

INCIDENCIA DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LINEAS AEREAS DE MEDIA TENSION SOBRE LOS 3800 MSNM

Ivan Turco Aliaga
ivanturco@gmail.com
Ingeniero Electricista
Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Universidad Nacional del Centro del Perú

RESUMEN

Este trabajo tiene por finalidad desarrollar una nueva metodología de protección contra descargas atmosféricas de líneas aéreas de media tensión sobre los 3800 m.s.n.m., su causa, consecuencia y como afectan a las líneas por inducción, son entre otros, algunos de los tópicos a tratar.

El voltaje inducido por las descargas atmosféricas dependerá de varios factores tales como la altura de la línea, las características geográficas, características regionales y locales del sitio de incidencia de la descarga con respecto a la línea, la topografía, el clima, la presencia de multiconductores y el efecto en la magnitud del máximo voltaje inducido.

En esta investigación se muestran estudios acerca del comportamiento de la descarga atmosférica, su efecto en las sobretensiones inducidas y por ende como repercuten en el cálculo de protección de las líneas de media tensión. Son diversos los factores que se varían, se pueden mencionar: la presencia de un conductor de tierra, la altura sobre el plano de tierra, el incremento del CFO y la resistencia de puesta a tierra de los conductores (cable guarda). En base a estas variables se obtuvieron los resultados de este trabajo.

ABSTRAC

This work aims to develop a new methodology to protect against electric discharges from lines of medium voltage over 3800 meters above sea level. How these electric discharges are generated and their consequences on the lines by induction are among others some of the topics to be addressed in this investigation.

The induced voltage by electric discharges depends on different factors such as height of line, geographic features, regional and local features of incidence site of the discharges with respect to line, topography, weather, the presence of multi-conductors and the effect of the maximum voltage induced on the magnitude

In this investigation we present studies on the behavior of the atmospheric discharge, its effect on overvoltage induced and their effect on the calculation to protect the lines of medium voltage lines. There are several factors that we can vary, among them are: the presence of a grounding conductor; height over ground level; increment of CFO and grounding resistance of conductors (guard cable). The results of this investigation are based on these variables

I. INTRODUCCIÓN

Los voltajes inducidos por descargas atmosféricas pueden ser una de las principales causas de sobretensiones y posterior salida de los sistemas eléctricos. Estos voltajes afectan los sistemas de transmisión y distribución incrementando los problemas de perturbaciones en los sistemas de potencia. Este estudio se ha venido desarrollando en los últimos años con el incremento de las redes eléctricas a nivel mundial. Para estimar la tasa de salida por sobre tensiones inducidas es necesario calcular el máximo voltaje inducido en la línea. Para esto es necesario la utilización de formulaciones o metodologías basadas en criterios de campos electromagnéticos.

Entre los factores más importantes que influyen en estos cálculos podemos citar las siguientes:

- Los niveles cerámicos que presentan características atmosféricas distintas de una determinada zona ya sea por las características geográficas, regionales y locales del sitio de incidencia de la descarga con respecto a la línea, así como de la topografía y del clima. Esto permite tener una data de la probabilidad de las descargas atmosféricas que ocurrirán en un año.
- La presencia de multiconductores.
- Las características geométricas de la línea, es decir su altura, el largo su posición con respecto al conductor de guarda, su posición con respecto a las estructuras.
- El sitio donde incide la descarga: sobre el propio conductor de fase, directamente a tierra o si la descarga ocurre en el cable guarda o las estructuras.
- Los parámetros de la descarga, como por ejemplo la corriente de retorno, la distancia perpendicular del punto de descarga a la línea, la altura de la nube.

Los trabajos en este campo han tenido un importante auge, porque han permitido en las últimas décadas, una estimación del comportamiento de los sistemas ante las descargas atmosféricas, aspecto muy importante en la planificación de los sistemas en el que se debe tomar en cuenta las sobretensiones internas y externas que en este caso corresponden a las descargas atmosféricas.

Los resultados en este trabajo intentan presentar, dentro del respectivo alcance una clara visión cómo los parámetros y las variables antes mencionadas influyen en los cálculos de sobretensiones inducidas y estas en la respectiva protección contra descargas atmosféricas de las líneas de media tensión.

El contenido de este trabajo se encuentra estructurado de manera tal que sea posible seguir un orden en cuanto a los factores, procesos y metodologías que permitan proteger nuestras líneas aéreas. Se presenta la teoría acerca de las descargas atmosféricas, se menciona lo referente a su formación y algunas de sus características. De igual modo se incluye información respecto a los tipos de incidencia, la manera de calcular el número de descargas atmosféricas según cada caso particular y la forma de protección de las líneas de media tensión en cada caso particular.

También se explica la formulación de Chowdhuri para el cálculo de la tasa de salida por sobretensiones inducidas, encontramos también el planteamiento de los casos a simular y posteriormente los resultados arrojados por cada uno de los casos con sus respectivos análisis, esto es tanto para un solo conductor de fase como para multiconductores. Para culminar contiene las conclusiones y recomendaciones surgidas de este trabajo, aquí se sintetiza el valor de este trabajo y de igual manera intenta orientar a futuros trabajos que puedan basarse en este proyecto.

II. OBJETIVOS

El objetivo principal del presente trabajo es desarrollar una metodología de protección de descargas atmosféricas en líneas de media tensión, basadas en el cálculo de sobretensiones inducidas y características geográficas, regionales y locales del sitio de incidencia de la descarga con respecto a la línea, así como de la topografía y del clima en alturas mayores a los 3800 m.s.n.m.

Ofreciendo así una herramienta útil para el diseño de aislamiento y protecciones, debido a consideraciones más reales que permitirán el uso adecuado de los recursos disponibles.

III. DESARROLLO

3.1. DESCARGAS ATMOSFERICAS

En el planeta tierra, ocurren un promedio de 100 descargas atmosféricas cada segundo, por lo que se producen alrededor de 8 millones de actividades al día.

De acuerdo a teorías generalmente aceptadas, los rayos juegan un papel importante en un intento de la naturaleza por mantener un balance dinámico entre las cargas de las capas superiores de la atmósfera y la superficie terrestre.

Fue Benjamín Franklin el principal científico de la era moderna en estudiar el fenómeno no solo en cuanto al origen y carga de la nube, sino en las alternativas de protección contra este fenómeno.

Sin embargo, el hombre desde los inicios de su existencia se ha visto fascinado y atemorizado ante este evento natural. Alrededor de él, se han originado, Dioses, leyendas, maldiciones, venganzas, milagros, etc.

Se habla de protección, pues a pesar de tratarse de un evento natural de espectacular belleza, su poder destructivo debido a la gran energía que maneja en mínimos intervalos de tiempo, es muy grande.

Antes de desarrollar un estudio sobre los efectos de las descargas en los sistemas de transmisión eléctrica aéreos, resulta conveniente conocer acerca de algunos de sus aspectos resaltantes, como lo son, su naturaleza y origen. Son muchas las teorías formuladas sobre la formación de una descarga atmosférica, entre ellas podemos mencionar las siguientes:

- Teoría de Simpson
- Teoría de Elster y Geitel
- Teoría de Wilson
- Teoría de Schonland

3.1.1 TEORÍA DE SCHONLAND

Una de las teorías más aceptadas para explicar la formación de la descarga nube - tierra, es la de "Schonland", según la cual el ciclo de la nube de tormenta (cumulus-nimbus) y la consecuente descarga eléctrica denominada rayo, se puede resumir en las siguientes etapas:

La Figura N°1 muestra los pasos de este proceso.

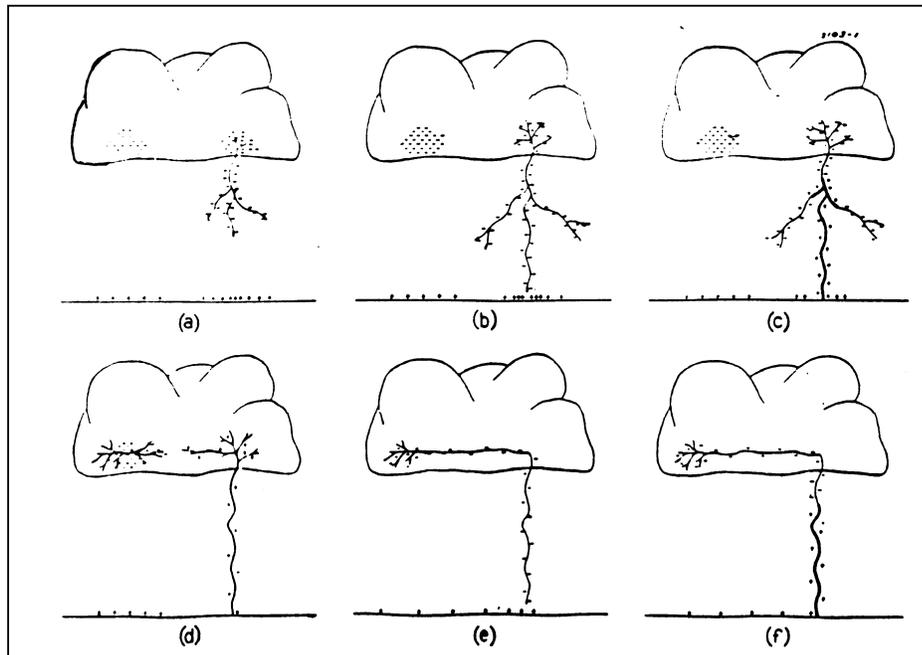


Figura N° 1: Distribución de Cargas en el Proceso de Formación de la Descarga Atmosférica.

- a. Las cargas eléctricas en la nube se encuentran distribuidas en forma no homogénea, existiendo por consiguiente, concentraciones desiguales de carga en el seno de la misma. Alrededor del 90% de las descargas son de carácter negativo.

- b. Una vez que el gradiente eléctrico sobrepasa el valor crítico, comienzan a ocurrir pequeñas descargas en el seno de la nube. Estas en virtud de la ionización por choque en el aire, van degenerando en forma de avalancha, denominada descarga piloto, la cual según lo medido, avanza a una velocidad promedio de 150km/s (aproximadamente 1/20 de la velocidad de la luz).
- c. La rama de la descarga piloto logra imponerse en su crecimiento hacia la tierra, viéndose acompañada de pequeños puntos luminosos, son los característicos de las denominadas “Descargas Escalonadas”. Durante este proceso, la luminosidad es baja y la corriente no excede de unos pocos amperios. El incremento del gradiente eléctrico de la tierra al aproximarse la descarga a ésta, favorece a la formación de un canal llamado “Canal de Recepción”. Dicha canal, rara vez supera los 30,48m de altura y no necesariamente tiene que ser el suelo, a veces puede ser originado incluso por un objeto ubicado por encima del plano de tierra (torre de transmisión, torre de telecomunicaciones, etc.).
- d. El canal de recepción sale entonces al encuentro de la descarga piloto, la cual trae una gran cantidad de cargas negativas (o positivas, según sea el caso), formándose así el canal plasmático. Para neutralizar la carga en la nube, una gran cantidad de cargas opuestas salen del plano de tierra, utilizando el mismo canal previamente ionizado. A través de este canal plasmático, ocurrirán todas las descargas sucesivas de las cuales la primera es la de retorno denominada “Descarga de Retorno” o “Return Stroke”

La velocidad de propagación de esta descarga está aproximadamente entre el 30% y el 10% de la velocidad de la luz, lo cual causa que sea apreciable el valor de la intensidad de corriente la cual puede alcanzar valores de hasta 160kA. Mientras la descarga principal requiere un tiempo aproximado de 20ms para llegar a la tierra, la descarga de retorno acusa un tiempo promedio de 100µseg. La forma de onda de la corriente, es determinada por la tasa de descarga del canal plasmático, la cual es obviamente función de la velocidad de retorno y de la distribución de las cargas a lo largo del canal.

