



PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES BLINDAJE DE INSTALACIONES Y LÍNEAS ELECTRICAS

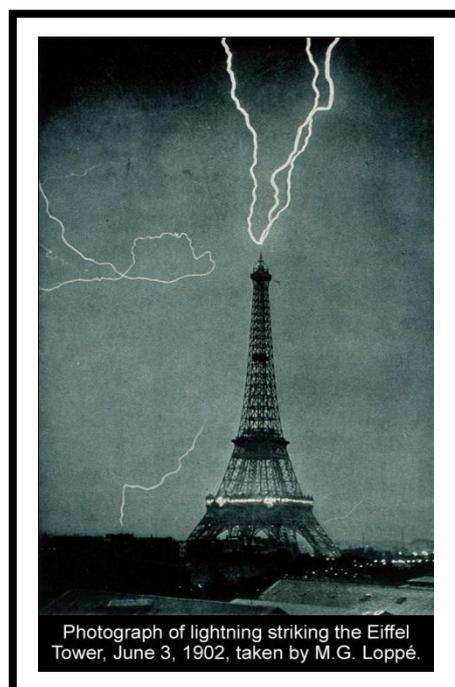


UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

UNIDAD ACADÉMICA CONCORDIA

AUTOR: Ing Elec. FERNANDO MARULL

Colaboración: Jorge A. Soto Muñoz



ÍNDICE

PROTECCIÓN CONTRA SOBRETENSIONES BLINDAJE DE INSTALACIONES Y LÍNEAS ELECTRICAS	1
.....	1
1. EVALUACIÓN DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS REF 1	1
1.1. DESCRIPCIÓN DEL FENÓMENO DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA	1
1.2. DESCARGA DE ACCIÓN DESCENDENTE	1
1.3. DESCARGA DE ACCIÓN ASCENDENTE	2
1.4. FLASH MULTI-CHISPA	2
ESTADÍSTICA EXPERIMENTAL REF 2	5
2.1. TIPOS DE DESCARGAS	5
Parámetros	5
2.2. MAGNITUDES REGISTRADAS	5
2.3. CARTAS ISOCERAÚNICAS [ISO (IGUAL) - CERAUNOS (RAYO)]	6
2.4. DETECCIÓN Y REGISTRO	7
2.5. CURVAS DE NIVEL ISOCERAUNICO	8
3. PARÁMETROS PARA EL MODELADO DE LA DESCARGA ATMOSFÉRICA REF 3	13
3.1. DISTANCIA DE SALTO FINAL $[D_s]$ (ATAQUE DEL RAYO)	14
3.2. VALOR DE LA CORRIENTE DE RAYO	14
4. DISEÑO DE PROTECCIÓN CONTRA DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	16
4.1. CRITERIOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO REF 3	16
4.2. ELEMENTOS CUANTITATIVOS PARA LA EVALUACIÓN DEL RIESGO	16
4.3. ESQUEMA DE CRITERIO BÁSICO	16
4.4. MÉTODOS EMPÍRICOS PARA EL DISEÑO DE LA PROTECCIÓN	17
4.5. MÉTODO CON EL MODELO ELECTROGEOMÉTRICO [E.G.]	19
5. CRITERIO PARA EL DISEÑO DE BLINDAJE AEREO	28
5.1. NECESIDAD DE SU USO EN LÍNEAS Y ESTACIONES	28
5.2. COORDINACIÓN	28
5.3. MATERIALES PARA HILOS DE GUARDIA	28
5.4. SECCIONES PARA LOS CABLES DE GUARDIA	28
5.5. PUESTAS A TIERRA	28
6. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LINEAS Y ESTACIONES	29
6.1. ESTADÍSTICAS DE FALLAS EN LÍNEAS	33

6.2.	TENSIONES Y CORRIENTES CRÍTICAS	33
6.3.	FORMAS DE LAS ONDAS DE LAS DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	33
6.4.	DEFORMACIÓN DEL FRENTE DE ONDA DE CHOQUE AL DESPLAZARSE	34
6.5.	ZONA DE ACERCAMIENTO DE LÍNEA A LA ESTACIÓN TRANSFORMADORA	35
6.6.	DISMINUCIÓN DE LA TENSIÓN DE CRESTA (V _c) A LO LARGO DE LA LÍNEA	35
6.7.	DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA LÍMITE DE ZONA DE ACERCAMIENTO REF 9	36
6.8.	DETERMINACIÓN DE LA DISTANCIA LÍMITE DE ZONA DE ACERCAMIENTO	36
6.9.	EQUIPOS CONECTADOS DIRECTAMENTE A UNA LÍNEA AÉREA Y A UN CABLE SUBTERRÁNEO REF 10	37
6.10.	SOBRETENSIONES TRANSFERIDAS EN LOS TRANSFORMADORES	38
7.	EVALUACION DE LAS SOBRETENSIONES APLICADAS U_s DE ORIGEN INTERNO	43
8.	MÉTODOS COORDINACIÓN DE LA AISLACIÓN REF IEC 60071	45
8.1.	DETERMINACIÓN DE AISLACIÓN PARA FRECUENCIA INDUSTRIAL O SOBRETENSIONES TEMPORARIAS	45
8.2.	DETERMINACIÓN DE LA AISLACIÓN SEGÚN LAS SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO O ATMOSFÉRICAS	45
8.3.	PROBABILIDAD DE LAS SOBRETENSIONES APLICADAS	45
8.4.	PROBABILIDAD DE DESCARGA DE LAS AISLACIONES SOMETIDAS A IMPULSO.	46
8.4.1.	<i>Combinación de aislaciones múltiples.</i>	46
8.4.2.	<i>Influencia de las condiciones atmosféricas.</i>	47
8.5.	MÉTODOS DE COORDINACIÓN DE LA AISLACIÓN.	47
8.5.1.	<i>Método Estadístico general.</i>	48
8.5.2.	<i>Método Estadístico Simplificado.</i>	49
8.6.	EVALUACIÓN DEL RIESGO Y VERIFICACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES	51
9.	RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA DISRUPTIVA EN AIRE Y LA TENSIÓN RESISTIDA 50%	53
9.1.	RESPUESTA DE AISLACIÓN A TENSIONES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL	53
9.2.	FÓRMULA DE GALLET LEROY [EDEF]	53
9.3.	FÓRMULA DE L. PARIS [ENEL]	54
9.4.	FÓRMULA POR NORMA IEC 60071	54
9.5.	VALORES DE FACTOR DE GAPS KG O K EN NORMA IEC 60071-2	55
9.6.	CORRELACIONES ENTRE DISTANCIAS EN AIRE (GAP) Y TENSIONES U 50%	56
9.7.	SOBRETENSIONES RESISTIDAS POR UNA DISTANCIA EN AIRE.....	56
9.8.	AISLAMIENTO DE SEGURIDAD PARA PARTES ENERGIZADAS	57
9.9.	DISTANCIAS DE SEGURIDAD	58
10.	PROTECCION DE EQUIPOS CONTRA SOBRETENSIONES	59
10.1.	EXPLOSORES EN AIRE:	59
10.2.	PROTECCIÓN IDEAL CONTRA S. T.	59
10.3.	CONVENCIONALES.	60
	<i>Descargadores de explosores planos D.E.P.</i>	60
	<i>Descargadores de explosores activos D.E.A. (de soplado magnético)</i>	60
10.4.	DESCARGADOR DE ÓXIDOS METÁLICOS "DEVOM".	62
10.5.	COMPARACIÓN DE FUNCIONAMIENTO DE DESCARGADORES DEA-DEVOM.....	63
11.	DIMENSIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES.....	65
11.1.	DATOS DEL SISTEMA.	65
11.2.	DATOS DE LA INSTALACIÓN.....	66
11.3.	DATOS DEL DESCARGADOR.....	66
11.4.	VERIFICACIONES DE LA APLICACIÓN.	67
11.4.1.	<i>Corriente de descarga y tensiones residuales.</i>	67
11.4.2.	<i>Energía absorbida por el descargador.</i>	68
11.4.3.	<i>Energía absorbida por sobretensiones de maniobra.</i>	68
11.4.4.	<i>Energía absorbida por sobretensiones Atmosféricas.</i>	68
11.5.	DISEÑO DE LA INSTALACIÓN.....	69
11.5.1.	<i>Distancia de protección</i>	69
11.5.2.	<i>Distancia máxima para la ubicación del descargador</i>	69
11.5.3.	<i>Márgenes de protección.</i>	69
APENDICE	75	
DISEÑO Y COORDIANCION DE AISLAMIENTO	75	



1. Evaluación de las descargas atmosféricas Ref 1

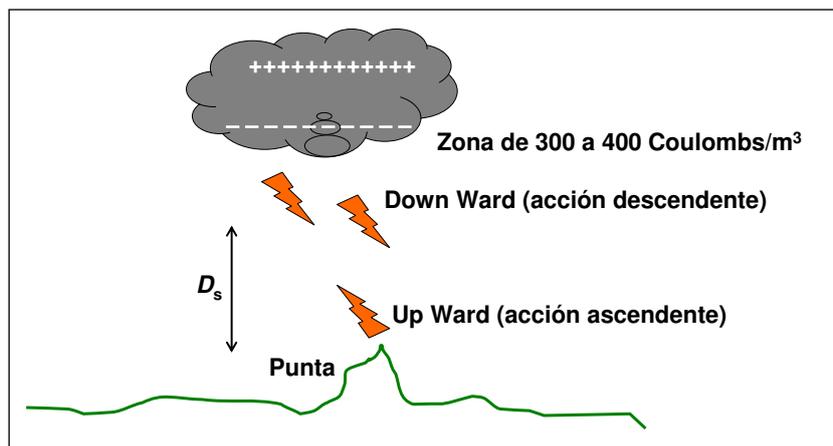
Analizaremos los métodos para la evaluación cuantitativa del efecto de las descargas atmosféricas sobre una instalación eléctrica la cual se quiere proteger, básicamente en la actualidad se reconocen dos metodologías de simulación usadas para modelar el fenómeno de la descarga atmosférica sobre las estructuras, veamos

- Método Electro Geométrico (E.G.), el cual con diversas modificaciones y actualizaciones de distintos autores es bien usado desde hace 20 años.
- El otro método es de reciente aplicación, y es el de la Propagación de Líderes (L.P.) y su aplicación se realiza mediante programas de cálculo.

1.1. Descripción del fenómeno de la descarga atmosférica

Si bien no es necesario profundizar sobre el fenómeno para modelarla, bastará con aceptar que durante las tormentas eléctricas, las cargas se separan en nubes de polaridad opuesta, se verifica que la nube en su parte inferior contiene una alta densidad de carga negativa (30 a 100 Coulomb/m³) y algo similar en la parte superior pero de polaridad opuesta.

Cuando la nube se acerca a otra nube, ó a la tierra, el campo eléctrico llega a valores cercanos a los críticos, donde la aceleración se los electrones libres alcanzan la energía cinética para extraer electrones de los átomos y se entra en una producción en cadena y el fenómeno se reproduce y amplifica hasta que se supera la tensión disruptiva (U_d) y puede aparecer la descarga líder.



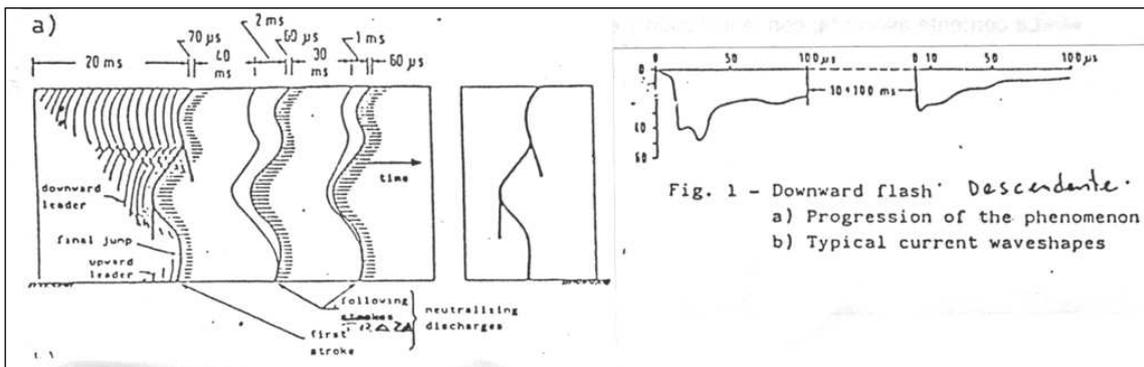
1.2. Descarga de acción descendente

Se desarrolla en la parte inferior de la nube, donde tiene lugar un fuerte incremento del campo eléctrico con la aparición de canales ramificados a tierra.

Estos canales tienen bordes de alta conductibilidad rodeados por cargas de la misma polaridad. El canal o líder progresa en dirección a tierra en una sucesión de pasos cada uno de algunas decenas de metros con pausas de 20 a 50 μ seg. Entre uno y otro. A medida que el líder desciende va disminuyendo poco a poco la carga acumulada en la nube y el campo eléctrico en la tierra aumenta. Por otra parte también en puntos elevados y especialmente en las puntas tiene lugar el efecto corona y esto generará una acción ascendente con líder que, generalmente no es mayor que unas decenas de metros de altura y busca el encuentro con el líder descendente que viene bajando.

Cuando el líder descendente se encuentra con el líder ascendente o con la tierra, si este no se formó, comienza la neutralización de las cargas este proceso viene acompañado con un fuerte incremento de la corriente y un impulso intenso que se desplaza a velocidades del 10 % al 50 % de la velocidad de la luz.

Estas corrientes luminosas sobre el canal, con otras ramificaciones luminiscentes son las partes del rayo visibles al ojo humano.

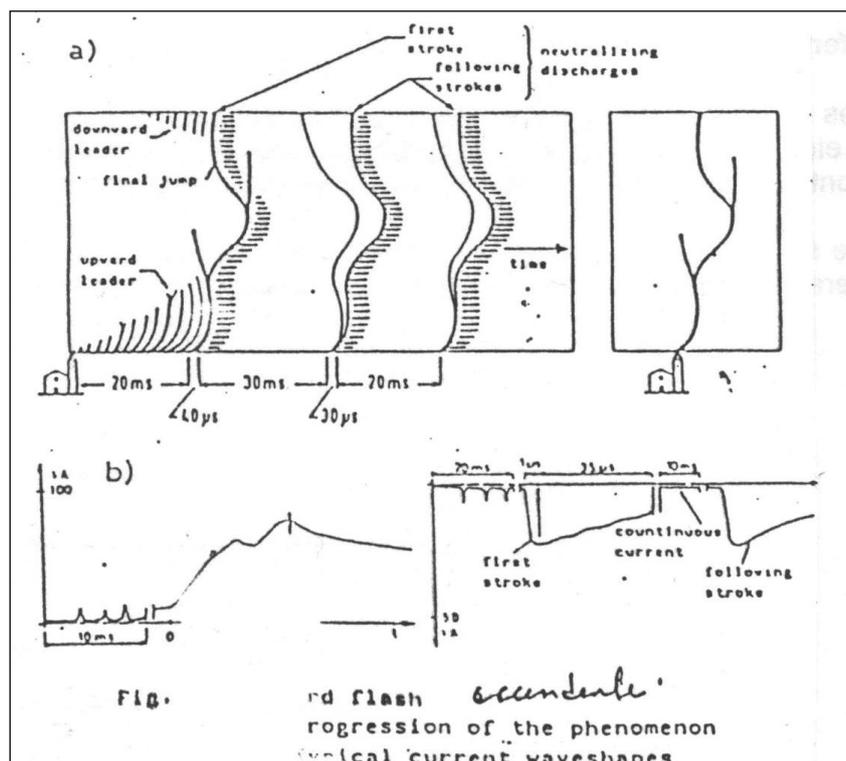


1.3. Descarga de acción ascendente

En estructuras muy altas, especialmente localizadas en las montañas (cima) pueden existir gradientes tales que den lugar a la aparición del efecto corona; los que con el campo eléctrico existente darán lugar a la aparición de líderes de acción ascendente.

Estos canales viajan en acción ascendente a cientos y a veces miles de metros con sus partes cargadas de polaridad opuesta a la nube y se la nube hacia esta. El fenómeno es muy rápido y termina en una fracción de segundo acompañado de una corriente de pocos kA.

El evento viene también acompañado con descargas entre nubes y en este caso la acción del líder ascendente forma parte de la descarga entre la nube cargada y la tierra, a partir de esto tiene lugar la neutralización de las cargas con la misma intensidad de corriente que encontramos en las descargas de acción descendente.



1.4. Flash multi-chispa

Los rayos que se ven con el ojo humano, aparecen como un cuerpo luminoso. El hecho real es que está compuesto por muchos pulsos de luces asociados, que son los llamados "strokes" (trazas) y están asociados a las corrientes de neutralización. El primer impulso de corriente está seguido de otro subsiguiente, separado por un intervalo de tiempo del orden de los 10 a 20 μseg y se mueven en la misma traza que el primero.

Como tope superior tiene lugar un número de 10 a 20 trazas aunque usualmente son 2 o 3 el número de trazas probable.



Estos impulsos de corriente de neutralización pueden o no ser seguidos de corriente de poca magnitud (cientos de Amp.) y el evento finaliza en decenas de μseg



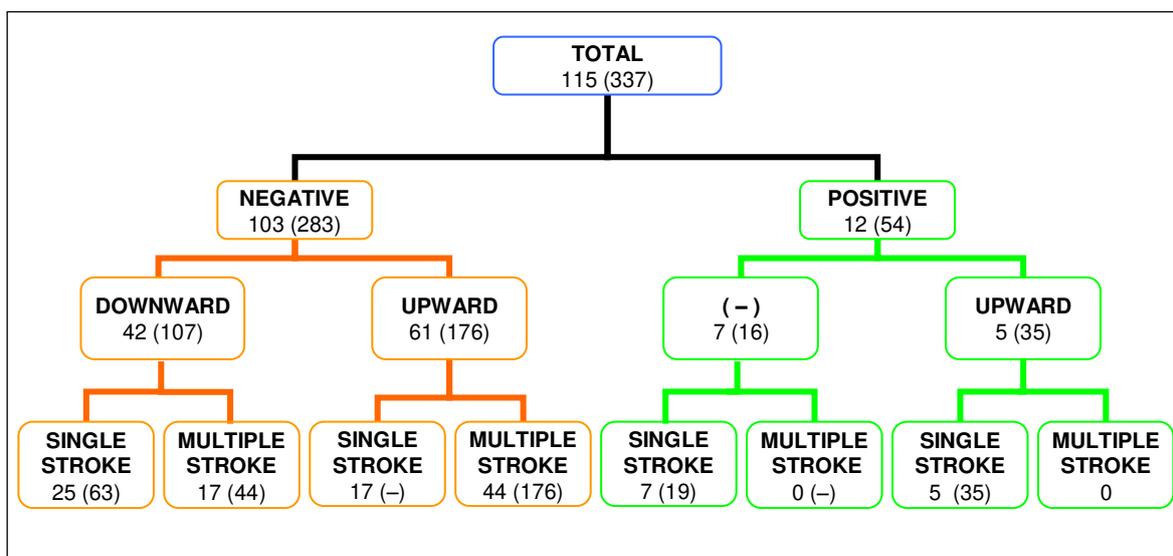
2. Estadística experimental Ref 2

2.1. Tipos de descargas

Esta estadística se realiza mediante estaciones de medición que se instalaron al efecto para lograr la parametrización del fenómeno y en general tiene en cuenta criterios que permiten la clasificación dentro de lo siguiente:

- **La corriente asociada:** con la inclusión y el desarrollo de los canales de acción ascendente.
- **La corriente impulso:** por la neutralización de carga asociada al canal de acción ascendente
- **La corriente continua:** vinculada a la neutralización ó redistribución de la carga en la nube.

a) Subdivisión de las descargas observadas



b) Valores medido y relevantes de la desviación estándar de los parámetros de los rayos

Parámetros	Rayos descendentes negativos				Rayos ascendentes positivos	
	Primer rayo		Rayo seguidor		n	$x_{med} \times s \times \log x$
	n	$x_{med} \times s \times \log x$	n	$x_{med} \times s \times \log x$		
I (kA)	143	34 (0.247)	168	13.34 (0.246)	40	43 (0.409)
T_{er} (μseg)			146	1.2 (0.376)	28	33 (0.599)
$\frac{di}{dt}$ (kA/μseg)	125	14 (0.262)	149	39 (0.258)	26	2.6 (0.597)
T_{hv} (μseg)	119	73 (0.262)	132	31 (0.3929)	20	300 (0.404)
$\int i \cdot dt$ (A·seg)	118	4.4 (0.378)	135	1 (0.365)	39	74 (0.452)
$\int i^2 \cdot dt \times 10^3$ (A·seg) ²	118	53 (0.553)	106	7.2 (0.578)	39	780 (0.772)

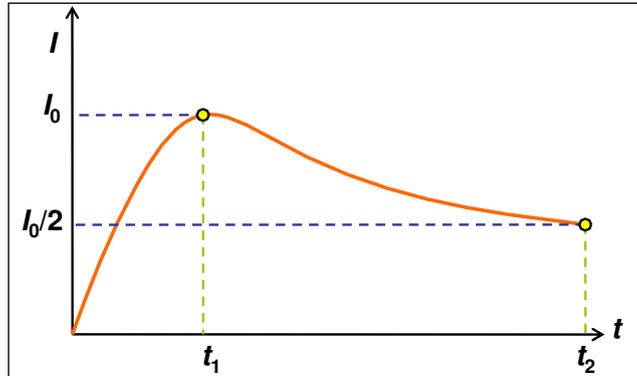
2.2. Magnitudes registradas

Los ensayos de campo realizados, han revelado que la característica “Magnitud - Tiempo” de los rayos, responde a la forma de onda tipo doble exponencial con los siguientes valores promedios y formas.

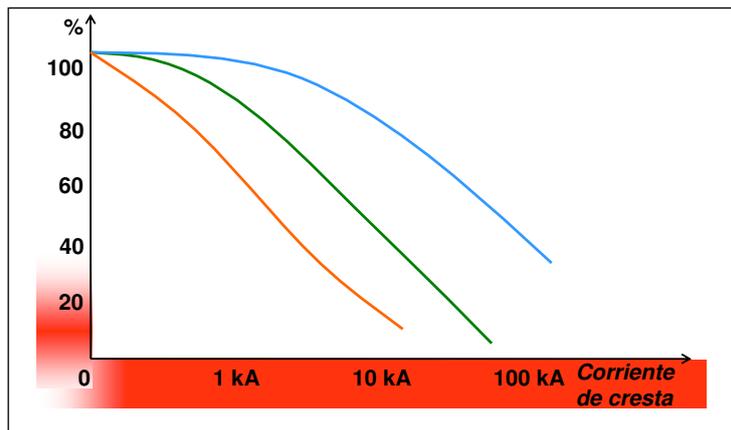
Valores característicos de los rayos descendentes



VALOR DE CRESTA	MEDIO	MAXIMO	
		14 kA	21 kA
t_1 = Tiempo de frente	1 microsegundo	10 microsegundos	
t_2 = tiempo de cola	10 microsegundos	100 microsegundos	
CARGA	Q (+)	50	100
	Q (-)	15	160



Vemos en la gráfica estadística de frecuencia de aparición de rayos según su intensidad, la probabilidad de que un rayo superior a 10 kA atraviese un descargador de este valor es menor del 10 %, lo cual justifica el empleo general de descargadores de 10 kA de corriente nominal.



Se puede realizar una estadística sobre los rayos ascendentes:

Valor de cresta de la corriente I_c [A]	10	1000
Duración hasta el valor medio t_2	10 μ seg	100 μ seg
Carga Q [Coulomb]	100	300

2.3. Cartas isoceraúnicas [iso (igual) - ceraunos (rayo)]

Dado que el número de rayos que caen por unidad de superficie (km^2) es función directa del número de días de tormenta, se toma una unidad de tiempo, mes o año, y se observa que estos valores varían según el lugar y la época del año.

Si se toma el número anual de días de tormenta [T_d] se pueden graficar en un mapa las líneas que engloban zonas de igual nivel.

Existen varias maneras de vincular los días de tormenta con el número de descargas a tierra [N_g], esto se verá con más detalles cuando se estudien los "modelos", pero una buena aproximación se obtiene con las siguientes expresiones:

$$[N_g] = 0.2 \times T_d \quad \text{según IRAM 1024/93} \quad [N_g] = 0,04 \times T_d^{1,25}$$

- T_d : número de días de tormenta, nivel isoceraunico.
- N_g : número de rayos por año por km^2



Otros valores son los siguientes:

$$Ng = 0,023 \times Td^{1,3} \text{ Esta es la usada por IEC 60071}$$

$$Ng = 0,004 \times Td^{1,35}$$

$$Ng = 0,006 \times Td^{1,55}$$

Debido a que las descargas por rayos a tierra son vectorizadas por la inducción electrostática, para su evaluación estadística es conveniente tener en cuenta las características geológicas y morfológicas del terreno y su superficie.

