



ACTIVO F.L.I.O. 155037

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

**“Selección de Aislación en las Estructuras de
Lineas de Transmisión”**

TESIS DE GRADO

**Previa a la Obtención del Título de
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: POTENCIA

Presentada por:

HECTOR ANTONIO PLAZA VELEZ

Guayaquil - Ecuador
1.985

AGRADECIMIENTO

*Al Ing. ADOLFO SALCEDO GUERRERO,
Director de Tesis, por su ayuda y
colaboración para la realización
de este trabajo.*

*A la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL
LITORAL, por los conocimientos entregados
por el personal docente de la Facultad de
Ingeniería Eléctrica a mí persona.*

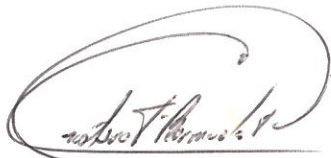
DEDICATORIA

A MIS PADRES

A MIS HERMANOS

A MIS COMPANEROS

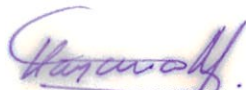
A MIS AMIGOS POLITECNICOS



.....
Ing. Gustavo Bermúdez Flores
SUB-DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



.....
Ing. Adolfo Salcedo Guerrero
DIRECTOR DE TESIS



.....
Ing. José Layana C.
MIEMBRO PRINCIPAL

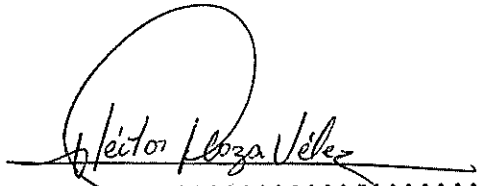


.....
Ing. Jorge Flores M.
MIEMBRO PRINCIPAL

DECLARACION EXPRESA

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL".

(Reglamento de Exámenes y Título profesionales de la ESPOL).


.....
HECTOR ANTONIO PLAZA VELEZ

RESUMEN

El conocimiento de la magnitud de las sobretensiones que pueden producirse en un sistema eléctrico de potencia sean éstos de origen externo o interno, nos permite el tomar las medidas adecuadas para proteger los equipos y dispositivos del sistema, asegurando de esta manera la continuidad de servicio al usuario.

Con el presente trabajo se ha pretendido dar una respuesta a la importancia que tiene el tema en los sistemas de potencia de alta tensión, desde el punto de vista de la selección de las estructuras y de las líneas de transmisión.

A medida que los sistemas eléctricos transmiten mayores bloques de energía se hace necesario controlar el número de interrupciones del sistema o parte de él.

Las salidas debidas a descargas atmosféricas, constituyen un buen porcentaje de las salidas totales de una línea de transmisión.

El problema planteado es entonces conocer el comportamiento de una línea de transmisión considerando estos factores mencionados.

INDICE GENERAL

	<u>Pág.</u>
RESUMEN	VI
INDICE GENERAL	VII
INDICE DE FIGURAS	XII
INDICE DE TABLAS	XIX
INTRODUCCION	20
 CAPITULO I	
CRITERIOS BASICOS PARA DETERMINAR LA AISLACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION	
	24
1.1 Factores de diseños de líneas protección inherente	24
1.2 Aislación en la estructura	29
1.3 Aislación en el vano	30
1.4 Aislación y espaciamiento	37
1.4.1 Nivel básico de aislamiento	37
1.4.2 Características de descargas disruptivas	45
1.4.3 Descarga directa a la torre	67
1.4.4 Descarga al punto medio del vano	71
1.4.5 Aislamiento mínimo para líneas	77
1.4.6 Coordinación del espaciamiento con el nivel de aislamiento	79
 CAPITULO II	
PROTECCION CONTRA LAS SOBRETENSIONES	87
2.1 Generalidades	87
2.2 Sobretensiones de origen atmosférico	89
2.3 Sobretensiones de origen interno	92

	<u>Pág.</u>
2.3.1 Sobretensiones a la frecuencia industrial . . .	94
2.3.2 Sobretensiones debidas a la apertura de los interruptores	95
2.3.3 Sobretensiones de puesta a tierra	97
2.3.4 Sobretensión de puesta en servicio de una línea	98
2.3.5 Cambio de características del circuito	101
 CAPITULO III	
EFFECTOS DE LOS AISLADORES EN LAS LINEAS DE TRANSMISION	105
3.1 Generalidades	105
3.2 Clasificación de los aisladores empleados en las líneas eléctricas aéreas	111
3.2.1 Por su constitución	111
3.2.2 Por su aplicación	112
3.2.3 Por el lugar de instalación	112
3.2.4 Por su forma y características especiales	115
3.2.5 Por su acabado	115
3.3 Características que definen un aislador	123
3.3.1 Línea de fuga	123
3.3.2 Distancia disruptiva	124
3.3.3 Tensión de corona	124
3.3.4 Tensión disruptiva en seco o a la frecuencia normal	124
3.3.5 Tensión disruptiva bajo lluvia a la frecuencia normal	126
3.3.6 Tensión disruptiva con ondas de sobretensión de frente recto	126

	<u>Pág.</u>
3.3.7 Tensión de perforación * * * * *	127
3.4 Influencia de la contaminación sobre los aisladores	128
3.4.1 Efecto sobre el depósito contaminante en los aisladores * * * * *	129
3.5 Efecto de la configuración de las cadenas * * * *	136
3.5.1 Efecto sobre la tensión de descarga * * * *	136
3.5.2 Cadena horizontal * * * * *	137
3.5.3 Cadena vertical * * * * *	138
3.5.4 Cadena en V * * * * *	138
3.6 Aisladores de suspensión * * * * *	139
3.6.1 Tipos de aisladores de suspensión * * * *	143
3.6.2 Reparto de potencial en una cadena de aisladores de suspensión * * * * *	144
3.6.3 Dispositivos de protección de los aisladores de suspensión * * * * *	149
 CAPITULO IV	
EFECTOS PRODUCIDOS EN LAS LINEAS DEBIDO A LAS DESCARGAS	
ATMOSFERICAS * * * * *	154
4.1 Descargas atmosféricas * * * * *	154
4.2 Probabilidad de descargas atmosféricas * * * *	158
4.3 Formación de cargas en las nubes * * * *	160
4.4 Carga y potencial en la nube * * * *	163
4.4.1 De la tensión * * * * *	165
4.4.2 De la corriente * * * * *	174
 CAPITULO V	
PUESTA A TIERRA Y ARCOS ELECTRICOS * * * *	
	180

	<u>Pág.</u>
5.1 Generalidades	180
5.2 Objetivo de una puesta a tierra	181
5.3 Requisitos de una puesta a tierra	184
5.4 Determinación de la resistividad del suelo	186
5.5 Enclavamiento de tierras	192
5.6 Toma equilibrada de tierras	204
5.7 El arco eléctrico	208
5.7.1 Interrupción de una corriente alterna	209
5.7.2 Influencia de las características del circuito interrumpido sobre el voltaje de restablecimiento	215
5.7.3 Desconexión de líneas en vacío	217
 CAPITULO VI	
PROTECCION POR CONDUCTORES AEREOS DE TIERRA	220
6.1 Generalidades sobre los conductores a tierra	220
6.2 Protección de campo : Generalidades	221
6.3 Protección del campo : Método de Peek	225
6.4 Distancia entre conductores de fases y conductores de tierra	226
 CAPITULO VII	
PROCEDIMIENTO GENERAL PARA SOLICITACIONES DE LA AISLACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION DE 138 KV	232
7.1 Sobrevoltaje a frecuencia nominal de transmisión	232
7.2 Sobrevoltaje de maniobra	233
7.3 Sobrevoltajes de origen atmosférico	235
7.4 Contaminación atmosférica	235
7.5 Condiciones meteorológicas	236

	<u>Pág.</u>
7.6 Aislación en la estructura	238
7.7 Distancias mínimas a la estructura	238
7.8 Protección contra descargas atmosféricas	240
7.9 Aislación en el vano	242
7.9.1 Distancia entre fases	242
7.9.2 Distancia entre conductores y cables de guardia	243
7.9.3 Distancia horizontal entre cables de guardia	243
7.9.4 Distancias mínimas del conductor al suelo	244
7.9.5 Distancias mínimas en cruces con líneas de comunicación o de potencia	247
7.9.6 Distancias mínimas a otras líneas de transmisión	248
7.10 Cálculo de una línea de transmisión de 138 KV	249
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	258
BIBLIOGRAFIA	262

INDICE DE FIGURAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.1	Disposición del alambre de tierra en línea de 230 KV	26
1.2	Aislación de una línea de transmisión en la estructura	34
1.3	Distancias mínimas de una línea de transmisión en el centro del vano	34
1.4	Características de la coordinación de aislación de un transformador con el pararrayo	43
1.5	Condiciones de voltaje para $R_1 = R_2 = 0.1X_1$	43
1.6	Característica de descarga disruptiva para aisladores de suspensión	46
1.7	Resistencia de puesta a tierra en el punto de una posible descarga eléctrica	59
1.8	Factor de acoplamiento entre un grupo de conductores y un conductor aislado	59
1.9	Factor de acoplamiento cuando no está presente el efecto corona para un cable de tierra de 1/2 pulgada de diámetro	61
1.10	El efecto sobre el acoplamiento de aumentar un tercer cable de tierra sobre una línea con otros dos conductores de tierra sobre ella.	61
1.11	Factor de cresta en la torre para una descarga en la torre	64
1.12	Tiempo de descarga en la torre	64
1.13	Factor de cresta en el punto medio del vano para una descarga ocurrida en este punto	66

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.14	Tiempo transcurrido hasta el momento de iniciarse el arco en la mitad central del vano, con respecto a una descarga ocurrida en dicha mitad	66
1.15	Gráfica para el cálculo de la proporción de arcos contorneando los aisladores. Los valores dados son la media de los hallados para ondas de frente de 2 μ seg.	74
1.16	Gráfica para el cálculo de los arcos ocurridos en medio del vano	74
1.17	Práctica en el uso de aisladores de suspensión la curva (a) representa un promedio práctico, la curva (b) nos da el mínimo número de disco para obtener el impulso básico de nivel de aislamiento y tener una descarga de 60 ciclos igual a 3.5 veces el voltaje de línea a neutro.	83
1.18	Línea de transmisión de un circuito simple con arreglo horizontal de conductores mostrando los diversos espaciamientos usado en coordinación del aislamiento.	83
1.19	Línea de transmisión de doble circuito con arreglo vertical de los conductores mostrando el espaciamiento usado en coordinación del aislamiento.	84
1.20	Relación entre el número de discos aisladores y el espaciamiento para líneas de transmisión	84
1.21	Arreglo horizontal de conductores para comparar espaciamiento D para un promedio de aislamiento de línea	

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
1.22	Arreglo vertical de conductores, y para comparar espaciamiento en C basado en el promedio de aislamiento de línea	86
2.1	Forma típica de una onda de corriente debido a un rayo	93
2.2	Forma de onda normalizada para representar un impulso de voltaje debido a un rayo	95
2.3	Oscilación medida con oscilógrafo catódico, correspondiente a la tensión de restablecimiento de un interruptor	100
2.4	Oscilación amortiguada de la tensión de restablecimiento de un interruptor	100
2.5	Sobretensión a que da origen la puesta de servicio de una línea	100
2.6	Círculo formado por varias partes de características distintas	102
3.1	Paso de corriente en un aislador por conductividad de masa (corriente de fuga)	107
3.2	Paso de corriente en un aislador por conductividad superficial	107
3.3	Paso de corriente en un aislador por perforación de la masa del aislador	107
3.4	Paso de corriente en un aislador por descarga disruptiva a través del aire	107
3.5	Diagrama vectorial de un aislante, con indicación del ángulo de pérdida dieléctrica	113

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
3.6	Aislador simple	113
3.7	Aislador compuesto	113
3.8	Aislador soporte	114
3.9	Aislador pasante	114
3.10	Aislador para servicio al interior	114
3.11	Aislador para servicio al exterior	114
3.12	Aislador acoplable	114
3.13	Aislador no acoplable	117
3.14	Aislador con montura metálica	117
3.15	Aislador sin montura metálica	117
3.16	Aislador de apoyo	117
3.17	Aislador de columna	118
3.18	Aislador de suspensión	118
3.19	Aislador de cadena	118
3.20	Aislador pasante	120
3.21	Aislador envolvente	120
3.23	Aislador de polea	120
3.24	Aislador para viento	120
3.25	Aislador con línea de fuga ampliada	120
3.26	Aislador para niebla	125
3.27	Línea de fuga de un aislador	125
3.28	Distancia disruptiva de un aislador	125
3.29	Voltaje de flameo de aisladores contaminados	133
3.30	Representación esquemática de una cadena de aisladores de suspensión	142
3.31	Representación esquemática de la posición de cadena de	

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
	aisladores para apoyo de alineación y para apoyo de anclaje	142
3.32	Reparto de las capacidades y de las corrientes de fuga en una cadena de aisladores de suspensión	148
3.33	Circuito equivalente de una cadena de cuatro aisladores suspendidos	148
3.34	Número de aisladores	150
3.35	Protección de una cadena de aisladores mediante pequeños cuernos o antena fijada a la grapa del cable	152
3.36	Protección de una cadena de aisladores mediante un doble juego de descargadores rectos situados en la parte superior e inferior de la cadena	152
4.1	Forma de la onda de impulso de $1.5 \times 40 \mu\text{seg.}$	157
4.3	Distribución de la descarga atmosférica	162
4.4	Distribución de la descarga atmosférica	162
4.5	Diagrama generalizado que muestra las corrientes de aire y de la distribución de electricidad en una típica tormenta eléctrica	162
4.6	Gradiente a nivel de tierra debido al paso de una nube tormentosa	167
4.7	Oscilograma de voltajes producidos por descargas sobre líneas de transmisión de varios rangos de voltajes ambas con y sin cables de tierra	167
4.8	Reproducción de varios oscilogramas que muestran el cambio en la forma de onda en función del trayecto recorrido	

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
4.9	Reproducción de algunos oscilogramas que muestran la variación del valor de la tensión máxima en función del camino recorrido por la onda	172
4.10	Intensidad de las corrientes del rayo en las líneas de transmisión	176
4.11	Corriente del rayo a través de los pararrayos colocados en las centrales y estaciones	176
4.13	Duración de las descargas. Valores obtenidos y frecuencia relativa en % con que ocurren	178
4.14	Forma de onda y amplitud de la corriente de descarga del rayo	178
5.1	Variación con la temperatura de la resistividad de un terreno. Arcilla roja 18.6% de humedad	188
5.2	Variación de la resistividad de un suelo con su contenido porcentual de humedad	188
5.3	Potencial de paso	195
5.4	Voltaje de toque cerca a una estructura	196
5.5	Potencial de malla	197
5.6	Puesta a tierra de una estructura de alta tensión con la utilización de electrodos de acero galvanizado pero aplicándose una protección catódica galvánica	203
5.7	Efecto del número de cables sobre la impedancia de contrapeso impedancia de 1000 pies de alambre en una longitud y en dos, tres y cuatro pedazos una pequeñas	206
5.8	Caída de potencial a través de un arco eléctrico en función de la intensidad de corriente	210

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
5.9	Arco eléctrico debido a una corriente alterna	210
5.10	Circuito equivalente para ilustrar la interrupción de una corriente alterna	210
5.11	Interrupción de una corriente alterna	214
5.12	Interrupción de un circuito capacitivo	218
6.8	Dimensiones básicas de las estructuras con circuitos arreglados verticalmente	230
6.9	Distancias eléctricas en la estructura	231

INDICE DE TABLAS

<u>Nº</u>		<u>Pág.</u>
I	RESISTENCIA DE TIERRA	28
II	DISTANCIAS MINIMAS ENTRE CONDUCTORES	32
III	DISTANCIAS MINIMAS DEL CONDUCTOR AL SUELO	36
IV	NIVELES BASICOS DE IMPULSO DE AISLAMIENTO	40
V	IMPULSO MINIMO DE VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO	48
VI	IMPULSO MINIMO DE VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO	49
VII	VOLTAJES DE CONTORNEAMIENTO PARA AISLADORES DE SUSPENSION	51
VIII	VOLTAJES DE CONTORNEAMIENTO PARA ENTREHIERROS	53
IX	NUMERO MINIMO DE DISCOS DE AISLADORES PARA LINEAS DE TRANSMISION BASADO EN 5 ³ / ₄ PULGADAS.	78
X	COORDINACION DE ESPACIAMIENTO CON NUMERO DE AISLADORES	81
XI	CLASES DE CONTAMINACIONES	135
XII	RESISTENCIA AL PIE DE LA TORRE NECESARIA CON AISLAMIENTO MINIMO BAJO LA ASUNCION DE UNA CORRIENTE DE DESCARGA DE 100.000 AMPERIOS EN LA TORRE	191

INTRODUCCION

La aislación en las líneas de transmisión debe ser determinada después de un cuidadoso estudio de las solicitaciones a que estará sometida, consecuencia de las condiciones meteorológicas y ambientales de zonas por donde atraviezan, así como las condiciones de operación.

El nivel de aislación escogido debe ser suficiente para permitir una operación aceptable durante la vida útil de la línea de transmisión, y así evitar la menor cantidad de interrupciones de servicio.

No es posible seleccionar el aislamiento solamente en base al voltaje normal de operación del sistema, sino que deben considerarse los transientes ocasionados ya sea por descargas atmosféricas en el sistema u otra causa, puesto que las perturbaciones de este tipo pueden dar lugar a que el voltaje alcance niveles muchos mayores al normal.

Por consiguiente es primordial definir lo más exactamente posible el grado de seguridad que se pretende obtener para la línea, en base al cual se determina no solamente su aislación sino otros parámetros principales: estructura, fundiciones, conductores.

Lo anteriormente expuesto nos conduce a que es necesario

aceptar un número de fallas de la aislación durante la operación de la línea, número que dependerá del grado de seguridad establecido.

Es conveniente hacer notar que el aspecto económico debe de estar presente desde el punto de vista de estimar los riesgos de fallas. Las interrupciones de servicio constituyen las pérdidas económicas más apreciables, pero tampoco podemos tener un sobredimensionamiento de las aislaciones, por lo que deberá procurarse dar la adecuada selección de la aislación de las líneas de transmisión, con un marcado sentido económico y de seguridad de funcionamiento.

El sobredimensionamiento del aislamiento en los equipos a más de ser oneroso, no es conveniente en algunas partes de las instalaciones del sistema desde el punto de vista de protección contra sobretensiones, ya que esto trae como consecuencia cuando ocurra sobretensiones intensas que presenten flameos o ruptura del aislamiento en partes vitales del sistema que pueden ser inaccesibles, por ejemplo: es preferible que ocurra un flameo o ruptura del dieléctrico en el aislamiento de la línea de transmisión, a que ocurra en las boquillas del transformador, o bien siguiendo la misma línea de razonamiento es preferible que lo anteriormente expuesto ocurra en las boquillas del transformador y no en su interior.

La disminución de la aislación no sólo permite reducir el costo sino también aumentar la potencia de transporte al disminuir la reactancia inductiva en serie.

Para el estudio de la determinación de la aislación en una línea de transmisión considera que ésta se divide en dos partes a saber :

a) AISLACION EN LA ESTRUCTURA.- La aislación en la estructura queda determinada fundamentalmente por el número de aisladores y por la distancia en aire o espaciamiento, entre los conductores de fase a la estructura, se debe considerar además la ubicación de los cables de guarda y el valor de la resistencia de puesta a tierra en la estructura.

b) AISLACION EN EL VANO.- La aislación en el vano queda determinada por la distancia entre conductores y el suelo, entre cables de guarda y conductores.

Además también se usan DISPOSITIVOS AUXILIARES, como son los tubos protectores, pararrayos, anillos de protección, etc., estos dispositivos limitan el aumento de tensión o extinguen el arco producido por la caída directa del rayo sobre los conductores de línea. Su elevado costo, problemas de mantenimiento o poca eficacia, restringen su aplicación a un plano secundario. Son útiles para proteger

líneas de bajo voltajes, transformadores sub-estaciones y centrales.

En lo que concierne a las sobretensiones atmosféricas éstas son imposibles de predecir con exactitud y en dichos casos se adopta un valor conveniente de aislamiento, tal que los contorneamientos sean reducidos, y con esto evitar el menor daño posible en el sistema.

CAPITULO I

CRITERIOS BASICOS PARA DETERMINAR LA AISLACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION

1.1 FACTORES DE DISEÑOS DE LINEAS PROTECCION INHERENTE

El diseño de una línea de transmisión considerando las descargas atmosféricas es prácticamente independiente del voltaje de operación. La principal consideración es obtener un nivel de protección para el diseño deseado. Los principios básicos sobre los cuales se basa el diseño de una línea para las descargas directas son :

- 1) Cables a tierra con suficiente resistencia mecánica, tienen que ser colocados adecuadamente para proteger las líneas de conductores de las descargas directas.
- 2) La distancia adecuada de los conductores de líneas hacia la torre o hacia la tierra tiene que ser mantenida para que exista una completa efectividad del aislamiento de la torre.
- 3) El espacio adecuado de los conductores a tierra hacia los conductores de fase, tiene que ser mantenido, especialmente en el vano medio, para prevenir el salto de chispas sobre los conductores.

- 4) Por último pero igualmente importante se debe asegurar que la resistencia al pie de la torre sea lo más baja posible, como económicamente justificada.

Los puntos de arriba pueden ser mejor visualizados en la Fig. 1.1, lo cual muestra un diseño de la ubicación correcta de los conductores a tierra para un circuito simple.

Los cables a tierra se muestran colocados arriba de las líneas conductoras, con este tipo de construcción los cables a tierra no son puestos directamente sobre los conductores. Esto elimina la posibilidad de contactos en caso de moverse las líneas con las cargas externas.

La experiencia con líneas y también las pruebas de laboratorio han mostrado que cuando el ángulo de protección, (el ángulo formado por una línea a través del cable de tierra y el cable de la fase exterior, y la vertical), no exceda los 30° se obtendrá una buena protección de los conductores de líneas, y la probabilidad de descarga lateral hacia los conductores se reduce. La localización correcta de los cables a tierra, colocados arriba de los cables de fase, es un compromiso con la utilidad efectiva de la

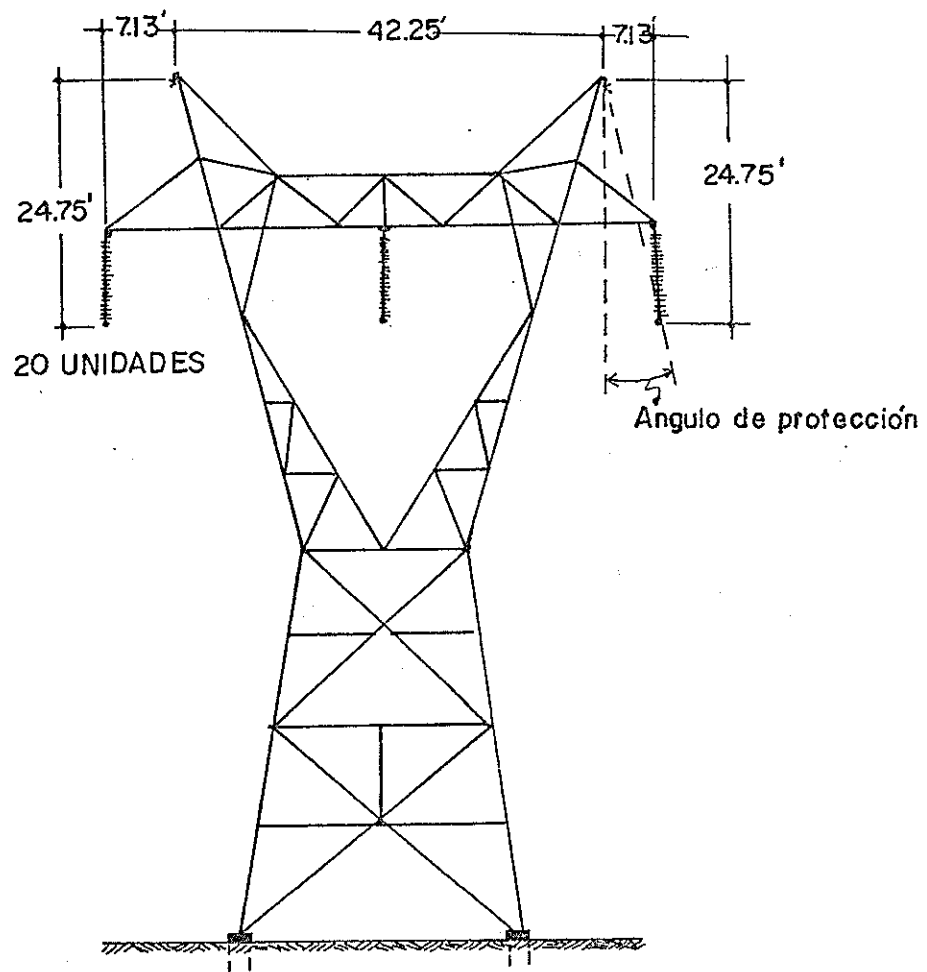


FIG. 1.1 DISPOSICION DEL ALAMBRE DE TIERRA
EN LINEA DE 230 Kv.

estructura aislada, sin embargo si los cables a tierra no son colocados para interceptar las descargas su propósito se anula, ya que el primer requisito es colocar correctamente los cables a tierra a la debida distancia de los conductores para prevenir las descargas laterales hacia los conductores.

El segundo y tercer factor, es decir el mantenimiento de un espacio adecuado desde los conductores hacia la torre, y desde los cables a tierra hacia los conductores fase, son naturalmente de importancia, para tener un diseño balanceado, y serán discutidos posteriormente.

El grado con el cual el cuarto requerimiento, baja resistencia al pie de la torre, puede ser obtenido dependiendo de las condiciones locales del terreno. Este método es usado para reducir el equivalente de esta resistencia y el grado al cual ésta es mantenido, es seguramente materia de economía, ya que uno de los problemas es el balanceo del costo; para bajar la resistencia frente al costo incrementado del aislamiento de la estructura de la torre para asegurar lo deseado

Las resistividades de los materiales de la tierra es tán listados en la Tabla I, varían de acuerdo a un

	METRO OHMS	PIE OHMS	CENTIMETRO OHMS
<i>Promedio general</i>	100	328	10.000
<i>Tierra pantanosa</i>	0.01-1.0	0.0328-3.28	1-100
<i>Agua de mar</i>	10-100	32.8-328	1.000-100.000
<i>Tierra seca</i>	1000	3280	10 ⁵
<i>Pisatra pura</i>	10 ⁷	3.28x10 ⁷	10 ⁴
<i>Piedra arenita</i>	10 ⁸	3.28x10 ⁸	10 ¹⁰

TABLA I RESISTENCIA DE TIERRA

rango considerable, ya que el método de asegurar una baja resistencia de la base de la torre, dependerá de las condiciones del terreno.

1.2 AISLACION EN LA ESTRUCTURA

La aislación en la estructura queda determinada fundamentalmente por el número de aisladores, por la distancia en aire o espaciamiento entre los conductores de fase a la estructura, además se debe considerar la resistencia de puesta a tierra, en la estructura. La Fig. 1.2, muestra la aislación en la estructura.

La aislación en la estructura deberá cumplir con todos los requerimientos de las distintas sollicitaciones a que estará sometida durante su servicio. Estas sollicitaciones son :

- a) Sollicitaciones producidas por sobrevoltajes de origen interno.
- b) Sollicitaciones producidas por sobrevoltajes de origen externo.
- c) Sollicitaciones producidas en condiciones de servicio normal.

1.3 AISLACION EN EL VANO

La aislación en el vano queda determinada por las distancias entre conductores y el suelo, entre cables de guardia y conductores, y las distancias mínimas entre conductores.

La distancia mínima entre conductores deberá ser tal que no haya peligro de formación de arcos entre ellos, como consecuencia de las oscilaciones producidas por el viento o por acumulación de la suciedad del medio ambiente sobre los conductores.

Para el cálculo de estas distancias mínimas entre conductores, por lo general cada país define estas distancias mediante fórmulas, las cuales deben ser fijadas de acuerdo a condiciones locales.

Para determinar la distancias mínimas entre conductores aéreos, usamos la siguiente fórmula, de acuerdo a la norma VDE-0210 del reglamento Alemán de Instalaciones.

$$D_{mc} = K \sqrt{f_c + L_c} + \frac{V}{150} \text{ m} \quad (1)$$

donde :

D_{mc} : distancia mínima entre conductores en el medio del vano (m).

f_c : flecha del conductor a 60°C (m)

V : voltaje nominal entre fase (KV)

K : factor que depende del ángulo máximo de desviación del conductor.

L_c : longitud de la cadena de aisladores (m)

Los valores para K son los siguientes :

$K = 0.70$ para ángulos mayores de 65°

$K = 0.65$ para ángulos comprendidos entre 55° y 65°

$K = 0.62$ para ángulos comprendidos entre 40° y 55°

$K = 0.60$ para ángulos menores de 40°

A continuación damos una tabla de las distancias mínimas entre conductores calculados de acuerdo a la fórmula del reglamento Alemán de corrientes fuertes.

Estas distancias mínimas entre conductores, se pueden aplicar tanto a líneas dispuestas verticalmente como horizontalmente.

Además debe ser en base a la conveniente separación

V_L (Kv)	L_{max} (m)	conductor	K	L_c (m)	f_{ca} 60°C (m)	D_{mc} (m)
69	200	ACSR	0.65	0.89	4.00	1.9
138	300	ACSR	0.65	1.72	7.80	3.00
230	350	ACSR	0.62	2.35	10.20	3.73

TABLA II DISTANCIAS MINIMAS ENTRE CONDUCTORES

existente en el medio vano, ya que es diferente a la existente en la torre.

En la Fig. 1.3, se muestran estas distancias en el centro del vano.

Respecto a la distancia mínima entre el conductor y el suelo, esta debe elegirse con un criterio que prevea fundamentalmente seguridad a las personas, y para ello se debe tener presente la clase de terreno o lugar por donde atravieza la línea de transmisión.

Pero es de tomar en cuenta que por lo regular los conductores tienen en ellos aumentos de temperatura entonces es necesario primero saber el valor de la flecha máxima para esta condición, y así mantener la separación mínima al suelo que es requerida.

En la Tabla III se dan los valores de las distancias mínimas del conductor al suelo en el medio vano, que han sido estudiadas y aprobadas por INECEL de acuerdo a cada zona del país.

Se ha establecido para las líneas de transmisión en el Ecuador, que la altura mínima desde el suelo al conductor más bajo no sea menor de 6.000 metros con relación a la máxima flecha (a 60°C en la zona 1, y

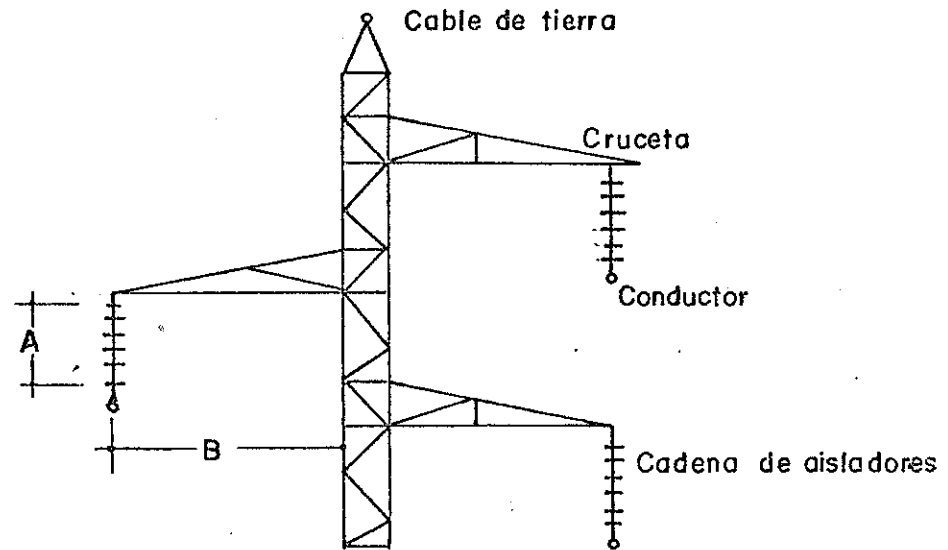


FIG. I.2 AISLACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION EN LA ESTRUCTURA.

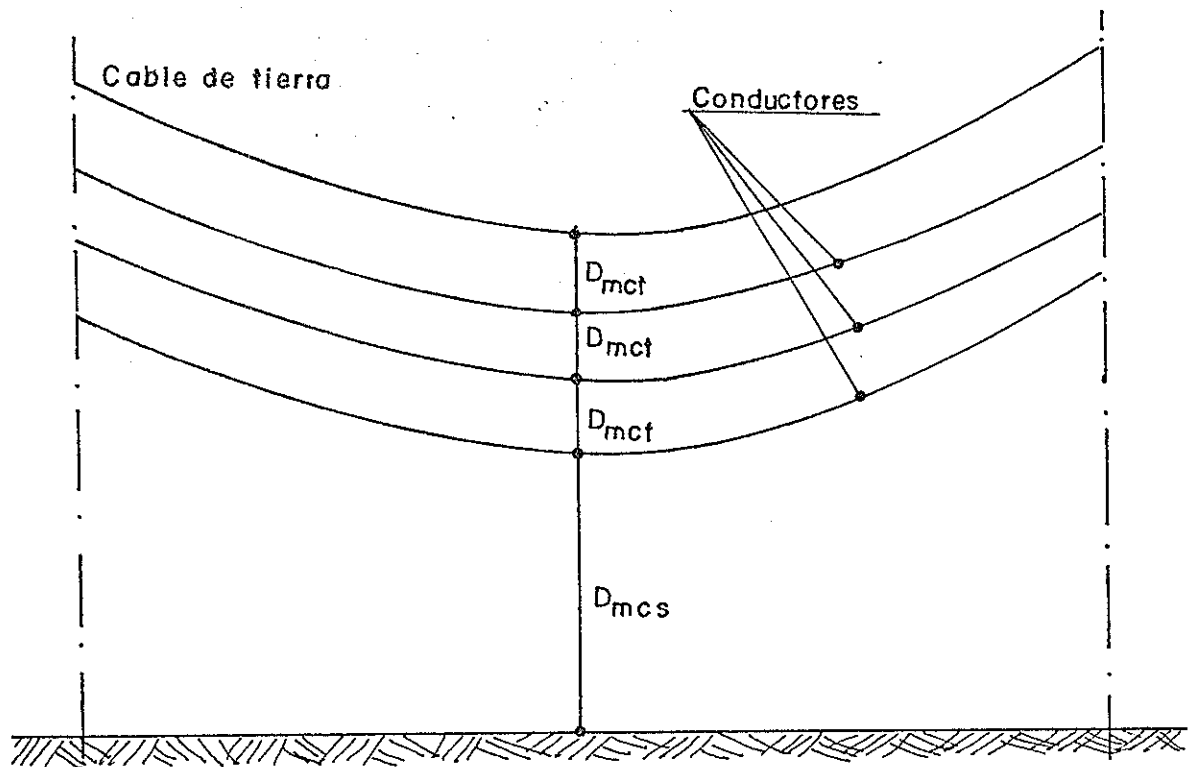


FIG. I.3 DISTANCIAS MINIMAS DE UNA LINEA DE TRANSMISION EN EL CENTRO DEL VANO

a 45° en la zona 2) y al cruzar caminos, no sea menor de 7,000 metros. Estos requerimientos son para líneas operando a 110 KV.

Para un nivel de voltaje mayor se incrementó esta distancia tomando en cuenta la variación de la densidad relativa del aire según la altura con la siguiente expresión :

$$Kd = \frac{KV - 110}{150 \cdot d} \quad (2)$$

De donde se obtiene que el valor de la distancia mínima al suelo será de :

- Para terrenos normales $D_{mcs} = 6.0 + Kd$
- Para cruce de caminos $D_{mcs} = 7 + Kd$

En la condición 1, estas distancias mínimas son considerando la flecha máxima final correspondiente a la condición de transmisión de la potencia nominal de la línea aérea, y para una desviación de conductores por acción del viento en ángulo comprendidos entre 0° y 10°.

En la condición 2 son considerando la flecha máxima final correspondiente a la condición de transmisión

	ZONA 1		ZONA 2	
	CONDICION 1	CONDICION 2	CONDICION 1	CONDICION 2
<i>Caminos de primera importancia.</i>	9.0 m	7.7 m	9.5 m	8.2 m
<i>Terreno transitado y caminos de segunda importancia.</i>	7.8 m	6.5 m	8.3 m	7.0 m
<i>Terreno normal</i>	6.8 m	5.5 m	6.8 m	5.5 m
<i>En vías de ferrocarril distancia al riel</i>	9.0 m	7.7 m	9.5 m	8.2 m

TABLA III DISTANCIAS MINIMAS DEL CONDUCTOR AL SUELO

de la potencia de emergencia de las líneas aéreas.

Para los conductores desviados por acción del viento en ángulos mayores de 10° , podrán aceptar distancias entre el conductor y el suelo inferiores a las ya indicadas, tomando en cuenta el grado de accesibilidad de tales terrenos, tal es el caso de acantilados o cerros con pendientes fuertes.

1.4 AISLAMIENTO Y ESPACIAMIENTO

1.4.1 NIVEL BASICO DE AISLAMIENTO

El nivel básico de aislamiento se refiere a la probabilidad o seguridad que presenta el aislamiento de los equipos para soportar sobretensiones tales que ese aislamiento no sea afectado.

El "equipo" empleado en un sentido muy general, debe forzosamente, según la práctica moderna, someterse al principio de coordinación de aislamiento, es decir; a la solución de : un nivel adecuado que asegure que la perforación o contorno de los varios aislantes del "equipo" se efectúen en un voltaje superior al del nivel seleccionado, y un mecanismo de

protección, que asegure una eficiente protección contra sobretensiones para el equipo.

NEMA define el nivel básico de aislamiento en la siguiente forma: "Los niveles básicos de aislamiento son los niveles de referencia, expresados como el voltaje de cresta de una onda standard no más de 1.5×40 microsegundos", y "el aislamiento de los aparatos deben ser mayor o igual que el nivel básico de aislamiento".

Según la definición dada por NEMA, se tiene, que el aislamiento de los aparatos que están de acuerdo con los niveles deben soportar ensayos, con valores de cresta, no menores con lo que constan en la Tabla IV.

Esta tabla está basada en una onda standard de 1.5×40 microsegundos; para una onda standard diferente, como por ejemplo la que utilizan en Francia 1×50 microsegundos.

Los niveles básicos de impulsos de aislamiento serán diferentes, desde luego que la experiencia conseguida a lo largo de diferentes pruebas e investigaciones, permiten conside-

rar la onda de $1.5 \times 40 \mu.sg.$ como la más adecuada. Entendiéndose como onda 1.5×40 , aquella que alcanza el valor de cresta en 1.5 microsegundos, y decrece hasta la mitad del valor de cresta en 40 microsegundos.

Para algunos valores de clasificaciones de referencia, como bien se ve en la columna tercera de la Tabla IV, los niveles de impulso básicos de aislamiento, más bien conocido como las siglas "BILs" (standard basic impulse insulation levels) en un importante número de líneas con conexión a tierra, los equipos tienen aislamiento correspondientes a una clasificación referencia más baja con la cual se logra una economía.

En la Tabla IV para bajos valores de clasificación de referencia, se ve, existen en la columna segunda dos valores, el primero de ellos hace referencia a distribución y el segundo valor a potencia.