- e. El impacto provocado por las cargas eléctricas que la descarga de retorno induce en el seno de la nube, es tan fuerte que en la mayoría de los casos origina una segunda descarga orientada hacia la tierra, denominada “Descarga Secundaria”, la posee una velocidad promedio del 1% de la velocidad de la luz. Este par de fenómenos (Descarga de Retorno y Descarga Secundaria), pueden repetirse un número de veces apreciable, lo cual se denomina, “Descargas Múltiples”.
No existe un modelo analítico del proceso de un Rayo, los fenómenos que participan (atmosféricos, electrostáticos) son aleatorios, los estudios se basan en registros de parámetros y vistas fotográficas en la etapa de impacto en el suelo.
 - En las regiones de clima templado como el Perú, entre el 80% y el 90% de las descargas por Rayo, son de polaridad negativa (95% en la zona ecuatorial).
 - Los Rayos Descendentes parten de la nube, son mayormente de polaridad negativa (-) y los Rayos Ascendentes parten del suelo, son esporádicos y mayormente de polaridad positiva (+).
 - En las zonas planas, la mayoría de los rayos son descendentes, cuando son ascendentes se producen desde objetos protuberantes puntiagudos o muy altos.



Fig. 2 Descarga nube – tierra (Rayo)



Fig. 3 Descarga Nube – Nube (Relámpago)

3.1.2 CARACTERÍSTICAS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS Y SU INCIDENCIA EN LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN

Los sistemas aéreos de transmisión y distribución se encuentran expuestos a diversos fenómenos naturales, entre ellos por supuesto se encuentran las descargas atmosféricas. Este fenómeno es totalmente aleatorio; sin embargo, existen ciertos datos los cuales nos suministran información de que tan propensa a descargas atmosféricas es una zona geográfica determinada; dichos datos, vienen dados gracias al nivel ceraúnico que caracteriza a una zona específica. El nivel ceraúnico de una zona no es más que el promedio del número de días con descargas atmosféricas por año en una localidad determinada. La forma de representar estos niveles es, a través de líneas las cuales son parte indispensable de los llamados Mapas Isoceraúnicos, quienes nos muestran de manera gráfica los distintos Niveles Ceraúnicos existentes, en una zona o país determinado.

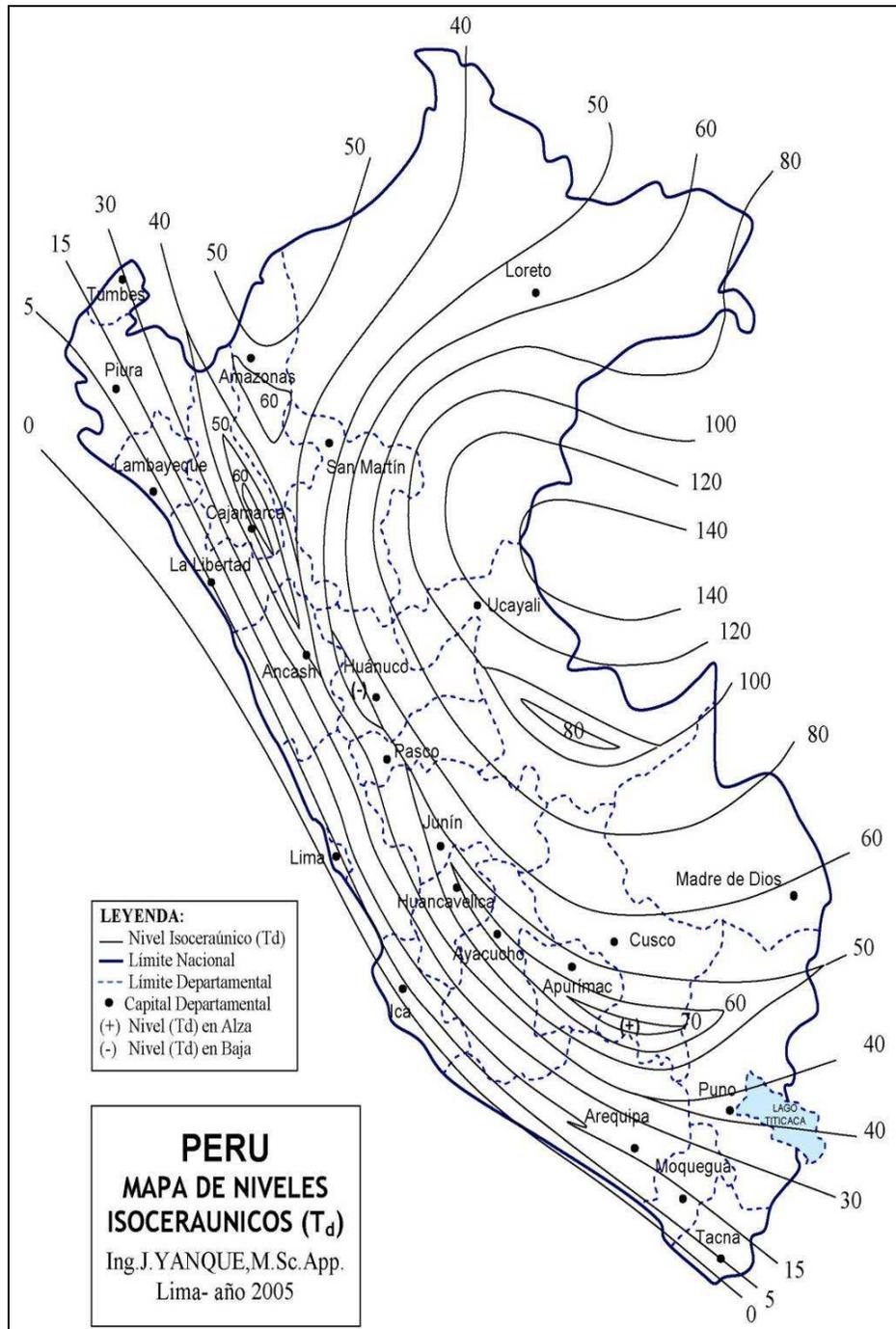


Fig. 4 Mapa de Niveles Isoceraúnicos Td (Cortesía del Ing. Justo Yanque)

El mapa de Niveles Isoceraúnicos del Perú, incluye datos satélites, información continental, registros dispersos compatibilizados con la geografía y orografía territorial; destacan las siguientes zonas ecológicas de habitad natural:

➤	Sierra de Baja altitud hacia el litoral o pie de monte	:	hasta 2000 m,	(20)
➤	Sierra de Media altitud	:	2000 – 3500 m	(40)
➤	Sierra de Gran altitud	:	3500 m – más	(50)
➤	Microclimas de Alta Cota e Interandinos	:	-	(de 40- 70)
➤	Zona Yunga, Valles Altos	:	1000 – 2000 m	(60)
➤	Selva Baja o Plana	:	hasta 800 m	(120)
➤	Selva Alta o Accidentada	:	800 – 1500 m	(80)
➤	Costa Norte Ecuatorial	:	hasta 1000 m	(15)
➤	Costa Centro - Sur	:	hasta 1000 m	(0)

A. Magnitud de la Descarga

La importancia de la magnitud de la descarga radica en que el valor de la Sobretensión Inducida en líneas eléctricas es directamente proporcional a esta, por ende es una de las principales características a ser tomada en cuenta al momento de hablar de Descargas Atmosféricas y su incidencia en líneas eléctricas.

B. Tipos de Impacto que pueden presentar una Descarga Atmosférica

Las descargas atmosféricas se clasifican según el sitio donde inciden:

- **IMPACTO A TIERRA**
Las descargas que pudieran caer en las cercanías de las líneas sin que sean atraídos ni por el conductor de guarda ni por los conductores de fase, es decir, caer directamente en la tierra. Aún cuando la descarga logre impactar en la tierra puede ocasionar sobretensión en la línea.
- **IMPACTO A CONDUCTOR DE GUARDA Y/O ESTRUCTURAS (POSTES O TORRES)**
Cuando la descarga impacta al conductor de guarda o a las estructuras, se dice que los conductores de fase están perfectamente apantallados. Sin embargo, no es extraño que ocurran fallas debido a las descargas retroactivas que pudieran superar al CFO (Critical Flashover) de los aisladores y en algún momento ocasionar una falla de la línea a tierra y por consecuencia una interrupción del servicio eléctrico.
- **IMPACTO A CONDUCTOR DE FASE**
Se da el caso en el que el conductor se encuentra desprotegido, es decir que no se encuentra bajo el apantallamiento del conductor de guarda. En estos casos la descarga puede impactar directamente sobre el conductor y existe casi un 100% de probabilidad de que ocasione la salida de la línea en cuestión.

C. Tiempo de Frente

El valor de la tensión inducida depende del tiempo de frente que presente la descarga de retorno, es por ello que la combinación de esta característica junto con la magnitud de la descarga los convierte en factores determinantes para la variación de la Tensión Inducida. Para una magnitud de descarga dada, se observa que a menor tiempo de frente mayor es el valor de la Tensión Inducida y viceversa.

D. Angulo de Incidencia

Como bien se sabe generalmente las descargas atmosféricas inciden con cierto ángulo. Este ángulo de incidencia trae efectos directos sobre los valores de tensión inducida, sin embargo para el desarrollo de este trabajo se asume que las descargas inciden a tierra con un ángulo de 90 grados, esto en función de ser consistentes con la formulación planteada por los autores [8,17] en cuyas metodologías basaremos nuestro estudio.

3.1.3 PARÁMETROS DE INCIDENCIA DEL RAYO

A. Cálculo del Número de Descargas Atmosféricas a Tierra.

Por simplicidad se dice que el número de descargas a tierra es proporcional a los niveles ceraúnicos de la localidad en cuestión. Una de las ecuaciones más utilizada para determinar la densidad de rayos a tierra es la propuesta por Anderson y Eriksson, en 1980, que se muestra a continuación, ya que los resultados obtenidos están avalados por un período de observación seis años.

$$N_g = 0,04 \cdot (T_d)^{1,25} \quad (1)$$

Donde:

N_g : Número total de descarga a tierra (descarga/ km²-año)

T_d : Nivel Ceraúnico (días de tormenta al año)

Un dato importante para el estudio y diseño de un sistema eléctrico para transmisión o distribución de energía, es conocer cuantas descargas atmosféricas a tierra ocurren por km² en una localidad de interés.

Cuando una descarga atmosférica hace impacto en el sistema, bien sea en los conductores de guarda o en la estructura (poste), incide en dicho sistema una corriente de magnitud muy elevada. Esta corriente oscila alrededor de los kiloamperios (hay un 50% de probabilidad de exceder 31 kA).

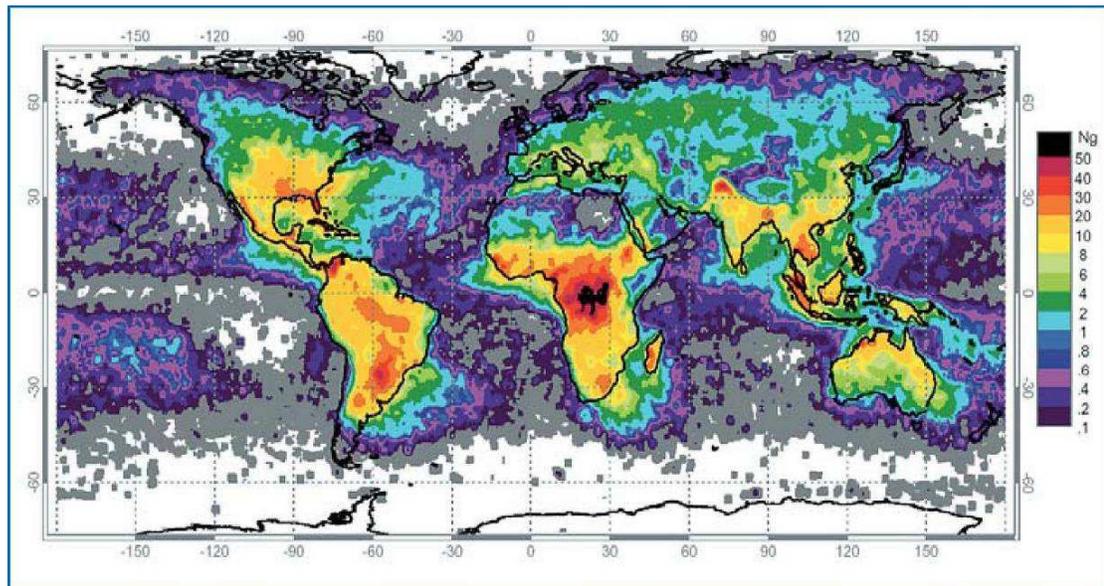


Fig. 5 Densidad de descargas a tierra por Km al año (Fuente Nasa)

B. Cálculo del Número de Descargas Atmosféricas incidentes a Estructuras.

El Número de descargas que impactan a la torre (N_T) viene dada por la relación siguiente:

$$N_T = 0.6 \cdot (N_L - N_S) \quad (2)$$

Donde:

N_L : Número total de descargas a la línea por 100 km por año.