La resistividad del terreno tiene influencia en parámetros que van desde la intensidad, cantidad y forma de onda del choque, ya que se puede asimilar la situación a la descarga de un capacitor sobre una resistencia. También tiene influencia en la ubicación del canal de descarga. Por ej.: los terrenos rocosos y su dificultad para formar el canal ionizado.

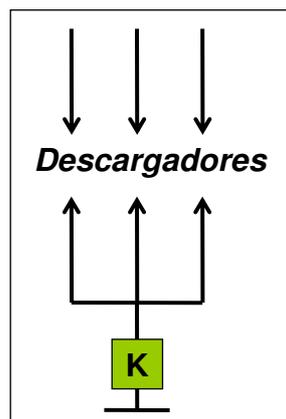
2.4. Detección y registro

La ocurrencia de descargas, puede ser detectada mediante diversos dispositivos que trabajan por acción directa de la corriente del rayo o a la distancia mediante la detección de la onda electromagnética emitida por la descarga.

- **CLINDONÓGRAFO:**

Este dispositivo funciona en base a la corriente de descarga, la cual se hace pasar a través de un papel, el cual se deteriora en función del paso de la corriente a mayor superficie mayor corriente.

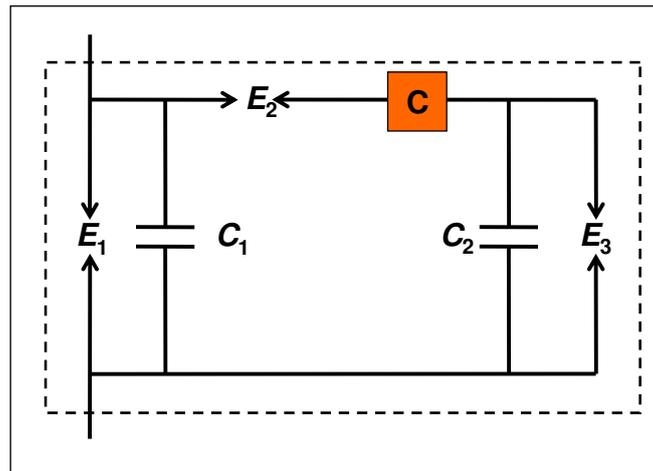
Instalación del clindonógrafo:



- **CONTADORES DE DESCARGA:**

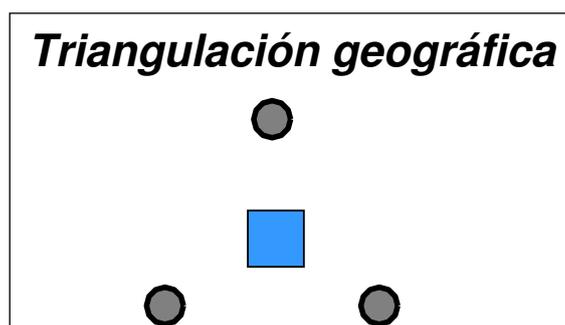
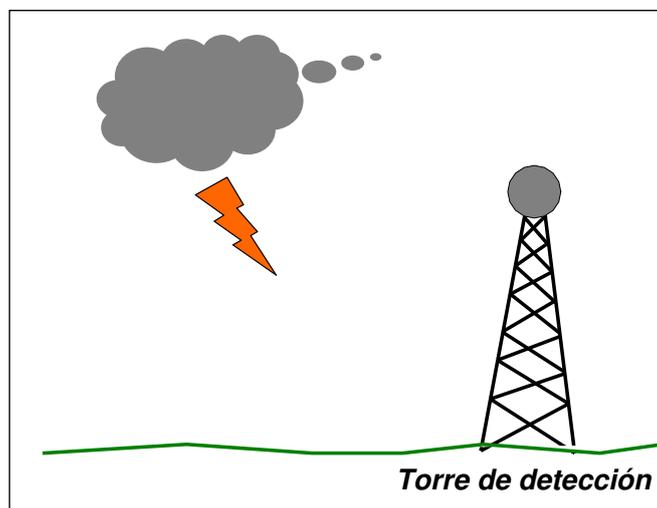
Se instala en forma similar al clindonógrafo, y su esquema eléctrico es el de la siguiente figura, donde:

- C: contador numérico
- E₁, E₂ y E₃: Explosores
- C₁ y C₂: capacitores



• EQUIPOS PARA DETECCIÓN A DISTANCIA:

Mediante antenas y dispositivos muy sensibles de detección se pueden registrar la ocurrencia de descargas y su intensidad y luego mediante triangulación obtener su localización.

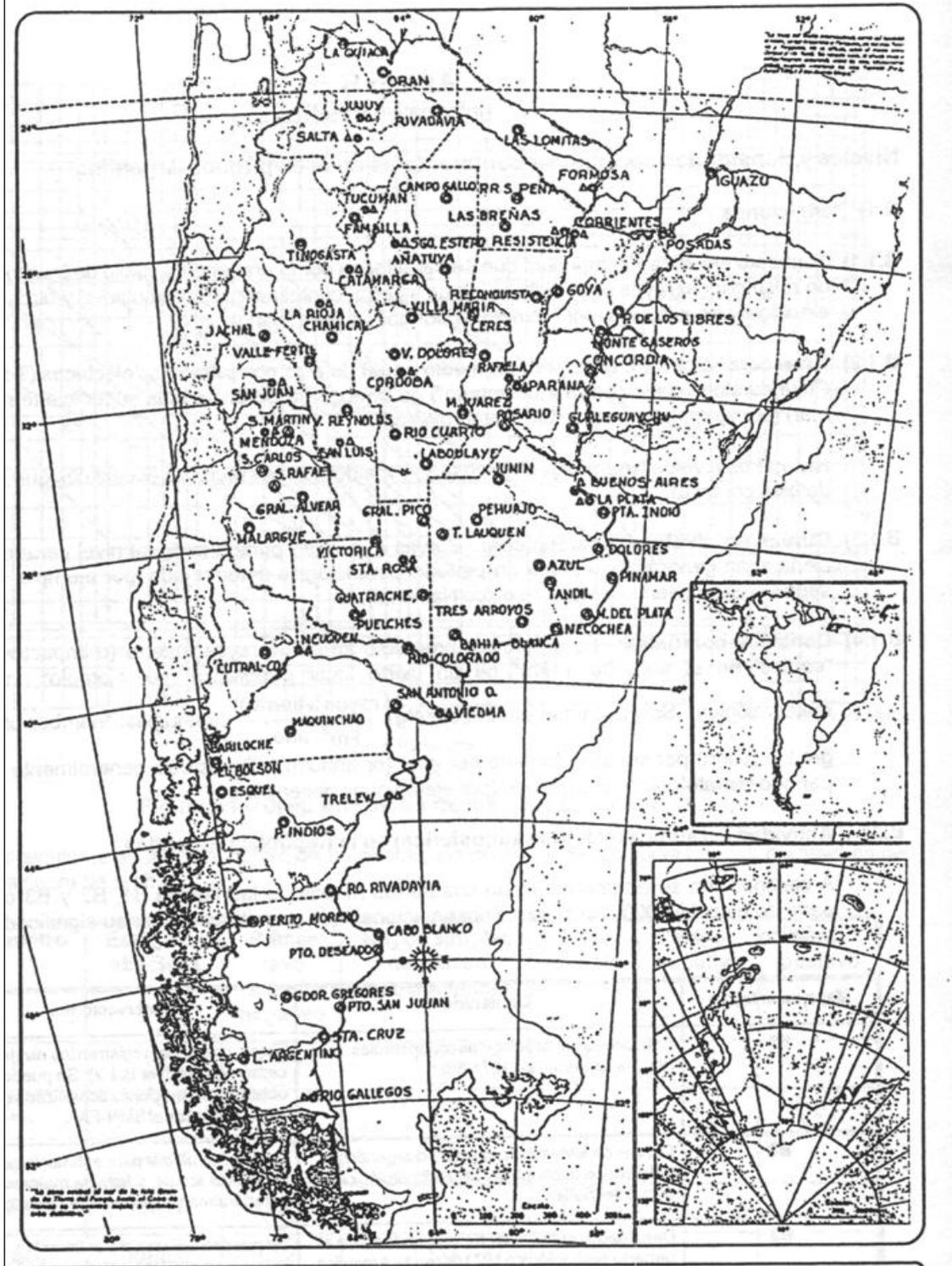


2.5. Curvas de nivel isoceraunico

Por medio de Estaciones de Registro (1er mapa) tenemos las curvas de nivel que delimitan zonas de igual número de días de tormenta por año [T_d] (2do mapa) y finalmente vemos en el 3er mapa a [N_g], número de descargas por km²/año.

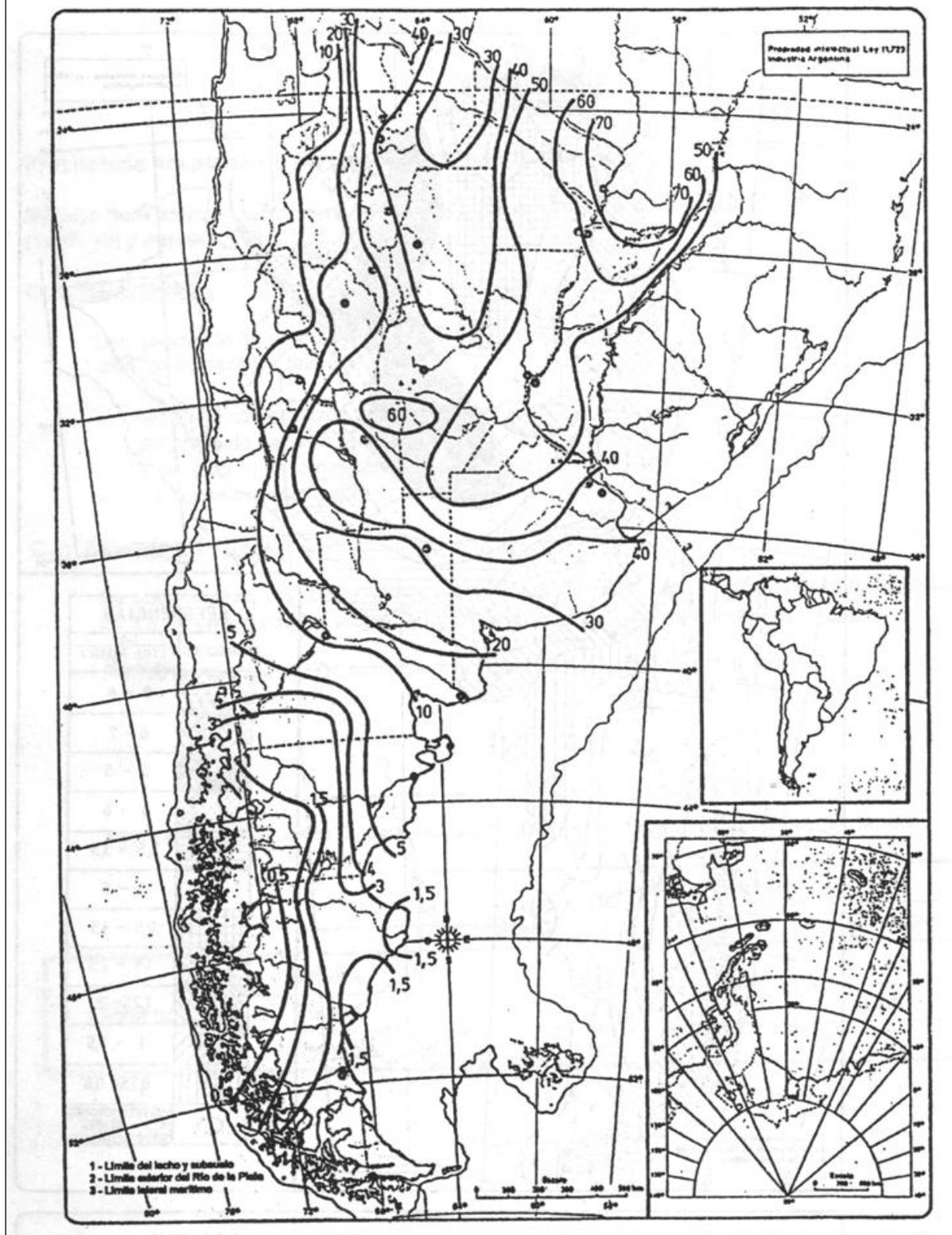


IRAM 2184-1-1:1997



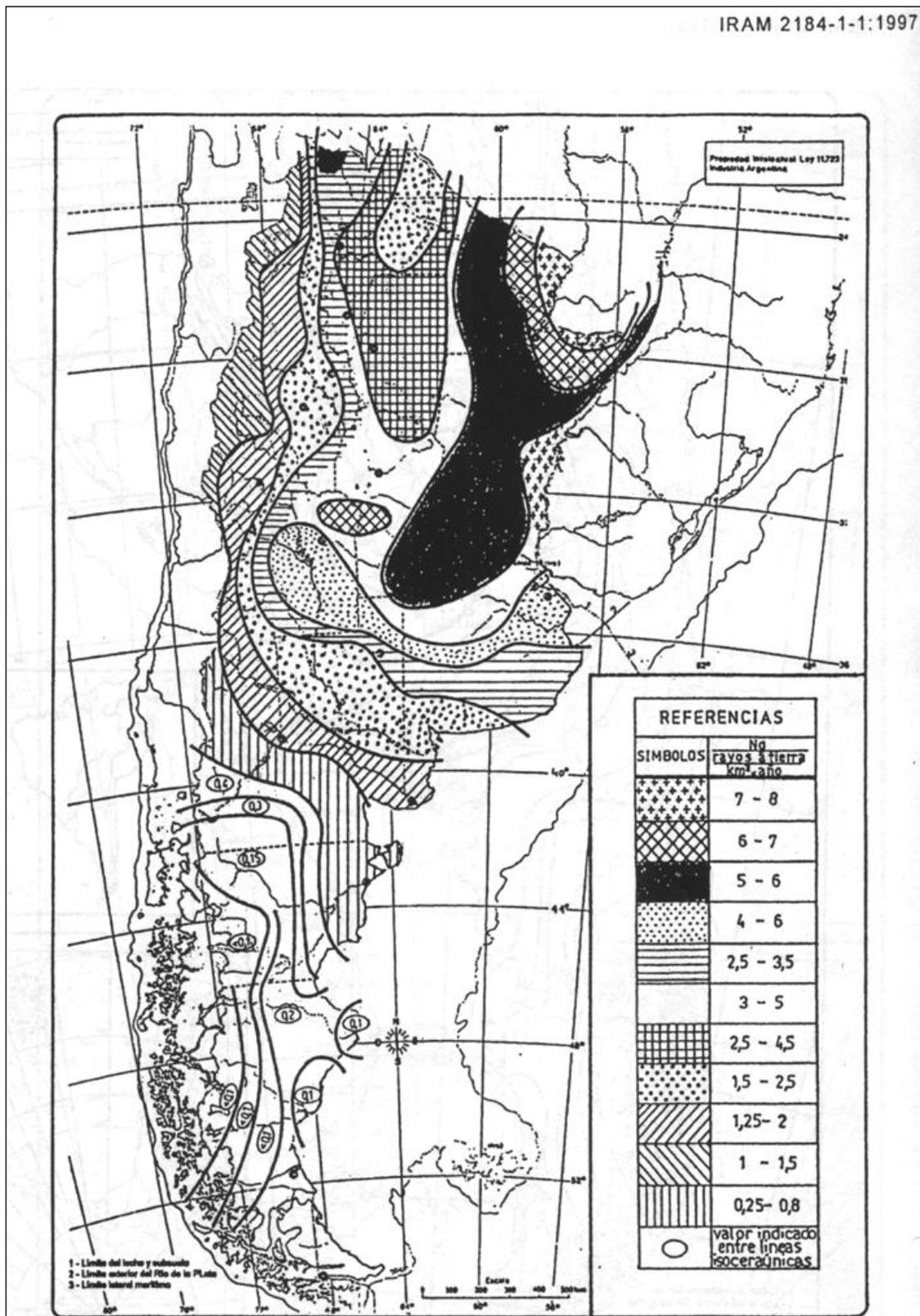


IRAM 2184-1-1:1997





IRAM 2184-1-1:1997



3. Parámetros para el modelado de la descarga atmosférica Ref 3

Si bien no hay un modelo definitivo para simular el salto final del rayo, se puede aceptar un mecanismo de impacto basado en ciertas bases físicas simplificadas.

- La acción descendente esta representada por un segmento de carga Q
- Distancia del salto final: D_s , definida entre C_p y P .
- Una distancia dieléctrica vertical (G.A.P.) de 10 m, se tiene en el frente de la acción descendente para simular la zona de ramificaciones (*strimers*).

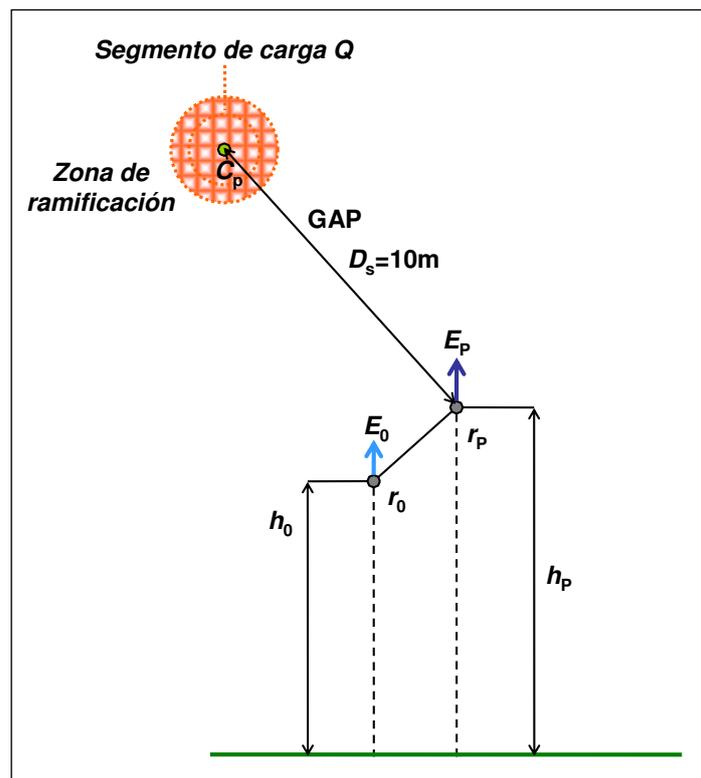
La carga en el líder descendente Q es acumulada tal que el voltaje en C_p sea igual al esfuerzo del aire $E = 500$ kV/m por la distancia D_s

$$U_{cp} = E \times D_s$$

- El terminal aéreo es representado por una geometría de radio r_p ubicado a una altura h_p .
- El radio del elemento protegido es r_o ubicada a una h_o .

Los valores a considerar de r_p y r_o deben ser tenidos en cuenta en función de la aparición del efecto corona según y los valores críticos se para geometría cilíndrica o esférica:

- $r = 0.36$ m para electrodos esféricos $Q = - 100$ μ coulomb/m Descendente
- $r = 0.10$ m para electrodos cilíndricos $Q = + 50$ μ coulomb/m Ascendente



- **Modelo físico simplificado de salto final**

Una referencia del valor las intensidades de las descargas, se puede obtener ; no como valor absoluto , si no en base a la relación entre los valores de campo eléctrico del terminal aéreo E_p (hilo de guardia) y el objeto protegido E_o (conductor), permitiendo fijar una relación que permite la evaluación de la efectividad del blindaje.

- **Relación de protección**

Es la relación entre los campos eléctricos inducidos por la carga que se acerca. Se vinculan con la formula:



$$\frac{E_o}{E_p}$$

Un razonable margen de seguridad en ciertas instalaciones puede ser: 0,8.

3.1. Distancia de salto final [D_s](Ataque del Rayo)

Según el modelo electrogeométrico de aplicación en líneas de transporte de energía eléctrica se han determinado y asimilado a valores experimentales para modelaciones de esta magnitud.

Hay modelos más recientes para vincular D_s con el valor de pico de la corriente I presentado por diferentes autores y en general son de la forma

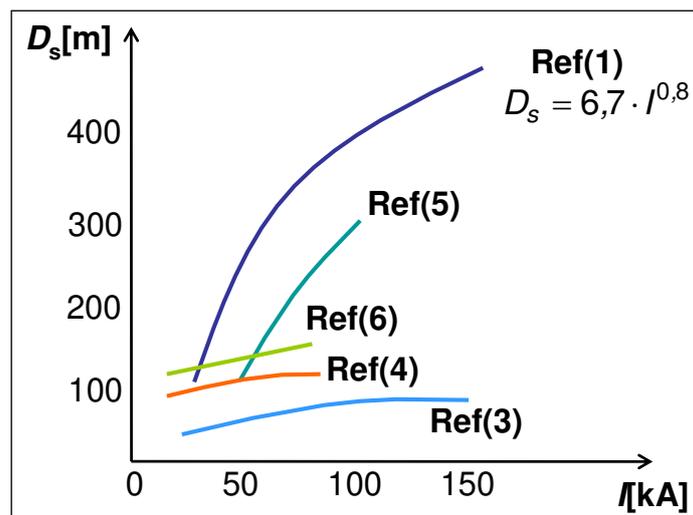
$$D_s = A \times I^B$$

Donde A y B son constantes que cada autor determina según su experiencia.

Una expresión muy usual es:

$$D_s = 6.7 \times I^{0.8} \text{ Ref. (1)}$$

Esto permite presentar una familia de curvas de D_s en función de la corriente de pico del rayo I , según distintos especialistas e institutos



3.2. Valor de la corriente de rayo

Es un valor estocástico al que se le puede asignar una función *log normal*. Es bastante diferente si se tiene en cuenta la polaridad ya que el 90% es negativo y el 10% positivo.

Un valor aceptable es: $I = 30 \text{ kA}$

Con desvío standard: $\sigma_{\log I} = 0,32$





4. Diseño de Protección Contra Descargas Atmosféricas

4.1. Criterios para la evaluación del riesgo *Ref 3*

Un criterio para el diseño del sistema de protección debe ser modelado en base a las siguientes parámetros y en algunos casos a la combinación de varios. Los puntos básicos para tener un criterio de protección estandarizado deben ser encontrados a partir de:

- **La experiencia histórica:**

El historial, junto a un sistema de protección estandarizado nos dará la garantía de un suficiente grado de seguridad y confiabilidad en la operación del sistema eléctrico.

- **Frecuencia de falla:**

La protección será diseñada para garantizar que la frecuencia de falla esperada, en la zona protegida, no sea mayor que un valor fijado previamente por el comitente, la empresa prestataria del servicio o el Ente Regulador.

- **Análisis técnico económico:**

El diseño deberá obedecer a una solución técnico-económica. El costo de protección versus salidas de servicio. La adopción del criterio necesita del conocimiento de las estadísticas de fallas, de los rayos sobre las estructuras, con protección o sin estas y de los riesgos que corren las personas y los equipos que están dentro de las instalaciones.

