

Trabajo de Diploma.

Título: Modelación en ATPDRAW del comportamiento ante rayos de líneas de transmisión.

Autor: Cindy Domínguez López.

Tutor: Dr. Ing. Ángel Valcárcel Rojas.

Curso 2003-2004

"Año del 45 Aniversario del Triunfo de la Revolución"

Santa Clara 2004

CON SU ENTRAÑABLE TRANSPARENCIA

RESUMEN.

Este trabajo trata sobre el impacto de las descargas atmosféricas en las líneas de transmisión, haciendo énfasis en cómo se ven afectadas las cadenas de aisladores que se encuentran bajo condiciones de contaminación, propone además una metodología de cálculo del proceso de descargas inversas y directas provocadas por rayos en líneas de transmisión bajo las condiciones antes mencionadas, demostrando gráficamente como se ven afectados estas cadenas de aisladores cuando se varía el tiempo de frente, la resistencia de puesta a tierra así como la intensidad de la onda incidente, lo que constituye una herramienta muy valiosa a la hora de determinar o evaluar el nivel de aislamiento de estas instalaciones.

Importancia y actualidad del tema.

Las descargas atmosféricas son la causa fundamental de disturbios en muchos sistemas eléctricos en el mundo. El debilitamiento que sufre el aislamiento bajo condiciones de contaminación se ve acentuado cuando éste es sometido a sobretensiones de origen atmosférico.

Objetivo de la investigación.

Modelación en ATPDRAW del comportamiento ante rayos de líneas de transmisión incluyendo el efecto que la contaminación de los aisladores tiene en este proceso.

Aportes y novedad científica.

El elemento más novedoso de este trabajo está dado en:

La Modelación en ATPDRAW de una línea de transmisión que permite analizar los transitorios que tienen lugar cuando esta es impactada por una descarga atmosférica.

Resultados más relevantes.

Se pudo analizar el comportamiento de una línea de transmisión variando diferentes parámetros como son: resistencia de puesta a tierra, tiempo de frente y amplitud de la onda de corriente incidente, así como el efecto de la contaminación en el proceso de descargas inversas.

ÍNDICE.

	1
CAPITULO I. Descarga superficial de aisladores por efecto de la contaminación.	_
	2
Introducción.	2
1.2. Antecedentes históricos.	2
1.3. Principales tipos de contaminación.	3
1.4. Efecto de las descargas eléctricas sobre los aisladores bajo condiciones de contaminación.	4
1.5. Características generales de los contaminantes.	4
1.6. Factores que determinan la acumulación y la distribución de la capa de contaminante.	
	5
1.7. Características físicas de las descargas sobre la superficie de los elementos aislantes contaminados.	8
1.8. Conductividad superficial en los aisladores.	11
1.9 Evaluación de la severidad de la contaminación ambiental	13
1.9.1 Determinación de los niveles de contaminación atmosférica	1/
1.9.2 Determinación de la distancia de fuga específica	14
1.10. Processo de descerera superficiel de cisladores contaminadas	1/
1.10.1. Interchercher	19
1.10.1. Introducción.	19
1.10.2. Desarrollo del modelo propuesto.	20
CAPITULO II. Cálculo de descargas inversas y directas bajo condiciones de contaminación.	
	27
2.1. Introducción.	27
2.2. Modelo propuesto para el cálculo de las reflexiones desde torres adyacentes.	27
2.3. Cálculo de la impedancia transitoria de la torre y la resistencia de aterramiento.	
	28
2.4. Comportamiento dinámico de la puesta a tierra.	29
2.5. Cálculo de la tensión en los aisladores de la torre impactada.	34
2.6. Determinación de la razón de salida por impacto directo de una línea aérea de potencia.	
	35
2.7. Determinación de la ocurrencia del flameo bajo condiciones de contaminación.	
	38
2.8. Ejemplo del procedimiento de cálculo.	42
CAPÍTULO III. Efectos del tiempo de frente, la resistencia de puesta a tierra y la magnitud de la corriente en la tensión aplicada a los aisladores.	
	11
3.1. Introducción	44
3.2. Efecto del tiempo de frente en la forma de onda de la tensión anlicada al aislador	44
5.2. Electo del tiempo de tiente en la forma de onda de la tension apricada al aislador.	11
3.3. Efecto de la resistencia de puesta a tierra en la forma de onda de la tensión aplicada al aislador.	44
2.4. Efecto de la amplitud de la anda incidente en la forma de ande de la tensión enliged e el	47
3.4. Electo de la amplitud de la onda incidente en la forma de onda de la tension aplicada al aislador	
	50
	54
BIBLIOGRAFIA.	55

INTRODUCCIÓN.

La Ingeniería es la disciplina profesional cuyo objetivo es transformar los recursos que proporciona la naturaleza con el fin de producir bienes y servicios que cumplan con las exigencias de esta sociedad. En forma particular, la Ingeniería Eléctrica, transforma recursos naturales, sienta las bases para la fabricación de maquinarias a emplear por la industria eléctrica y rige los procesos de transformación propios de esta industria, la cual está siendo exigida cada vez más a proporcionar un suministro confiable de fluido eléctrico, libre de disturbios.

Dentro de las anomalías que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia se encuentran las sobretensiones que ocasionan un mayor esfuerzo en los sistemas de transmisión. Cuando se rebasa el voltaje que existe a través de las terminales de un aislamiento, por cualquier voltaje pico, se dice que existe una sobretensión.

Las sobretensiones se pueden clasificar en dos tipos:

Las sobretensiones internas, son producto de algún cambio en las condiciones de operación del sistema de potencia, pudiendo ser temporales o transitorias.

Las sobretensiones externas, son producto de las descargas atmosféricas, y estas pueden incidir directa o indirectamente sobre el equipo componente del sistema de potencia.

Las líneas de transmisión son los elementos más propensos a sufrir daños debido a este fenómeno natural, pues abarcan un área bastante amplia dentro del terreno donde están localizadas, dado que recorren grandes distancias y cruzan por terrenos expuestos a distintos tipos de climas, como son: costeros, montañosos, etc.

Actualmente, se llevan a cabo estudios de laboratorio aplicando sobretensiones transitorias tipo impulso de rayo de frente rápido (1.2/50 μ s), para saber la forma en que se comporta una línea de transmisión ante este tipo de eventos naturales, estudios que resultan en extremo difíciles y costosos, pero que además nunca llegan a simular todas las condiciones que encuentra el aislamiento en su medio natural de trabajo.

De particular importancia en este análisis, resultan los sistemas de potencia que son impactados por descargas atmosféricas, y que, además, se encuentran en una zona donde existe un alto índice de contaminación que provoque una operación más riesgosa de las líneas de transmisión ya que su nivel de aislamiento se ve debilitado, ocasionando la falla de éste ante este tipo de eventos.

CAPÍTULO I. Descarga superficial de aisladores por efecto de la contaminación.

1.1. Introducción.

Uno de los fenómenos que más puede influir en la confiabilidad de las instalaciones eléctricas es la contaminación ambiental, la cual puede causar serios daños tanto a las partes metálicas como a las partes aislantes de la misma.

El efecto fundamental de la contaminación sobre las partes metálicas es el de la corrosión, que puede provocar el debilitamiento mecánico de la instalación, y con ello llegar a provocar interrupciones severas en el servicio; en tanto que la acción de la contaminación sobre las partes aislantes es la de provocar fallas en las redes bajo condiciones normales de operación. Las fallas del aislamiento debido a la contaminación se deben al desarrollo de altos gradientes de tensión sobre la superficie de los aisladores a causa de la formación de las bandas secas y al establecimiento de descargas eléctricas a través de ellas.

1.2. Antecedentes históricos.

Desde los inicios del desarrollo eléctrico mundial, se han registrado dificultades en la operación de los sistemas de transmisión y de distribución de energía eléctrica debido al fenómeno de la contaminación. Los primeros estudios datan del año 1907 en Italia, donde se presentaban serias dificultades con el aislamiento de los sistemas de 25 kV situados cerca de la costa, lo que provocaba serias dudas sobre la factibilidad de la transmisión de la energía eléctrica mediante el empleo de líneas aéreas.

En los primeros tiempos, los estudios fueron encaminados fundamentalmente a mejorar los diseños de los elementos aislantes, en tanto que el aspecto teórico quedaba relegado a un segundo plano. En la década de 1930 se dieron los primeros pasos de importancia en el estudio teórico del fenómeno producido por la contaminación al establecerse el papel que en el mismo tiene la formación de las bandas secas.

El desarrollo alcanzado por los sistemas de transmisión en la década de 1950 hizo más imperiosa aún la necesidad de encontrarle solución al problema, siendo en este período donde se intensificaron los estudios, cubriéndose principalmente los siguientes aspectos:

- Diseño de aisladores con mejores características de operación bajo condiciones de contaminación.
- Desarrollo de metodologías de prueba tendientes a simular las condiciones naturales de contaminación a que se encuentran sometidos los aisladores.
- Estudio teórico del fenómeno a fin de conocer todos los factores que inciden en su desarrollo.

1.3. Principales tipos de contaminación.

Existen dos tipos principales de contaminación: la de origen marino y la de origen industrial, existiendo situaciones particulares en las que es posible considerar un tercer tipo, el cual se presenta cuando coinciden simultáneamente los dos tipos ya mencionados, como sucede en las zonas de gran desarrollo industrial aledañas al mar.

Existe un caso muy particular de contaminación que se presenta en zonas desprovistas de vegetación por efecto del polvo que puede llegar a depositarse en los aisladores; esto es común en los campos en períodos de seca muy prolongados o en los trabajos de preparación de la tierra para la agricultura.

<u>Contaminación marina.</u>- Se puede ubicar no sólo en las inmediaciones de la costa, sino también, a considerables distancias de la misma cuando se trate de zonas costeras no montañosas, en las cuales los vientos marinos pueden tener una influencia apreciable.

<u>Contaminación industrial.</u>- Este fenómeno tiene su aparición con el desarrollo industrial, por lo que se encuentra limitado a las zonas industriales, siendo el mismo de muy diversas clases dependiendo del tipo de industria que la origina: química, petroquímica, metalúrgica, de cemento, etc., cada una de las cuales tiene sus características propias.