N_S : Número total descargas por falla de apantallamiento por 100 km por año.

C. Cálculo del Número de Descargas Atmosféricas en Fases.

La figura 6 muestra la región de apantallamiento para una línea con dos conductores de guarda. Para una línea con un solo conductor de guarda, b es igual cero. La altura del conductor de guarda (h) viene dada por la relación:

$$h = h_g - \frac{2}{3} \cdot (h_g - h_{gw}) \quad (3)$$

Donde:

h_g : Es la altura del conductor de guarda en la estructura y

h_{gw} : Es la menor distancia del conductor de guarda a tierra.

Luego de determinar h , es necesario determinar el ancho del apantallamiento W , esta distancia es aquella en la cual cualquier descarga atmosférica que incida dentro de este rango va impactar en el conductor de guarda o los conductores de fase. Este valor se halla mediante la siguiente expresión.

$$W = b + 4h \quad (4)$$

Esta es una representación simplista. Otra aproximación más acorde sería la siguiente:

$$W = b + 4h^{1.09} \quad (5)$$

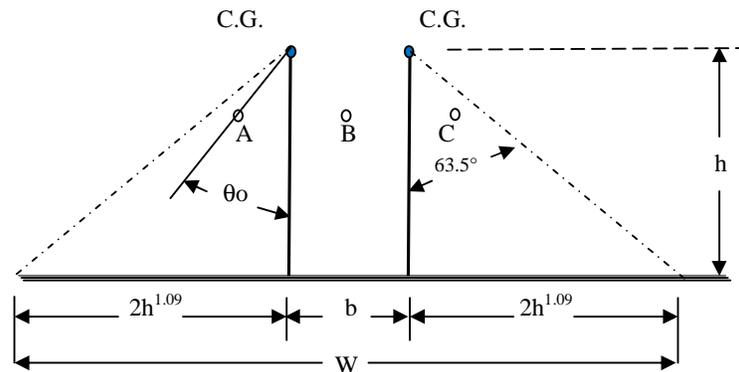


Fig. 6 Geometría para la determinación de W

Un Sistema de Detección y Localización además de registrar los rayos nube a tierra nos brinda la información sobre el momento en que ocurre la descarga, su valor pico, el número de descargas consecutivas, e incluso su polaridad. Se utilizan con más frecuencia para determinar la ocurrencia del rayo en tiempo y espacio para aplicaciones en tiempo real debido a los costos adicionales por procesamiento y comunicación de datos. La información que se obtiene en una región de la determinación de rayos a tierra en un ciclo solar permite definir las curvas de isodensidad de rayos a tierra.

Las descargas eléctricas atmosféricas pueden tener polaridad positiva o negativa. Las descargas ubicadas en los grupos 1 y 3 se les denominan rayos lineales con líderes descendentes con polaridades negativa y positiva, respectivamente. Los representados en los grupos 2 y 4 se les conocen como rayos lineales con líderes ascendentes con polaridades positiva y negativa, respectivamente. Aunque alrededor del 90% de las descargas atmosféricas son rayos con líderes descendentes de polaridad negativa algunas consideraciones sobre los de polaridad positiva son importantes:

1. Un análisis global de incidencia de rayos positivos indica que éstas pueden variar en diferentes regiones del mundo, ese rango de variación es generalmente menor al 10% pero puede alcanzar hasta un 20%.

2. En los casos en que la incidencia de rayos positivos exceda el 10%, estos deben ser considerados porque su proporción puede variar los límites superior e inferior de la distribución de amplitudes de corriente.
3. La incidencia de rayos positivos puede incrementarse con la altitud de la región y/o con el aumento de la altura de la estructura.
4. Las investigaciones demuestran que las descargas positivas están relacionadas principalmente a rayos lineales con líderes ascendentes y que éstos ocurren principalmente para estructuras muy altas o estructuras ubicadas en regiones muy altas.

Un rayo a tierra frecuentemente incluye un proceso de *descargas múltiples*. Éstas pueden desarrollarse de dos formas:

- Pueden ser originadas por el camino aún ionizado de la descarga de retorno y se suceden desde otra regiones cargadas de la misma nube, una o más descargas a tierra que en cualquier caso (líder inicial ascendente o descendente) se desarrollan con líder ininterrumpido de la nube a la tierra para golpear el mismo punto en que incide la descarga principal.
- Pueden ser originadas por ramificaciones al final del camino ionizado que conducen a la descarga principal y tienen diferentes puntos de terminación a la de la descarga de retorno. En la tierra ocurre en varios puntos (rayos de raíces ramificadas) o pueden involucrar una sucesión de descargas espacialmente separadas (rayos complejos) que, aunque ocurren a intervalos comparables a los de las descargas descritas en el punto anterior, tienen aparentemente, líderes guías independientes y pueden terminar a varios kilómetros del punto de incidencia de la descarga principal.

La primera forma agrupa alrededor del 90% de las descargas múltiples y el resto, el 10% corresponde al segundo grupo. El conocimiento de las características de las descargas sucesivas es importante para la operación adecuada de los sistemas eléctricos porque ellos pueden someterse a un grupo de descargas dentro de un intervalo muy corto y por tanto sus dispositivos de protección deben estar diseñados para estas contingencias.

D. Amplitud máxima de la corriente del rayo

Las amplitudes de la corriente de retorno de la descarga se describen en función de su distribución de probabilidades de ocurrencia. La distribución de la corriente de retorno del rayo, que aparecen en la literatura, más importante son: la de AIEE (1950), Popolansky (1972) y la de Anderson/Eriksson (1978). Las dos últimas sobre la base de distribución log-normal. La de Anderson/Eriksson, se deriva de la de Popolansky, pero sólo considera aquellas estructuras de altura inferior a 60 m. Su valor medio es 31 kA y su desviación típica de 0.32, se muestra a continuación.

$$P(I_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{I_0}{31}\right)^{2.6}} \quad (6)$$

Donde:

P(I₀) : Probabilidad de exceder el valor de corriente I₀ (%).
I₀ : Valor de corriente del rayo (kA).



Fig.7 Utilización de conductor de guarda en líneas de media tensión.

3.2 METODOLOGIA PARA EL CÁLCULO DE LA SOBRETENSIÓN INDUCIDA

A. Metodología según Voislav:

Los tres factores principales tomados en cuenta en la determinación de los voltajes inducidos, según esta metodología, son:

- Descarga de Retorno, en la cual se asume la distribución temporal y espacial de la corriente de la descarga a lo largo del canal.
- El Campo Electromagnético que irradia la descarga, el cual también es llamado LEMP (Lightning Electromagnetic Pulse).
- El Modelo de Acoplamiento, el cual estudia la interacción entre el modelo LEMP y la Línea de Transmisión en la cual se induce.

Las simplificaciones del modelo son:

- Para el cálculo del LEMP, se asume que el plano de tierra es un conductor perfecto.
- El canal de la descarga atmosférica es modelado como una antena vertical a una distancia D de la Línea.
- La línea de transmisión se representa como un mono conductor sin pérdidas el cual se encuentra situado a una altura h sobre el plano de tierra.
- El diámetro del conductor se fija en 1 cm.
- Se asume que la longitud de la línea es infinita, esto con la finalidad de evitar la influencia que pudieran tener los terminales de la línea en cuanto al máximo voltaje inducido.

Tras el desarrollo matemático y comparaciones con resultados experimentales obtenidos en la literatura, Voislav, llega a la siguiente formulación empírica (ecuación 7) para determinar el valor de la máxima sobretensión inducida. Cabe indicar que dentro de la metodología utilizada por éste autor, el cálculo ya toma en cuenta los dos fenómenos involucrados, como lo son: la inducción propiamente dicha en la línea y el fenómeno de onda viajera que se produce a lo largo de la línea.

$$U_{max}(D) = k_u \cdot I_0 \cdot \exp(k_0 + k_1 \cdot \ln D + k_3 \cdot \ln^3 D) \quad (7)$$

Donde

$$(k_0) = 2.25 + 325 \cdot \exp\left(-\frac{|T - 0.1^{1.45}|}{0.55}\right) \quad (8)$$

$$k_1 = -\frac{k_0 - \sqrt{k_0}}{3.45} \quad (9)$$

$$10^4 k_3 = -0.9 + 7.5 \cdot (T - 0.02) \quad (10)$$

$$k_u = \frac{h}{10} \cdot [1 - 0.1875 \cdot (T - 0.8) - 3.333 \cdot 1^4 \cdot \frac{4}{h^{0.8}} \cdot \tau] \quad (11)$$

- T : Tiempo de frente de onda.
 τ : Tiempo de cola.
 D : Distancia más cercana entre el punto de incidencia a tierra de la descarga y la línea.

B. Metodología según Chowdhuri

Las bases de las premisas de Chowdhuri para desarrollar un modelo que represente las sobretensiones inducidas producidas por descargas atmosféricas en las cercanías de una línea aérea son las siguientes:

- El canal plasmático de descarga de retorno totalmente vertical.
- Se desprecia el efecto electrostático de la nube y de la descarga principal.
- La velocidad de descarga es constante.
- La descarga principal tiene una distribución uniforme de carga.

Se asume que no hay pérdidas en el conductor de la línea y la tierra es perfectamente conductora.

El sistema de coordenadas empleado para el análisis de Chowdhuri se muestra en la fig. 8

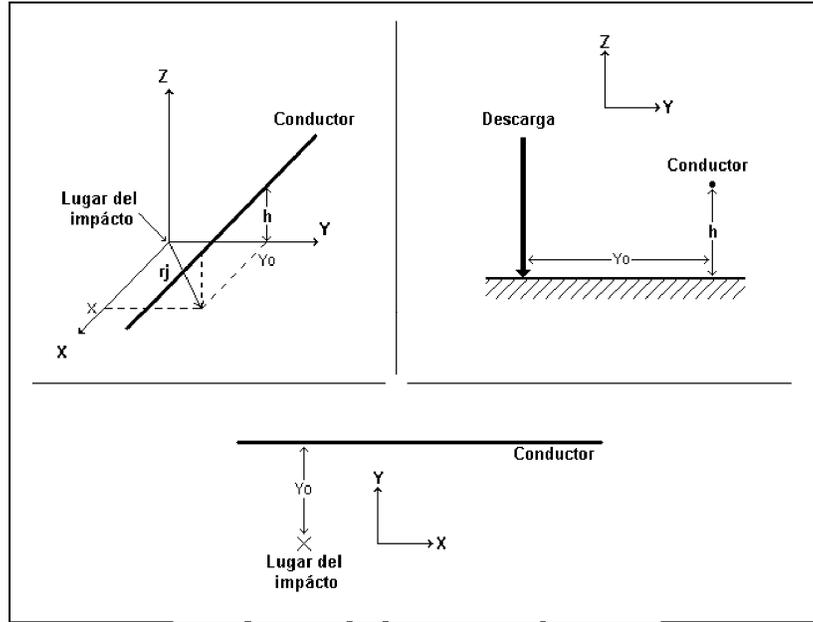


Fig.8 Sistema de Coordenadas empleadas por Chowdhuri.