4.2. Elementos cuantitativos para la evaluación del riesgo

El riesgo de falla es función de los siguientes parámetros para evaluar la probabilidad de los rayos que producirán fallas:

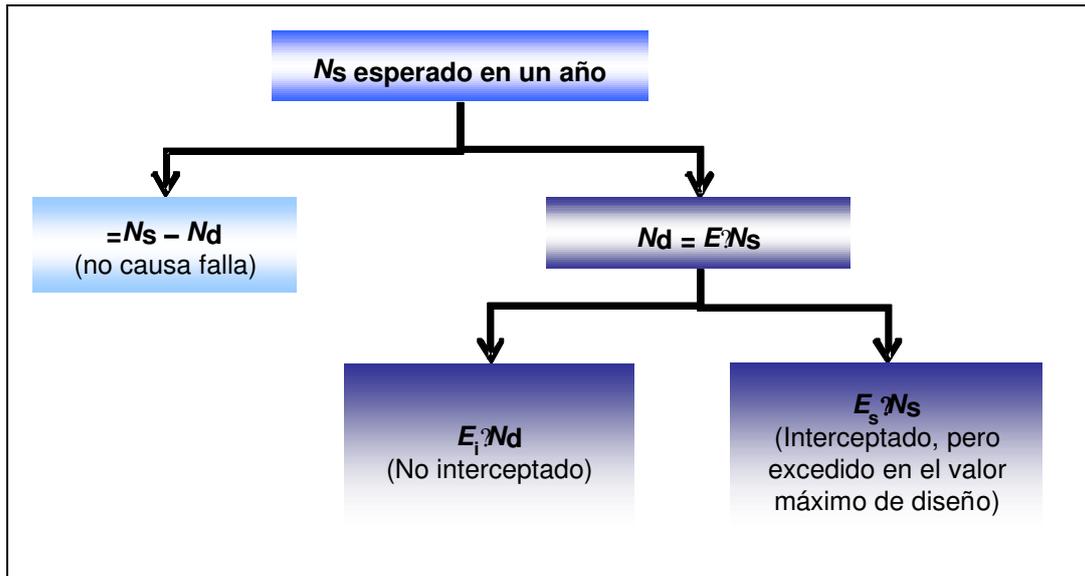
- N_s (**probabilidad de rayo**): es el número de rayos que pueden impactar en la estructura de la instalación considerada (línea o estación) en un año.

$$N_s = A_{eq} \times N_g \quad (A_{eq}: \text{Área equivalente de la instalación o de influencia})$$

- E (**Eficiencia del sistema de protección**): es la relación entre la expectativa anual de rayos que causarían fallas N_d (número de desconexiones) y la probabilidad de rayo N_s , está caracterizado por dos parámetros; E_i , eficacia de la intercepción y E_s , medida de la eficacia.
- E_i (**eficacia de la intercepción**): es la relación entre el número de rayos que se espera no interceptar y la probabilidad de rayo N_d sobre las estructuras e hilos de guardia.
- E_s (**medida de la eficacia**): es la relación entre el número de rayos que se espera no interceptar, por que se exceden de la medida esperada y la probabilidad de rayo N_d que produce falla.

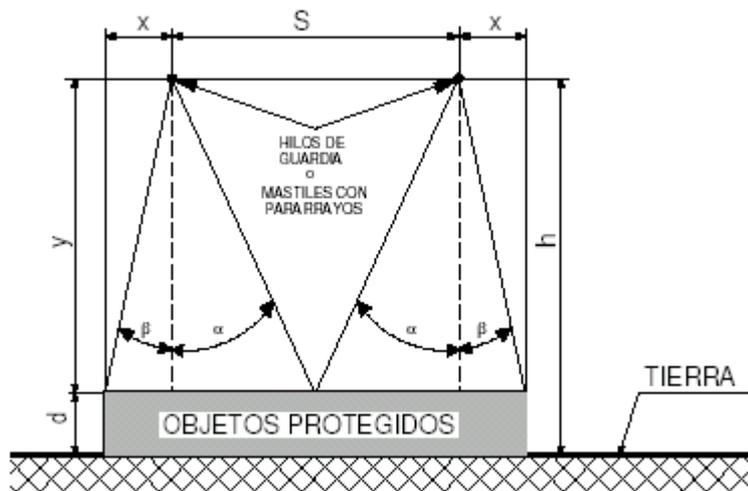
4.3. Esquema de criterio básico

- E_i : está relacionado con el valor mínimo de la corriente de rayo.
- E_s : está relacionado con el valor máximo de la corriente de rayo.
- N_d número de desconexiones o fallas producidas por rayos.



4.4. Métodos empíricos para el diseño de la Protección

Método de ángulos fijos para Pararrayos e hilos de guardia



Los Angulos utilizados son: $\alpha = 25^\circ$ $\beta = 45^\circ$ o 30°

Método de Langhrer

Método llamado de curvas fijas es utilizado para los casos de tener que realizar un análisis para uno o dos hilos de guardias o pararrayos instalados a distintas alturas y se adoptan los siguientes criterios.

Cuando son dos pararrayos o hilos de guardia hay dos criterio para diseñar el conjunto

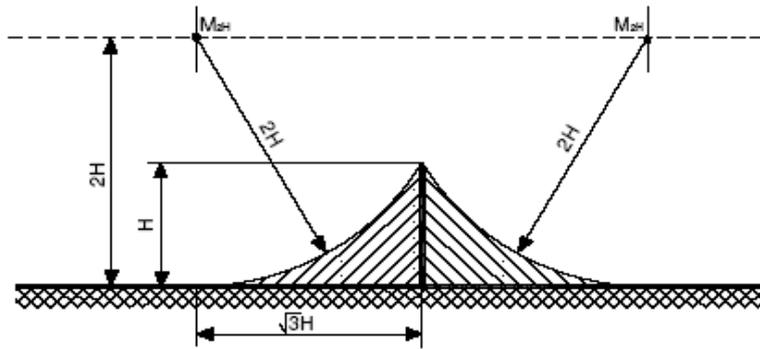
Considerar que el pararrayo de menor altura es el que es el que se toma como base para el diseño de ambos

Considerar que ambos actúan independientemente

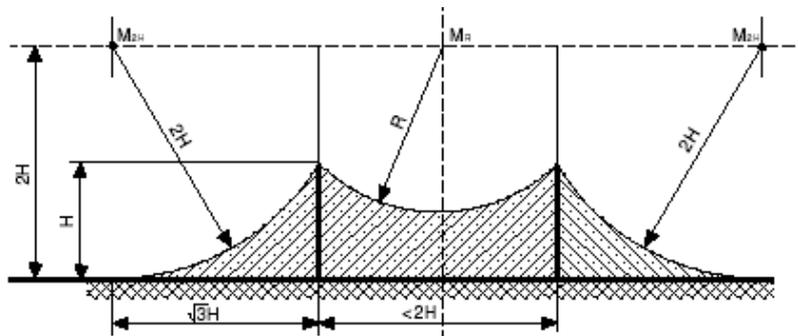
Para obtener una guía de aplicación de este método y el análisis de su tasa de fallas ver la Norma IEEE-998 (1996)

Presentaremos los esquemas básicos para los distintos casos.

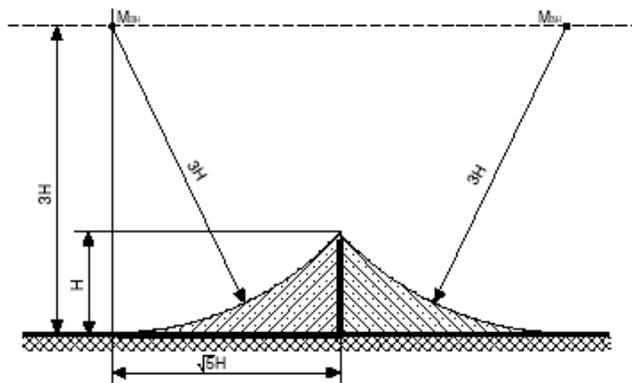
Esquema para un hilo de guardia



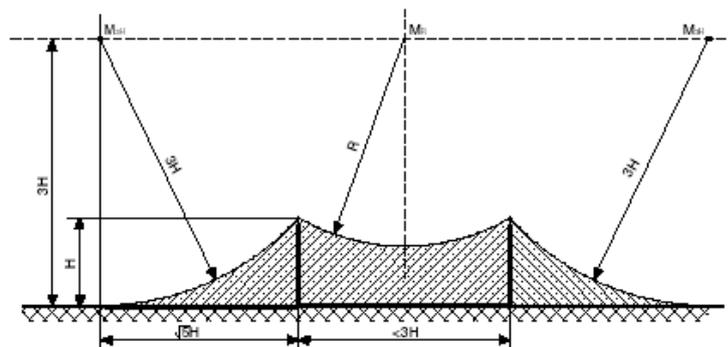
Esquema para dos hilos de guardia



Esquema para dos pararrayos



Esquema para dos pararrayos



4.5. Método con el modelo Electrogeométrico [E.G.]

El modelo *E.G.* no considera especificidades del punto de vista orográfico, por lo tanto las comparaciones con otros métodos deberán hacerse para la condición de terreno llano.

El esquema general del modelo *E.G.* considera el fenómeno teniendo en cuenta solo el canal descendente de carga:

$$q = k \cdot I^n$$

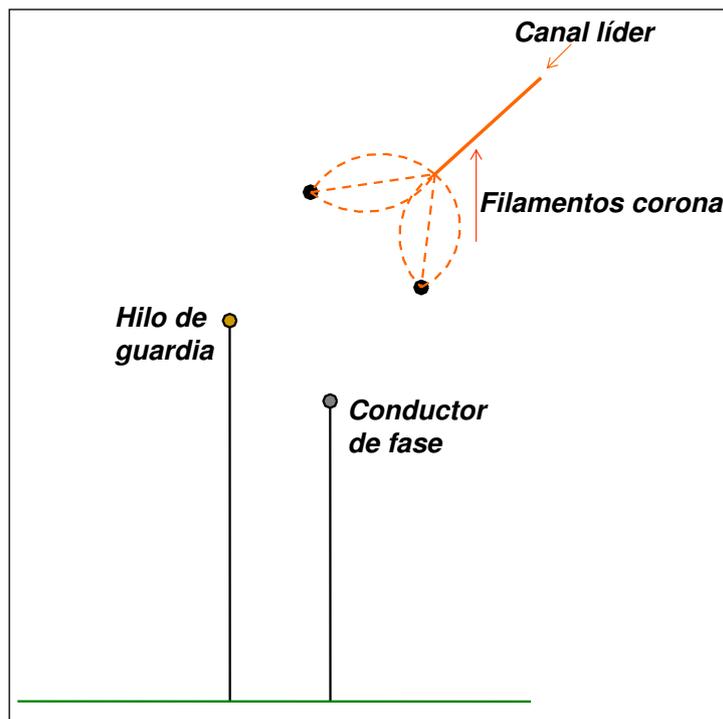
a) GILMAN-WHITEHEAD

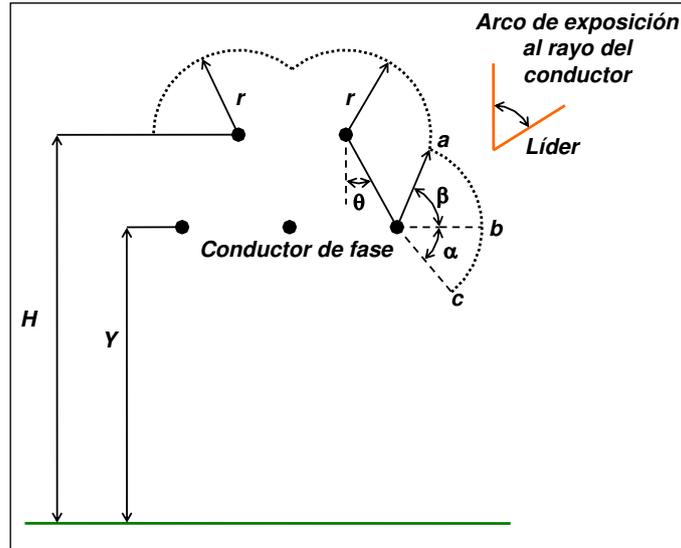
Esta versión considera que la llamarada se aproxima a la línea desde diferentes direcciones y permite definir una exposición al arco que es función de la geometría de la línea.

Una efectiva protección (S_{fw1}) es también definido como una protección equivalente que da la actual exposición en la hipótesis del rayo cayendo verticalmente. Las figuras 5-6-7-8, hacen referencia al comportamiento de la corriente de rayo para distintos casos.

b) J. ANDERSON

Esta versión simplificada solo define un blindaje [S_{fw1}] para un rayo vertical y la exposición esta vinculada a la proyección horizontal de la exposición al rayo.





Longitud del canal descendente formula general:

$$L_{sd} = A \times I^W$$

- $L_{sd} = D_s$
- A y W : se obtiene de tablas

La composición geométrica se realiza a partir fórmulas reconocidas por laboratorios de prestigio veamos las conocidas:

$$E.N.E.L \ D_s = 6,7 \times I_C^{0,8}$$

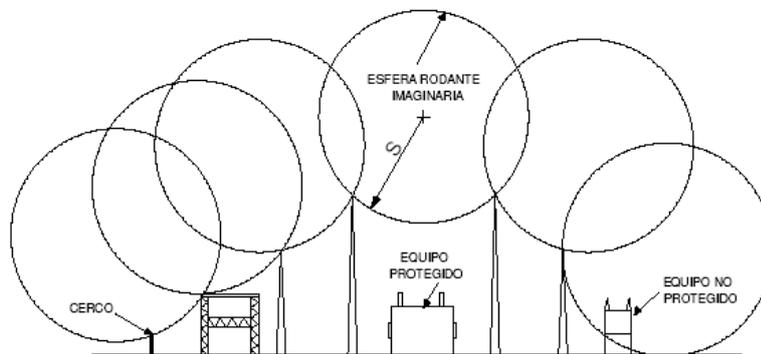
$$I.E.E.E. \ r_c = 9,4 \times I_C^{2/3}$$

- I_c : corriente crítica considerada

Las fórmulas vistas se pueden usar para vincular el radio de protección y la corriente crítica con la cual se diseña el blindaje.

Aplicación del método electrogeométrico con esfera rodante

Este método requiere que se haga rodar una esfera de radio S sobre la superficie a proteger, el cálculo de el valor de S está en la Norma IEEE 998 veamos



La crítica I_s se calcula



$$I_s = \frac{1.1BIL}{Z_s/2}$$

BIL Nivel Básico al Impulso Atmosférico de la cadena de aisladores

I_s Corriente de impacto de rayo permisible (kA).

Z_s Impedancia de onda del conductor por el que pasa la corriente del rayo (Ω)

Nota La división por 2 es para el caso en que estamos en el medio de la línea, no se realiza si estamos en un extremo, o frente a un cambio importante en la impedancia de onda

Los valores de $i < I_s$ si penetran al sistema protegido no producirán cebado de la cadena

La impedancia de onda del conductor Z_s se calcula:

$$Z_s = 60 \sqrt{\ln\left(\frac{2h}{R_c}\right) \ln\left(\frac{2h}{r}\right)}$$

h Altura media del conductor (m).

R_c Radio corona del conductor (m).

r Radio metálico del conductor (m).

Cálculo de R_c Radio corona del conductor:

$$R_c \ln\left(\frac{2h}{R_c}\right) - \frac{V_c}{E_0} = 0$$

V_c Tensión del aislador para onda de impulso negativo de 6 μs de frente en kV Puede usarse el BIL del aislador .

E_0 Campo eléctrico limite de corona se toma 1500 kV/m

Finalmente La distancia de impacto S se calcula como:

$$S = 8kI_s^{0.65}$$

Donde k depende de la forma del electrodo aéreo :

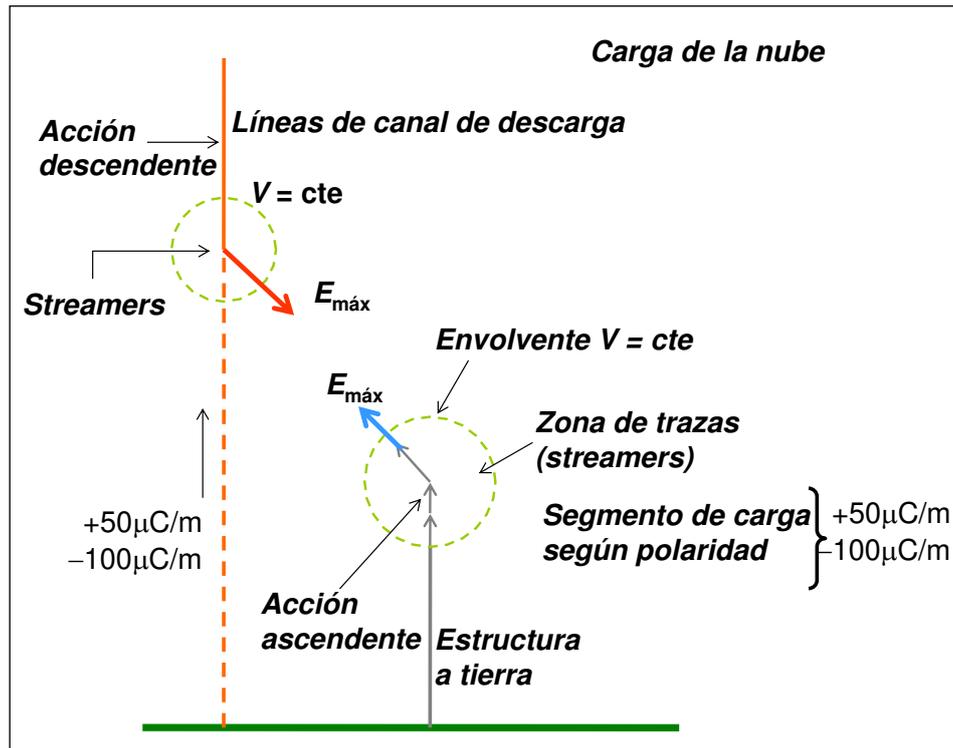
Para rayos de punta $k = 1,2$

Hilos de Guardia $k = 1$

4.6. Modelo LEADER PROGRESSION; [L.P.] Ref 7

El modelo que se ha desarrollado para la evaluación de las fallas de blindaje en líneas aéreas está basado en el uso de modelos matemático basados en el conocimiento de elementos teóricos ya descriptos por lo tanto pasaremos a su descripción.

El modelo matemático trabaja simulando una serie de sucesivos avances cuyos sucesivos desplazamientos, simulan los recorridos más probables de la evolución que va produciendo el rayo. La evolución se hace teniendo en cuenta lo que pasa en la parte superior de la nube como los sucesos que tienen lugar a nivel del suelo, en los bordes superiores expuestos de la instalación, estructuras torres e hilos de guardia.



Esquema descriptivo de la simulación.

Los canales descendentes y luego el ascendente avanzan de a tramos; en trazas que van modificando su dirección, de esta manera, en función de los parámetros tales como;

- Carga líder ascendente $+50 \mu\text{C/m}$ ó Carga líder descendente $-100 \mu\text{C/m}$
- Velocidad de retorno $v = 0,156 \times c$ a $0,2 \times c$ donde c : velocidad de la luz
- Probabilidad de carga Q : Carga probable del canal negativo

Ejemplo:

$$q = 38 \times I^{0,68} [\mu\text{C/m}\cdot\text{kA}]$$

Pueden experimentarse otros valores dado que el fenómeno es extremadamente complejo.

Para la simulación de la extensión de la zona de chispa se puede tomar un gradiente de campo eléctrico de 2 - 4 kV/mm.

En la simulación, el algoritmo va modificando la posición del canal inicial de descarga respecto a la estructura en una serie sucesiva de trazas que configura su trayectoria.

Es posible determinar para un valor de corriente dado la distancia máxima $L.D.$ y cual es la parte de la corriente no interceptada que accede al conductor.

De manera análoga se puede determinar zonas (travesaños) de la nube, en la que la carga puede llegar al conductor de energía evitando el hilo de guardia. La denominamos $[S_{fw}]$ (*sheldin failure width* ó **Falla de Blindaje**).

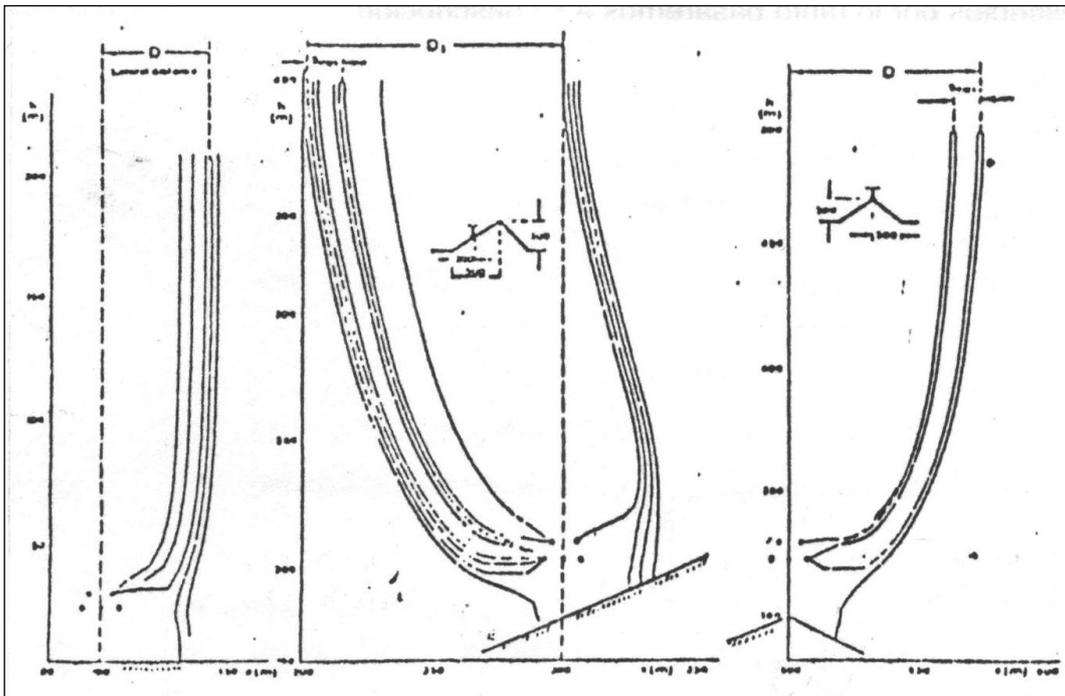
Para el tratamiento teórico se usa la fórmula [5-2] con sus criterios de aplicación.

Resultado del Modelo

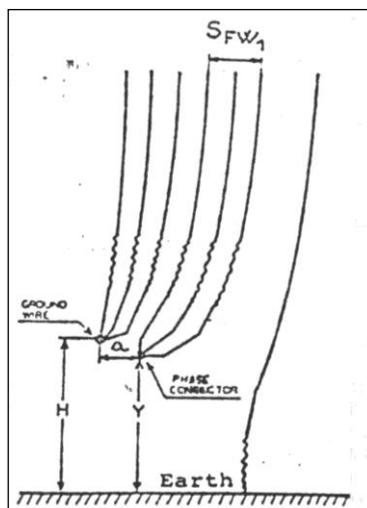
Mediante programas de cálculo se pueden obtener, para un valor de corriente crítica dada y una configuración determinada, una familia de curvas, que responden a cada una de las distancias laterales ($L.D.$) tomadas para este caso, para tres situaciones orográficas distintas pudiéndose observar la parte del cielo $[S_{fw}]$ cuyas descargas alcanzan el conductor figura 1.

También se pueden presentar la distancia lateral como función de la corriente de rayo, para diferentes alturas sobre el terreno, tanto para conductores horizontales y verticales, como para estructuras en terreno horizontal

Estos resultados pueden ser aplicados ambos, para determinar la exposición al rayo. Este número de descargas es el que impactará a la línea ó a la estructura y para el diseño de la protección contra rayos. También se puede usar un programa de cálculo que se aplicará en cada caso en particular.



Ejemplo del cálculo computado de un líder en una línea de 420 kV en diferentes condiciones ortográficas



Comparación de Modelos Ref 4

Sobre dos modelos tipos para la evaluación de las fallas de blindaje podemos ver:

- **Modelo ELECTROGEOMETRICO [E.G]:** conocido y modificado por varios autores durante los últimos 30 años.
- **Modelo LEADER PROPAGACION [L.P.]:** desarrollado en los últimos 10 años sobre la base de la simulación de la propagación de líderes ascendentes y descendentes

FENOMENO CONSIDERADO	HIPOTESIS DE MODELACION	
		E.G.



Líder descendente	Relación carga líder Q: corriente de descarg	No se considera	$q = k \times I^n$
Líder descendente	Velocidad	No se considera	De importancia sólo con líder ascendente
Líder descendente	Ángulo de aproximación	$P = k_n \times \cos \theta$	Depende del esfuerzo del campo
Líder descendente	Longitud de salto L_{sd} o D_s	$L_{sd} = A \times I^W$	Evaluado en función del esfuerzo de campo en frente del líder
Líder ascendente	Principio o inicio	No se considera	Cuando el gradiente de los electrodos llega a valor crítico
Líder ascendente	Relación: Carga-líder corriente	No se considera	Carga líder constante independiente de la corriente
Líder ascendente	Velocidad	No se considera	Relación de velocidad Down/up $\frac{1}{4}$ a 1
Líder ascendente	Longitud de salto L_{su}	No se considera	Según esfuerzo de campo y distribución de frente
Nubes	Carga	No se considera	Función de la corriente
Salto final	longitud	L_{sd}	$L_{sd} + L_{su}$
Orografía	Llanura lateral de cerro Cima de cerro	Empírico	Modelado en calculo
Punto Impacto		Encuentro por el descendente	1. por el descendente 2. por el ascendente
Evaluación de la falla de blindaje		Por exposición al arco cuya descarga llega al conductor	Determinación del S_{fw} cuya descarga llega al conductor

Criterio general para protección de líneas de EAT Ref 7 y 8

En líneas de transmisión se usa el parámetro S_{fw} (Shielding failure with) falla de blindaje puede evaluarse con la distribución de probabilidad de las diferentes corrientes de rayo y teniendo en cuenta la longitud de la línea con el número de rayos.

