 4.12, 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.

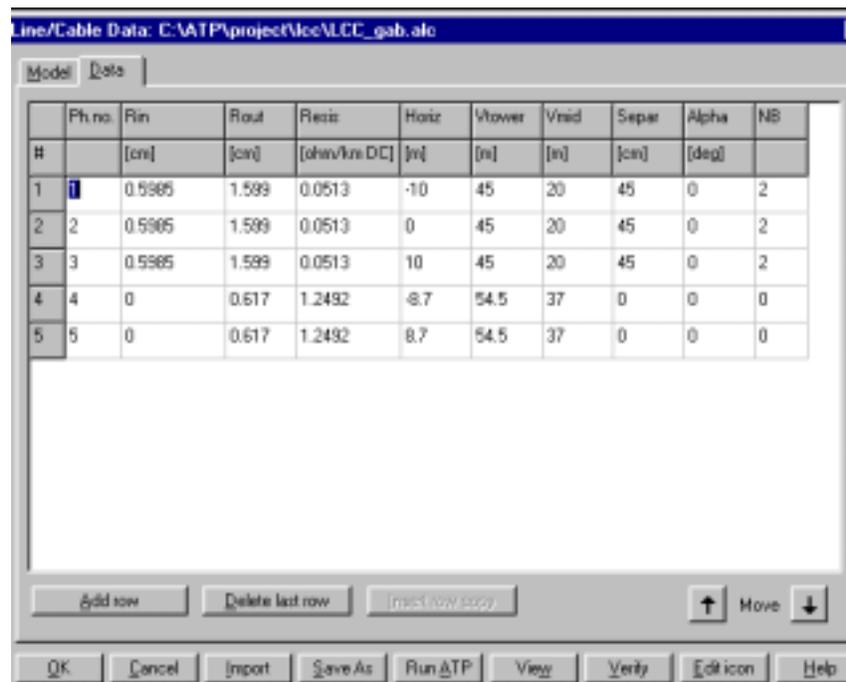


Figura 4.12. Datos geométricos de la línea.

4.6.3. Introducción de los Datos del Apartarrayos.

En la Figura 4.13 se muestra la caja de dialogo de entrada de datos del apartarrayos, en esta ventana se introducen principalmente los datos del voltaje de referencia del apartarrayos y si representa un apartarrayos con entrehierro o no.

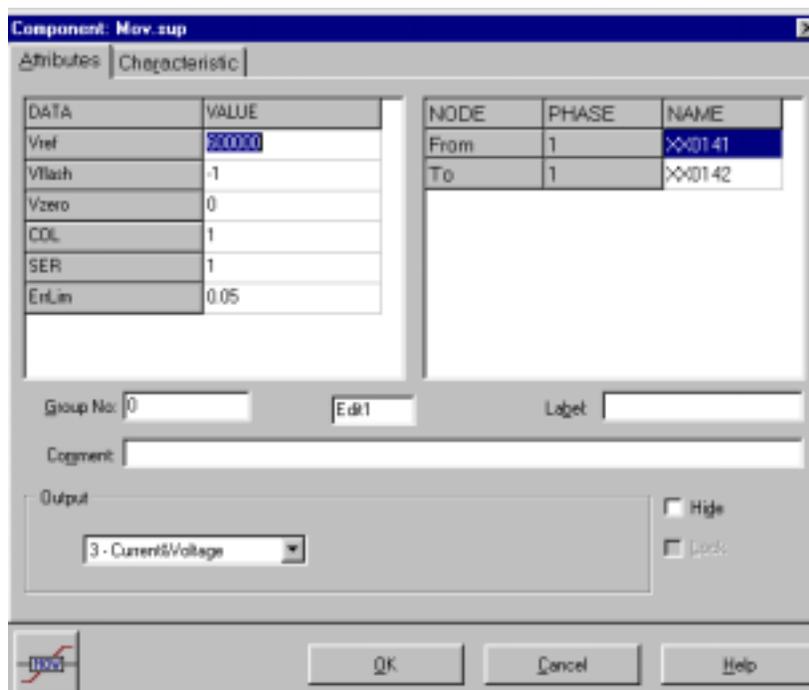


Figura 4.13. Ventana de datos de entrada del apartarrayos.

Donde el voltaje de referencia (V_{ref}), es un valor de voltaje aproximado al voltaje nominal del sistema al cual el apartarrayos empieza a operar, también es conocido como el voltaje de descarga. Esta se obtiene de la siguiente expresión.[35]

$$V_{ref} = 1.39 \sqrt{2} V_n \text{ apartarrayos} \quad (4.8)$$

En la siguiente grafica se muestran los datos de la curva característica V-I del apartarrayos.

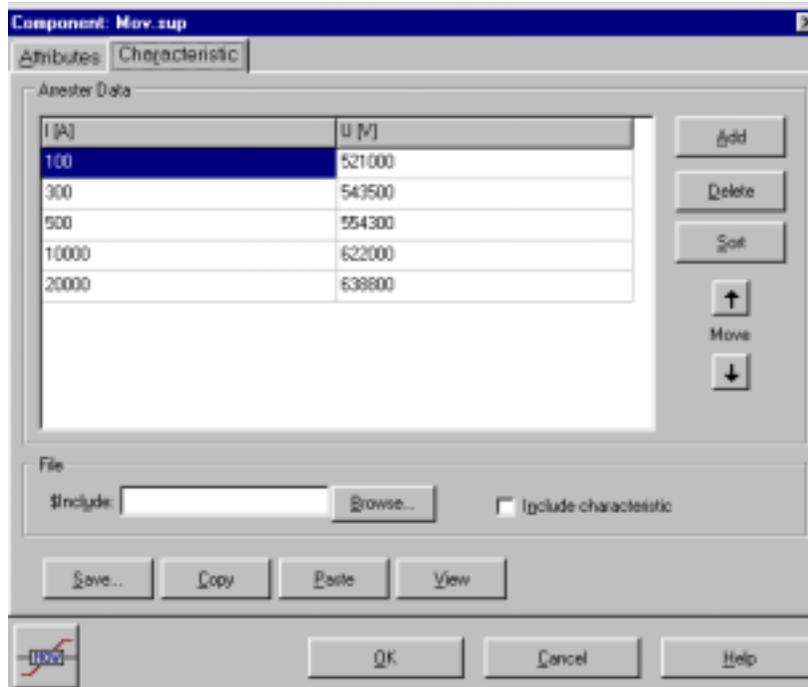


Figura 4.14. Datos de la Curva V – I del Apartarrayos.

Para obtener la curva característica V – I es necesario conocer el V_{ref} del apartarrayos, y con la siguiente expresión.[35]

$$I = 2500 \left(\frac{V}{V_{ref}} \right)^{26} \quad (4.9)$$

Se despeja el voltaje V, el cual indica el valor de voltaje que se presenta cuando se propone un valor de corriente de rayo.

$$V = V_{ref} \left(\frac{I}{2500} \right)^{1/26} \quad (4.10)$$

De esta última expresión normalmente el rango de corrientes típicas que presentan las descargas atmosféricas se encuentra entre 5 – 20 kA, proponiendo una corriente $I = 5$ kA en la expresión anterior se obtiene el voltaje que se producirá en el apartarrayos cuando el rayo experimente una corriente de 5 kA.