El voltaje inducido en un conductor j por un escalón de corriente, viene dado por la siguiente ecuación:

$$\frac{d}{dt}V_{ij} = \frac{d}{dt}V_{ij1} \cdot u(t - t_0) - \frac{d}{dt}V_{ij2} \cdot u(t - t_0 - t_f) \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}V_{ij1} = -\frac{60 \cdot \alpha_z \cdot h_j}{\beta} \cdot \left(\frac{z - \beta^2}{\beta \cdot c}\right) \cdot \left[\frac{\sqrt{(t - t_0)^2 + \alpha^2} + (t - t_0)}{(t - t_0) \cdot \sqrt{(t - t_0)^2 + \alpha^2} + (t - t_0)^2 + \alpha^2} \right] + \frac{60 \cdot \alpha_z \cdot h_j}{\beta} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r_j^2}} \right] \quad (13)$$

$$\frac{d}{dt}V_{ij2} = -\frac{60 \cdot \alpha_z \cdot h_j}{\beta} \cdot \left(\frac{1 - \beta^2}{\beta \cdot c}\right) \cdot \left[\frac{\sqrt{(t - t_0 - t_f)^2 + \alpha^2} + (t - t_0 - t_f)}{(t - t_0) \cdot \sqrt{(t - t_0 - t_f)^2 + \alpha^2} + (t - t_0 - t_f)^2 + \alpha^2} \right] + \frac{60 \cdot \alpha_z \cdot h_j}{\beta} \cdot \left[\frac{1}{\sqrt{h_c^2 + r_j^2}} \right] \quad (14)$$

- β : Relación entre la velocidad de la descarga de retorno y la velocidad de la luz.
- hj : Altura del conductor respecto a tierra.
- hc : Altura de la nube.
- α_1 : I_0/t_f
- α_2 : función de los tiempos de frente y cola de la descarga.
- I_0 : Magnitud de la descarga.
- t_f : Tiempo de frente de la descarga.
- C : Velocidad de la luz.

3.3 METODOS EXISTENTES PARA LA ESTIMACION DE LA TASA DE SALIDA POR SOBRETENSIONES INDUCIDAS

La metodología utilizada para la estimación de la tasa de salida es la de Chowdhuri, incorporándole algunos parámetros diferentes, como la función para la determinación del radio crítico de atracción y la propia estimación de la magnitud máxima de la tensión inducida.

3.3.1. Formulación de Chowdhuri

El 75% de las de salidas en líneas de media tensión son debidas a descargas atmosféricas. Las formas en las cuales este fenómeno se puede presentar para influir, son:

- A. Que la descarga incida directamente en el conductor de fase (descargas directas).
- B. Que la descarga incida en el conductor de guarda o en las estructuras (descargas retroactivas ó “Backflashover”).
- C. Que la descarga ocurra a tierra pero cercana a la línea en cuestión (sobretensiones inducidas).

Para A. y B. se desarrolla una metodología de cálculo para la tasa de salida internacionalmente aceptada; y en el siguiente trabajo se intenta presentar un procedimiento para C.

Los campos magnéticos y electrostáticos producidos por la descarga de retorno van a interactuar con la línea induciendo tensiones de corta duración (frecuencia en el orden de los Mhz). La complejidad de este fenómeno está enmarcado por la dependencia que existe entre la tensión inducida con los parámetros de la descarga y de la línea aérea. Dichos parámetros son:

- Altura de la línea
- Altura de la nube
- Distancia del punto de incidencia del rayo a la línea
- La amplitud de la corriente
- El frente de onda de la descarga de retorno
- La velocidad de la descarga de retorno

A continuación se propone un método para estimar la tasa de salida de una línea de media tensión debido a descargas atmosféricas a tierra en el retorno. Los datos vienen dados por una curva Tasa de salida (N° de salidas / 100Km línea. / Año) en función de varios parámetros involucrados.

3.3.2. Metodología propuesta.

Se puede observar en la Figura N° 9 la forma de onda general que presenta una descarga de retorno:

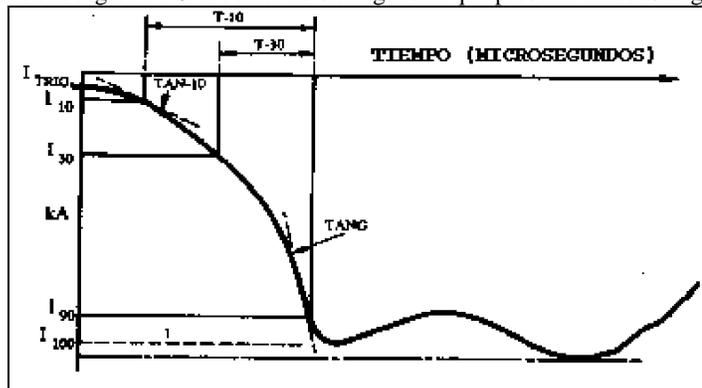


Figura N° 9: Forma de Onda de Corriente de la Descarga de Retorno.

Se asume que la forma de onda de corriente de la descarga de retorno tiene un frente lineal y una cola infinita. En la práctica la forma de onda es compleja, se definió una forma de onda cóncava con varios picos [9,12]. En este análisis se toma el primer pico de corriente como el máximo pico I_p para la forma linealizada de la onda y un frente de onda determinado por la siguiente expresión:

$$t_f = \frac{T - 30}{0.6} \quad (15)$$

Si la distancia perpendicular de la descarga líder a la línea sobrepasa la distancia crítica de atracción de la línea, el rayo impactará probablemente en tierra. Esta distancia crítica perpendicular y_{01} se puede calcular una vez que se conozca el radio de atracción (r_s) tal como se muestra en la Figura N°10.

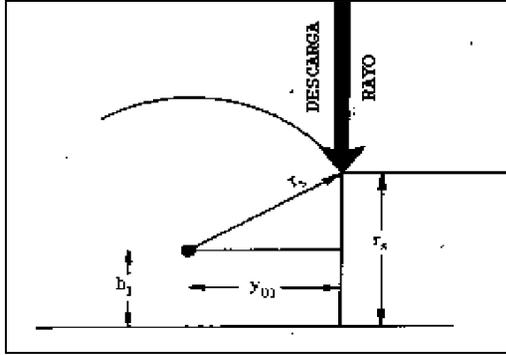


Figura N°10: Geometría de la línea para el Cálculo del Radio de Impacto.

Donde:

$$y_{01}^2 = r_s^2 - (r_s - h_l)^2 \quad (16)$$

$$r_s = 10(I_p)^{0.65} \quad (17)$$

Se asumió que el radio de atracción a la línea es el mismo que existe al plano de tierra. La distancia r_s y la distancia mínima horizontal y_{01} son funciones del pico máximo de la descarga de retorno I_p , la cual viene dada en Kilo Amperes. La altura de la línea viene dada por h_l y es expresada en metros.

3.3.3. Procedimiento Computacional.

La amplitud de corriente de la descarga de retorno (I_p) se incrementa de $1 < I_p < 200$ KA. a intervalos $\Delta I_p = 0.5$ KA. El tiempo de frente (T_f) de la corriente varía $0.5 < T_f < 10.5$ μ seg. en pasos $\Delta T_f = 0.5$ μ seg. Para cada magnitud distinta de corriente I_{pi} se calcula la distancia mínima horizontal respectiva (Y_{01}), de manera de que para una descarga con I_{pi} , Y_{01i} , y T_{fi} se calcule la sobretensión inducida por Voislav (V_v) y por la máxima fuente de Chowdhuri (MFC), para luego compararlas con el CFO. Entonces:

- Si la sobretensión excede el CFO del sistema se procede a determinar la distancia máxima horizontal a partir de la cual el voltaje inducido deja de superar al mismo, Y_{02} para V_v y Y_{03} para MFC (Figura 11), para ello se incrementa Y_{02} (y/o Y_{03}) comenzando desde Y_{01} a intervalos $\Delta Y_0 = 1$ m. Una vez obtenido Y_{02} (y/o Y_{03}) se calcula al área respectiva según (Ec. 18), definiendo A_v y A_c como el área correspondiente al cálculo por V_v y MFC respectivamente. Dicha expresión se obtiene de considerara la Línea de 100 Km de longitud tomando en cuenta ambos lados de la Línea, y trabajando las distancias Y_{0i} en metros.

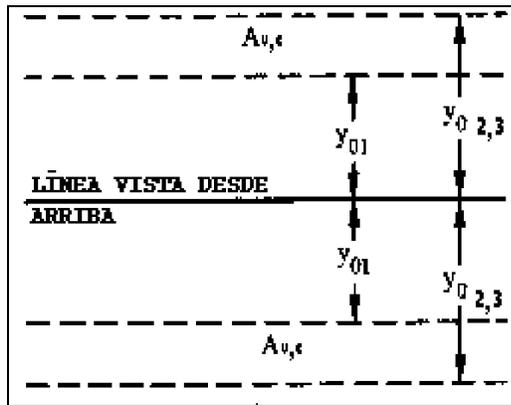


Figura N° 11: Área ($A_{v,c}$) de Incidencia dentro de la cual la descarga causa sobretensiones que originan falla.

$$A_{v,c} = 0.2(Y_{o_{2,3}} - Y_{o_1}) \quad [km^2] \quad (18)$$

Finalmente con estas áreas y la densidad de descargas a tierra (n_g), que es función del nivel cerámico, se puede calcular la Tasa de Salida parcial n_{fo1} y n_{fo2} para I_{pi} y T_{fi} , según (Ec. 19), las cuales se irán acumulando en n_{fov} y n_{foc} según corresponda (Ec. 20). Donde n_{fo1} y n_{fov} están asociadas al cálculo por Voislav y por ende n_{fo2} y n_{foc} al cálculo por MFC. Luego se incrementa T_{fi} y se repite este análisis manteniendo I_{pi} y Y_{o1} .

$$n_{fo_{1,2}} = p(I_P) \cdot p(t_f) \cdot \Delta I_P \cdot \Delta t_f \cdot n_g \cdot A_{v,c} \quad (19)$$

$$n_{f_{v,c}} = \sum_{I_P=1kV}^{200kV} \sum_{t_f=0.5s}^{10.5s} p(I_P) \cdot p(t_f) \cdot \Delta I_P \cdot \Delta t_f \cdot n_g \cdot A_{v,c} \quad (20)$$

- Si no se excede el CFO entonces no tiene sentido incrementar T_{fi} por lo que se procede a incrementar I_{pi} directamente, para luego repetir el mismo procedimiento. Por último el número esperado de salidas/100 km/ año será el n_{fo} acumulado (n_{fov} , n_{foc}). En la Figura N°12 se aprecia una curva que permite estimar el número de salidas bajo ciertas condiciones dadas.

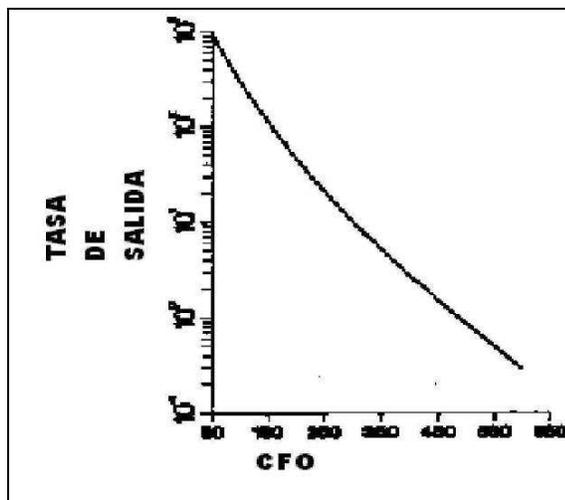


Figura N° 12: Curva de Tasa de salida vs CFO normalizada según Chowdhuri para: $h_l = 10 \text{ m}$; $h_c = 3 \text{ Km}$; $\beta = 0.3 \text{ p.u.}$; $n_g = 10/\text{Km}^2/\text{año}$
 $rs=8(I_p)^{0.65}$

3.4. SISTEMA DE PUESTAS A TIERRA

La resistencia de puesta a tierra está directamente relacionada con la composición natural del suelo, (características físicas y químicas), es decir, que el suelo será de resistencia baja cuando sea altamente húmedo, con composición arcillosa y con un alto contenido de minerales conductores. Al contrario se presentará una alta resistencia de puesta a tierra cuando el suelo sea de composición seca y altamente rocosa, lo que implica que la resistencia de puesta a tierra puede variar con la época del año.

Lo anterior tiene lógica, pues la corriente asociada con la descarga atmosférica al llegar a la base de la estructura encuentra o no, según la composición del suelo un medio propicio para disipar la energía del rayo.

Cuando una línea de transmisión tiene continuas salidas debido a flameos inversos por altas resistencias de puesta a tierra en las estructuras, se debe buscar mejorar (bajar) la resistencia que la corriente asociada al rayo encuentra al llegar al suelo.