SELECCION DEL IMPULSO BASICO DEL NIVEL DE AISLAMIENTO

Este debe ser seleccionado, en forma que se pueda dar una adecuada protección al sistema,

CLASIFICACION DE REFERENCIA EN KV.	NIVEL DE IMPULSO BASICO EN KV.	NIVEL DE AISLAMIENTO REDUCIDO EN KV.
1.2	30*	45 ⁺
2.5	45*	60 ⁺
5.0	60*	75 ⁺
8.7	75*	95 ⁺
15	95*	110 ⁺
23	150	
34.5	200	
46	250	
69	350	
92	450	
115	550	450
138	650	550
161	750	650
196	900	900
230	1050	
287	1300	1050
345	1550	1300
360	1610	1550

+ Para clase de equipos de distribución
* Para clase de equipos de potencia

TABLA IV NIVELES BASICOS DE IMPULSO DE AISLAMIENTO

mediante el empleo de varios mecanismos. La diferencia entre las características del aislamiento y del mecanismo de protección, admitida por la tolerancia de fabricación, se basa en una consideración económica que debe balancear la mejor conveniencia entre, la posibilidad de tener una posible falla a un costo inicial menor, o disminución de tal posibilidad, a causa de una mayor resistencia en el aislamiento, a un costo inicial mayor. Es decir, que la selección del impulso básico del nivel de aislamiento debe darse por una especie de equilibrio entre el costo del aislamiento, la protección y la posibilidad de falla.

Debido a que el mecanismo de protección esencialmente contra descargas directas, conviene a fin de preveer sobretensiones bajo condiciones normales de operación o fallas, tener una clasificación de referencia un 5% mayor que, el valor dado por el máximo voltaje eficaz posible de línea a neutro que se puede tener bajo esas condiciones.

Conviene en este punto dar un ejemplo, que aclare, lo referente a la selección de BILs.

El tal ejemplo está expresado en la Fig. 1.4 , que representa la coordinación del aislamiento de un transformador con la característica del mecanismo protector.

El transformador considerado pertenece a un sistema de 138 KV está sólidamente conectado a tierra, y las relaciones de impedancia en los terminales del transformador son :

$$X_0/X_1=2.0 ; R_0/X_1=1 \quad R_1/X_1=0.1 ; R_1=R_2 \text{ y } X_1=X_2$$

en donde, R_0 es la resistencia de secuencia cero, X_1 es la reactancia subtransitoria de secuencia (+), X_2 reactancia de secuencia (-)

Para estas condiciones el máximo voltaje a tierra en los terminales del transformador para cualquier tipo de falla en el sistema. La reactancia de falla es 74% del voltaje normal de fase-fase que se lo obtiene de la Fig. 1.5, esto implica que considerando un margen de 5% por sobretensiones del sistema, el voltaje eficaz del protector debe ser (1.05) (74) ó 77.7% el cual es :

$$(77.7)\% \cdot (138) = 107.2 \text{ KV}$$

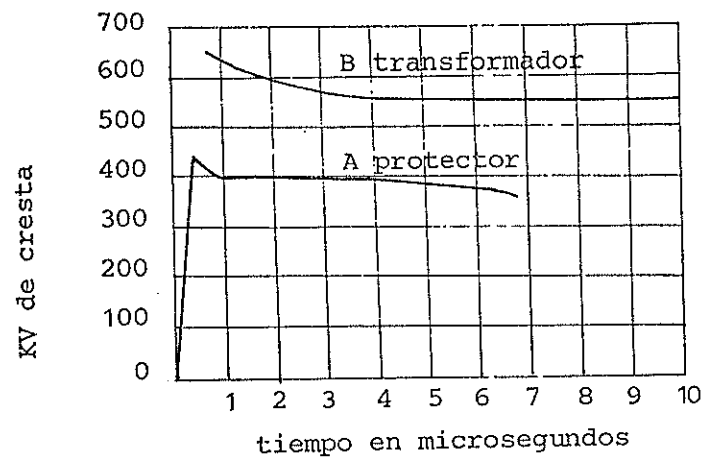


Fig. 1.4 CARACTERISTICAS DE LA COORDINACION DE AISLACION DE UN TRANSFORMADOR CON EL PARARRAYO.

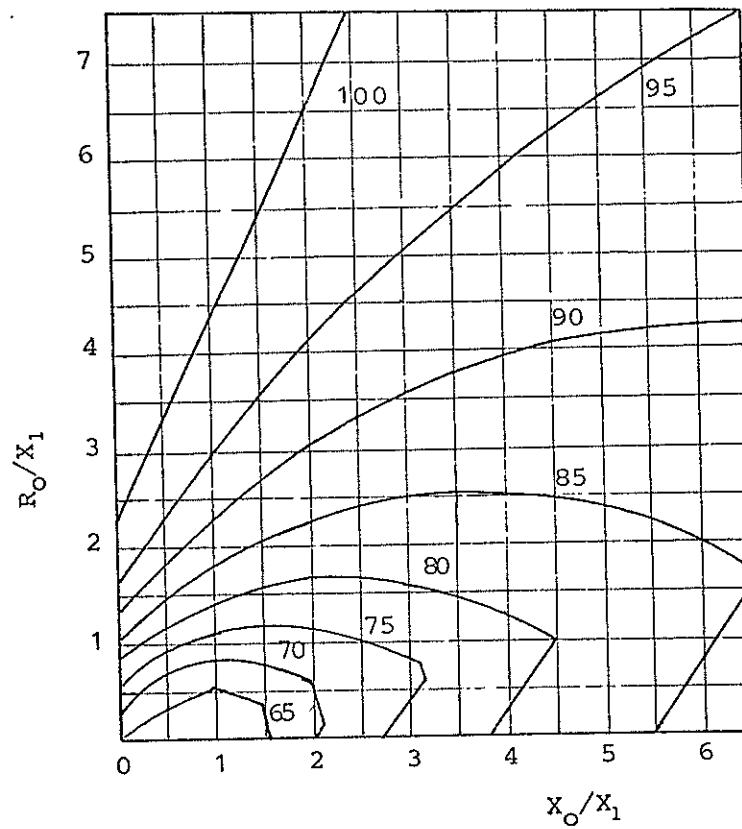


Fig. 1.5 CONDICIONES DE VOLTAJE PARA $R_1 = R_2 = 0.1 X_1$

Por lo que un pararrayo de 109 KV (que es el valor correspondiente a aquellos de clasificación standard más cercano al valor de 107.2 KV calculado) se necesita.

La curva A de la Fig. 1.4, es la característica de un cierto pararrayo de 109 KV, por una onda asumida de 1.0 x 20 microsegundos, por 5000 amp. y una tolerancia sumada al 15% sobre el promedio del impulso de la chispa y más una tolerancia del 10% sobre la caída a través del pararrayo.

Asumiendo un margen del 15% más 35 KV entre los 400 KV y el BIL requerido para el aislamiento del transformador, se tiene para el BIL tal valor de 495 KV, esto implica que puede emplearse un nivel de aislamiento reducido (550 KV) en lugar de los 650 KV que con la clasificación de referencia de 138 KV podría tenerse. Este valor puede ser aplicado como muestra en la curva B de la Fig. 1.4.

Desde luego que la relación de impulso básico depende también de la seguridad que se requiere tener en la zona como de las características y posibilidades de las descargas.

1.4.2 CARACTERISTICAS DE DESCARGAS DISRUPTIVAS

Las características de las curvas de voltaje tiempo de entrehierros, conductores paralelos, cadenas de aisladores, etc. todos tienen la misma forma típica.

En la Fig. 1.6, están dibujados los impulsos y las características de descargas disruptiva a 60 ciclos para aisladores de suspensión, la gráfica corresponde a la dada por la "General Electric Corporation" para aisladores de 10 pulgadas de diámetro por $5\frac{3}{4}$ pulgadas de espesor.

En la figura se da tanto el voltaje de cresta en función del tiempo necesario para el rompimiento, teniendo el número de unidades aisladoras que constituyen la cadena; como el voltaje de cresta en función de la longitud de la cadena o del número de unidades aisladoras que constituyen la cadena teniendo el tiempo para rompimiento como parámetro.

El mínimo o valor crítico de descarga es el valor sobre la curva voltaje vs tiempo donde la curva luego de un cierto tiempo tiende a

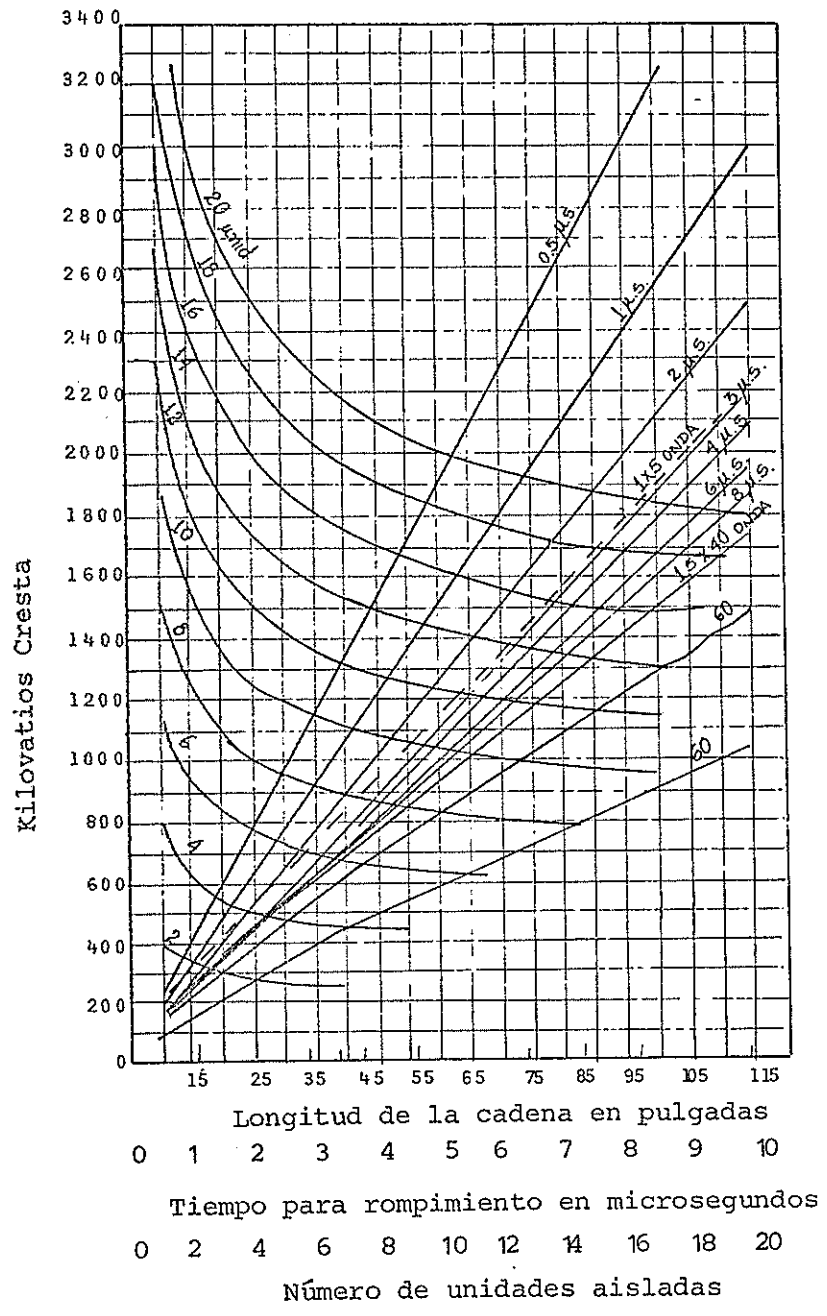


Fig. 1.6 CARACTERISTICA DE DESCARGA DISRUPTIVA PARA AISLADORES DE SUSPENSION.

a una asíntota paralela al eje del tiempo. Esto es el valor de la cresta de la onda, cuya amplitud se ajusta para causar descargas sobre el 50% de las aplicaciones.

El Subcomité sobre correlación de datos de laboratorio de la "EEI-NEMA Join Committee of Insulation Coordination", por su parte, ha adoptado valores de voltajes de contorneamiento (flashover), basado en diferentes datos de laboratorio, para aisladores standard, tanto para ondas de impulso como para ondas de 60 ciclos.

Así en la Tabla V, se da el voltaje de impulso de contorneamiento, para aisladores de suspensión de 10 pulgadas de diámetro y $5\frac{3}{4}$ pulgadas de espesor en condiciones standard de presión, temperatura y humedad.

En la Tabla VI, se da el voltaje de impulso de contorneamiento para entrehierro en condiciones standard de presión, temperatura y humedad.

En la Tabla VII se da el voltaje de contorneamiento (flashover) para onda de 60 ciclos, pa

NUMERO DE UNIDADES DE AISLADORES	ONDA DE 1 x 5 MICROSEGUNDOS		ONDA DE 1.5 x 40 MICROSEGUNDOS	
	POSITIVA	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA
1	155	155	150	150
2	285	295	255	255
3	395	410	355	345
4	500	520	440	415
5	610	630	525	495
6	715	750	610	585
7	820	860	695	670
8	930	975	780	760
9	1040	1090	860	845
10	1145	1205	945	930
11	1250	1320	1025	1015
12	1355	1430	1105	1105
13	1460		1185	1190
14	1565		1265	1275
15	1670		1345	1360
16	1775		1425	1445
17	1880		1505	1530
18	1985		1585	1615
19	2090		1665	1700
20	2200		1745	1785

TABLA V IMPULSO MINIMO DE VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO

ESPACIAMIENTO DEL ENTREHIERRO EN PULGADAS	ONDA DE 1 x 5 MICROSEGUNDOS		ONDA DE 1.5 x 40 MICROSEGUNDOS	
	POSITIVA	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA
0.5	22	23	22	23
0.75	30	38	30	38
1.0	38	51	38	51
1.5	51	62	51	62
2	60	83	60	82
3	76	103	75	102
4	97	124	91-95	102
5	120	146	106-114	123
6	143	167	128-141	143
7		188	141-155	163
8	187	209	159-166	183
9		231	175-178	203
10	233		190	224

TABLA VI IMPULSO MINIMO DE VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO

ESPACIAMIENTO DEL ENTRETIERRO EN PULGADAS	ONDA DE 1 x 5 MICROSEGUNDOS		ONDA DE 1.5 x 40 MICROSEGUNDOS	
	POSITIVA	NEGATIVA	POSITIVA	NEGATIVA
	12		273	
14		315		293-318
15	340	335	275	309-342
16		360		323-359
18		400		360-386
20	440	445	350	395-415
25		550		490
30	640	660	505	490
40	835	875	650	740
50	1035	1085	800	910
60	1230	1300	945	1070
70	1425	1515	1095	1235
80	1620		1240	1405
90	1815		1385	1570
100	2010		1530	

TABLA VI (continuación)

NUMERO DE AISLADORES	VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO EN KV EFECTIVOS
1	80
2	155
3	215
4	270
5	325
6	380
7	435
8	485
9	540
10	590
11	640
12	690
13	735
14	785
15	830
16	875
17	920
18	965

TABLA VII VOLTAJES DE CONTORNEAMIENTO PARA AISLADORES DE SUSPENSION

ra aisladores en suspensión de 10 pulgadas de diámetro y $2\frac{3}{4}$ pulgadas de espesor en condiciones standard de presión, temperatura y humedad.

En la Tabla VIII, se da el voltaje de contorneamiento (flashover) para ondas de 60 ciclos, para entrehierros en condiciones standard de presión, temperatura y humedad.

Desde luego que los valores anotados en las Tablas V, VI, VII y VIII, tendrán factores de corrección de acuerdo a las condiciones ambientales.

Se debe añadir además que, un pie de madera es equivalente a una unidad standard aisladora de 10 pulgadas de diámetro y $2\frac{3}{4}$ pulgadas de espesor y que el voltaje de contorneamiento (flashover) de las combinaciones de aisladores y madera es igual a la suma de los voltajes de contorneamiento (flashover) de las unidades aisladoras y de la madera tomadas aisladamente (individualmente).

FÓRMULA GENERAL DEL CONTORNEAMIENTO

Se ha logrado establecer una fórmula relativa

ESPACIAMIENTO DEL ENTRE- HIERRO EN PULGADAS	VOLTAJE DE CONTORNEAMIENTO EN KV EFECTIVOS
0.5	11.5
0.75	17.5
1	22.5
1.5	32
2	40
3	50
4	58
5	66
6	74
8	89
10	105
15	150
20	200
30	295
40	385
50	480
60	575
70	665
80	755
90	835

TABLA VIII VOLTAJES DE CONTORNEAMIENTO PARA ENTREHIERROS

mente simple para estimar el voltaje de contorneamiento en las líneas de transmisión.

Es la siguiente :

$$V = (1 - C_n)(\alpha)(R.I.) + e = (1 - C_n)(\alpha)(R'.I_0) + e \quad (3)$$

donde:

C_n = factor de acoplamiento

α = factor de cresta

R' = resistencia efectiva en el punto de choque

R = resistencia al pie de la torre

I_0 = corriente de descarga atmosférica que existi
ría ante una resistencia de tierra de cero.

V = voltaje a través de los aisladores

e = valor instantáneo del voltaje de frecuencia normal.

Cada uno de los factores que en esta fórmula intervienen conviene considerarlos en forma independiente, como en los próximos numerales se hace efectivamente.

RESISTENCIA A TIERRA "R"

Esta resistencia depende del punto en el que se ha realizado la descarga. Así si el choque se ha realizado sobre un conductor de

tierra y a la mitad del vano, "R" es infinita, si el choque es en la torre misma, "R" es la resistencia al pie de torre.

En las torres de altura corriente puede despreciarse la caída por impedancia en la torre, pero esta impedancia debe tenerse en cuenta en el caso de tratarse de torres de gran altura, como por ejemplo, en el cruce de los ríos.

Es muy probable que las tensiones desarrolladas alcancen valores de 3 KV por metro. Foust y Lewis dicen que en el 90% de sus observaciones encontraron entre los extremos de una torre de unos 12 m. de altura (40 pies) tensiones inferiores a 50 KV.

RESISTENCIA EFECTIVA "R'"

Cuando la descarga es recibida por una torre, la resistencia aparente que encuentra el rayo tiene por valor.

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_n} + \frac{1}{R}} \quad (4)$$

donde :

Z_0 = Impedancia característica del rayo, que se supone de unos 400 (ohmios), pero cuyo valor no se lo conoce con exactitud.

Z_n = Impedancia de onda de la línea, debe calcularse considerando los n conductores (su valor aproximado es 500 ohmios).

R = Resistencia al pie de la torre

Pero tenemos que :

$$Z_n = \frac{Z + (n-1) Z'}{n} \quad (5)$$

donde :

Z = Impedancia característica promedio de los n conductores.

Z' = Impedancia característica mutua entre pares de n conductores.

Como se dijo anteriormente se consideran los valores aproximados de :

$$Z = 500 \text{ ohm} \quad \text{y de } Z' = 125 \text{ ohm}$$

Los valores de la resistencia R' se lo puede encontrar de la Fig. 1.7, en función de consi

derar $Z_0 = 400 \text{ ohm}$ y $Z' = 125 \text{ ohm}$.

La onda de voltaje viajera desde un punto que será equivalente a $R' \cdot I_0$, induce una onda acompañante en un conductor adyacente, el cual es de un valor de varias veces el factor de acoplamiento de la onda de voltaje. La diferencia en voltaje aparece entre el grupo de conductores impactados por la descarga con respecto a un conductor que se encuentra aislado por la estructura y su valor es igual a $(1 - C_n)$ veces la onda de voltaje viajera. Por esto debemos obtener el valor de C_n .

FACTOR DE ACOPLAMIENTO " C_n "

Este factor depende del número, configuración y espaciamiento de los conductores, en esencia, sufre también modificaciones a causa del efecto corona.

El factor de acoplamiento entre un grupo de " n " conductores y un conductor solitario está dado por :

$$C_n = \frac{60}{nZ_n} \log_e \frac{(b_1, b_2 \dots \dots \dots b_n)}{(a_1, a_2 \dots \dots \dots a_n)}$$

n = Número de hilos de guardia

Z_n = Impedancia promedio del grupo de "n" conducto-

b_n = Distancia del conductor solitario a los conduc-
tores imagen.

a_n = Distancia del conductor solitario al conductor
superior y los hilos de guardia.

$n = 1, 2, 3, \dots, n$

De esta ecuación es claro ver el porqué para altos voltajes, al producirse el efecto corona, la variación " Z_n ", decrece al presentarse el efecto corona, y produce un incremento en el factor de acoplamiento. Por ello, es que partiendo de la Fig. 1.8, el eje de la abscisa es la relación existente entre b/a en donde se obtiene que :

$$\frac{b}{a} = \sqrt{\frac{b_1 b_2 \dots b_n}{a_1 a_2 \dots a_n}} \quad (7)$$

La gráfica permite, conociendo la disposición espaciamiento y número de los conductores encontrar el factor de acoplamiento.

McCann, luego de diversos trabajos sobre factores de acoplamiento, llega a establecer para una disposición como la señala en la parte

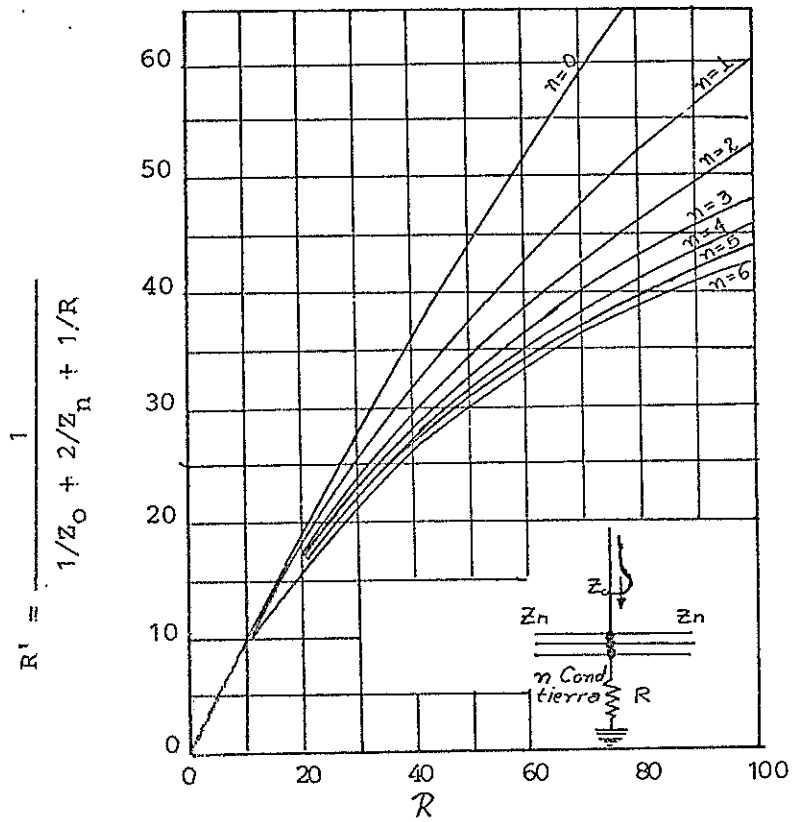


Fig. 1.7 RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA EN EL PUNTO DE UNA POSIBLE DESCARGA ELECTRICA.

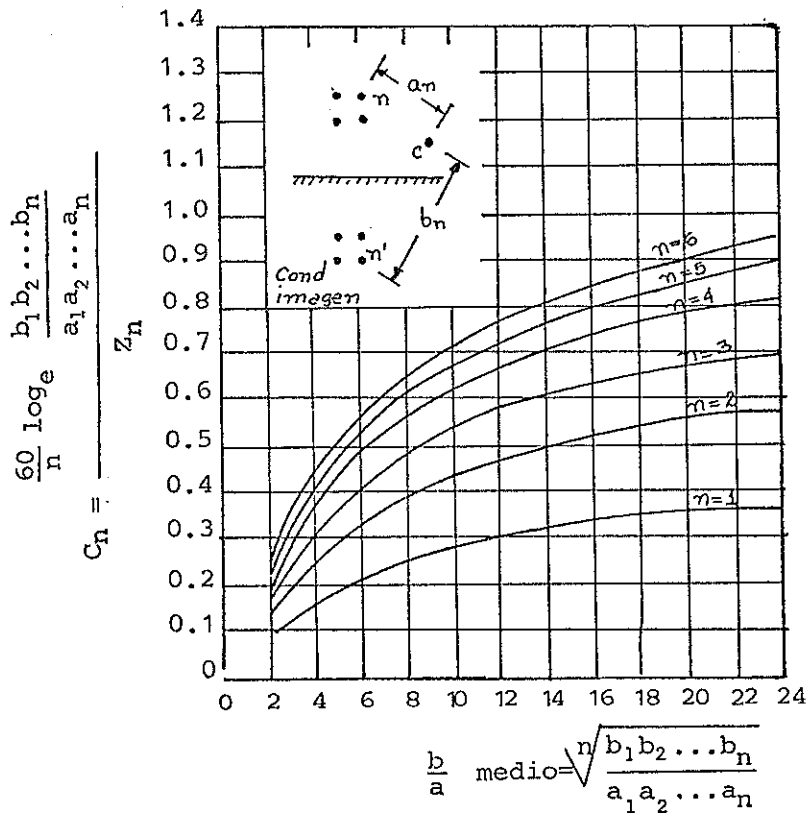


Fig.1.8 FACTOR DE ACOPLAMIENTO ENTRE UN GRUPO DE CONDUCTORES Y UN CONDUCTOR AISLADO.

superior izquierda de la Fig. 1.9, curvas de factor de acoplamiento en función de la distancia entre conductores de tierra y fase para diferentes alturas, ver Fig. 1.9 del conductor de tierra.

De la figura se desprende que para altura de conductor de tierra y espaciamiento tiene un valor en el rango de 0.25 a 0.35. Estudios han llevado a concluir que para el caso de que existan dos conductores aéreos de tierra, para valores de altura de esos conductores y espaciamiento comunes el factor está comprendido en un rango de 0.35 a 0.45 (con un solo conductor de línea).

Es interesante anotar la Fig. 1.10, en la que se da el factor de acoplamiento debido a tres conductores aéreos de tierra, uno debajo y los otros dos sobre el conductor de fase, como función de potencial del conductor de tierra.

Los estudios revelan un hecho sobresaliente "un incremento del 25 al 45% en el factor de acoplamiento se logra teniendo tres conductores de tierra con la disposición indicada en

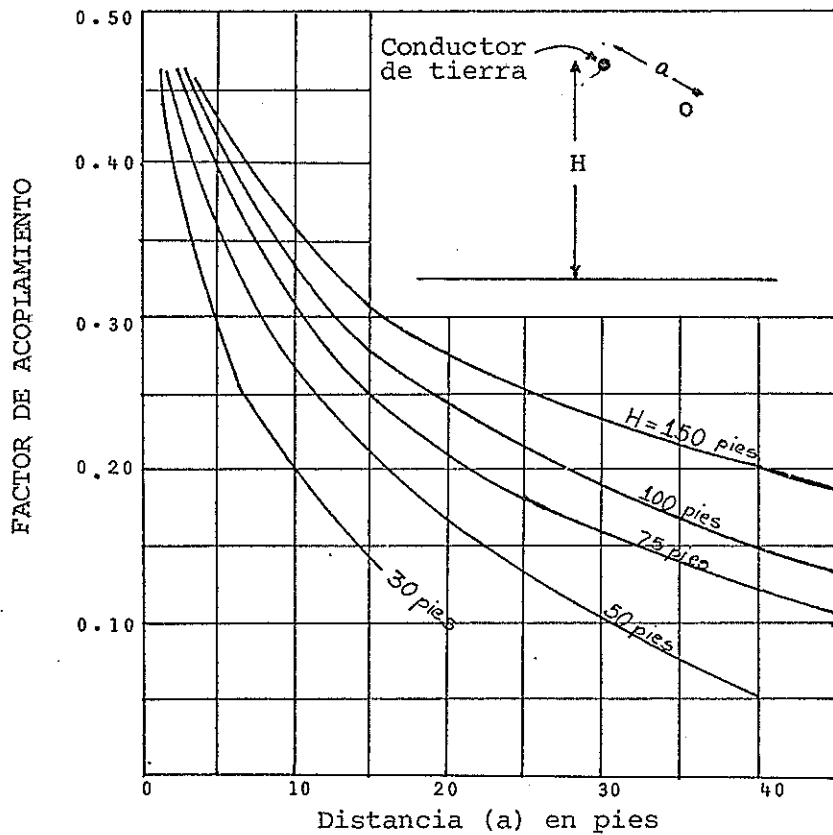


Fig.1.9 FACTORES DE ACOPLAMIENTO CUANDO NO ESTA PRESENTE EL EFECTO CORONA. PARA UN CABLE DE TIERRA DE 1/2 PULGADA DE DIAMETRO.

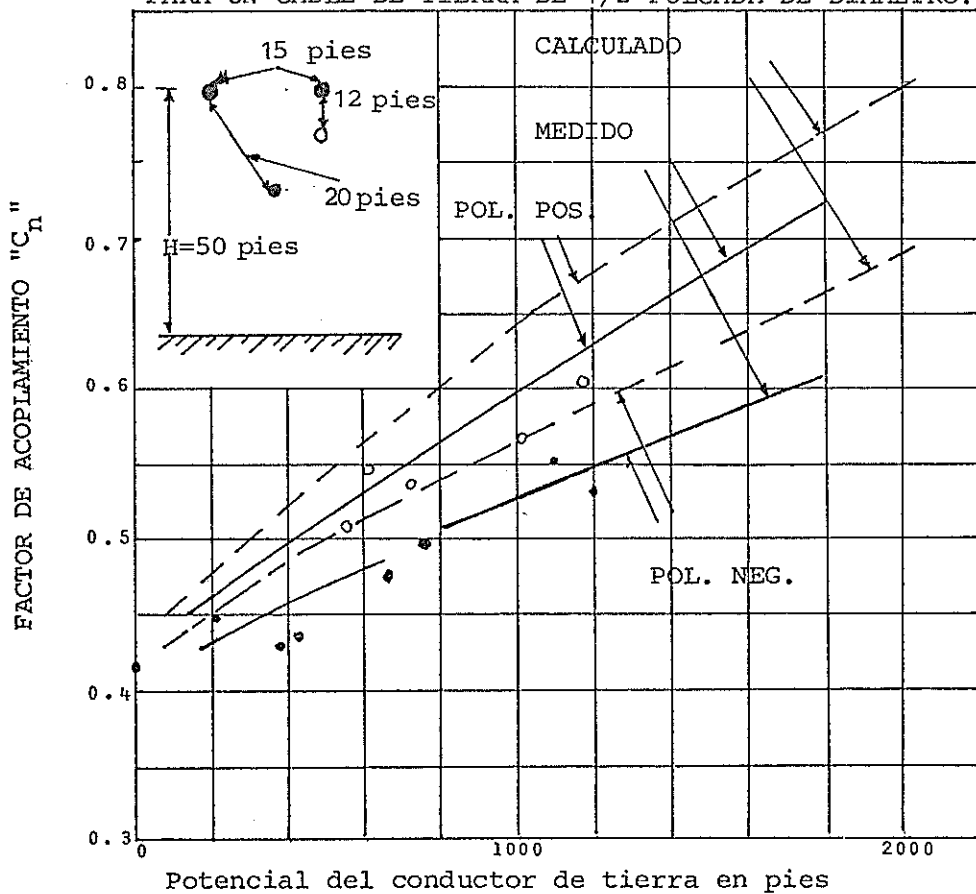


Fig.1.10 EL EFECTO SOBRE EL ACOPLAMIENTO DE AUMENTAR UN TERCER CABLE DE TIERRA SOBRE UNA LINEA CON OTROS DOS CONDUCTORES DE TIERRA SOBRE ELLA.

la Fig. 1.10, que teniendo la misma disposición pero con la supresión del conductor de tierra situado debajo del de fase". Estos hechos hacen resaltar la importancia del conductor de tierra (aéreo).

FACTOR DE CRESTA " α " Y TIEMPO PARA QUE SE PRODUZCA EL CONTORNAMIENTO (FLASHOVER).

El factor de cresta depende de la longitud de los vanos o distancia entre puntos de transición, de la impedancia al pie de torre y del frente de la onda de descarga.

A fin de poder calcular dicho factor, para cualquier caso específico conviene construir una rejilla de reflexión, calcular los factores de reflexión y refracción y construir luego de la computación de las diversas reflexiones y refracciones la onda resultante. Esto se hará para diferentes valores del frente de onda y del vano.

Desde luego que ya teniendo las formas de onda y para diferentes casos, fácil es establecer el factor de cresta y el tiempo en el que

se efectuará el contorneamiento para determinadas condiciones.

Basándose en lo dicho y tras numerosos cálculos se ha logrado determinar curvas que permiten conocer rápidamente para determinados valores de los parámetros, tanto el factor de cresta como el tiempo necesario para contorneamiento.

Así en la Fig. 1.11, se da para una línea como la indicada, y para el caso en que la descarga es directamente a la torre, el factor de cresta (α) en función de $\frac{R}{Z_n}$ en la cual R es la resistencia al pie de la torre y Z_n es la impedancia promedio de los "n" conductores.

El valor de T/f actúa como parámetro siendo T la longitud del vano o mejor dicho el tiempo que tarda la onda en recorrer el vano y f el frente de onda al que puede darse el valor de 1 microseg. que es equivalente a 1000 pies por ser constante la velocidad de propagación que es igual a la de la luz.

En la Fig. 1.12, será para una línea como la

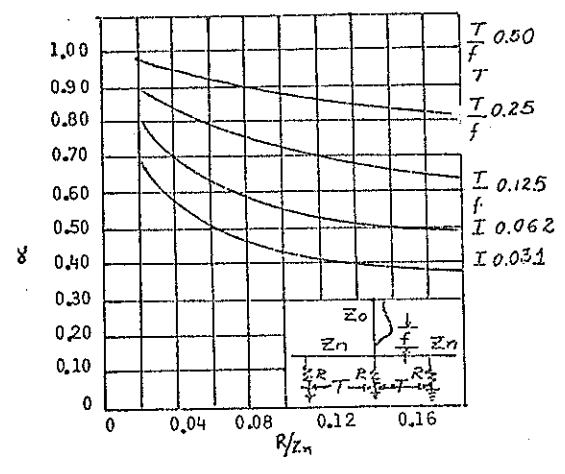


Fig.1.11 FACTOR DE CRESTA EN LA TORRE PARA UNA DESCARGA EN LA TORRE.

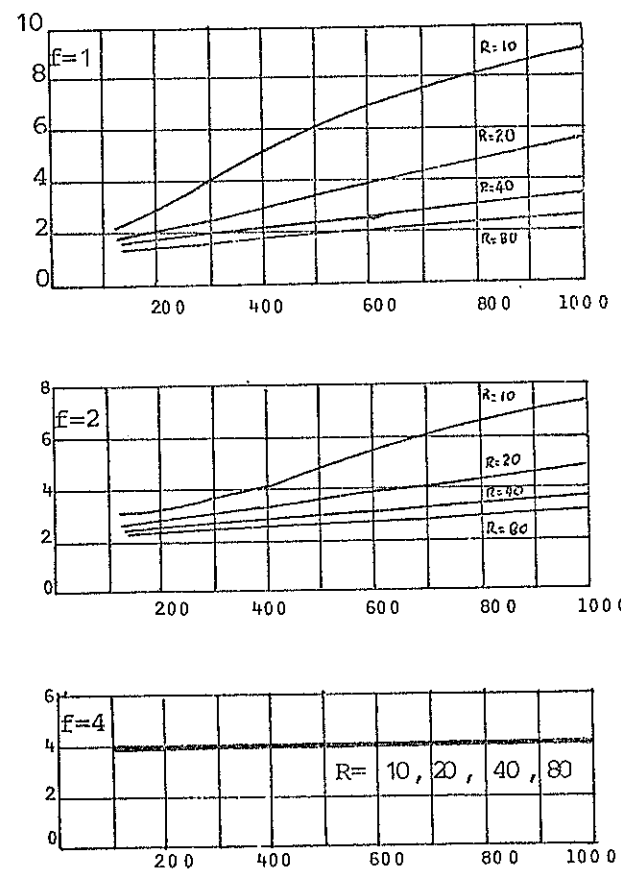


Fig.1.12 TIEMPO DE DESCARGA EN LA TORRE.

dada en la Fig. 1.11, y para el caso en que la descarga es directamente a la torre, nos muestra el tiempo de descarga \underline{t} en función de la longitud de vano expresado en pies, teniendo como parámetros, la resistencia al pie de la torre (R) y el frente de la onda de descarga (\underline{f}).

Para un tiempo de frente de onda de 4 microsegundos el tiempo de descarga es constante para diferentes valores de resistencia al pie de la torre o diferentes longitudes de vano.

En la Fig. 1.13, se da el factor de cresta en función del valor $\frac{T}{\underline{f}}$ y para diferentes valores de la resistencia al pie de la torre, en el caso de la línea que enseña la misma figura y cuando la descarga es en la mitad del vano.

Finalmente en la Fig. 1.14, se da el tiempo necesario para contorneamiento en un caso similar al dado en la Fig. 1.13, la curva representa aquel tiempo como función de la longitud del vano en pies y teniendo la resistencia al pie de la torre (R) y al frente de la onda de descarga (\underline{f}) como parámetros.

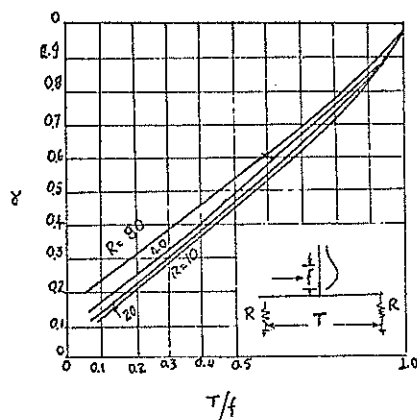


Fig.1.13 FACTOR DE CRESTA EN EL PUNTO MEDIO DEL VANO PARA UNA DESCARGA OCURRIDA EN ESTE PUNTO.

Tiempo hasta la iniciación del arco, microsegundos

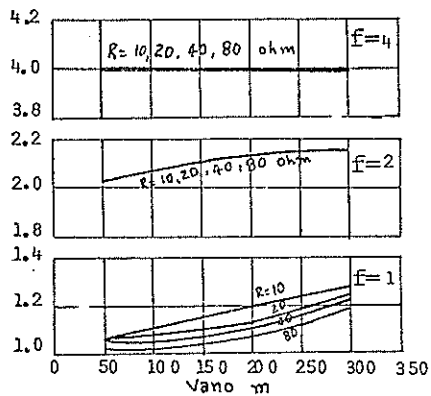


Fig.1.14 TIEMPO TRANSCURRIDO HASTA EL MOMENTO DE INICIARSE EL ARCO EN LA MITAD CENTRA DEL VANO, CON RESPECTO A UNA DESCARGA OCURRIDA EN DICHA MITAD.

1.4.3 DESCARGA DIRECTA A LA TORRE

Bewley construyó una gráfica basada en la relación :

$$I = \frac{V}{(1 - C_n) \alpha R'} \quad (8)$$

donde:

I : Intensidad que podría alcanzar la corriente de la descarga de un rayo sobre un suelo de resistencia nula, la cual es igual al doble de la intensidad de la onda de corriente en la descarga (se supone que la impedancia característica del rayo de 400 ohm).

V : Tensión que soportan los aislantes (aisladores o conjunto de aisladores y madera).

C_n : Factor de acoplamiento (que depende del número de conductores, de su separación y situación relativa, y depende también del efecto corona).

α : Factor de cresta que depende de la longitud de los vanos o distancias entre tubos protectores, resistencia entre torre y suelo, forma del frente de onda e impedancia característica del conductor).

R' : Resistencia aparente que depende de la resistencia de tierra y de las impedancias característi

cas del rayo y del conductor que sufre la descarga.