4.6.4. Fuente de Rayo.

Para simular una descarga atmosférica esta se considera como una fuente de corriente. Para este efecto lo que se debe tomar es el valor de la corriente del rayo que será simulada y la forma de onda del impulso que en este caso se considera la forma de onda estándar 8/20 μseg . Figura 4.15.[8,11]

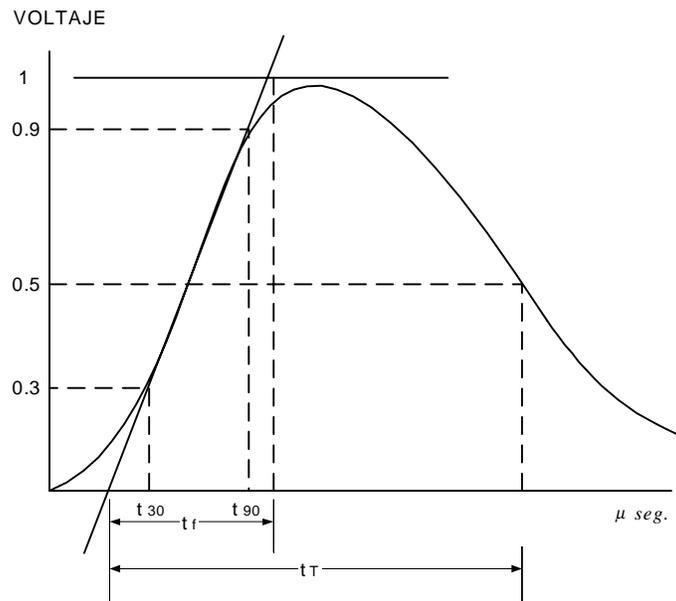


Figura 4.15. Forma de onda de Impulso del Rayo.

4.7. CASOS DE ESTUDIO.

A continuación se presentan los resultados de la simulación de descargas atmosféricas a una línea de transmisión de 400 kV de un circuito con disposición horizontal de los conductores fases y con dos hilos de guarda, considerando algunas condiciones de operación como son la variación de la resistencia al pie de las torres y valores promedio de corrientes del rayo.

Para esta simulación se considera que las descargas inciden en el hilo de guarda así como en una de las fases. Para ambos casos se presentan los voltajes obtenidos a través de los aisladores y cuando las fases están sin apartarrayos y con apartarrayos.

4.7.1. Datos de la línea de transmisión.

Datos del sistema

Voltaje nominal: 400 kV.
Voltaje máximo: 420 kV.
NBI = 1050 – 1425 kV.

Datos geométricos de la línea

Radio interno del conductor fase: 0.5985 cm.
Radio externo del conductor fase: 1.599 cm.
Resistencia del conductor: 0.0513 ohm / km C.D.
Distancia Horizontal: 10 m entre fases
Altura vertical en la torre: 45 m.
Altura vertical a la mitad del claro: 20 m.
Número de conductores por fase: 2
Separación entre conductores: 45 cm.

Radio externo del hilo de guarda: 0.617 cm
Resistencia del conductor: 1.2492 ohm / km C.D.
Distancia Horizontal: 8.7 m.
Altura vertical en la torre: 54.5 m.
Altura vertical a la mitad del claro: 37 m.

Modelo de la línea de transmisión

Para este caso se trata de una línea aérea trifásica con dos hilos de guarda, el modelo utilizado para simular la línea es el Jmarti.

Datos del Apartarrayos

Para modelar el apartarrayos se utilizó una curva característica V – I del apartarrayos, para este caso el V_{ref} o voltaje de descarga obtenido para el apartarrayos que será utilizado, se obtuvo con la ecuación 4.8.

En el apéndice C se muestra el procedimiento para la obtención de la curva característica.

4.7.2. Simulación de una descarga atmosférica al hilo de guarda en una línea de 400 kV.

A continuación se muestran los resultados obtenidos de casos representativos cuando el rayo incide en el hilo de guarda de una línea de transmisión.

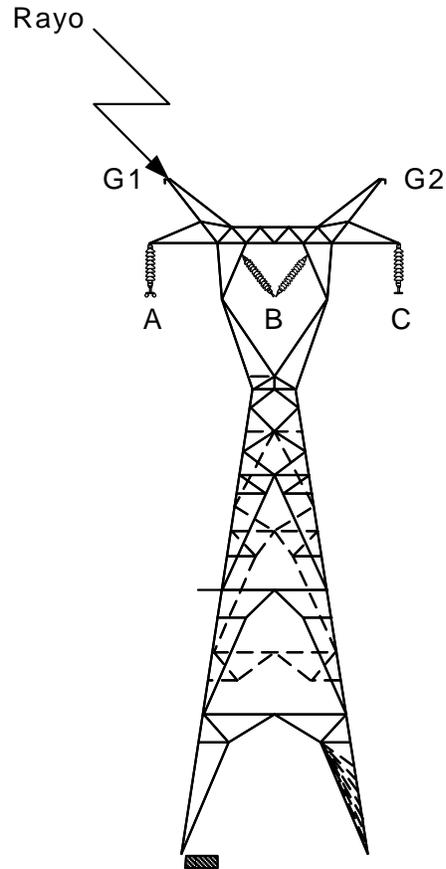


Figura 4.16. Descarga al hilo de guarda en una torre de 400 kV de tipo 4BA1.

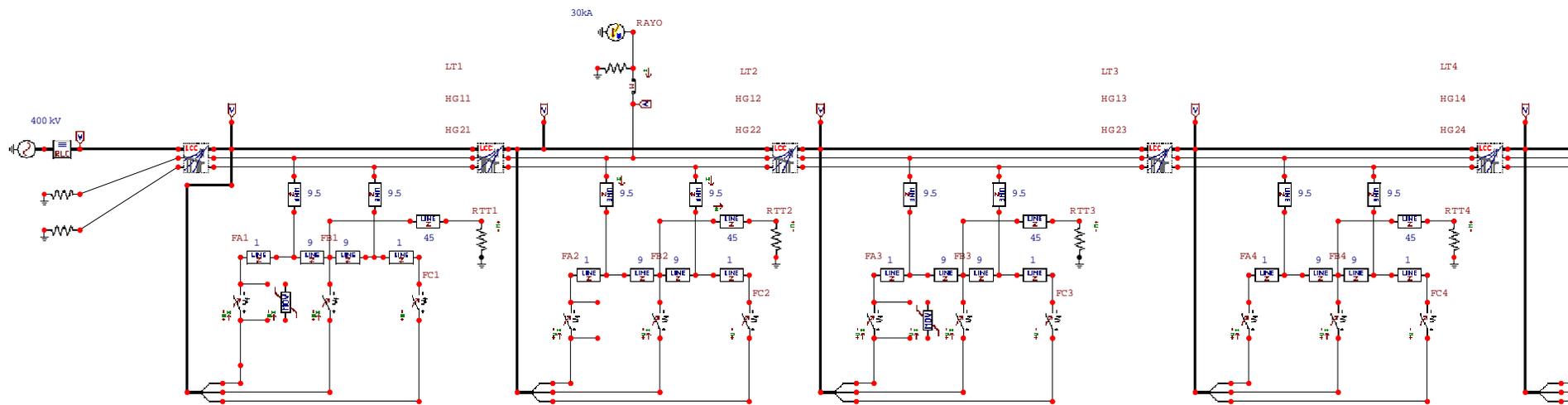


Figura 4.17. Representación de la incidencia del rayo al hilo de guarda en el ATP.