Sabiendo el nivel ceraúnico de la zona por donde cruza la línea de transmisión, podemos por medio de una gráfica probabilística de distribución de rayos, calcular el valor de la corriente de rayo que aceptaremos nos produzca flameo inverso (la anterior decisión, se toma dependiendo del grado de confiabilidad que pretendemos dar a la línea de transmisión); con dicha corriente y con el voltaje de flameo de la cadena de aisladores podemos buscar el valor necesario de resistencia de puesta a tierra.

En la práctica una línea de transmisión no tiene un valor constante de resistencia de puesta a tierra, sino que presenta una gama de valores según la localización de las distintas torres, por lo que, lo primero al querer mejorar las puestas a tierra de una línea de transmisión es medir que valores de resistencia tiene cada torre.

Ante el anterior problema, la respuesta más lógica técnicamente que podría ocurrirnos, sería colocar una malla de tierra en la base de cada estructura, pues dicha malla de tierra dispersaría las corrientes asociadas con los rayos. Solución que tiene limitante desde el punto de vista económico.

En vista de lo anterior, los procedimientos seguidos en la práctica son:

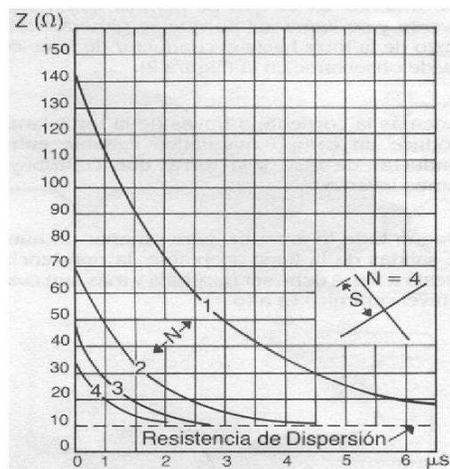
A. Cables de contrapeso

La utilización de cables de contrapeso es de práctica común y consiste en enterrar horizontalmente cables conductores pegados a las estructuras de las torres, la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y con aumento del diámetro del contrapeso enterrado (hasta cierto punto).

El sistema de puesta a tierra se comporta como una impedancia transitoria, variando desde su valor inicial hasta el valor de resistencia de dispersión.

En la figura 10 están indicadas las curvas que muestran esta variación para determinada configuración de contrapesos.

Un cable de contrapeso tiene una impedancia inicial de impulso, dependiendo de las condiciones del suelo, normalmente de 150 a 200 ohmios. Con la propagación de la onda de corriente a través del contrapeso, esta impedancia de impulso es reducida a su resistencia de dispersión en un período de tiempo dependiendo de la longitud del cable y de la velocidad de propagación de impulso.



Z 150Ω - Impedancia de impulso, (inicial)
R 10 Ω - Resistencia de dispersión
N Número de cables de contrapeso.

Fig.13 Variación de la impedancia transitoria y efecto del número de contrapesos.

De la anterior figura podemos observar que al colocar más contrapesos bajamos el valor total de la impedancia transitoria inicial. (Es como colocar resistencias de aproximadamente 145 ohmios en paralelo).

Número de contrapesos	Impedancia inicial	
1 cable	145	<i>ohms</i>
2 cables	$\frac{145 \cdot 145}{145 + 145}$	= 72 <i>ohms</i>
3 cables	$\frac{72 \cdot 145}{72 + 145}$	= 48 <i>ohms</i>
4 cables	$\frac{48 \cdot 145}{48 + 145}$	= 36 <i>ohms</i>

Los impulsos atmosféricos se propagan en una estructura con una velocidad aproximada del 80% de la velocidad de la luz, o sea

$$V_{pt} = 0.8 \cdot 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \cdot \frac{1 \text{ s}}{10^6 \mu\text{s}} \cdot \frac{1000\text{m}}{1\text{km}}$$

$$V_{pt} = 240 \text{ m/s}$$

Donde:

V_{pt} : Velocidad de propagación de la corriente de un rayo en una estructura.

Además, los impulsos atmosféricos se propagan en un contrapeso con una velocidad del orden de un tercio de la velocidad de la luz, o sea:

$$V_{pc} = \frac{300.000 \text{ km}}{3} \cdot \frac{1 \text{ s}}{\text{s}} \cdot \frac{1000\text{m}}{1\text{km}} \cdot \frac{1}{10^6 \mu\text{s}}$$

$$V_{pc} = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$$

Donde:

V_{pc} : Velocidad de propagación de la corriente de un rayo en un contrapeso.

Según lo anterior un contrapeso de 300m, con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 ohms, tardaría 6 microsegundos para que su resistencia efectiva sea reducida a su resistencia de dispersión.

$$t = \frac{s}{v} \quad (21)$$

Donde:

t = tiempo, s = espacio (ida y vuelta) 600 ohm

v = Velocidad = $V_{pc} = 100 \text{ m}/\mu\text{s}$

$$t = \frac{600}{100\text{m}/\mu\text{s}} = 6 \mu\text{s}$$

Del mismo modo, un cable de contrapeso de 75m, con una impedancia de impulso de aproximadamente 150 ohms, solo necesitará 1.5 microsegundos para reducir su resistencia efectiva a su resistencia de dispersión. Lo anteriormente descrito, sirve para demostrar que desde el punto de vista de respuesta transitorio (fenómenos muy rápidos), es mejor la utilización de varios cables contrapesos con longitudes menores que un cable contrapeso con longitud muy grande.

La impedancia de impulso inicial de los contrapesos, depende de las condiciones del suelo (normalmente de 150 a 200 ohms) y no depende directamente de la longitud del cable. Por lo que la longitud del contrapeso debe ser tal que el tiempo que tarde el impulso en ir a la punta y volver, sea superior al tiempo de crecimiento del fenómeno. Como estamos hablando de una descarga atmosférica, la cual es normalizada por una onda de $1,2 \times 50 \mu s$ o superior

Garantizándonos que cuando la onda vuelve, (el fenómeno) ya se encuentra decreciendo. (Figura 14).

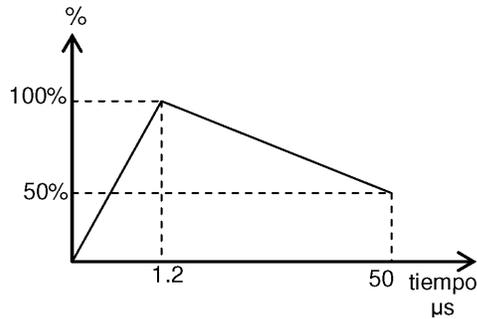


Fig.14 Onda normalizada para descargas atmosféricas.

Como conocemos las velocidades de propagación del impulso en la torre y en los contrapesos y el tiempo de crecimiento del fenómeno, podemos calcular la longitud del contrapeso.

Visualicemos la distancia que ha de recorrer el impulso según la figura 17.

Estableciendo que la transición es prácticamente completa en el tiempo necesario para la onda retornar del extremo remoto del cable contrapeso.

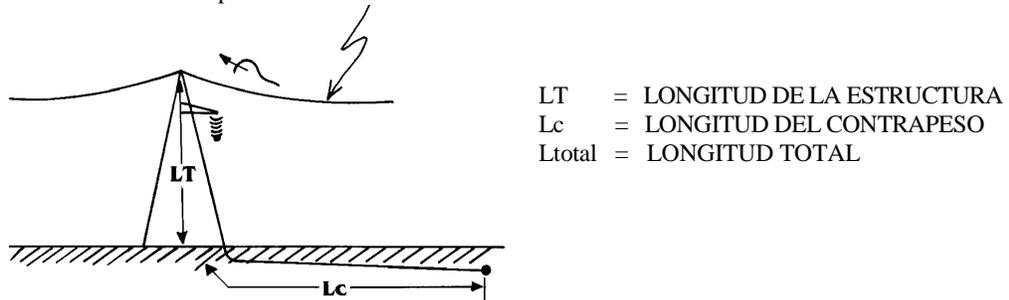


Fig.15 Distancia que recorre el impulso.

$$L_{total} = LT + Lc + Lc + LT$$

$$L_{total} = 2LT + 2Lc$$

Supongamos una torre de 30m de altura. El tiempo que transcurre mientras recorre la estructura será:

Tt = tiempo en la torre
Tc = tiempo en el contrapeso

$$t = \frac{s}{v} \quad (22)$$

Donde:

t = tiempo, s = espacio, v = Velocidad

$$t_T = \frac{2L_T}{V_{FT}} = \frac{60m}{240m/\mu s} = 0.25 \mu s$$

También sabemos que:

$$t_{TOTAL} = t_T + t_C \quad (23)$$

$$t_C = 1.5 \mu s - 0.25 \mu s = 1.25 \mu s$$

$$s = v \cdot t = 100 \frac{m}{\mu s} \cdot 1.25 \mu s = 125 \mu s$$

Como es el espacio de ida y vuelta, el contrapeso debe tener una longitud de aproximadamente 62 metros. Obtendríamos un valor un poco más corto de la longitud de contrapesos, si asumimos un tiempo total más cercano al pico de la onda normalizada ($1.2 \mu s$), o si tenemos una estructura más alta. Si el contrapeso es muy largo, la parte crítica de la descarga (el ascenso) ya pasó y el impulso no ha llegado a la punta del contrapeso, lo que podría verse como "enterrar la plata".

Algunos tipos de arreglos de cables contrapesos, utilizados para el mejoramiento de las puestas a tierra de las estructuras de una línea de transmisión son mostrados en la figura 16.

Los arreglos (a) y (b) son muy costosos y solo traen ventaja para fenómenos de baja frecuencia (60Hz), pues es el caso de los contrapesos muy largos.

El arreglo más común es el (e).

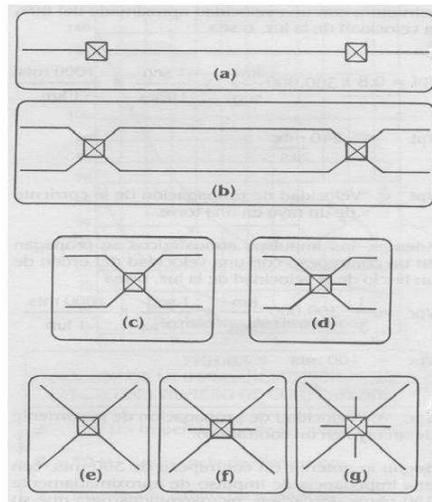


Fig.16 Los contrapesos teóricamente no tienen que ser demasiado profundos, pero si están muy superficiales pueden ser saqueados fácilmente.

B. Varillas de contrapeso

La utilización de varillas de contrapeso en nuestro medio se hace principalmente para aterrizar pararrayos (copperweld) y consiste en enterrar verticalmente varillas conductoras pegadas a las estructuras de las torres y al igual que con los cables de contrapeso la resistencia disminuirá con el aumento de la longitud y aumento del diámetro de la varilla enterrada (hasta cierto punto).

La utilización de varillas de contrapeso se basa en el principio de que la resistencia del suelo mejora con la profundidad (premisa que no es cierta en todos los casos).

Mientras más profundas queden las varillas, mejor será su comportamiento, pero más complicada y costosa su colocación. En países como Canadá, entierran varillas muy profundas (hasta 10m) que son enterradas por etapas y van siendo ensambladas cuando la anterior está enterrada, método que solo es posible en suelos blandos como los arcillosos.

En cuanto a los arreglos de varillas de contrapeso no hay algo muy establecido, pero lo que sí es cierto, es que mientras más separadas estén las varillas, más bajo será el valor de puesta a tierra obtenido, pues menos "copado" estará el medio alrededor de cada varilla.

C. Combinación de cables y varillas de contrapeso

Cuando el arreglo de cables de contrapeso llega a ser del tipo (g), (figura 16) y aún no se ha logrado un valor de resistencia de puesta a tierra aceptable, se procede a enterrar varillas de contrapeso, aunque también se encuentran los demás arreglos de la figura 6 combinados con varillas.