La Fig. 1.15, se ha dibujado suponiendo que la onda crece uniformemente hasta alcanzar el valor máximo en 2 microsegundos, que el factor de cresta (α) tiene en cuenta la reflexión en las torres adyacentes, y que el tiempo necesario para iniciar la descarga (t), depende de la resistencia media entre torre y suelo, puede prescindir del efecto de las tensiones del sistema de transmisión.

Esta figura tiene como abscisas la relación V/α y como parámetro, la longitud del vano. La gráfica inferior contiene la curva experimental de Lewes y Foust, que nos da la corriente del rayo, y un haz de recta que viene dado por la ecuación:

$$\frac{V}{\alpha} = (1-C_n) R' \cdot I \quad (9)$$

donde $(1-C_n) R'$ se toma como parámetro. Estas gráficas trazadas de manera que incluyen las descargas ocurridas dentro de la primera cuarta parte del vano, están ilustradas con un ejemplo cuya solución viene dada por la lí

nea de trazos.

Una línea tiene siete aisladores en cada cadena, dos hilos de tierra a una altura de 18 m. una separación media entre conductores y hilo de tierra de 4.5 m., 150 m. de distancia entre torres y una resistencia entre torre y suelo de 60 ohm.

¿Qué proporción de arcos es de esperar ocurran en las torres o en sus inmediaciones?

Primero, se debe hallar el valor $(1-C_n)R'$, el cual se obtiene de las Fig. 1.7 y 1.8. Tomando el valor de $R=60$ y dos conductores de tierra, la gráfica de la Fig. 1.7 da para R' el valor 39.

La posición relativa entre los hilos de tierra y de línea es tal que $\frac{b}{a}$ media es 7.7, lo cual da un valor de $C_n = 0.39$ (Fig. 1.8).

$$\text{Luego } (1-C_n)R' = (1-0.39)39 = 23.8$$

Refiriéndonos ahora a la Fig. 1.15, y siguiendo horizontalmente desde el punto de ordenada siete aisladores hasta cortar la recta de 150 m., y de esta intersección, bajando verti

calmente hasta el valor del parámetro $(1-C_n)R' = 23.8$, se lee siguiendo horizontalmente una corriente de 37.000 amp., la cual corresponde a un 18% de descargas.

Si se desea reducir estas descargas hasta un 5%, es necesario aumentar el aislamiento o disminuir la resistencia entre torre y suelo, prefiriéndose por regla general, lo último. De la gráfica inferior de la Fig. 1.15, se deduce que a un rayo de intensidad 67.000 amp. le corresponde un 5% de descargas, y si la resistencia suelo-torre se mantiene en los 60 ohm. de antes, o sea con $(1-C_n)R' = 23.8$ se encuentra que $\frac{V}{\alpha}$ es 1540 y se necesitarán trece aisladores.

Si al contrario, el aislamiento se mantiene como antes, debe disminuir R hasta que $(1-C_n)R' = 0.61R' = 12.8$ para lo cual $R' = 21$; para este R' en la Fig. 1.7 se encuentra que $R = 25$ ohm.

Si se usan brazos de madera en torres metálicas o poste de madera, debe calcularse el número de aisladores a que equivalen, e igualmente deberá procederse en caso de querer in-

investigar la proporción de descarga del conductor a las torres o entre hilo de tierra y de línea. Si el rayo no fuera interceptado por el hilo de tierra y cayera sobre un conductor de línea, la corriente del rayo que origina el arco puede obtenerse mediante la relación E/R' , donde E es la tensión de arco, y R' la resistencia aparente que será en este caso de 154 ohm.

$$R' = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_n} + \frac{1}{R}} = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{2}{500} + \frac{1}{\infty}} = 154$$

1.4.4 DESCARGA AL PUNTO MEDIO DEL VANO

Puede calcularse el comportamiento de la línea de tierra con relación a las descargas ocurridas en el medio del vano, entendiéndose por tal una longitud del mismo que abarque una cuarta parte del vano a cada lado del centro de éste. La tensión de descargas entre conductores se toma igual a la de arco entre varillas situadas a la misma distancia y separadas por aire.

La reducción de la tensión se origina por efecto de las reflexiones de las ondas en las

torres adyacentes, desarrollándose una especie de carrera entre el crecimiento del potencial en el punto que ha sufrido la descarga y la llegada de estas reflexiones.

Debido a que al tener una descarga al punto medio del vano existe una resistencia infinita al paso de la corriente a tierra, el contorneamiento (flashover) no se origina, esto sin embargo es cierto únicamente si el vano es de una longitud tal que no se alcance el voltaje de descarga disruptiva hasta que las ondas de reducción, es decir las ondas producidas por reflexión en las torres no regresen.

Los valores del factor de cresta y del tiempo necesario para tener contorneamiento se obtiene de la Fig. 1.13 y 1.14 respectivamente.

La ecuación

$$I = \frac{V}{(1 - C_n) \alpha R'}$$

queda determinada en la Fig. 1.16, la cual va junto con las Fig. 1.13 y 1.14. Dicha ecuación se resuelve en la Fig. 1.16 por la intercepción de dos familias de curvas: las tensiones de arco V (como función de la separa-

ción entre el conductor de tierra y el de línea (S), y el tiempo necesario para iniciar la descarga(t) y las curvas representativas del valor de V en función de las otras variables de la ecuación. El uso de la Fig. 1.16 es el siguiente :

- a) Se halla α de la Fig. 1.13, y t de la Figura 1.14.
- b) Se encuentra para una determinada separación (S) entre el conductor de tierra y el de la línea en medio del vano, en la Figura 1.16, la intersección vertical con la curva (t) apropiada, y se interpolo el valor de αI .
- c) Para este valor de αI y α se determina la corriente del rayo I y la correspondiente proporción de arcos de las curvas de la correspondiente gráfica de la Fig. 1.16.

Este cálculo puede hacerse al revés, y determinar la separación entre los conductores de línea y de tierra en el medio del vano, para que los arcos debido a la descarga no excedan de una determinada proporción.

Número de aisladores de 10" de diámetro y 5 3/4" de separación.

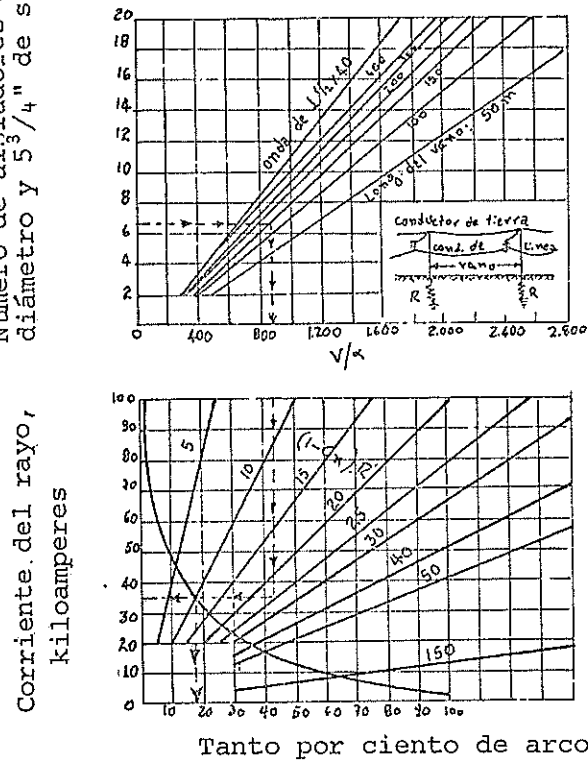
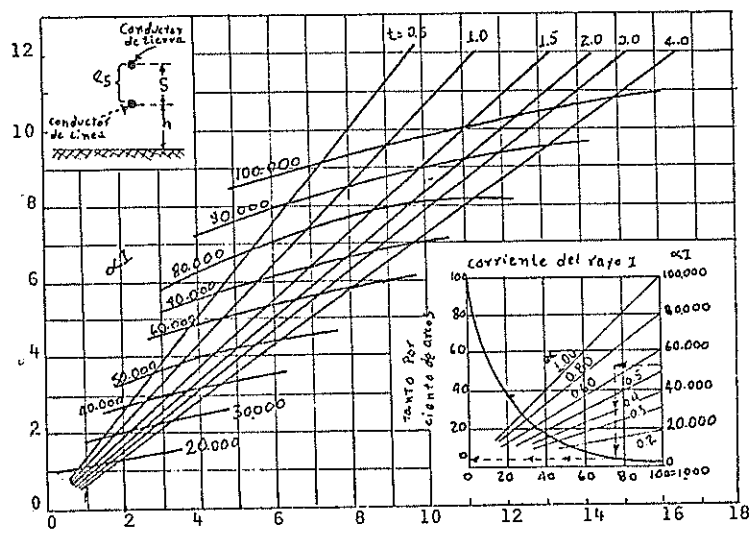


Fig. 1.15 GRAFICA PARA EL CALCULO DE LA PROPORCION DE ARCOS CONTORNEANDO LOS AISLADORES. LOS VALORES DADOS SON LA MEDIA DE LOS HALLADOS PARA ONDAS DE FRENTE DE 2µseg.

tensión entre el conductor de línea y el de tierra en medio del vano, megavolt



Separación en el medio del vano, entre el conductor de tierra y el de línea, metros.

Fig. 1.16 GRAFICA PARA EL CALCULO DE LOS ARCOS OCURRIDOS EN MEDIO DEL VANO.

Como ejemplo tomemos una resistencia de tierra de 40 ohm., una separación (S) de 4.5 m. y una longitud de vano (T) de 250 m.; supongamos también un frente de onda (f) de 1μ seg., o sea 300 m.

$$\frac{T}{f} = 0.83 \text{ y de la Fig. 1.13 ;}$$

$$\alpha = 0.76 \text{ deduciéndose de la Fig. 1.14}$$

$$t = 1.17 \text{ de la Fig. 1.16}$$

$$\alpha I = 55.000 \quad e$$

$$I = 72.000 \text{ amp., con una proporción de arcos del 3\%.}$$

Si la longitud del vano decrece hasta 150 m., I aumenta a 125.000 con una proporción del 1%. Por lo contrario, si se deja fija la longitud del vano en 250 m. y el frente de onda aumenta a 600 m. se necesita para que produzca arco, una corriente de alrededor de los 115.000 amp. Estos resultados indican que el frente de onda es del orden de 2μ seg., o mayor, no se necesitarán separaciones mayores de 4.5 m., a menos que los vanos sean relativamente largos.

Se observa que cuando la longitud del vano

disminuye, el amperaje permisible aumenta y se reduce el porcentaje de contorneamiento. Lo mismo ocurre cuando la longitud del vano permanece la misma, pero aumenta el frente de onda.

Es indiscutible que los rayos caídos en medio del vano ocasionarán considerablemente, menos arcos en las torres que lo que descargan directamente sobre éstas.

Conforme a lo expresado, el cálculo de este nivel eléctrico según el estudio de Bewley, no es más que aproximado, es decir que con él no pueden obtenerse resultados exactos. Ya se indicó que no se conocen debidamente ciertos datos, como por ejemplo, la resistencia del suelo durante el paso de la corriente de la descarga, la impedancia característica del rayo y la influencia del efecto corona sobre el factor de acoplamiento, ni como intervienen todos ellos en el cálculo del fenómeno, por lo que no es posible proceder con exactitud matemática.

1.4.5 AISLAMIENTO MINIMO PARA LINEAS

El aislamiento de líneas puede variar dentro de un amplio rango, generalmente el aislamiento de las líneas se hace proporcional al voltaje de operación de la línea.

La pregunta que respecto al aislamiento mínimo surge, queda contestada mediante la Tabla IX, en la que se da el número de discos necesarios (unidades aisladoras de 23/4 pulgadas de espesor) para tener un contorneamiento en seco para voltaje de 60 ciclos igual o mayor que 3.5, 4, 4.5, 5 veces el voltaje normal línea-neutro. El menor valor corresponde a la columna 3.5 el voltaje normal línea-neutro. Se da también el número de unidades aisladoras promedio y el impulso básico de nivel de aislamiento, todo para diferentes valores de clasificación de voltaje.

Hay una tendencia a usar aislamiento más alto para líneas cuyo voltaje de operación es más alto, tendencia que se puede apreciar muy bien en la Fig. 1.17.

Pero se puede usar el aislamiento mínimo, si

CLASIFICACION DE REFERENCIA EN KV	NUMERO DE DISCOS NECESARIOS PARA TENER UN CONTORNEAMIENTO EN SECO A UN VOLTAJE DE 60 CICLOS IGUAL O MAYOR QUE :				PROMEDIO PRACTICO DEL NUMERO DE DISCOS	IMPULSO BASICO DE NIVEL DE AISLAMIENTO KV
	3.5 voltaje línea-neutro	4.0 voltaje línea-neutro	4.5 voltaje línea-neutro	5.0 voltaje línea-neutro		
34.5	2	2	2	3	3	200
46	3	3	3	4	4	250
69	4	4	5	5	5	350
92	5	5	6	7	7	450
115	6	7	8	8	8	550
138	7	8	9	10	9	650
161	8	9	11	12	11	750
196	10	11	13	14	13	900
230	12	14	15	18	15	1050
287	15	18	20	23	19	1300
345	19	22	25	29	22	1550
360	20	23	27	30	23	1610

TABLA IX NUMERO MINIMO DE DISCOS DE AISLADORES PARA LINEAS DE TRANSMISION BASADO EN $5^{3/4}$ PULGADAS.

siempre que se tenga condiciones adecuadas ,
las cuales de acuerdo a lo hasta aquí expresado
son :

- a) Tener una adecuada protección para descargas directas.
- b) Tener una resistencia al pie de la torre relativamente baja.

Desde luego que existen otros factores como:
nieve, niebla, humo, etc., sobre todo si son
en proporciones de consideración que pueden o
bligar a tener aislamientos más altos.

1.4.6 COORDINACION DEL ESPACIAMIENTO CON EL NIVEL DE AISLAMIENTO.

A cada nivel de aislamiento corresponde un apropiado espaciamiento entre conductores, y a la torre con el cual se puede llegar a un mejor aprovechamiento en la potencia del aislador.

En general, el espaciamiento entre un conductor de fase y uno de tierra o a la estructura de la torre, puede basarse en un margen de exceso razonable, por ejemplo, 10 por ciento del valor de impulso de contorneamiento de los

aisladores.

W. Lewis, ha desarrollado la Tabla X, en la cual él da los espaciamiento con referencia a las estructuras de la Fig. 1.18 y 1.19, se nota en estas figuras que él considera el máximo giro que puede tener la cadena de aisladores por causa de viento es de 30 grados.

Para el espaciamiento "E" en la Fig. 1.19, Lewis sigue este criterio: con un espaciamiento de $2/3$ veces el espaciamiento "A" se tiene un contorneamiento para 60 ciclos en seco de 2.5 veces el voltaje de línea-línea y cuando "E" es aproximadamente igual a "A" se tendrá el contorneamiento aproximadamente un valor de 3.5 veces el voltaje fase-fase.

Referido a la Fig. 1.18 y 1.19, y como es una extensión a su Tabla X, Lewis da las curvas de la Fig. 1.20, en la que se ve el espaciamiento, en función del número de aisladores. Según se observa en las figuras de las estructuras, las distancias anotadas por "A", "B", "C", "D" corresponden a lo siguiente :

A : Distancia desde el conductor al punto de la estructura de la torre posiblemente

NUMERO DE AISLADORES	ESPACIAMIENTO A EN PIES	ESPACIAMIENTO B EN PIES	ESPACIAMIENTO C EN PIES	ESPACIAMIENTO D EN PIES
3	2	3	4	6
5	3	4.5	6	9
7	4	6	8	12
9	5	7.5	10	15
11	6	9	12	18
13	7	10.5	14	21
15	8	12	16	24
17	9	13.5	18	27
19	10	15	20	30
21	11	16.5	22	33
23	12	18	24	36
25	13	19.5	26	39
27	14	21	28	42
29	15	22.5	30	45
31	16	24	32	48

TABLA X COORDINACION DE ESPACIAMIENTO CON NUMERO DE AISLADORES

más cercano.

B : Distancia desde un conductor suspendido a una cadena de aisladores, cuando se halla en su posición normal al miembro vertical de la torre más cercano.

C : Distancia entre conductores cuando se hallan en una disposición vertical, y distancia entre conductores de fase y plano de conductor de tierra.

D : Distancia entre conductores en disposición horizontal.

Gracias a la siguiente relación "el impulso de contorneamiento (flashover) de dos discos aisladores de 10 pulgadas de diámetro y $2\frac{3}{4}$ pulgadas de espesor, es aproximadamente igual al contorneamiento (flashover) de 12 pulgadas de entrehierro standard", han podido establecer como una relación práctica lo siguiente:

espaciamento "A" = (número de discos + 1) / 2

espaciamento "B" = 1.5 (espaciamento "A")

espaciamento "C" = 2.0 (espaciamento "A")

espaciamento "D" = 3.0 (espaciamento "A")

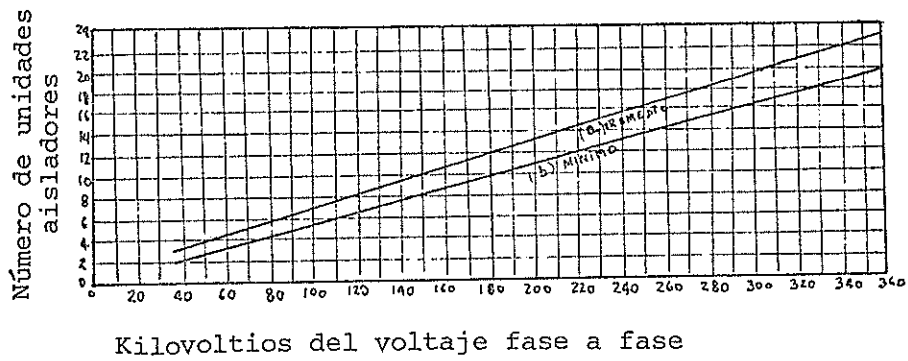


Fig. 1.17 PRACTICA EN EL USO DE AISLADORES DE SUSPENSION. La curva (a) representa un promedio práctico, la curva (b) nos da el mínimo número de disco para obtener el impulso básico de nivel de aislamiento y tener una descarga de 60 ciclos igual a 3.5 veces el voltaje de línea a neutro.

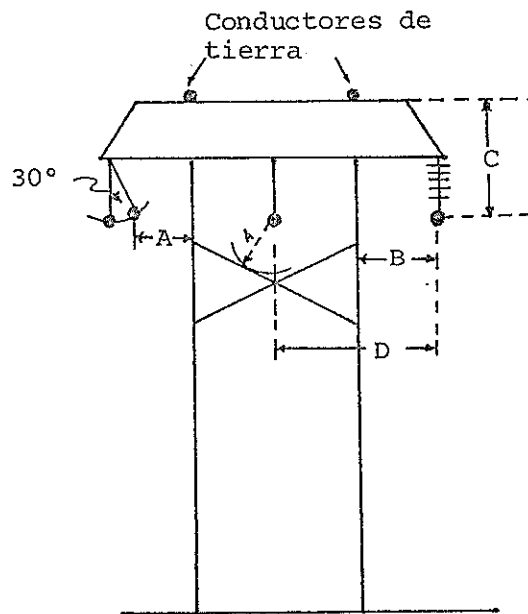


Fig.1.18 LINEA DE TRANSMISION DE UN CIRCUITO SIMPLE CON ARREGLO HORIZONTAL DE CONDUCTORES MOSTRANDO LOS DIVERSOS ESPACIAMIENTO USADO EN COORDINACION DEL AISLAMIENTO.

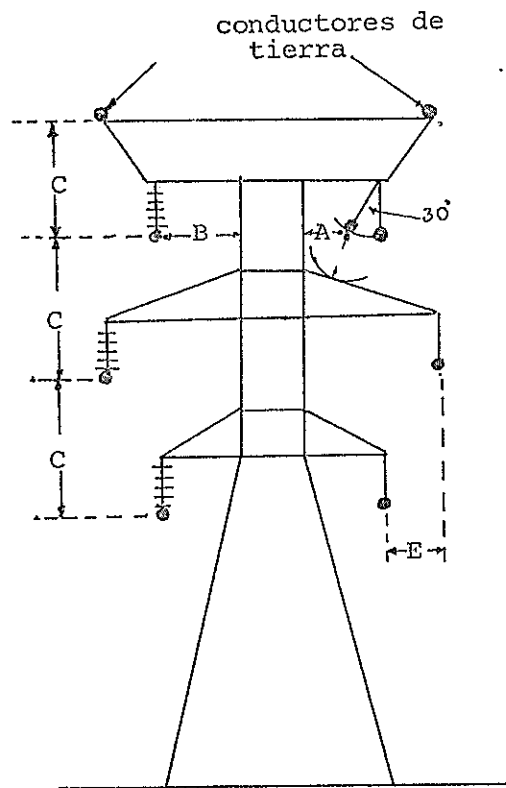


Fig. 1.19 LINEA DE TRANSMISION DE DOBLE CIRCUITO CON ARREGLO VERTICAL DE LOS CONDUCTORES MOSTRANDO EL ESPACIAMIENTO USADO EN COORDINACION DEL AISLAMIENTO.

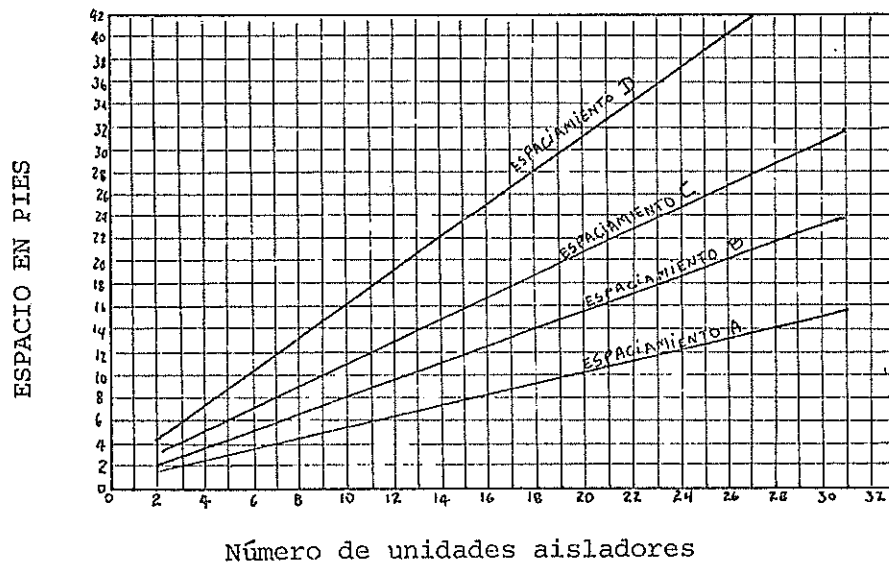


Fig. 1.20 RELACION ENTRE EL NUMERO DE DISCOS AISLADORES Y EL ESPACIAMIENTO PARA LINEAS DE TRANSMISION.

espaciamiento "E" = 0.5 (espaciamiento "A") para con
diciones desfavorables de nieve
y humedad.

espaciamiento "E" = 0.5 (espaciamiento "A") para con
diciones favorables de nieve, y
regiones secas.

En la Fig. 1.21, el espaciamiento entre con-
ductores para una disposición horizontal y
basado en el aislamiento promedio dado en la
Fig. 1.17 y en la Fig. 1.22, se da el espaciam
miento entre conductores para una disposición
vertical y basado también en el aislamiento
promedio dado en la Fig. 1.18.

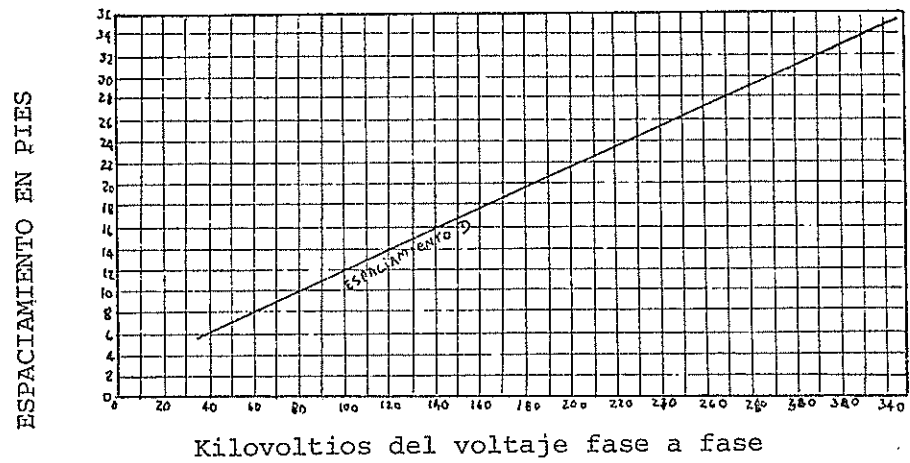


Fig. 1.21 ARREGLO HORIZONTAL DE CONDUCTORES PARA COMPARAR ESPACIAMIENTO D PARA UN PROMEDIO DE AISLAMIENTO DE LINEA.

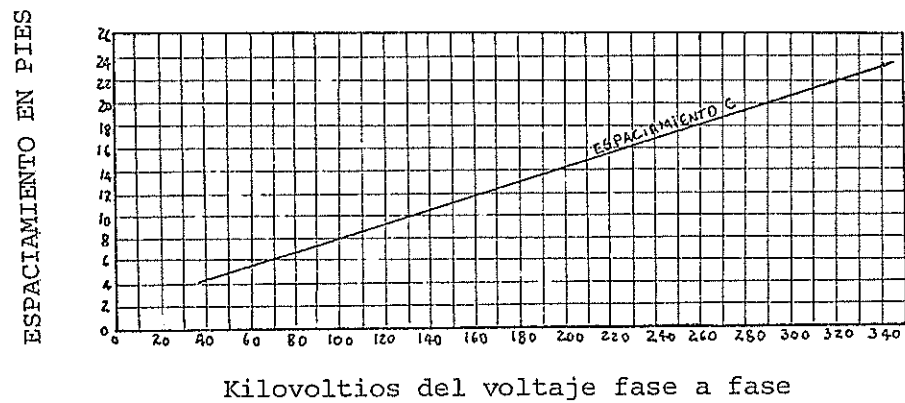


Fig. 1.22 ARREGLO VERTICAL DE CONDUCTORES, Y PARA COMPARAR ESPACIAMIENTO C BASADO EN EL PROMEDIO DE AISLAMIENTO DE LINEA.

CAPITULO II

PROTECCION CONTRA LAS SOBRETENSIONES

2.1 GENERALIDADES

En las instalaciones eléctricas, por causas unas veces intrínsecas y otras debido a fenómenos externos, la diferencia de potencial entre conductores o entre éstos y tierra puede alcanzar, durante un tiempo generalmente reducido, valores superiores a la diferencia de potencial más o menos constante que existe normalmente en los bornes de las máquinas generatrices y correspondiente a las condiciones del circuito. Tales diferencias de potencial anormales, que se conocen con el nombre de sobretensiones, pueden manifestarse entre la tierra y los conductores de la instalación, y por consiguiente entre la tierra y los arrollamientos de las máquinas o de los aparatos, y también entre dos conductores de diversa polaridad o de fases diferentes, pudiendo asimismo elevarse anormalmente la diferencia de potencial entre dos puntos poco distantes de un mismo conductor.

Cuando en una parte de la instalación o de las máquinas el aumento de tensión sobrepasa los valores para los cuales están dispuestos los aisladores de la línea, o los aislantes de los cables subterráneos y de

los arrollamientos, y además dura un tiempo apreciable yendo acompañada de suficiente intensidad de corriente, puede dar lugar a la producción de averías. Estas se manifiestan generalmente por el deterioro lento o rápido, o con perforación de los aislantes, que en un tiempo más o menos breve puede poner fuera de servicio los cables, las máquinas o los aparatos en los que se haya manifestado la sobretensión.

En la construcción de las máquinas y de los aparatos eléctricos, los dieléctricos empleados como aislantes se eligen y dimensionan de modo que presenten un cierto coeficiente de seguridad, de forma análoga al que se fija en la construcción para la resistencia de los materiales y que pueden soportar una tensión de prueba más elevada que la normal de servicio, lo mismo puede decirse del revestimiento de los hilos y de los cables aislados formando conductores, e igual ocurre con los aisladores de porcelana o vidrio para las líneas aéreas cuya tensión de prueba es superior a la de trabajo.

De lo expuesto se deduce que las sobretensiones son peligrosas para la integridad de las máquinas, aparatos y conductores, cuando alcanzan valores superiores a las tensiones de prueba. Así, pues, es preciso prevenirse empleando protecciones que si no

evitan la formación de sobretensiones impidan al menos que al producirse sobrepasen los límites convenientes. Las sobretensiones pueden ser de dos clases: sobretensiones de origen atmosférico o externas y sobretensiones internas.

Las de origen atmosférico, como se comprende afectan únicamente a las líneas aéreas. Las que obedecen a causas internas pueden producirse en toda clase de instalaciones.

2.2 SOBRETENSIONES DE ORIGEN ATMOSFERICO

Descargas atmosféricas entre nubes y líneas aéreas: Se advierte que la formación de tormentas es debido a las cargas estáticas de las nubes, consideradas como cuerpos conductores. Cuando una nube cargada estáticamente a un cierto potencial se aproxima a la tierra o a otra nube, podrá llegar un momento en que la diferencia de potencial entre las dos nubes o entre la nube y la tierra, sea superior a la tensión crítica de descarga. Entonces saltará la chispa, a la que se designa con el nombre de "RAYO". En consecuencia, los rayos no son más que grandes arcos entre dos cuerpos cargados electrostáticamente. Por experiencias realizadas se ha llegado a la conclusión de que la frecuencia de la corriente debido al

rayo puede alcanzar hasta 10.000 Hz, lo que parece comprobar que el campo eléctrico creado en el aire en el momento del rayo varía a su vez muy rápidamente.

En la Fig. 2.1, se muestra la forma típica de una onda de corriente debido a un rayo. El tiempo en que alcanza el valor de cresta es de uno a diez microsegundos y decae a un valor de la mitad del valor de cresta en unos diez a cien microsegundos. El valor de cresta puede ser del orden de unos 100.000 amperios.

Los sobrevoltajes que aparecen en las líneas de transmisión debido a descargas atmosféricas, pueden producirse en dos formas: por inducción electrostáticas o por descargas directas sobre las torres, los cables de guarda o los conductores de la línea.

En el primer caso el sobrevoltaje se produce de la siguiente forma: la carga eléctrica de una nube que se encuentra sobre una línea de transmisión induce en los conductores de ésta una carga de polaridad contraria, la cual se va acumulando gradualmente en los conductores debido al paso de corrientes de fuga por la superficie de los aisladores; si se produce

un rayo de la nube a tierra o a otra nube, la carga eléctrica de la nube desaparece bruscamente y deja en libertad la carga eléctrica acumulada en los conductores, la cual se propaga a lo largo de la línea en forma de ondas viajeras. Las mediciones realizadas en líneas de transmisión han mostrado que este tipo de sobrevoltajes es de magnitud relativamente pequeña y de polaridad generalmente positiva, y en consecuencia sólo afecta a líneas de distribución o subtransmisión con voltajes de operación del orden de 35 Kv o menos.

Las descargas directas de rayos sobre las líneas producen sobrevoltajes mucho más elevados que los inducidos y son una de las principales causas de interrupción en las líneas.

Los sobrevoltajes producidos por las descargas de rayos son impulsos unidireccionales de muy corta duración (decenas de microsegundos), con un frente escarpado y una cola de disminución más lenta. Se estima que el 70% o más de las descargas atmosféricas tienen una magnitud de cresta igual a, o mayor que 2.000 Kv, se ha registrado un valor máximo de 20.000 Kv.

Para reproducir las ondas de voltaje producidas por

rayos en los laboratorios y poder normalizar las pruebas de aislamiento al impulso, se ha definido una forma de onda como la que se muestra en la Figura 2.2, que se considera típica de las producidas por rayos. Como se ve en dicha figura, el tiempo para alcanzar el valor de cresta es de 1.5 microsegundos y el tiempo en que la onda decrece a la mitad del valor de cresta es de 40 microsegundos.

2.3 SOBRETENSIONES DE ORIGEN INTERNO

Las variaciones de carga en una red, producen a su vez variaciones de tensión. En particular, el cierre y la apertura de los interruptores provoca ondas móviles, pero las sobretensiones así generadas son menos peligrosas que las de origen atmosférico, si bien es cierto que en algunas ocasiones han sido registradas, en el momento del corte de la corriente, sobretensiones de valores múltiples de la tensión de servicio. Sin embargo, si la amplitud de las ondas de origen interno no elevada, su frente es muy escarpado.

Las oscilaciones libres que provienen de la superposición de la onda incidente y de la onda reflejada, no son generalmente peligrosas, porque entonces no llega al doble de esta tensión cuando el neutro de

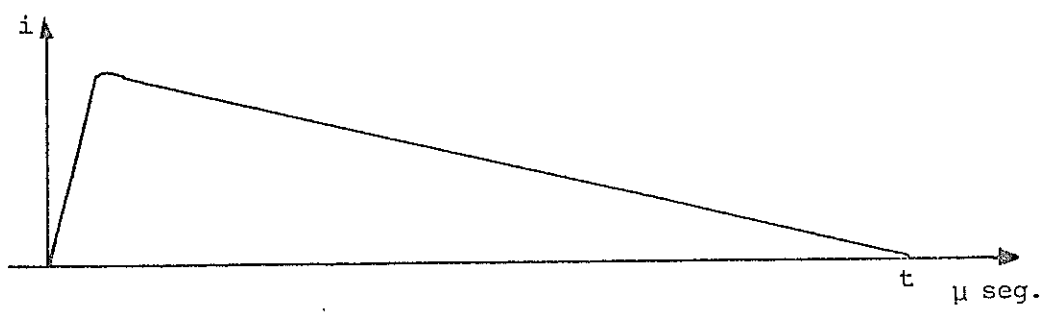


Fig. 2.1 FORMA TIPICA DE UNA ONDA DE CORRIENTE DEBIDO A UN RAYO

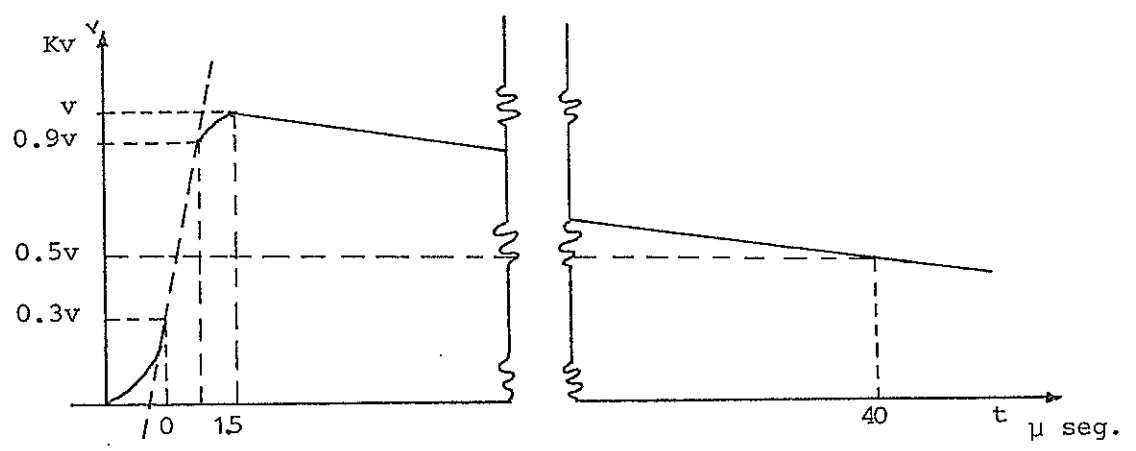


Fig. 2.2 FORMA DE ONDA NORMALIZADA PARA REPRESENTAR UN IMPULSO DE VOLTAJE DEBIDO A UN RAYO

la red está puesta a tierra, y lo sobrepasa ligeramente si el neutro está aislado cuando se producen tierras accidentales sobretodo si se enciende un arco intermitente, éste da lugar a resonancia susceptibles de provocar sobretensiones superiores a 3.5 veces la tensión compuesta de servicio.

A continuación se indican las clases de sobretensiones de origen interno:

2.3.1 SOBRETENSIONES A LA FRECUENCIA INDUSTRIAL

Los sobrevoltajes a frecuencia industrial se producen por fallas en el sistema o por variaciones bruscas de carga y su valor depende igualmente de las características del sistema.

Estos sobrevoltaje son de magnitud reducida con lo cual se tiene la ventaja de que no ponen en peligro la aislación del sistema. En igual forma que para los sobrevoltajes transientes, deben considerarse los valores resistidos y críticos de la aislación para los sobrevoltajes a frecuencia industrial.

Por lo general se estima que para el proyecto de la aislación el sobrevoltaje a frecuencia industrial no es superior de 1.5 a 2.0 veces

el valor del voltaje máximo de servicio, y queda representado por la siguiente expresión:

$$V_{fi} = K_i \cdot \frac{V_L}{\sqrt{3}} \text{ (Kv)}$$

V_L : voltaje máximo de servicio entre fases (Kv).

K_i : valor del sobrevoltaje a frecuencia industrial, oscila de 1.5 a 2.0 veces el valor máximo del voltaje entre fase y tierra.

2.3.2 SOBRETENSIONES DEBIDAS A LA APERTURA DE LOS INTERRUPTORES.

Esta clase de sobretensiones producidas al cortar la corriente de un circuito, son más importantes que las sobretensiones a la frecuencia de servicio.

Después de efectuado el corte o la interrupción del circuito, la tensión presenta una oscilación de media o de alta frecuencia.

Sin embargo, la oscilación no alcanza amplitudes demasiado elevadas después de haberse interrumpido el cortocircuito.

La Fig. 2.3 muestra una imagen de una tal on-

dulación obtenida con el oscilógrafo catódico. Si no hubiera amortiguamiento, la tensión tomaría la marcha de la curva con trazado de puntos. La ordenada máxima alcanzaría un poco más del doble de la amplitud A , a la frecuencia industrial. El amortiguamiento produce una disminución sensible de la ordenada máxima, por lo que ésta no llega a 200% y muy a menudo está comprendida entre 140 y 160% de la tensión de servicio. En muchos casos, la oscilación se amortigua de tal forma que la amplitud de la tensión a la frecuencia industrial no se sobrepasa (véase Fig. 2.4).

En el caso de interrupción de corriente en transformadores en vacío, se originan sobretensiones entre línea y tierra, acompañadas de ondas de frente rígido. La corriente en vacío del transformador, que es relativamente pequeña, puede ser interrumpida, bien antes de su paso natural por cero, o también en el momento que tiene el valor de cresta. El corte repentino de esta corriente dará nacimiento a valores extremadamente elevados de la tensión de restablecimiento, si el espacio que separa los contactos abiertos del interruptor puede soportar esta tensión; pero en

los interruptores de aceite se produce un reencebamiento del arco cuando la tensión ha aumentado en una cantidad relativamente pequeña y cae a cero para volver a comenzar. El espacio que separa los contactos representa, por decirlo así, una válvula de seguridad que impide el origen de sobretensiones muy elevadas. La práctica confirma que las sobretensiones por interrupción no alcanzan más que muy raramente valores inadmisibles. Al desconectar del manantial de energía las líneas en vacío, se producen asimismo sobretensiones formadas por ondas de frente escarpado, dando origen a fenómenos distintos de los de la desconexión de los transformadores en vacío. En el caso de las líneas, cada reencebamiento entre los contactos del interruptor produce una sobretensión debido a la capacidad de la línea.