Para cada modelo la relación de falla de blindaje para 1 (uno) conductor es evaluada por la ecuación:

$$N_1 = N_g \cdot L \cdot \int_0^{\infty} S_{fw1}(i) \cdot P(i) \cdot di$$

- L : longitud de la línea
- N_g : densidad de rayo a tierra (4 R/km² año)
- $S_{fw1}(i)$: falla de blindaje para un conductor en función de la corriente de rayo
- $P(i)$: probabilidad estadística de la distribución de la corriente de rayo

Para la comparación se propone un parámetro adicional que es:

$$N_{sf1} = N_g \cdot L \cdot \int_0^{\infty} S_{fw1}(i) \cdot P(i) \cdot di.$$

- N_{sf1} : número de fallas de blindaje que llegan al conductor con un valor de corriente superior a valor I .

Se hace notar que $N_{sf1} = N_{t1}$ número total de aperturas (1 conductor); cuando el valor de $I = I_c$ definido para la línea como corriente crítica del impacto del rayo.

$$I_c = \frac{U_{I1}}{Z_c / 2}$$

- U_{I1} : **B.I.L.** Nivel Básico de Aislamiento (capacidad de la línea para soportar impulso atmosférico)
- Z_c : Impedancia de línea del conductor
- I_c : Corriente crítica es la que produce flambéo

Si se consideran el total de los conductores se pueden obtener el "Total de fallas" ó "aperturas de la línea": $N_t = N_{sf}$

Considerar las corrientes con siguientes valores típicos $I = 30$ kA $\sigma_{logf} = 0,32$

Otras propuestas $I = 14,5$ kA $\sigma_{logf} = 0,43$

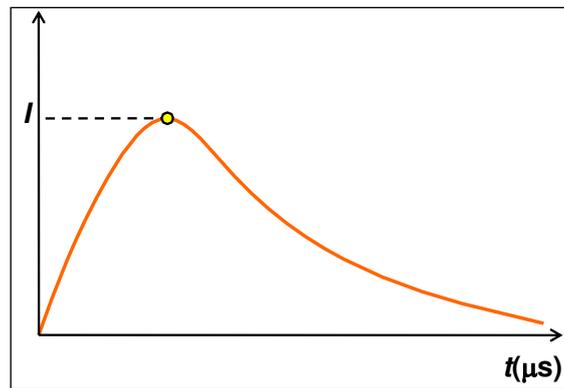
Para $I < 20$ kA $I = 46,6$ kA $\sigma_{logf} = 0,44$



Para $I > 20$ kA

$I = 33,2$ kA

$\sigma_{\log I} = 0,26$



Distribución de la corriente

Prueba del modelo

Para la prueba de la validez del modelo se realiza, una comparación de la exposición computada con los registros de campo que pueden llevarse a cabo.

Ambos resultados, el de campo para la línea de transmisión y para estructuras de sostén se pueden usar en principio.

Se debe tener en cuenta lo dificultoso de la evaluación ya que se debe manejar en función de una "tasa de falla" calculada y otra efectiva lo cual puede ser irrealizable.

Para definir un criterio de comparación entre los registros de campo y los resultados de cómputo, definimos un área equivalente de exposición (A_{eq}); es definida a partir de observaciones.

$$A_{eq} = \frac{N_s}{N_g}$$

- N_s : Numero de rayos a las estructuras en el año
- N_g : densidad de rayos a tierra para la zona en estudio [$n/\text{km}^2 \cdot \text{año}$]. Se puede evaluar en función de Td (días de tormentas en el año).

$$N_g = 0,023 \times Td^{1,3} \text{ Esta es la usada. por IEC 60071}$$

Otros valores son los siguientes ver párrafo 2,3

El mismo parámetro (A_{eq}^*) puede computarse usando los resultados obtenidos para las estructuras de sostén vertical ubicadas en llanuras según la siguiente expresión :

$$A_{eq}^* = \sum \pi \times (L \cdot D^2 \cdot i_{j+1} - L \cdot D^2 \cdot i_j) \times (1 - P(i_j))$$

donde:

- $i_1; i_j$, límites inferior y superior de las amplitudes de corriente consideradas.
- $P(i)$: probabilidad acumulada de la distribución estadística de las amplitudes de corrientes.

Se puede tomar: $I = 30$ kA con $\sigma_{\log I} = 0,32$

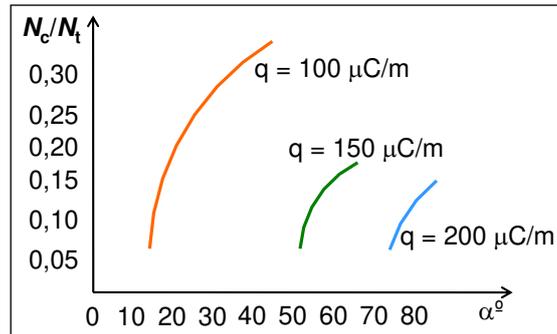
Dato de la estadística de valores experimentales obtenida para diferentes condiciones orográficas y diferentes alturas de torres.

Por último se puede graficar los valores computados de A_{eq}^* y A_{eq}/km^2 de los datos reales y los computados para diferentes alturas y relación de:

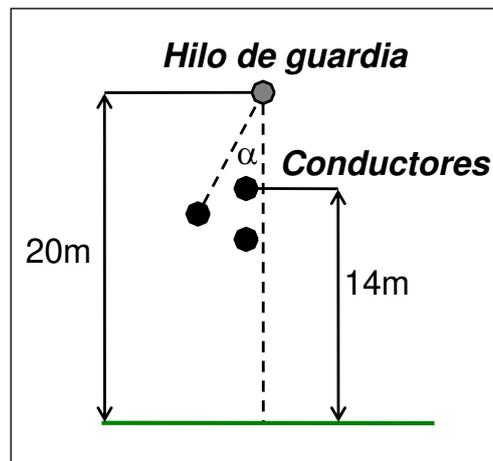
$$\gamma = \frac{\text{Altura de la colina}}{\text{Altura de la columna}}$$



Aplicación del programa para obtener la relación de protección N_c / N_t versus el ángulo según el nivel de descarga.

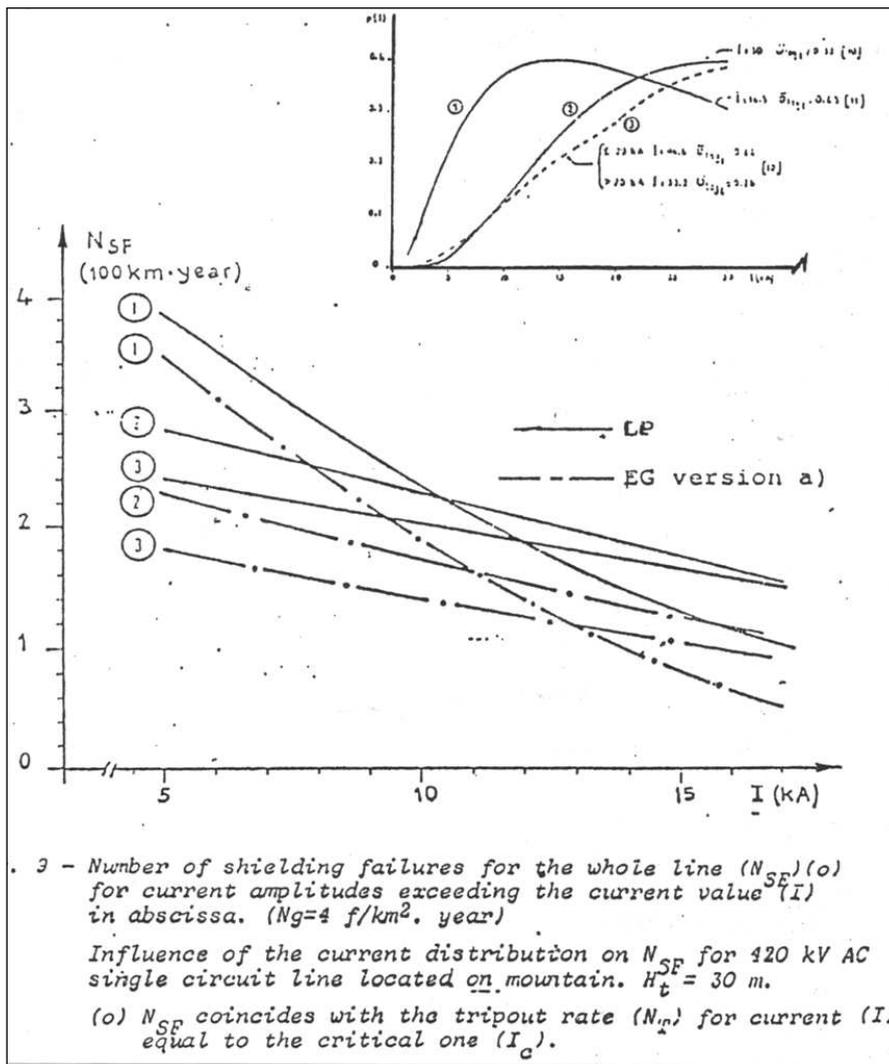


- N_c = número de descargas a conductor
- N_t = número de descarga total a la línea
- α = ángulo de protección



Disposición Planialtimétrica

Vemos que para valores de ángulos de protecciones menores que 15° las cargas tienden a cero.





5. CRITERIO PARA EL DISEÑO DE BLINDAJE AEREO

5.1. Necesidad de su uso en líneas y estaciones

La necesidad de utilización de cables de guardia será estudiada a partir del nivel de riesgo asumido, N° de fallas por cada 100 km de línea /año el nivel isoseúranico en función del N° de rayos por km²/año y el área afectada como A_{eq} , vinculada a través de la eficiencia del blindaje E_1 :

$$N_s = A_{eq} \times N_g$$

5.2. Coordinación

Para determinar el A_{eq} y E_1 se tiene en cuenta el ángulo de protección a través de la corriente crítica I_c y del Nivel Básico de Aislación adoptado y de allí el número de descargas que provocan la desconexión de la línea.

$$I_c = \frac{BIL}{Z_0/2}$$

5.3. Materiales para hilos de guardia

Se pueden usar:

- cables de acero galvanizado
- cables tipo Copperweld
- cables de aluminio-acero

5.4. Secciones para los cables de guardia

Las secciones pueden ser: 35 - 50 - 70 mm²; según la impedancia de tierra aceptada; pero lo importante aplicar una sección mínima para el alambre periférico que compone el cable. El criterio general es que la descarga más comprometida solo erosione solo un 50 % de la sección del alambre expuesto a la descarga.

5.5. Puestas a tierra

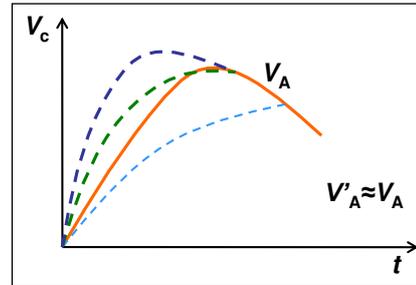
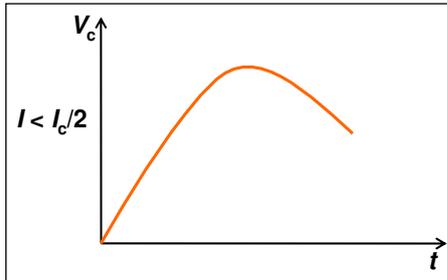
Se consideran puestas a tierra $5 < R_t < 10\Omega$ para zonas comunes y valores menores hasta $R_t < 2\Omega$ para zonas cercanas a las estaciones especialmente en la zona de acercamiento, la última torre es la más crítica. Puede llegarse a tender conductores enterrados y vinculados a la malla de tierra de la estación en la llamada zona de acercamiento a la Estación Transformadora. (ver párrafo 6.5.)



6. DESCARGAS ATMOSFÉRICAS EN LINEAS Y ESTACIONES

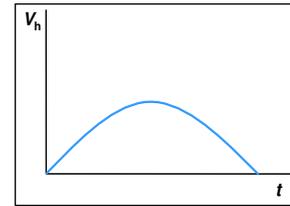
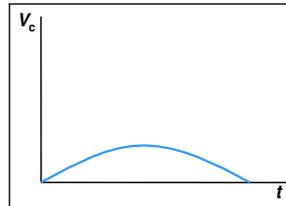
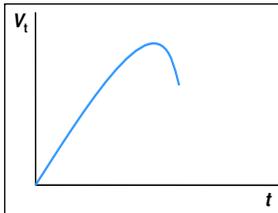
Veamos como es el comportamiento de las descargas atmosféricas cuando impactan en las líneas de transmisión, y cuan distintos pueden ser sus comportamientos según sea la intensidad del Rayo y el modo de impactar en la instalación. También se puede representar los potenciales que se presentan en distintos elementos que interviene en el proceso como lo son, los Hilos de Guardia, las Torres y el conductor.

Descarga atmosférica directa a conductor producida sin descarga en la cadena.

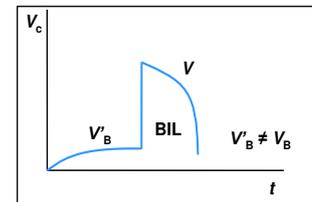
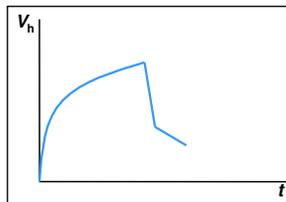
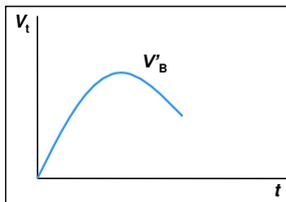


- V_c : Tensión en el conductor (inducida o directa)
- V_t : Tensión en la torre
- V_h : Tensión en el hilo de guardia

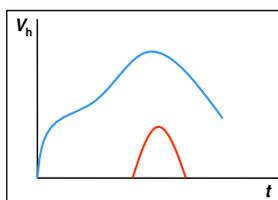
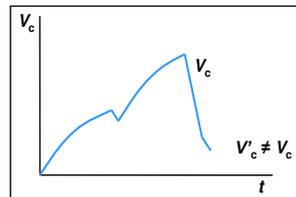
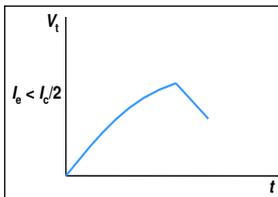
Descarga atmosférica en hilo de guardia sin descarga inversa



Descarga atmosférica en hilo de guardia con descarga inversa en aislador



Descarga atmosférica en conductor con descarga en aislador





6.1. Estadísticas de fallas en líneas

Los análisis cuantitativos del funcionamiento de las líneas dado que en general son aislaciones reconstituibles se realizan de modo estadístico y en una primera consideración vemos

$$\text{Riesgo de descarga} \begin{cases} dA \times N(Pbf) \rightarrow \text{sin descarga} \\ dB \times N(Pbf) \rightarrow \text{con descarga inversa} \\ dC \times N(Pbf) \rightarrow \text{directo} \end{cases}$$

Valores típicos para un año y 100 km de línea

- $N_f = 105$ N° de rayos en el área de exposición
- $N_{Bis} = 0,7$ N° de fallas por rayos que producen descarga inversa
- $N_{is} = 0,04$ N° de fallas por rayos que producen descarga directa.

6.2. Tensiones y corrientes críticas

La tensión máxima que aparece en función de la corriente de falla i de la impedancia de onda de la línea:

$$U = I_f \times Z_0$$

I_f : corriente de falla

- Z_0 : es la impedancia de onda incluyendo el efecto corona, aprox. 300 a 400Ω y también se puede considerar un coeficiente de acoplamiento aprox. $0,3$ de la tensión inducida del hilo de guardia sobre el conductor.

La corriente crítica I_s es la que se tiene con la tensión disruptiva de la cadena U_d :

$$U_d = I_C \times Z_0$$

6.3. Formas de las ondas de las descargas atmosféricas

Debido a que la amplitud de los sobrevoltajes frecuentemente exceden el valor requerido y producen la descarga al cabo de un tiempo, en la parte plana de la onda, es conveniente expresar la característica "Volt - Tiempo" de la aislación.

Esta característica que resulta de los ensayos puede expresarse en función de la tensión $U_{50\%}$ correspondiente al GAP (trayectoria en aire) en estudio y responde a una ecuación del tipo:

$$U_B = 1 + \frac{k}{t_B^n} \times U_{50\%}$$

- U_B : tensión de la descarga
- T_B : tiempo de descarga
- k y n coeficientes que dependen de la onda impulso.
- $U_{s2\%}$ = "Sobretensión estadística" representa el valor de para el cual nos queda excedido el 2% de la distribución estadística.
- $U_{s50\%}$ = Sobretensión estadística resistida el 50% de las aplicaciones sobre el aislamiento en estudio.
- U_{aw} = "tensión resistida" estadística, se toma aquella tensión resistida el 90% de las aflicciones, es decir, provoca disrupción el 10% de las aplicaciones.

Cuando la descarga tiene lugar en aire o en los aisladores, la tensión de descarga es función de la distancia. El resultado es una familia de curvas dadas, que es de aplicación general. La influencia de los electrodos se tiene en cuenta con el K_{gf} del GAP estudiado.

$$U_{50\%} \pm 5\% = kgf(d)$$

kg : coeficiente de la configuración de los electrodos. Ver párrafo 10.3



d : distancia entre electrodos el GAP

Los tipos de impulso son:

- **Impulso doble exponencial:**

a. con cola de larga duración (tiempo de cresta 1,2 microsegundos, tiempo para $V_c = 0,5 V_c$ $t = 50$ microsegundos).

$$k = 1,3 \quad n = 1 \quad \text{se aplica } t_b = 1/20 \text{ } \mu\text{segundos}$$

b. Con cola de corta duración 1,2 / 20 (μseg)

$$k = 1,29 + \frac{0,5}{t_n} \quad n = 0,67 + 0,0067 \times t_n$$

$$t_n (\mu\text{seg.}) \quad \text{aplicable para } t_b = 1/10 \text{ } \mu\text{seg.}$$

- **Impulso de crecimiento lineal:**

$$k = 2,5 \quad n = 0,7 \quad 1/10 \text{ } \mu\text{seg.}$$

- **Impulso de oscilación amortiguada: (200 kHz)**

$$k = 1,1 \quad n = 0,45 \quad 1/20 \text{ } \mu\text{seg}$$

La evaluación general indica que, con descargas indirectas la onda de sobretensión deriva de una doble exponencial la onda 1,2/ 50 μseg se ha normalizado internacionalmente y la onda 1/20 μseg cola corta, que como sollicitación es más exigente tiene probabilidad de producir oscilaciones si hay bajas resistencias en las puestas a tierra.

La descarga inversa se produce cuando el potencial entre la torre y el conductor supera la tensión resistida por el aislamiento la descarga se producirá con valores cercanos al valor del BIL. La descarga produce un frente de rápido crecimiento muy escarpado.

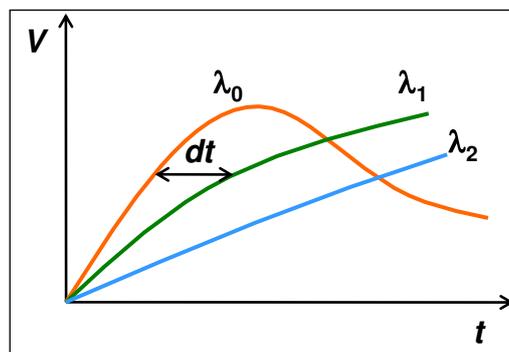
Se recomienda que la descarga tenga lugar fuera de la "zona de acercamiento" de una Estación Transformadora pues los frentes escarpados dificultan el buen funcionamiento de los descargadores de sobretensión. Ver párrafo 7.5

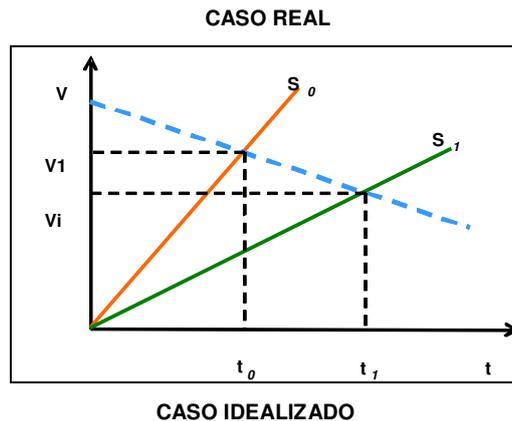
6.4. Deformación del frente de onda de choque al desplazarse

La onda de choque producida por impacto directo del rayo sobre el conductor o por una descarga inversa, en su viaje a lo largo de la línea es atenuada y deformada por diversos factores. Tales como efecto corona y las resistencias transversales que presentan los aisladores.

Esta deformación tiene dos efectos directos, produce una disminución del valor de cresta y también un retardo en el tiempo en que la onda de choque alcanza su valor máximo.

Todos estos fenómenos traen como consecuencia una reducción de la derivada del frente de onda haciéndolo menos escarpado a la llegada a los equipos de la estación. Básicamente reduce la característica tensión-tiempo los kV/ μseg . Esto es fundamental para el correcto funcionamiento de los descargadores.





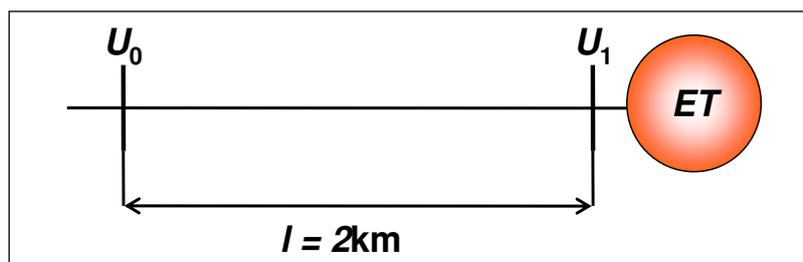
6.5. Zona de acercamiento de Línea a la Estación Transformadora

Se puede suponer también un riesgo de falla en la Línea en la zona de acercamiento y en función de este riesgo que debe ser lo más bajo posible, por supuesto inferior al resto de la Línea. De este modo se obtiene la longitud de la zona de acercamiento donde las fallas tendrían un frente de onda muy escarpado y las protecciones de sobretensión perderían efectividad.

$$I = \left(\frac{1}{N_a} \right) \times Nf \text{ [km/año]}$$

- $N_a = N^\circ$ de fallas por años estudiados
- $Nf = N^\circ$ de fallas 100 km/año

Se puede tomar una distancia de aproximadamente 2 km. Y en esta zona es de primordial importancia de la resistencia de puesta a tierra. deben ser valores menores a 2 Ohms llegando a enterrar cables de tierra y conectar a la malla de la Estación Transformadora.



Zona de acercamiento de la E.T.

6.6. Disminución de la tensión de cresta (V_c) a lo largo de la Línea

La onda deformada por factores. Tales como efecto corona, skin y otras pérdidas que presentan las líneas produce una deformación en frente de onda con la siguiente expresión matemática del fenómeno:

$$U_i = \frac{U_0}{1 + k \times U_0 \times l}$$

- $U_i =$ Tensión de Cresta incidente en la estación
- $U_0 =$ Tensión de Cresta máx. posible al borde de la zona acercamiento.
- $l =$ longitud de la zona de acercamiento



$$k = \text{coeficiente de frente de onda} \begin{cases} 0,5 \times 10^{-4} \\ 0,6 \times 10^{-4} \end{cases}$$

La dispersión de valores se considera en función de la tensión de descarga de la cadena que forma la línea de la siguiente manera:

$$U_0 = U_{w50\%} + 4 \cdot \sigma = U_w \times 1,2$$

- U_w = tensión resistida por la cadena

6.7. Determinación de la distancia límite de zona de acercamiento Ref 9

Para estimar la disminución de la tensión a lo largo de la zona l el escalón del frente de onda se va deformando retrasándose con un retardo que será $\Delta t(U)$ función del valor que la tensión U supera al valor crítico de corona.

$$\frac{\Delta t(U)}{l} = a \times U \text{ donde } (a) \text{ es un parámetro constante.}$$

La velocidad (V^ζ) es:

$$V^\zeta(U) = \frac{c}{1 + a \cdot U \cdot c} \text{ (c) velocidad de la luz}$$

Esta relación entre la velocidad y su dependencia con el voltage puede relacionarse con la variación de la capacidad equivalente (C_e) y su aumento respecto a la geométrica (C_g) con la adición de una capacidad adicional (C_a) variable con la tensión. Entonces:

$$C_e(U) = C_g + C_a(U) \text{ lo que implica } V^\zeta(U) = \frac{c}{\sqrt{\frac{(1 + C_a(U))}{C_g}}}$$

El valor de $C_a(U)$ se puede obtener también: $C_a(U) = K \cdot U + \frac{K^2 U^2}{4 \times C_g}$

Donde el parámetro K se define como: $K = \frac{2 \cdot a}{Z_c}$

El valor de Z_c es la impedancia del conductor.