D. Aplicación de sal y carbón

La aplicación de sal común fue muy utilizada hasta hace muy poco tiempo, con la característica de que si rebaja la resistencia del terreno, pero es una solución temporal, porque al pasar el tiempo el agua va lavando la sal y por consiguiente va aumentando de nuevo la resistencia del terreno.

Por lo anterior, se complementa la adición de sal al terreno con la adición de carbón (de origen vegetal) pues este último absorbe el agua salada y la retiene. Después de una descarga, parte del agua salada absorbida por el carbón se "seca" y el carbón absorbe más agua, por lo que cada vez el carbón tendrá agua menos salada. Además con el pasar del tiempo y debida a la misma humedad, el carbón se desintegra y permite que se lave la sal.

Es una práctica equivocada utilizar carbón mineral porque este no absorbe (retiene) el agua salada, y sería como tratar de mejorar la resistividad del suelo agregando pequeños trozos de material conductor.

La adición de sal y carbón (vegetal) tienen además la desventaja de que cuando es una zona altamente rocosa es prácticamente imposible su aplicación.

Otra desventaja de la aplicación de sal como medio para rebajar la resistencia de puesta a tierra se presenta si hay electrodos de hierro, pues esta contribuye a su corrosión, especialmente en terrenos ácidos.

E. Adición de bentonita

La utilización de bentonita como un agregado al terreno en que se construye la puesta a tierra es un método que se utiliza solo en casos extremos cuando el tipo de suelo es altamente rocoso, arenisco o volcánico y no es posible utilizar métodos convencionales, o por medio de estos obtener valores satisfactorios de puesta a tierra.

La bentonita geológicamente es uno de los más puros minerales de arcilla. El componente principal de la bentonita es la montmorillonita (pudiendo llegar al 80%) por lo que determina las propiedades fundamentales de ésta. Lo más importante de la estructura de la montmorillonita es que está formada por tres planos de mallas. Estos planos elementales se superponen paralelamente y forman una especie de tejido de capas. Entre estos tejidos de capas hay espacios vacíos llamados huecos intercrystalinos. Éstos huecos tienen la propiedad de absorber diversas sustancias, en especial el agua. Por lo anterior se concluye que para nuestro caso, la propiedad más importante de la montmorillonita y por ende de la bentonita, es la facilidad intercrystalina de dilatación.

Otra propiedad de la montmorillonita es la permeabilidad de los poros y espacios intercrystalinos. Con la absorción de humedad cambia el volumen y la forma exterior de las partículas. Este aumento de volumen disminuye la permeabilidad de los poros de modo que se retiene la humedad por la estructura cristalina formada.

Básicamente el procedimiento de mejoramiento de puesta a tierra a base de bentonita, consiste en rellenar las grietas naturales, aberturas y huecos libres que existen en el terreno mediante una masa que envuelve las partículas de terreno y las une eléctricamente, formando una gran superficie buena conductora de electricidad.

Si el terreno no presenta grietas o huecos naturales, es necesario producirlos artificialmente en la proximidad de la puesta a tierra. Estas grietas pueden producirse mediante pequeñas explosiones que no afecten la resistencia mecánica del terreno, (la cantidad de explosivo dependerá de las propiedades de la roca). Con esto se producen fisuras capilares extensas en la roca como consecuencia de la onda de choque producida y además por el sacudón que se produce simultáneamente.

La bentonita por ser una sustancia conductora de la electricidad, su utilización es muy apropiada como masa de relleno y unión, además protege a la puesta a tierra contra la corrosión. Por lo anterior también se utiliza bentonita en suelos de baja resistividad específica, de acción corrosiva acida en los que se pretende proteger el electrodo o conductor de tierra contra la corrosión (por ejemplo suelos con aguas subterráneas acidas).

3.5. PLANTEAMIENTO DE CASOS

El común denominador de los casos que se plantean a continuación es poder obtener resultados que permitan comparar de manera cualitativa y cuantitativa la influencia del cálculo de las Sobretensiones Inducidas debido a Descargas Atmosféricas, en los resultados de la Tasa de Salida.

Existen diversas metodologías para calcular el valor máximo de una Sobretensión Inducida. Según lo expuesto en el presente trabajo, las metodologías evaluadas para el cálculo de Voltaje máximo inducido serán Chowdhuri y Voislav. Voislav en su formulación arroja un resultado de Voltaje máximo inducido, el cual, incluye el efecto de Onda Viajera por el monoconductor. Por otro lado Chowdhuri modela el máximo valor de la Sobretensión Inducida como la superposición de un número n de fuentes a lo largo de la longitud de la línea en estudio, para el desarrollo de este trabajo se modelará el valor de la máxima fuente de voltaje (MFC) ubicada en el punto más cercano entre el lugar de incidencia de la descarga y la línea en cuestión, es decir $x=0$ mts.

3.5.1. Para un solo conductor en el espacio (Monoconductor).

A continuación se fijan algunos de los parámetros asumidos según [11] y sobre la base de los cuales se desarrollarán los casos planteados a continuación.

- $\beta = 0,3$
- Desviaciones estándar para el tiempo (dst)=0,553
- Desviaciones estándar para la corriente (dsI)=1,33 o 0,605 dependiendo del módulo de la corriente.
- Media de Corriente (Im)=31kA
- Media de Tiempo (tm)=3,83 μ seg
- Longitud de la línea=100kms
- Tiempo de cola de la forma de onda de la corriente de la descarga de retorno T=50 μ seg

A. Variación del CFO (Critical Flash Over)

Para este caso se consideran las siguientes variables físicas:

Tabla N°1. VARIABLES FÍSICAS DEL CASO VARIACION DEL CFO

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al año]	Resist. a tierra
VALOR	100 a 600 Δ CFO=50	10	3	10	No Aplica

Se aplica la metodología de la Tasa de Salida variando como único parámetro el CFO de la línea en cuestión. Se fijan muchos de los datos de entrada con los mismos valores expuestos por Chowdhuri [7,12], esto para poder lograr cierta concordancia entre los resultados arrojados por este trabajo y aquellos expuestos en su publicación. De esta manera se crea un punto de comparación.

Para este caso se plantea la variación de la Tasa de Salida según el aislamiento, es por ello que se varía el CFO en intervalos de 50kV y dentro de un rango de 100 a 600kV. Para luego estudiar como varía la Tasa de Salida con este parámetro.

B. Variación del hl

Tabla N°2. VARIABLES FÍSICAS DEL CASO VARIACION DE hl

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al año]	Resist. a tierra
VALOR	100	10 a 30 Δ hl= 10	3	10	No Aplica

Basado en la misma configuración del caso anterior, pero variando la altura de la línea (hl) en intervalos de Δ hl= 10mts y en un rango comprendido entre $10 < hl < 30$ mts.

Para el desarrollo de este caso se fijo el CFO en 100kV. Para luego observar como varia la Tasa de Salida con la altura.

C. Variación del Nivel Ceraúnico

Tabla N°3. VARIABLES FÍSICAS DEL CASO VARIACION DEL NIVEL CERAUNICO

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al año]	Resist. a tierra
VALOR	100	10	3	10 a 100 10,30,40,60,80,100	No Aplica

Siguiendo la misma configuración inicial caso (A), pero fijando el CFO en 100 kV y hl en 10 m, se procede a variar el Nivel Ceraúnico (T). Dicha variación tendrá aumentos de 10 y 20 días de tormenta al año, en un rango comprendido entre $10 < T < 100$ días de tormenta al año.

3.5.2. Para un conductor de fase y un conductor de guarda (Multiconductor)

Como se ha mencionado a lo largo del trabajo, existe influencia en el valor del voltaje inducido cuando se está en presencia de varios conductores, es por ello que se plantean casos donde se estudian los resultados de la Tasa de Salida en una línea de configuración vertical la cual consta de un conductor de fase más un conductor de guarda. El estudio se limita a este tipo de líneas debido a que cualquier modelo de multiconductores puede ser llevado a la configuración antes descrita.

D. Variación del CFO (Critical Flash Over)

Para este caso se consideran las siguientes variables físicas:

Tabla N°4. VARIABLES FÍSICAS DEL CASO VARIACION DEL CFO

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	Hg [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al Año]	hg/hl
VALOR	100 a 600 A=50	10	11	3	10 a 100 10,30,40,60,80,100	

Se aplica la metodología de la Tasa de Salida variando como único parámetro el CFO de la línea en cuestión. Con la salvedad que ahora se incluye otro conductor.

Se fijan muchos de los datos de entrada con los mismos valores expuestos por Chowdhuri [10,16], esto para poder lograr cierta concordancia entre los resultados arrojados por este trabajo y aquellos expuestos en su publicación. De esta manera se crea un punto de comparación.

Para este caso se plantea la variación de la Tasa de Salida según el aislamiento, es por ello que se varía el CFO en intervalos de 50kV y dentro de un rango de 100 a 600kV. Para luego estudiar como varía la Tasa de Salida con el CFO.

E. Variación del hl y relación hg/hl

Tabla N° 5. VARIABLES FÍSICAS CASO VARIACIÓN DEL HL Y RELACIÓN HG/HL

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	Hg [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al Año]	hg/hl
VALOR	100	10	11	3	10 a 100 10,30,40,60,80,100	

Es necesario señalar que los cálculos se van a desarrollar teniendo el conductor de guarda en un solo punto de conexión a tierra, lo cual es una aproximación obtenida de [13]

En este caso se van a variar las alturas presentes en la configuración; se pretende lograr ver el efecto de la distancia existente entre el conductor de fase y su respectivo conductor de guarda. La manera de alcanzar esto será variando los parámetros hl, hg y la relación existente entre las alturas de ambos conductores (hg/hl).

F. Variación de la Resistencia puesta a tierra

Tabla N° 6. VARIABLES FÍSICAS CASO VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA PUESTA A TIERRA

VARIABLE	CFO [kV]	hl [m]	hc [km]	T [días de Tormenta al	Resist. a tierra
VALOR	100	10	3	10 a 100 10,30,40,60,80,100	5 a 100 5,10,20,100

Sin alterar ninguno de los parámetros del caso (E) y continuando con las mismas variaciones que se efectúan en este, se integra ahora una nueva variable. Esta variable es la resistencia de puesta a tierra (R). Estos valores de resistencia son los siguientes cubrirán un rango de 5, 10 20 y 100Ω.

IV. RESULTADOS

MONOCONDUCTOR

4.1. Variación del CFO

El método utilizado para calcular la Tasa de Salida en la línea fue el planteado por Chowdhuri [7]. Sin embargo para él calculo de voltaje inducido en el algoritmo se utilizaron dos métodos distintos. El primero corresponde con la presentada por Voislav [4], y el segundo surge de aproximar el voltaje inducido al valor de la Máxima Fuente de Chowdhuri (MFC), es por ello que la Tasa de Salida para esta aproximación difiere de la original presentada por el autor [11] Tabla N° 8. Debido a que los valores de Tensión Inducida arrojados por la metodología de Voislav difieren de los obtenidos con la formulación de MFC, **es normal que para niveles de CFO relativamente bajos los resultados en el cálculo de las salidas anuales esperadas difieran.** A pesar de estas diferencias se puede apreciar que conforme se incrementa el CFO de la línea, el comportamiento de la Tasa de Salida correspondiente a cada una de las formulaciones desarrolladas se aproximen cada vez más al valor teórico esperado [11]. Esto se observa en sistemas con altos niveles de tensión donde las tensiones inducidas por descargas atmosféricas no representan la causa principal de falla puesto que el sistema se encuentra diseñado para soportar transitorios de este tipo. A continuación, en la Figura N°17 podemos observar la diferencia entre el método de Voislav y Chowdhuri.