Como se muestra en la figura 4.17 se simula una corriente de rayo promedio de 30 kA incidiendo sobre el hilo de guarda ubicada en el nodo 2 de la línea (LT2). Para este caso se consideran los siguientes valores de resistencia al pie de las torres identificadas como:

RTT1 = 400 ohms

RTT2 = 100 ohms

RTT3 = 300 ohms

A continuación se muestran los voltajes obtenidos en los aisladores cuando el rayo incide sobre el hilo de guarda 1 del nodo 2 (ver figura 4.17).

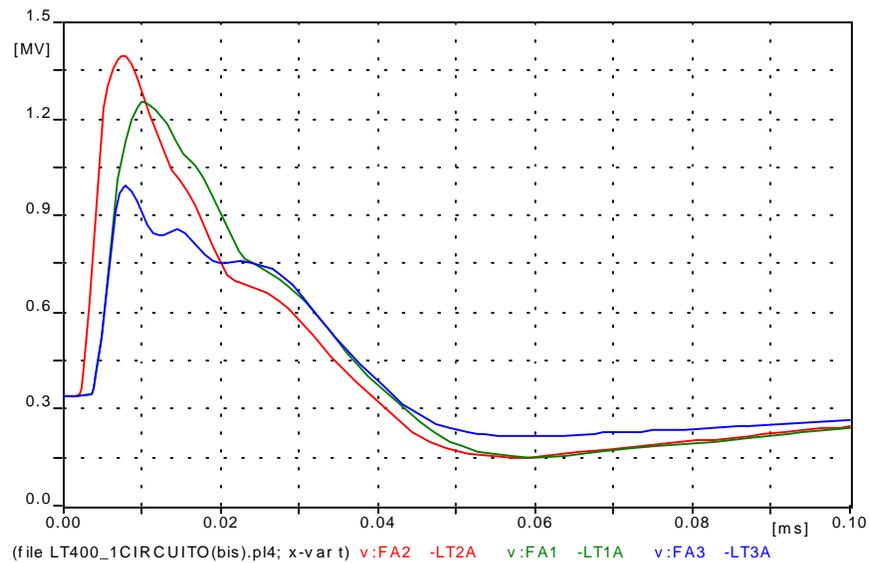


Figura 4.18. Voltaje en la fase A en los nodos 1,2 y 3.

En la gráfica 4.18 se muestran los voltajes obtenidos en los aisladores de la fase A ubicada en los nodos 1,2 y 3, se observa que en ninguna de las fases se presenta una falla por flameo inverso debida al rayo, no obstante el voltaje más alto se obtiene en la fase A del nodo 2 (FA2-LT2A) que se aproxima al voltaje máximo de diseño (NBI =1425 kV) del aislamiento. Los voltajes en las fases B y C son de menor valor debido al acoplamiento reducido que se tiene con respecto al hilo de guarda donde incide el rayo y solamente se muestran los de la fase A debido a que estas experimentan mayor inducción del hilo de guarda.

Considerando el caso anterior si el rayo incide en el mismo punto sobre el hilo de guarda pero ahora considerando que los valores de la resistencia al pie de las torres adyacentes al punto de incidencia aumentan, se tendría lo siguiente:

RTT1 = 500 ohms

RTT2 = 100 ohms

RTT3 = 500 ohms

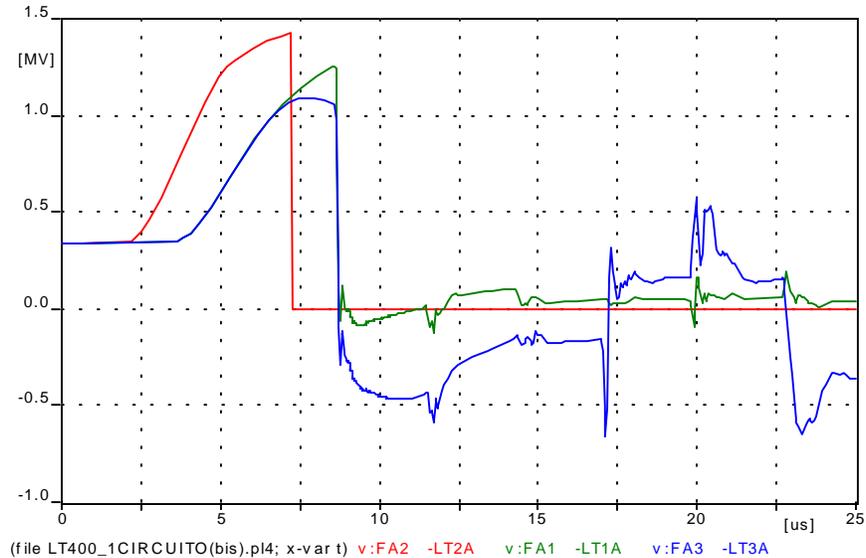
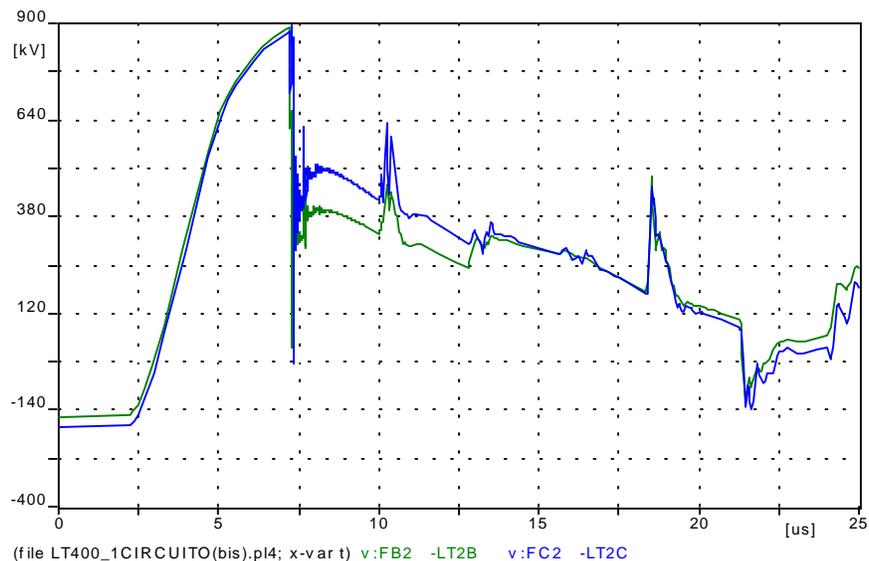


Figura 4.19. Voltaje de flameo en la fase A del nodo 2.

En la grafica 4.19, se observa que al aumentar la resistencia a tierra en las torre adyacentes al punto de incidencia, esto contribuye a que falle la fase A del nodo 2 provocando el flameo de la cadena de aisladores, por otro lado, en los aisladores de las fases A en los nodos 1 y 3 se observa que los voltajes aumentan ligeramente.

Mientras tanto en las fases B y C del nodo 2, los voltajes se mantienen por debajo del nivel básico de aislamiento.



4.20. Voltaje en las fases B y C del nodo 2.

Analizando los resultados anteriores se puede notar que si un rayo incide en una torre a través del hilo de guarda un parámetro importante es la resistencia que se tenga al pie de la torre, como se observó anteriormente el hecho de tener una resistencia al pie de la torre baja en el punto de incidencia no garantiza que no exista falla, ya que si esta es lo

suficientemente pequeña podrá evitar un flameo, pero si las resistencia en las torres adyacentes son altas esto provocara fallas por flameo inverso en otras torres o en el punto de incidencia.