En algunos casos, el contaminante es eliminado con facilidad por medio de un simple lavado y en otros, como en el caso del cemento, puede llegar a formar incrustaciones que solamente pueden ser eliminadas por medio de agentes químicos o por tratamientos mecánicos altamente abrasivos.

La atención que se presta a este fenómeno se ha incrementado considerablemente debido a la necesidad de instalar las grandes unidades generadoras de electricidad en zonas costeras por facilidades de abastecimiento de combustible, así como por la disponibilidad de agua para las mismas; otro factor de importancia es el desarrollo de grandes centros urbano-industriales en zonas costera por las facilidades que brinda el transporte marítimo.

1.4. Efecto de las descargas eléctricas sobre los aisladores bajo condiciones de contaminación.

Las descargas que se establecen sobre la superficie de los aisladores contaminados tienen grandes variaciones dependiendo de la magnitud de la corriente, que puede tomar valores desde los pocos miliamperes hasta los cientos de ellos. Debido a dichas variaciones, que pueden ser bruscas, se produce el fenómeno de la radiointerferencia; así como el deterioro de la superficie de los aisladores y hasta la ocurrencia de la descarga total.

<u>Radiointerferencia</u>.- Este fenómeno es producido por el efecto corona que acompaña a las descargas sobre la superficie de los aisladores contaminados cuando el ancho de la banda seca que se forma es tal que, la ruptura dieléctrica del aire se hace imposible sin un proceso previo de ionización.

<u>Deterioro de la superficie de los aisladores</u>.- Los aisladores de porcelana normalmente soportan el calor producido por las descargas, aunque pueden llegar a producirse fallas mecánicas. La existencia del fenómeno

de las descargas superficiales limitó durante mucho tiempo el uso de elementos aisladores de material sintético, ya que el calor generado por ellas producía descomposición química en su superficie, lo que con el tiempo llegaba a producir la falla del elemento aislante.

<u>Descarga total.</u>- Esta situación se presenta cuando las descargas superficiales crecen hasta un punto tal en que se produce un cortocircuito estable en el sistema, provocando una falla y su salida de operación.

1.5. Características generales de los contaminantes.

En su forma más general los contaminantes constan de dos partes fundamentales:

Una parte eléctricamente inerte que al humedecerse no se disocia en iones y por lo tanto no es conductora y cuya función es la de darle a la capa de contaminante sus características adhesivas y absorbentes.

Una parte eléctricamente activa que al mojarse se disocia en iones, dando a la capa de contaminante sus características conductivas.

Las partículas de contaminante que se encuentran en suspensión en el aire y que por tanto pueden ser trasladadas por éste a las cercanías de las subestaciones y líneas de transmisión, poseen un diámetro que se encuentra en el rango de 0.001 a 400 micrones. Algunas de las partículas más comunes, así como sus diámetros, son mostrados en la Tabla 1.5.1.

Partículas	Diámetro
Humo	0.0001-1
Cemento	1-20
Polvo orgánico	1-50
Polvo mineral	1-100
Niebla	1-100
Ceniza	30-180

Tabla 1.5.1. Características generales de las partículas contaminantes.

1.6. Factores que determinan la acumulación y la distribución de la capa de contaminante.

La magnitud y la distribución de la capa de contaminante sobre la superficie de los aisladores no es posible determinarla con gran precisión debido a la diversidad de factores involucrados en cada caso en particular. Cuando una partícula de contaminante se encuentra en la cercanía de un aislador energizado la misma está sujeta a diversas fuerzas, por lo tanto, se moverá en la dirección de la resultante para depositarse sobre el

aislador, después de lo cual, estará sometida a la acción de las lluvias, el rocío y la niebla que actuarán sobre su distribución original.

Fuerza gravitacional.- La fuerza gravitacional sobre la partícula puede expresarse de la siguiente forma:

$$F_G = \frac{4}{3}\pi r^3 d$$
 (1.1)

donde:

d- Gravedad específica de la partícula.

r- Radio de la partícula.

La tendencia de esta fuerza es la de depositar las partículas más pesadas en la superficie superior de los aisladores; acentuándose su efecto con el tamaño de las mismas.

Fuerza del viento.- La magnitud que puede alcanzar se expresa en la forma siguiente:

$$F_{\rm V} = 6\,\pi\,r\,\nu\,\eta\tag{1.2}$$

donde:

- η Coeficiente de fricción.
- v- Velocidad del viento.
- *r* Radio de la partícula.

En el conjunto de fuerzas que actúan sobre las partículas, la ejercida por el viento es la de mayor incidencia y esta es la encargada de llevar las partículas de contaminante a las proximidades del aislador, lo que permite que a su acción se sume el efecto de las otras fuerzas que actúan sobre la partícula. En su efecto juegan un papel importante las características aerodinámicas del aislador.

<u>Fuerzas electrostáticas.</u>- El efecto de las fuerzas electrostáticas tiene una gran dependencia del estado de carga de la partícula, lo que hace que el análisis se efectúe para partículas cargadas y para partículas sin carga. Sobre toda partícula eléctricamente neutra sometida a la acción de un campo eléctrico no uniforme se ejerce una fuerza que la atrae hacia las regiones de más alta densidad de campo, esta fuerza se expresa por:

$$F_E(1) = \frac{r^3}{2} \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon + 2} \operatorname{grad} E$$
(1.3)

donde:

E- Valor r.m.s. de la magnitud del campo.

ɛ- Permitividad de la partícula.

r- Radio de la partícula.

Las partículas cargadas están sometidas a una fuerza que se expresa por:

$$F_E(2) = n q E \tag{1.4}$$

donde:

E- Magnitud del campo eléctrico.

q- Carga de un electrón.

n- Número de cargas elementales en la partícula.

Para el caso de corriente alterna, esta fuerza es oscilatoria y por tanto su resultante es cero, excepto cuando esté presente el fenómeno del efecto corona, ya que dada la diferencia entre las tensiones de comienzo del mismo para la polaridad positiva y negativa se produce un efecto rectificador, con lo que se presenta un desplazamiento de la partícula hacia las zonas de más alta intensidad de campo. Por lo antes expuesto, queda claro que las condiciones de contaminación para corriente directa son más severas que para corriente alterna.

<u>Efecto de la lluvia.</u>- El efecto directo de la lluvias es el de lavar la superficie superior de los aisladores, por lo que es uno de los factores que mayor influencia tiene en la no uniformidad de la distribución de la capa de contaminante. Esto contribuye directamente a que el grado de contaminación de las áreas protegidas del aislador sea muy superior a la del resto del mismo. La acción de lavado de las lluvias tiene gran dependencia de la posición de los aisladores, tan notable ha sido este aspecto en la experiencia práctica, que se ha mostrado que, bajo las mismas condiciones de contaminación, las disposiciones aislantes inclinadas y horizontales tienen un comportamiento superior con respecto a las verticales. En la Figura 1.6.1 y Figura 1.6.2 se muestra la distribución de contaminante sobre la superficie de un aislador neblinero y uno aerodinámico contaminados naturalmente.



Fig. 1.6.1 Curva de distribución del contaminante acumulado a lo largo de la superficie de un aislador neblinero.



Fig. 1.6.2 Curva de la distribución del contaminante acumulado a lo largo de la superficie de un aislador aerodinámico.

1.7. Características físicas de las descargas sobre la superficie de los elementos aislantes contaminados.

Sobre la superficie de los aisladores sometidos a los efectos de la contaminación se producen tres tipos diferentes de descargas eléctricas: descarga tipo arco, descarga incandescente ("glow") y descarga por efluvios ("streamer").

<u>Descarga tipo arco.</u> - Una vez humedecido el contaminante, y antes de la formación de las bandas secas, la corriente mantiene su forma sinusoidal tal como se muestra en la Figura 1.7.1 (a). Después de formadas las bandas secas e iniciado el proceso de descargas a través de ellas, la corriente sufre bruscas variaciones en su magnitud y en su forma de onda.

Como se puede observar en la Figura 1.7.1 (b), la corriente pierde su continuidad apareciendo períodos finitos de corriente cero.

La descarga observada en este estado es la característica de los arcos, lo que se comprueba por su característica U-I negativa y por su intensidad luminosa que permite su fácil reconocimiento. El proceso inicial de la descarga comienza sin prácticamente ningún proceso previo de ionización, estando determinado básicamente por la ruptura dieléctrica del aire producido por las altas y bruscas concentraciones de campo aplicadas a las bandas secas.

Bajo las condiciones iniciales, los pasos altamente ionizados por las descargas precedentes aseguran una rápida reignición de los mismos cada medio ciclo, siendo los períodos de corriente cero menores de 2 ms.



Fig. 1.7.1 Característica de la corriente para cuatro estados diferentes de secado de la capa de contaminante.

a - Antes de la formación de las bandas secas.

- b Formación de las bandas secas.
- c Aumento de la amplitud de las bandas secas.
- d Proceso de secado intenso.

Como el proceso de secado sobre los aisladores continúa, el incremento en la resistencia hace que los picos de corriente disminuyan, disminuyendo por tanto la ionización producida por las descargas, por lo que las mismas se producirán cada vez a más altos valores de tensión, aumentando con ello los períodos de corriente cero.

Al aumentar los períodos de corriente cero el proceso de recombinación en los pasos ionizados se hace más efectivo, llegando a un punto tal en que se hace necesario un proceso de ionización previo para que se establezca la descarga.

Cuando los intervalos de corriente cero alcanzan un tiempo del orden de las 2 ms se requiere un proceso previo de ionización antes de que se pueda establecer la nueva descarga, lo cual dependerá del grado de desionización alcanzado, la longitud del paso a ionizar, etc.

A partir de este punto del fenómeno el proceso de reignición no se repite cada medio ciclo, Figura 1.7.1 (c) a la Figura 1.7.1 (d), desarrollándose la descarga predominantemente en el semiciclo negativo debido a las características propias del efecto corona.