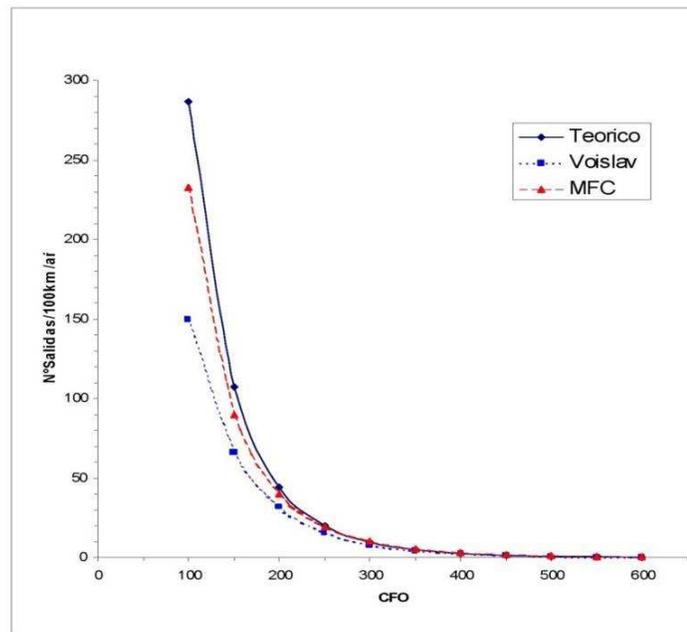


Figura N° 17: Tasa de Salida según los Métodos Propuestos para el Cálculo de Tensiones Inducidas (Voislav, MFC y Teórico de Chowdhuri). Considerando una línea aérea con: hl=10; Ng=10; rs=10 10.65

Tabla N°8. DATOS DE LA TASA DE SALIDA SEGÚN EL CÁLCULO DE S/I POR VOISLAV, MFC Y CHOWDHURI [CASO FIG. 17]

CFO [kV]	T.S. Vv	T.S. MFC	T.S. Teórica	Diferencia% Vv-Teórico	Diferencia% MFC-Teórico
100	149,725	232,605	286,40	0,48	0,19
150	66,006	89,761	107,30	0,38	0,16
200	31,443	39,952	44,42	0,29	0,10
250	15,605	19,546	19,85	0,21	0,02
300	7,954	10,224	9,47	0,16	0,08
350	4,125	5,623	4,74	0,13	0,19
400	2,156	3,216	2,48	0,13	0,30
450	1,130	1,897	1,35	0,16	0,41
500	0,588	1,149	0,76	0,23	0,51
550	0,302	0,710	0,44	0,31	0,61
600	0,151	0,447	0,26	0,42	0,72

4.2. Variación de la Altura de la Línea

La tensión inducida es función de la amplitud de corriente (I_p), el tiempo de frente (T_f) y del punto de incidencia de la descarga (Y_o); sin embargo la altura de la línea (h_l) es un parámetro que puede influenciar enormemente los resultados esperados. Como la tensión inducida es proporcional a la altura de la línea, es lógico que este hecho se refleje en la Tasa de Salida esperada.

Para este caso se varió la altura de la línea en intervalos de 10 m. Y en un rango comprendido entre los 10 y los 30 m. Los resultados se muestran en la Figura N°18. Donde se observa que ambas líneas de resultados presentan un crecimiento lineal aún cuando poseen distintas pendientes. A simple vista se observa que existe una relación directamente proporcional entre h_l y la Tensión Inducida. **A mayor altura mayor el valor del voltaje inducido.**

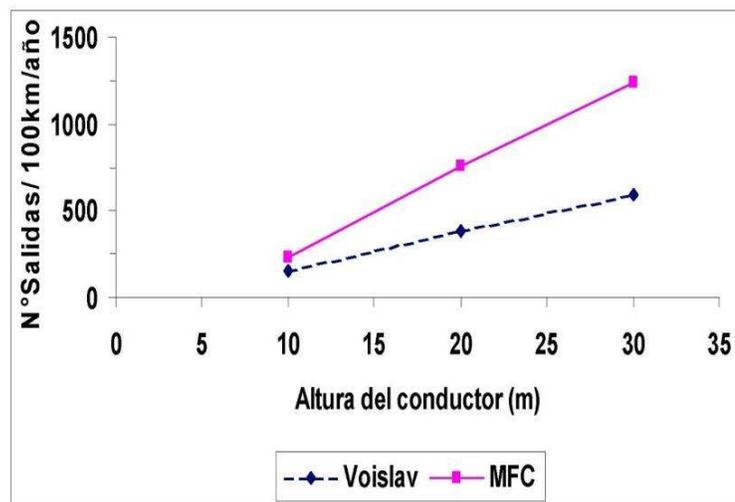


Figura N°18: Influencia de la Altura del Conductor para efectos del valor de la Sobretenión Inducida

4.3. Variación del Nivel Ceraúnico

Como se mencionó en anteriormente, la Tasa de Salida es directamente proporcional al nivel ceraúnico del medio donde se encuentre la línea. Y es de esperarse que si el nivel ceraúnico aumenta, también aumente la cantidad de descargas que podrían llegar a tierra, incrementando a su vez la probabilidad de que una de estas descargas posea el I_p , T_f y Y_o necesarios para superar el CFO de la línea aumentando así el número de salidas por sobretensiones inducidas. El sistema estudiado fue el mismo del 4.1. variando N_g para tres valores de nivel ceraúnico: bajo (10-30), medio (40-60) y alto (80-100). De los resultados obtenidos, Figura N° 19, se corrobora que existe una relación lineal, claramente se observa a medida que se incrementa el nivel ceraúnico aumenta también el número de salidas.

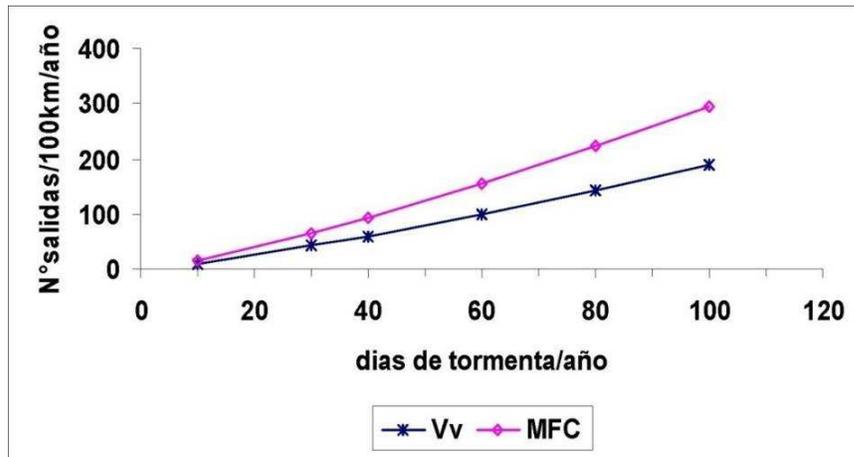


Figura N°19: Curva de Influencia del Nivel Ceraúnico en la Tasa de Salida según Voislav (Vv) y la máx. fuente de Chowdhuri (MFC)

MULTICONDUCTOR

4.4. Efecto de considerar conductor de guarda para el cálculo de la Tasa de Salida cuando varía el CFO

Siguiendo el mismo patrón de la sección 4.1 se varía el CFO de la línea dentro de un rango de $100 < CFO < 600$ kV en intervalos de 50kV, el conductor de guarda está situado un metro por encima del conductor de fase a una altura de 11 mts. El efecto de atenuación del conductor de guarda es bastante significativo puesto que de los resultados de la Tabla N° 9 luego de compararlos con los de la sección 4.1 se demuestra en qué grado se reduce el valor de la tensión inducida, esto calculado con una resistencia de puesta a tierra de 10ohm.

Tabla N° 9: DATOS COMPARATIVOS DE LA TASA DE SALIDA SEGÚN CHOWDHURI (MFC) Y VOISLAV, CONSIDERANDO EL EFECTO DEL CONDUCTOR DE GUARDA.

CFO [kV]	Tasa de Salida (Voislav)		Diferencia %
	sin c/g	con c/g	(sin c/g-con c/g)
100	149,725	71,286	52,39
150	66,006	24,735	62,53
200	31,443	9,202	70,73
250	15,605	3,556	77,21
300	7,954	1,394	82,47
350	4,125	0,544	86,81
400	2,156	0,205	90,49
450	1,130	0,072	93,63
500	0,588	0,022	96,26
550	0,302	0,065	78,48
600	0,151	0,010	93,38

a) Voislav

Tasa de Salida (MFC)			Diferencia %
CFO [kV]	sin c/g	con c/g	(sin c/g-con c/g)
100	232,605	98,744	57,55
150	89,761	31,125	65,32
200	39,952	11,715	70,68
250	19,546	4,935	74,75
300	10,224	2,247	78,02
350	5,623	1,083	80,74
400	3,216	0,546	83,02
450	1,897	0,284	85,03
500	1,149	0,152	86,77
550	0,710	0,083	88,31
600	0,447	0,046	89,71

b) MFC

4.5. Variación de hl y la relación hg/hl

Ahora se introduce el efecto del conductor de guarda en el cálculo de la tasa de salida con la finalidad de comparar su influencia sobre la misma. Para ello se toma un CFO=100 kV y para diferentes alturas del conductor de guarda (hg) y una misma altura de fase (hl=10) se comparan resultados con los calculados en la sección anterior. Estos resultados se muestran en la Tabla N° 10 en la que se aprecia una significativa reducción en las posibles salidas de la línea. Esta reducción es inversamente proporcional a la distancia que separa ambos conductores. A medida que existe mayor diferencia de altura entre los conductores de fase y guarda, el efecto de atenuación del voltaje inducido es menor, por ende a mayor distancia entre dichos conductores, mayor es el voltaje inducido en el sistema.

Tabla N°10: VARIACIÓN DE HL Y LA RELACIÓN HG/HL

hg/hl	CON C. DE GUARDA		SIN C. DE GUARDA		
	T.S. Voislav	T.S. MFC	T.S. Voislav	T.S. MFC	T.S. Teórica
1,1	69,312	94,846	149,725	232,605	286,4
1,25	90,567	128,821	149,725	232,605	286,4
1,5	105,955	154,623	149,725	232,605	286,4

Sin embargo para tener un mayor rango de comparación con el caso monoconductor se estudió el efecto de la distancia entre conductor de guarda y conductor de fase para las mismas alturas usadas en el caso 3.5.1 (D), ver Figuras N° 20, 21 y 22.