En particular la expresión de la pendiente inicial (s) para casos de frentes de onda lineales será:

$$s_1 = \frac{s_0}{1 + a \cdot l \cdot s_0}$$

6.8. Determinación de la distancia límite de zona de acercamiento

Para la zona de acercamiento consideramos que la onda es deformada por efecto corona, y otras pérdidas que presentan las líneas produce una deformación en frente de onda:

$$l_{pi} = \frac{2 \times t}{(nk_{co}(U - U_p))}$$

- U = amplitud de la sobretensión considerada más baja
- U_p = nivel de protección al impulso atmosférico.
- l_p = longitud de entre el punto del rajo incidente y la subestación
- t = es el mayor tiempo entre el punto de la subestación a proteger y el descargador más cercano (μs)

- n = número de líneas que están conectadas a la subestación
- k_{co} = constante de amortiguación por efecto corona ($\mu\text{s}/\text{kV}\cdot\text{m}$) (ver Tabla 7.8)
- U_w = tensión resistida por la cadena

Configuración del conductor	k_{co} ($\mu\text{s}/\text{kV}\cdot\text{m}$)
Conductor simple	$1,5 \times 10^6$
Conductor doble	1×10^6
Conductor triple o cuadruple	$0,6 \times 10^6$
Seis u ocho conductores	$0,4 \times 10^6$

6.9. Equipos conectados directamente a una línea aérea y a un cable subterráneo Ref 10

Cuando hay equipos conectados directamente a una línea aérea y otros conectados a través de cables son sometidos a sobretensiones de origen atmosférico, vemos que la sobretensión se propaga por la línea a la casi a la velocidad de la luz y cuando alcanza un cable se descompone en una onda reflejada y otra transmitida.

La amplitud de la onda transmitida U_2 viene dada por:

$$U_2 = \frac{2 \times Z_2}{Z_1 + Z_2} \times U_1$$

La amplitud de la onda reflejada U_R viene dada por:

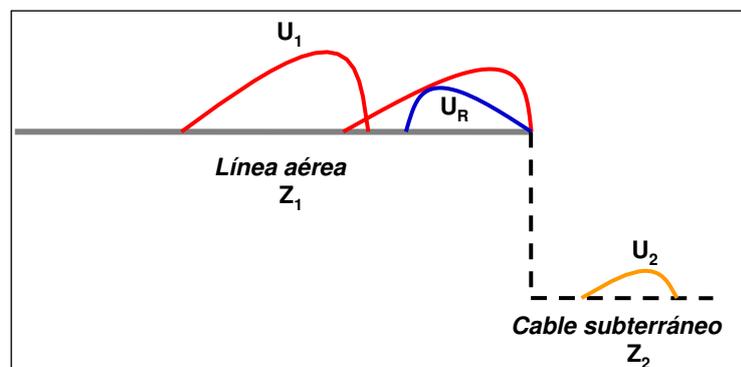
$$U_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2} \times U_1$$

- U_1 = amplitud de la sobretensión sobre la línea aérea
- Z_1 = Impedancia de onda de la línea aérea en la práctica del orden de 300 a 400 Ω .
- Z_2 = Impedancia de onda del cable en la práctica del orden de 25 a 50 Ω .

La impedancia característica Z_c para la transmisión de onda de línea o cable viene dado por la expresión:

$$Z_c = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Esquema gráfico del fenómeno de reflexión.





La onda se refleja en el punto de acceso al cable en función de la impedancia de onda efectiva del juego de barras a las barras de la estación. Debido a esto continuarán produciéndose reflexiones sucesivas en las dos extremidades del cable en función de las ecuaciones anteriores, en donde U_1 y Z_1 son valores relativos a la onda que llega al punto de reflexión, U_2 y Z_2 son valores relativos a la onda transmitida y U_R a la onda reflejada.

6.10. Sobretensiones transferidas en los transformadores

En muchos casos las sobretensiones de una onda incidente en un transformador puede ser decisiva cuando se diseña la protección de un transformador especialmente conectado a generadores o a redes.

Los sobretensiones transferidas por los transformadores son mayormente de frente rápido o lento. El modo de la transferencia se produce por distintas causas veamos.

- transferencia por la capacidad electrostática entre bobinados
- transferencia oscilatoria por oscilaciones naturales de circuitos primario y/o secundario con las capacidades a tierra de los bobinados.
- Normal transferencia electromagnética la cual depende de la relación de vueltas primarias y secundarias y de la inductancia de dispersión

Las componentes oscilatorias deberán ser superpuestas a los valores transferidos por las capacidades entre bobinados de alta y baja tensión.

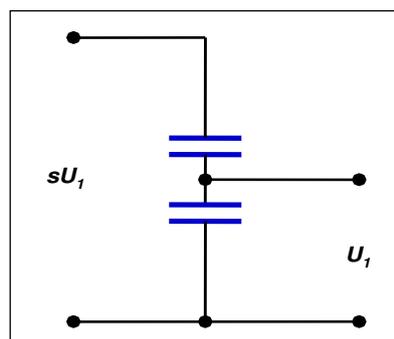
Tensión transferida vía capacitiva

A la suma de estas capacidades la llamaremos C_t .

A las capacidades agrupadas de la red exterior conectada al circuito secundario a la cual denominaremos C_s .

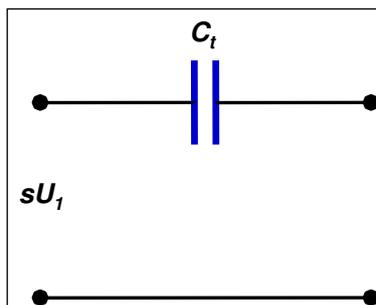
El pico de la tensión capacitiva en el secundario sU_1 inicial en condiciones de impulso atmosférico U_1 se puede representar por un circuito equivalente a un divisor capacitivo que tiene en cuenta los valores de las capacidades en los bobinados de alta y baja y del que recibe la tensión transferida contra tierra, veamos el circuito equivalente.

Circuito de transformador el divisor capacitivo equivalente



$$sU_1 = \frac{C_t}{C_t + C_s} \times U_1$$

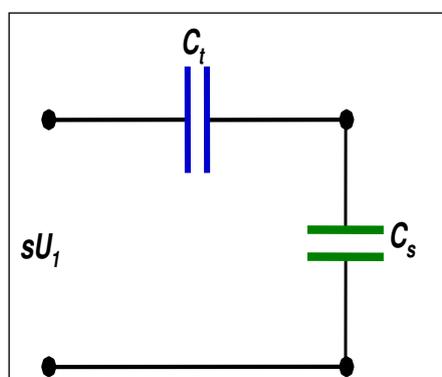
Circuito de equivalente a la transferencia capacitiva



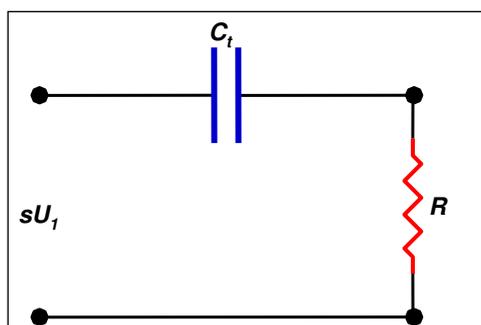
$$U_2 s = s R C t_1 \quad \text{Valor inicial con resistencia } R$$

S es la pendiente del frente de onda $\text{kV}/\mu\text{seg}$

Red exterior capacitiva



Red exterior resistiva



Tensión transferida vía inductiva

La transferencia de una fuerza electromotriz por acoplamiento inductivo entre los arrollamientos puede evaluarse cualquiera sea el tipo de conexión, considerando la tensión de impulso como una tensión alterna monofásica,

La amplitud de las componentes de alterna transferidas por esta vía dependerá de la relación de transformación así como de la relación de impedancias del transformador.



La tensión alterna U_2 , de lado de baja tensión viene dado según los esquemas que se han normalizado para una tensión fase tierra o entre fases, viene dado por:

$$U_2 = p \cdot q \cdot r \cdot \frac{U_p}{N}$$

Donde:

- q : factor de respuesta del circuito de BT
- r : factor que depende de la conexiones
- U_p : la tensión de pico lado AT
- N : la relación de transformación



7. EVALUACIÓN DE LAS SOBRETENSIONES APLICADAS U_s DE ORIGEN INTERNO

De acuerdo a su forma de onda y duración, las tensiones y sobretensiones se dividen en los siguientes tipos:

Las sobretensiones internas de frecuencia industrial

Son Tensiones sinusoidales de corta duración a frecuencia industrial nominal: una tensión sinusoidal con frecuencia entre 48 Hz y 62 Hz, y duración de 60.

Para las tensiones de frecuencia industrial y/o temporarias se deberá, considerar que las mismas son aplicadas al conjunto de las aislaciones entre fase y tierra y entre estas.

La idea es no sobrepasar el Nivel de la Tensión de Diseño D.I.L. de los equipos que ocasione daños permanentes en alguna de las aislaciones o el acortamiento de su vida útil.

La capacidad de los equipos para soportar estas sollicitaciones se verifica mediante las pruebas siguientes;

- ensayo de tensión aplicada 50Hz duración 1 min
- ensayo de tensión inducida larga duración (200 -350 Hz)

- Tensión permanente (a frecuencia industrial): Tensión de frecuencia industrial, considerando que tiene valor eficaz constante, aplicada continuamente a un par de terminales de una configuración de aislación, valores superiores a 1,05.
- Sobretensión transitoria: son de corta duración de pocos milisegundos a 2 o 3 seg, oscilatoria o no oscilatoria, usualmente fuertemente amortiguada son limitada por las protecciones a valores 1,2 a 1,3.

Las sobretensiones transitorias se dividen en:

Sobretensión de frente de onda lento: sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con picos de duración entre $20 \mu s < T_p \leq 5000 \mu s$, y duración de cola $T_2 \leq 20 \mu s$.

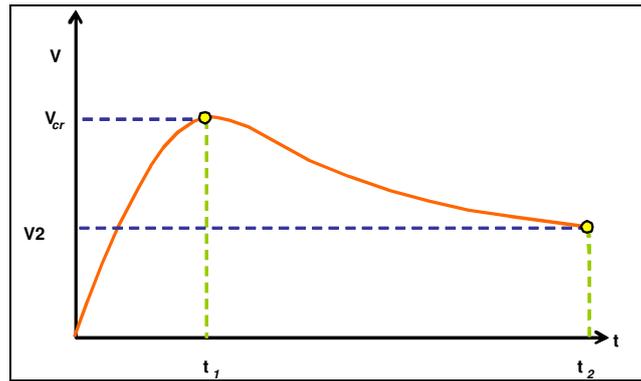
- Sobretensión de frente de onda rápido: sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con picos de duración entre $0,1 \mu s < T_1 \leq 20 \mu s$, y duración de cola $T_2 < 300 \mu s$.
- Sobretensión de frente de onda muy rápido: sobretensión transitoria, usualmente unidireccional, con picos de duración $T_f \leq 0,1 \mu s$, duración total $< 3 \mu s$, y con oscilaciones superpuestas de frecuencia $30 \text{ kHz} < f < 100 \text{ Mhz}$.
- Sobretensiones combinadas (temporales, frente de onda lento, frente de onda rápido, frente de onda muy rápido): Consiste en la composición de dos tensiones aplicadas simultáneamente entre cada uno de los dos terminales de fase de una aislación entre fases (o longitudinal) y tierra. Se clasifica por la componente de mayor valor pico.

Para calcular las sobretensiones aplicadas a una instalación cuando estas son de origen interno o de maniobra se deben utilizar los estudios realizados del sistema y de estos estudios se obtienen los valores de sobretensión en [P.U.] para cada tipo de maniobra (recierre, cierre, etc.).

Para la realización de estos estudios se utilizan los analizadores de redes o con simulaciones hechas mediante herramientas de cálculo más modernas tales como los programas *EMTP* y *ATP*. se toman los más elevados con su correspondiente factor de dispersión, estos datos se dan en función de la *Tensión de Pico a Frecuencia Industrial* para tierra pero responden a los fenómenos transitorios de las reactancias y capacidades que entran en juego con la instalación y el sistema eléctrico al que están interconectados.

La forma de la onda es de frente menos escarpado que la atmosférica del orden de los 200 μseg y la duración de la cola va a depender de los elementos de circuitos que están involucrados en el transitorio pero usualmente está en el orden de 1500 a 3000 μseg . Pero para los estudios y los ensayos se ha normalizado la onda en 200/2400 μseg

Los valores de pico son menores a los de las ondas atmosféricas pero debido a su larga duración la sollicitación es muy exigente para las aislaciones sólidas o líquidas especialmente en tensiones de EAT 200kV o superiores para tensiones inferiores los transitorios de maniobra suelen no tener tanta significación para las aislaciones.



Forma se onda de sobretensión de maniobra.

$$t_1=200\mu\text{seg}$$

$$t_2=2400\mu\text{seg}$$

Las amplitudes son una familia de curvas cuyo valor de cresta dependerá mucho del instante en que ocurren los transitorios es por ello que se debe expresar de modo probabilístico con una dispersión dada.

El valor de cresta de la sobretensión se expresa por unidad (PU) relacionado a la Tensión máxima Fase Tierra del sistema a 50Hz (U_p)

$$U_{cr} = [P.U.] \times U_p$$

Para:

$$U_p = U_l \times \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}$$

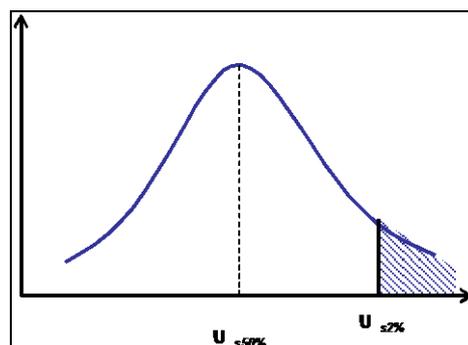
Vemos que la distribución estadística será del tipo gaussiana vemos que se puede vincular la $U_{s2\%}$ con la $U_{s50\%}$ a través de la función dispersión σ_s .

$$U_{s50\%} = \frac{U_{s2\%}}{1 + 2 \cdot \sigma_s}$$

$$U_{s2\%} = U_{s50\%} \times (1 + 2 \cdot \sigma_s)$$

$$U_{s50\%} = U_{s25\%} \times (1 - 2 \cdot \sigma_s)$$

Distribución de la densidad de las sobretensiones de maniobra



Con su dispersión σ_s correspondiente podremos expresar matemáticamente cual es el valor probable se las sobretensiones que comprometen o que soportaran las aislaciones en estudio que en general se adopta el valor normalizado del 2%

$$U_{s2\%} = [P.U.2\%] \cdot U_p$$



Valores posibles

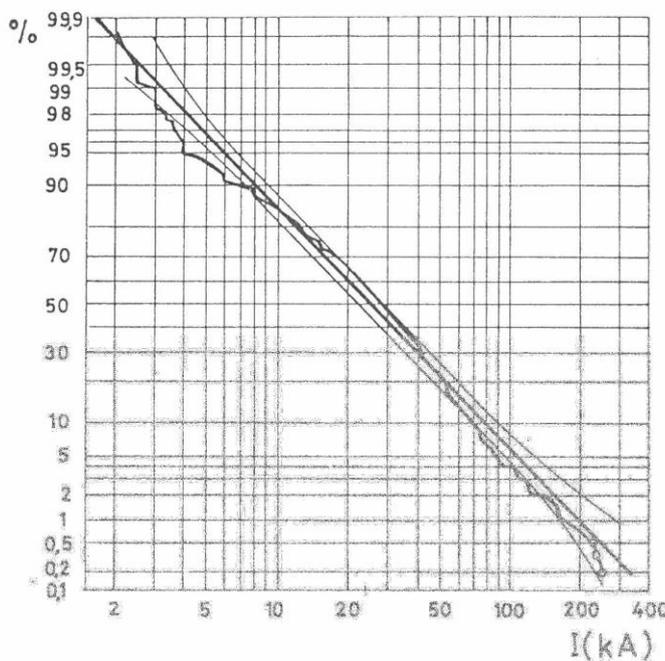
Las sobretensiones en el sistema de EAT están en orden de 2,1 a 3.5 PU.

Estas sobretensiones internas son de breve duración, en forma de ondas de alta frecuencia fuertemente amortiguadas. Para su simulación pueden emplearse ondas 250/2500 μ s.

Se deben fundamentalmente a la maniobra de los interruptores: conexión y desenganche de líneas en vacío, corte de pequeñas corrientes inductivas, eliminación de fallas o corte de corrientes capacitivas. La forma y valor de estas sobretensiones dependen de gran número de factores, algunos aleatorios.

Al ser tan variada la posibilidad de formas de ondas posibles, se consideran sólo los valores de cresta como los factores determinantes del comportamiento del aislamiento, definiéndose la probabilidad de aparición de una sobretensión dada. Las curvas de probabilidad correspondientes se asemejan en gran medida a la distribución normal.

Para las líneas de tensión inferior a 300 kV, las sobretensiones de maniobra en general no son condicionantes del aislamiento, del equipamiento son más importantes las sobretensiones atmosféricas.



Datos estadísticos de intensidad de descargas.
Trazo fino: intervalos de confianza del 95 %
Trazo grueso: curva media.

Valores Indicativos para el caso de maniobras en Líneas se dan en la tabla siguiente, para instalaciones de tensión superior

Tipo de Maniobra	Resistencia de Preinserción en interruptores	Compensación de la energía		Valor de la Comensación de Línea		
		> 50 %	< 50 %	máx.	medio	mín
Recierre Tripolar	NO		X	3,66	2,90	2,14
		X		3,54	2,74	1,89
	SI		X	2,14	1,72	1,37
		X		2,20	1,63	1,32
Conexión de Línea	NO		X	2,90	2,31	1,66
		X		2,78	2,24	1,81
	SI		X	2,20	1,77	1,35
		X		1,88	1,51	1,31



En la Tabla se dan valores indicativos tomados de contingencias del servicio en líneas reales, que pueden ser tomados como sobretensiones estadísticas (2%) para realizar los cálculos.

Los valores son para el extremo receptor de la línea y para el tipo de maniobra que da mayores sobretensiones.

Como se puede observar, los valores de sobretensión llegan en la mencionada Tabla, obtenida a partir de estadística realizadas en varias líneas, hasta un máximo de 3,66 p.u.

Las sobretensiones de maniobra suelen ser determinantes en la fijación de distancias en aire, especialmente en el caso de líneas de muy alta tensión.



8. MÉTODOS COORDINACIÓN DE LA AISLACIÓN Ref IEC 60071

8.1. *Determinación de Aislación para Frecuencia Industrial o Sobretensiones Temporarias*

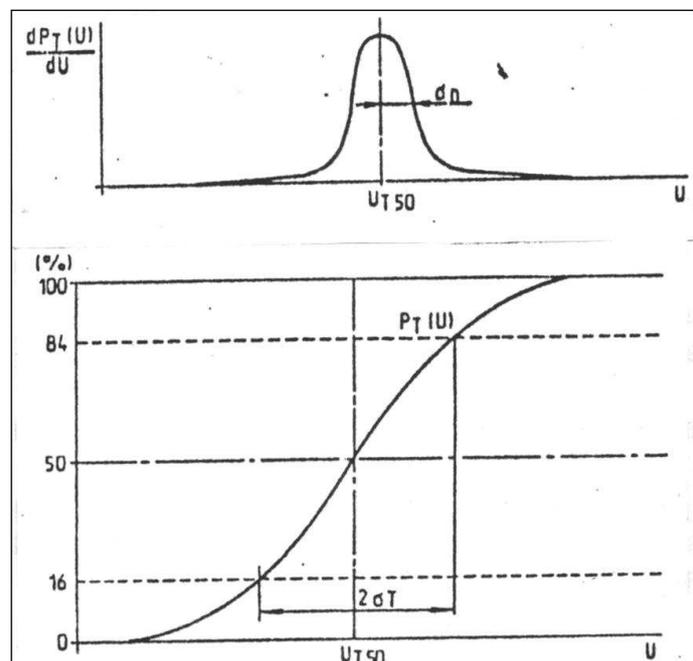
A fin de diseñar las aislaciones para que soporten las tensiones de frecuencia industrial y/o temporarias se deberá, considerar que las mismas son aplicadas al conjunto de las aislaciones entre fase / tierra o fase /fase y no sobrepasando generalmente el valor de 1.5 p.u. durante 1 a 10 seg o aún mas tiempo, hasta que actúen las protecciones de sobretensión. El objetivo es no sobrepasar el Nivel de la Tensión de Diseño D.I.L. y tener daños permanentes en algún lugar de la aislación.

8.2. *Determinación de la Aislación según las Sobretensiones de origen Interno o Atmosféricas*

Para abordar este problema, se disponen de distintos métodos para cuantificar la coordinación de la aislación, En la aplicación de estos métodos, se deberá correlacionar una familia de sobretensiones probables, y correlacionar con la capacidad de las aislaciones para soportarlas.

8.3. *Probabilidad de las Sobretensiones aplicadas*

Las diferentes clases de sobretensiones a tener en cuenta en una coordinación de aislación son muy numerosos para permitir un estudio analítico, por esto se trabajará con las distribución de la posibilidad de aparición de las sobretensiones de cada tipo representativo, atmosféricas vistas en capítulo 7 y de origen interno capítulo 8, veamos las distribuciones estadísticas estandarizadas y usuales.



$f_0(U)$ = Densidad de probabilidad de Sobretensiones

$$F_0(U) = \int_U^{\infty} f_0(U) \cdot dU \text{ Densidad de las Sobretensiones acumuladas}$$

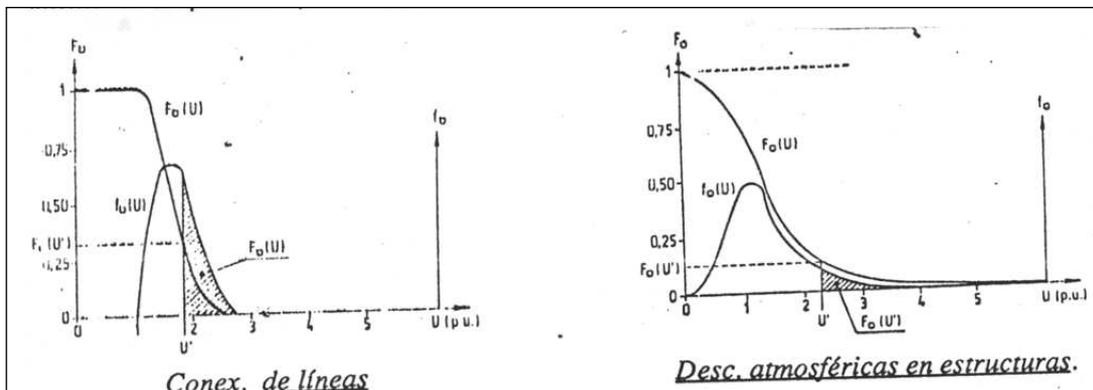
8.4. Probabilidad de descarga de las aislaciones sometidas a impulso.

La probabilidad de descarga de una aislación sometida a impulso, de forma, polaridad y valor de cresta U dados, para intervalos cortos de tiempo, puede determinarse, si la aislación es autorregenerativa, aplicando el impulso N veces y contando el número de descargas N_1 . Siendo el cociente N_1/N el valor de esta probabilidad cuando el número de eventos es elevado.

Para el caso de conjuntos de aparatos con aislaciones no autorregenerativas, puede trabajarse estadísticamente, con la ayuda de la curva de distribución de los aparatos que pasan la prueba y los que la fallan, fundadas razones económicas hacen que se trabaje con un número bajo de eventos.

Cuando se consideran impulsos de maniobra o de origen atmosféricos de diferentes valores de cresta U , se puede asociar a cada valor posible una *probabilidad de descarga* P_T , se define de esta manera, una función $P_T(U)$ para un corto intervalo de tiempo t .

Los valores de $P_T(U)$ crecen de cero a una probabilidad del 100 % en una banda más o menos estrecha que queda definido por dos parámetros, uno de ellos es la posición de la banda de tensión y el otro es relacionado con el ancho de dicha banda, de los ensayos de laboratorio el primero se toma igual a la tensión U_{w50} que es la probabilidad de descarga o de tensión resistida de 50%, el restante relacionado con el ancho de la banda es directamente la desviación normal (σ) que en el caso de una distribución Gaussiana comprende los valores de probabilidad de 16 % a 84%.