Debido a que cada vez se produce la descarga a valores mayores de tensión, la corriente sube rápidamente llegando en tiempos del orden de los 10 μ S al valor que determinen para ese instante la magnitud de la tensión aplicada, la resistencia del resto del aislador y la caída de tensión en el arco que se establece, siguiendo después la forma característica que le corresponda de acuerdo a la onda de tensión aplicada, Figura 1.7.2.



Fig. 1.7.2 Efecto de las descargas sobre la forma de onda de la corriente.

A medida que aumenten los períodos de corriente cero, aumenta el tiempo en que la mayor parte de la tensión aplicada lo está sobre las bandas secas, con lo que se producen altas intensidades de campo en sus extremos permitiendo el desarrollo de los demás fenómenos asociados al efecto corona.

<u>Descarga incandescente.</u>- Este tipo de descarga se caracteriza por ser de muy corta duración y por producirse en los alrededores de los valores máximos de la onda de tensión, siendo una de las fuentes de radio interferencias asociadas con el fenómeno producido por la contaminación.

Este tipo de descarga desaparece cuando el aislador se ha secado por completo y por tanto no existen puntos sobre su superficie con intensidades de campo suficientemente altas para permitir su formación.

Dada la corta longitud que alcanzan estas descargas, no juegan un papel fundamental en el proceso de ionización, pero crean las condiciones de ionización necesarias para el desarrollo de las descargas tipo "streamer".

<u>Descargas por efluvios</u> ("streamer").- Después de la aparición de las descargas incandescentes, si el aislador contaminado sigue sometido a algún proceso de humedecimiento, el ancho de las bandas secas disminuye, aumentando la intensidad del campo a través de ellas, lo que hace posible que se puedan desarrollar descargas de mucha mayor longitud y que se caracterizan por su naturaleza ramificada, las que dentro del fenómeno de corona son conocidas como descargas tipo "streamer".

Estas descargas son las que producen la ionización necesaria para la formación de descargas tipo arco cuando los períodos de corriente cero exceden los 2 ms.

Estas descargas son las máximas responsables de la intensidad de las radio interferencias que acompañan a las descargas superficiales en los aisladores contaminados.

1.8. Conductividad superficial en los aisladores.

Como se conoce, la conductividad superficial de un elemento aislante expuesto al medio ambiente depende básicamente de las condiciones ambientales, fundamentalmente de la humedad y de la contaminación ambiental, de los parámetros propios del aislador. La naturaleza hidrofóbica o hidrofílica son muy importantes, pues ellas determinan su respuesta ante el agua, en estas propiedades también juega un papel importante la naturaleza polar o no del material.

Los elementos aislantes, con la superficie perfectamente limpia y seca, tienen una resistencia superficial del orden de $10^7 - 10^{10} \Omega$ y después de ser expuestos al aire con 100 % de humedad relativa la resistencia de las superficies hidrofóbicas disminuye de dos a cuatro órdenes de diez y las superficies hidrofílicas disminuyen de cinco a siete órdenes.

En los aisladores que están sometidos a condiciones de contaminación ambiental, el efecto de la humedad es aún mayor debido a que la capa de contaminante absorbe humedad y con

ello aumenta considerablemente la conductividad superficial de la misma, tal como se muestra en la Figura 1.8.1 para aisladores limpios y contaminados.

Como se aprecia en la Figura 1.8.1, el aumento de la corriente superficial es apreciable a medida que aumenta la humedad y también es apreciable la diferencia en el comportamiento en los aisladores sometidos a prueba.



Fig. 1.8.1 Variación de la corriente superficial con la humedad.

- 1 Aislador de vidrio contaminado.
- 2 Aislador de porcelana contaminado.
- 3 Aislador de vidrio limpio.
- 4 Aislador de porcelana limpio.

Material	Altura	Diámetro	Línea de fuga

Tabla 1.8.1. Parámetros de los aisladores (cm).

Porcelana	15,0	27,50	36,5
Vidrio	14,4	25,5	30,5

1.9. Evaluación de la severidad de la contaminación ambiental.

Para la evaluación de la severidad de la contaminación ambiental es necesario, primero que todo, la determinación de los niveles de contaminación ya que con ello podremos calcular la magnitud de la línea de fuga del aislamiento que se necesita para evitar las fallas por esta causa. Los métodos son de evaluación indirecta y directa.

Los de evaluación indirecta se basan en la selección de muestras de contaminantes y los de evaluación directa se basan en el comportamiento de elementos aislantes situados directamente en las regiones de interés, los que pueden estar energizados o no.

Conocidos los niveles de contaminación, es necesario determinar las características de operación de los diferentes tipos de aisladores para evaluar su comportamiento ante las diferentes condiciones y con ello seleccionar, para una disposición aislante dada, los mejores aisladores.

La Publicación 815 de la IEC evalúa la severidad de la contaminación en cuatro niveles:

Ligera.

Media.

Fuerte.

Muy fuerte.

Estos niveles dependen de la intensidad de la contaminación, definiéndose para cada uno de los niveles las siguientes áreas:

<u>Ligera.</u>- Áreas sin industrias, con poca densidad de casas equipadas con plantas de calefacción. Áreas con baja densidad de industrias o casas pero sujetas a vientos frecuentes y/o lluvias frecuentes. Áreas agrícolas de poco desarrollo. Áreas montañosas. Todas estas áreas deben estar situadas como mínimo a 10 - 20 Km. del mar y no deben estar expuestas a vientos directos provenientes del mar.

<u>Media.</u>- Áreas con industrias que no produzcan contaminación y con poca densidad de casas equipadas con equipos de calefacción. Áreas con alta densidad de casas o industrias pero sujetas a frecuentes vientos y lluvias. Áreas expuestas a vientos provenientes del mar pero no cerca de las costas.

<u>Fuerte.</u>- Áreas con alta densidad de industrias y suburbios de grandes ciudades con alta densidad de casas y de plantas de calefacción. Áreas cerca del mar y en algunos casos expuestas a vientos relativamente fuertes provenientes del mar.

<u>Muy fuerte.</u>- Áreas generalmente de moderada extensión sujetas a polvos conductores y a humo que pueden producir finos depósitos de contaminante conductor. Áreas de moderada extensión cerca de las costas expuestas a aerosoles marinos directos. Áreas de desierto caracterizadas por largos períodos sin lluvia y expuestos a vientos fuertes que arrastran arena y sal, sujetos regularmente a procesos de condensación.

Para las áreas antes descritas, se definen las siguientes longitudes específicas efectivas de línea de fuga en kV/cm.

Nivel de	Longitud específica efectiva		
contaminación	mínima en kV/cm		
I - Ligero	1,6		
II - Medio	2,0		
III - Fuerte	2,5		
IV - Muy fuerte	3,1		

Tabla 1.9.1. Longitud específica efectiva para cada nivel de contaminación.

Como se puede apreciar, las definiciones antes dadas son bastante generales, por lo que, generalmente cada cual hace un estudio detallado para definir sus zonas de contaminación y las magnitudes de las longitudes efectivas de línea de fuga a emplear.

1.9.1. Determinación de los niveles de contaminación atmosférica.

Para la determinación de los niveles de contaminación atmosféricos se emplean dos métodos: los de evaluación directa y los de evaluación indirecta.

<u>Métodos de evaluación indirecta.</u>- Estos métodos caracterizan las zonas de contaminación sin tener en cuenta el aislamiento. Entre los más usados se encuentran:

- Los colectores de polvo no direccionales.
- Los colectores de polvo direccionales.
- El monitoreo de partículas sólidas en el aire.

• Los colectores de niebla.

De ellos, los más usados son los dos primeros por su sencillez y porque con ellos se obtienen buenos resultados.

Los colectores de polvo no direccionales se diseñan para obtener la deposición del contaminante que es arrastrado por el viento desde todas las direcciones y por gravedad, y da un estimado de toda la cantidad de polvo depositado sobre una superficie horizontal. Por el análisis del contaminante depositado y por la medición de la conductividad de los componentes solubles en agua, se determina la severidad de la contaminación.

Los colectores de polvo direccionales están compuestos por cuatro recipientes orientados según los cuatro puntos cardinales y dispuestos en forma tal que puedan colectar las partículas del contaminante que arrastra el viento, determinándose la severidad de la contaminación igual que en el caso anterior, pero adicionalmente permite determinar la posición de los focos de contaminación más severos.

En estos métodos, una vez recolectado el contaminante depositado, se determinan la densidad total del contaminante (D_T) y la densidad del contaminante soluble (D_S) por las expresiones:

$$D_T = \frac{M_T}{NA} \qquad \left(\frac{mg}{cm^2 x dia}\right) \tag{1.5}$$

$$D_{s} = \frac{M_{s}}{NA} \qquad \left(\frac{mg}{cm^{2} x dia}\right) \tag{1.6}$$

donde:

 M_T - Masa total del contaminante.

 M_{S} - Masa del contaminante soluble.

A- Área promedio de la abertura de los recipientes (cm²).

N-Número de los días de exposición.

Además, se determina la conductividad a 20°C del contaminante soluble mediante su disolución en una solución al 0,2% de concentración.

Considerando una probabilidad de ocurrencia de estos valores de 0,05% se determina la probabilidad P de que se presente un nivel de contaminación de este tipo por el producto de ellos tres, y en base a esta probabilidad se definen las zonas de contaminación. Una vez determinadas estas zonas, es necesario determinar para cada una de ellas la longitud específica efectiva de línea de fuga a emplear.

<u>Métodos de evaluación directa.</u>- En estos métodos, se determina un parámetro específico en aisladores contaminados bajo condiciones naturales, que puedan correlacionarse con el comportamiento de aisladores iguales bajo condiciones de contaminación artificiales. Entre estos métodos se destacan:

El conteo de pulsos de corriente de fuga.

El de la amplitud máxima de la corriente de fuga.

El de la densidad equivalente de sal depositada.