Para este caso un apartarrayos no puede ser utilizado debido a que los apartarrayos están diseñados principalmente para operar cuando una fase sufra una sobretensión debida a un aumento de corriente a través de la fase. Por lo tanto la solución para estos casos de descargas es la disminución de la resistencia al pie de las torres o si es posible aumentar el aislamiento.

4.7.3. Simulación de una descarga atmosférica a un conductor fase de una línea de 400 kV.

En esta simulación se considera que una descarga incide en un conductor fase debida a una falla por blindaje.

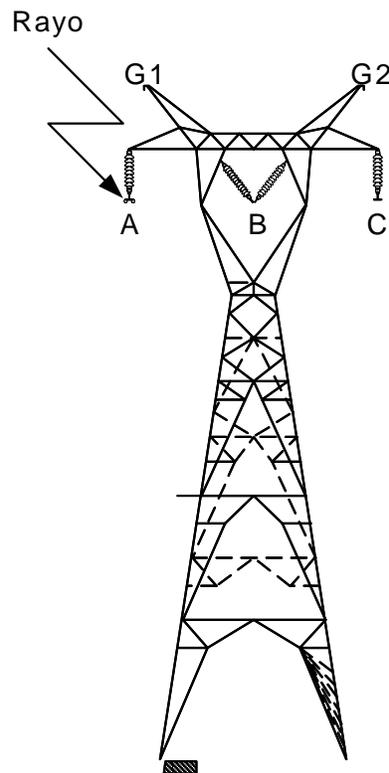


Figura 4.21. Descarga al conductor fase en una torre de 400 kV de tipo 4BA1.

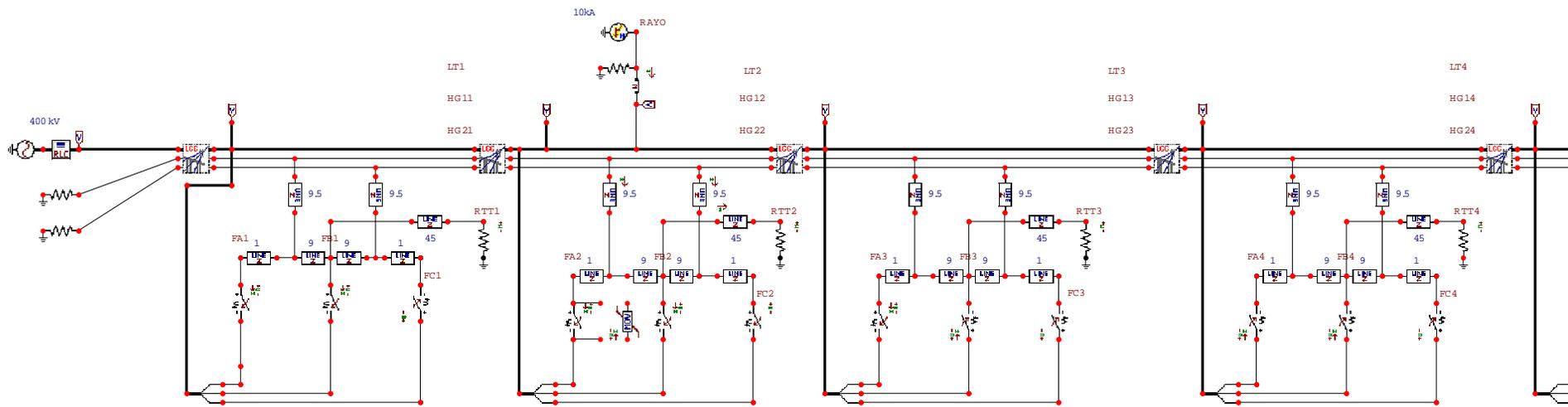


Figura 4.22. Representación de la incidencia del rayo a un conductor fase en el ATP.

Para esta simulación se considera que la corriente del rayo incide en el conductor fase A (figura 4.22), debido a que esta fase al igual que la fase C tiene mayor probabilidad de sufrir una descarga directa de rayo por ser fases externas, para esto se supone que la corriente del rayo que incide tiene una magnitud de 10 kA. A continuación se muestran los voltajes obtenidos cuando la línea no tiene apartarrayos.

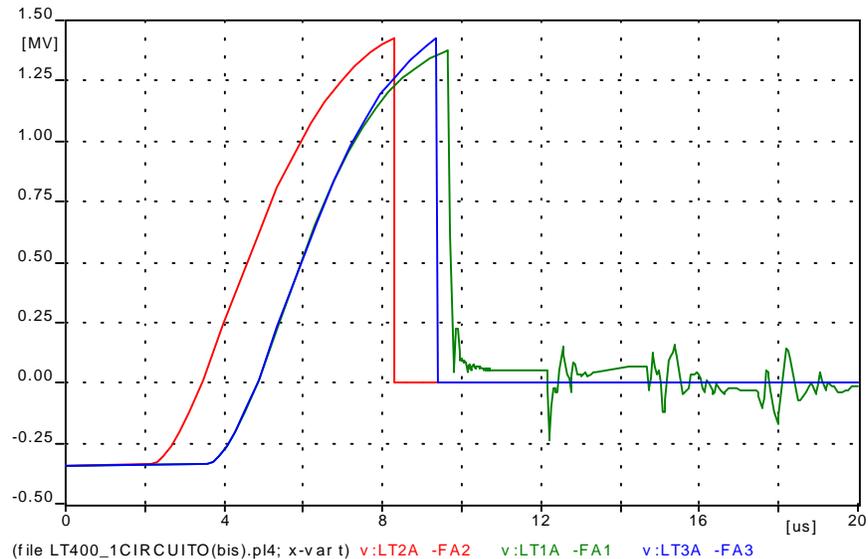


Figura 4.23. Voltajes obtenidos en las fases A en los nodos 1,2 y 3

En esta grafica se muestra que las fases A en los nodos 2 y 3 (LT2 y LT3 respectivamente) fallan debido a la caída directa del rayo.

Se observa que al incidir un rayo directamente sobre una fase esta queda desprotegida y como resultado final se puede presentar la salida de la línea por flameo de la cadena de aisladores. Si ahora se protege esta línea con un apartarrayos, el problema sería en que torre se colocaría ya que un rayo puede incidir en cualquiera de estas.

De lo anterior se presentan los siguientes casos: Primero, si colocamos el apartarrayos en el nodo 2 se evitaría que fallarán las fases A en los nodos 2 y 3 como se muestra en la figura 4.24.

Como se observa en la siguiente figura, al colocar el apartarrayos en la fase A del nodo 2 se evita también el flameo en la fase A del nodo 3.