2.3.3 SOBRETENSIONES DE PUESTA A TIERRA

No se comprende en ellas elevaciones de tensión con relación a la tierra, ocasionadas por el desplazamiento del diagrama vectorial cuando se produce un cortocircuito permanente. Se hace referencia únicamente a las sobretensiones que forman parte de fenómenos

transitorios producidos durante la puesta a tierra y seguida interrupción de la misma. Estos arcos intermitentes son muy perjudiciales y los fenómenos producidos son comparables a los reencebamientos en la desconexión de capacidades.

Hay ejemplo de sobretensiones violentas producidas por arcos intermitentes, que han dado origen a averías considerables. Se han medido sobretensiones por esta causa de 3.1 veces la tensión compuesta de servicio, que se ha reducido a 1.3% solamente cuando el neutro estaba directamente unido a tierra.

La duración efectiva de las sobretensiones de origen interno, es en general mayor que las de origen atmosférico y puede alcanzar el orden de magnitud de un semiperíodo de la frecuencia industrial, es decir, 10.000 μ s. Por el contrario, estas sobretensiones son menos elevadas y pueden limitarse a valores reducidos con el empleo de medios sencillos.

- 2.3.4 SOBRETENSION DE PUESTA EN SERVICIO DE UNA LINEA
De las sobretensiones a que dan origen la puesta en servicio de una línea o de un cable,

se dará una breve referencia.

Supondremos un cable en vacío que se conecta a un manantial de energía. La tensión U aplicada en el origen se propaga, naturalmente, hacia la extremidad opuesta bajo la forma de una onda móvil (onda de carga) de frente escarpado, y si el circuito está abierto en ese punto, Fig. 2.5, se producirá una reflexión total de la onda, y una tensión de amplitud $2U$ remontará hacia el origen (Fig. 2.5a); pero en ese punto la tensión se mantiene constante por el generador y al valor U , produciéndose por consiguiente una onda de descarga U que se propagará hacia la extremidad (Figura 2.5b) y después de reflejarse retornará hacia el origen, anulándose la tensión (Fig. 2.5c).

Como el generador mantiene la tensión U , una nueva onda de carga se transmitirá nuevamente si no actuara como amortiguante el circuito. Es evidente que en cada punto del cable se reproducirán periódicamente las mismas condiciones, y la puesta en servicio del cable se caracterizará consiguientemente por la formación de una especie de onda estacionaria cuyo

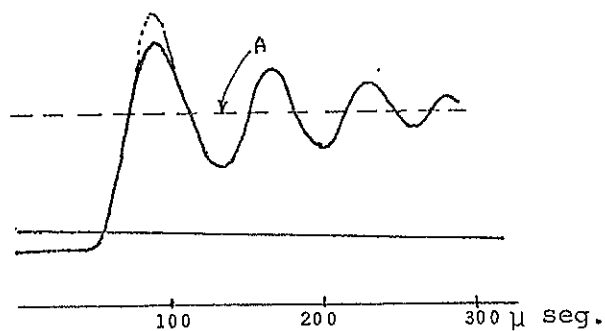


Fig.2.3 OSCILACION MEDIDA CON OSCILOGRAFO CATODICO, CORRESPONDIENTE A LA TENSION DE RESTABLECIMIENTO DE UN INTERRUPTOR.

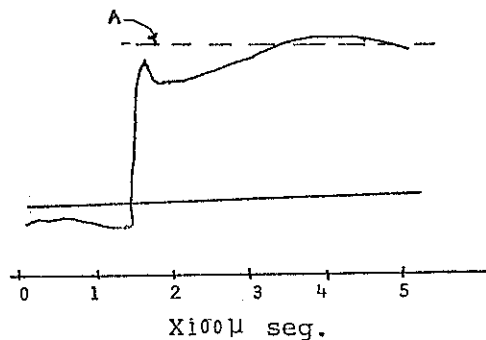


Fig.2.4 OSCILACION AMORTIGUADA DE LA TENSION DE RESTABLECIMIENTO DE UN INTERRUPTOR.

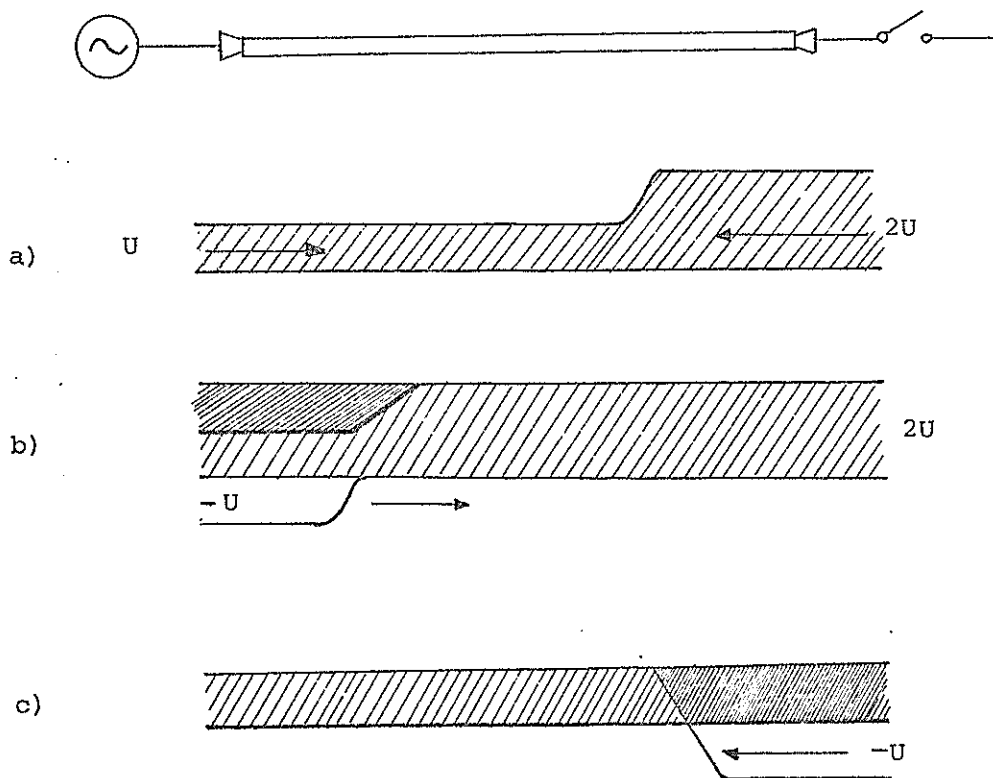


Fig.2.5 SOBRETENSION A QUE DA ORIGEN LA PUESTA DE SERVICIO DE UNA LINEA.

vientre está en la extremidad y en que la fre cuencia es :

$$\delta = \frac{V}{4 \cdot L}$$

siendo V la velocidad de propagación de la onda, y L la longitud del cable.

Prácticamente, este fenómeno transitorio es de corta duración, pero de todos modos se produce en el cable, en los primeros instantes del cierre del interruptor, una sobretensión de amplitud $2U$ (salvo el efecto de amortiguamiento).

2.3.5 CAMBIO DE CARACTERISTICAS DEL CIRCUITO

Si el cable del ejemplo anterior estuviera unido en su extremidad a una línea aérea, y si ésta terminase a su vez en un interruptor abierto o en un transformador (Fig. 2.6), la onda de cierre experimentaría un aumento de tensión en el punto de unión del cable con la línea aérea y una reflexión sucesiva en la ex tremidad de ésta.

Si por ejemplo, la impedancia de la onda del cable es $Z_1 = 50$ ohmios y la línea $Z_2 = 500$ oh-

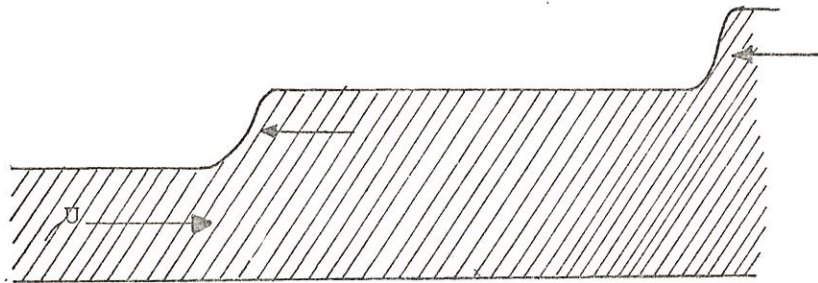


Fig. 2.6 CIRCUITO FORMADO POR VARIAS PARTES DE CARACTERISTICAS DISTINTAS.

mios, la onda de carga transmitida por el generador al cable sufrirá en la extremidad opuesta un aumento.

$$u \frac{2Z_2}{Z_1 + Z_2} = u \frac{1000}{550} = 1.8u$$

y en los bornes de un transformador, por ejemplo, de impedancia

$Z_3 = 10.000$ ohmios se producirá una reflexión

$$1.8 \cdot u \frac{Z_3 - Z_2}{Z_2 + Z_3} = \frac{1.8 \cdot 9500}{10500} u = 1.65u$$

La tensión resultante alcanzará pues sobre la línea el valor :

$$u(1.8 + 1.65) = 3.45u$$

esto comprueba que pueden producirse arcos a tierra en las cajas terminales del cable y algunas veces (por acción consecutiva) perforaciones en éste o descargas a la masa de los transformadores.

CAPITULO III

EFECTOS DE LOS AISLADORES EN LAS LINEAS DE TRANSMISION

3.1 GENERALIDADES

En las líneas eléctricas aéreas, los conductores deben ir aislados de los apoyos correspondientes. Ya hemos visto que estos conductores se emplean casi siempre sin aislamiento propio, es decir, desnudos. Por lo tanto, se necesita un elemento intermedio, denominado aislador, de buenas propiedades dieléctricas, que aislen totalmente los conductores bajo tensión, de los apoyos que soportan la línea. La unión de los conductores a los aisladores y de los aisladores a los apoyos, se efectúa por medio de piezas metálicas denominadas, en general, HERRAJES y que, naturalmente están aislados entre sí por medio del material que constituye el aislador.

Por lo tanto, la misión fundamental del aislador es evitar el paso de la corriente del conductor al apoyo. Este paso de corriente puede producirse por cualquiera de las causas que se citan a continuación :

- a) POR CONDUCCION DE MASA, es decir, a través de la masa del aislador, como corriente de fuga (Fig.3.1).
con los materiales actualmente empleados en la fa

bricación de aisladores, la corriente de fuga resulta insignificante y no se tiene en cuenta.

- b) POR CONDUCTIVIDAD SUPERFICIAL, o sea contorneado la parte exterior del aislador por aumento de su conductividad debido a la formación de una capa humedad, de polvo, o sales depositadas sobre la superficie del aislador (Fig. 3.2).

La corriente de fuga correspondiente puede reducirse hasta límites seguros dando a la superficie del aislador un perfil apropiado, de forma que el recorrido de la corriente de fuga sea la mayor posible.

- c) POR PERFORACION DE MASA DEL AISLADOR (Fig. 3.3). Esta circunstancia tiene poca importancia en los aisladores para bajas tensiones, ya que el material constituyente del aislador resulta suficiente para evitar la perforación. Pero en altas tensiones, el peligro es mucho mayor, sobre todo en aisladores de gran espesor, pues en este caso, es muy difícil fabricarlo de forma que conserven sus propiedades dieléctricas en toda su masa. Un fallo en estas propiedades en algún punto del interior del aislador puede provocar su perforación. Por esta razón, los aisladores para altas tensio-

nes se fabrican muchas veces en varias piezas superpuestas de reducido espesor, unidas entre sí por una pasta especial; de esta forma se evita el peligro de que puedan existir defectos en el interior de la masa del aislador, ya que la estructura de éste puede vigilarse cuidadosamente durante su fabricación.

- d) POR DESCARGA DISRUPTIVA A TRAVES DEL AIRE, formándose un arco el conductor y el soporte a través del aire, cuya rigidez dieléctrica no basta para evitar la descarga (Fig. 3.4).

En ciertas ocasiones, la rigidez dieléctrica del aire disminuye como sucede con la lluvia, porque los filetes de agua de lluvia que se desprenden de la superficie del aislador toman el potencial del conductor y se encuentran a menos distancia del soporte que de aquel. Estas descargas pueden evitarse por un diseño adecuado de los aisladores que han de trabajar a la intemperie, es decir, sometido a la acción de la lluvia, para aumentar la distancia existente entre conductor y soporte, el perfil de estos aisladores se hace con una o de varias ondulaciones en forma de campanas, con lo que aumenta la tensión necesaria para que se forme el arco.

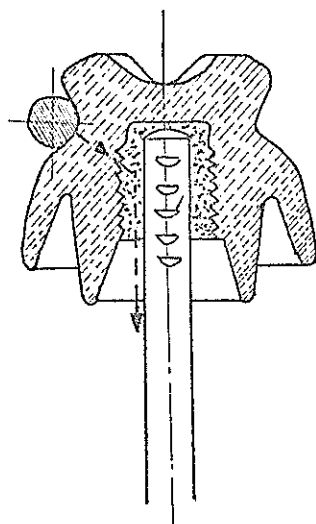


Fig. 3.1 PASO DE CORRIENTE EN UN AISLADOR POR CONDUCTIVIDAD DE MASA (corriente de fuga).

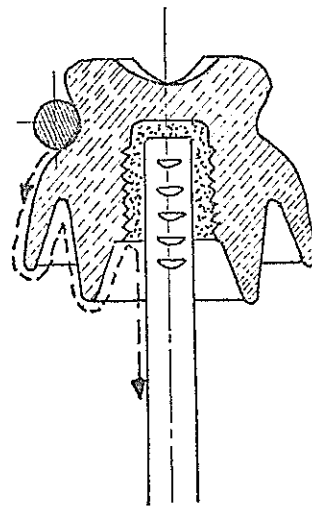


Fig. 3.2 PASO DE CORRIENTE EN UN AISLADOR POR CONDUCTIVIDAD SUPERFICIAL.

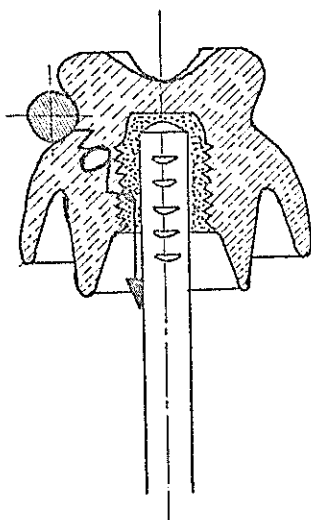


Fig. 3.3 PASO DE CORRIENTE EN UN AISLADOR POR PERFORACION DE LA MASA DEL AISLADOR.

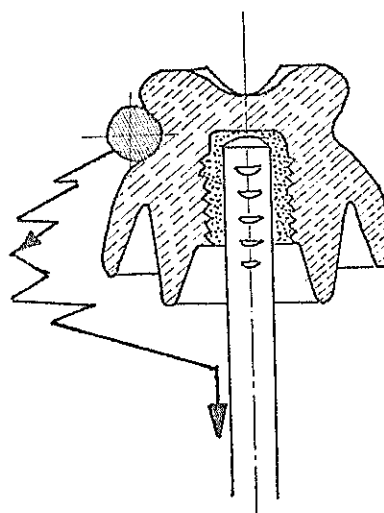


Fig. 3.4 PASO DE CORRIENTE EN UN AISLADOR POR DES CARGA DISRUPTIVA A TRÁVES DEL AIRE.

A continuación definiremos algunos conceptos relacionados con los materiales aislantes en general, y más particularmente, con los aisladores. Téngase en cuenta que cualquier dispositivo aislante constituye un condensador. Recordemos que, entre las placas de un condensador, sometidas a una tensión U , existe un campo eléctrico, caracterizado por la magnitud denominada intensidad de campo eléctrico y expresada por

$$E = U/a$$

siendo a la distancia entre placas, si U está expresada en Kv y a en cm., E estará expresada en Kv/cm.

RIGIDEZ DIELECTRICA : Si se intercala una placa aislante entre las dos placas de un condensador y se aumenta gradualmente la tensión entre las placas, llega un momento en que es perforado el aislante, produciéndose la descarga, la tensión a la cual ocurre la perforación U_p se denomina tensión de perforación y a la intensidad de campo que ocurre la perforación, o sea

$$E_p = U_p/a$$

Se denomina RIGIDEZ DIELECTRICA si se expresa U_p en Kv y a se expresa en cm., la rigidez dieléctrica se expresa en Kv/cm. El valor de la rigidez dieléctrica tiene gran importancia. Para determinar la calidad de un aislante, éste será tanto mejor, cuanto ma

yon sea su rigidez dieléctrica, si U es la tensión de servicio de una instalación y U_p es la tensión de perforación de un aislante determinado, la relación

$$S = U_p/U$$

Es el COEFICIENTE DE SEGURIDAD a que se trabaja dicha instalación.

CONSTANTE DIELECTRICA : Se llama también INDICE DIELECTRICO, y expresa el comportamiento dieléctrico de un material aislante. Es un concepto relacionado con el de inducción dieléctrica, que vamos a explicar brevemente: la carga eléctrica que admite cada placa de un condensador por cm^2 de superficie se denomina inducción dieléctrica. Si en el espacio entre placas existe el vacío, esta magnitud está relacionada con la intensidad de campo eléctrico que hemos definido anteriormente por la siguiente expresión :

$$D = \epsilon_0 E$$

D : Inducción dieléctrica; en culombios/ cm^2

E : Intensidad de campo eléctrico; en V/cm

ϵ_0 : Constante dieléctrica en el vacío o absoluta.

Esta constante vale 8.85×10^{-12}

Si en el espacio entre placas, en lugar de existir el vacío, estuviera lleno de una sustancia aislante

varían las condiciones, ya que en este caso, la inducción dieléctrica aumenta.

Ahora tenemos :

$$D = \epsilon \epsilon_0 E$$

D : Inducción dieléctrica; en culombios/cm²

E : Intensidad de campo eléctrico en V/cm

ϵ_0 : Constante dieléctrica absoluta = 8.84×10^{-14}

ϵ : Constante dieléctrica relativa

Por lo tanto, la constante dieléctrica relativa, o a breviadamente, CONSTANTE DIELECTRICA del material aislante, expresa cuantas veces dicho material es más aislante que en el vacío. Un material aislante será, por lo tanto, tanto mejor cuanto mayor sea su constante dieléctrica.

FACTOR DE PERDIDAS : Hemos dicho que cualquier dispo sitivo aislante es en realidad, un condensador. Y to dos sabemos que, si se aplica una corriente alterna a un condensador, éste se carga y descarga sucesivamente; de ello resulta una corriente alterna, cuyo valor máximo se haya desfasado 90° en adelante del correspondiente a la tensión, pero una sustancia aislante no tiene nunca una conductividad nula, siem pre pasa a través de ella una pequeña corriente de tubo que depende de la resistencia eléctrica de la

capa aislante. Esto hace que un dispositivo aislante no sea nunca un condensador puro y que aparezca siempre una pequeña corriente, debido a la resistencia en fase la tensión como consecuencia, el desfase ψ entre la corriente y la tensión en bornes no es nunca de 90° sino algo menor al ángulo.

Se llama ángulo de pérdida dieléctrica y la relación $\text{tg} \delta = I_a / I_n$, recibe el nombre de FACTOR DE PERDIDA. Esta magnitud tiene mucha importancia para determinar la calidad de un aislante desde el punto de vista térmico, ya que la corriente activa (I_a), en fase con la tensión en la que, según la ley de Joule, provoca el calentamiento del aislante. Por lo tanto, cuanto menor sea esta corriente menor también será el factor de pérdida ($\text{tg} \delta$) y mejor será el aislante en lo que a comportamiento térmico se refiere.

3.2 CLASIFICACION DE LOS AISLADORES EMPLEADOS EN LAS LINEAS ELECTRICAS AEREAS.

Los aisladores pueden clasificarse según diferentes criterios.

3.2.1 POR SU CONSTITUCION

AISLADOR SIMPLE, es el constituido por una só la pieza de porcelana, esteatita o vidrio (Fi

gura 3.6).

AISLADOR COMPUESTO, es el formado por dos o más aisladores simples unidos entre sí de forma permanente, por medio de un material de unión, aislante o semiconductor (Fig. 3.7), este aislador está destinado a trabajar a mayores tensiones.

3.2.2 POR SU APLICACION

AISLADOR SOPORTE, es el destinado a mantener un conductor, en una parte de su periferia, alejada de una masa conductora o semiconductor (Fig. 3.8).

AISLADOR PASANTE, es el previsto de un agujero que lo atraviesa y en el que se introduce el conductor, con el objeto de mantenerlo alejado de su periferia, de una masa conductora o semiconductor (Fig. 3.9).

3.2.3 POR EL LUGAR DE INSTALACION

AISLADOR PARA SERVICIO AL INTERIOR, es el empleado en lugares resguardados en la lluvia (Fig. 3.10).

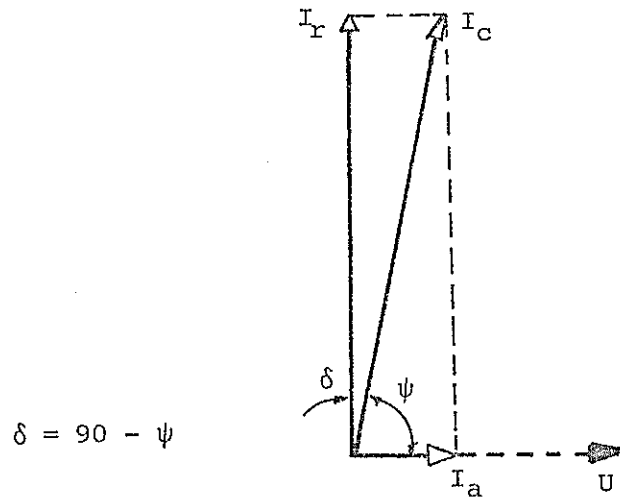


Fig. 3.5 DIAGRAMA VECTORIAL DE UN AISLANTE, CON INDICACION DEL ANGULO DE PERDIDA DIELECTRICA

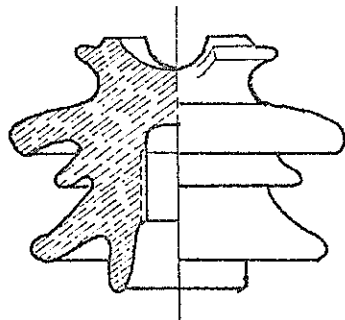


Fig. 3.6 AISLADOR SIMPLE

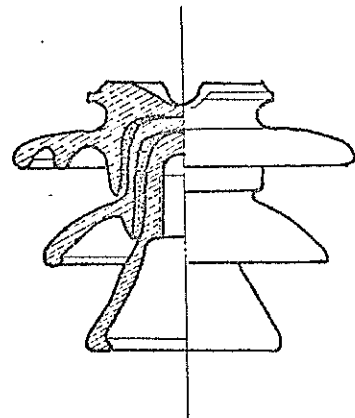


Fig. 3.7 AISLADOR COMPUESTO

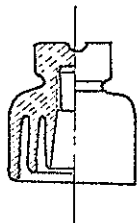


Fig. 3.8 AISLADOR SOPORTE



Fig. 3.9 AISLADOR PASANTE

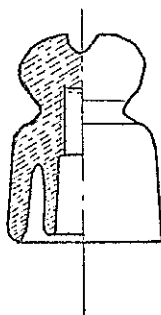
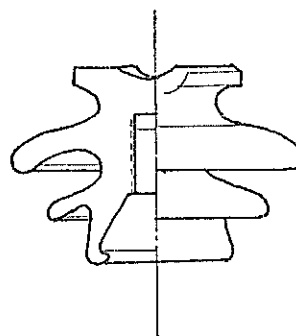
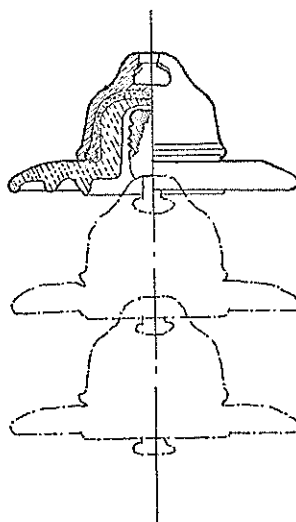
Fig. 3.10 AISLADOR PARA SERVICIO
AL INTERIOR.Fig. 3.11 AISLADOR PARA
SERVICIO AL EXTERIOR.

Fig. 3.12 AISLADOR ACOPLABLE

AISLADOR PARA SERVICIO AL EXTERIOR, o para servicio a la interperie, es el utilizado en lugares no resguardados de la lluvia (Fig.3.11).

3.2.4 POR SU FORMA Y CARACTERISTICAS ESPECIALES

AISLADOR ACOPLABLE, es el proyectado de tal forma que permita el acoplamiento amovible de una serie de elementos, hasta obtener un grado de aislamiento deseado. El acoplamiento puede ser del tipo rígido o del tipo articulado (Fig. 3.12).

AISLADOR NO ACOPLABLE, es el que no está construido para su acoplamiento amovible con otros elementos similares (Fig. 3.13).

3.2.5 POR SU ACABADO

AISLADOR CON MONTURA METALICA, es el que está provisto de una o varias piezas metálicas destinadas a la fijación del propio aislador o del conductor (Fig. 3.14).

AISLADOR SIN MONTURA METALICA, es el que no tiene ninguna pieza metálica para su fijación o para la del conductor (Fig. 3.15).

A continuación exponemos la nomenclatura de los tipos de aisladores más utilizados en las líneas eléctricas aéreas.

AISLADOR DE APOYO, es el provisto de uno ó dos herrajes : uno destinado a su fijación sobre una base y el otro, eventual, a la fijación del conductor (Fig. 3.16).

AISLADOR DE COLUMNA, es el constituido por dos ó mas elementos acoplables, unidos en acoplamiento rígido (Fig. 3.17).

AISLADOR DE SUSPENSION, es el provisto de montura para una suspensión articulada (Fig.3.18).

AISLADOR DE CADENA, es el constituido por dos ó más aisladores de suspensión acoplados, formando un acoplamiento articulado (Fig. 3.19).

AISLADOR PASANTE, es el provisto de un agujero axial, destinado a aislar un conductor a su paso por una pieza conductora o semiconductora, también se lo denomina Pasamuros (Figura 3.20).

AISLADOR TUBULAR, es el aislador pasante sencillo en forma de tubo en el lenguaje de los

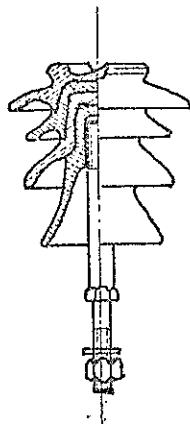


Fig. 3.13 AISLADOR NO ACOPLABLE

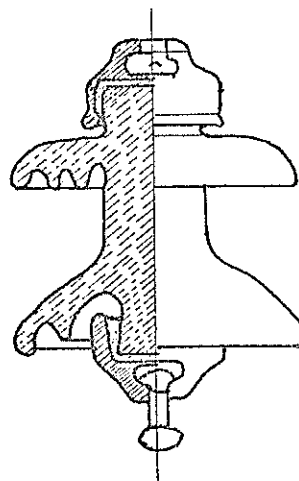


Fig. 3.14 AISLADOR CON MONTURA METALICA.

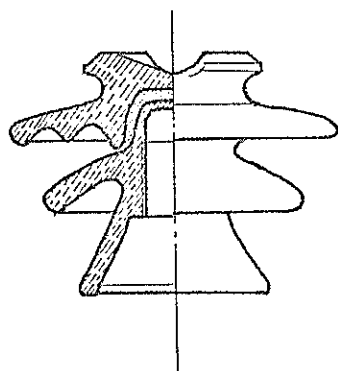


Fig. 3.15 AISLADOR SIN MONTURA METALICA.

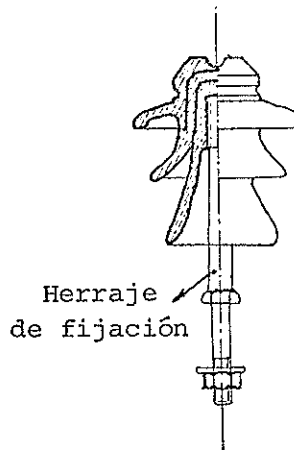


Fig. 3.16 AISLADOR DE APOYO

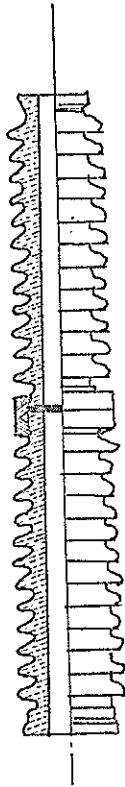


Fig. 3.17 AISLADOR DE COLUMNA

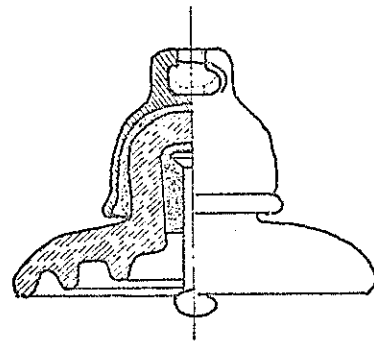


Fig. 3.18 AISLADOR DE SUSPENSION

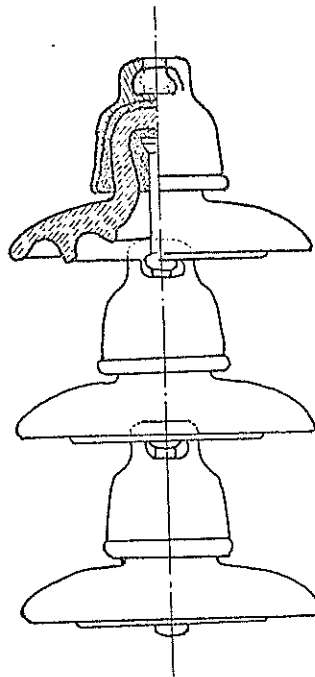


Fig. 3.19 AISLADOR DE CADENA

electricistas se les conoce con el nombre de Pijas (Fig. 3.21).

AISLADOR ENVOLVENTE, es el similar a un aislador pasante, pero destinado solamente a constituir una envoltura protectora (Fig. 3.22).

AISLADOR DE POLEA, es un aislador simple, casi siempre de forma cilíndrica, con un agujero axial y provisto de una ó varias ranuras en la superficie exterior, situadas en planos perpendiculares al eje de la pieza (Fig. 3.23).

AISLADOR PARA VIENTO, es el aislador simple generalmente de forma alargada, provisto de dos agujeros o ranuras perpendiculares entre sí transversales están destinados a aislar dos partes de un cable o tirante (Fig. 3.24).

Además de los tipos de aisladores reseñados que podemos considerar generales, existen algunos tipos especiales que tienen características consecutivas, especiales, y están destinados a líneas eléctricas instalados en condiciones muy particulares.

Los más interesantes son los siguientes :



Fig. 3.20 AISLADOR PASANTE

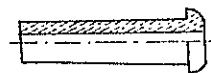


Fig. 3.21 AISLADOR TUBULAR

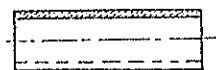


Fig. 3.22 AISLADOR ENVOLVENTE

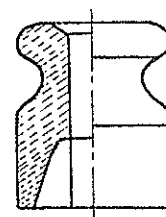


Fig. 3.23 AISLADOR DE POLEA

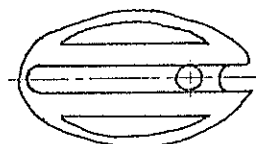
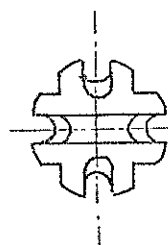


Fig. 3.24 AISLADOR PARA VIENTO

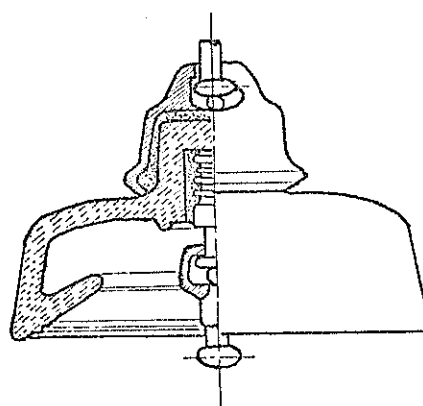


Fig. 3.25 AISLADOR CON LINEA DE FUGA AMPLIADA

AISLADOR CON LINEA DE FUGA AMPLIADA, cuya línea de fuga ha sido aumentada para obtener un aislamiento satisfactorio en ambientes muy polvientos o salinos (Fig. 3.25).

AISLADOR PARA NIEBLA, o sea el especialmente proyectado para obtener un satisfactorio aislamiento en ambientes de niebla intensa (Figura 3.26).

CONDICIONES GENERALES QUE DEBEN CUMPLIR LOS AISLADORES PARA LINEAS ELECTRICAS AEREAS.

Como condiciones generales, los aisladores empleados en las líneas eléctricas aéreas han de cumplir las siguientes :

- a) Rigidez dieléctrica suficiente para que su tensión de servicio, con objeto de que soporten las sobretensiones que puedan presentarse en la línea, sin peligro de perforación. La rigidez dieléctrica de un aislador depende esencialmente del material que lo constituye y del espesor dado a este material.
- b) Forma adecuada para evitar las descargas de contorneamiento entre el conductor en

contacto con los aisladores y los soportes metálicos que fijan estos mismos aisladores, y que a su vez, se fijan a los apoyos de la línea.

- c) Disminuir la corriente de fuga entre aislador y soporte, hasta que su valor sea prácticamente despreciable; esto para las condiciones más desfavorables, es decir, cuando el aislador está sometido a la lluvia.
- d) Resistencia mecánica suficiente para que trabaje con buenas condiciones de seguridad, bajo la acción de los esfuerzos que el conductor transmitirá al aislador. Es decir, que la carga de rotura de un aislador ha de ser, por lo menos igual a la del conductor que debe soportar, aplicada dicha carga en la sección del amarre del conductor al aislador.
- e) Efecto de envejecimiento lo menor posible, para evitar gastos de reposición y de mantenimiento. Este envejecimiento se debe a la degeneración del material constituyente del conductor, producida por diversas causas, actualmente con los procedimientos de

fabricación de los materiales aislantes para aisladores durante muchos años sus buenas propiedades mecánicas y eléctricas.

3.3 CARACTERISTICAS QUE DEFINEN A UN AISLADOR

De acuerdo con las condiciones generales que deben cumplirse, expresadas anteriormente, se han establecidos unas características mínimas para los aisladores de líneas aéreas, hasta no hace mucho tiempo, se distinguían los aisladores por la tensión de servicio a que estaban destinados, pero actualmente, se estima que esta tensión no caracteriza a un aislador ya que lo más conveniente en cada caso depende de las condiciones del aislador.

Mediante los correspondientes ensayos, se han de estipular y comprobar las siguientes características.

3.3.1 LINEA DE FUGA

Es la distancia entre las fuerzas conductoras de la que está provisto el aislador, en las condiciones que se establecen para los ensayos de tensión disruptiva, medida sobre la su perficie del aislador (Fig. 3.27).

3.3.2 DISTANCIA DISRUPTIVA

Es la distancia en el aire, entre las piezas de las que está provisto el aislador, en las condiciones establecidas para los ensayos de tensión disruptiva, también se denomina distancia de contorneamiento (Fig. 3.28).

3.3.3 TENSION DE CORONA

Es el valor eficaz de la tensión, expresado en kilovoltios, al que deja de ser visible en la oscuridad, toda manifestación luminosa. En cualquier punto del aislador causada por la ionización del aire (efecto corona).

3.3.4 TENSION DISRUPTIVA EN SECO O A LA FRECUENCIA NORMAL.

Se denomina también tensión de contorneamiento y es el valor eficaz de la tensión, expresado en kilovoltios, en el que se produce la "descarga disruptiva" o "descarga por contorneamiento", en el aislador, recordemos que la descarga disruptiva se produce a través del aire bajo aspecto de una chispa o arco, o de un conjunto de chispas o arcos, que establecen conexión eléctrica entre las piezas metá-

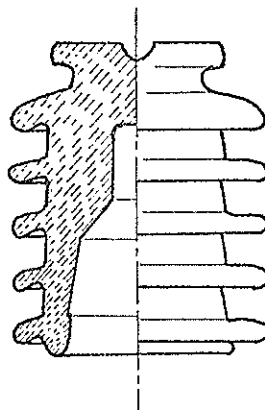


Fig. 3.26 AISLADOR PARA NIEBLA

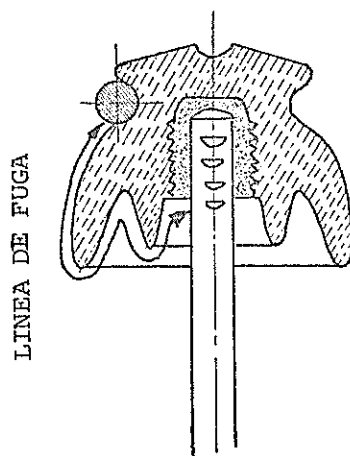


Fig. 3.27 LINEA DE FUGA DE UN AISLADOR.

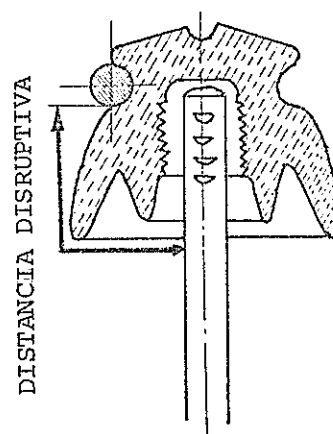


Fig. 3.28 DISTANCIA DISRUPTIVA DE UN AISLADOR.

licas del aislador, sometidas normalmente a la tensión de servicio. Para la tensión disruptiva en seco o a la frecuencia normal se somete al aislador a un ensayo en atmósfera normal seca a una frecuencia de 60 hertz.

3.3.5 TENSION DISRUPTIVA BAJO LLUVIA A LA FRECUENCIA NORMAL.

Para determinar la tensión disruptiva bajo lluvia a la frecuencia normal, el ensayo se realiza también con una frecuencia de 60 hz. pero sometido al aislador, a los efectos de una lluvia artificial. Así para determinar la tensión mínima disruptiva, es decir, el valor mínimo de 5 determinaciones sucesivas sobre el aislador, durante ensayos de un minuto de duración.

3.3.6 TENSION DISRUPTIVA CON ONDAS DE SOBRETENSION DE FRENTE RECTO.

Es el valor de cresta (no el eficaz) de la tensión de la onda, expresado en kilovoltios en que se produce la descarga disruptiva, para los ensayos se utilizan trenes de ondas de choque de frente escarpado, de duración $1 \times 50 \mu$ seg. obtenidas en generadores de on-

das que van aumentando de valor, hasta que producen aproximadamente, un 50% de descarga de contorneamiento, sobre un mismo aislador. Este valor de la tensión de choque es el que se adopta como valor característico del aislador.

3.3.7 TENSION DE PERFORACION

Es el valor eficaz de la tensión, expresado en kilovoltios, en el que tiene lugar la perforación del aislante, es decir la destrucción localizada de este material, producida por una descarga que atraviesa el cuerpo del aislador, de acuerdo con esto, el desprendimiento de un fragmento del borde de un aislador por efecto del calor de un arco de contorneamiento, no debe considerarse como perforación.

El excesivo calentamiento local y el calentamiento diferencial ocasionado por la excesiva corriente de fuga, disminuyen rápidamente la resistencia dieléctrica del material, lo cual se traduce mayor disipación de energía hasta producir la ruptura de perforación del aislador.

3.4 INFLUENCIA DE LA CONTAMINACION SOBRE LOS AISLADORES

Los aisladores modernos están diseñados, inicialmente para una limpieza natural mediante las lluvias y el viento. De tal manera que bajo condiciones normales de depósito de polvo atmosférico, actúen en forma satisfactoria.

Sin embargo, los aisladores en su uso normal pueden estar en un medio ambiente con diferentes grados de contaminación, que disminuye su aislamiento produciendo flameo, y en caso extremo, dando lugar a interrupciones del suministro de energía eléctrica.