El método de conteo de pulsos consiste en contar los pulsos de corriente que se presentan debido a las descargas sobre la superficie de los aisladores contaminados durante un período de tiempo y, en dependencia de su frecuencia y magnitud, determinar que tipo de aislamiento es mejor para unas condiciones dadas. Para su implementación, se requiere de un campo de pruebas y del equipamiento necesario para medir los pulsos de corriente y discriminar su magnitud en niveles por lo general de 20, 50, 100 y 150 mA. Es muy útil en la evaluación del comportamiento de diferentes tipos de aisladores bajo condiciones de contaminación.

En el método de la amplitud máxima de la corriente de fuga se miden los pulsos de corriente pico, en aisladores de medición energizados a la tensión de operación, durante un período de tiempo determinado, seleccionándose el valor del pulso de corriente mayor como criterio para evaluar el nivel de contaminación en el punto analizado.

El método de la densidad equivalente de sal depositada (**DESD**) es uno de los más utilizados y para su aplicación se sitúan aisladores de muestra en los lugares de interés, los que se van retirando según lapsos predeterminados, se lavan cuidadosamente con agua destilada y se determina su resistividad a 20°C en Ω -cm, con la cual se determina la salinidad de la solución en **g/l** por la fórmula:

$$S = \exp\left(\ln\rho - \frac{1,70865}{0.9727151}\right) \tag{1.7}$$

El **DESD** se determina por la expresión:

$$DESD = \frac{SV}{A} \qquad \left(\frac{mg}{cm^2}\right) \tag{1.8}$$

donde:

- S- Salinidad de la solución.
- V- Volumen de la solución.
- A- Área lavada del aislador.

En base al DESD se definen los niveles de contaminación.

Una vez determinadas estas zonas es necesario determinar para cada una de ellas la longitud específica efectiva de línea de fuga a emplear.

1.9.2. Determinación de la distancia de fuga específica.

En la determinación de la distancia de fuga específica, uno de los métodos más empleados es el de determinar la tensión de descarga mínima promedio en aisladores contaminados naturalmente o artificialmente, por el método de la contaminación previa del aislador. Los aisladores contaminados se humedecen en forma continua con agua de conductividad no mayor de 100 µS/cm y utilizando un megóhmetro de 2,5 kV se mide periódicamente su resistencia hasta que alcance el valor mínimo.

A continuación se ejecutan una serie de mediciones consecutivas de tensiones de descarga aumentando lentamente la tensión aplicada hasta que se produzca el secado de la capa de contaminante, este proceso se repite hasta tres veces siempre y cuando la superficie del aislador no se haya lavado completamente.

En calidad del valor de la tensión de descarga mínima promedio de un aislador, en un punto dado de una región determinada, se considera el promedio de los valores mínimos obtenidos en cada serie de mediciones realizadas.

La distancia de fuga específica del aislamiento se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\lambda_e = K_S V K_e \left(\frac{L}{S}\right)^{\frac{1}{2}} \qquad \left[\frac{cm}{kV}\right]$$
(1.9)

donde:

 K_{s} - Coeficiente de reserva.

- L-Longitud de fuga geométrica del aislador (cm).
- V- Tensión de descarga mínima promedio (kV).
- *K*_e- Coeficiente de efectividad del aislador.

En el coeficiente de efectividad del aislador se tiene en cuenta el comportamiento del aislador en cuestión, respecto a uno tomado como patrón, por lo que, en él se considera su efectividad en el aprovechamiento de la longitud de la línea de fuga al desarrollarse la descarga, en lo que influye, como se sabe, la longitud geométrica de la línea de fuga, la magnitud del área protegida, el diámetro, altura constructiva, etc.

La determinación de este coeficiente es muy importante pues permite definir con exactitud el mejor tipo de aislador para una condición de contaminación dada. Para su determinación se toman los posibles tipos de aisladores a emplear y se someten a las mismas condiciones de contaminación, naturales o artificiales, y se les determina la tensión de descarga mínima promedio a cada tipo para cada zona de contaminación, calculándose K_e por la expresión:

$$K_e = \frac{L}{L_o} \frac{V_o}{V}$$
(1.10)

donde:

L, L_o- Longitud de fuga geométrica del aislador bajo prueba y del aislador patrón respectivamente.

V, V_o- Tensión de descarga mínima promedio del aislador bajo prueba y del aislador patrón respectivamente.

1.10. Proceso de descarga superficial de aisladores contaminados.

1.10.1. Introducción.

En la bibliografía consultada sobre descargas en los aisladores ocasionadas por rayos, no se tiene en cuenta el efecto de la contaminación, sin embargo, en el desarrollo de este trabajo se pudo comprobar que bajo condiciones de impacto directo, en dependencia de las características constructivas de la línea, del tiempo de duración de la descarga, etc, la tensión aplicada al aislador puede durar decenas µs, ver Figura 1.10.1.



Fig. 1.10.1. Variación de la tensión a que se ven sometidas las cadenas de aisladores en las tres fases de una torre impactada por un rayo.

Algunos autores [1] [2] han demostrado experimentalmente, que para ondas tipo conmutación (250/2500 µs), la fortaleza del aislamiento se reduce por efecto de la contaminación entre un 40 y un 60 %, por lo tanto, teniendo en cuenta los tiempos de duración la tensión en el aislador en condiciones de impacto directo, señalados anteriormente, se propone un método de cálculo que permite incluir el efecto de la contaminación en estos cálculos, cuando las condiciones de esta así lo requieran.

1.10.2. Desarrollo del modelo propuesto.

Partiendo del modelo establecido por Obenaus (Figura 1.10.2.1) [3] [2] y como es conocido, bajo determinadas condiciones en el aislador aparece una descarga parcial en la banda seca mientras el resto del aislador permanece humedecido.

La longitud de la banda seca o la longitud que representa la descarga parcial se representa por X mientras que la longitud total del aislador viene dada por L; quedando por tanto la longitud de la banda húmeda como L–X.



Fig. 1.10.2.1 Modelo de F. Obenaus.

Existen dos criterios fundamentales para desarrollar el modelo, primeramente se debe conocer la formulación de la tensión mínima para que no se extinga una descarga parcial en serie con la capa contaminada y humedecida.

Un circuito eléctrico equivalente del modelo de Obenaus se muestra en la Figura 1.10.2.2.



Fig. 1.10.2.2. Circuito equivalente del modelo.

Como se puede apreciar consiste en una fuente de tensión en oposición que representa el arco (V_{arco}) y una resistencia en serie R(X), quedando:

$$V = V_{arco} + R(X) \cdot I$$

(1.11)

donde:

I- Corriente circulante por la superficie aislante.

R(X)- resistencia de la capa húmeda del contaminante.

Varco- Caída de tensión en la parte seca del contaminante.

El arco eléctrico se puede representar como una resistencia interconectada entre dos electrodos, en cuyo espacio se ha formado este, lo que conlleva como en toda resistencia, a una caída de tensión asociada al mismo. Esta resistencia no tiene un comportamiento lineal, pues se ve acompañada de una caída de tensión anódica y catódica, más la propia que se produce a través del canal plasmático. Uno de los estudios más significativos realizados en este sentido [4], concluye que:

$$V_{arco} = a + b \cdot X + \frac{c + d \cdot X}{I}$$
 (kV)

(1.12)

donde:

a, b, c, d - Constantes que dependen de los materiales del electrodo.

X- Longitud del arco.

l- Longitud del aislador

V_{arco}- Caída de tensión a través del arco.

Experimentalmente se ha demostrado que Varco se puede expresar a través de:

$$V_{arco} = \frac{A \cdot X}{I^n} \tag{kV}$$

donde:

A y n- Coeficientes determinados según diferentes autores.

El empleo de la ecuación (1.13) facilita más el análisis, pues en la ecuación (1.12) entran a jugar demasiados factores que complican el análisis. Los valores más comunes de los coeficientes A y n que se emplean se pueden apreciar en la Tabla 1.10.2.1.

Tabla 1.10.2.1. Valores de A y n.

Α	63	100	200
n	0.76	0.5	0.83

Estos coeficientes se basan en la experimentación y en este caso se toman los experimentos de Claverie y Porcheron [2], por tanto los coeficientes tomarían los valores de A = 100 y n

= 0.5 quedando entonces:

$$V_{arco} = \frac{100 \cdot X}{\sqrt{I}}$$
(kV)
(1.14)

Para el cálculo de la resistencia de la capa húmeda de contaminante, se consideró esta como un electrólito.

De estudios electroquímicos se conoce que una de las magnitudes más importantes que caracterizan a las soluciones de electrólitos lo constituye la conductividad. Las soluciones electrolíticas pueden considerarse con una buena aproximación como conductores eléctricos de primera clase (óhmicas), la resistencia de las disoluciones puede por tanto evaluarse por la expresión:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \tag{1.15}$$

donde:

- R- Resistencia del material y como propiedad extensiva del sistema depende del tamaño y forma del dispositivo conductor.
- ρ Resistividad del material, depende de la temperatura.
- *l*-Longitud del conductor.
- A Área del conductor.

Para soluciones electrolíticas es más conveniente referirse a la conductancia (c) y a la conductividad (σ)

$$c = \frac{1}{R} \tag{1.16}$$

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{1.17}$$

Si se establece que:

$$K = \frac{l}{A} \tag{1.18}$$

llegando a la siguiente expresión:

$$c = \sigma \cdot \frac{1}{K} \tag{1.19}$$

donde:

- *c* Conductancia (*S* : siemens).
- σ Conductividad ($S \cdot m^{-1}$).
- *K* Constante de la celda.

La constante de la celda (K) depende de la geometría de la celda (forma, posición y superficie de los electrodos), volumen y forma del recipiente y el nivel del electrólito en él.

La conductividad de la disolución (σ) caracteriza la conductividad eléctrica de un volumen de la misma, limitado por dos electrodos paralelos con un área de un metro cuadrado (m^2) y situados a una distancia de un metro (m) entre sí. La conductividad de las disoluciones de electrólitos depende de su fortaleza, así aquellos electrólitos más fuertes mostrarán mayores valores de conductividad.

Para un mismo electrólito, un aumento de la concentración provoca dentro de ciertos límites un incremento de la conductividad. En la siguiente Tabla 1.10.2.2 se observan las variaciones de la conductividad en soluciones de NaCl de diferentes concentraciones.