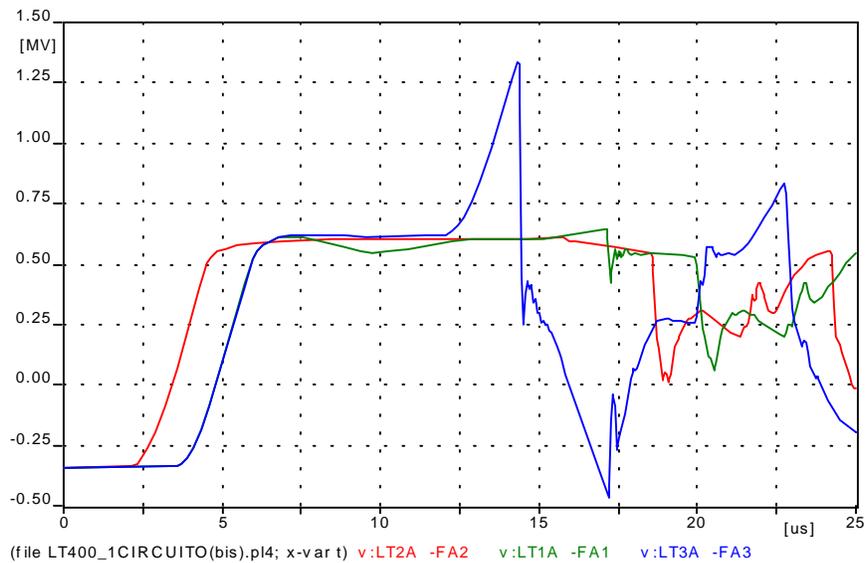


Figura 4.24. Voltajes en los nodos 1,2 y 3 con apartarrayos en el nodo 2.

Por otro lado si ahora se coloca el apartarrayos en el nodo 3 suponiendo que el rayo incide nuevamente en el mismo punto (LT2), se observa en la figura 4.25, que los voltajes en la fase A de los nodos 1 y 2 aumentan con el riesgo de que puedan sufrir un flameo mientras tanto en la fase A del nodo 3 el voltaje disminuye.

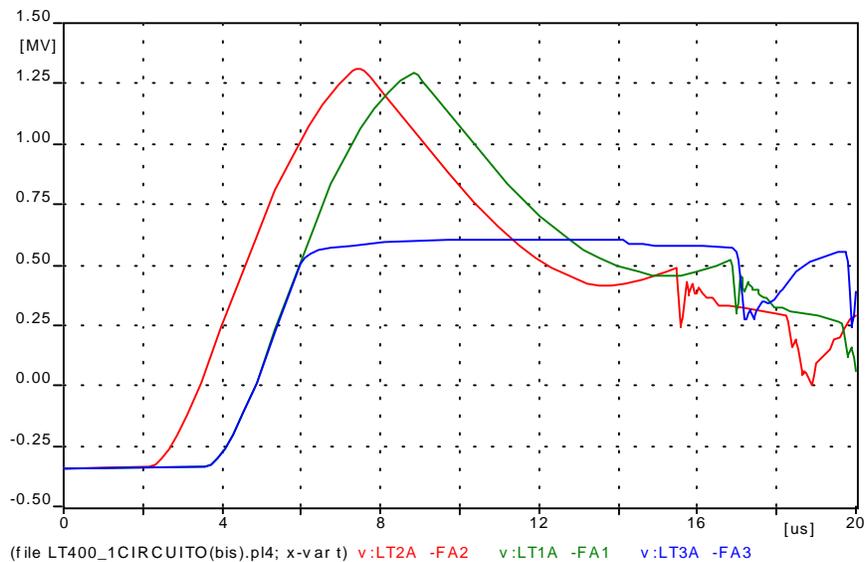


Figura 4.25. Voltajes en los nodos 1,2 y 3 con apartarrayos en el nodo 3.

De lo anterior se puede notar que si un rayo incide en una fase sin apartarrayos esta puede terminar en una falla por flameo, a menos que se encuentre instalado un apartarrayos en la torre mas próxima al punto de incidencia.

De tal manera que una solución para proporcionar protección contra descargas a los conductores fases sería colocar apartarrayos en zonas confinadas de la línea de trasmisión donde se presenten mayor número de salidas de líneas colocando apartarrayos en las fases más expuestas en torres alternas, es decir, en una si y en la otra no, procurando siempre que en las torres donde se coloquen los apartarrayos se tengan valores de resistencia en la base de las mismas lo suficientemente bajo para que el apartarrayos drene con facilidad mayor cantidad de corriente.

Gracias a la facilidad que presentan algunos programas de simulación como lo es el ATP, se pueden proponer distintas condiciones de operación en un sistema y en base al análisis de estos resultados se pueden obtener esquemas de protección buscando aquel que sea más conveniente, para esto es necesario que los modelos utilizados para representar cada componente del sistema sean precisos.



CAPITULO
5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

En esta tesis se propone una metodología para la aplicación de apartarrayos en las líneas de transmisión para disminuir las salidas de las líneas por efecto de las descargas atmosféricas.

De las simulaciones mostradas en el capítulo anterior al aplicar la metodología desarrollada se concluye:

- Los resultados obtenidos dependieron en gran medida de la precisión de los modelos y parámetros de cada uno de los componentes del sistema utilizados en la representación de la línea de transmisión.
- La metodología propone que mediante la representación de una parte del sistema en el ATP se muestren distintos escenarios de operación, sometiendo a la línea a descargas atmosféricas en distintos puntos obteniendo con esto los esfuerzos esperados y mediante el análisis de estos resultados buscar la mejor solución.
- De los resultados obtenidos en cada simulación aplicando esta metodología se proponen esquemas de protección con apartarrayos de línea analizando que configuración es la más adecuada y que reduzca el número de salidas al año.
- Debido a que cada línea tiene sus características propias, por lo tanto la solución para una de ellas no será la misma para otra.
- Después de analizar los resultados de la simulación de las descargas atmosféricas, se observó que la aplicación principal de los apartarrayos de línea se halla en la protección de las líneas cuando estas sufren una sobretensión debida a una descarga directa a un conductor producto de una falla de blindaje.
- Dado a que actualmente no existe una metodología para la aplicación de apartarrayos de línea, este trabajo puede ser utilizado para la planeación de líneas de transmisión nuevas o existentes donde se desee o se requiera reducir el índice de salidas al año.

- Una manera de reducir las salidas de las líneas es colocando apartarrayos, pero estas se colocarán solamente en las fases mas expuestas, es decir, no siempre se necesitan colocarlas en todas las fases, ya que existen fases con poca probabilidad de descarga directa debido al blindaje proporcionado por los hilos de guarda además del proporcionado por la torre.
- Por otro lado se requieren de datos confiables del nivel céraunico para cada zona, es decir, la densidad de rayos a tierra en las zonas por donde atraviesan las líneas de transmisión ya que con estos datos se pueden predecir que magnitudes de corrientes pueden aparecer.

5.1. RECOMENDACIONES PARA TRABAJOS FUTUROS

Este trabajo desarrollado puede ser utilizado como un punto de inicio para un estudio mas detallado de los efectos de la descarga atmosférica en las líneas de transmisión. Dentro de las recomendaciones para trabajos futuros se tienen los siguientes:

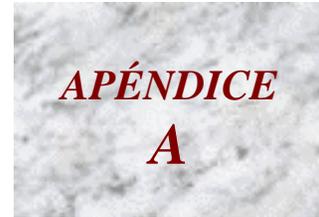
- Realizar un estudio para determinar los costos por la incorporación de apartarrayos en las líneas comparándola con los costos debidos a las salidas de líneas por efecto del rayo (por energía no suministrada, fallas en el equipo o instalación, etc.), y observar si es factible el uso de estos dispositivos.
- Considerar cuales serían los efectos de las condiciones ambientales y de contaminación en la superficie de los apartarrayos.
- Incorporar un modelo de apartarrayos con gap para simular descargas a la línea y observar el comportamiento de los apartarrayos ante estas sobretensiones.