Los fabricantes de aisladores han efectuado diferentes investigaciones simulando condiciones de contaminación a nivel de laboratorio, observando el comportamiento de los aisladores y tratando de establecer las razones de las fallas, para diseñar aisladores que operan en zonas contaminadas, y optimizar los métodos para que las instalaciones puedan operar sin soportar problemas de flameo o pérdidas de aislamiento.

Se ha logrado mucho progreso en los últimos años en el desarrollo de métodos para prevenir flameo de los aisladores en servicio normal, aumentando la distan-

cia de fuga sobre la superficie total del aislador, utilizando recubrimientos superficiales o lavando los aisladores en caliente. Además se han desarrollado esmaltes resistivos, como una solución más definitiva al problema del flameo por contaminación.

3.4.1 EFECTO SOBRE EL DEPOSITO CONTAMINANTE EN LOS AISLADORES.

El flameo por contaminación sobre un aislador se presenta cuando la mayor parte de la superficie está cubierta por una capa de baja resistividad. Exceptuando algunos casos muy especiales de contaminación en los cuales el depósito es conductor en atmósfera seca, tales como polvo de óxido metálicos y coque, el contaminante debe de estar húmedo en este caso la capa húmeda es conductora, debido a las sales disueltas en ellas o debido a la formación de ácidos diluïdos.

En una determinada atmósfera, las densidades de depósitos salinos dependen de la forma y tamaño de los aisladores y del efecto del lavado por lluvia.

Los efectos principales de la acumulación de

depósitos contaminantes son las siguientes:

a) EXCESIVA CORRIENTE DE FUGA

A medida que se humedece la superficie del aislador, disminuye la resistencia y se presenta una corriente de fuga apreciable de carácter intermitente. La disipación de energía aumenta la temperatura y esto a su vez disminuye la resistencia dieléctrica del aislador, ocasionando pérdidas de la capacidad aislante del material.

b) FLAMEO CONTINUOS

Existe el riesgo de flameo por contaminación en servicio en tres casos especiales:

- Cuando el aislador se expone a la lluvia después de haber sido energizado al voltaje normal de trabajo, durante un largo período de tiempo.
- Cuando un aislador contaminado y "húmedo" se energiza a su voltaje normal de trabajo.
- Cuando un aislador contaminado y "húmedo" se somete a un voltaje transitorio.

El primer caso es el más común y en estas circunstancias el aislador se comporta de acuerdo a lo anotado en (a).

En el segundo caso, se puede presentar el flameo antes de alcanzar la estabilidad térmica; y en el tercer caso se presenta el flameo antes de llegar a la misma. En general, la corriente intermitente de fuga modifica el gradiente de potencial, ioniza do el aire, disminuyendo el voltaje de fla meo y provoca la descarga a tierra.

c) CORROSION

Se produce una acelerada corrosión de las partes metálicas en las instalaciones que operan en áreas de alta contaminación. Las causas principales de dicha corrosión son:

- Efectos electrolíticos debido a la corriente de fuga.
- Pérdida de capa de Zinc (galvanizado), quedando el metal expuesto a la acción corrosiva del medio.
- Generación de ácido nítrico a partir del ozono producido por el efecto corona y

el calentamiento.

d) RADIO INTERFERENCIA

El efecto de descargas eléctricas sobre los aisladores produce alguna interferencia. Sin embargo, las descargas superficiales que producen las corrientes excesivas, no necesariamente son las responsables de las altas interferencias, puesto que contienen muy pocos componentes de alta frecuencia.

Las descargas tipo corona resultantes de distorsión del campo eléctrico, originadas por una superficie contaminada "húmeda" pero conformación de bandas secas, son las causantes de interferencia en señales de radio y televisión.

La Fig. 3.29, ilustra la reducción del voltaje de flameo en aisladores contaminado.

SOLUCIONES AL PROBLEMA DE CONTAMINACION

La severidad del problema de contaminación en una instalación específica está gobernada generalmente por lo siguiente :

- densidad o rata de depósito contaminante

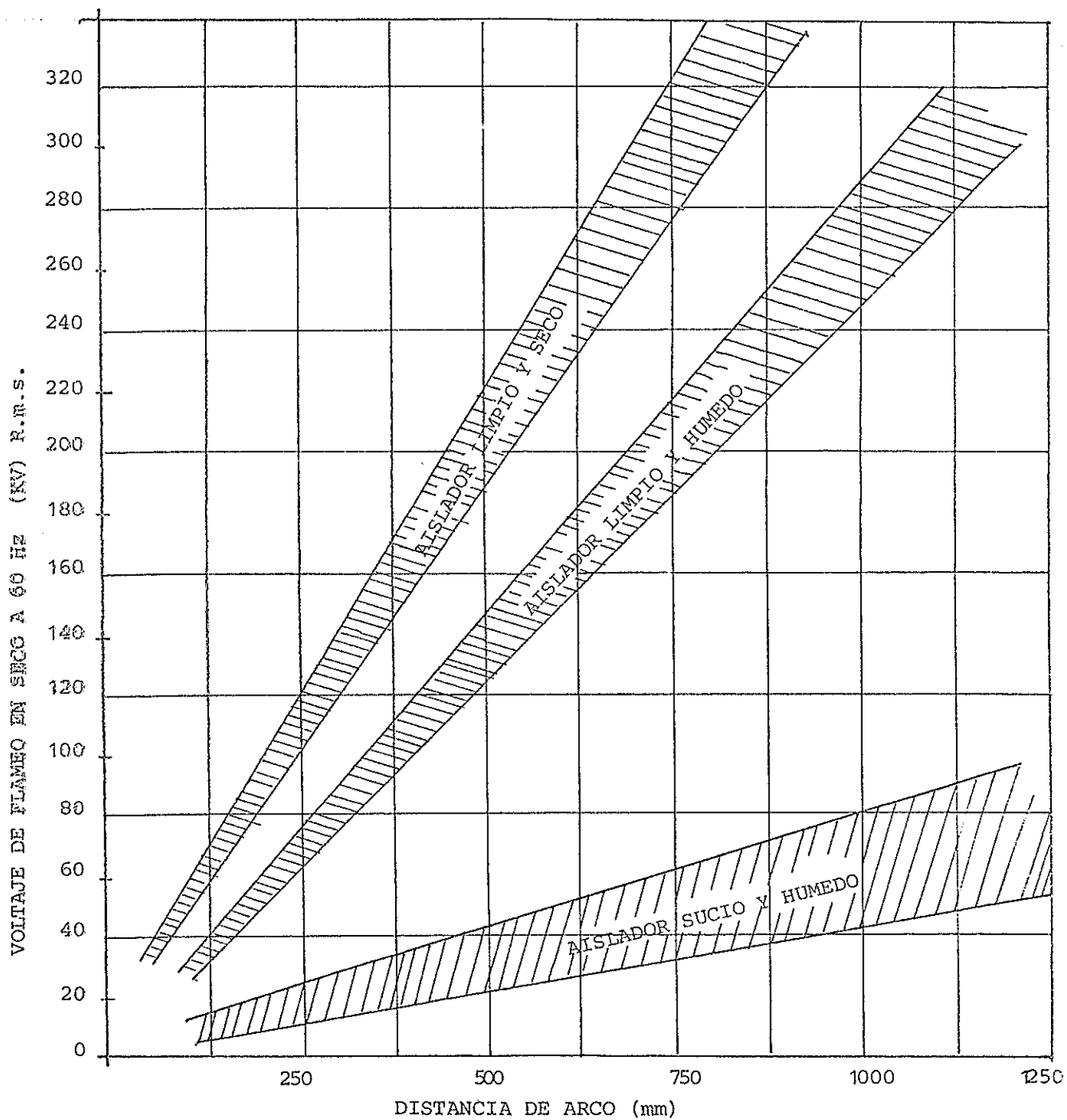


Fig. 3.29 Voltaje de flameo de aisladores contaminados

- frecuencia e intensidad de las aguas lluvias y del viento.
- naturaleza del contaminante, su conductividad y su facilidad de adherirse a la superficie del aislador.

Con el fin de reducir el efecto de contaminación superficial, se emplean actualmente las siguientes soluciones :

a) SOBREAISLAMIENTO

Una forma efectiva de prevenir problema de flameo en zonas contaminadas, consiste en aumentar la distancia de fuga sobre la superficie del aislador.

La tabla XI utilizada por RWE (Rheinisch Westfälischen Elektrizitätswerk Aktiengesellschafts) recomienda los valores de distancia de fuga por cada Kv de voltaje nominal del sistema.

Una forma de aumentar la distancia de fuga consiste en utilizar aisladores sobredimensionados, por ejemplo : aisladores de 34.5 Kv de circuitos de 13.2 Kv (cuando se tra-

CLASE DE AISLAMIENTO	CATEGORIA	Z O N A	DISTANCIA DE FUGA mm/Kv SISTEMA
A	1	<i>Agrícola, forestal, no industrial</i>	17-20
B	2	<i>Ligera a mediana contaminación pero niebla frecuente</i>	22-25
C	3	<i>Áreas industriales, externa contaminación</i>	26-36
D	4	<i>Zona costera-contaminación con depósitos conductores</i>	38-45

TABLA XI CLASES DE CONTAMINACIONES

ta de aisladores tipo Pin ("LINE POST" , etc.) o aumentar el número de unidades cuando se trata de una cadena de aisladores de suspensión.

3.5 EFECTO DE LA CONFIGURACION DE LAS CADENAS

En una determinada atmósfera y para un determinado aislador, la densidad de un depósito salino depende de la configuración de la cadena.

Así es que una cadena en V recibe el 80% y una cadena horizontal recibe apenas el 50% de la cantidad de contaminante que se deposita en una cadena vertical, cuando son sometidas a las mismas condiciones de contaminación.

3.5.1 EFECTO SOBRE LA TENSION DE DESCARGA

En general, los voltajes de flameo por descargas atmosféricas (impulsos propiamente) tienden a variar linealmente con la longitud de la cadena de aisladores, pero las características de voltaje de flameo a 60 Hz y las características de voltaje por accionamiento muestran una tendencia a la saturación. Este comportamiento aparece por la duración del voltaje impreso de 60 Hz y del voltaje por

accionamiento, los cuales tienen frente de ondas mayores que la onda de impulso. En cadena de 12 aisladores, las pruebas realizadas reflejan que las cadenas tienen mejor desempeño cuando contaminada son por orden en v vertical, y horizontal con excepción de los puntos de baja salinidad.

A continuación compararemos el arco inicial y del mecanismo de predescarga para las tres configuraciones.

3.5.2 CADENA HORIZONTAL

La distancia de fuga o línea de fuga no tiene eficiencia porque el arco se inicia en la región del vástago y continúa por la superficie ranurada del aislador para una posición de punta entre las partes salientes de la ranurada, y el gorro del aislador adyacente hasta la parte periférica.

De esa forma, el arco va anulando segmentos cada vez mayores de la distancia de fuga.

La cadena horizontal, en tanto, es proporcionar un fácil camino de escape para el arco, que se extingue rápidamente.

3.5.3 CADENA VERTICAL

El arco que se inicia en las regiones próximas al vástago camina sobre el contorno inferior de cada aislador debido a la tendencia que posee para subir y de esa forma, hace pleno uso de la distancia de fuga. En la medida que el arco camina hacia los bordes del aislador, ocurre el secador de las ranuras, creando una faja seca lo cual puede soportar una tensión mayor, por lo tanto, los gases ionizados que se crean suben y forma una columna conductora que estimula la descarga de la cadena. Otro fenómeno curioso que se observa en las cadenas verticales es que el líquido contaminante es empujado por el calor y presión del terminal del arco y gotea por los bordes del aislador, empeorando el funcionamiento de la cadena.

3.5.4 CADENA EN V.

Posee todas las ventajas principales de las otras dos configuraciones el arco hace uso pleno de la distancia de fuga y además tiene un camino de escape para los gases ionizados que no influyen en los aisladores adyacentes.

3.6 AISLADORES DE SUSPENSION

En los aisladores de suspensión, objeto del presente capítulo, la fijación del conductor al aislador se realiza por suspensión del aquel mediante herrajes adecuados; a su vez, el propio aislador está fijado también por suspensión al apoyo correspondiente; y, finalmente, estos aisladores están constituidos generalmente por varias piezas iguales, formando cadena, y fijadas entre sí también por suspensión.

En la Fig. 3.30, se ha presentado esquemáticamente un aislador de suspensión compuesto, constituido por una cadena de 6 aisladores simples; 1 es la cruceta fijada al poste correspondiente, 2 es el herraje de fijación de la cadena de aisladores a la cruceta, 3 es uno de los aisladores simples que constituyen la cadena, 4 es uno de los herrajes de fijación entre dos elementos aisladores de la cadena, 5 es el herraje de fijación del conductor a la cadena y, finalmente, 6 representa el conductor.

Estos aisladores son más caros que los aisladores de apoyo y sólo resultan competitivos con ellos a partir de tensiones de servicio de unos 70 Kv en adelante. Aunque muchas empresas los han adoptado incluso para tensiones de servicio de 10 Kv; para es-

tas tensiones reducidas se emplean aisladores de sus
pensión de menores dimensiones que los aisladores pa
ra más altas tensiones.

Entre las ventajas de estos aisladores podemos indi
car que, a partir de un pequeño número de tipos nor-
malizados, se pueden preparar cadenas de aisladores,
para diferentes tensiones de servicio de la línea y
del tipo y tamaño de estos elementos que debe elegir
se, además de acuerdo con la máxima tensión mecánica
que ejercerán los conductores.

La disposición de varias piezas iguales, facilita el
montaje cómodo y la rápida reposición de las piezas
defectuosas; además la rotura de un elemento no obli
ga a la interrupción del servicio como ocurre con
los aisladores de apoyo. Por otra parte, las repara
ciones son mucho más económicas, ya que debe reponer
se uno de los elementos de la cadena y no todo el
aislador como sucede con los aisladores de apoyo.

Otra de las ventajas de los aisladores de suspensión
es que permiten aumentar fácilmente, si es necesario,
el nivel de aislamiento de una línea, bastando para
ello aumentar el número de elementos de cada cadena;
de esta forma, se puede elevar sin grandes dificulta
des, la tensión de servicio de una línea prevista i-

nicialmente para una tensión de servicio menor.

La seguridad contra la perforación es muy superior en los aisladores de suspensión constituido por varios elementos por la alta tensión de la descarga de cada uno de ellos, que aumenta además casi proporcionalmente al número de dichos elementos.

Desde el punto de vista mecánico, los aisladores de suspensión permiten conseguir la igualdad de tensión mecánica en todos los vanos comprendidos entre dos apoyo de anclaje, por inclinación si es necesario de la cadena respecto a su posición vertical, sin deslizamiento del conductor sobre la cabeza del aislador, como sucede en los aisladores de apoyo, ya que éstos están fijados rígidamente a los apoyos.

Tal como se expresa en la Fig. 3.31, si los esfuerzos de tracción en dos vanos contiguos, son iguales y de sentido opuesto (caso de los apoyos de alineación), la cadena quedará en posición vertical, mientras que la posición de la cadena será inclinada en los apoyo de anclaje y de ángulo, en lo que los esfuerzos de tracción son distintas en ambas direcciones.

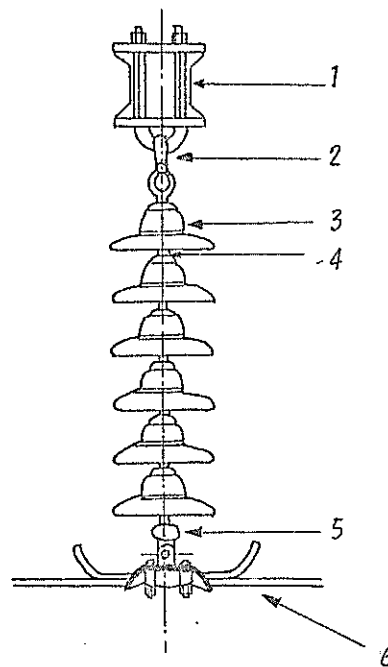


Fig. 3.30 Representación esquemática de una cadena de aisladores de suspensión.

1-Cruceta; 2-Herraje de fijación de la cadena de aisladores a la cruceta; 3-Aislador; 4-Herraje de fijación entre los aisladores de la cadena; 5-Herraje de fijación del conductor a la cadena de aisladores; 6-Conductor.

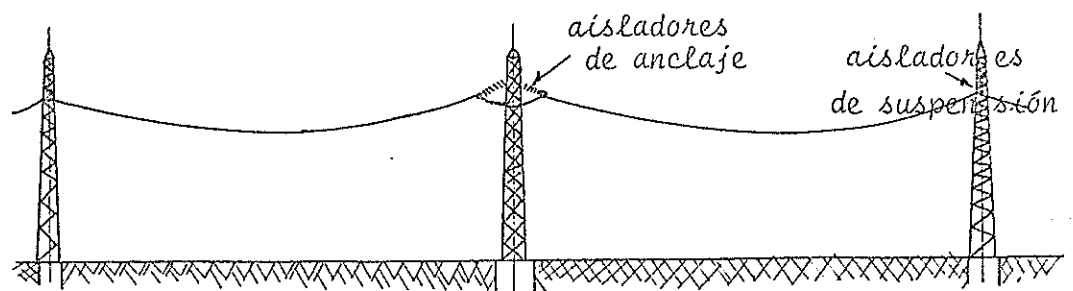


Fig. 3.31 Representación esquemática de la posición de cadenas de aisladores para apoyo de alineación y para apoyos de anclaje.

Como contrapartida, entre los inconvenientes de los aisladores de suspensión podemos indicar, ante todo, que las partes sometidas a fuerte cargas mecánicas, también son solicitadas eléctricamente por lo que, a pesar de su cuidadosa construcción hay que contar con cierto número de fallas en servicio. Además, al acumularse depósitos de materias extrañas en la superficie aislante, surgen perturbaciones en los servicios que sólo pueden evitarse mediante una continua comprobación del estado eléctrico de los aisladores que debe realizarse durante el servicio; por lo tanto, esta comprobación exige elevados gastos de mantenimiento.

3.6.1 TIPOS DE AISLADORES DE SUSPENSIÓN

Aunque se han estudiado bastantes tipos de aisladores de suspensión sólo algunos de estos tipos han tenido aplicación práctica; describiremos los más interesantes.:

Los aisladores de suspensión pueden clasificarse en dos grandes grupos :

- a) Aisladores de núcleo hueco
- b) Aisladores de núcleo macizo

Los aisladores de suspensión de núcleo hueco

más utilizados en la actualidad, son los siguientes :

- 1) Aislador Hewlett
- 2) Aislador de caperuza y vástago
- 3) Aislador Seffry-Dewitt

Los aisladores de suspensión de núcleo masivo más empleados actualmente, son los indicados a continuación :

- 1) Aislador Motor
- 2) Aislador de Barra

3.6.2 REPARTO DE POTENCIAL EN UNA CADENA DE AISLADORES DE SUSPENSION.

En una cadena de aisladores de suspensión, la diferencia de potencial existente entre un conductor y el herraje de fijación a la cruceta del apoyo, no se reparte uniformemente. Ello trae como consecuencia una desigualdad en la tensión a la cual quedan sometidos los aisladores, siendo esta tanto menor cuanto más alejado estén del conductor.

El efecto anteriormente descrito se debe a la desigual corriente capacitiva en los diferen-

tes elementos, por agregarse a la capacitancia de cada uno de ellos, la existente entre el y tierra. Una cadena de aisladores es desde el punto de vista de las capacitancias, equivalente a un conjunto de condensadores conectados como se lo indica en la Fig. 3.32, en la que se han considerado tres elementos, como puede apreciarse en esta figura.

La corriente capacitiva que pasa por el elemento más cercano al conductor, es mayor que la de los demás, y va decreciendo en cada uno de ellos según el orden de colocación (desde el conductor a la cruceta) sucediendo lo propio con la diferencia de potencial a que se hallan sometidos los elementos.

Aunque las tensiones parciales que corresponden a cada uno de los aisladores de la cadena, pueden calcularse teóricamente, el resultado de estos cálculos no coincide exactamente con los resultados experimentales, ya que hay que tener en cuenta otros fenómenos secundarios, entre los que tienen gran importancia el efecto de fuga superficial de corriente, que es proporcional a la tensión entre armadu

nas de cada elemento y que actúa en parte como efecto compensador al desigual reparto de las corrientes de capacidad en cada elemento.

Si

C : Capacitancia de cada elemento

C_1 : Capacitancia de cada elemento respecto a tierra.

V_n : Potencial del conductor respecto a tierra.

V_{n-1} : Potencial en la unión en los dos últimos elementos.

Entonces se tendrá

$$WC (V_n - V_{n-1}) = WC (V_{n-1} - V_{n-2}) + WC_1 V_{n-1}$$

$$WC (V_{n-1} - V_{n-2}) = WC (V_{n-2} - V_{n-3}) + WC_1 V_{n-2}$$

y haciendo $K = \frac{C_1}{C}$ tendremos

$$V_n = (2+K) V_{n-1} - V_{n-2}$$

$$V_{n-1} = (2+K) V_{n-2} - V_{n-3}$$

Con estas ecuaciones se podrán calcular los valores V_{n-1} , V_{n-2} conociendo el de V_n .

(NOTA: En las expresiones anteriores las corrientes y las tensiones están desfasadas en 90°).

Al aplicar las ecuaciones anteriores a una cadena formada por 6 elementos, para un valor de K aproximado de 0.2 y V_n próximo a 100 Kv resulta que el último elemento soporta más de 30 Kv, en lugar de 16.6 Kv, valor que le correspondería si la distribución de voltajes fuera uniforme.

Este efecto haría imposible la utilización de tensiones de línea muy elevadas, a menos que se acudiera a elementos mayores, de capacidad más grande, para los situados en las proximidades del conductor. Pero afortunadamente en la práctica, se produce un efecto de fuga superficial que aumenta con la tensión entre las armaduras de cada elemento y presenta un camino aparte de las corrientes I' , I'' , lo que permite la identidad de todos los miembros de la cadena, sin trabajo excesivo para el último, tal como lo muestra la Fig. 3.33.

Dicha teoría está confirmada por los hechos experimentales, por medio de los métodos men-

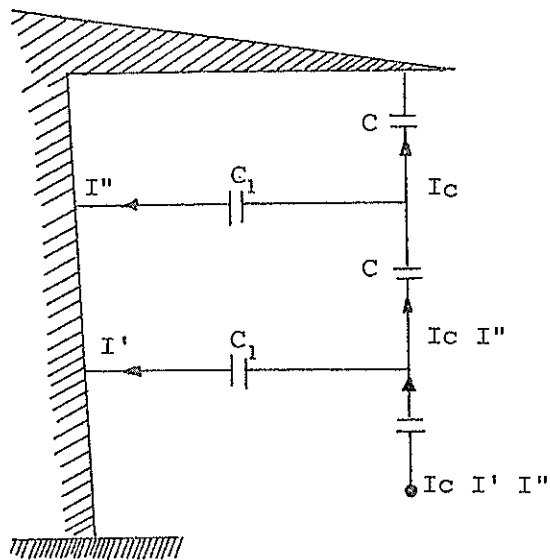


Fig. 3.32 Reparto de las capacidades y de las corrientes de fuga en una cadena de aisladores de suspensión.

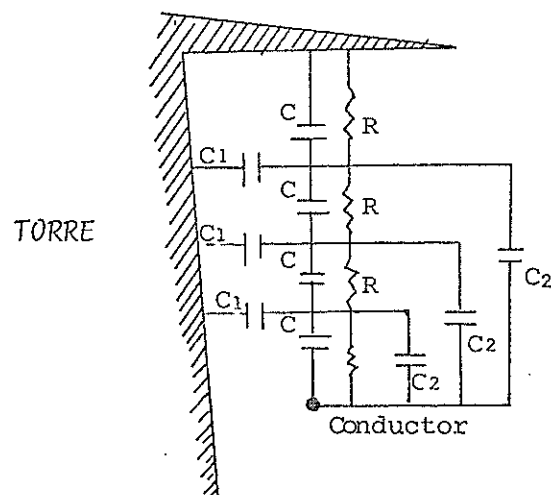


Fig. 3.33 Circuito equivalente de una cadena de cuatro aisladores suspendidos.

C = capacidad propia del disco,
 C_1 = capacidad disco a tierra
 C_2 = capacidad disco a línea
 R = resistencia de pérdidas

cionados se han establecido ciertas caracterís
ticas, tales como la que se ilustra en la Fí
gura 3.34, que nos muestra la distribución de
voltaje en los elementos de cadenas de dife-
rentes longitud, usando aisladores de 10 pul-
gadas igual a la distancia entre anillos.

3.6.3 DISPOSITIVOS DE PROTECCION DE LOS AISLADORES DE SUSPENSION.

En el caso que se produzca un arco entre dos
o más aisladores de una cadena pueden resul-
tar dañados estos elementos, lo que constitu-
ye un serio problema de mantenimiento de pro-
tección de los aisladores de forma que, en ca
so de que se produzca un arco, éste se manten
ga apartado de la cadena de aisladores. A con
tinuación, reseñaremos algunos de estos proce
dimientos.

La primera medida de precaución consistió en
pequeños cuernos o antenas fijadas a la grapa
del cable (Fig. 3.35). Pronto pudo apreciar-
se que la protección resultaba mucho más efi-
caz si se disponía en doble juego de antenas
situadas, respectivamente, en la parte supe-
rior e inferior de la cadena de aisladores

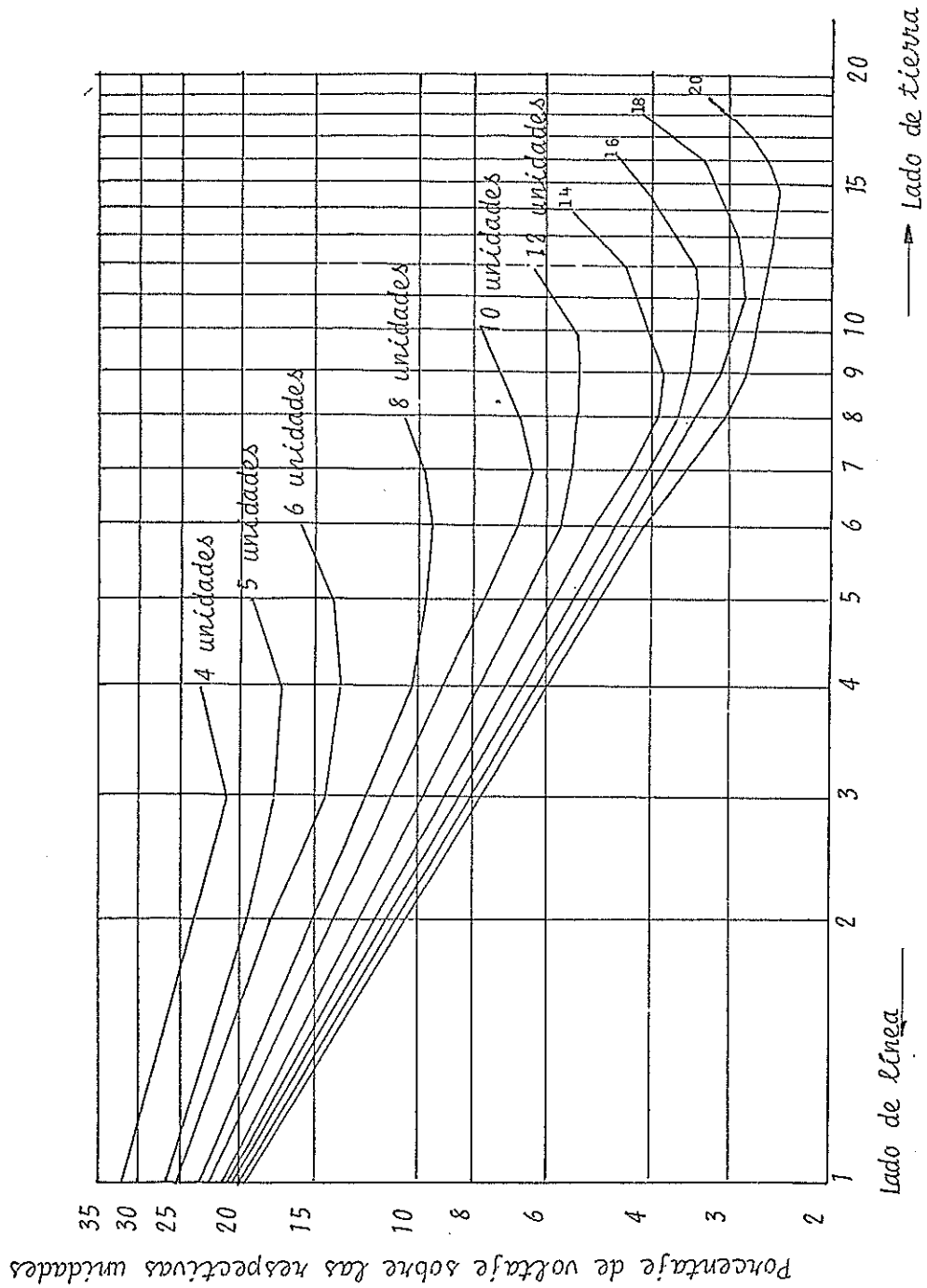


Fig. 3.34 NUMERO DE AISLADORES

(Fig. 3.36); además tal como puede apreciarse en la figura, estas antenas han de ser de bastante longitud.

Las protecciones anteriores pueden considerarse eficaces en caso de arcos sencillos. Pero bajo el efecto de ondas de sobretensión de frente escarpado o de descargas atmosféricas, el arco tiende a saltar en cascadas en la cadena de aisladores y las pruebas experimentales demostraron que la separación entre cuernos debía ser bastante inferior a la longitud de la cadena de aisladores. Por esta razón, la protección mediante cuernos o antenas produce una reducción de la tensión de arco o exige un aumento del número de elementos de la cadena y por lo tanto, de la longitud de ésta.

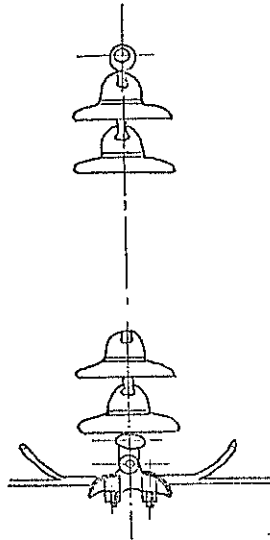


Fig. 3.35 Protección de una cadena de aisladores mediante pequeños cuernos o antena fijadas a la grapa del cable.

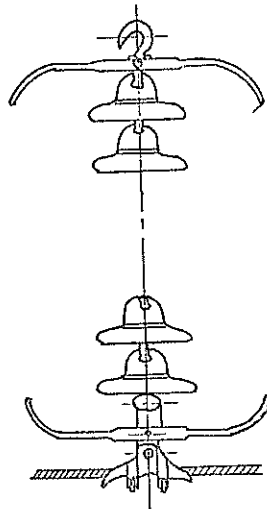


Fig. 3.36 Protección de una cadena de aisladores mediante un doble juego de descargadores rectos situados en las partes superior e inferior de la cadena.

CAPITULO IV

EFECTOS PRODUCIDOS EN LAS LINEAS DEBIDO A LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

4.1 DESCARGAS ATMOSFERICAS

El problema de predecir el comportamiento de una línea de transmisión frente a las descargas atmosféricas es muy complejo, debido a que las perturbaciones resultan de ciertas combinaciones de sucesos, que tienen cada una determinada probabilidad de ocurrir, es decir :

- a) Probabilidad de que ocurra una tormenta eléctrica en zona donde pasa la línea.
- b) Probabilidad de que ocurra una descarga
- c) Probabilidad de que la descarga llegue a la línea
- d) Probabilidad de que la descarga tenga un cierto valor de corriente en Kv.
- e) Probabilidad de que la descarga tenga un cierto valor de resistencia de puesta a tierra (Ω).
- f) Probabilidad de que se produzca una falla en la aislación.

Sabemos que las perturbaciones de una línea de trans

misión varían de acuerdo al número de descargas que caen sobre ésta. Por ello para determinar el número de perturbaciones debemos tener como dato principal el nivel isocerámico por donde pasa la línea, esto se obtiene de las estaciones meteorológicas del país.

De los datos obtenidos, y con los cuales INECEL realiza sus estudios, se toma los siguientes niveles isocerámicos máximos en la

Zona 1 (Costa) = 30

Zona 2 (Sierra) = 50

El nivel isocerámico se lo define como el número de días en el año que se escuchan truenos. Tenemos una fórmula para la cual determinamos el número anual de descargas por km², lo cual es la siguiente :

$$Na = \frac{T}{10}$$

donde :

Na : Número anual de descargas atmosféricas por km²

T : Nivel isocerámico

Cuando no existen hilos de guardia como protección contra descargas atmosféricas, se aceptan que éstas caigan directamente en los conductores provocando perturbaciones, cuyo número en el año puede ser com-

patible con la seguridad en general del sistema diseñado.

Mediante numerosas experiencias se ha obtenido valores al medir intensidades de cresta con diversos tipos de rayos, estableciéndose estadísticas, mediante la cual se determinan situaciones en que aparecen corrientes de intensidades superiores a determinados valores, de aquí por ejemplo; el 7% de los rayos son con una intensidad superior de los 40 KAmperios y para intensidades menores de 10 KAmperios, sólo el 40% de los rayos es superior a dicho amperaje.

Cuando existe una descarga directa sobre las líneas de transmisión se provoca una onda de sobrevoltaje inicial el cual luego se divide en dos ondas viajeras que parten en sentido opuestos del punto en que se produce la descarga.

FORMA, ATENUACION Y DISTORSION DE ONDAS VIAJERAS

En general las ondas viajeras están caracterizadas por frente, cresta y cola, como se indica en la parte superior de la Fig. 4.1; debiéndose anotar los siguientes valores cuantitativos :

CRESTA, es decir la amplitud máxima en kilovoltios,

FRENTE, expresado en microsegundos, es el tiempo transcurrido desde el instante cero hasta el instante en que se tiene la cresta, generalmente el instante cero es virtual, como se indica en la figura, y dado por la intersección de la línea que une los puntos correspondientes al 10% y al 90% del valor de cresta, y el eje del tiempo. Se tiene entonces, el valor " $T_1 + T_3$ " y el valor " T_3 ".

FRENTE EFECTIVO, aquel correspondiente a " T_2 ",

LONGITUD, aquel que en la figura corresponde a " T_4 "

POLARIDAD, se toma la de cresta.

Los fabricantes, expresan la característica de una onda, con los valores " T_3 " y " T_4 ", denominando por ejemplo: onda "1.5 x 40 microsegundos" a la que tiene " T_3 " = 1.5 microsegundos, y " T_4 " = 40 microsegundos

Si las ondas viajeras se deben a descargas atmosféricas, su forma se puede expresar fácilmente, como bien se comprueba la experiencia, por la diferencia de dos funciones exponenciales, según se indica en la Fig. 4.2a.

Se debe tener presente que cualquiera sea la forma de onda, se la puede expresar como la suma de componentes rectangulares, gracias a la función unitaria

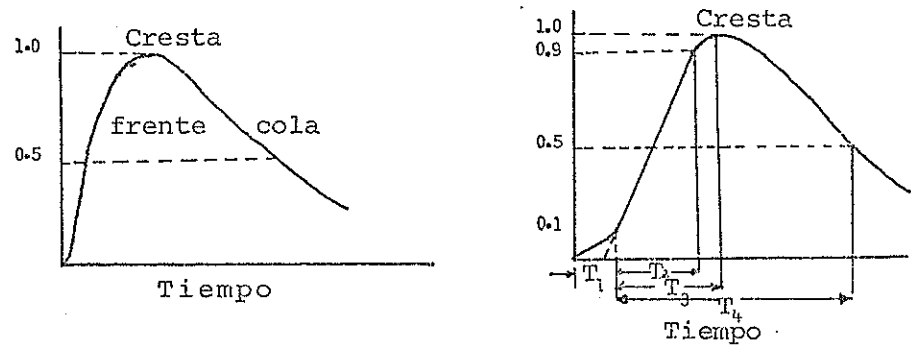


Fig. 4.1 FORMA DE LA ONDA DE IMPULSO DE $1,5 \times 40 \mu\text{seg.}$

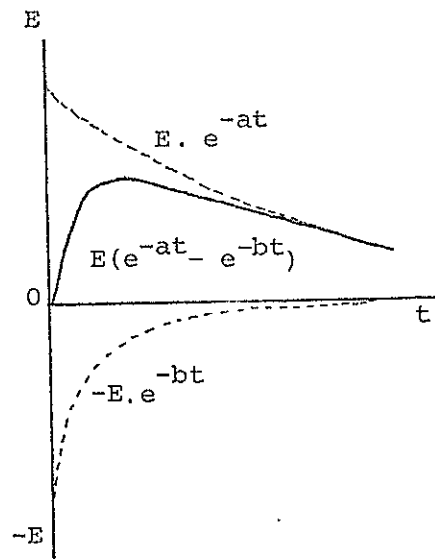


Fig. 4.2a

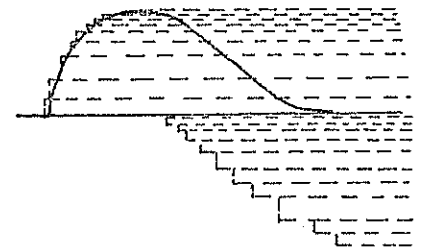


Fig. 4.2b

de Heavisids, como se ilustra en la Fig. 4.2b.

La onda al viajar por la línea puede sufrir cambios: **ATENUACION**, es decir decrecimiento en magnitud de cresta de la onda.

DISTORSION, cambio en la forma que en general consiste en un alargamiento, acentuamiento de las irregularidades, término de la similitud existente entre la onda de tensión y la onda de corriente.

Técnicamente es posible tener atenuación sin distorsión, lo contrario no, tanto atenuación como distorsión se producen a consecuencias de pérdidas de energía y variaciones en la inductancia y capacitancia, al suponer que los parámetros de la línea son constantes, se tendrá una solución simple.

4.2 PROBABILIDAD DE DESCARGAS ATMOSFERICAS

Mediante estadísticas de carácter meteorológico se ha llegado a establecer, aunque en forma aproximada, la probabilidad de que ocurran descargas atmosféricas.

Uno de los primeros pasos que con tal objeto y para una determinada zona se da es establecer el llamado nivel isoseráumico, es decir, el número de días que

en esa zona durante un año se escucha por lo menos una vez al día un trueno. Luego uniendo puntos de igual nivel isoseráumico se establecen las llamadas curvas de nivel isoseráumico o carta isoseráumica.

Siguiendo en el curso de estas investigaciones se ha tratado de establecer una correlación entre el nivel isoseráumico y el número de rayos que caen por año, por kilómetro cuadrado y aún cuando los valores que han obtenido son diferentes incluso para regiones climatéricas similares, puede unirse la información pertinentes en estos valores : 0.7 para zonas templadas y 1.0 para zonas tropicales, valores que tienen interés para previcciones de carácter general.

Es evidente entonces determinar la probabilidad de temporales e incluso preveer las posibles descargas en un cierto tiempo van a soportar los equipos.

Debe tomarse en cuenta algo muy importante, la distribución de descargas atmosféricas no es uniforme ni tan siquiera en las diferentes horas del día, peor en el transcurso del año como bien se puede apreciar en la Fig. 4.3, y Fig. 4.4, que dan la distribución de tormentas atmosféricas en porcentajes, para los diferentes meses del año en la primera y

para los diferentes horas del día en la segunda.

Resulta también de interés establecer el número de descargas por unidad de longitud y unidad de tiempo en líneas de transmisión, la unidad de tiempo generalmente es el año, y la longitud (en EE.UU. especialmente), por lo general 100 millas, lo cual es posible gracias a las estadísticas y de gran utilidad en cuanto a protección se refiere.