Concentración NaCl $(mol \cdot L^{-1})$	Conductividad ($S \cdot m^{-1}$)
0.1	1.067
0.5	4.681
1.0	8.576
2.0	14.940
3.0	19.670
4.0	22.890
5.0	24.730

 Tabla 1.10.2.2. Relación entre la concentración y conductividad.

La fundamentación radica en el hecho de que con un aumento de la concentración, aumenta el número de portadores de carga y por tanto un aumento de la conductividad. El agua de mar a diferencia del agua lluvia experimenta una elevada conductividad justificada por la alta concentración de sales disueltas en ella, la conductividad de las soluciones de electrólitos también experimenta un aumento con la temperatura ya que el aumento de esta genera una mayor movilidad de los iones hacia los electrodos correspondientes.

El esquema representado en la Figura 1.10.2.1, bajo estudio se asemeja a una celda de conductividad típica de

una solución electrolítica, considerando que partículas depositadas en el aislador producen una película por lo que se considera el paso de la corriente a través de una superficie. Aplicando las ecuaciones que rigen la Ley de Ohm en este medio se tiene para este sistema en particular una expresión análoga a:

$$R(X) = \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{(L - X)}{W} \tag{\Omega}$$

(1.20)

donde:

 γ - Conductividad de la capa contaminante húmeda (Ω^{-1}).

L- Longitud geométrica de fuga del aislador (cm).

W- Longitud de la circunferencia media del aislador (cm).

Para el análisis en la práctica, se toma como referencia la solución de agua destilada con cloruro de sodio, es decir un equivalente de la contaminación marina (se ha demostrado que el cloruro de sodio es el tipo de contaminante que crea las condiciones peores para el trabajos estable del aislamiento bajo contaminación) además se considera que la distribución del contaminante en el aislador es uniforme. Basado en lo anterior se determina γ a través de:

$$\gamma = F \cdot C \cdot \alpha \cdot (b^+ + b^-)$$

(1.21)

donde:

F- Constante de Faraday (F = 96487 c/mol).

C- Concentración molar de equivalentes del electrólito (mol/l).

- α Grado de disociación (como es un electrólito fuerte y además la disociación es completa $\alpha = 1$).
- (b⁺ y b⁻)- Movilidad de los iones positivos y negativos respectivamente. Para el cloruro de sodio (NaCl) a 25°C toma los siguientes valores:

$$b^{+}(Na) = 4.5 \cdot 10^{-4} (cm^{2}/s.V).$$

$$b^{-}(Cl) = 6.77 \cdot 10^{-4} (cm^{2}/s.V).$$

Para calcular la concentración del electrolito en el aislador se parte de conocer, primeramente, la Densidad de Sal Equivalente Depositada (DESD). Como se señaló anteriormente se considera el contaminante como un equivalente de la contaminación marina, por tanto partiendo de estos planteamientos y basados en los estudios desarrollados por M. Castro [1] se puede obtener la DESD de la Tabla 5.2.2, para determinar la concentración:

 $C = \frac{m}{Vol}$ (1.22)

donde:

m- Masa de sal equivalente depositada.

Vol- Volumen de agua depositado.

Nivel de contaminación.	DESD (mg/cm ²) asociada.
Ι	DESD≤0.01
II	0.01 <desd≤0.02< td=""></desd≤0.02<>
III	0.02 <desd≤0.04< td=""></desd≤0.04<>
IV	0.04 <desd≤0.06< td=""></desd≤0.06<>
V	0.06 <desd≤0.08< td=""></desd≤0.08<>
VI	0.08 <desd< td=""></desd<>

Tabla 1.10.2.3 Densidad de sal equivalente depositada.

Igualmente para determinar la masa se parte de la Densidad de Sal Equivalente Depositada (DESD), tomada de la Tabla 1.10.2.3.

 $m = DESD \cdot S$

(1.23)

donde:

S- Área donde se deposita el contaminante.

Mientras que el volumen vendría determinado por:

 $Vol = h_r \cdot S$

(1.24)

donde:

h_r- Humedad relativa del aire (%).

Por tanto, dividiendo (1.23) entre (1.24) se tiene que:

$$C = \frac{DESD}{h_r}$$

(1.25)

Para determinar los valores de W y L se requiere conocer la forma del aislador, pero como es conocido, la complejidad de este, hace prácticamente imposible precisar las mediciones, por tanto para poder realizarlo es necesario modelar el aislador cual si fuera un cilindro, en el cual su diámetro viene dado por la semisuma de los diámetros mayor y menor del aislador Figura 1.10.2.3, además la longitud de fuga está representada por la altura del cilindro, por lo que para conocer W se aplica la siguiente expresión:

$$W = \Pi \cdot \frac{(D+d)}{2} \tag{1.26}$$

donde:

D- Diámetro mayor del aislador (cm).

d- Diámetro menor del aislador (cm).



Fig. 1.10.2.3. a) Sección de un aislador.

b) Modelo aproximado del aislador.

El valor de L se toma como la longitud de fuga geométrica del aislador, que siendo una aproximación no se aleja de la realidad al ser la que consideran todos los investigadores para facilitar el problema.

CAPÍTULO II. Cálculo de descargas inversas y directas bajo condiciones de contaminación.

2.1. Introducción.

Al producirse un impacto directo, en las líneas protegidas con cable protector este puede golpear las torres, o los cables protectores en el vano entre torres y en este caso pudiera ocurrir la descarga inversa de los aisladores; de ocurrir una falla de blindaje el impacto lo recibirían los conductores de fase y en ese caso ocurriría la descarga directa. En las líneas no protegidas el impacto lo recibirían las torres dando lugar a una descarga inversa o los conductores de fase lo que también daría lugar a la descarga directa.

Tomando como punto de partida algunos de los resultados obtenidos por John G. Anderson [5] [6] y los obtenidos por A. Valcárcel [7] se desarrolló una modelación en ATP que permite determinar la ocurrencia o no de descargas inversas o directas en líneas de transmisión bajo condiciones de contaminación.

2.2. Modelo propuesto para el cálculo de las reflexiones desde torres adyacentes

Las reflexiones desde torres adyacentes pueden reducir la tensión en los aisladores de la torre impactada debido a las ondas de corriente reflejadas, ya que dependiendo de la longitud del vano entre torres, estas ondas reflejadas pueden llegar antes o después que la tensión de cresta alcance su máximo en la torre golpeada. La magnitud de las reflexiones no se determina fácilmente por medios analíticos simples porque las ondas reflejadas se deforman por el efecto corona y las pérdidas resistivas, las que a su vez son funciones de la tensión, el tiempo de crecimiento (de la onda) y la distancia entre torres y además por el gran número de ondas que por reflexiones y refracciones múltiples pueden estar involucradas, sin embargo, se requiere de la consideración de estas reflexiones porque las mismas pueden reducir el promedio de disparos si llegan lo suficientemente rápido a la torre impactada por la descarga.

Una estrategia utilizada por algunos investigadores con algún éxito en este sentido consiste en reemplazar cada impedancia transitoria de la torre adyacente y su resistencia de aterramiento por una impedancia equivalente que está en función de la forma de la onda de impacto, no obstante, el hecho de no considerar el resto de la línea influye en la forma de la onda de tensión que llega al aislador, por lo que, teniendo en cuenta lo antes planteado, se propone el siguiente modelo:

Considerar una torre adyacente, más una línea terminada en su impedancia característica a cada lado de la torre impactada, Figura 2.2.1. Se pueden tener en cuenta otros modelos, con más torres adyacentes a la impactada, pero la precisión puede ser despreciada, no obstante, el algoritmo que se propone permite contemplar cualquier número de torres.



Fig. 2.2.1. Modelo que considera una torre adyacente más una línea determinada en su impedancia característica a cada lado de la torre impactada.

2.3. Cálculo de la impedancia transitoria de la torre y la resistencia de aterramiento.

Se puede suponer que la torre es una simple línea corta de transmisión con una impedancia transitoria constante, aterrada mediante su resistencia de aterramiento a la base, esta impedancia transitoria se ha calculado y medido tanto en el campo como en modelos de escala. Las torres que pueden ser idealizadas por un cono de altura h y un radio de base r, por ejemplo, las torres convencionales de doble circuito, poseen una impedancia transitoria, ampliamente aceptada por la literatura [8] [9] [10] [11] [12] [13], que se expresa mediante:

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

Y para torres cilíndricas, la literatura [6] [9] [10] plantea que la expresión siguiente da resultados satisfactorios:

$$Z_t = 60\ln\left(\frac{h}{r}\right) + 90\left(\frac{r}{h}\right) - 60 \qquad (\Omega)$$
(2.2)

donde:

h y r son la altura y el radio equivalente (significa la periferia dividida por 2π) de la torre.

Las expresiones obtenidas por Sargen y Darveniza [13] son las preferidas por el autor.

Con esta expresión de impedancia transitoria, se desarrolló un modelo de la torre en ATP.



Fig. 2.3.1. Modelo de la torre en ATPDRAW.

2.4. Comportamiento dinámico de la puesta a tierra.

El estudio de los transitorios en los sistemas a tierra ha sido tratado por varios investigadores [14] [15] [9] [11] [16] [17]. Existen dos corrientes fundamentales para el tratamiento de este problema:

Enfoque empírico.

Enfoque analítico.

Dentro del enfoque analítico existen tres variantes, las cuales se basan en:

- Teoría de los circuitos eléctricos.
- Teoría de las líneas de transmisión.
- Teoría del campo electromagnético.

La modelación propuesta en este trabajo se basa en la teoría de los circuitos eléctricos y la teoría de las líneas de transmisión. Ambas implican la determinación de la impedancia que aparece en el sistema de puesta a tierra.