Suponiendo que $P_T(U)$ tiene una distribución gaussiana, la probabilidad standard se puede plantear:

$$U_{T50\%} = \frac{U_{T90\%}}{1 - 1,3 \cdot \sigma_T}$$

$$F_x = \frac{1}{\sigma \cdot 2 \cdot \pi} \int \rho \frac{x-u}{\sigma^2} dx$$

8.4.1. Combinación de aislaciones múltiples

Cuando se tienen muchas aislaciones en paralelo la aislación total se puede simplificar en función de las dispersiones parciales en función de su promedio cuadrático.

$$\sigma_T = \sqrt{\sigma_t^2 + \sigma_a^2}$$

Valores Comunes para: Dispersión por razones de clima

$$\begin{cases} \sigma = 5\% \\ \sigma = 6\% \\ \sigma = 8\% \end{cases}$$

Para aislaciones combinadas se pueden utilizar factores de adaptación:

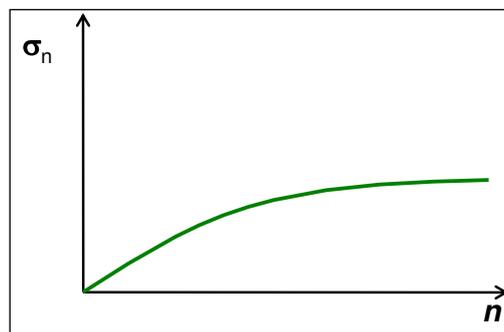
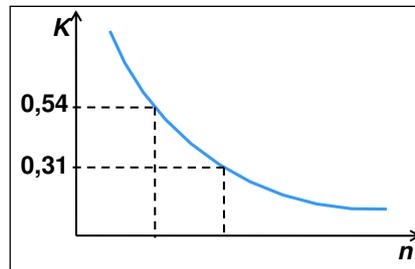
$$\sigma_a = k \cdot \sigma_T$$

En función de k para:



$$U_{T50\%} > k \cdot \frac{U_w}{1 - 1,13 \times \sigma_T}$$

El factor de dispersión $k = f(n)$ del gráfico, con (n) número de aislaciones en paralelos.



Esta tensión debe ser mayor a la que se toma para el diseño ya que esto estará afectado por las condiciones climáticas, humedad, polución etc. Estas entran en consideración con un coeficiente K . Para la aislación de diseño U_{aw} toman:

$$U_{T50\%} = \frac{U_{T90\%}}{1 - 1,3 \cdot \sigma_T} \geq K \frac{U_{aw}}{1 - 1,3 \cdot \sigma_T}$$

8.4.2. Influencia de las condiciones atmosféricas.

Para obtener las aislaciones de trabajo $U_{T50\%}$, es la que se tienen en condiciones cualesquiera como ser lluvia o contaminación:

$$U_{T50\%} = K_c \frac{U_{aw}}{1 - 1,3 \cdot \sigma_T}$$

La dispersión resultante en función de la constante por condición atmosférica [K_c]

- Condición normal: $K_c = 1$ $\sigma_a = 5\%$
- Condición adversa: $K_c < 1$ $\sigma_a > 5\%$

Si se trata de descargas atmosféricas: $\sigma_a = 6\%$

8.5. Métodos de coordinación de la Aislación.

Se exponen aquí los distintos métodos que se utilizan para evaluar la coordinación de los componentes a las sobretensiones, los mismos se puede usar individualmente o como combinación entre ellos

Método Convencional o Determinístico

El método *Convencional o Determinístico* está basado en el concepto que las *Tensiones Máximas* (U_{STM}) que se aplican sobre las aislaciones son superiores a las respectivas *Tensiones Resistidas Mínimas* (U_{wm}). Este método es normalmente aplicado cuando no hay información disponible de posibles riesgos de falla del equipamiento en servicio

La elección de la aislación se deberá hacer de manera que haya un margen, o coeficiente de seguridad que cubra al proyectista contra las propias incertidumbres en los dos valores en juego Sobretensiones Máximas y la Tensión



Soportada Mínima. No se pretende estimar el Riesgo de Falla. por lo cual se tomará un margen de protección dado con el uso de descargadores.

Este criterio es preferentemente aplicado a las aislaciones no autorrestaurables (ej sólidas), es decir para los casos en que además no se tiene referencia concreta de la probabilidad de falla del equipo en servicio asegurándose no soportar las tensiones verificadas a través de ensayos o cálculos.

El método determinístico:

- aplicado cuando la aislación se caracterizada por la tensión soportada ($U_w = 100\%$), el valor seleccionado es igual al voltaje de coordinación obtenido multiplicando la sobretensión asumida como máxima por un Factor de Coordinación (K_c), que tiene en cuenta la incertidumbre asumida por ambos valores esto incluye a las aislaciones en aire cuando no se admite probabilidad de fallo, caso las distancias mínimas de seguridad en aire IEC 60071 anexo A Tablas A1, A2 y A3.
- aplicado cuando las aislaciones exteriores que se caracterizan por voltajes soportados estadístico ($U_w = 90\%$) K_c tendrá en cuenta entonces la diferencia este voltaje y la tensión soportada asumida

Veamos la fórmula de aplicación

$$U_{STM} > k \cdot U_{Wm}$$

Los coeficientes de seguridad recomendados según IRAM 2211 cuando se utilizan descargadores conectados muy cerca de los elementos protegidos son:

- $K_c = 1,15$ para sobretensiones atmosféricas.
- $K_c = 1,25$ para sobretensiones .de maniobre

8.5.1. Método Estadístico general

En el método estadístico está basado en la frecuencia de ocurrencia de un origen especificado la distribución probable de sobretensiones independientemente del origen y de la probabilidad de descarga de las aislaciones, El riesgo de falla se determina combinando sobretensiones y probabilidad de descarga en cálculo simultaneo. Paso a paso teniendo en cuenta la naturaleza estadística de ambos.

Se aplica preferentemente a aislaciones autoreconstituibles, para lo cual se evalúa un riesgo de falla cuyo valor se usará como índice de seguridad en el diseño del aislamiento, tratando de tener un equilibrio técnico-económico entre el costo de falla y el costo de reducción o limitación del riesgo según el grado de la protección utilizado para a cada solicitud tipificada.

Se tratará de calcular el número anual medio probable de fallas para cualquier parte componente de la red, como consecuencia de la aparición de sobretensiones importantes independientemente de cual fuere su naturaleza.

El método estadístico se limita controlar que el riesgo de falla de una aislación debido a sobretensiones previsibles de la red según cada tipo de solicitud, su frecuencia de aparición anual y la distribución estadística de las amplitudes, se mantenga dentro de los límites aceptables en función de la zona considerada.

Supongamos también que la tensión resistida de un componente de la aislación para un intervalo de tiempo dado esté definida por la probabilidad $P_T(U)$ de descarga disruptiva de la aislación cuando se aplica una sobretensión de valor (U).Supongamos además que la distribución de las sobretensiones que se aplican a un mismo elemento aislante esta definida por la densidad de probabilidad $f_0(U)$. La probabilidad de que pueda producirse una sobretensión de valor comprendido entre U y $U + dU$, es entonces $f_0(U) dU$.

La densidad de probabilidad de falla (R) de la aislación causado por una sobretensión de valor U es por consiguiente el producto de la densidad de aparición de una sobretensión de valor U por la probabilidad de falla de la aislación cuando se le aplica una sobretensión de valor U por lo tanto vemos.

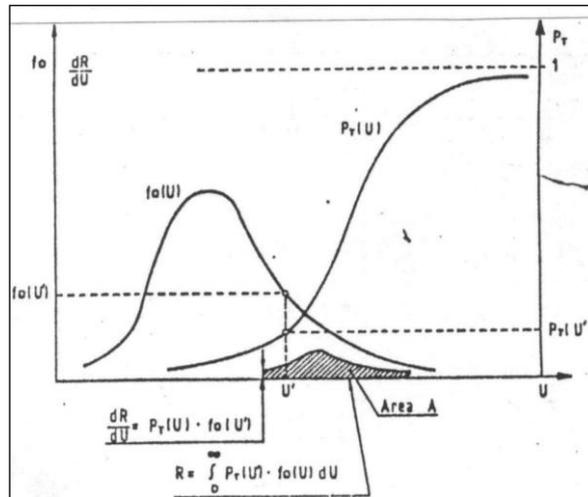
$$dR = f_0(U) \cdot P_T \cdot dU$$

De esta expresión obtenemos la gráfica que representa el Riesgo de descarga de una aislación dada según una sobretensión (U), la integral representa el área de la zona en que ambas curvas se interfieren.

$$R = \int_0^{\infty} f_0(U) \cdot P_T(U) \cdot dU$$



Gráfico de la Evaluación del Riesgo de falla de una Aislación



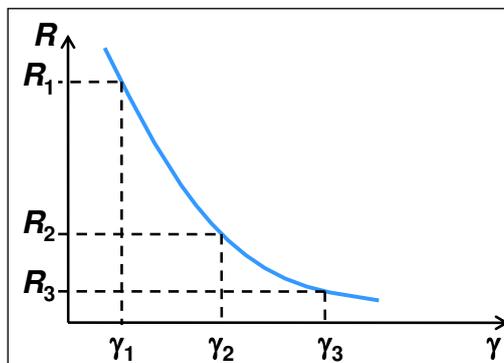
8.5.2. Método Estadístico Simplificado

Una evaluación correcta del riesgo de falla puede realizarse a partir de algunas hipótesis de simplificación tales como aceptar que ambas distribuciones tienen formas Gaussianas con desviaciones normales conocidas.

Sobre estas consideraciones podemos establecer una correlación entre el *Riesgo de Falla* y el margen de seguridad a respetar entre esos dos valores de acuerdo a la fórmula:

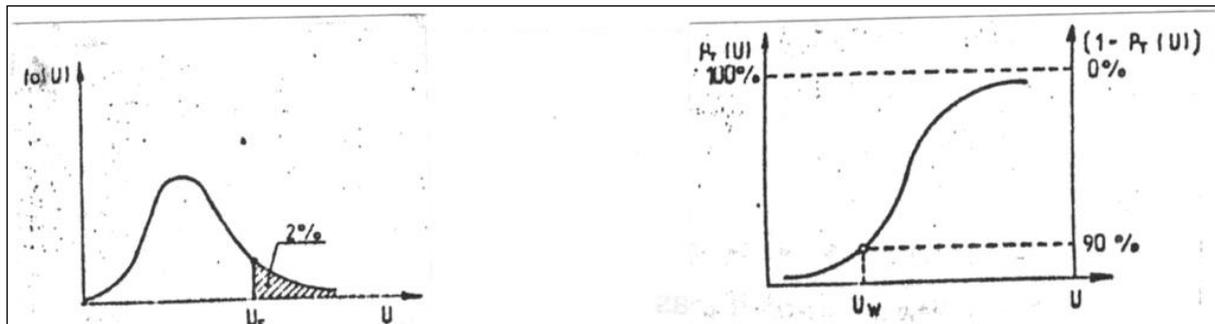
$$\gamma = \frac{U_w}{U_s}$$

Y presentamos la Gráfica en versión simplificada:

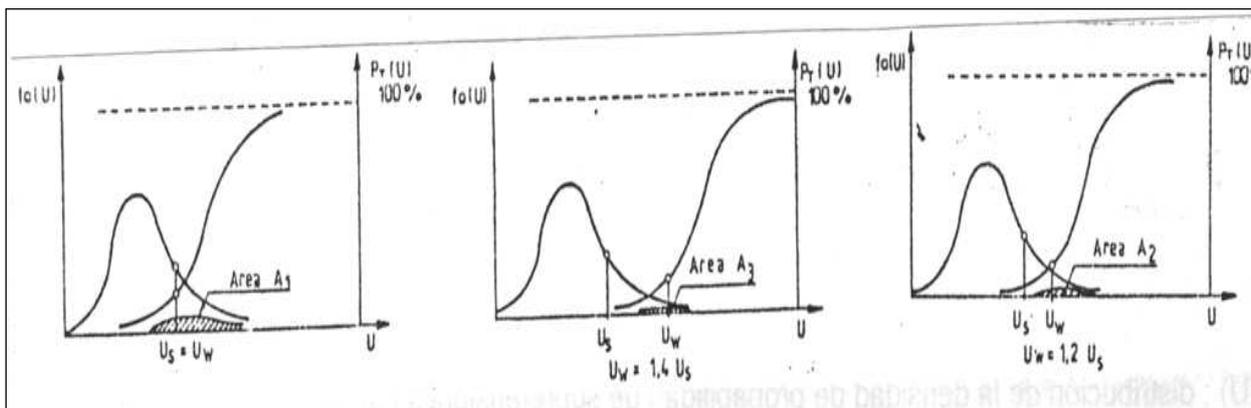


Donde

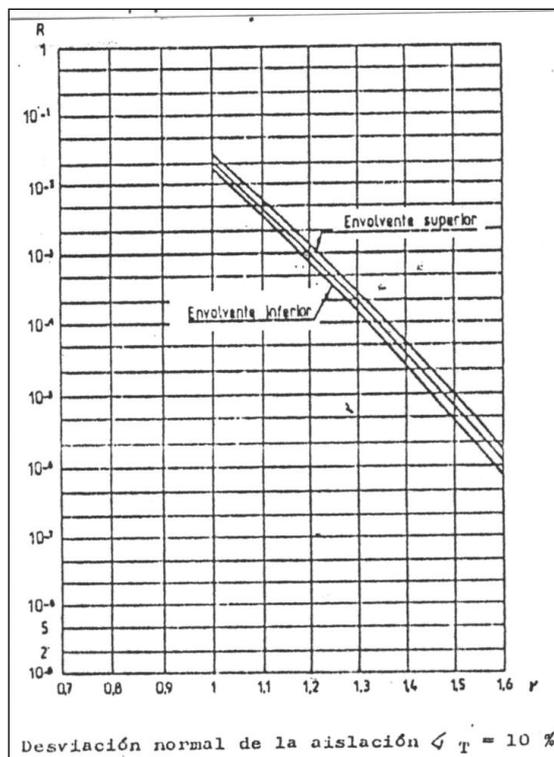
- U_s : Sobretensión Estadística de la curva de densidad de probabilidad. se ha tomado como referencia la del 2%
- U_w : Tensión Resistida Estadística sobre probabilidad de descarga, se ha tomado como referencia 90%
- γ : Coeficiente de seguridad estadístico con valores de referencia 1,0 ; 1,2 ;

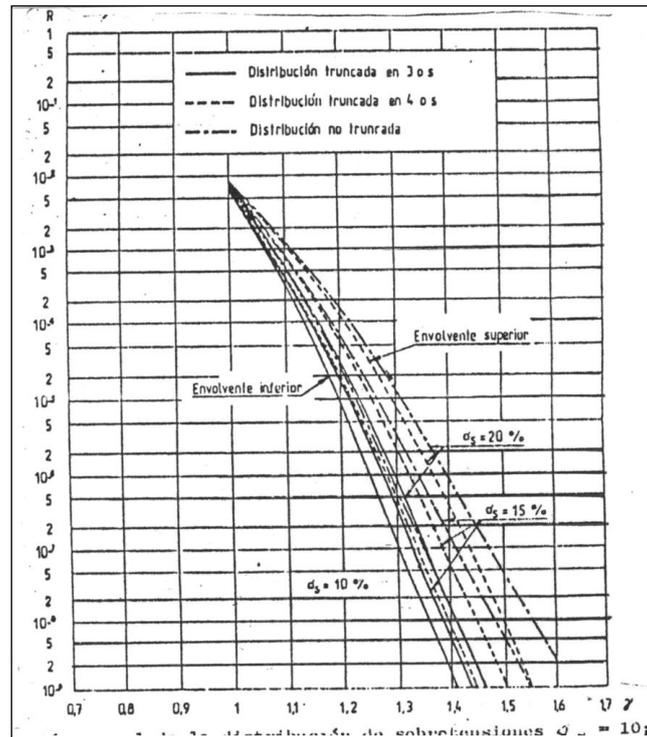


Definidos los factores de seguridad estadísticos $\gamma = \frac{U_W}{U_S} = \frac{U_{T10\%}}{U_{S20\%}} = 1,0; \dots 1,2; \dots 1,4$



Estos valores fueron adoptados en función de los valores standarizados y se presentan en una familia de curvas en las Normas IRAM 2211 parte 1 y en la internacional IEC 60071 parte 4





En la norma IEC 60071 –93 se presenta una gran familia de estos gráficos para distintas aislaciones y diversos tipos de sobretensiones con sus desvíos standard σ_s o σ_t .

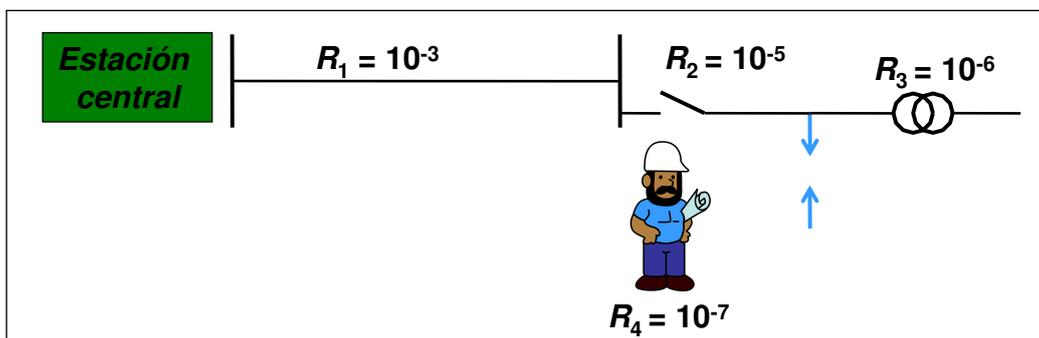
8.6. Evaluación del Riesgo y verificación de las sobretensiones

Evaluación del riesgo total como suma del riesgo de cada uno de los elementos que forman parte de una instalación de transmisión.

El riesgo de falla total será la suma de los riesgos parciales para una

$$R_t = \sum R_1 + R_2 + \dots R_n \text{ [Riesgo total]}$$

Elección del nivel de riesgo según zona o equipo:



- R : Riesgo de falla por evento, según el elemento estudiado.
- R_1 : Para las líneas en general
- R_2 : Para barras de TV y Seccionadores
- R_3 : Para los transformadores aislaciones económicamente muy costosas
- R_4 : Para las áreas de circulación sobre las personas, es el más conservador



Quantificación del Riesgo

La probabilidad de fallas para un valor de tensión estadístico cualquiera viene dado por:

$$R = \int_0^{\infty} f_0(U) \cdot P_T(U) \cdot dU$$

- $f_0(U)$: distribución de la densidad de probabilidad de sobretensiones (U)
- $P_T(U)$: probabilidad de descarga disruptiva de la aislación sometida a una onda normalizada cuya sobretensión de Pico es U



9. RELACIÓN ENTRE LA DISTANCIA DISRUPTIVA EN AIRE Y LA TENSIÓN RESISTIDA 50%

Es un fenómeno conocido el hecho que el aire tiene una capacidad limitada para soportar sin descargar el campo eléctrico producido por las ondas de alta tensión y además por la propiedad del campo eléctrico vemos que este es inversamente proporcional a la distancia.

Esto llevó a los técnicos a desarrollar distintas fórmulas que vinculan la probabilidad un espacio en aire de distancia (d) de tener falla el 50% de las veces cuando aplicamos una onda de tensión que llamamos $U_{T50\%}$.

Estas relaciones serán distintas según la naturaleza de la onda las tipificadas en:

- Tensiones de frecuencia industrial valores de pico o r.m.s.
- Sobretensiones frente lento tipo maniobra positiva o normalizadas
- Sobretensiones frente escarpado tipo atmosféricas positivas o negativas

Todas las expresiones para vincular [$U_{T50\%}$] con la distancia de GAP (disruptiva), son estipuladas para la presión atmosférica y para el nivel del mar de no ser así deberá hacerse los ajustes correspondientes.

También en todas las expresiones matemáticas se considera que el factor de configuración (Kg) igual a la unidad es el caso punta placa.

9.1. Respuesta de aislación a tensiones de frecuencia industrial

Según la Norma IEC 71, la tensión soportada al 50% para una distancia en aire en aire (gap) sometido a una sollicitación de 50 Hz es una para el caso punta placa puede aproximarse con la siguiente fórmula para distancias superiores a 3m.

$$U_{50\%RP} = 750\sqrt{2} \cdot \ln(1 + 0,55 \cdot d^{1,2}) \quad (\text{kVpico}, m)$$

Este valor es aproximadamente un 20 a 30 % menor al que corresponde para sobretensión de maniobra onda positiva.

La influencia de la configuración K , es generalmente menor a la correspondiente por ST de maniobra positiva:

- para gaps entre 1m y 2 m, la fórmula puede usarse en conocimiento que es conservadora
- es algo menor para distancias arriba de aprox. 1m
- para distancias mayores a 2 m la resistencia puede ser evaluada de acuerdo a la siguiente ecuación (para condición seca) :

$$U_{50\%} = U_{50\%RP} (1,35K + 0,35 \cdot K^2)$$

9.2. Fórmula de GALLET LEROY [EDEF]

La tensión:

$$U_{T50\%} = Kg \frac{d \cdot 3400}{8 + d}$$

- d : distancia en metros
- U_{t50} : tensión de impulso para el 50 % de los ensayos
- Kg : coeficiente de configuración

La distancia:

$$d = \frac{8 \cdot U_{T50\%}}{Kg \cdot 3400 - \frac{U_{T50\%}}{Kg}}$$



9.3. **Fórmula de L. PARIS [ENEL]**

Relación para onda de sobretensión standard positiva también IEC 60071

$$U_{T50\%}^+ = Kg \cdot 500 \cdot d^{0,6} \text{ [kV]}$$

Relación para onda negativa

$$U_{T50\%}^- = Kg \cdot 1260 \cdot d^{0,45} \text{ [kV]}$$

9.4. **Fórmula por Norma IEC 60071 .**

Relación para onda de sobretensión atmosférica positiva

$$U_{T50\%}^+ = Kg \cdot 530 \cdot d \text{ [kV]}$$

Relación para onda sobretensión atmosférica negativa

$$U_{T50\%}^- = Kg \cdot 700 \cdot d \text{ [kV]}$$

Relación para onda de sobretensión maniobra positiva

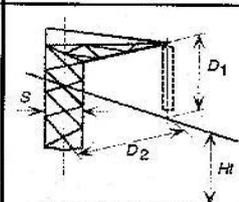
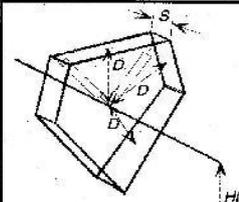
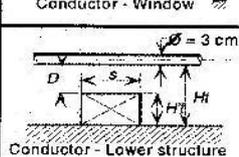
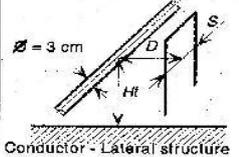
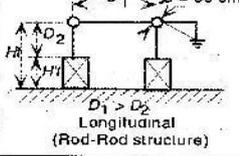
$$U_{T50\%}^+ = Kg \cdot 1080 \cdot \ln(0,46d + 1) \text{ [kV]}$$

]



9.5. Valores de factor de GAPS Kg o K en norma IEC 60071-2

Veamos en la tabla los valores típicos para sobretensión de maniobra fase – tierra.

Gap tipo	parámetros	entorno	valor de referencia
 Conductor - Crossarm	K	1,36 - 1,58	1,45
	D_2 / D_1	1 - 2	1,5
	Ht / D_1	3,34 - 10	6
	S / D_1	0,167 - 0,2	0,2
 Conductor - Window	K	1,22 - 1,32	1,25
	Ht / D	8 - 6,7	6
	S / D	0,4 - 0,1	0,2
 Conductor - Lower structure	K	1,18 - 1,35	1,15 Conductor-Plane 1,47 Conductor-Rod
	H_1 / Ht	0,75 - 0,75	0 0,908
	H_1 / D	3 - 3	0 10
	S / D	1,4 - 0,05	- 0
 Conductor - Lateral structure	K	1,28 - 1,63	1,45
	Ht / D	2 - 10	6
	S / D	1 - 0,1	0,2
 Longitudinal (Rod-Rod structure)	K	1,03 - 1,66	1,35
	H_1 / Ht	0,2 - 0,9	0
	D_1 / Ht	0,1 - 0,8	0,5

Los factores de gaps para geometrías fase – fase se presentan en la siguiente tabla

Configuración	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,33$
Anillo – anillo electrodos suaves	1,80	1,70
Conductores cruzados	1,65	1,53
Punta – punta conductor – conductor	1,62	1,52
Barras soportadas	1,50	1,40
Geometrías asimétricas	1,45	1,36

Coefficiente % de polaridad negativa: $\alpha = U^- / (U^+ + U^-)$



9.6. Correlaciones entre distancias en aire (gap) y tensiones U 50%

Veamos algunos valores de distancias de flambéo calculadas con las fórmulas presentadas anteriormente para $K = 1$ caso punta –plano. Estas son fórmulas empíricas que tienen entornos muy particulares de aplicación y además deben ser los resultados deberán ajustarse para las condiciones de altitud humedad presión y temperatura con las fórmulas de las normas.