4.3 FORMACION DE CARGAS EN LAS NUBES

TEORIA DE SIMPSON :

El proceso exacto por el cual una nube adquiere cargas eléctricas no es completamente conocido. Existen muchas teorías siendo la más importante la de Simpson y la de Wilson.

Según la teoría de Simpson, el fenómeno de la formación de las cargas se debe a la acumulación en el interior de las nubes de gotas de agua en estado de vapor. Existen en las nubes tres regiones esenciales: la baja en la que la velocidad de las corrientes de convección excede la velocidad crítica 800 cm/seg. en forma tal que no se produce lluvia, la central en las gotas de vapor de agua se rompen en otras más pequeñas, siguiendo entonces a causa de las mis

mas corrientes su ascensión, la alta a la que llegan las más pequeñas gotas de vapor de agua (que son las más livianas) y en donde también al decrecer la velocidad del aire, las gotas se reúnen nuevamente formando gotas pesadas que caen a la región baja, el ciclo se repite.

Las gotas de vapor de agua por el proceso descrito se cargan eléctricamente, siendo positiva la carga de las más ligeras y negativa la de las más pesadas; eventualmente pues en la región alta predominan cargas positivas, teniendo en cuenta que el trabajo necesario para la separación de las cargas y su mantenimiento en la nube es proporcionado por las corrientes de aire, es lógico que la nube retorna a su estado inicial cuando cesan las corrientes de convección, por otra parte debe tenerse en cuenta que la temperatura en las regiones altas de la nube es fresca por lo que existen cristales de hielo, los que con el impacto del aire se cargan negativamente (cuando el aire está positivamente cargado), en conclusión pues la distribución de cargas es la indicada en la Fig. 4.5.

TEORIA DE WILSON :

Esta teoría depende para su explicación especialmen

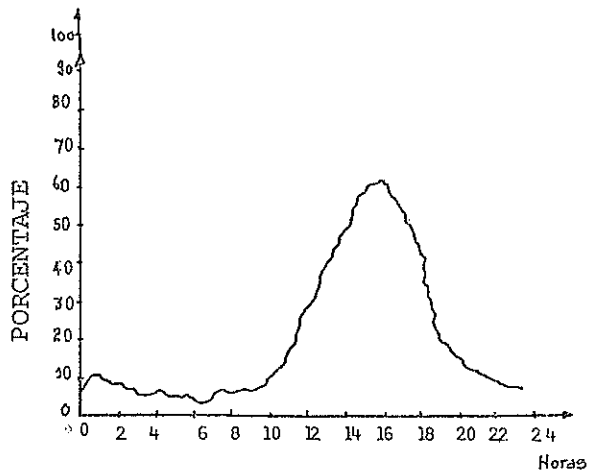


Fig.4.3 DISTRIBUCION DE LA DESCARGA ATMOSFERICA.

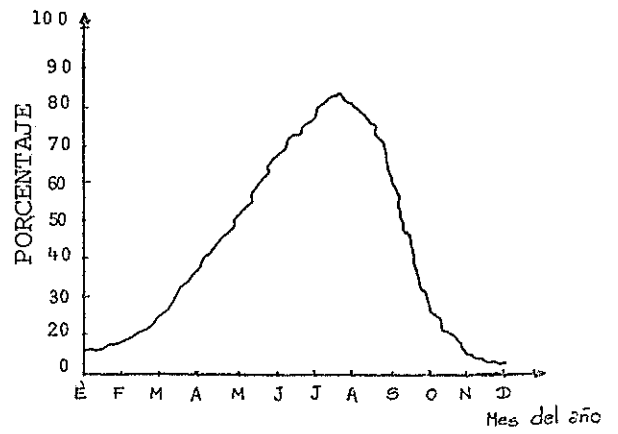


Fig.4.4 DISTRIBUCION DE LA DESCARGA ATMOSFERICA.

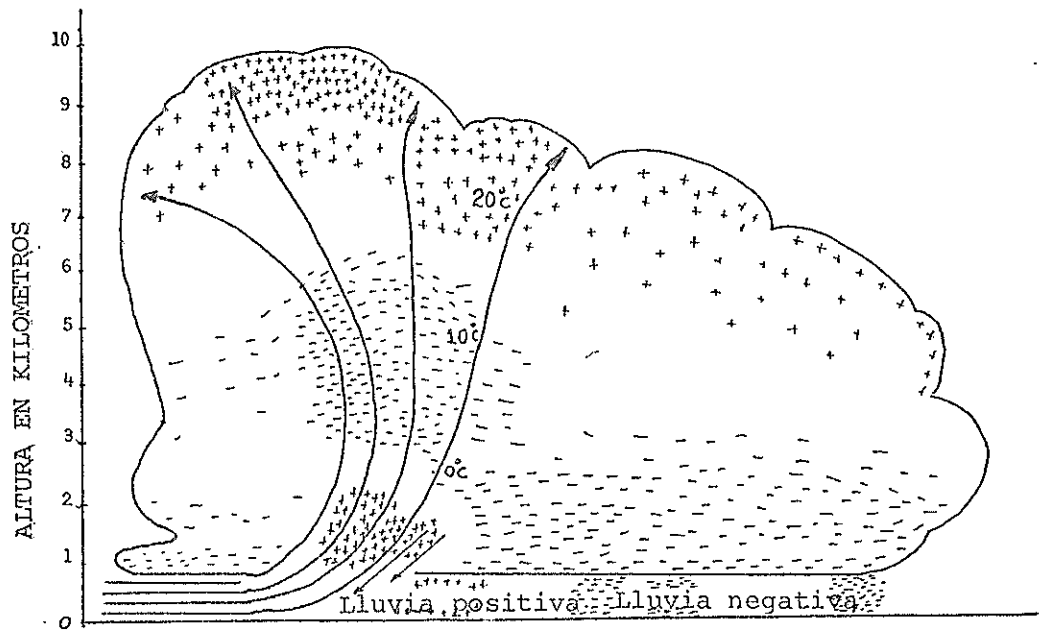


Fig.4.5 DIAGRAMA GENERALIZADO QUE MUESTRA LAS CORRIENTES DE AIRE Y LA DISTRIBUCION DE ELECTRICIDAD EN UNA TIPICA TORMENTA ELECTRICA.

te de la presencia de una gran cantidad de iones en la atmósfera y de la gradiente normal de campo entre nube y tierra. Muchos de los iones positivos y negativos existentes adjuntos a diminutas partículas de agua, forman grandes y pequeños iones; en un campo tal, una gota relativamente grande de agua llega a polarizarse por inducción y al caer atrae iones negativos y repela iones positivos; en esta forma la gota adquiere cargas negativas y el aire circundante queda cargado en forma predominante positivamente, gotas pequeñas caen con velocidad reducida y a través de un aire positivamente ionizado recogen cargas positivas y ultimadamente se trasladan a las regiones más altas de la nube debido a las corrientes de aire quedan pues las regiones altas de la nube cargadas positivamente y las bajas negativamente.

4.4 CARGA Y POTENCIAL EN LA NUBE

La carga máxima en una nube tormentosa se ha estimado de diferentes maneras tiene un valor comprendido entre 1 y 100 coulombios siendo al parecer el valor más común 10 coulombios.

La carga se forma lenta y exponencialmente en un período de quizás muchos segundos y hasta frecuente-

mente minutos. Es algo muy aceptado que el máximo de cargas electrostáticas se alcanza en unos 15 ó 20 minutos; realizándose si la carga es suficiente, la descarga en el interior de la nube y a tierra.

Se puede suponer que la nube viene a ser como un enorme generador de cargas electrostáticas o bien un conjunto de numerosos generadores llamados células. Cada nube tormentosa tiene una vida limitada, o si se quiere cada célula tiene una vida media de una célula generatriz es de aproximadamente una hora. Gracias precisamente a esta suposición es fácil comprender el porque se efectúan las descargas tanto en el interior de la nube como a tierra.

La máxima componente vertical de gradiente de campo debida a una nube cargada es del orden de :

300 voltios por centímetro, en nivel de tierra.

100 voltios por centímetro, en la nube.

10.000 voltios por centímetro en el punto de descarga inicial.

El último valor anotado es el necesario para romper el aire pero en regiones ocupadas por gotas de agua del tamaño encontrado en las nubes, esto es gotas cuyo diámetro es del orden de 0.3 cm.

Debido a que la descarga es de un efecto progresivo, el valor de gradiente que se ha dicho es el necesario existente sólo en las regiones inmediatas a la cabeza de la descarga.

Es interesante notar que en buen tiempo las gradientes medidas son :

1 voltio por centímetro en nivel de tierra

0.02 voltios por centímetro a 10.000 metros

La gradiente a nivel de tierra debido al paso de una nube tormentosa como la indicada en la Fig. 4.6, tiene frecuentemente la forma indicada en la misma figura, primero positiva, luego negativa y finalmente positiva otra vez, siendo el movimiento de la nube el indicado por la flecha.

4.4.1 DE LA TENSION

Son las tensiones existentes en las líneas de transmisión las que más interesan, los estudios al respecto empezaron hace muchos años y gracias a ellos hoy se tiene un conocimiento adecuado del rango en el que se encuentra el valor de esas tensiones.

El rango de variación es muy grande depen-

diendo su valor, en mucho de las condiciones de la línea, se han registrado voltajes de cresta de hasta 5.000 kilovoltios.

En la Fig. 4.7, se encuentra el resultado de datos recopilados en diversas líneas de transmisión. Claramente se nota que los valores de voltaje de cresta de línea a tierra, decrecen al decrecer el rango del voltaje de la línea, lo que seguramente debe a la reducción de la resistencia de aislamiento con la reducción del voltaje de operación.

La figura indica también que siempre que se tenga una tensión de operación alta, en líneas con conductores de tierra la tensión línea a tierra producida por las descargas atmosféricas es de un valor menor que la producida en líneas sin conductores de tierra. En esta figura las curvas señaladas con la letra A, indican que se hace referencia al total de descargas aplicadas a líneas sin conductores de tierra; las curvas señaladas con la letra B indican que se hace referencia a las descargas sobre líneas sin conductores de tierra, pero sólo a las que no producen fallas, y las señaladas por la letra C indi-

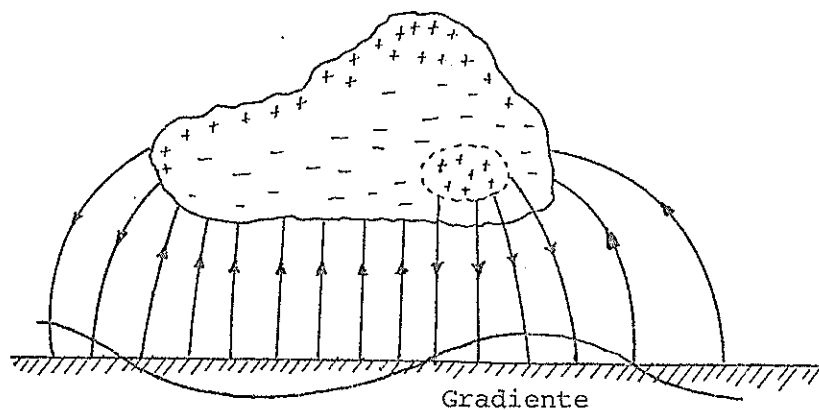


Fig.4.6 GRADIENTE A NIVEL DE TIERRA DEBIDO AL PASO DE UNA NUBE TORMENTOSA.

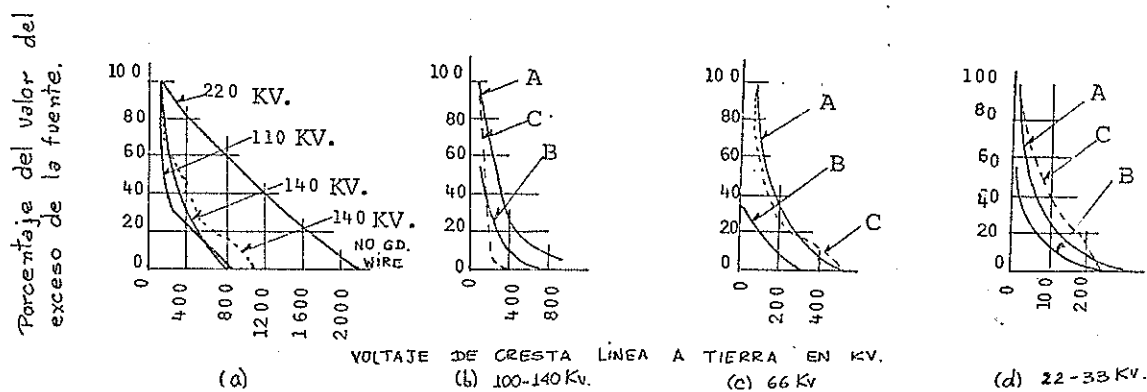


Fig. 4.7 OSCILOGRAMA DE VOLTAJES PRODUCIDOS POR DESCARGAS SOBRE LINEAS DE TRANSMISION DE VARIOS RANGOS DE VOLTAJES AMBAS CON Y SIN CABLES A TIERRA.

can que se hace referencia al total de descargas atmosféricas sobre líneas con conductores de tierra.

Wagner ha llegado a establecer que el potencial del canal de la descarga descendente es tá relacionado a la velocidad de la descarga de retorno en la siguiente ecuación :

$$V = 1.2 (10^5) (v) / (1 - 2.2 V^2)$$

donde:

V : Potencial en kilovoltios

v : Velocidad de la descarga de retorno por unidad de la velocidad de la luz.

De esta ecuación aparentemente puede pensarse que el potencial de descarga es independiente de la corriente, pero esto más adelante al establecerse la relación entre la corriente y la velocidad de la descarga de retorno se verá que no es cierto.

FORMA DE LA ONDA DE TENSION EN LAS LINEAS

Sólo se tienen datos relativos a la forma de onda en las líneas de transmisión, los cuales se obtuvieron por medio de oscilógrafos de rayos catódicos conectados a los conductou

res. En la mayoría de los casos no se conocía el punto donde había descargado el rayo y las ondas registradas eran ondas viajeras, las cuales seguramente habían sufrido ya variaciones notables durante el camino. La forma de estas ondas es idéntica a la de las que alcanzan los aparatos a proteger. Estas ondas, aunque de tensión, tienen su tiempo de crecimiento o tiempo hasta la cresta, y su tiempo hasta el valor medio semejante a los de las ondas de corriente.

La onda de tensión es importante desde el punto de vista del aislamiento, mientras que la forma de onda de la corriente lo es para estudiar el funcionamiento de los dispositivos de protección. En una línea de transmisión, ambas ondas están relacionadas por la impedancia característica, de manera que basta conocer una para poder calcular aproximadamente la otra. No se sabe todavía como relacionar la corriente medida en la descarga, con lo que, debido a aquella, circula por la línea de transmisión a partir del lugar donde se recibió la descarga.

Fortescue y Bewley, consideran el rayo como

un conductor vertical, de impedancia característica de igual a 200 y 400 ohm, respectivamente. Por otra parte, Lewis y Foust suponen que la suma de corrientes en los varios caminos en que se divide, debe ser igual a la intensidad de la descarga medida en lo alto de la torre.

Como consecuencia del descubrimiento del proceso de la descarga inicial y la de retorno, ya no puede considerarse que el canal seguido por la descarga sea equivalente a un conductor conectado a un generador de impulso que sería la nube. Sin embargo, considerando la falta de precisión de los datos de que disponemos con referencia al rayo en sí, cualquier método será aceptable, puestos que los resultados obtenidos, sea cual sea el utilizado, quedan dentro de los límites establecidos. El único oscilograma de tensión que se conoce tomado junto a una descarga directa lo fue en un sistema de 220 Kv.

La forma de onda cambia con el camino recorrido, haciéndose en general, los frentes menos abruptos y las colas más largas. El valor de cresta también decrece con el viaje.

Los investigadores están de acuerdo en que el efecto corona desempeña un papel importante en el cambio de forma de la onda durante su recorrido.

Pero existen, además, otros cambios no explicados por el efecto corona, que lo son mediante la teoría de las velocidades múltiples de Bewley, la cual se basa en la variación de penetración de la corriente en el suelo, según sea la resistencia de éste, y en el aumento del diámetro efectivo de los conductores, debido al efecto corona.

La Fig. 4.8, enseña gráficos de oscilogramas que muestran el cambio en la forma de onda con su corrimiento para ondas positivas y negativas, enteras y de cola truncada.

La variación del valor de cresta en función del camino recorrido está indicada en la Figura 4.9.

Se pueden ver que las ondas completas se atenuan mucho más rápidamente que las cortadas. En la teoría de las velocidades múltiples de Bewley, estos resultados son consecuencia

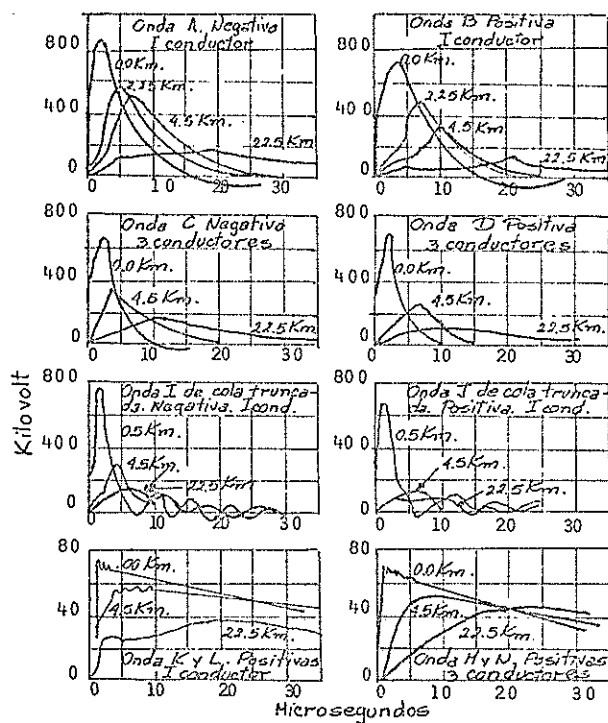


Fig. 4.8 REPRODUCCION DE VARIOS OSCILOGRAMAS QUE MUESTRAN EL CAMBIO EN LA FORMA DE ONDA EN FUNCION DEL TRAYECTO RECORRIDO.

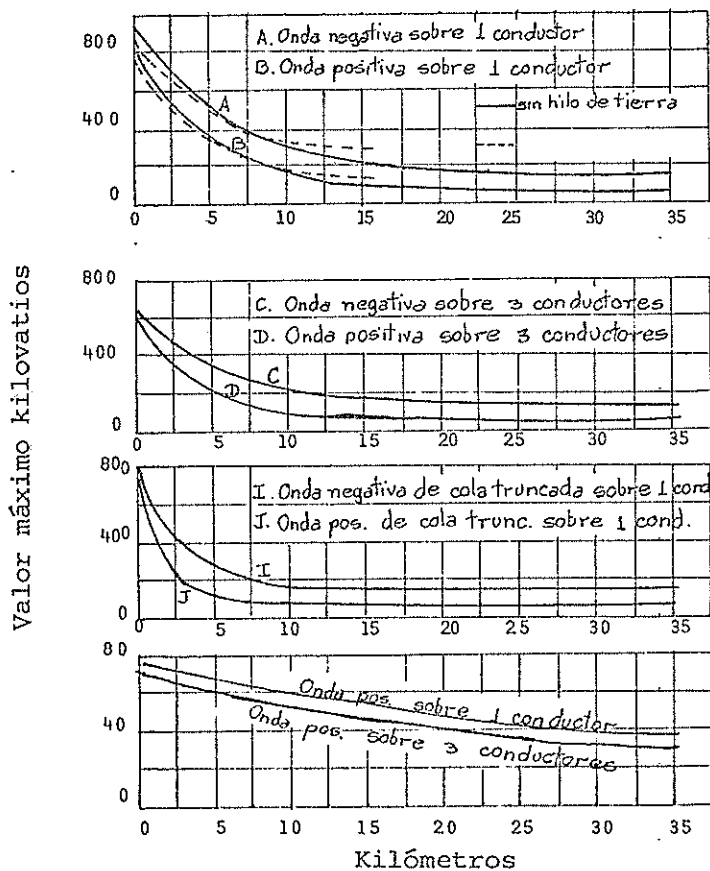


Fig. 4.9 REPRODUCCION DE ALGUNOS OSCILOGRAMAS QUE MUESTRAN LA VARIACION DEL VALOR DE LA TENSION MAXIMA EN FUNCION DEL CAMINO RECORRIDO POR LA ONDA.

de una menor penetración en el suelo y también de su separación en ondas de velocidades múltiples.

Para el cálculo de la atenuación, generalmente se usa la fórmula empírica dada por Foust-Menger.

$$e = \frac{e_0}{KSe_0 + 1}$$

$$A = -Ke^2$$

donde:

e_0 : Tensión inicial de la onda en el punto de inserción.

K : Un factor empírico de proporcionalidad

S : Distancia en kilómetros que ha recorrido la onda.

e : Tensión en kilovoltios a la distancia S .

A : Atenuación en kilovoltios por kilómetro en aquellos puntos en que la tensión de onda es e .

Según Bewley y Rudge

$K =$ (aproxim) 0.0037 para ondas de cola truncadas (2 μ seg).

$K = (\text{aproxim}) 0.00019$ para ondas cortas (5μ seg)

$K = (\text{aproxim}) 0.0001$ para ondas largas (20μ seg)

4.4.2 DE LA CORRIENTE

Los valores más exactos de la amplitud de la onda de corriente se han obtenido mediante un anillo magnético dispuesto para efectuar lecturas en los pies de las torres en las líneas aéreas.

En algunos casos se medía la corriente en las cuatro patas de la torre. La corriente total del rayo se obtuvo por la adición de las corrientes medidas en todas las torres que habían sido afectadas por la descarga de un mismo rayo. Debe hacerse notar que el 50% de los rayos tiene una intensidad superior a los 13.000 amp. (Fig. 4.10).

Sin embargo, sólo un 10% de los rayos tiene una corriente superior a los 32.000 amp. La relación entre la corriente total del rayo y la corriente en una sola torre, aumenta con el valor de la intensidad de estas corrientes, poniendo de manifiesto que los rayos de gran intensidad de corriente descargan a tra

vés de varias torres, mientras que los rayos de pequeña tan solo afectan a una de ellas, alrededor del 90% de las corrientes medidas eran de polaridad negativa.

La distribución de estas corrientes a través de los pararrayos colocados en líneas y centrales, puede verse en las curvas de tipo experimental de la Fig. 4.10 y 4.11 respectivamente.

En los valores hallados se observa, entre otras características, que se registra una proporción mucho mayor de descargas positivas en las redes de distribución que en las líneas de transmisión. Es probable que muchas de éstas sean debido al salto de cargas desde nubes de polaridad negativa.

Es importante conocer la existencia de una descarga de tipo continuo, pues seguramente es la causa de la quema de la cubierta de los cables y de los conductores, ayudando también a la fusión de fusibles en las redes de distribución. Quizá sea también ella la que fija el valor mínimo del tiempo que debe transcurrir antes de la reconexión de una lí

Intensidad de la corriente en la torre o en la descarga, amperios.

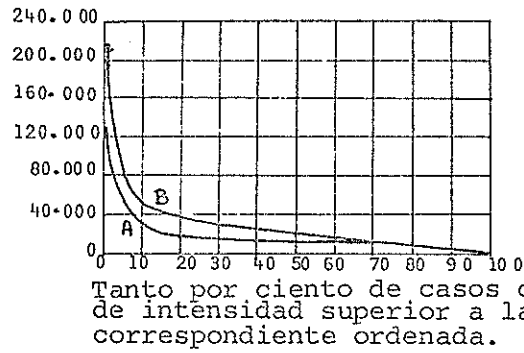


Fig. 4.10 INTENSIDAD DE LAS CORRIENTES DEL RAYO EN LAS LINEAS DE TRANSMISION.

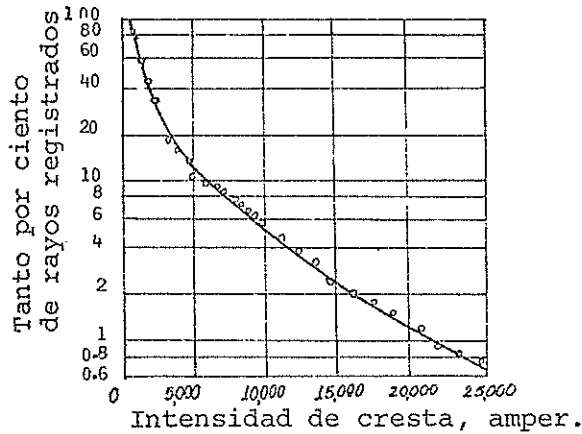


Fig. 4.11 CORRIENTE DEL RAYO A TRAVES DE LOS PARARRAYOS COLOCADOS EN LAS REDES DE DISTRIBUCION.

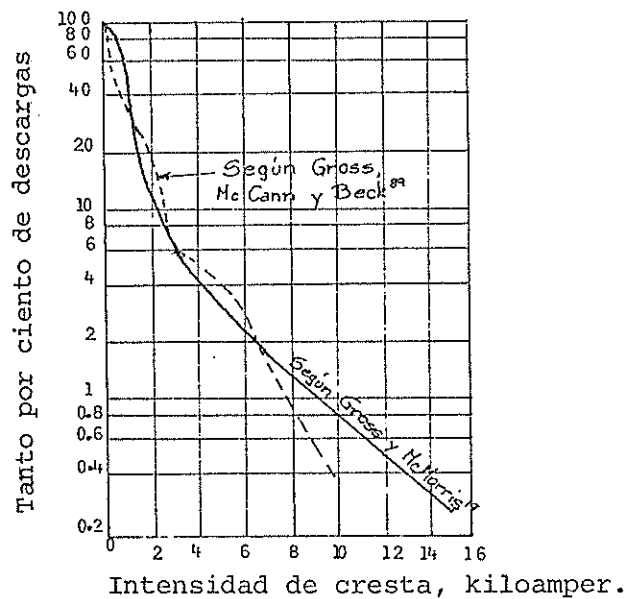


Fig. 4.12 CORRIENTE DEL RAYO A TRAVES DE LOS PARARRAYOS COLOCADOS EN LAS CENTRALES Y ESTACIONES.

nea cuando se emplean interruptores de reconexión automática, pues ésta no es posible hasta que la ionización del aire ocasionada por la descarga ha desaparecido, evitando así que el arco se cebe de nuevo. La duración de todas las descargas que circulan por el mismo canal, se ha medido en multitud de los casos mediante cámaras cinematográficas, oscilógrafo, fulcronógrafo o registrador fotográfico. El tiempo máximo fue de 1.5 seg. (ver Fig. 4.13).

En un cierto número de casos, la duración de la corriente total de la descarga se midió con oscilógrafo o fulcronógrafo. La corriente máxima registrada fue de 160.000 amp. La mayoría de las crestas de corriente medidas, fueron de polaridad negativa (ver Fig. 4.12).

FORMA DE LA ONDA DE LA CORRIENTE

Mediante mediciones directas apropiadas se ha registrado la forma de onda de las corrientes del rayo.

La Fig. 4.14, muestra el frente de onda, su cola y velocidad de crecimiento de la corriente

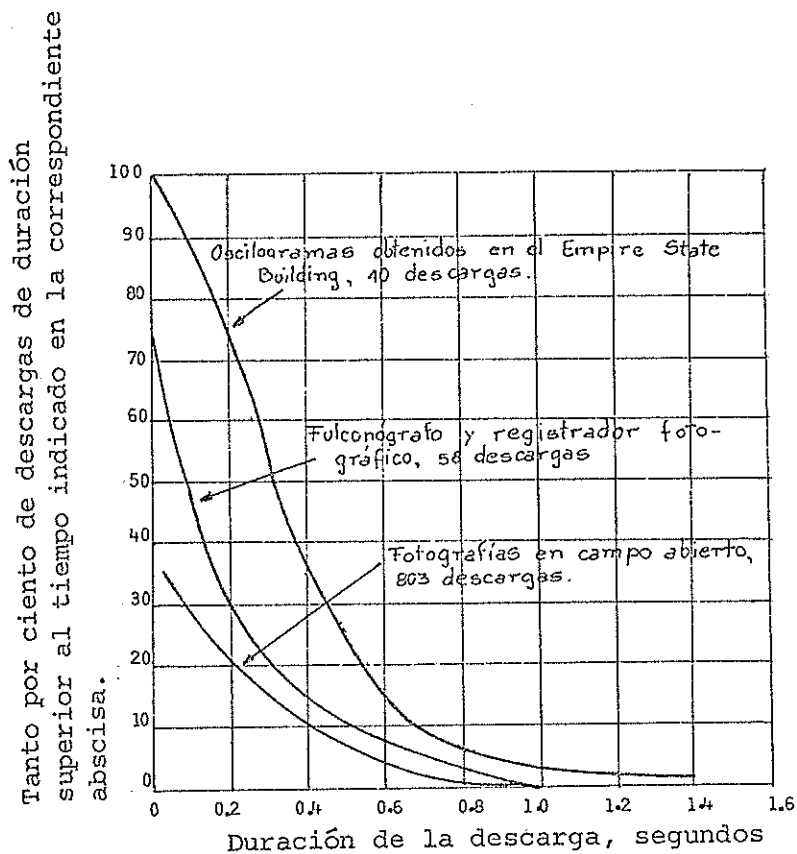


Fig. 4.13 DURACION DE LAS DESCARGAS. VALORES OBTENIDOS Y FRECUENCIA RELATIVA (EN %) CON QUE OCURREN.

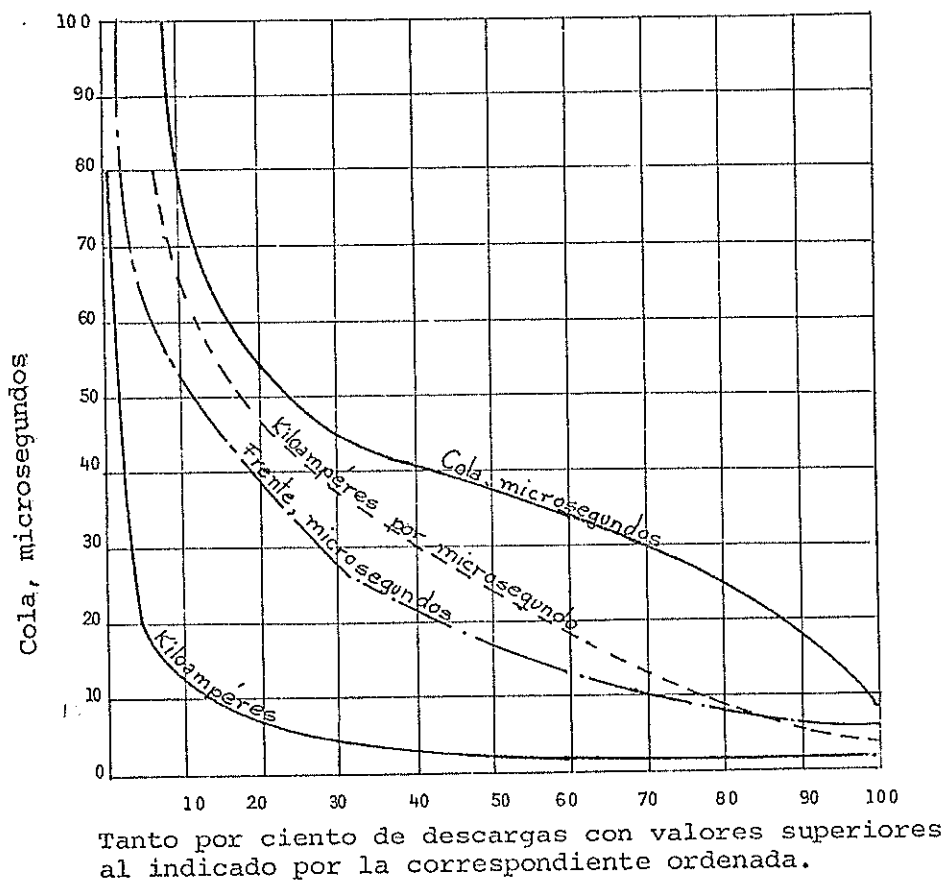


Fig. 4.14 FORMA DE ONDA Y AMPLITUD DE LA CORRIENTE DE DESCARGA DEL RAYO.

te obtenido por McEachron con un oscilógrafo y por McCann y otros con fulcrográfo.

No pueden decirse que los rayos tengan una determinada forma de onda, pero sí que están comprendidos entre ciertos límites que vienen dados por curvas y tablas que dan la proporción de rayos con características determinadas.

CAPITULO V

PUESTA A TIERRA Y ARCOS ELECTRICOS

5.1 GENERALIDADES

Poner a tierra significa unir a la masa terrestre un punto de una instalación eléctrica a través de un dispositivo apropiado el cual debe presentar determinadas características de funcionamiento.

En hipótesis, admitiendo la probabilidad de efectuar una conexión a tierra de resistencia nula, podría pensarse en mantener a un potencial cero el punto unido a tierra, obviamente esta hipótesis no es prácticamente realizable, por cuanto no hay posibilidad de efectuar conexiones de resistencia nula y porque en el terreno, al que necesariamente debe unirse el circuito de tierra realizado, es un material de resistividad mucho más elevado que los conductores normalmente empleados en las conexiones eléctricas.

La disposición de una toma de tierra supone, en primer lugar, el conocimiento de las características de cada instalación eléctrica a la que debe aplicarse así como también de las corrientes y tensiones a que puede estar sometida.

Es necesario además, conocer el comportamiento de los electrodos tanto desde el punto de vista de la resistencia que ofrecen al paso de la corriente, como desde el de los gradiente de potencial a que dan lugar. Toda instalación o toma de tierra debe someterse una vez realizada, al objeto de comprobar su eficacia y ver si responde a la exigencia de la red a que debe acoplarse.

En cuanto a los arcos intermitentes son ocasionados por descargas disruptivas incipientes o interrupción de cortocircuito. Esto implica sobrevoltajes transitorio que pueden alcanzar un considerable valor o a la creación de una oscilación de alta frecuencia en el punto de falla y una elevación de voltaje a varias veces el normal a tierra en sucesivos reencendidos.

Estas acciones son aparentemente causadas por la capacitancia a tierra en el mantenimiento de un potencial de corriente entre los sucesivos arcos, más adelante trataremos detalladamente los arcos eléctricos.

5.2 OBJETIVO DE UNA PUESTA A TIERRA

Los objetivos perseguidos al realizar una puesta a

tierra son múltiples y generalmente propio de cada caso, en cuestión se consideran los más frecuentes.

- a) Establecer valores adecuadamente bajos los voltajes entre fases y tierras, durante fallas en los sistemas de transmisión.

La elección de los pararrayos de un sistema de transmisión depende de los valores posibles de voltaje de fase a tierra durante fallas. Mientras menor sea el valor en la resistencia de puesta a tierra de un sistema de transmisión menor será el voltaje entre fase y tierra en el punto de fallas; por lo tanto, mejor será el voltaje nominal requerido de los pararrayos.

Un valor inferior del voltaje nominal de los pararrayos significa un valor inferior del voltaje margen de protección para una aislación dada de los equipos de subestaciones a la posibilidad de reducción en los niveles de aislación de éstos. Por otro lado, los voltajes transientes por maniobras en los sistemas de transmisión son proporcionales a los voltajes fase-Neutro.

Como es posible esperar la ocurrencia de sobretensiones durante fallas a tierra, es conveniente un valor de voltaje fase-tierra de un valor lo más

bajo posible para reducir la sollicitación transiente, lo cual determina el nivel de aislación de los sistemas de transmisión importante.

- b) Proporcionar una vía de baja impedancia de falla, lo más económica posible, a un sistema, para lograr la operación rápida de los elementos de protección, relés, fusibles, etc.

 - c) Conducir a tierra las corrientes provenientes de descargas atmosféricas, limitando los voltajes producidos en instalaciones eléctricas (líneas de transmisión de potencia, de comunicaciones, en subestaciones, etc.).

 - d) Evitar voltajes peligrosos entre estructuras, equipos, etc. (en general elementos que pudiesen adquirir algún potencial incontrolable), y el terreno durante fallas o en condiciones normales de operación.

 - e) Servir como conductor de retorno a ciertas instalaciones, equipo a consumo, por ejemplo :
 - Instalaciones de tracción eléctrica
 - Puesta a tierra del neutro en instalaciones de distribución.
-

- Enrollados de transformadores de potencial
- Circuito de telefonía en onda portadora
- Transmisión de potencia de corriente continua
- Protección catódica, etc.

5.3 REQUISITOS DE UNA PUESTA A TIERRA

Una puesta a tierra satisfactoriamente proyectada debe cumplir con algunos o la totalidad de los siguientes requisitos :

- a) Deberá tener una resistencia tal que el sistema de transmisión del cual forma parte, puede considerarse como sólidamente "Puesta a tierra".
- b) Deberá tener una resistencia tal que en cualquier época del año la corriente de falla a tierra sea capaz de producir la operación de los elementos de protección.
- c) Deberá tener una impedancia de onda de un valor bajo tal, que al ocurrir descargas atmosféricas, no se produzcan arcos inversos entre las partes metálicas (por ejemplo estructuras) y los conductores energizados.
- d) Deberá conducir a tierra las corrientes de fallas

sin provocar gradientes de potencial peligrosos entre puntos establecidos en la superficie del terreno o entre un punto del terreno y objetos conductores vecinos.

- e) Deberá ser capaz de conducir las corrientes de fallas durante el tiempo eventualmente posible sin sobre calentamiento de sus elementos constituyentes.
 - f) Deberá ser resistente al toque corrosivo del terreno y atmósfera.
 - g) Los diferentes electrodos y elementos que conforman el sistema puesta a tierra deben ser capaces de conducir las corrientes de fallas sin calentamiento, tal que zonas específicas, este hecho pudiese dar lugar a incendios o a explosiones.
 - h) En zonas con emanaciones inflamables deberá recurrirse a métodos adecuados para evitar en su totalidad posibles arcos eléctricos entre postes metálicos y el terreno.
 - i) El costo del sistema de puesta a tierra deberá ser lo más bajo posible, por esta razón la puesta a tierra naturales tales como tubería, y estructu-
-

ras metálicas enterradas deben ser considerados, teniendo presente posibles problemas de transferencia de potencial o problema de corrosión.

5.4 DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Se considera de importancia fundamentalmente para el cálculo y diseño de una puesta a tierra, el conocimiento lo más exacto posible de las características del terreno donde se construirá ésta.

De las características generales lógicamente la más importante en relación con el objetivo perseguido es la resistividad del suelo. Además de la resistividad, otras características que son convenientes determinar y que tiene relación con aspectos importantes del proyecto de una puesta a tierra son la humedad, el PH del terreno y la temperatura. Un conocimiento de la corrosividad del suelo es de especial importancia en estos casos.

La única manera de conocer la o las resistividades del terreno es haciendo la medición directa en el si tio y ésta debe efectuarse durante épocas secas. En nuestro país estas condiciones deben realizarse entre los meses de Agosto y Noviembre.

En casi la totalidad de los casos en que se desea de terminar la resistividad de un terreno, se utiliza lo que se denomina sondeo eléctrico. Mediante el sondeo eléctrico se obtiene información para determi nar las resistividades de los diferentes estratos del terreno y sus profundidades.

En lo referente a la influencia de la temperatura la cual hace variar los valores de la resistividad del terreno, lo que aumenta lentamente a medida que la temperatura desciende hasta el punto de fusión (0°C 32°F). Por debajo de este punto, la resistencia cre ce muy rápidamente al descender aun más la temperatu ra, tal caso lo tenemos en la Fig. 5.1.