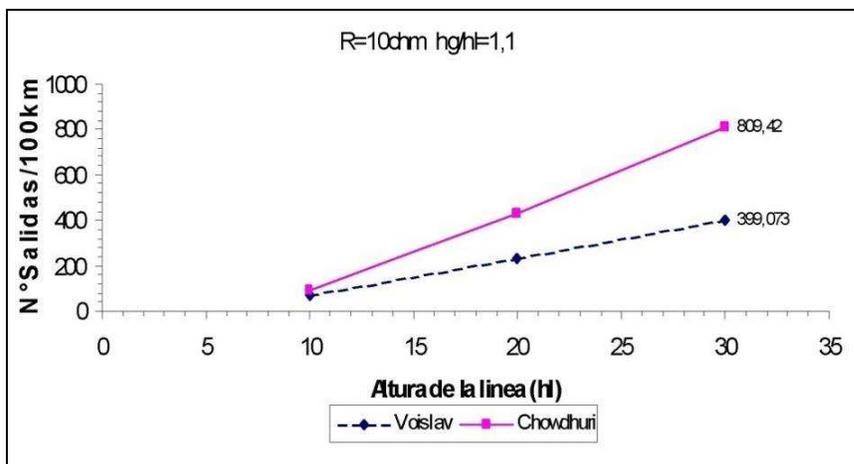


Figura N° 20. Efecto del Cable de Guarda. hg/hl=1,1

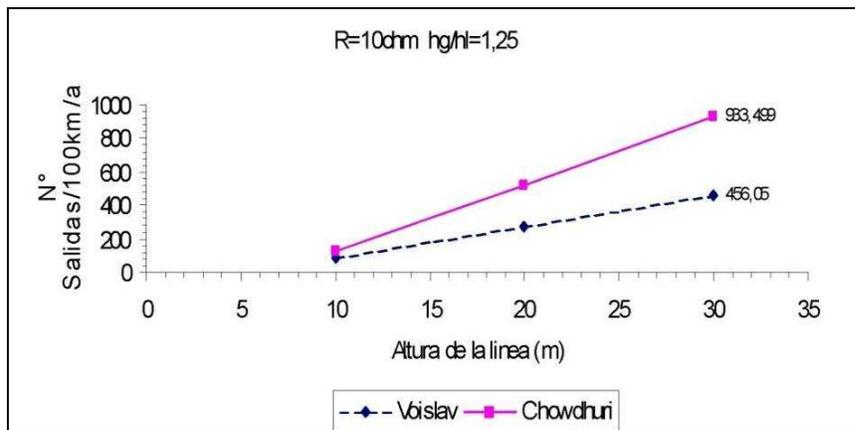


Figura N°21. Efecto del Cable de Guarda. hg/hl=1,25

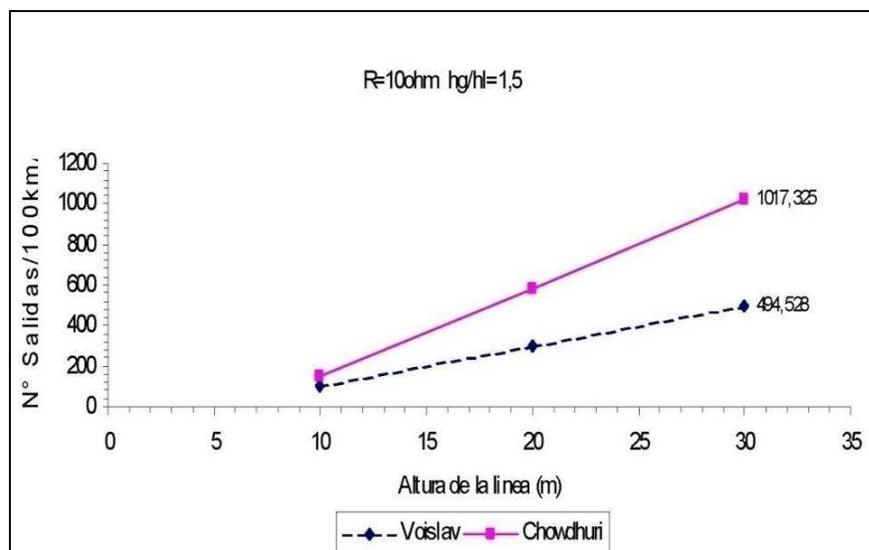


Figura N°22. Efecto del Cable de Guarda. hg/hl=1,5

4.6. Variación de la Resistencia Puesta a Tierra

Puesto que el efecto atenuador del conductor de guarda sobre el voltaje está relacionado con la resistencia de puesta a tierra, según los resultados obtenidos en la Tabla N° 11, se puede apreciar que para una misma relación de hg/hl la respuesta de la Tasa de Salida se comienza a notar más ante valores de resistencias cercanos a la impedancia de acople fase-guarda del sistema (valores por encima de los 100 ohm).

Tabla N° 11. VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA PUESTA A TIERRA

hg/hl=1,1	hl =10m hg=11m		hl =20m hg=22m		hl =30m hg=33m	
	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)
5	68,003	92,821	228,995	421,611	395,759	802,217
10	69,312	94,846	231,564	426,921	399,073	809,42
20	71,826	98,744	235,492	437,055	405,344	823141
100	87,513	123,815	266,841	500,143	444,232	907,78

Tabla N° 11 a) hg/hl=1.1.

hg/hl=1,25	hl =10m hg=12,5m		hl =20m hg=25m		hl =30m hg=37,5m	
R (ohm)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)
5	89,557	127,178	272,992	513,079	453,716	928,453
10	90,567	128,821	274,825	516,96	456,05	933,499
20	92,493	131,983	278,343	524,345	460,45	943,16
100	104,301	151,806	299,997	570,183	487,73	1002,584

Tabla N° 11 b) hg/hl=1.25.

hg/hl=1,5	hl =10m hg=15m		hl =20m hg=30m		hl =30m hg=45m	
R (ohm)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)	T.S. (voislav)	T.S. (MFC)
5	105,205	153,329	303,156	576,942	492,872	1013,73
10	105,955	154,623	304,507	579,798	494,528	1017,325
20	107,397	157,103	307,037	585,214	497,689	1024,212
100	116,246	172,391	322,693	618,792	517,247	1066,848

Tabla N° 11 c) hg/hl=1.5.

V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. A medida que aumenta el nivel Ceraúnico aumenta también el número de descargas por kilómetro cuadrado por año. Esto es debido a que a mayor nivel Ceraúnico en una zona determinada aumenta la probabilidad de que ocurra un mayor número de descargas atmosféricas a tierra, y en consecuencia se incrementa la probabilidad que estas descargas originen sobretensiones inducidas en la línea y por ende se incremente la tasa de salida.
2. Existen parámetros que influyen directamente en el valor de la tensión inducida. Tales parámetros son: la amplitud de corriente (I_p), el tiempo de frente (T_f), el punto de incidencia de la descarga (Y_o) y la altura de la línea (h_l), y esto a su vez incide directamente en el valor de la tasa de salida.
3. De los resultados obtenidos, se demuestra la influencia significativa que tienen las variables estudiadas, tanto en la sobretensión inducida, como sobre la tasa de salida obtenida. Por ello, es importante que cuando se realice el diseño de líneas aéreas de media tensión en zonas geográficas alturas mayores a los 3800 msnm con altos niveles ceraunicos y con altas posibilidades de que ocurran descargas atmosféricas cercanas a las líneas (entorno a los 2 km), se tomen previsiones sobre algunos de los parámetros de diseño que pueden ayudar a minimizar la tasa de salida
 - Incremento del nivel de aislamiento.
 - Disminución de la altura efectiva sobre el plano de tierra.
4. Las sobretensiones inducidas, tienen una marcada incidencia en las salidas de líneas aéreas de media tensión ubicadas en zonas geográficas llanas, poco habitadas y de altos niveles ceraunicos; siendo maypres las salidas por inducción que por impacto de descargas atmosféricas directas en conductores de fase; esto debido primordialmente al área abarcada en el entorno de la línea, donde cualquier descarga promedio, pueden inducir valores de tensiones superiores a los 100kV.
5. Se analizó el efecto del conductor de guarda en el cálculo de la tasa de salida con la finalidad de observar su influencia sobre la misma. Los resultados arrojaron que existe una significativa reducción en la tasa de salida de la línea debido al efecto de atenuación del conductor de guarda. Esta reducción es inversamente proporcional a la distancia que separa ambos conductores.
6. Puesto que el efecto atenuador del conductor de guarda sobre el voltaje está relacionado con la resistencia de puesta a tierra, se puede apreciar que para una misma relación de altura de conductor de guarda y altura de la línea (hg/hl) la variación en la Tasa de Salida comienza a hacerse apreciable ante valores de resistencias cercanos a la impedancia de acople fase-guarda del sistema (valores por encima de los 100 ohm) estos valores no son aplicables a la realidad.
7. Aunque los conductores de guarda proporcionan gran protección a los conductores de fase contra las descargas atmosféricas (descargas directas), ocurren salidas del servicio por flámeos inversos que se deben a resistencias de puesta a tierra elevadas. Para vencer esta dificultad surgen dos posibilidades: aumentar el nivel del aislamiento de la línea o disminuir la resistencia de puesta a tierra. Sin embargo, una selección óptima del aislamiento debe ser hecha cotejando los dos factores: fallas del apantallamiento y descargas disruptivas inversas. Lo que conducirá a una correcta localización de los cables de guarda y una adecuada selección de la puesta a tierra de las estructuras.
8. Para dar una idea de valores de puesta a tierra, podemos decir que: son muy buenos valores de 20 ohm o menos y que valores por encima de 50 o 60 ohm ya son preocupantes; para suelos altamente rocosos se pueden encontrar valores superiores a los 350 ohm.

9. En las configuraciones multiconductoras de una línea de transmisión, el acoplamiento capacitivo e inductivo entre los conductores atenúan el voltaje inducido. Por esta razón, el uso de un conductor de guarda o de un neutro es un método eficiente de atenuación de la sobretensión, pues el voltaje y la corriente circulante en esta se oponen al fenómeno de inducción en los conductores de fase atenuando su valor de 10% a 20%. A mayor altura mayor será la inducción de voltaje en un conductor, por tanto resulta más efectivo el uso de un cable guarda que un neutro.

10. El método más común en nuestro medio para mejorar las puestas a tierra es la utilización de contrapesos. Desde el punto de vista de respuesta transitoria, es mejor la utilización de varios cables contrapeso con longitudes menores, a una cantidad reducida de cables contrapeso con longitudes muy largas. Según la deducción teórica de este trabajo, se tiene que los primeros 60m de cables de contrapeso son los más efectivos.

VI. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- [1] Luis A. Siegert C. “Alta Tensión y Sistemas de Transmisión”, 1ra Edición, Editorial Limusa, México, Págs.256-257,1988.
- [2] Master, M. J., M.A. Uman, Y. T. Lin, and R. B. Standler, Calculations of lightning return stroke electric and magnetic fields above ground, J. Of Geophys. Res., 86, 12, 127 – 12, 132, 1981
- [3] “Herramienta computacional para cálculo de sobretensiones inducidas en sistemas eléctricos con la utilización de EMTP-ATP”. Alexander Cordero G. Trabajo de pasantía presentado ante la U.S.B. 1998.
- [4] Voislav Jankov, Estimation of the Maximal Voltage Induced on an Overhead Line Due to the Nearby Lightning, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 12, N°1, Enero 1997.
- [5] Jose Raul Martín, Diseño de Subestaciones Eléctricas, 1ra Edición en Español, Editorial Alta Tensión y McGraw Hill/ Interamericana de México, Págs. 193 – 206, 1992.
- [6] Jhon Anderson, Thomas A. Short, Algorithms For Calculation of Lightning Induced Voltages on Distribution Lines, , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 8, N°3, Julio 1993.
- [7] P. Chowdhuri, Lightning-Induced Voltages on Multiconductor Overhead Lines, , IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 5, N°2, Abril 1990.
- [15] Ramírez Jorge, Martínez Miguel. “Influencia de las Sobretensiones por Descargas Atmosféricas y Comportamiento de los Sistemas de Puesta a Tierra en Líneas Aéreas de Transmisión y Distribución” Caracas 1997
- [9] Justo Yanque M., Alta Tensión y Técnicas de Pruebas de Laboratorio. UNI -FIEE Notas del Curso, 2004.
- [10] Hernán Untiveros Zaldivar, Diseño de Líneas de Transmisión Aéreas de Alta Tensión, CIP Capitulo de Ingeniería Mecánica Eléctrica, Curso Profesional, Págs. 71-82, 1998.
- [11] Chowdhuri P., “Estimation of Flashover Rates of Overhead Power Distribution Lines by Lightning Strokes to Nearby Ground” IEEE Transactions on Power Delivery, vol 4, No 3, julio 1989.
- [12] Chowdhuri P., Gross E. “Voltages Surges Induced on Overhead Lines by Lightning Strokes” IEEE Proceedings, vol. 114 No. 12 December 1967.
- [13] S. Yokoyama, “Experimental Analysis of Earth Wires for Induced Lightning Surges”, IEEE Proceedings, Vol. 127, No 1, Enero 1980.
- [14] S. Rusck, “Induced Lightning Overvoltages on Power Transmission Lines with Special Reference to the Overvoltage Protection of Low-Voltage Networks”, Trans. Royal Inst. Tech., vol 120, 1958.

VII. INDICE

i	RESUMEN.....	1
ii	ABSTRACT	1
I	INTRODUCCIÓN.....	1
II	OBJETIVOS	2
III	DESARROLLO DEL TRABAJO.....	3
	3.1. DESCARGAS ATMOSFERICAS	3
	3.1.1 TEORÍA DE SCHONLAND.	3
	3.1.2 CARACTERISTICAS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS Y SU INCIDENCIA EN LÍNEAS AÉREAS DE MEDIA TENSIÓN	5
	3.1.3 PARÁMETROS DE INCIDENCIA DEL RAYO.....	6
	3.2 METODOLOGIA PARA EL CÁLCULO DE LA SOBRETENSIÓN INDUCIDA.....	10
	3.3. METODOS EXISTENTES PARA LA ESTIMACION DE LA TASA DE SALIDA POR SOBRETENSIONES INDUCIDAS.....	11
	3.4 SISTEMA DE PUESTAS A TIERRA	15
	3.5 PLANTEAMIENTO DE CASOS.....	20
IV	RESULTADOS	22
V	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	28
VI	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	30
VII	ÍNDICE	31