Sobretensiones atmosféricas U 50% según IEC 60071

Distancia en mm	Onda positiva kV	Onda negativa kV
150	70	90
250	133	175
800	424	550
920	480	650
2050	1100	1425
2200	1150	1550

Sobretensiones de maniobra U 50% para ondas positivas standard

Distancia en mm	Paris IEC 60071 kV	Paris IEC 60071 Strd kV	Galet-Leroy kV
950	390	485	378
1000	426	515	394
1500	567	638	537
2000	705	758	680
3300	997	1023	993
3500	1036	1060	1035
3900	1110	1150	1114

Tensiones a frecuencia industrial valores de V 50% en r.m.s. según IEC 60071

Distancia en mm	kV
270	80
430	138
700	230
1080	350
1680	525

9.7. Sobretensiones resistidas por una distancia en aire

Correlación para la onda de impulso atmosférico normalizada, la tensión soportada por una distancia en aire según IEC 60071/2 Tabla A1

Pico de la onda de tensión soportada kV	Mínima distancia varilla – estructura mm	Mínima distancia conductor – estructura mm
60	90	-
95	160	-
170	320	-
450	900	-
550	1100	-
650	1300	-
950	1900	1700
1300	2600	2400
1425	2850	2600
1550	3200	2900

Para las tensiones fase – fase es aplicable la mínima distancia entre varilla – estructura.

Para fase Tierra son aplicables las mínimas distancias de conductor estructura metálica y punta estructura metálica
El impulso atmosférico normalizado es aplicable tanto para fase tierra como para fase - fase



Correlación para la onda de maniobra normalizada, la tensión soportada por una distancia en aire fase – tierra IEC 60071/2 Tabla A2

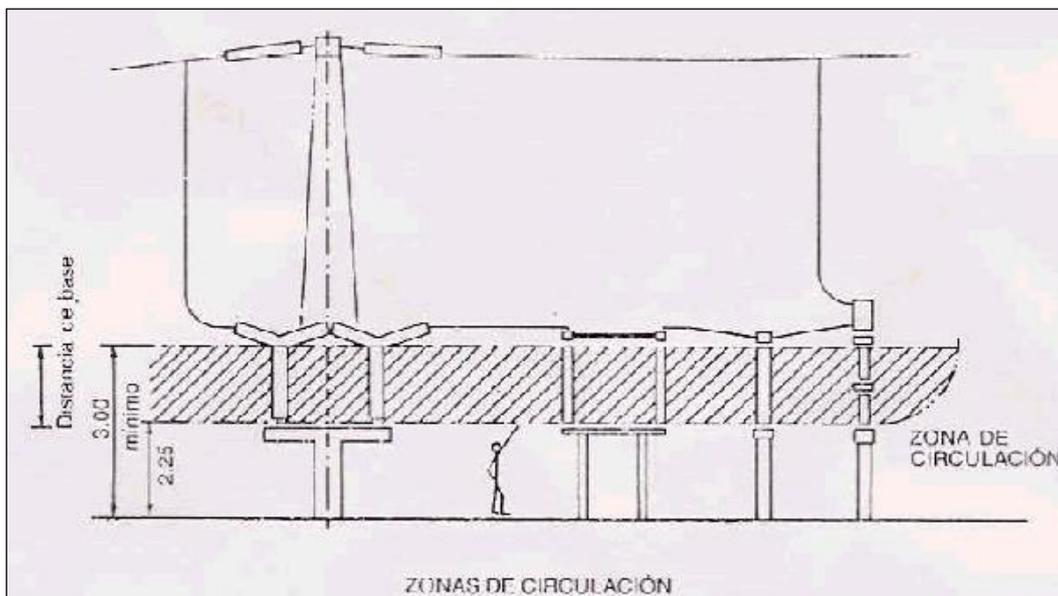
Pico de la onda de tensión soportada kV	Mínima distancia varilla – estructura mm	Mínima distancia conductor – estructura mm
750	1600	1900
950	2200	2900
1050	2600	3400
1175	3100	4100
1300	3600	4800

Correlación para la onda de maniobra normalizada, la tensión soportada por una distancia en aire fase - fase. 60071/2 Tabla A3

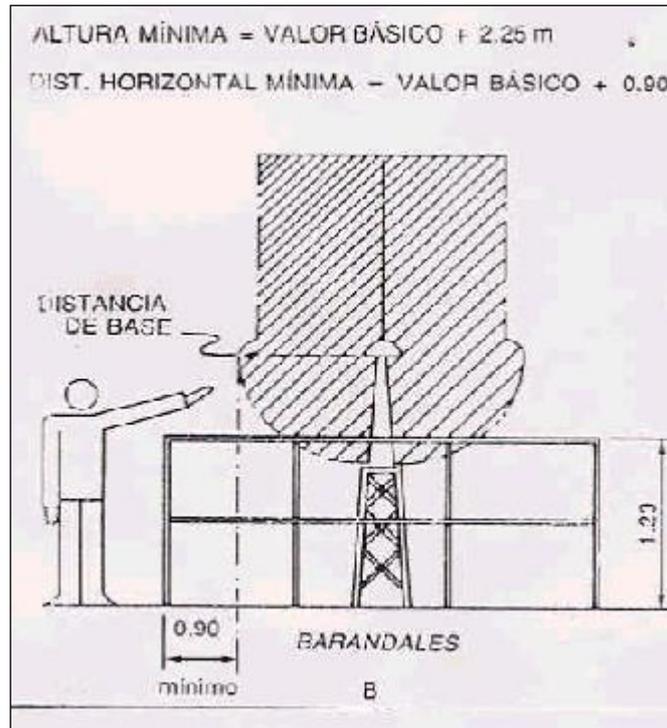
Pico de la onda de tensión soportada kV	Mínima distancia – conductor paralelo mm	Mínima distancia varilla - conductor
1125	2300	2600
1425	3100	3600
1575	3600	4300
1680	3900	4600
1760	4200	5000

9.8. Aislamiento de seguridad para partes energizadas

El aislamiento de seguridad es el medio que existe entre la parte conductora energizada y las zonas o partes que pueden ser accesibles a las personas.



Las partes energizadas deberán permanecer fuera del alcance de las personas por esto las distancias de seguridad deberán ser lo suficientemente amplias, como para evitar la descarga en aire, incluso con algún acercamiento casual o involuntario de las personas o de algún elemento sostenido por esta veamos la gráfica de las zonas de acercamiento y circulación.



9.9. Distancias de seguridad

Las distancias mínimas para lograr el aislamiento de seguridad en una estación transformadora medio que existe entre las partes conductoras energizadas y las áreas de circulación que serán ser accesibles a las personas.

Las Distancias en general están regidas por las distancias mínimas estipuladas para cada nivel de tensión en la ley 19587 y su Dec. Reglamento 351/79, a estas distancias se le adicionan márgenes según la el lugar y modo donde serán utilizadas.

Estas distancias (DA) están compuestas por dos longitudes y en la Norma IEC 61472 Live Working Minimum Approach Distances Method of Calculation se las han especificado convenientemente mediante la expresión:

$DA = DU + DE$ Donde DU es la mínima distancia eléctrica necesaria para obtener U_{90%}

Y DE es la distancia ergonómica que va desde 0,2 a 1 metro tomando el valor de 60 cm como el más usual

Presentamos también aquí las propuestas para la reglamentación de la AEA del reglamento de construcción de EE TT.

Tensión nominal en (kV)	Mínima distancia Fase - tierra (m)	Distancia horizontal (m)	Distancia vertical (m)	Dis. Paso vehicular (m)
13,2	0,80			
33	0,80	1,70	3,05	6,50
132	1,50	2,40	3,75	7,00
220	2,10	3,00	4,35	7,50
330	2,90	3,80	5,15	8,50
500	3,60	4,50	5,85	10,00

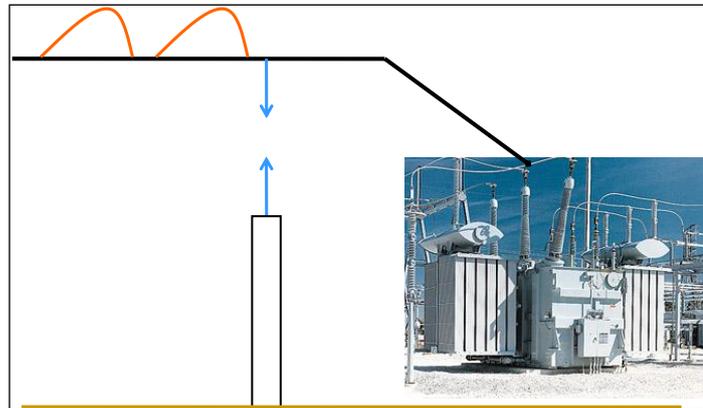


10. PROTECCIÓN DE EQUIPOS CONTRA SOBRETENSIONES

10.1. Explosores en aire:

Las posibilidades de tener intercalado en un circuito un elemento que descargue a partir de un nivel determinado de tensión y que su aislación sea reconstituida luego de la descarga, se presenta como el método más sencillo y económico para la protección contra las sobretensiones ya estudiadas.

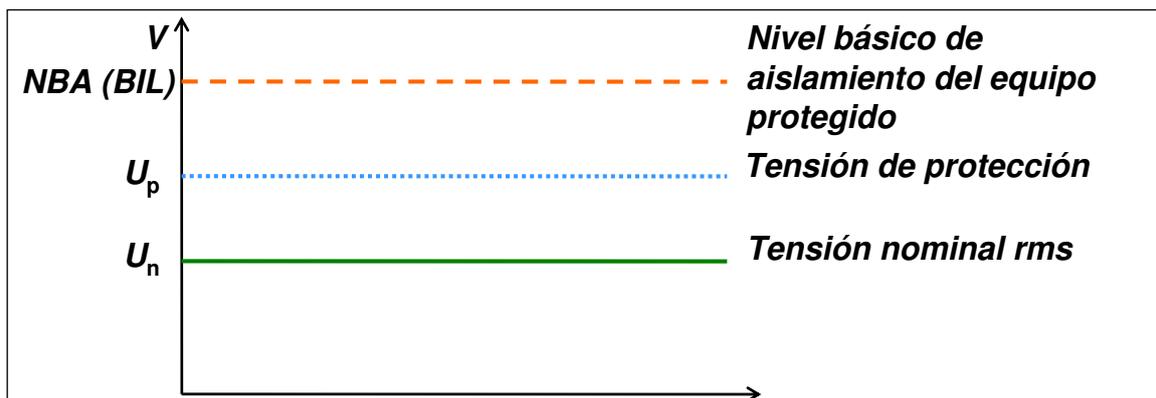
Esquema de funcionamiento



El inconveniente reside en la gran dispersión del valor de descarga y además, en que cada vez que se produce esta, se pierde el servicio, en la mayoría de los casos al despejar los interruptores el cortocircuito que se ha formado en el explosor, otro inconveniente económico es la necesidad de un "Nivel de aislamiento" relativamente alto para el resto de la instalación.

10.2. Protección ideal contra S. T.

La figura representa gráficamente la expresión más general contra sobretensiones. Es decir que a partir de un Nivel Básico de Aislamiento (NBA ó BIL), todas las sobretensiones, se deberán reducir a un Nivel básico de protección determinado que será inferior al NBA



Son diversas las técnicas conocidas para lograr el efecto deseado por la protección de sobretensión:



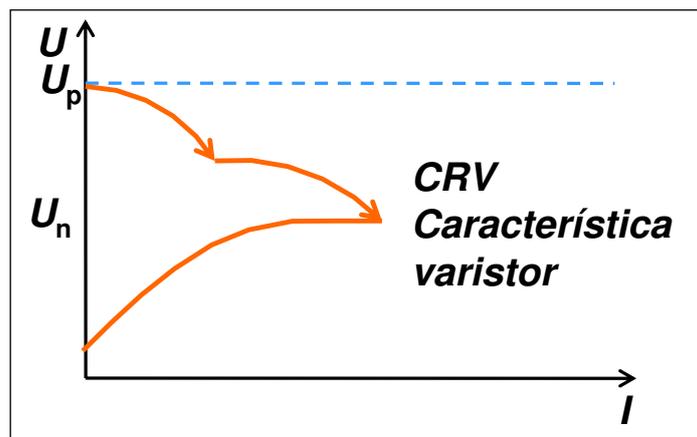
10.3. Convencionales.

En el sistema convencional se combinan los explosores, que se usan en serie a los efectos de lograr un módulo de fabricación, con variantes de carbono de silicios (CS), los que también conectados en serie limitan la corriente subsiguiente que deriva el descargador luego de la descarga y sometido a la tensión de servicio.

La corriente reducida y la subdivisión de los explosores permiten que en su paso por cero se pueda extinguir el arco.

El descargador de explosores planos es de funcionamiento simple ya que se subdivide el arco en varios explosores de un varistor (Resistencia variable que aumenta su valor por el paso de la corriente, esto ayuda al apagado del descargador)

Descargadores de explosores planos D.E.P.

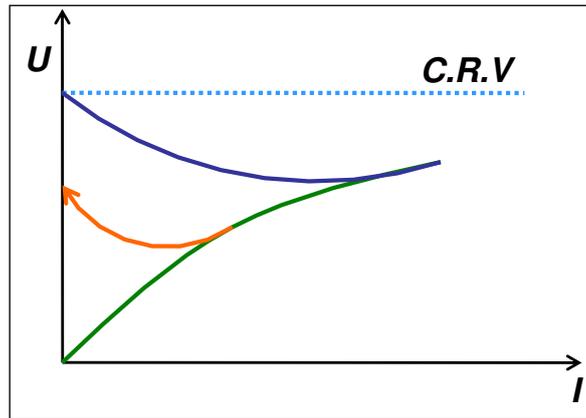


Respuesta eléctrica

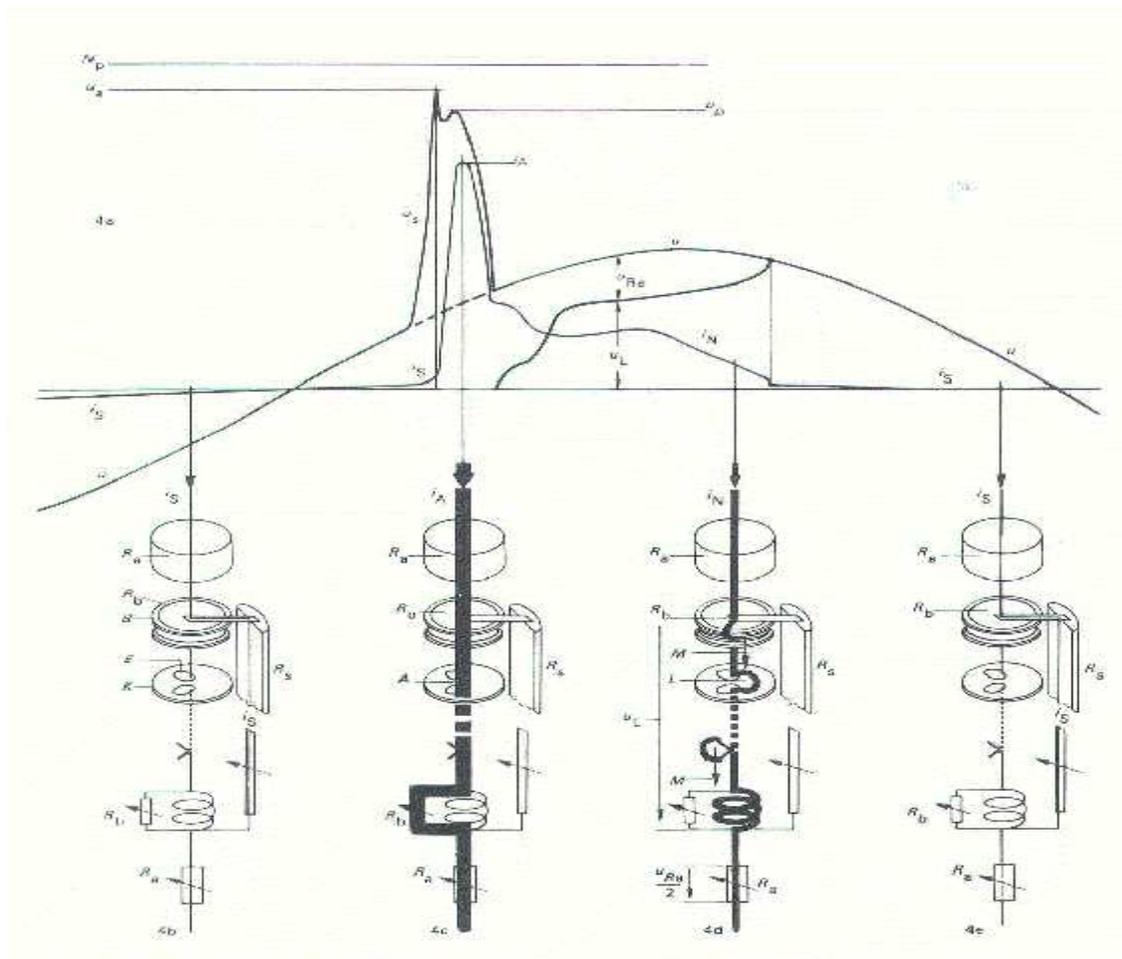
Descargadores de explosores activos D.E.A. (de soplado magnético)

Fueron desarrollados para funcionar con un nivel de protección más reducido y un mayor poder de absorción energética. Se usa en altas tensiones y el funcionamiento es simple, se trata de alargar el arco eléctrico de cada explosor haciendo abrazar un flujo magnético producido por la propia corriente, apareciendo una tensión opuesta que puede apagar el arco antes de su paso por cero.

Diagrama U I de funcionamiento



Respuesta eléctrica

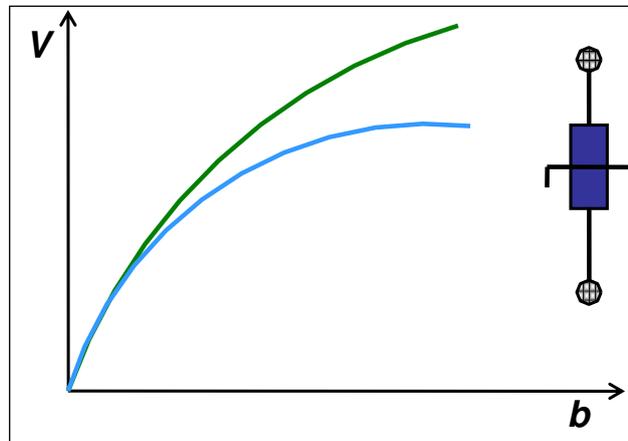


Vemos que la característica del descargador de electrodos activos se asemeja más al descargador ideal, en el gráfico se presenta la secuencia de funcionamiento durante la operación de descarga y de apagado de la corriente.

10.4. Descargador de óxidos metálicos "DEVOM".

Estos descargadores se basan en la utilización del material cerámico formado por óxidos de zinc, de bismuto y cobalto de característica de corriente muy alinéales $\alpha > 20$. En la expresión $R = \alpha \cdot U$, α coeficiente de alinealidad.

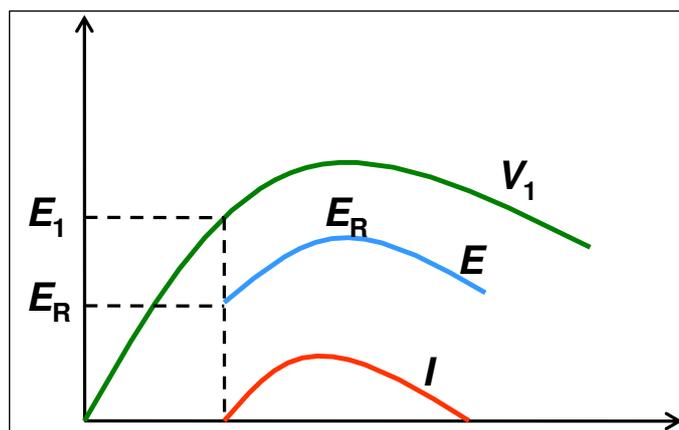
Estas resistencias anómalas también podrían funcionar con explosores en serie para interrumpir el arco y la circulación de corriente es mínima.



CSI: corriente subsiguiente de interrupción

- Ventajas de esta nueva tecnología, actualmente se pueden mencionar:
- Nivel de protección definido con mayor exactitud y repetitividad.
- Menor margen de seguridad, lo que implica reducción del BIL y SIL del equipamiento.
- No existe corriente subsiguiente ni transitorio de su interrupción
- Menor tamaño por no poseer explosores y mayor capacidad de absorción de energía.
- Frente de onda "suavizado". Supresión de transitorios

Evolución temporal de las tensiones

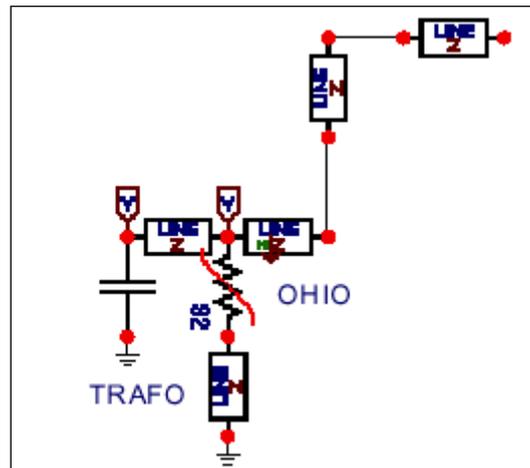


- E_1 : tensión de cebado [E_1]
- E : tensión en terminal del descargador
- E_R : tensión residual (es la remanente una vez actuado. $E_R = f(I)$)
- T_c : tiempo de cebado

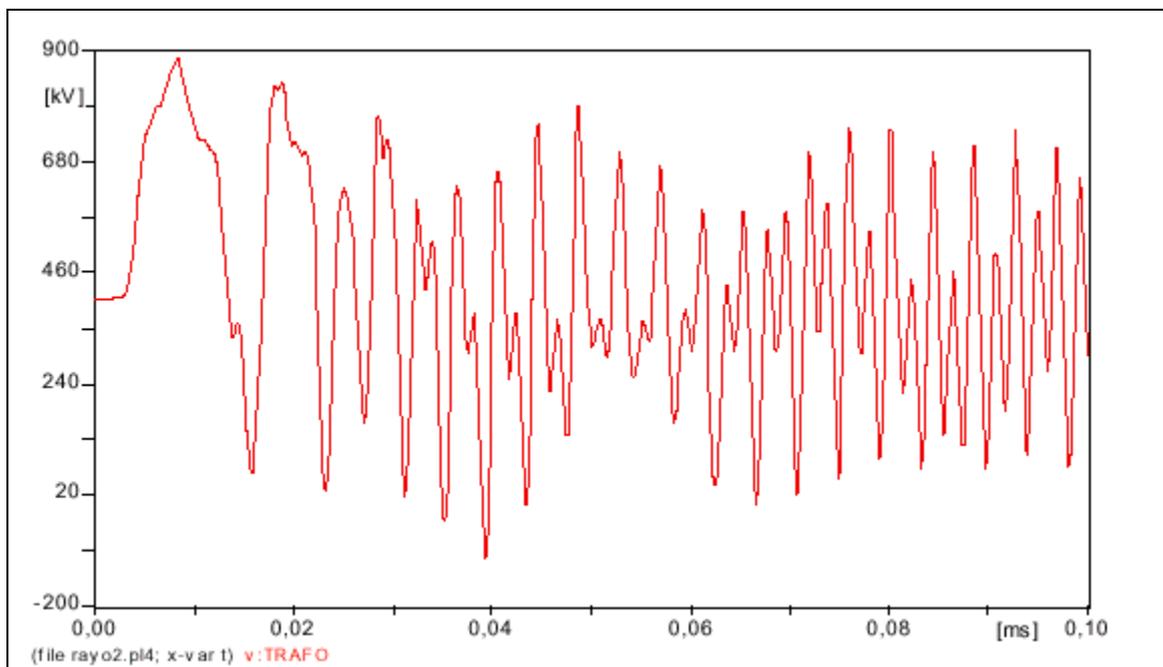


10.5. Comparación de funcionamiento de descargadores DEA-DEVOM

Esquema de la zona en estudio para Descargador autovalvular DEA con carburo de silicio CSi

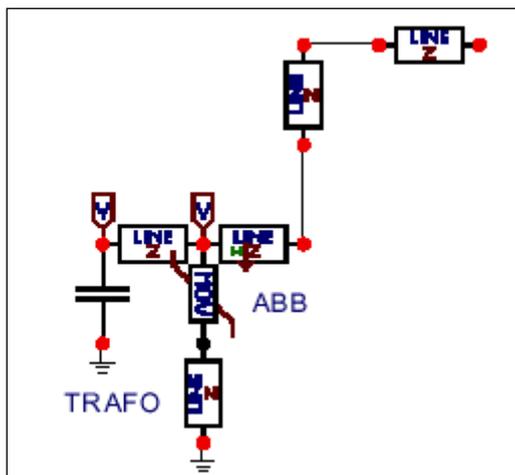


Respuesta de la tensión sobre un Transformador de Potencia

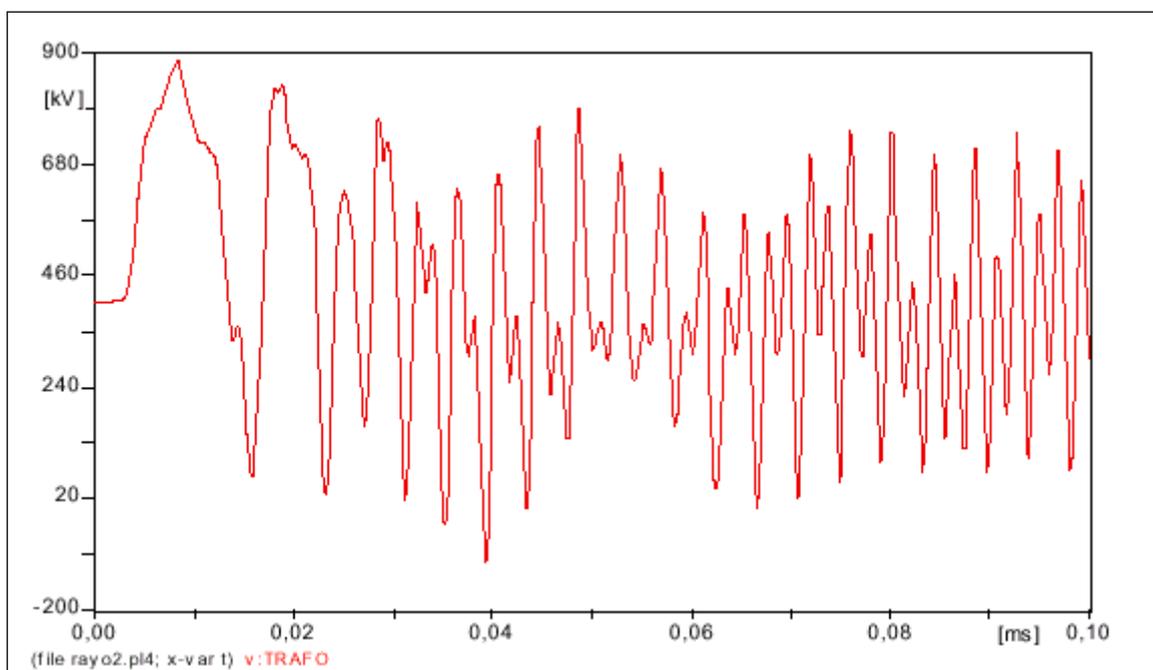




Esquema de la zona en estudio para Descargador de óxido de Zing ZnO₂



Respuesta de la tensión sobre un Transformador de Potencia





11. DIMENSIONAMIENTO DE LA PROTECCIÓN CONTRA LAS SOBRETENSIONES.

Para establecer las condiciones extremas de uso se deben determinar las mismas en función de los datos del sistema eléctrico según las sobretensiones más probables.