Los sistemas de puesta a tierra además de conducir la corriente de falla a esta, también deben conducir a tierra la corriente provocada por las descargas atmosféricas, la cual se comporta como una onda de choque y, por lo tanto, se encuentra gobernada por la impedancia característica del sistema de puesta a tierra. Al arribar un frente de onda, la corriente que se propaga con el mismo, se filtra (a través de los electrodos) a tierra, pero en su camino se encuentra con una impedancia de conexión con esta y por otra parte la onda al propagarse por la

tierra se encuentra con una oposición a su paso. El cálculo de la impedancia de puesta a tierra, se encuentra dividido en dos partes fundamentales:

Impedancia de conexión:

El comportamiento dinámico, de la puesta a tierra denota que la impedancia del sistema no solo se compone de una resistencia, sino que aparecen en esta una parte reactiva compuesta de un capacitor y un inductor. En muchos de los trabajos de cálculo de descargas inversas y directas la impedancia de puesta a tierra se da solo en función de la resistencia medida en la base de la torre. En gran parte de la literatura científica relacionada con este tema se aborda el análisis de esta manera, y en el mejor de los casos este parámetro se da en función de la impedancia de impulso.

Para conocer el valor de la capacitancia de la puesta a tierra se parte de la ecuación de la resistencia de puesta a tierra, quedando entonces:

$$C = \frac{\rho}{4 \cdot \pi \cdot R} \cdot \varepsilon \tag{F}$$

donde:

E- Permitividad eléctrica absoluta del medio en que se propaga (A.s/V.cm).

Como se conoce, toda onda que se propaga en un medio lo realiza con una velocidad igual a:

$$v = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \tag{(2.4)}$$

donde:

L- Inductancia del medio por que se propaga (H).

C- Capacidad del medio (F).

v- Velocidad de propagación de la onda (m/µs).

Que también se puede expresar por:

$$v = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon \cdot \mu}} \tag{(m/\mu s)}$$

donde:

µ- Permeabilidad magnética absoluta del medio (V.s/A.cm).

Igualando las ecuaciones (2.4) y (2.5), se obtiene:

$$L = \frac{\varepsilon \cdot \mu}{C} \tag{H}$$

Con estos datos la impedancia de conexión del sistema de puesta a tierra viene dado por un circuito equivalente, a través de un modelo de una línea media, el cual se puede apreciar en la Figura 2.4.1.



Fig. 2.4.1. Modelo de la impedancia de conexión.

Por tanto la impedancia total del sistema viene dada por:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{\left(R + i \cdot w \cdot L\right)} + i \cdot w \cdot C}$$
(2.7)

donde:

w- Frecuencia angular de la onda que se propaga.

Según Heaviside [5] para el desarrollo de una función no periódica y para tiempos de análisis muy pequeños se puede tomar la frecuencia angular como:

$$w = \frac{1}{t} \tag{2.8}$$

donde:

t- Tiempo que dura la onda, Figura 2.4.2.

Por tanto la ecuación (2.7) se transforma en:

$$Z = \frac{1}{\frac{1}{\left(R+i\cdot\frac{L}{t}\right)} + i\cdot\frac{C}{t}}$$
(Ω) (2.9)

Esta ecuación refleja el comportamiento de la impedancia de conexión en el tiempo.



Fig. 2.4.2. Posible forma de onda de la corriente.

Impedancia de propagación:

La tierra aunque no es un conductor por excelencia, posee baja resistencia pues el área por la cual circula la corriente a través de esta es grande. La resistencia de esta al igual que todo conductor es afectada por la frecuencia, lo cual se conoce por efecto pelicular.

El efecto pelicular decide la magnitud del amortiguamiento de cualquier onda al aumentar la resistencia, por lo que se puede plantear, que esta resistencia en un medio conductor como la tierra, satisface la siguiente expresión:

$$R = \frac{1}{h} \cdot \sqrt{\frac{\rho \cdot w}{\pi}} \tag{(2.10)}$$

donde:

 ρ - Resistividad de la capa de tierra (Ω .m).

h- Altura del conductor del cable protector sobre la tierra (m).

w- Frecuencia angular.

Sustituyendo (2.8) en (2.10) se obtiene:

$$R = \frac{1}{h} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{\pi \cdot t}} \tag{2.11}$$

Como se puede apreciar, se tiene la expresión de la resistencia en función del tiempo.

Con ambas ecuaciones (2.9) y (2.11) se desarrolló un programa en MatLab mediante el cual se obtuvo la dependencia con el tiempo de todo el sistema. Ambas impedancias se pueden apreciar interrelacionadas en la Figura 2.4.3 y cuya representación gráfica se muestra en la Figura 2.4.4.



Fig. 2.4.3. Impedancia total del sistema de puesta a tierra.

donde:

- L- Inductancia de la impedancia de conexión (H).
- C- Capacitancia de la impedancia de conexión (F).
- R- Resistencia de la impedancia de conexión (Ω).
- R_p Resistencia de la impedancia de propagación (Ω).



Fig. 2.4.4. Gráfico de impedancia de puesta a tierra vs. tiempo.

Para brindar una idea de la validez del método propuesto, se establece una comparación con los resultados obtenidos por M.E. Almeida en [14] cuyo resultado fundamental sobre el comportamiento ante impulso de la puesta a tierra se puede apreciar en la Figura 2.4.5.

Este método se basa en considerar que la resistividad del medio depende del campo eléctrico, ya que este no es uniforme al ocurrir un fenómeno de ionización en la tierra.

De esta figura se puede apreciar que la variación con respecto al tiempo de la puesta a tierra es semejante en los dos métodos, lo cual confirma los resultados del modelo desarrollado. Es de señalar que el método de M.E Almeida está avalado por resultados obtenidos experimentalmente.



Fig. 2.4.5. Comportamiento ante impulso de la puesta a tierra, según [14].

2.5. Cálculo de la tensión en los aisladores de la torre impactada.

Partiendo del circuito equivalente del modelo propuesto anteriormente se hace un modelo en ATP, Figura 2.5.1, con el cual se puede determinar la forma de onda de la tensión que aparece en los aisladores de cualquiera de las fases de una línea de doble circuito con estructuras como la que se muestra en la Figura 2.5.2, teniendo en cuenta todas las posibles ondas que se generan en el proceso de transmisión – reflexión que tiene lugar entre esta torre y sus torres adyacentes, así como internamente en la propia torre impactada.



Fig. 2.5.1. Modelo obtenido con el ATPDRAW.



Fig. 2.5.2. Dimensiones y características constructivas de las estructuras usadas para el análisis.

En la Figura 2.5.3 se muestran la forma de la onda de tensión que aparece en el aislador de la cruceta superior, para una separación entre torres adyacentes de 500m, en la cual incide un rayo con una corriente de 180 kA.



Fig. 2.5.3. Tensión en la cruceta superior de la torre.

2.6. Determinación de la razón de salida por impacto directo de una línea aérea de potencia bajo condiciones de contaminación.

Basado en el modelo electrogeométrico (MEG) el ancho del área de atracción de una línea viene dado, Figura 2.6.1 por:

$$A = b + 2x \tag{(m2)}$$

o lo que es lo mismo:

$$A = b + 2\sqrt{r_s^2 - (r_{sg} - h)^2} \qquad (m^2)$$
(2.13)

siendo:

$$r_s = 8 \cdot I_s^{0.65} \tag{(m)}$$

$$r_{sg} = k_{sg} \cdot r_s \tag{(m)}$$

- r_s Distancia de impacto.
- r_{sg} Distancia de impacto al plano de tierra.
- I_s Corriente de retorno en (kA).
- k_{sg} Entre 0.6 y 1 según el criterio de diferentes autores dependiendo del nivel de voltaje y la altura de la línea.
- h Altura de los cables protectores de la línea en caso de que esté desprotegida.
- *b* Separación entre los cables protectores para una línea protegida con dos cables o la separación entre las fases extremas de una línea protegida con un solo cable o desprotegida.



Fig. 2.6.1. Determinación del área de atracción a ambos lados de la línea.

Partiendo de la mínima corriente que es capaz de provocar descarga para un tiempo de frente de 0.5μ s. Cualquier corriente igual o mayor que esta I_1 impactará la línea si incide dentro del área de atracción A_1 . Este valor se incrementa hasta 200 kA en pasos de 0.5 kA y el tiempo de frente se varía desde 0.5 μ s hasta 10.5 μ s con pasos de 0.5 μ s. Para cada corriente se calcula la nueva distancia de impacto y con ella la nueva área de atracción. Si la densidad de rayos a tierra de la región es N_g (número de rayos por Km^2 al año) para la combinación de corriente y tiempo de frente seleccionado será:

$$N_{A1} = P_1(I, t_f) \cdot I \cdot t_f \cdot N_g \cdot A_1$$
(2.16)

donde:

 $P_1(I, t_f)$ - Función de densidad probabilística de acoplamiento de amplitud y tiempo de frente de la corriente y esta dada por [18]:

$$P(I,t_f) = \frac{\exp\left[\frac{-0.5}{1-\rho^2}(f_1 - f_2 + f_3)\right]}{2\pi I t_f \sigma_{\ln I} \sigma_{\ln t_f} \sqrt{1-\rho^2}}$$
(2.17)

donde:

$$f_1 = \left(\frac{\ln I - \ln I_m}{\sigma_{\ln I}}\right)^2 \tag{2.18}$$

$$f_2 = 2\rho \left(\frac{\ln I - \ln I_m}{\sigma_{\ln I}}\right) \left(\frac{\ln t_f - \ln t_{fm}}{\sigma_{\ln t_{fm}}}\right)$$
(2.19)

$$f_3 = \left(\frac{\ln t_f - \ln t_{fm}}{\sigma_{\ln t_{fm}}}\right)^2 \tag{2.20}$$

 ρ - Coeficiente de correlación entre la corriente y el tiempo de frente = 0.47.

 t_{fm} - Tiempo de frente medio = 3.83 µs.

 $\sigma_{ln tfm}$ - Desviación estándar Log natural = 0.553.

Para I < 20 kA:

 I_m - Corriente media = 61.1 kA.

 $\sigma_{lm Im}$ - Desviación estándar Log base e = 1.33

Para I > 20 kA:

 I_m - Corriente media = 33.3 kA.

 $\sigma_{lm Im}$ - Desviación estándar Log base e = 0.605.