REFERENCIAS

- [1] H. Prinz, *Lightning in History*, Chapter 1 of *Lightning* (R.H. Golde, Ed.) London: Academic Press. 1977.
- [2] B. Dibner, *Benjamín Franklin*, Chapter 2 of *Lightning* (R.H. Golde, Ed) London: Academic Press. 1977.
- [3] B.F.J. Schonland, *The Flight of Thunderbolts*, Oxford: Clarendon Press.
- [4] www.geindustrial.com/industrialsystems/products/arresters.shtml
- [5] Comisión Federal de Electricidad (CFE). *Fallas en Líneas de Transmisión, Estadísticas y Eventos Relevantes*. Revista anual publicada por la Gerencia de Subestaciones y Líneas de la coordinadora de Transmisión y Transformación de CFE. 1999 – 2001.
- [6] Instituto de Investigaciones Eléctricas (IIE). *Estudios de Líneas y subestaciones ante Descargas Atmosféricas y Contaminación*. Reporte Final, Septiembre de 1994.
- [7] Luis A. Siegert C. *Alta Tensión y Sistemas de Transmisión*. Ed. Limusa.
- [8] IEEE Power Engineering Society. *IEEE Guide for the Application of Metal – Oxide Surge Arresters for Alternating Current Systems*. IEEE std. C62.22-1997.
- [9] Transinor As. *User's Manual for the TN – FLASH*.
- [10] Working Group 33.11 task Force 03. *Application of Metal Oxide Surge Arresters to Overhead Lines*. A. SCHEI, Convenor of WG 33.11. ELECTRA No. 186 October 1999.
- [11] Andrew R. Hileman. *Insulation Coordination for Power Systems*. Marcel Decker, Inc 1999. <http://dekker.com>.
- [12] Allan Greenwood. *Electrical Transients in Power Systems*.
- [13] Martin A. Uman. *Natural Lightning*. Fellow, IEEE, Department of Electrical Engineering, University of Florida. IEEE 1993.
- [14] International Standard. IEC 71-2. *Insulation Coordination Part 2*. No. De Referencia CEI/IEC 71-2, 1996.

- [15] A. J. Eriksson. *An Improved Electromagnetic Model for Transmission Line Shielding Analysis*, IEEE Trans. On Power Delivery, July 1987, pp 871-886.
- [16] A. J. Eriksson. *Lightning and Tall Structures*, Trans. SAIEE, Aug. 1978.
- [17] E. R. Love. *Improvements on the Lightning Stroke Modeling and Application to Design of EHV and UHV Transmission Lines*. University of Colorado, 1973.
- [18] Comisión Federal de Electricidad. *Coordinación de Aislamiento*. Especificación CFE L0000-06, Julio 1991.
- [19] Oscar Kastrup, Luiz Cera Zanetta Jr. *Lightning Performance Assessment whit Line Arrester*. Furnas Centrais Eléctricas S. A. USP Sau Paulo University Brazil. 1996 IEEE / PES T&D Conference and Exposition.
- [20] M. Babuder, E. Brocard, S. Sadovic. *Lighting Performance Improvement of 123 kV Transmission Line by Use of Line Arresters*. International symposium on High Voltage Engineering 1999.
- [21] IEC 99-4. *Metal Oxide Surge Arresters Without Gaps for a.c. Systems*. 1991.
- [22] F. de la Rosa, R. Velásquez. *Application of Metal Oxide Arresters in T & D Systems in Mexico*. IEEE T & D Conference Proceedings, Los Angeles CA. 1996.
- [23] C.T. Gaunt. *Categories of Line Arresters Application*. CIGRE SC 33.97 (COLL) 3.15 IWD.
- [24] S. Yokoyama. *Distribution Surge Arresters Behavior Due to Lightning Induced Voltages*. IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. PWRD-1, pp. 171-178, 1986.1.
- [25] Yamamoto Y., Hanada T., Omote T. *A New Application concept of transmission line arresters to 500 kV lines*. Kansai Electric Power Co. Inc. Osaka Japan. IEEE Power Engineering Society Transmission and Distribution, 1999. p 681-686.
- [26] Ueda,Toshiaki. *Investigation of effect of Transmission line arresters verified by Lightning surges at substations*. Chubu Electric Power Co. Inc, Nagoya Japan. Electric engineering in Japan, 1999, p 30-39.
- [27] Sadovic S., Joulie R., Tartier S. *Use of Line surge Arresters for the improvement of the Lightning performance of 63 kV and 90 kV Shielded and Unshielded transmission lines*. IEEE Transactions on Power Delivery Vol. 12, p 1232-40, 1997.

- [28] C.F. Wagner, A.R. Hileman. *The Lightning Stroke II*. AIEE Trans. on PA&S, 1961, pp 622-642.
- [29] F.S. Young, J.M. Clayton, A.R. Hileman. *Shielding of Transmission Lines*. AIEE Trans. 1951, pp 132-154.
- [30] H.R. Armstrong, E.R. Whitehead. *Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding*. IEEE Trans. on PA&S, 1969, pp 617-626.
- [31] G.E. Brown, E.R. Whitehead. *Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding - II*. IEEE Trans. on PA&S, 1969, pp 617-626.
- [32] J.R. Marti. *Accurate Modelling of Frequency – dependent Transmission Lines in Electromagnetic Transient Simulation*. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 1 January 1982.
- [33] Working Group 33.02. *Guidelines for Representation of Network Elements when Calculating Transients*. CIGRE 1990.
- [34] H. Schmitt, W. Winter. *Simulation of Lightning Overvoltages in Electrical Power Systems*. Dept. EV SE NC3 Siemens AG.
- [35] Westinghouse Electric Corporation, EMTP Development Coordination Group and Electric Power Research Institute. *Electromagnetic Transient Program (EMTP), PRIMER*, EL-4202, Research Project 2149-1, Final Report, September 1985.
- [36] Comisión Federal de Electricidad. *Redes de Tierra para Estructuras de Líneas de Transmisión Aéreas de 69 a 400 kV*. Especificación CFE 00JL0-28
- [37] Folleto Tranquell XE. *Product and Application Guide*, General electric.



APÉNDICE
A

EL MODELO GEOMÉTRICO

Considerando el concepto general como se describe en la **figura A.1**. Para un valor específico de corriente del rayo, los arcos de radio “rc” están trazados de los conductores fases y de los hilos de guarda. Además, una línea horizontal a una distancia Rg de la superficie del suelo es construida. Las intersecciones entre estos arcos y las intersecciones de estos arcos con la línea horizontal son marcadas con A, B y C. Las guías descendentes que alcancen el arco entre A y B terminarán en el conductor fase. Aquellos que alcancen el arco entre B y C terminarán en los hilos de guarda y aquellos que terminen mas allá de A terminarán en el suelo o a tierra.