Por lo concerniente a la humedad, en la mayoría de los terrenos, a una mayor saturación de humedad le corresponde menor resistividad, al disminuir la hum edad en un 15% ésta experimenta un ligero aumento, y por debajo de este valor la resistividad aumenta rápidamente a medida que el porcentaje de humedad disminuye, como lo podemos apreciar en la Fig. 5.2.

INSTALACIONES EN GENERAL.- La puesta a tierra de las torres pueden estar constituidas de varias formas a fijarse valores máximo de la resistencia de

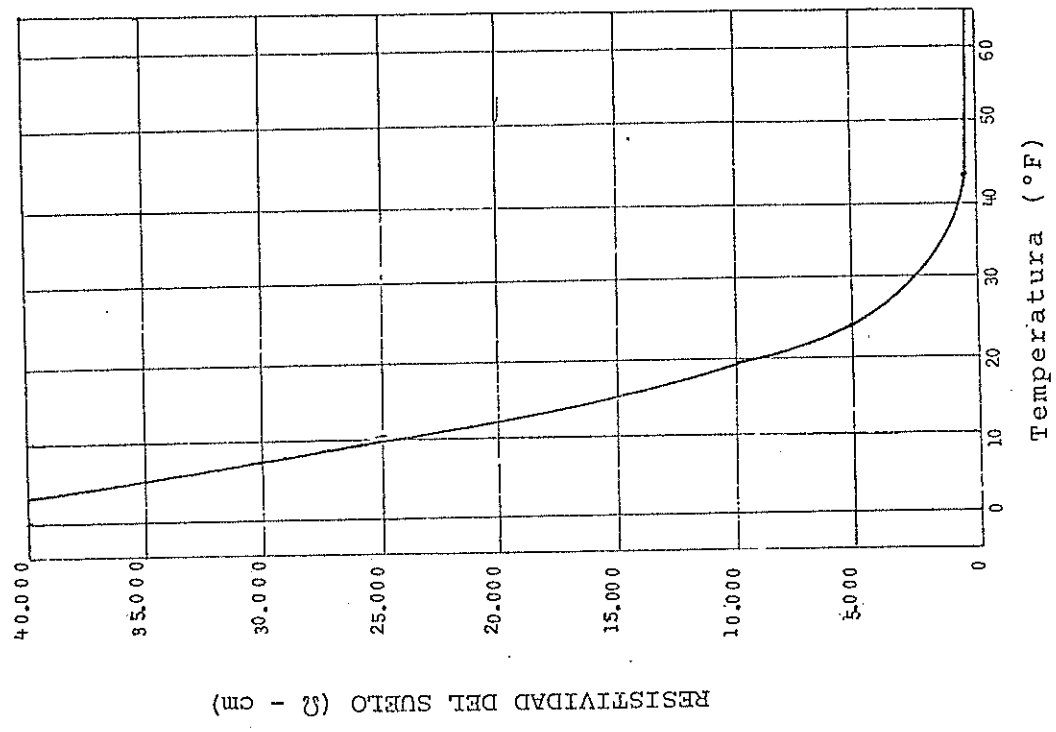


Fig. 5.1 VARIACION CON LA TEMPERATURA DE LA RESISTIVIDAD DE UN TERRENO. ARCILLA ROJA 18,6% DE HUMEDAD.

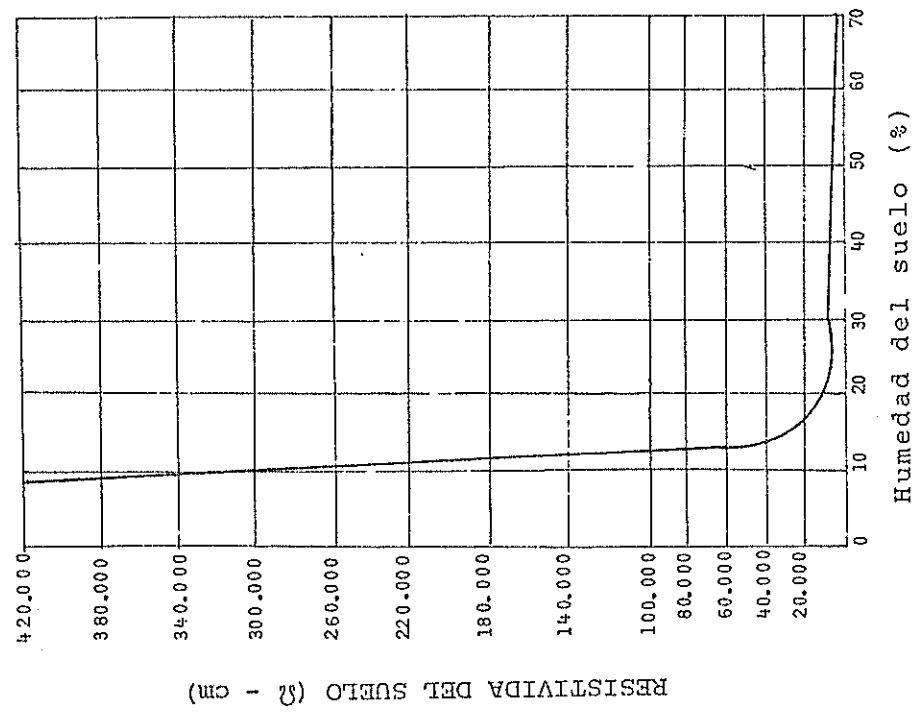


Fig. 5.2 VARIACION DE LA RESISTIVIDAD DE UN SUELO CON SU CONTENIDO PORCENTUAL DE HUMEDAD.

tierra de los pies de la torre, concordante con el nivel de aislación a adoptar en la línea. Estas formas de puesta a tierra dependen de la resistividad del terreno y del apoyo de la torre en el suelo.

Si el apoyo de las torres, es realizado por ejemplo mediante fundiciones de concreto, se incluyen varillas de copperwel (cobre-acero) enterrados verticalmente en cada esquina de la excavación y conectadas mediante cables de cobre a cada pie de la torre, cuando la resistividad del terreno es alta, se utiliza cable de cobre (llamado contrapesos) enterrados horizontalmente.

En efecto, es evidente que con una baja resistencia al pie de la torre tenemos que :

- a) Los potenciales en los conductores de tierra se reducen.
 - b) Los potenciales en los conductores de fase se reducen.
 - c) Los potenciales a través de los aisladores se reducen.
 - d) Los disturbios se limitan a pocos vanos.
 - e) La duración de los voltajes que ocasionan daños es más corta.
-

Estos hechos y la posibilidad de tener el aislamiento mínimo con una resistencia de tierra adecuada, lo que ya en el Capítulo I, sección 1.4.5 se dijo hacen pensar en la conveniencia de tratar de reducir la resistencia al pie de la torre, que es de ordinario de valores más altos que los deseables, por métodos adecuados.

Como el empleo de esos métodos es sumamente costoso, la resistencia al pie de la torre deberá tener un valor dado por el balance económico entre una resistencia baja al pie de la torre apropiadas para un a islamiento mínimo, o una resistencia al pie de la torre más elevada con un nivel de aislamiento más elevado a la posibilidad de falla en el aislamiento.

La a islación entre el aislamiento mínimo y la resistencia al pie de la torre se ve claramente en la Tabla XII que está basado en una corriente de descarga de 10^5 amperios y un aislamiento mínimo de la Tabla IX.

VOLTAJE DEL CIRCUITO EN KV	NUMERO DE UNIDADES AISLADORES MINIMO UNIDADES CUYO ESPESOR ES 23/4 PULGADAS	ONDA POSITIVA DE IMPULSO DE CONTORNEAMIENTO DE 1.5 x 40 EN KV	RESISTENCIA AL PIE DE LA TORRE MAX. VALOR PERMISIBLE EN OHMIOS
34.5	2	250	2.5
46	3	335	3.6
69	4	440	4.4
92	5	525	5.3
115	6	610	6.1
138	7	695	7.0
161	8	780	7.8
198	10	945	9.5
230	12	1105	11.1
287	15	1345	13.5
345	19	1665	16.7
360	20	1745	17.5

TABLA XII RESISTENCIA AL PIE DE LA TORRE NECESARIA CON AISLAMIENTO MINIMO BAJO LA ASUNCION DE UNA CORRIENTE DE DESCARGA DE 100.000 AMPERIOS EN LA TORRE.

5.5 ENCLAVAMIENTO DE TIERRAS

Consiste en el enclavamiento en tierra de un gran número de barras usualmente de 3/4 a 2 pulgadas de diámetro y 10 a 50 pies de longitud, dependiendo la resistencia de cada una de las barras tanto de su longitud y diámetro como resistividad de la tierra varía en un gran rango sin ser constante con respecto al voltaje. Es posible incluso, que la resistencia de tierra obtenida por este método sea menor para una onda de impulso es inicialmente más alta que la resistencia medida pero decrece cuando el voltaje tiende a su valor de cresta. Esto enseña que la resistencia a corriente continúa es sólo una medida del orden de la magnitud que puede tener.

La humedad y el nivel de la capa fértil que puede existir influyen normalmente en la resistividad del suelo, también el contenido de sales tiene su marcada influencia. Pero asumiendo que la tierra es uniforme y homogénea, es posible calcular la conductancia de las barras en términos de las dimensiones de ellas inmersas y de la resistividad del suelo H.B. Dwight da la siguiente fórmula para la resistencia de una barra simple.

$$R = (\rho) \{ \ln (4L/r) - 1 \} / (2\pi L) \quad (5.1)$$

siendo:

ρ : resistencia del suelo

γ : radio de la barra

L : longitud de la barra

Hace algunos años se consideraba que cualquier objeto conectado adecuadamente a tierra, no ofrecía ningún peligro. La serie de accidentes producidos han demostrado que esta configuración no es válida.

Es necesario aclarar que una subestación en la que la resistividad del terreno es baja, no es en sí mismo, una garantía de seguridad, pudiendo en determinados casos ser peligroso.

Experiencias efectuadas han concluido que más del 99% de las personas pueden soportar, sin que se produzca un paro cardíaco, corrientes determinadas por la ecuación siguiente:

$$I = \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

donde :

I : corriente en amperio (valor eficaz)

t : duración del shock (segundos)

Entre los factores que permiten que las posibles descargas que pueda sufrir una persona, sea de mayor

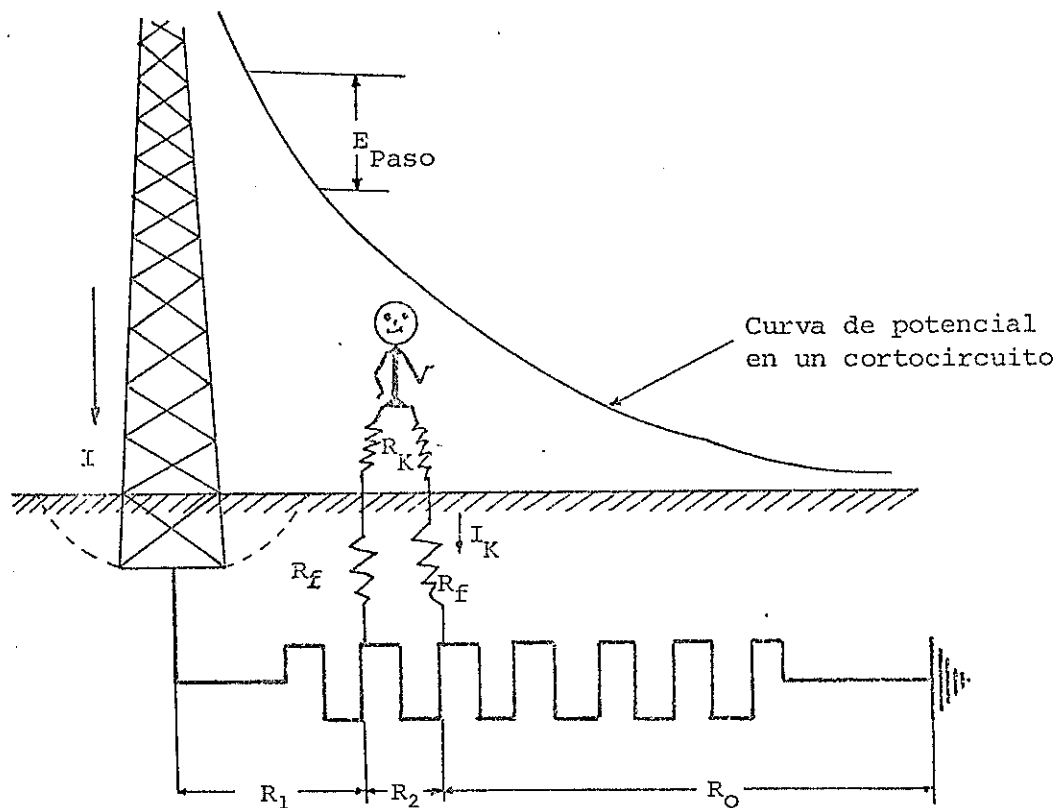
gravedad, se puede citar :

- a) La presencia de una corriente de falla alta, en relación con el tamaño de la malla de tierra.
- b) Alta resistividad del terreno.
- c) Ausencia de resistencias de contacto o de resistencias en serie, que limitan el flujo de corriente a través del cuerpo humano, a valores seguros.
- d) Duración del contacto por un tiempo relativamente largo.
- e) La posibilidad de que la distribución del flujo de la corriente a tierra, origine puntos con gradientes de potencial altas.

POTENCIALES TOLERABLES.- Bajo este campo, es adecuado definir los siguientes potenciales :

- a) Potencial de paso
 - b) Potencial de contacto
 - c) Potencial de malla
-

a) POTENCIAL DE PASO : Es la diferencia de potencial entre dos puntos en la superficie de un terreno que pueden ser tocados simultáneamente por una persona.

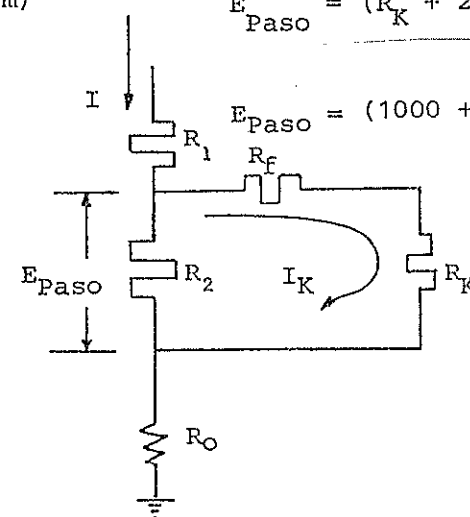


$$R_f = 3\rho_s (\Omega - m)$$

$$R_K = 1000\Omega$$

$$E_{Paso} = (R_K + 2R_f) I_K \text{ Voltios}$$

$$E_{Paso} = (1000 + 6\rho_s) \frac{0.165}{\sqrt{t}} \text{ Voltios}$$



CIRCUITO-EQUIVALENTE

I_K : corriente fluyendo a través del cuerpo.

R_K : resistencia justo bajo los pies (Ω).

R_f : resistencia del cuerpo humano (Ω).

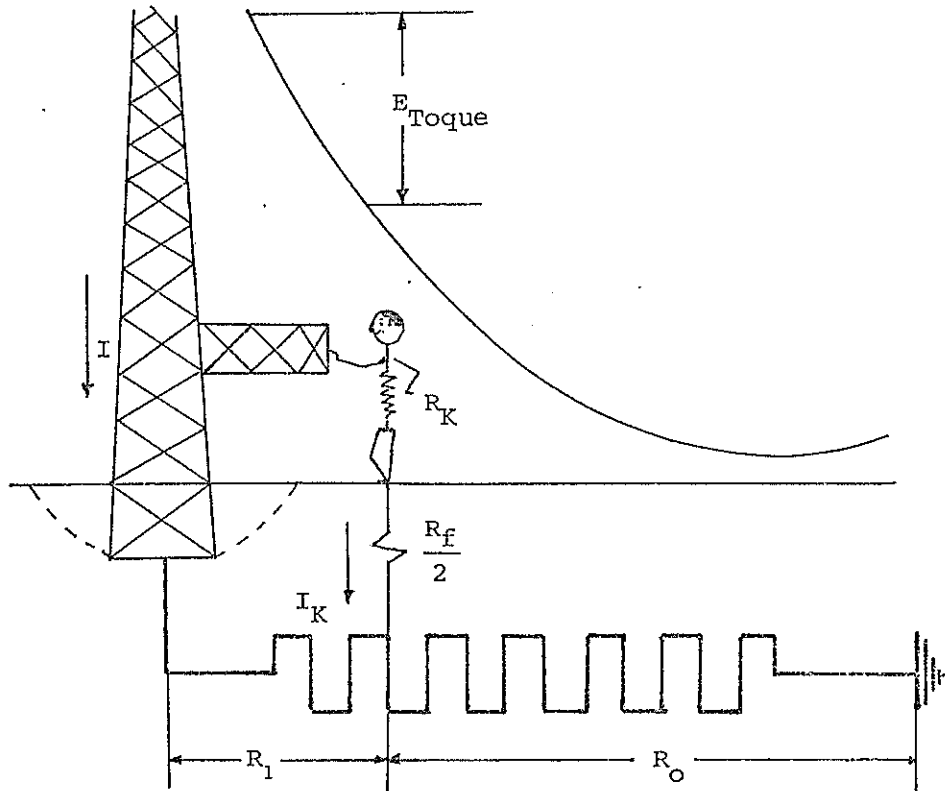
ρ_s : resistividad del suelo cercana a la superficie ($\Omega - m$)

I : corriente de falla que fluye a tierra.

Fig. 5.3

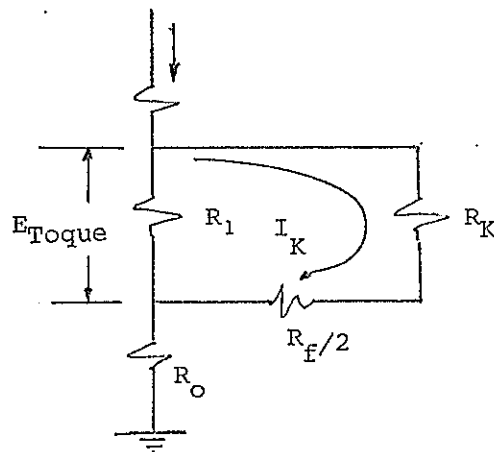
finalmente tenemos: $E_{Paso} = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}}$ Voltios

b) POTENCIAL DE CONTACTO : Es la diferencia de potencial entre



un punto en la superficie de un terreno y cualquier otro punto que pueda ser tocado simultáneamente por una persona.

$$E_{Toque} = (R_K + R_F/2) I_K$$



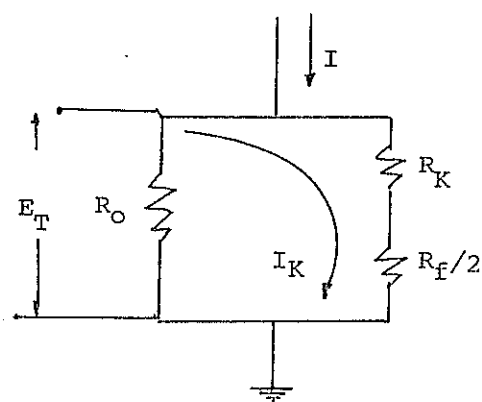
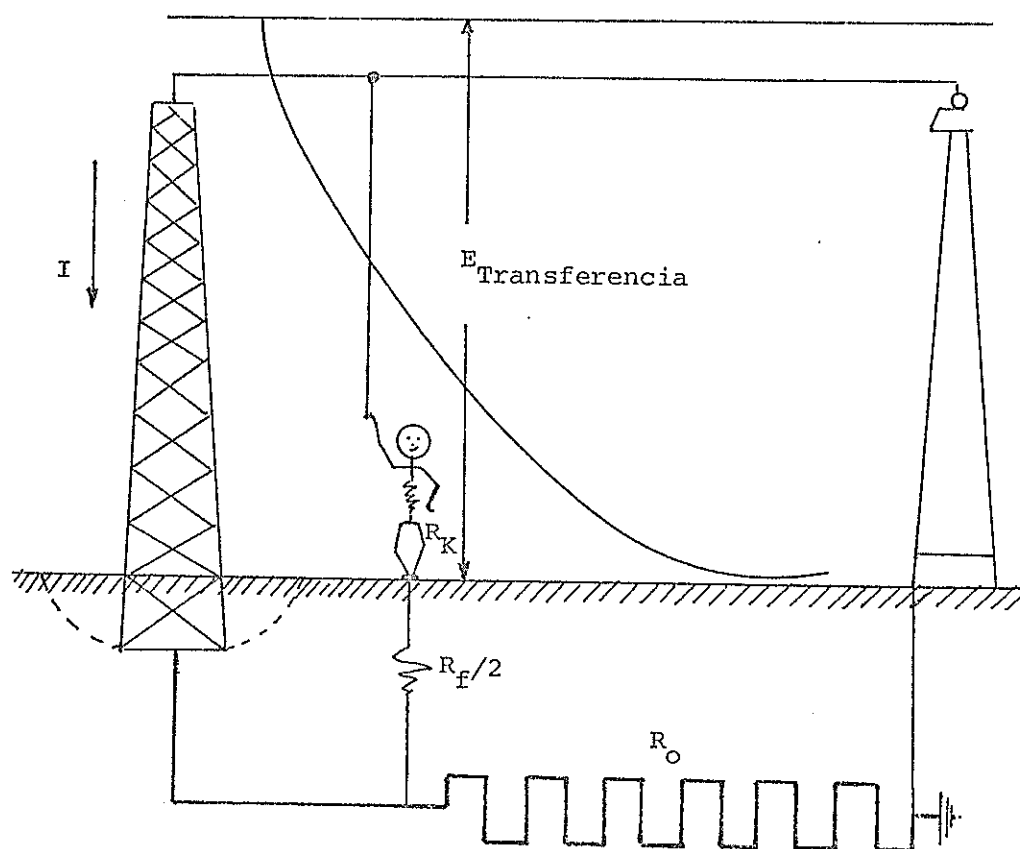
$$E_{Toque} = \left(1000 + \frac{3\rho_s}{2}\right) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$E_{Toque} = \frac{165 + 025 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

CIRCUITO-EQUIVALENTE

Fig. 5.4 VOLTAJE DE TOQUE CERCA A UNA ESTRUCTURA

c) POTENCIAL DE MALLA :



CIRCUITO-EQUIVALENTE

$$E_{\text{Transf}} = \left(R_K + \frac{R_f}{2} \right) I_K$$

$$E_{\text{Transf}} = \left(1000 + \frac{3\rho_s}{2} \right) \frac{0.165}{\sqrt{t}}$$

$$E_{\text{Transf}} = \frac{165 + 0.25\rho_s}{\sqrt{t}}$$

Fig. 5.5

c) POTENCIAL DE MALLA : Es un caso especial del potencial de contacto y es el de mayor importancia. Es la diferencia de potencial entre un punto de una estructura puesta a tierra y el centro de una malla rectangular.

De éstos tres potenciales el más peligroso es el potencial de contacto, debido a que produce una circulación de una mayor corriente a través de los órganos vitales incrementando el peligro de muerte.

El potencial de paso es menos grave ya que la corriente que circula por el cuerpo humano es menor, al estar éste en paralelo con la resistencia de tierra y no tener contacto directo con ninguna estructura.

PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES.- Dos son los métodos empleados generalmente para reducir las resistencias de contacto de la torre con el suelo. Uno de ellos es el de las llamadas estacas de tierra y el otro es el de los contrapesos o contraantenas. A menudo, para obtener una buena protección contra el rayo es necesario reducir la resistencia de tierra hasta 10 ohm e incluso menos.

No obstante poder calcularse la resistencia del suelo bajo determinadas condiciones, en la práctica se

determina ésta por medidas directas.

Cuando las condiciones del terreno son particularmente malas parece dar buenos resultados hincar en el suelo estacas de gran longitud, siempre desde luego, que éste sea de clase tal que permita esta operación.

El contrapeso o contraantena puede ser de dos tipos:

- a) radial
- b) continúa

Tanto en un caso como en otro, el conductor se entiera a una profundidad de 0.3 a 1 m, y debe conectarse a cada torre directamente o dejando un espacio de aire.

El metal empleado en el contrapeso puede ser cualquiera, sólo debe ser fuerte mecánicamente y resistente a la corrosión. Se desconoce el efecto que pueda tener la sección del conductor, pero la experiencia parece demostrar que un conductor que no sea mecánicamente resistente, resulta suficiente desde el punto de vista de la conductividad.

Se demuestra teóricamente y mediante ensayos que la contraantena tiene una impedancia característica inici

cial de 150 a 200 ohm, la cual disminuye hasta reducirse a su valor final de resistencia; el tiempo empleado en esta variación es el necesario para que la primera onda reflejada que se propaga con una velocidad de la luz, llegue a la contraantena.

Los elementos o electrodos utilizados para obtener una buena resistencia a tierra son la que a continuación consideramos como importante :

- ALAMBRE EN ANGULO RECTO

Longitud del brazo "L" profundidad s/2

$$R_{pb} = \frac{1}{4L}$$

- SEMIESFERA

Radio a

$$R_{pt} = \frac{\rho}{2\pi a}$$

- VARILLA UNICA DE TIERRA

Longitud "L", radio a.

$$R_{pt} = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\epsilon_n \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

- ALAMBRE ENTERRADO HORIZONTALMENTE

Longitud 2L, profundidad s/2

$$R_{pt} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ell_n \frac{4L}{a} + \ell_n \frac{4L}{s} - 2 + \frac{\delta}{2L} - \frac{\delta^2}{16L^2} + \frac{\delta^4}{512L^4} \dots \right)$$

- ESTRELLA DE CUATRO BRAZOS

Longitud del brazo L , profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ell_n \frac{2L}{a} + \ell_n \frac{2L}{s} + 2,912 - 1,071 \frac{\delta}{L} + 0,645 \frac{\delta^2}{L^2} - 0,145 \frac{\delta^4}{L^4} \dots \right)$$

- ARO DE ALAMBRE

Diámetro del aro D , diámetro del alambre d , profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ell_n \frac{8D}{d} + \ell_n \frac{4D}{s} \right)$$

- ALAMBRE EN ANGULO RECTO

Longitud del brazo " L ", profundidad $s/2$

$$R_{pb} = \frac{\ell}{4\pi L} \left(\ell_n \frac{2\ell}{a} + \frac{2\ell}{s} - 0,2373 + 0,2146 \frac{\delta}{L} + 0,1035 \frac{\delta^2}{L^2} - 0,0424 \frac{\delta^4}{L^4} \dots \right)$$

- ESTRELLA DE TRES BRAZOS

Longitud del " L ", profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ell_n \frac{2\ell}{a} + \ell_n \frac{2\ell}{s} + 1,071 - 0,209 \frac{\delta}{L} + 0,238 \frac{\delta^2}{L^2} - 0,054 \frac{\delta^4}{L^4} \dots \right)$$

- ESTRELLA DE SEIS BRAZOS

Longitud del brazo " L ", profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ell_n \frac{2\ell}{a} + \frac{2\ell}{s} + 6,851 - 3,128 \frac{\delta}{L} + 1,758 \frac{\delta^2}{L^2} - 0,490 \frac{\delta^4}{L^4} + \dots \right)$$

- ESTRELLA DE OCHO BRAZOS

Longitud del brazo "L", profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ell_n \frac{2L}{a} + \ell_n \frac{2L}{s} + 10,98 - 5,51 \frac{s}{L} + 3,26 \frac{s^2}{L^2} - 1,17 \frac{s^4}{L^4} \dots \right)$$

- PLATINA ENTERRADA HORIZONTALMENTE

Longitud $2L$, sección $(a \times b)$, profundidad $s/2$ donde $b = a/8$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ell_n \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - ab}{2(a+b)^2} + \ell_n \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \dots \right)$$

- DISCO ENTERRADO HORIZONTALMENTE

Radio a , profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7a^2}{12s^2} + \frac{33a^4}{40s^4} \dots \right)$$

- DISCO ENTERRADO VERTICALMENTE

Radio a , profundidad $s/2$

$$R_{pt} = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7a^2}{24s^2} + \frac{99a^4}{320s^4} \dots \right)$$

Daremos un ejemplo de puesta a tierra de una estructura de alta tensión, en la cual se usa generalmente un anillo rectangular circunscrito a la base de la torre, dispuesto como se indica en la Fig. 5.6.

Va en la práctica se han utilizado electrodos de ace

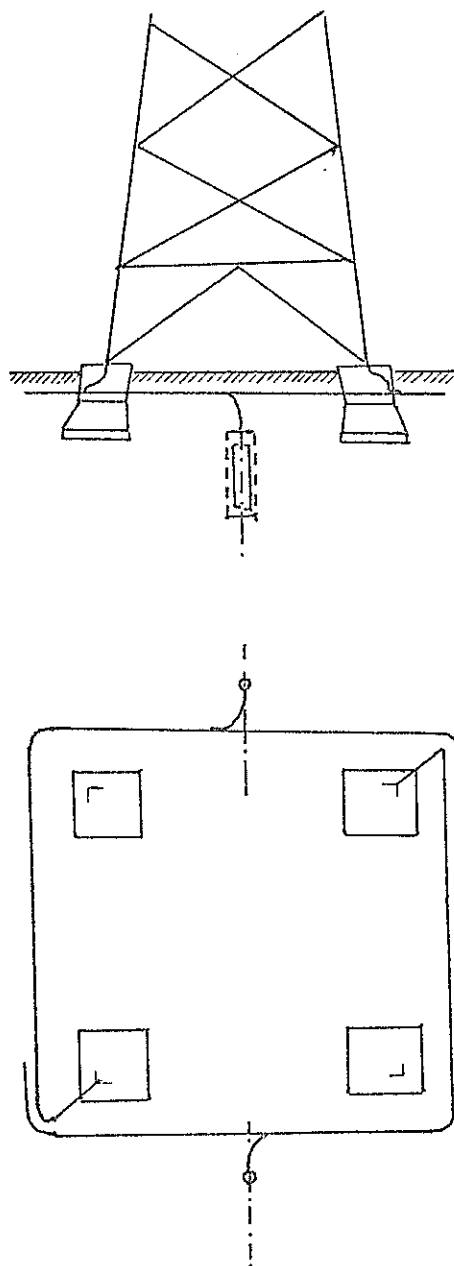


Fig.5.6 PUESTA A TIERRA DE UNA ESTRUCTURA DE ALTA TENSION CON LA UTILIZACION DE ELECTRODOS DE ACERO GALVANIZADO PERO APLICANDOSE UNA PROTECCION CATODICA GALVANICA.

no galvanizado en lugar de los de cobre, pero éste es de un tiempo de vida menor, por lo que existe un método que duplicaría este valor, el cual es por medio de la utilización de lo que conocemos como protección catódica galvánica.

5.6 TOMA EQUILIBRADA DE TIERRAS

Consiste en conductores horizontales localizados en el suelo de una profundidad de 1 a 3 pies y sujetos a la base de la torre. Los conductores pueden ser continuo de torre a torre y paralelo a los conductores de línea, o del tipo radial, es decir formados por conductores que irradian desde la base de la torre.

Cuatro son los principales efectos que se reconocen en una toma equilibrada de tierra a saber :

- a) Impedancia de descarga inicial
- b) Resistencia de escape final
- c) Transición desde la impedancia inicial a la final
- d) Acoplamiento con el conductor de tierra y con los conductores de línea.

Además, tanto pruebas como cálculos han enseñado que la descarga en una toma equilibrada de tierra es predominantemente una onda viajera cuya velocidad está

alrededor de $1/3$ de la velocidad de la luz, esto es la velocidad inferior a la de la descarga en los conductores aéreos de tierra.

Múltiples experiencias y cálculos llevan a la siguiente conclusión :

Para los primeros cientos de metros de longitud del conductor de la toma de tierra equilibrada se obtiene la mayor ganancia con la disminución de la resistencia de tierra.

Como un incremento de la longitud de aquel conductor; y a manera de colorario para esto :

"Conductores de 60 a 100 mts son más convenientes que aquellos más largos". Si bien es posible de consideraciones técnicas encontrar la conductancia de fuga "G" en términos de la resistividad del suelo asumiendo un medio homogéneo, es más práctico y más satisfactorio encontrar por mediciones directas en el campo para las que hay que tener mucho cuidado por las variaciones que en un mismo día, y aún más de estación a estación existen.

La ventaja de usar conductores no muy largos, se ve en Fig. 5.7, dada por Bewley y nótese que el uso de tres a cuatro conductores radiales de 60 a 100 me-

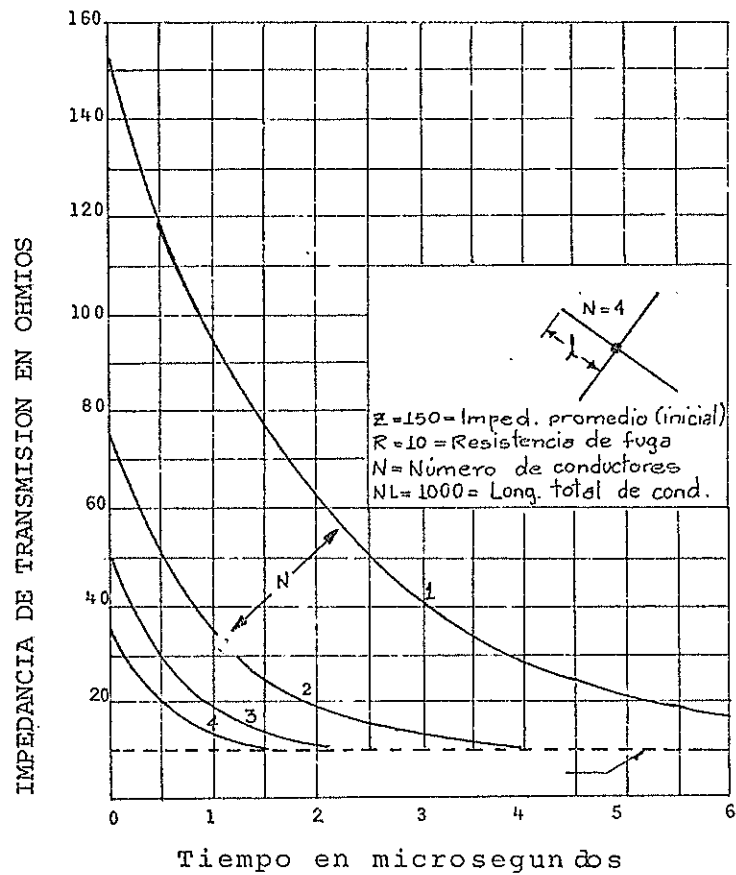


Fig. 5.7 EFECTO DEL NUMERO DE CABLES SOBRE LA IMPEDANCIA DE CONTRAPESO
 IMPEDANCIA DE 1000 PIES DE ALAMBRE EN UNA LONGITUD Y EN DOS,
 TRES Y CUATRO PEDAZOS UNAS PEQUEÑAS.

tros de longitud dan excelentes resultados.

De estos resultados y otros obtenidos de un análisis que involucra tanto ondas multiveloces con reflexiones, Bewley afirma lo siguiente :

- a) Ondas multiveloces existen en el conductor que constituye la toma equilibrada de tierra, pero la única de importancia es una que viaja a $1/3$ la velocidad de la luz, por lo que las reflexiones pueden calcularse en esa base.
 - b) Debido a la disposición a tierra, la corriente en el conductor decae rápidamente y el frente de la onda de descarga que avanza rápidamente y grandemente, por lo que el acoplamiento con los conductores aéreos de tierra desaparece en puntos situados a pocas decenas rara vez cientos de metros del pie de la torre.
 - c) El acoplamiento con el conductor aéreo de tierra depende primordialmente de la posición de imágenes de corriente y no mayormente de las relaciones de capacitancia. Cuanto más alta es la resistividad del suelo y más bajo el nivel freático, más baja está localizada la imagen de la corriente y más grande el acoplamiento.
-

- d) Tomas equilibradas de tierra de más de 60 a 100 metros no son ejecutables.
- e) Es posible usar conductores dispuestos verticalmente, pero la pequeña ventaja que se obtiene, no justifica las dificultades inherentes al montaje.

5.7 EL ARCO ELECTRICO

Cuando se trata de abrir un circuito eléctrico, entre los dos electrodos que se separan aparece un arco eléctrico que mantiene la continuidad del circuito y permite que siga circulando una corriente.

Este arco está constituido por electrones y gas ionizado a temperatura muy altas (2500 a 1000°C). El arco es, por lo tanto un conductor gaseoso; al contrario que en los conductores metálicos ordinarios, la caída de potencial a través del arco varía en proporción inversa a la intensidad de la corriente.

En efecto, si se aplica una diferencia de potencial entre dos electrodos, se comprueba que el arco se inicia para un valor determinado V_0 . Si se hace aumentar la intensidad de la corriente, la caída de potencial a través del arco disminuye: El arco más caliente y más ionizado, ofrece una resistencia menor

al paso de la corriente. Si la intensidad de corriente decrece, la característica caída de potencial-intensidad de corriente pasa por debajo de la característica que se obtiene al aumentar la corriente y se extingue para una diferencia de potencial entre los electrodos $V_1 < V_0$ (véase Fig. 5.8).

La diferencia de potencial entre los extremos de un arco recorrido por una corriente sinusoidal, para una distancia entre electrodos constante, tiene la forma que se indica en la Fig. 5.9.

5.7.1 INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE ALTERNA

Desde el punto de vista de su interrupción, la corriente alterna presenta una gran ventaja sobre la corriente continua: La corriente pasa por cero cien veces por segundo si la frecuencia del sistema es 50 ciclos o 120 veces si la frecuencia es 60 ciclos.

Esta característica se aprovecha para facilitar la interrupción de la corriente.

Para ver como se realiza la interrupción de la corriente, supongamos que tenemos un circuito como el que se indica en la Fig. 5.10;

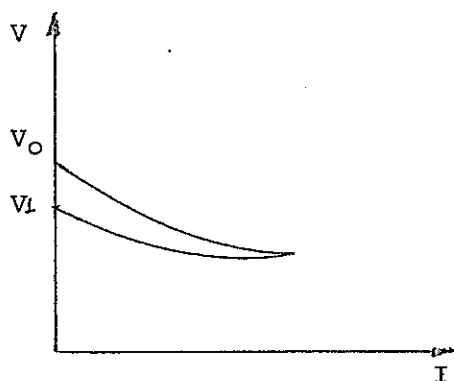


Fig.5.8 CAIDA DE POTENCIAL A TRAVES DE UN ARCO ELECTRICO EN FUNCION DE LA INTENSIDAD DE CORRIENTE.

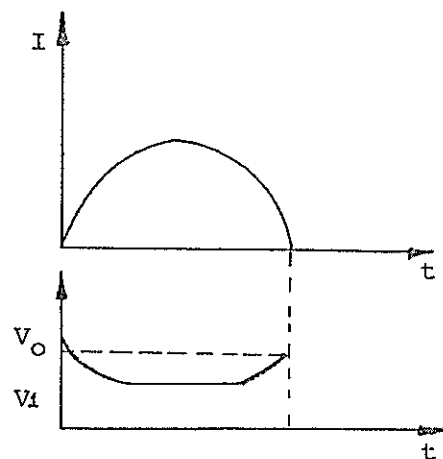


Fig.5.9 ARCO ELECTRICO DEBIDO A UNA CORRIENTE ALTERNA.