11.1. Datos del sistema.

- **Tensión nominal máxima, U_{nm} .**

Es el máximo voltaje de operación, se toma entre el 5 al 10% en función de la tensión nominal de línea. U_n (fase y fase).

$$U_{nm} = (1,05 \text{ a } 1,10) \cdot U_n$$

- **Sobretensión de maniobra.**

- Vista en el capítulo 7

- **Sobretensión atmosférica.**

- Vista en los capítulos 5 y 6

- **Impedancia de onda. Z_o [Ω]**

Parámetro propio de la característica de las líneas consideradas que llegan a la estación transformadora un frente de onda, solo una de las fases.

- **Sobretensión temporaria para fallas a tierra, U_{st} .**

Es una condición muy común y analiza la sobretensión esperada en el descargador durante el tiempo en que está presente la falla a tierra y ésta depende de las condiciones de puesta a tierra del sistema.

El gráfico representa la U_{st} . En valor de (P.U.) en el lugar de la falla para sistema directo a con falla monofásica.

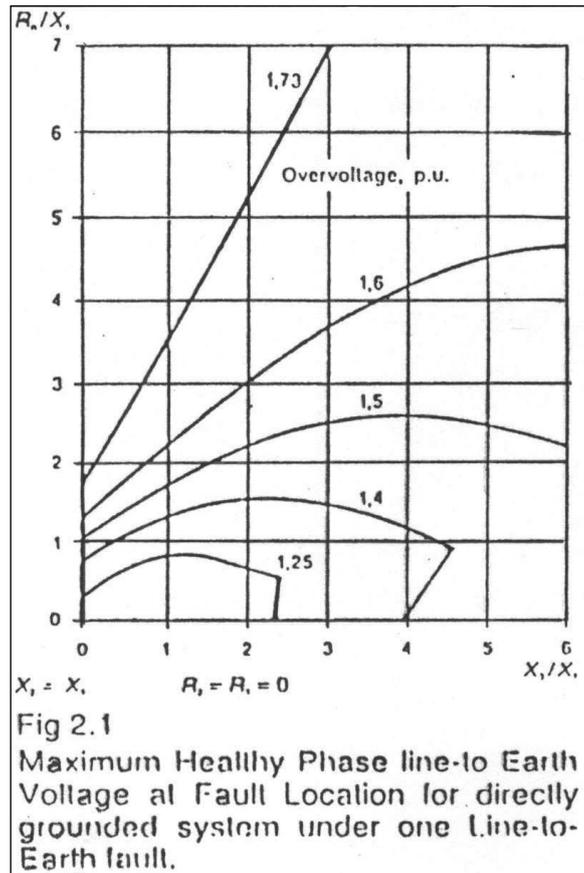
Aproximación: En sistemas conectados directos a tierra Se pueden tomar:

$$U_{st} = 0,8 \times U_n = 1,4 \frac{U_n}{\sqrt{3}}$$

En estos casos se toma como tiempo de duración de falla en AT y 10 seg. en MT

- **Tiempo de la sobretensión.**

Se estima en función de las protecciones que actúan durante las fallas en EAT se puede tomar 0,6 o 0,8 seg.



11.2. Datos de la instalación.

- **BIL- Nivel básico de aislación.**

Es la sollicitación soportada por el equipamiento cuando se aplica una sobretensión atmosférica. Se usan 2 valores típicos para un mismo tipo de onda que generalmente es 1,2/50 μ s. Los valores son uno para la aislaciones reconstituibles de equipos y otros algo inferiores para máquinas cuya aislación es más costosa.

Ejemplo: transformadores de potencia.

- **SIL-Nivel básico de aislación.**

Es la sollicitación soportada por el equipo por sobretensión de maniobra cuando se aplica una onda que tiene una mayor duración, puede ser: 250/2500 (onda normalizada).

- **Otros datos.**

- Valor de tensión deportada U_n , U_w , $U_{m\acute{a}x}$ de la cadena tipo de la línea.
- Distancia de Acercamiento a la Estación Transformadora.
- Distancia geométricas entre equipos en el interior de la estación.
- Distancia de seguridad para personas y equipos.

11.3. Datos del Descargador.

- **Tipo de descargador**

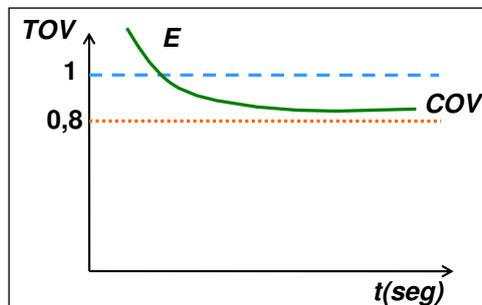
- (Visto en cap. 10) (DEP - DEA - DEVOM.)

Tensión de Operación continua "C.O.V." Se pueden presentar curvas que representan estas características en función de COV.



$$TOV_E = K_E \cdot COV$$

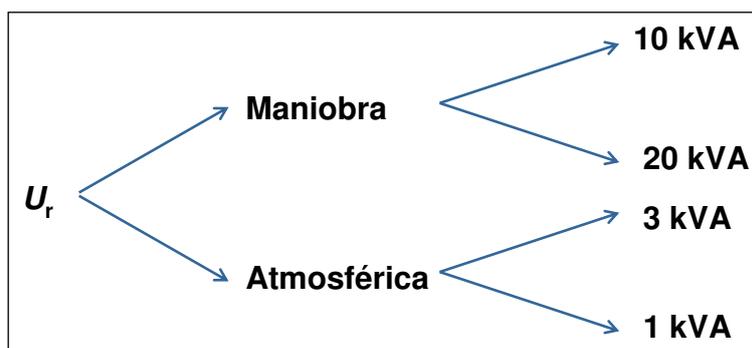
- KE: factor de falla a tierra
 - sist. directo K = 1,4
 - sist. indirecto K = 1,73



- **Valor de la tensión residual, U_r .**

Es el valor de tensión que se tiene en bornes del descargador al operar en condiciones de descarga, según sean estas del tipo Atmosférico ó Maniobra con forma de onda normalizada.

Ejemplo: para DEP y DEA.



- **Capacidad energética, [kJ].**

Es la capacidad del descargador para producir la disipación total de la energía absorbida. Sin fallas internamente el valor se da en Watt-Seg o en Joules.

- **Capacidad Energética Específica, kJ/kV.**

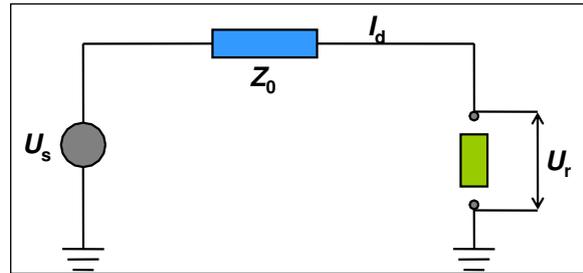
Es el valor antes citado pero dividido por la tensión nominal del descargador que lo divide, los valores comunes pueden llegar, según su tipo:

- DEP → 1,5 kJ/kV
- DEA → 6 kJ/kV
- DEVOM → 15 kJ/kV

11.4. Verificaciones de la aplicación.

11.4.1. Corriente de descarga y tensiones residuales.

Aplicando el teorema de Thevenin equivalente, se puede determinar la corriente de descarga y la tensión residual, tanto para sobretensiones de maniobra como atmosférica.



$$U_r = U_s - I_d \times Z_0$$

Donde:

- I_d = corriente de descarga.
- U_s = sobretensión (de maniobra U_{sn} o atmosférica U_{sa}).
- U_r = tensión residual.
- Z_0 = impedancia de onda de la línea.

11.4.2. Energía absorbida por el descargador

Para verificar la capacidad térmica se deberá regular la verificación de la energía eléctrica absorbida durante la actuación del descargador.

$$W = U_r \cdot I_d \cdot T_d = \frac{U_s - U_r}{Z_0} U_r \cdot T_d$$

- T_d : es el tiempo de descarga.

Si se desea obtener en términos de energía específica en términos de Joule por Volt a tensión nominal (U_n), se divide por la U_n .

$$w = \frac{W}{U_n} \quad [\text{kJ/kV}]$$

$$[\text{kJ/kV}]$$

11.4.3. Energía absorbida por sobretensiones de maniobra.

En este caso utilizamos como tiempo de descarga el correspondiente al tiempo que demora la onda en ir de un extremo a otro de la línea y regresar al origen dónde se descargará. Tiempo de descarga es:

$$T_d = \frac{2 \cdot l}{v}$$

- l = Long. de la línea.
- v = Velocidad de onda.

11.4.4. Energía absorbida por sobretensiones Atmosféricas.

En este caso se toma el tiempo equivalente de la corriente de descarga de la onda normalizada.

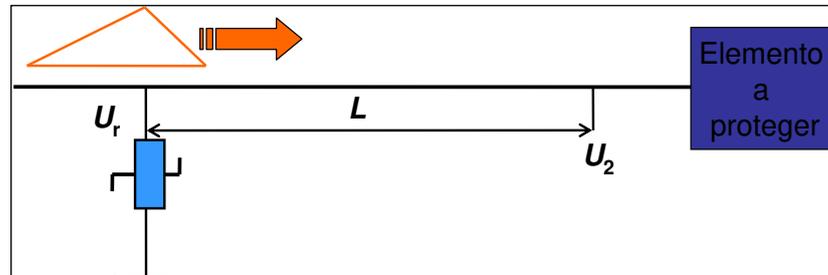
Ejemplo: $1,2/50\mu s$ t_1/t_2

$$T_d = 2 \cdot t_2 = 2 \cdot 50\mu s = 0,1\mu s$$

11.5. Diseño de la instalación.

11.5.1. Distancia de protección

Según el margen de seguridad adoptado debemos fijar cual es la distancia entre el descargador y el elemento protegido.



El voltaje en el objeto protegido será:

$$U_2 = U_r + \frac{2 \cdot S \cdot L}{v}$$

- U_r = voltaje residual
- S = deriv. Del frente de onda, 1000 kV/ μ s
- v = velocidad de la onda 300000 km/seg. l = distancia en metros
- L : distancia en metros del descargador al elemento a proteger

11.5.2. Distancia máxima para la ubicación del descargador

Si tomamos a U_2 igual al BIL o al SIL de la aislación del EQUIPO y si $U_r = U_{rsa}$ tensión residual atmosférica para el funcionamiento estudiado, en esta situación la distancia L es igual:

$$L = \frac{BIL - U_{rsa}}{2 \cdot S} \cdot v$$

Expresión simplificada en media tensión:

$$L_{m\acute{a}x} \leq (NA - \alpha \cdot NP) \cdot \frac{18}{U_{m\acute{a}x}}$$

$\alpha = 1,4$ para 24 kV o 36 kV

- NA : Nivel de aislamiento del equipo.
- NP : Nivel de protección del pararrayos.

11.5.3. Márgenes de protección.

El margen mínimo de protección que se considera adecuado debe ser mayor del 20% según la sobretensión sea de maniobra ó atmosférica respectivamente.

Definimos, el margen de protección para cada tipo de subestación:

$$L = \frac{BIL - U_{rsa}}{2 \cdot S} \cdot v$$

Expresión simplificada en media tensión:



$$L_{m\acute{a}x} \leq (NA - \alpha \cdot NP) \cdot \frac{18}{U_{m\acute{a}x}} \quad \text{según Ures.}$$

$$\text{Equipamiento. } M_{gen_equipo} \% = \frac{V_{equipo} - U_{rdesc}SIL - U_r}{U_{rdesc}} \times 100$$

Los márgenes de protecciones usuales son:

- 20% o más para aislaciones no reconstituibles
- 10% o más para aislaciones reconstituibles

Nivel de aislamiento al impulso de rayo para diferente número de aisladores estándar Aisladores de 254· mm (10·5 ¾ plg).y diferentes altitudes sobre el nivel del mar. (Sin considerar el efecto de humedad). NBI = 0,961·VCF.

NUMERO DE AISLADORES	VCF kV (1)	NBI kV (2)	NBI (kV) corregido por altitud			
			Metros sobre el nivel del mar			
			0-500	501-1500	1501-2500	2501-
1	125	120	112	99	87	79
2	255	245	229	203	179	162
3	345	331	310	274	242	220
4	415	398	372	330	291	265
5	495	475	445	394	348	316
6	585	562	526	466	411	374
7	670	643	602	533	471	428
8	760	730	684	605	535	486
9	845	812	760	673	595	540
10	930	893	836	741	654	594
11	1015	975	913	809	714	649
12	1105	1061	994	880	777	706
13	1185	1138	1066	944	834	757
14	1265	1215	1138	1008	890	809
15	1345	1292	1210	1072	947	860
16	1425	1369	1282	1136	1003	911
17	1505	1446	1354	1200	1059	963
18	1585	1523	1427	1264	1116	1014
19	1665	1600	1499	1328	1172	1065
20	1745	1676	1570	1391	1228	1117
21	1825	1753	1642	1454	1284	1167
22	1905	1830	1714	1518	1341	1218
23	1985	1907	1786	1582	1397	1270
24	2065	1984	1859	1646	1454	1321
25	2145	2065	1934	1713	1513	1375
26	2220	2133	1998	1770	1563	1420
27	2300	2210	2070	1834	1619	1471
28	2375	2282	2138	1894	1672	1521

Las columnas (1) y (2) dan valores en condiciones estándar de presión barométrica y temperatura a las cuales se pueden referir los cálculos.



Veamos Ahora en la tabla las distintas tensiones resistidas normalizadas en frecuencia industrial e impulso atmosférico para el equipamiento en función de las propias tensiones nominales hasta 245 kV

Tabla de norma IEC 60071.

Tensión máxima para el Equipamiento Um [kV] (Valor eficaz)	Tensión resistida de corta duración a frecuencia industrial nominal. [kV] (Valor eficaz)	Tensión resistida de impulso Atmosférico nominal.[kV] (Cresta)
3,6	10	20
		40
7,2	20	40
		60
12	28	60
		75
		90
17,5	38	75
		95
24	50	95
		125
		145
36	70	145
		170
52	95	250
72,5	140	325
123	(185)	450
	230	550
145	(185)	(450)
	230	550
	275	650
170	(230)	(550)
	275	650
	325	750
245	(275)	(650)
	(325)	(750)
	360	850
	395	950
	460	1050

Los valores entre parentesis no son recomendados deben hacerse ensayos para utilizarlos



Veamos Ahora en la tabla las distintas tensiones resistidas normalizadas en frecuencia industrial e impulso atmosférico y de maniobra para el equipamiento en función de las propias tensiones nominales.

Tabla II para Grupo II para equipamiento de 245 hasta 765 kV de Tensión máxima Norma IEC 60071.

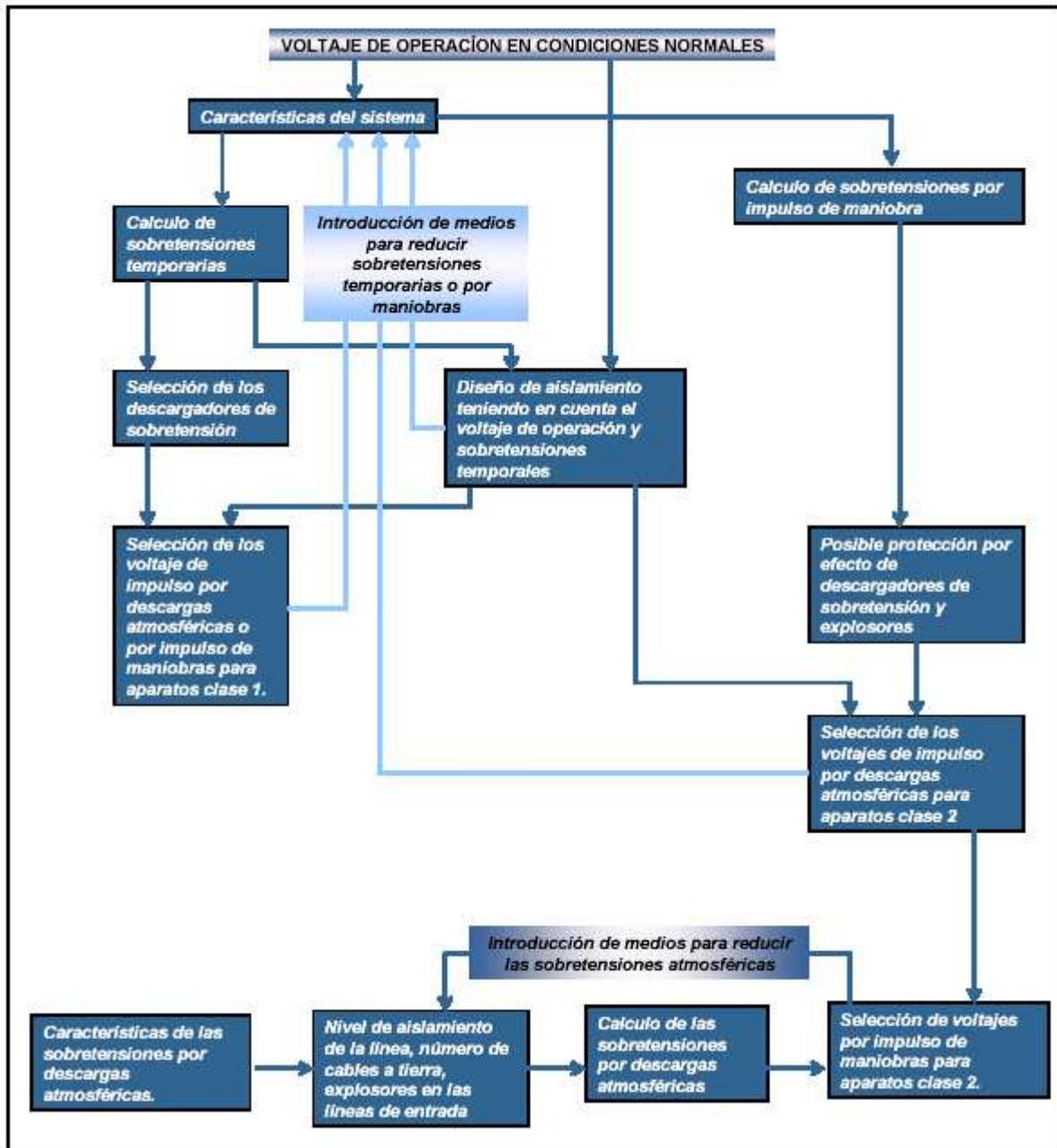
Tensión máxima para el Equipamiento Um [kV] (Valor eficaz)	Tensión resistida de impulso de maniobra nominal			Tensión resistida de impulso atmosférico nominal. [kV] (Cresta)
	Aislación longitudinal (nota 1) [kV] (Cresta)	Fase a tierra [kV] (Cresta)	Fase a fase (Relación con el valor de cresta de fase a tierra)	
300	750	750	1,50	850 950
	750	850	1,50	950 1050
362	850	850	1,50	950 1050
	850	950	1,50	1050 1175
420	850	850	1,60	1050 1175
	950	950	1,50	1175 1300
	950	1050	1,50	1300 1425
525	950	950	1,70	1175 1300
	950	1050	1,60	1300 1425
	950	1175	1,50	1425 1550
765	1175	1300	1,70	1675 1800
	1175	1425	1,70	1800 1950
	1175	1550	1,60	1950 2100





APENDICE

DISEÑO Y COORDIANCIÓN DE AISLAMIENTO





Bibliografía y Referencias

- Ref.1 (W.G.) ITALIAN ELECTOTECNICNICAL COMITEE Part.I – Lighting Courent Parameters.
- Ref.2 CIGRE 1980 Session 33-3.- Some aspects of the evaluatiónof Lighting Perfomace of Electrical Systems Cortina, Garbagnatti y otros.
- Ref.3 (W.G.) ITALIAN ELECTOTECNICNICAL COMITEE Part.III – Lighting Protective Systems Air Teminations.
- Ref.4 SHELDDING FAILURE EVALUATION– Coloquium Insulation .Coordination (WG 33) 6 10th june 1983 L. Deller, E. Garbagnati, A Pigni.
- Ref.5 STUDIO DEL COMPOTAMIENTO AL FULMINE DI LINEE DE TRASMISSIONE PER LA VALUTAZIONE DELLA LORO A FIABILITA – L. Deller, E. Garbagnati.
- Ref.6 CORONA AND IT´S IMPACT ON ATENUATION ON TRAVELERS WAVES – ENEL - CESI L. Deller, E. Garbagnati, A Pigni.
- Ref.7 STUDIO DEL COMPOTAMIENTO AL FULMINE DI LINEE DE TRASMISSIONE PER LA VALUTAZIONE DELLA LORO AFFIABILITA– C Cecchi, L. Deller, E. Garbagnati (1987).
- Ref.8 SHELDDING FAILURE EVALUATION ALICATION LUDER PROGRESSION– L. Deller, E. Garbagnati.
- Ref.9 Norma I.E.C. 60071, Anexo F (informativo)
- Ref.8 Norma IRAM 22 11, Parte II Mayo1988
- Ref.10 Norma I.E.C. 60071, Anexo E (informativo)