Suponiendo solo descargas verticales, las distancias Dc y Dg. se definen en la **figura A.1**. Siendo las distancias de exposición de los conductores de fase y de los hilos de guarda respectivamente. Por lo tanto para un valor específico de corriente para la cual los arcos de la **figura A.1**, están trazados, el número de caídas que terminarán en el conductor fase o el índice de falla de blindaje (Shielding Failure Rate), es el área formada por Dc y la longitud de la línea L veces la densidad de descargas a tierra, es decir:

$$SFR / I = 2N_g LD_c$$

La probabilidad de ocurrencia de esta corriente es $f(I)dI$ para que el índice de falla incremental $d(SFR)$ sea:

$$d(SFR) = 2N_g LD_c f(I)dI$$

y el SFR para todas las corrientes es :

$$SFR = 2N_g L \int_3^{\text{Im}} D_c f(I)dI$$

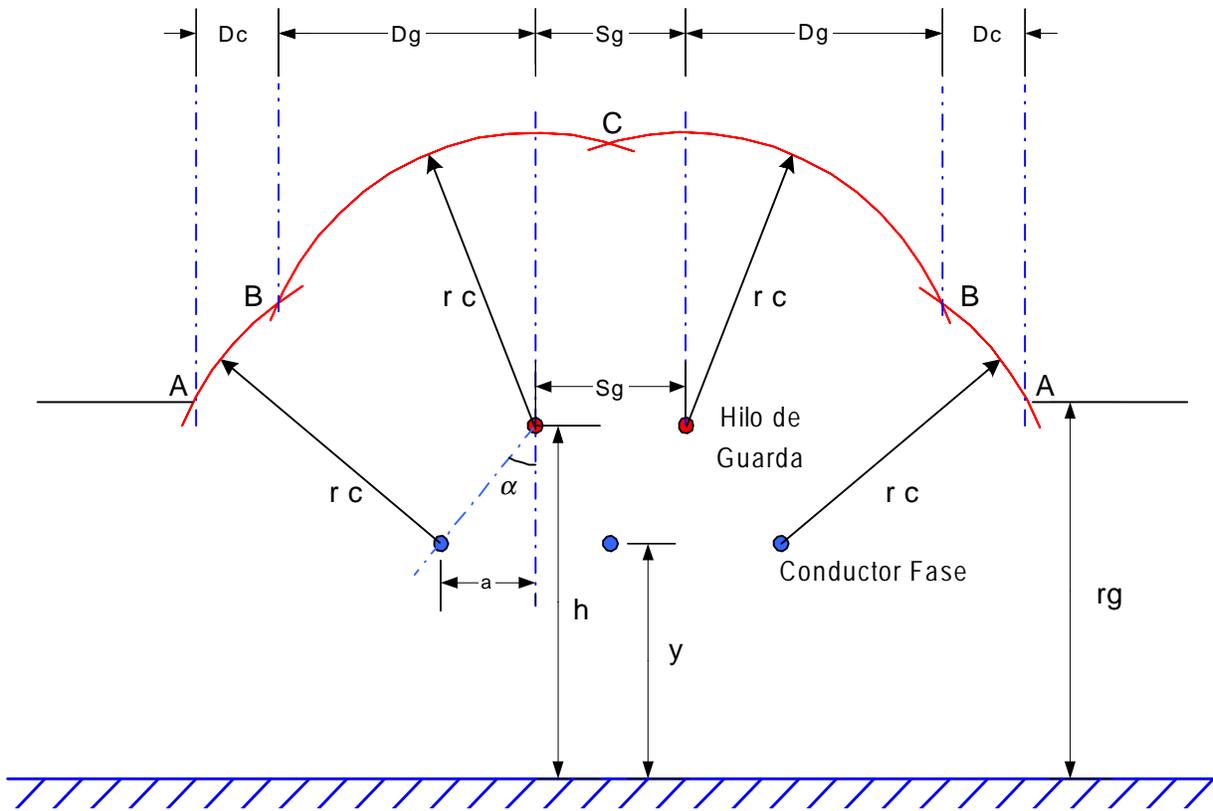


Figura A.1. El modelo Geométrico, definiciones de los ángulos y distancias.

Como se observa, los límites de integración son de 3 kA e I_m , donde I_m es la máxima corriente y sobre la cual ninguna descarga terminará en el conductor fase. Para explicar I_m , consideramos la siguiente figura A.2, donde se repite el diagrama de la figura anterior para corrientes y alturas de las torres mayores.

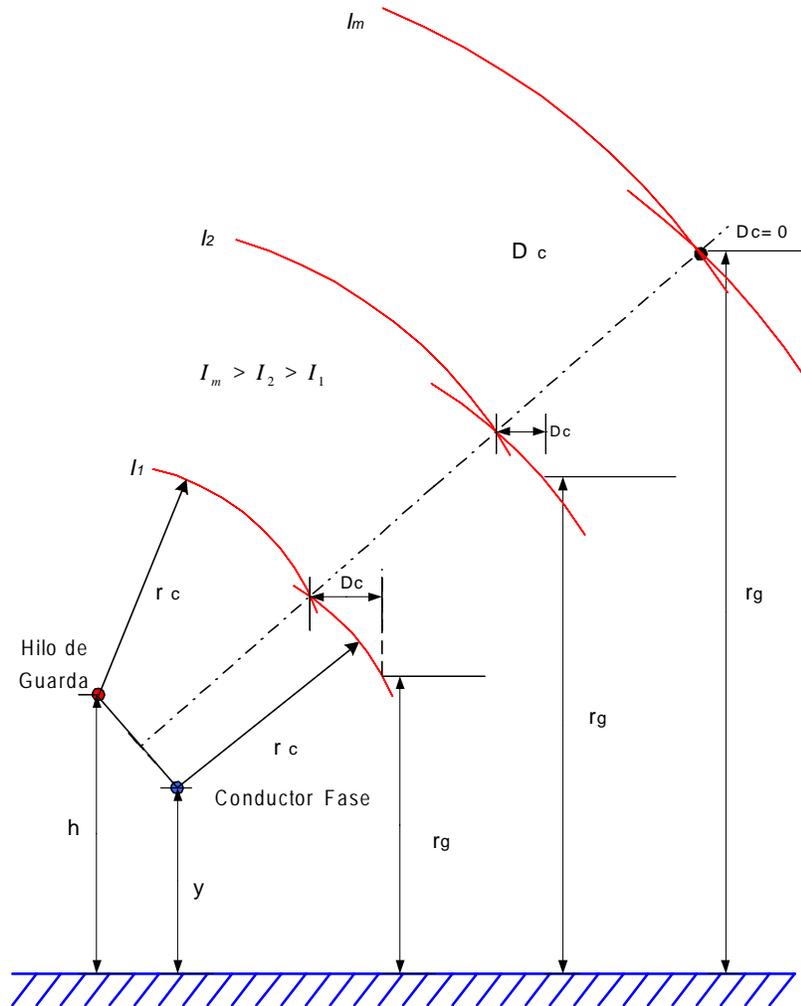


Figura A.2. Definición de I_m donde $D_c = 0$.

Como la corriente incrementa, D_c disminuye hasta un punto en la cual las tres distancias de golpeo se encuentran o se unen haciendo D_c igual a cero. Este punto es definido como la corriente I_m .

Por otro lado el límite inferior de 3 kA simplemente reconoce que la primera descarga no puede tener un valor de corriente cero, esto es que debe tener un límite inferior ya que el valor más bajo de corriente según reportes de la CIGRE es de 3 kA, por lo tanto se tomo como el valor mínimo.

No obstante, otros investigadores creen que valores tales como 1 o 2 kA, son más razonables, y por lo tanto algunas veces es usado un valor de corriente cero como límite inferior.