Para el primer valor de corriente se incrementa el tiempo de frente en 0.5µs hasta 10.5µs y en cada incremento se calcula:

$$\Delta N_{A1} = P(I, t_f) \cdot I \cdot \Delta t_f \cdot N_g \cdot A_1$$
(2.21)

donde:

El
$$N_{A1T}$$
 es:

$$N_{A1T} = N_{A1} + \sum_{t_f=1}^{t_f=10.5} \Delta N_{A1}$$
(2.22)

Luego se incrementa I en 5 kA y se calcula el N_{A2} como:

$$N_{A2} = P(I, t_f) \cdot \Delta I \cdot t_f \cdot N_g \cdot \Delta A \tag{2.23}$$

donde:

$$\Delta I = I_2 - I_1 \tag{2.24}$$

$$\Delta A = A_2 - A_1 \tag{2.25}$$

Luego se incrementa el t_f hasta 10.5µs con pasos de 0.5µs y en cada paso se calcula:

$$\Delta N_{A2} = P(I, t_f) \cdot \Delta I \cdot \Delta t_f \cdot N_g \cdot \Delta A \tag{2.26}$$

luego

$$N_{A2T} = N_{A2} + \sum_{t_f=1}^{t_f=10.5} \Delta N_{A2}$$
(2.27)

Esto se repite hasta I = 200kA, quedando:

$$N_{AT} = \sum_{i=1}^{n} N_{Ai}$$
(2.28)

siendo:

 $N_{\rm AT}$ - Razón de salida por impactos directos que provocan flameo inverso.

2.7. Determinación de la ocurrencia del flameo bajo condiciones de contaminación.

La dependencia de la tensión con la corriente se puede determinar a través de un gráfico de V contra I conociendo todos los parámetros constantes, se obtendrían los resultados que se muestran en la Figura 2.8.1.



Fig. 2.7.1. Dependencia de la tensión respecto a la corriente.

Analizando la Figura 2.7.1 se tiene que:

 V_{arco} representa el comportamiento que corresponde a la descarga en el aire, en tanto IxR(X) representa la caída de tensión en la capa húmeda del contaminante y V(I) constituye la combinación de ambos componentes. De acuerdo con los experimentos realizados por Claverie y Porcheron [2] se obtiene que la condición de formación de un arco a través de la banda seca en el aislador está dada por:

$$V \ge \frac{k \cdot X}{I^n} \tag{2.29}$$

donde:

k- Coeficiente determinado para la corriente en el arco para diferentes tensiones.

Tomando k = 800 (de acuerdo con Claverie y Porcheron [2]), y sustituyendo (1.14) y (2.29) en (1.11) se obtiene la expresión de la tensión mínima.

$$V = \frac{k}{(k-100)^{\frac{n}{n+1}}} \left(X^{\frac{1}{n}} \cdot R(X) \right)^{\frac{n}{n+1}}$$
(kV)

(2.30)

Como se aprecia esta ecuación representa una función dependiente de una sola variable X pues los demás coeficientes que aparecen son constantes.

La representación gráfica de esta expresión en función de la distancia (X) para la cual es posible la existencia de la descarga se puede apreciar en la Figura 2.7.2.

De la Figura 2.7.2 se observa que si al aislador se le aplica una tensión V_s y la longitud inicial de la descarga es menor que X_s dicha descarga podría crecer hasta alcanzar una longitud $X = X_s$ siendo imposible cualquier crecimiento posterior, ya que la tensión requerida para esto sería mayor que V_s . Sin embargo, si la descarga inicial es de longitud

 $X > X_c$, esta podría crecer hasta llegar a la descarga total, pues no se hace necesario un incremento de la tensión para su sostenimiento. En la práctica esto no ocurre pues se requeriría de que la longitud inicial de la descarga fuera mayor que la mitad de la longitud de fuga del aislador, lo que no sucede en la realidad, por tanto para que ocurra la descarga debe aparecer una tensión V(t) > V_c.



Fig. 2.7.2. Característica de la tensión vs. longitud del arco.

Así, resulta de vital importancia conocer el valor máximo (V_c) que presenta esta gráfica, pues si en algún instante de tiempo la tensión que aparece en el aislador supera a este valor, ocurrirá la descarga total.

Para conocer este pico se sustituye a R(X) en la ecuación 2.30 y se obtiene:

$$V = \frac{k}{\left(k - 100\right)\frac{n}{n+1}} \left(X^{\frac{1}{n}} \cdot \frac{(L-X)}{\gamma \cdot W}\right)^{\frac{n}{n+1}}$$
(kV)

(2.31)

Derivando (2.31) respecto a X e igualando a cero se obtiene el valor de la distancia para este máximo (X_c):

$$X_c = \frac{L}{(n+1)} \tag{cm}$$

(2.32)

de donde se obtiene V_c como:

$$V_c = \frac{k \cdot L}{(n+1) \cdot [(k-100) \cdot \gamma \cdot W]_{n+1}^n}$$
(kV)
(2.33)

Anteriormente se planteó que para valores menores que V_c, la descarga total era posible

sólo sí $X_s>X_c$. Analizando la expresión (2.33) para que esto se cumpla, la descarga inicial tendría que poseer una longitud mayor que la mitad de la longitud total del aislador, lo cual es prácticamente imposible para la longitud real de los mismos y para la tensión de trabajo aplicada en operación normal.

Con este procedimiento es muy fácil determinar si existe posibilidad de descarga, pero no muestra si esta en realidad ocurre, o lo que se produce es una descarga parcial en el aislador, por tanto se requiere de otro análisis para obtener los resultados adecuados. Lo más práctico es emplear la tensión como un indicador que señala la ocurrencia del fenómeno, pero la longitud del arco resulta más adecuada. Para determinarla, se parte de la forma de onda de tensión aplicada al aislador y con esta se determinan las variaciones de la longitud del arco en el tiempo. Como es de suponer si en algún instante esta supera la altura del aislador ocurre la descarga, para lo cual se requiere conocer la variación de la tensión en el tiempo lo cual permitirá obtener los ceros de la ecuación (2.33), formando con la misma un polinomio:

$$X^{\frac{n+1}{n}} - L \cdot X^{\frac{1}{n}} + A = 0$$
(2.34)

donde:

$$A = \left(\frac{V}{k}\right)^{\frac{n+1}{n}} \cdot \left(\left(k - 100\right) \cdot \gamma \cdot W\right)$$
(2.35)

Con la ayuda del Matemática 5.0 se obtuvo la expresión de X (Anexo # 1).

La distribución no lineal de tensión en las cadenas de aisladores es aplicable también para las sobretensiones de origen atmosférico, por lo que la tensión en cada uno de los aisladores de la cadena estaría dada por:

 E_1 = tensión en el primer aislador (el más próximo a la cruceta)

$$E_n = E_{n-1} + \sum_{i=1}^{n-1} E_i \cdot \frac{C_e}{C_i}$$
 (kV)

(2.36)

La relación entre las capacidades C_e/C_i toma valores entre 0.1 y 0.25, por lo que la suma de las tensiones en cada aislador es igual a la tensión de fase a tierra de la línea.

$$E_1 + E_2 + E_3 + E_4 + \dots + E_n = V_f(t)$$
(2.37)

2.8. Ejemplo del procedimiento de cálculo.

A modo de ejemplo, se toma un aislador estándar, cuyos datos se aprecian en la Figura 2.8.1.

Designación	Configuración.	Diámetro (D.mm).	Espaciamiento entre unidades (H.mm).	Distancia del arco (L.mm).
Disco normal (250S)	н	254	146	280

Fig. 2.8.1. Aislador estándar.

Además de estos datos, se necesita conocer el diámetro menor del aislador (d en mm) que para este caso es de 160 mm y para determinar el nivel de contaminación, se necesita conocer: humedad relativa del aire $h_r = 0.75$ (aproximado) y la densidad de sal equivalente depositada DESD = $0.03 \cdot 10^{-3}$ equiv.g/cm² (tercer nivel de contaminación Tabla 1.9.1). Partiendo de estos datos se programó un modelo en ATP un algoritmo (Anexo # 2) cuyos pasos fundamentales son:

- Determinar la tensión a que se encuentra sometida cada cadena de aisladores en la torre, con la cual se determina, la tensión para cada aislador de la cadena fundamentalmente para el más próximo a la línea.
- Determinar la longitud del arco, a través de (Anexo # 1), es decir calcular los ceros de dicha ecuación.
- 3. Luego para analizar si ocurre o no descarga se empleó un método gráfico, el que consiste en representar la longitud del arco en función del tiempo. Si en algún momento la longitud del arco supera la longitud del último aislador de la cadena ocurre la

descarga de este y a continuación la del resto de los aisladores.

Para una línea con estructuras como la que se muestra en la Figura 2.5.2, suponiendo el impacto de un rayo de 161 kA en el tope de la torre, la característica de longitud adquirida por el arco vs. tiempo, de un aislador como el descrito anteriormente, se muestra en las Figuras 2.8.2, 2.8.3 y 2.8.4 para las crucetas superior, intermedia e inferior.



Fig. 2.8.2. Longitud de arco vs. tiempo para la cadena de aisladores de la cruceta superior.



Fig. 2.8.3. Longitud de arco vs. tiempo para la cadena de aisladores de la cruceta intermedia.



Fig. 2.8.4. Longitud de arco vs. tiempo en la cadena de aisladores de la cruceta inferior.

CAPÍTULO III. Efectos del tiempo de frente, la resistencia de puesta a tierra y la magnitud de la corriente en la tensión aplicada a los aisladores.

3.1. Introducción.

Existe una serie de parámetros que inciden en la forma de onda de la tensión que queda aplicada a una cadena de aisladores en la estructura de una línea de transmisión, cuando sobre esta incide una descarga atmosférica, entre ellos los más importantes son el tiempo de frente de la onda de corriente incidente, la resistencia de puesta tierra de la torre impactada y la amplitud de la onda de corriente incidente.

3.2. Efecto del tiempo de frente en la forma de onda de la tensión aplicada al aislador.

Las Figuras 3.2.1 a la 3.2.6 muestran la forma de onda de la tensión que queda aplicada a la cadena de aisladores de la cruceta superior de la estructura de una línea de transmisión, para una onda incidente de 5 kA de amplitud y resistencia de puesta a tierra de 10 ohm para diferentes tiempos de frente.