APÉNDICE B

¿QUE ES EL ATP / EMTP?

B.0. 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.

B.1. 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 puede 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 contrato a través de una entidad oficial a su iniciador, sino que asignó 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, Maquinas 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 de 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 líneas 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.

B.2. 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 3.7.

B.3. DESCRIPCIÓN BÁSICA DE SUS CAPACIDADES.

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

El ATP Draw 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 ATP Draw 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 hacen del ATP Draw una herramienta poderosa en el análisis de transitorios de sistemas eléctricos de potencia.

El paquete ATP Draw 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 utilizados para la simulación digital de fenómenos transitorios electromagnéticos, así como de naturaleza electromecánica en sistemas eléctricos de potencia. Esto ha sido desarrollado continuamente a través de contribuciones internacionales sobre los pasados 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 los 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)
- Maquinas síncronas trifásicas, maquinas 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 calculo 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.

APÉNDICE C

DESCRIPCIÓN DE LOS ELEMENTOS DE LA LÍNEA DE TRANSMISIÓN REPRESENTADA EN EL ATP.

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.

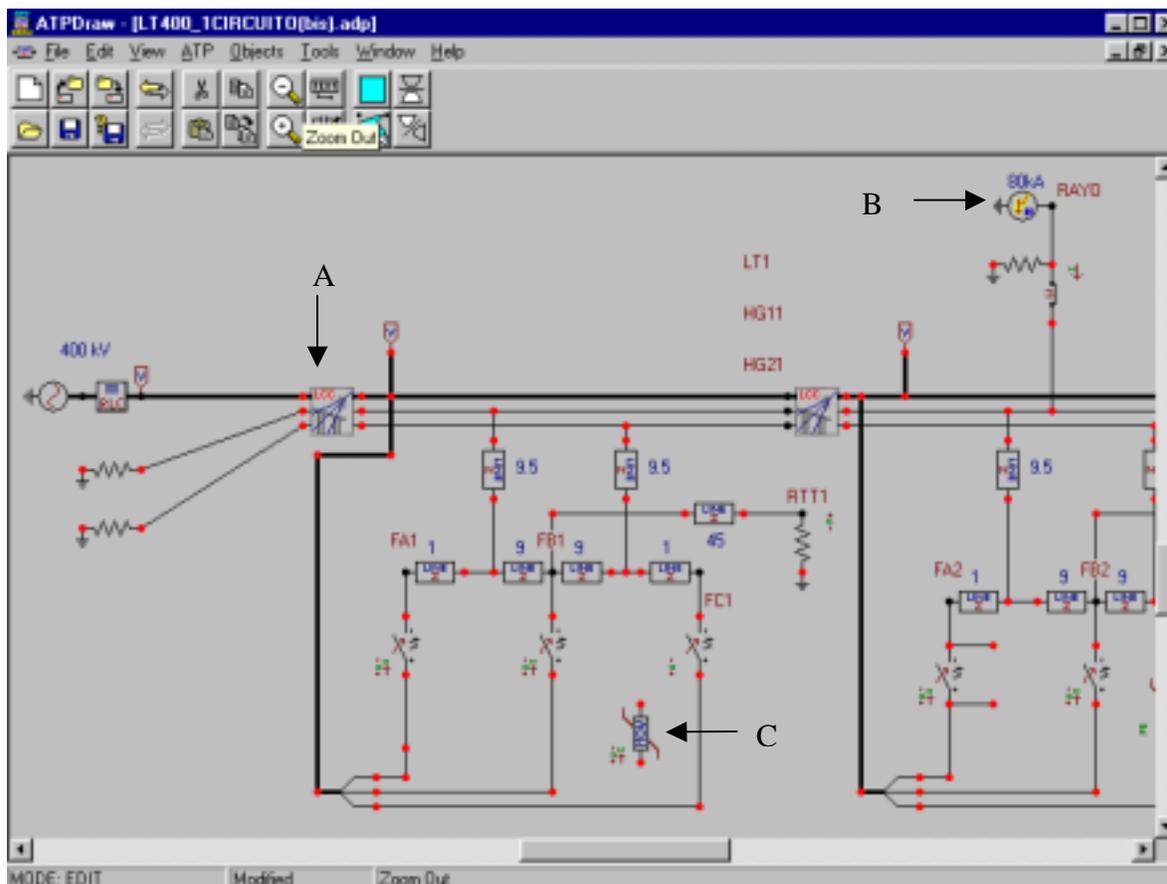


Figura C.1. Ventana principal del ATP con una sección de la línea de transmisión representada.

En la figura C.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 Jmartí 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 Jmartí.[32]

En la Figura C.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.

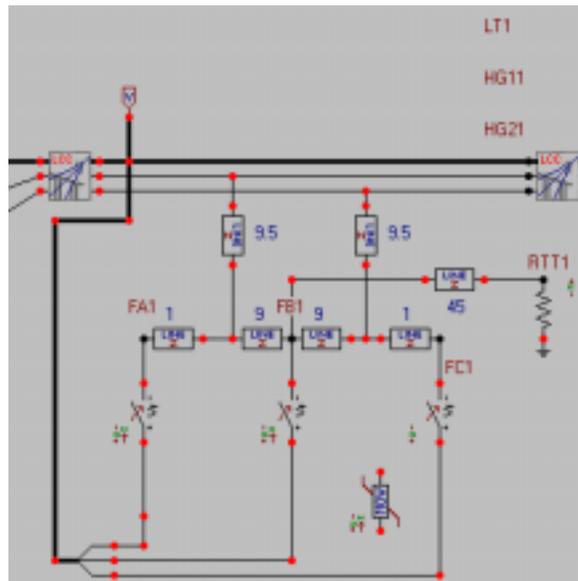


Figura C.2. Representación en el ATP de la torre conectada a los hilos de guarda y fases.

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.

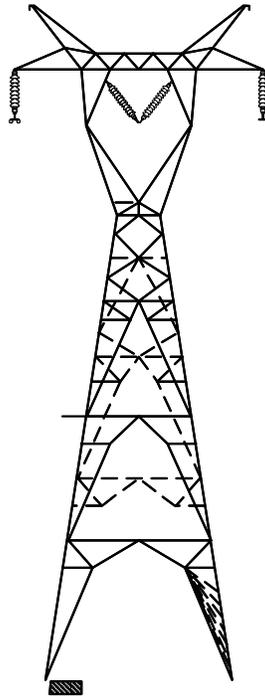


Figura C.3. Silueta de una torre de 400 kV de tipo 4BA1

La letra B mostrada en la figura C.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 C.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 4.8 mostrado en el capítulo 4, primero obtenemos el voltaje de referencia

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

donde V_n indica el voltaje nominal del apartarrayos que se obtiene mediante tablas proporcionada por fabricantes [37], considerando el voltaje máximo de operación continua eficaz o RMS (MTOC), el cual se obtiene de la siguiente manera:

$$MTOC = \frac{V \text{ max del sistema}}{\sqrt{3}} = \frac{420}{\sqrt{3}} = 242.49 \text{ kV}$$

De las tablas de apartarrayos se busca en la columna de $MTOC_{RMS}$ 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.

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

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

Con la Ecuación 4.10 del capítulo 4 se proponen valores de corriente de rayo promedio obteniéndose lo siguiente:

$$V = V_{ref} \left(\frac{I}{2500} \right)^{1/26}$$

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

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