Fig. 3.2.1. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 0.5 µs.



Fig. 3.2.2. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 1 µs.



Fig. 3.2.3. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 2 μ s.



Fig. 3.2.4. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 3 µs.



Fig. 3.2.5. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 4 µs.



Fig. 3.2.6. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para un tiempo de frente de 5 µs.

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, con el aumento del tiempo de frente de la onda incidente de corriente se produce una disminución en el primer pico de la tensión que queda aplicada, en este caso al aislador de la cruceta superior de la estructura, mientras que el resto de la característica de tensión contra tiempo se mantiene prácticamente invariable. Esto se debe a que el primer pico depende de la forma de la onda incidente inicial, mientras que la forma del resto de la característica depende del proceso de transmisión-reflexión que tiene lugar dentro de la torre impactada y entre esta y las torres vecinas, o sea, de la topología de la red (altura de la torre, distancia entre torres, resistencia de puesta a tierra, etc).

3.3. Efecto del tiempo de frente en la forma de onda de la tensión aplicada al aislador.

Las Figuras 3.3.1 a la 3.3.9 muestran la forma de onda de la tensión que queda aplicada a la cadena de aisladores de la cruceta superior de la estructura de una línea de transmisión, para una onda incidente de 5 kA de amplitud y tiempo de frente de 0.5 μ s para diferentes resistencias de puesta a tierra.



Fig. 3.3.1. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 10 ohm.



Fig. 3.3.2. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 20 ohm.



Fig. 3.3.3. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 40 ohm.



Fig. 3.3.4. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 80 ohm.



Fig. 3.3.5. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 100 ohm.



Fig. 3.3.6. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 200 ohm.



Fig. 3.3.7. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 300 ohm.



Fig. 3.3.8. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 400 ohm.



Fig. 3.3.9. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una resistencia de puesta a tierra de 500 ohm.

Como se muestra en las figuras anteriores, con el aumento de la resistencia de puesta a tierra se produce un aumento de la tensión en el primer pico toda la característica de tensión contra tiempo y en el resto hay una tendencia pequeña a disminuir, esto se debe a que al aumentar la resistencia de puesta a tierra las tensión que se reflejan en ella se hace mayor, y esta onda reflejada incrementa la tensión en el aislador, la disminución posterior se debe al proceso de transmisión reflexión con las torres vecinas.

3.4. Efecto del tiempo de frente en la forma de onda de la tensión aplicada al aislador.

Las Figuras 3.4.1 a la 3.4.7 muestran la forma de onda de la tensión que queda aplicada a la cadena de aisladores de la cruceta superior de la estructura de una línea de transmisión, para una onda incidente de 0.5 μ s de tiempo de frente y resistencia de puesta a tierra de 10 ohm para diferentes amplitudes de corriente.



Fig. 3.4.1. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 5 kA.



Fig. 3.4.2. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 10 kA.



Fig. 3.4.3. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 15 kA.



Fig. 3.4.4. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 20 kA.



Fig. 3.4.5. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 40 kA.



Fig. 3.4.6. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 60 kA.



Fig. 3.4.7. Variación de la tensión aplicada a la cadena de aisladores para una corriente de 80 kA.

Como era de esperar, un incremento en la magnitud de la corriente incidente provoca un aumento de la tensión a todo lo largo de la característica de tensión contra tiempo, el primer pico de corriente varía bruscamente al igual que los restantes debido a que a medida que va aumentando la magnitud de la corriente incidente aumenta la tensión aplicada a cada una de las cadenas de aisladores.

CONCLUSIONES.

Una vez concluido el trabajo es posible llegar a las siguientes conclusiones:

- La modelación en ATPDRAW ha confirmado que la tensión que queda aplicada a una cadena de aisladores cuando una torre es impactada por una descarga atmosférica tiene un tiempo de duración relativamente grande del orden de varios milisegundos.
- Si a la tensión de fase en un aislador contaminado se suma la tensión provocada por la descarga atmosférica, la probabilidad de ocurrencia de una descarga inversa por efecto de la contaminación crece considerablemente.
- 3. Incrementos en la razón de crecimiento de la onda de corriente del rayo provocan incrementos en el primer pico de la tensión que queda aplicada a la cadena de aisladores, pero el resto de la característica permanece prácticamente invariable, manteniendo el resto de los parámetros constante.
- 4. Incrementos en la resistencia de puesta a tierra provocan incrementos en el primer pico de la tensión que queda aplicada a la cadena de aisladores y en el resto de la característica aparece una tendencia a la disminución de la tensión, manteniendo el resto de los parámetros constante.
- 5. Incrementos en la amplitud de la onda de corriente incidente provoca incrementos de tensión a todo lo largo de la característica de tensión en el aislador.

BIBLIOGRAFÍA.

- [1].- Castro M. "Evaluación de aisladores tipo disco ante ondas de impulso tipo conmutación en condiciones de contaminación". II Jornadas de Alta Tensión y Aislamiento Eléctrico. Morelia, México. 1997.
- [2].- Mekhaldio A, Teguar M. Algorithm for pollution flashover calculation. Archives of Electrical Engineering, Vol. XLV, No. 4. 1996.
- [3].- Fulchiron D, "Sobretensiones y coordinación de aislamiento", Cuaderno Técnico nº 151, Schneider Electric, 27 p, 1994.
- [4].- Siegert C. L.A. "Alta tensión y sistemas de transmisión". México. 1009 p. 1989.
- [5].- Anderson, J.G. and T. A. Short, "Algorithms for calculation of lightning induced voltages on distribution lines", presented at the 1992 summer power meeting for publication in the IEEE Trans. on Power Delivery. 1992.
- [6].- Anderson J.G. IEEE. "Transmission Line Reference Book". Chapter 12.
 "Lightning perfomance of transmission lines". Pag 545 595. Electric Power Research Institute, Palo Alto, 1987.
- [7].- Valcárcel Rojas A. "Simulación de transitorios electromagnéticos generados por rayos en redes eléctricas". Tesis de Doctorado.2001.
- [8].- Chisholm W.A, Chow Y.L. and Srivastava K.D, "Lightning Surge Response of Transmission towers", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, pp. 3232 – 3242, 1983.
- [9].- IEEE Working Group Report: "Calculating the Lightning Performance of Distribution Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 5, No. 3, pp. 1408-1417, July 1990.
- [10].-IEEE Working Group Report, "Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II – Updates to Analytical Models", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, pp. 1254 – 1267, 1993.
- [11].-Kawai, M. "Studies of the Surge Response on a Transmission Line Tower", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-83. Pt. III. pp 30-34, 1964.
- [12].-McDermott, T.E., T.A. Short, J.G. Anderson, "Lightning Protection of Distribution Lines", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 9, No. 1, 1994.

- [13].-Sargent, M.A., M. Darveniza. "Tower Surge Impedance". IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems. Vol. PAS-88. pp 680-687. 1969.
- [14].-Anderson, R.B. and A.J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications", Electra, 69, pp. 65-102, 1980.
- [15].-Gupta B.R and Thapar B.," Impulse Impedance of Grounding Grids", IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-99,pp. 2357 – 2362, 1980.
- [16].-Master, M.J., M.A. Uman, W. Beasley and M. Darveniza, "Lightning-induced voltages on power lines: experiment", IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 9, pp. 2519-2529, 1984.
- [17].-Oettle E.E, "A New General Estimation Curve for Predicting the Impulse Impedance of Concentrated Earth Electrodes", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 3, pp 2020 – 2029, 1988.
- [18].-Anderson, R.B. and A.J. Eriksson, "Lightning parameters for engineering applications", Electra, 69, pp. 65-102, 1980.

ANEXO # 1.

$$X = \frac{L_{fug}}{3} + \frac{80*2^{\frac{2}{3}}*5^{\frac{1}{3}}*L_{fug}^{2}}{3*\sqrt[3]{10240000*L_{fug}^{3}}-189*\sigma*U^{3}*W+3+\sqrt{21}*\sqrt{20480000*\sigma*L_{fug}^{3}*U^{3}*W+189}}$$

$$\frac{\sqrt[3]{10240000*L_{fug}^{3}}-189*\sigma*U^{3}*W+3+\sqrt{21}*\sqrt{20480000*\sigma*L_{fug}^{3}*U^{3}*W+189*\sigma^{2}*U}}{240*2^{\frac{2}{3}}*5^{\frac{1}{3}}}$$

ANEXO # 2.

MODEL aiscont comment----operación del aislador bajo condiciones de contaminación Input: Voltaje a través del aislador. Output: Comando de salida del TACS switch -----endcomment INPUT UP. UN **OUTPUT CLOSE** DATA larc,dmay,dmen,lfug,hr,DESD,Naisl,ceci VAR CLOSE, U, C, σ , W, raiz, cosa, cosa1, X, a, b, Uf, E1 INIT CLOSE:=0 **ENDINIT** EXEC U:=Abs(UP-UN); a:=1:b:=a:Uf:=a:FOR i:=2 TO Naisl DO a:=a+b*ceci: b := b + a;IF i=Naisl THEN Uf:=a; **ENDIF ENDFOR** E1:=U/b; U:=E1*Uf; C:=DESD/hr; Cond:=96487.0*C*1.127e-3; W:=pi*(dmay+dmen)/2.0;raíz:=-20480000.0* σ *lfug**3*U**3*W+189.0* σ **2*U**6*W**2; raíz:=sqrt(raíz); $\cos a:=abs(10240000.0*1fug**3-189*\sigma*U**3*W+3*sqrt(21)*raiz);$ $\cos 1:=\cos *(1/3);$ X:=lfug/3+(80*2**(2/3)*5**(1/3)*lfug**2)/(3*cosa1); $X:=X+\cos(1/(240*2**(2/3)*5**(1/3));$ write(X); IF (X>=larc) THEN CLOSE:=1 ENDIF IF (X<larc) THEN CLOSE:=0 ENDIF ENDEXEC **ENDMODEL**