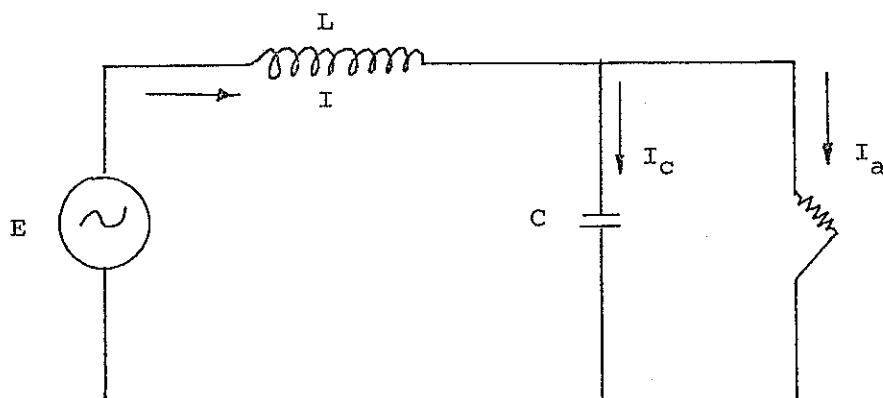


Fig. 5.10 CIRCUITO EQUIVALENTE PARA ILUSTRAR LA INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE ALTERNA.

compuesto por una fuerza electromotriz, una inductancia en serie y una capacidad en paralelo que nos puede representar, en forma muy simplificada un circuito real.

En el instante t_1 (véase Fig. 5.11) se inicia la separación de los contactos del interruptor. Aparece un arco eléctrico entre los dos contactos, el cual mantiene la circulación de la corriente en el circuito.

La corriente total proporcionada por el generador se divide entre el arco y el condensador. En un principio la caída de voltaje a través del arco es muy pequeña, el voltaje aplicado al condensador es muy pequeño y éste toma muy poca corriente. A medida que la caída de voltaje a través del arco aumenta, la corriente en el condensador aumenta y por lo tanto la corriente que atraviesa el arco disminuye.

Llega un momento en que, bajo la acción de los agentes de ionizantes, el arco se interrumpe, un poco antes del paso natural de la corriente por cero. El voltaje aplicado al condensador aumenta bruscamente y se produce una

oscilación del circuito LC que se amortigua más o menos rápidamente según la resistencia del circuito.

El voltaje aplicado entre los contactos aumenta primero hasta el punto P, llamado punto de extinción, cuya magnitud depende de la energía electromagnética :

$$\frac{1}{2} L i_1^2 = \frac{1}{2} C V_e^2 \quad V_e = i_1 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

siendo i_1 el valor de la corriente en el condensador en el momento de interrumpirse el arco. El voltaje oscila alrededor del valor de cresta del voltaje del generador que está adelantado 90° con respecto a la corriente del generador.

Al voltaje sinusoidal producido por el generador se superpone, pues, una oscilación de voltaje a la frecuencia natural del sistema

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Este voltaje transitorio, llamado voltaje de recuperación, puede alcanzar prácticamente un máximo teórico de dos veces el valor de cres-

ta del voltaje sinusoidal producido por el generador como ya se vió. En un circuito real esta oscilación es amortiguada por la resistencia del circuito. Si la rigidez dieléctrica R_d del medio que está entre los contactos que se están separando es mayor que el voltaje que aparece entre los contactos, el circuito queda abierto definitivamente. Si la rigidez dieléctrica no es suficiente para soportar el voltaje que aparece entre los contactos volverá a establecerse el arco (Fig.5.11).

Por lo tanto vemos que el interruptor debe realizar dos funciones para poder interrumpir un circuito :

- a) Debe ser capaz de disipar la energía producida por el arco que es igual a

$$\int_{t_1}^{t_2} V_a \cdot i_a \, dt \quad \text{sin que se dañe el interruptor}$$

- b) Debe ser capaz de restablecer muy rápidamente la rigidez dieléctrica del medio comprendido entre los contactos una vez que se ha extinguido el arco, o sea que la curva R_d , que representa la regeneración de la rigidez dieléctrica del medio entre los

I = corriente total proporcionada por el generador

i_a = corriente a través del arco

i_c = corriente a través del condensador

$$I = i_a + i_c$$

$$V_e = i_1 \sqrt{\frac{L}{C}}$$

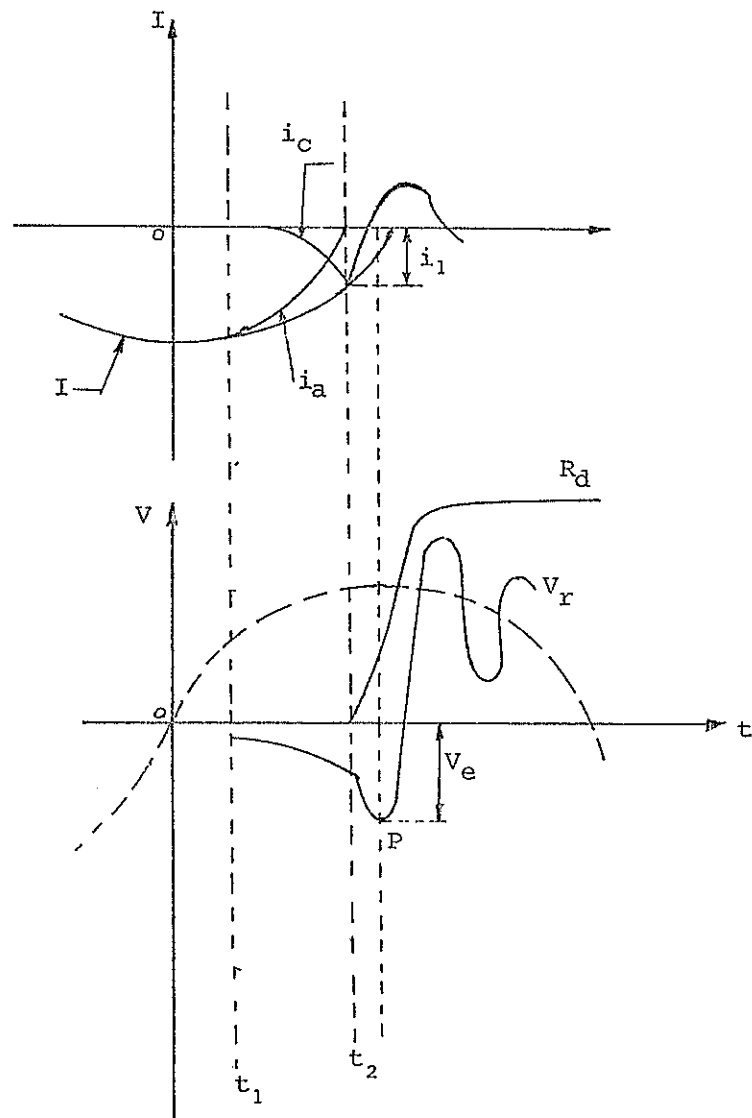


Fig. 5.11

INTERRUPCION DE UNA CORRIENTE ALTERNA

t_1 - se inicia la separación de los contactos

t_2 - el arco se interrumpe

contactos en función del tiempo, quede en todo momento por encima del voltaje de recuperación.

5.7.2 INFLUENCIA DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL CIRCUITO INTERRUPTIDO SOBRE EL VOLTAJE DE RESTABLECIMIENTO.

El voltaje de restablecimiento depende fundamentalmente de las características del circuito interrumpido. Su amplitud y su frecuencia tienen una influencia fundamental en el comportamiento del interruptor.

Podemos caracterizar el voltaje de restablecimiento mediante tres magnitudes :

- 1) La amplitud de la onda fundamental de voltaje.
 - 2) La frecuencia propia o natural f_0 de la oscilación libre del circuito LC.
 - 3) La amplitud de la oscilación natural que podemos caracterizar mediante un factor S definido como el cociente del valor de cresta del voltaje de restablecimiento y el valor de cresta de la onda fundamental.
-

Examinemos rápidamente estos tres factores :

-Amplitud de la onda fundamental : Depende del tipo de falla y del estado del neutro, ya sea que esté aislado, conectado sólidamente a tierra o conectado a través de una impedancia.

-Factor de amplitud de voltaje de restablecimiento : Veíamos que la amplitud puede expresarse por la expresión :

$$V_R = SE\sqrt{2}$$

donde:

S : factor de amplitud

E : valor eficaz de la onda fundamental 50 ciclos.

Téoricamente puede alcanzar el valor de 2; en la práctica no puede exceder de 1.5.

FRECUENCIA NATURAL :

La frecuencia natural de la oscilación varía mucho según los tipos de circuito. Es más alta en circuito de voltajes bajos, pudiendo alcanzar valores del orden de 3000 ciclos por segundos y más baja en circuitos de voltajes altos, pudiendo tener en este segundo caso valores del orden de 400 ciclos por segundo.

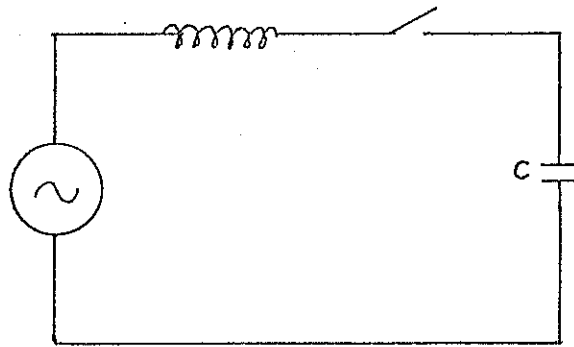
La frecuencia natural del sistema determina la velocidad de recuperación de voltaje en el momento en que se interrumpe el arco, esta velocidad de recuperación, que es un parámetro muy importante en el funcionamiento de ciertos tipos de interruptores, puede caracterizarse por la velocidad media de restablecimiento del voltaje o sea por el voltaje máximo $SE\sqrt{2}$ dividido por el tiempo $\frac{1}{2f_0}$ o sea medio ciclo.

$$\frac{d_v}{d_t} = 2 SE f_0 \sqrt{2} \text{ en Kv máximo}/\mu \text{ seg.}$$

5.7.3 DESCONEXION DE LINEAS EN VACIO

Una línea en vacío constituye un circuito preponderantemente capacitivo. Podemos representar su interrupción por el circuito simplificado de la Fig. 5.12a.

La corriente capacitiva de la línea que se va a interrumpir es de poca intensidad y está adelantada prácticamente 90° con respecto al voltaje, de manera que cuando la corriente pasa por cero el voltaje tiene su valor máximo Fig. 5.12b.



a

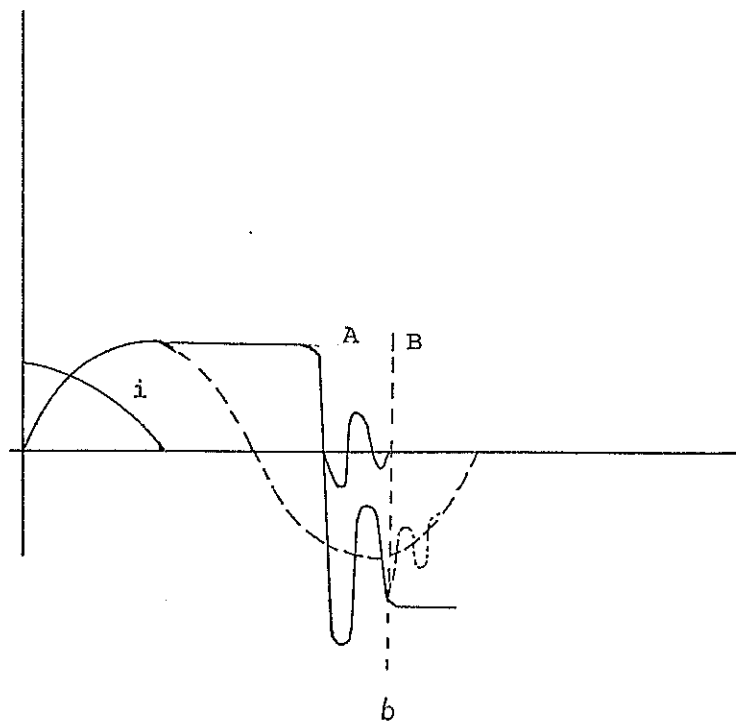


Fig. 5.12 INTERRUPCION DE UN CIRCUITO CAPACITIVO.

La capacitancia de la línea causa que al extinguirse el arco la línea quede cargada a este voltaje máximo. El voltaje del sistema del otro lado del interruptor, sigue variando en forma sinusoidal de manera que al cabo de un semiciclo la diferencia de voltaje aplicada entre los contactos del interruptor llegará a valer $2V\sqrt{2}$ y este aumento de voltaje aplicado entre los contactos puede exceder la rigidez dieléctrica del medio y producir, por ejemplo en el instante A, una reignición.

El arco vuelve a establecerse y la energía de esta carga capacitiva se descarga sobre el sistema produciendo una oscilación de voltaje y de corriente de alta frecuencia, determinada por la capacitancia de la línea y la inductancia del sistema.

La corriente puede interrumpirse en uno de los pasos por cero, por ejemplo en el instante B y la línea queda entonces cargada al voltaje que existía en ese momento, que es más elevado que el precedente. Este fenómeno puede repetirse varias veces y causar sobrevoltajes muy elevados.

CAPITULO VI

PROTECCION POR CONDUCTORES AEREOS DE TIERRA

6.1 GENERALIDADES SOBRE LOS CONDUCTORES A TIERRA

Los conductores a tierra son conductores colocados generalmente sobre los conductores de fase y conectados a tierra en cada estructura de apoyo. Hasta unos años atrás y debido seguramente a los pocos datos que sobre la teoría de descargas atmosféricas se tenía, los conductores aéreos de tierra se establecían primordialmente protección contra descargas inducidas, sólo a partir del año 1920, se empieza a reconocer que el principal causante de daños en las líneas es el choque de descargas directas en ellas, estableciéndose entonces, como la función principal de los conductores aéreos de tierra la de proteger las líneas de descargas directas, evitando que estas descargas lleguen a los conductores de fase conduciéndolas a tierra.

Los requerimientos en general que deben tener los conductores aéreos de tierra son :

- a) Estar localizados en forma adecuada respecto a los conductores de línea a fin de interceptar las descargas directas, esto es "hacer de pantalla".
-

- b) La resistencia al pie de la torre debe ser lo suficientemente baja, a fin de que el efecto producido por esto, sumando el efecto producido por un favorable factor de acoplamiento y por las reflexiones sucesivas, limiten el voltaje y eviten el contorneamiento en los aisladores de la torre.
- c) Adecuado espaciamiento con respecto a los conductores de fase para prevenir repentinos arcos contra ellos durante el tiempo requerido para que las ondas de reflexión a la mitad del vano arriben desde la torre.

En este capítulo sólo se contemplará las dos funciones principales de los conductores aéreos de tierra. Interceptar la descarga directa y conducir la corriente a tierra evitando la formación de tensiones excesivas en la torre o en el vano.

6.2 PROTECCION DE CAMPO : GENERALIDADES

El conductor aéreo de tierra debe colocarse tal que intercepte las descargas atmosféricas que, de no existir esta protección, descargarán sobre algunos de los conductores de línea.

El ángulo de protección proporcionado por un cable

de tierra está definido como el ángulo entre una línea vertical a través de un alambre de tierra y una línea inclinada que conecta el cable de tierra y la fase del conductor a ser protegido, ese es el ángulo α (véase Fig. 6.1).

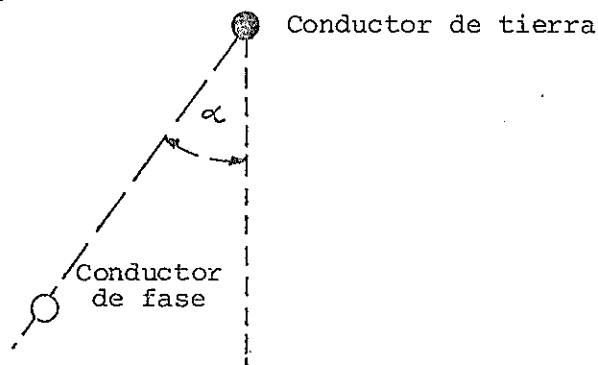


Fig. 6.1 Diagrama que muestra el ángulo relativo α de un cable a tierra aéreo.

ZONA DE PROTECCION.- Se define como el volumen entre la base plana "cbc" y los planos inclinados ac, extendido desde el cable a tierra hasta el plano de los conductores (Fig. 6.2). Además tenemos la relación de protección que es $Ky/y = K$.

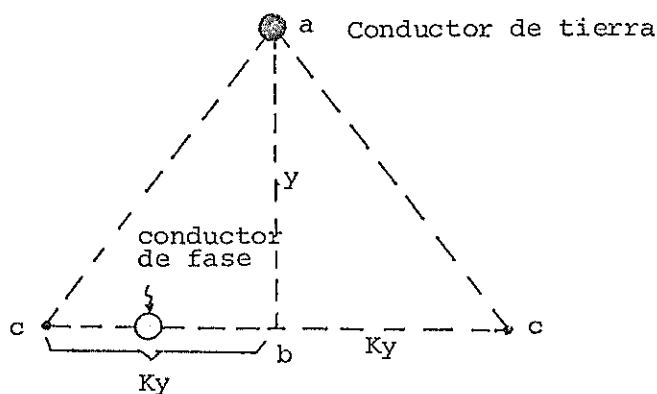


Fig. 6.2 Zona de protección de un cable a tierra

La razón de protección algunas veces es llamada superficie de protección o cubierta de protección.

Basados en estos criterios, trabajos múltiples han realizado ciertos investigadores durante muchos años para establecer el más adecuado ángulo de protección, ellos tenían además en cuenta la necesidad de un espaciamiento de los conductores tal que no haya contorneamiento a la mitad del vano.

Luego investigaciones como las que de inmediato se relatarán y han dado nuevo rumbo a la técnica de protección. Todos los trabajos, llámesen iniciales, condujeron a una práctica común, diseñar las líneas con ángulos de protección, comprendidos en los rangos de 20 a 45 grados.

De entre las investigaciones que por los resultados que obtuvieron, merecen más consideración están :

Las de Wagner, McCann y Lear, quienes dan un gráfico reproducido en la Fig. 6.3, que enseña los efectos del conductor de tierra sobre la localización del conductor de línea, y otros (véase Fig. 6.4), en que dan las distancias recomendadas entre dos conductores de tierra en función de la altura a la que se encuentra el conductor de línea y la distancia verti-

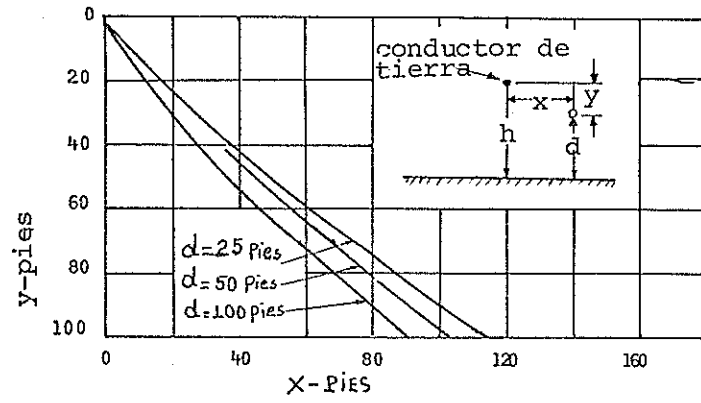


Fig. 6.3

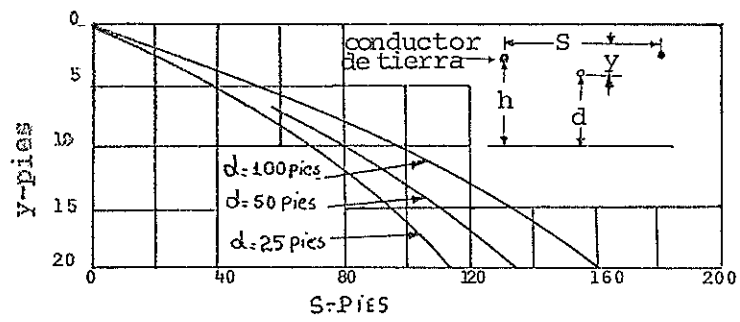


Fig. 6.4

cal entre conductores de tierra y línea.

6.3 PROTECCION DEL CAMPO : METODO DE PEEK

El cable de tierra debe colocarse en forma tal que intercepte cualquier rayo que, de no existir esta protección, descargara sobre algunos de los conductores de línea.

Peek establece que el efecto de pantalla de un cable de tierra depende de la distancia en dirección vertical existente entre él y el conductor protegido, y la distancia entre sus proyecciones sobre el plano horizontal. Si la distancia entre estas proyecciones es x y la altura del conductor de línea es y , el conductor de protección debe tener una altura superior a h , se supone que la altura de la nube es H , y pueden obtenerse de la Fig. 6.5 o calcularse mediante la expresión.

$$\frac{x}{H} = \{2(y/H) - (y/H)^2\}^{1/2} - \{2(h/H) - (h/H)^2\}^{1/2} \quad (6.1)$$

donde:

x : distancia horizontal entre conductor de fase y conductor de tierra.

H : altura de descarga (nube) 1000 pies o más según los lugares.

h : altura del conductor de tierra

y : altura a la que se puede tener protección.

Tanto las curvas como la ecuación anterior dan para " y " y " h " el mismo valor. Peek sugiere que el valor de " h " obtenido debería incrementarse en un 10%. Aun cuando el conductor de tierra esté colocado directamente sobre el conductor de línea más exterior, no puede asegurarse que éste nunca será alcanzado por el rayo.

Para Peek todos los puntos sobre un arco de circunferencia de radio " H " y centro "la nube" tienen igual probabilidad de ser golpeados, pensamiento que se aclara en la Fig. 6.6, en donde si " r " igual a " H ", se tendrá lo que Bewley llama "Distancia crítica" es decir el " D " de la Fig. 6.6.

Esta "distancia crítica" es de verdad el "ancho de corte", dándose en la Fig. 6.7 en función de la altura de la nube para diferentes valores de altura de la torre o para decirlo en mejor forma, altura del conductor de tierra.

6.4 DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES DE FASE Y CONDUCTORES DE TIERRA.

En base al ángulo de apantallamiento el cual es de un valor aproximado de 30° utilizado para el caso de di-

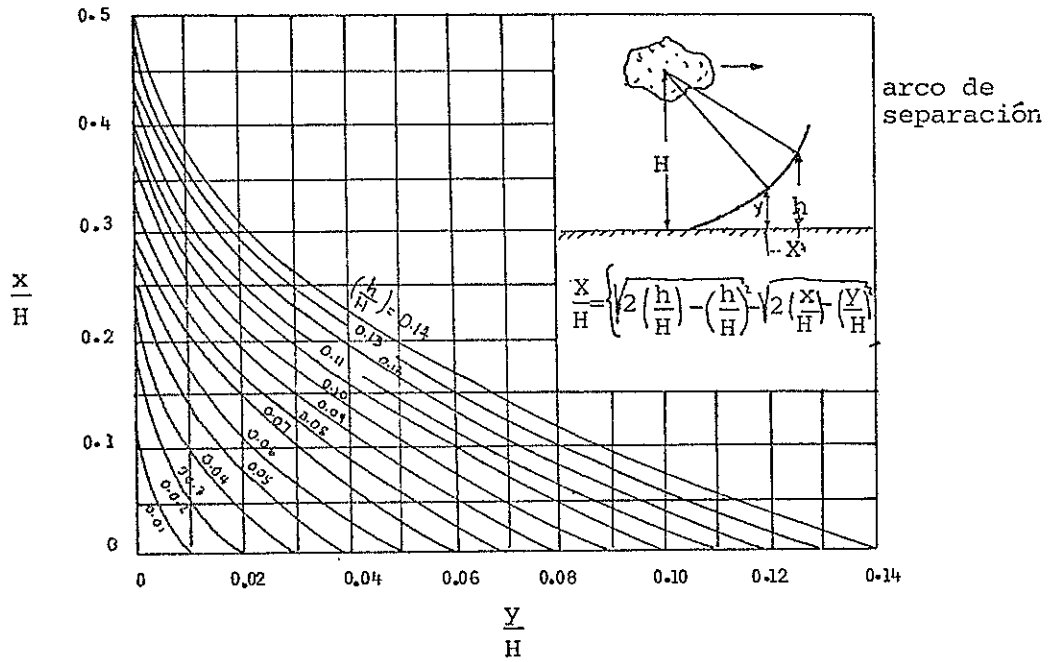


Fig. 6.5

Curvas que nos permiten encontrar la altura del hilo de guarda en una torre.

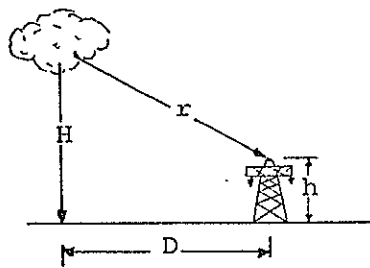


Fig. 6.6

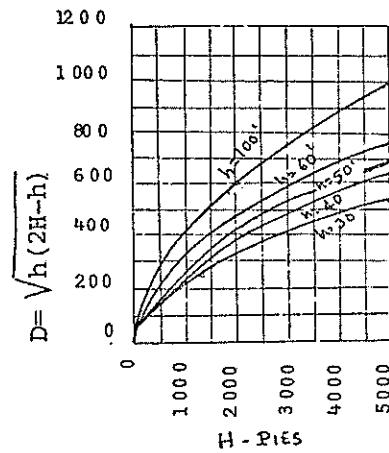


Fig. 6.7

seños preliminares. La distancia mínima entre el conductor y el cable de tierra debe ser determinado tanto en la estructura como en el centro del vano.

En la estructura, la distancia mínima entre el conductor y el cable de tierra quedará determinada por la siguiente expresión :

$$D_{mct} = \frac{G}{\operatorname{tg} \alpha} \text{ (m)} \quad (6.2)$$

$$G = D_{mfi} + L_{ca} \cdot \operatorname{Sen} \alpha + K \text{ (m)} \quad (6.3)$$

donde:

D_{mct} : distancia mínima posible entre el conductor y el cable de tierra (m).

G : distancia en aire entre la estructura y el conductor en posición normal (no desviado por el viento) m.

D_{mfi} : espaciamiento en aire mínimo a la estructura requerida por sobrevoltaje a frecuencia industrial ($^{\circ}$).

K : constante "m" que representa un margen de seguridad entre la distancia mínima entre el conductor y la estructura.

Dentro de las demás precauciones que deben tenerse en la aplicación de las distancias mínimas en la estructura, podemos señalar que las estructuras deben

siempre estar despejadas a su alrededor de árboles o cualquier tipo de obstáculos que puedan dar lugar a producir arcos: en igual forma, las estructuras, deberán quedar situadas siempre en lugares accesibles con el fin de facilitar una buena y periódica manten
ción de la aislación y de la línea en general.

La fórmula (6.2) y (6.3) se obtienen de la Fig. 6.8 y Fig. 6.9.

El cable de tierra debe ser tendido con una flecha menor que la de los conductores, para asegurar de es
te modo una separación adecuada en el centro del tra
mo.

La flecha con que deben tenderse los cables de tierra será de un 90% de la flecha de los conductores.

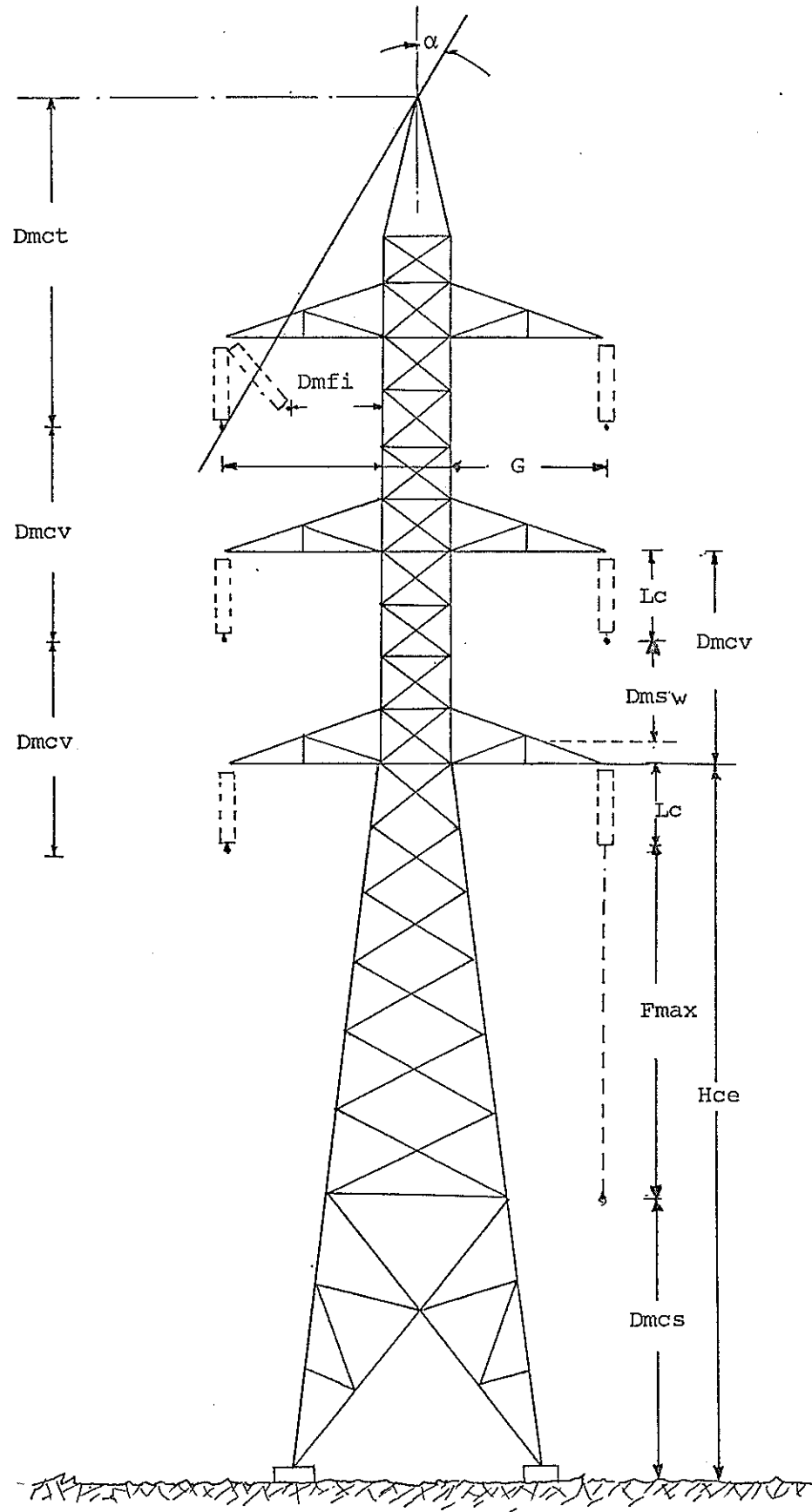


Fig.6.8. DIMENSIONES BASICAS DE LAS ESTRUCTURAS CON CIRCUITOS ARREGLADOS VERTICALMENTE.

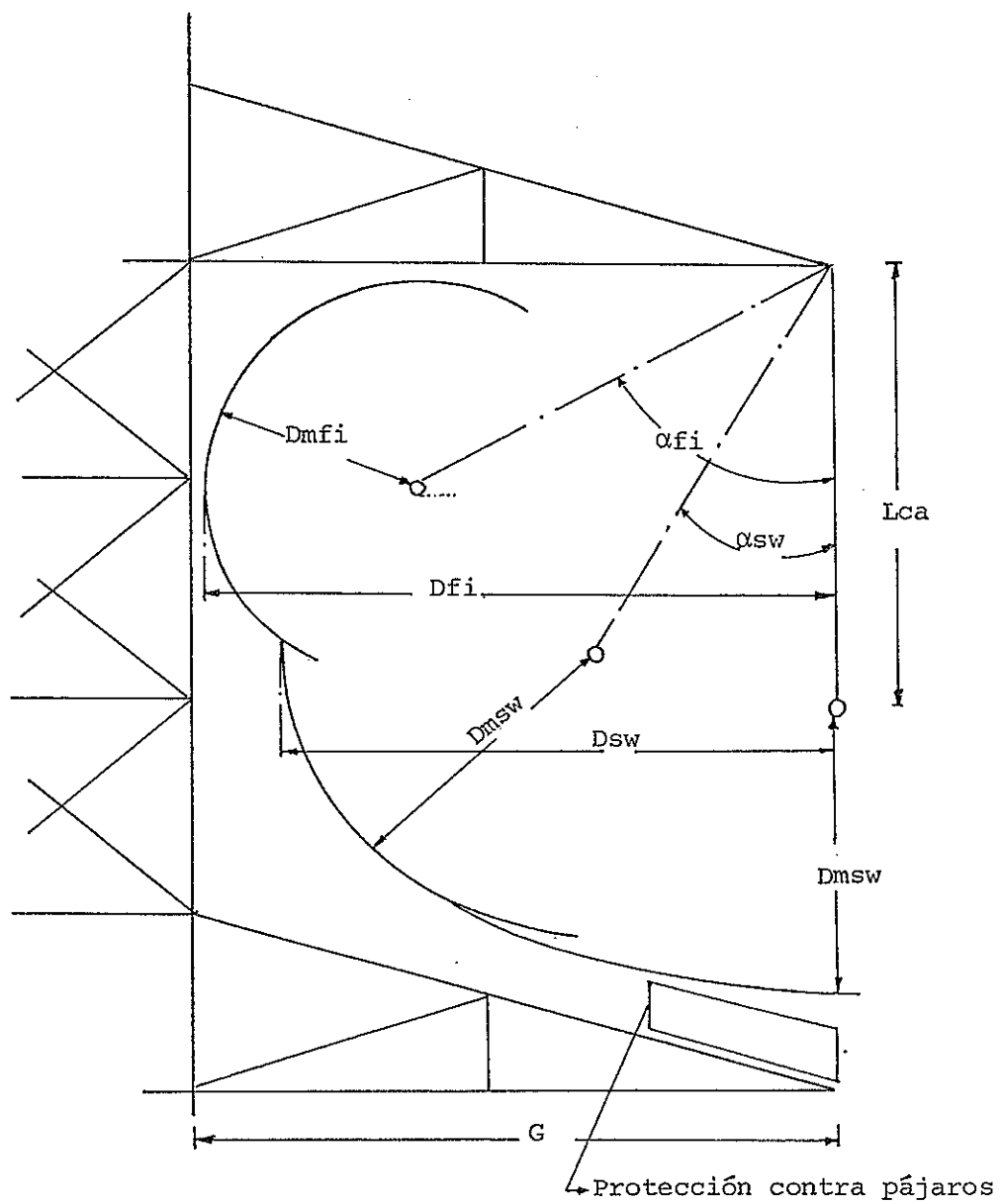


Fig.6.9 DISTANCIAS ELECTRICAS EN LA ESTRUCTURA

CAPITULO VII

PROCEDIMIENTO GENERAL PARA SOLICITACIONES DE LA AISLACION DE UNA LINEA DE TRANSMISION DE 138 KV

7.1 SOBREVOLTAJE A FRECUENCIA NOMINAL DE TRANSMISION

El sobrevoltaje a ser requerido por la aislación se considerará con un valor igual a 1.43 veces el voltaje nominal a tierra. El valor mínimo para diseño será de 114 KV rms entre fase y tierra.

La aislación de la estructura se calculará de modo que la línea tenga un 97% de probabilidad de resistir este sobrevoltaje a la altura máxima de la línea sobre el nivel del mar y considerando la disminución de su capacidad de resistir debido al efecto del número total de elementos de aislación en paralelo correspondiente a la línea.

La cadena de aisladores deberán resistir este sobrevoltaje bajo lluvia, considerando un valor para la desviación normal igual al 5% del voltaje crítico. El espaciamiento en aire lo deberá resistir en la condición en seco, con un valor para la desviación normal igual al 3% del voltaje crítico.

7.2 SOBREVOLTAJE DE MANIOBRA

$$V_{st} = K_T \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} V_L$$

Los sobrevoltajes transientes o por maniobras suceden cuando existen variaciones bruscas en el interior de un sistema eléctrico en operación, ya sea por falla o por maniobras de desconexión.

Los sobrevoltajes a ser resistidos por la aislación serán los siguientes expresado en "por unidad" del valor de cresta del voltaje nominal a tierra.

LINEA DE TRANSMISION DE 138 KV
MAXIMO SOBREVOLTAJE POR MANIOBRAS

PRUEBA	ENERGIZADA		RECONNECTADA	
	1	2	1	2
Zona				
KT	2.23	2.19	4.03	3.54

KT= Valor transiente que nos dá el número de veces del voltaje de línea a tierra.

Estos datos obtenidos que se calcularon en el analizador de redes transientes de la General Electric Company, en Schunectay N.Y., desarrollados por W.S. Price, valores que se obtuvieron por encargo del Instituto Ecuatoriano de Electrificación (INECEL) a

dicha compañía, y que los utiliza para sus cálculos.

Los valores mínimos para diseño, expresado en KV va lon cresta fase a tierra serán los siguientes:

ZONA 1	ZONA 2
455 KV	399 KV

La aislación de la estructura se calculará de modo que las líneas tengan las siguientes probabilidades de resistir el correspondiente sobrevoltaje, bajo lluvia y a la altura máxima de la línea sobre el ni vel del mar y considerando la disminución de su capacidad de resistir debido a los efectos del número total de elementos de aislación en paralelo correspondiente a la línea y de la proximidad a la estruc tura respectivamente.

PROBABILIDAD DE RESISTIR	POSICION DE LA CADENA DE AISLADORES
97.7%	Sin efecto de viento en conductores
84.0%	Con efecto de viento en conductores

El valor de la desviación normal se tomará igual al 5% del voltaje crítico y se considerará que la lluvia disminuye a este último en 5%.

7.3 SOBREVOLTAJES DE ORIGEN ATMOSFERICO

Se aceptará un total de 0.625 fallas anuales por circuito trifásico y por 100 Km de longitud de línea ó 1.0 fallas por 100 millas, incluyendo las fallas por "back flashover" y las de protección de los cables de guardia. Se considerará que las líneas estarán provistas de un sistema de reconexión automática que asegurará a lo menos un 75% de reconexiones exitosas.

La aislación deberá resistir estos sobrevoltajes a la altura máxima de la línea sobre el nivel del mar.

Se supondrán los siguientes niveles cerámicos máximos :

ZONA 1	30	(Costa)
ZONA 2	50	(Sierra)

7.4 CONTAMINACION ATMOSFERICA

Las clases de contaminación a considerar y las distancias de fuga mínima unitarias requeridas por las cadenas de aisladores y expresadas en mm/KV, valor efectivo fase a tierra correspondiente al voltaje máximo permanente, son los siguientes :

	ZONA 1	ZONA 1	ZONA 2
	Subzona a	Subzona b	
Clase de contaminación	C	entre B y C	B
Distancia de fuga mínima unitaria (mm/Kv)	33.3	29.8	26.4

Se considerarán comprendidos en la subzona a de la zona 1, todos los trazados de líneas que queden a menos de 30 Km de la costa, así como también aquellos que, quedando a una mayor distancia de la costa pasen por terrenos secos, con polvo seco y sin vegetación, por zonas con carencia de lluvias o por las cercanías de zonas industriales. En la subzona b se considerará comprendido el resto de los trazados.

CLASE B (Poca contaminación)

Zonas de grandes industrias, cruce por las vías de ferrocarriles y zonas de frecuentes lluvias.

CLASE C (Contaminación moderada)

Manifestada en las zonas cercanas al mar existiendo un 5% de contenido de sales solubles, polvos de plantas metalúrgicas, polvo de minas, polvo de fertilizantes en pequeñas cantidades.

7.5 CONDICIONES METEOROLÓGICAS

La determinación del voltaje crítico de la aislación

a distintas alturas sobre el nivel del mar se realizará de acuerdo a :

$$V_c = V_s * \frac{d}{H}$$

donde :

V_c : Voltaje crítico a cierta altitud, Kv

V_s : Voltaje crítico en condiciones meteorológicas normales y a nivel del mar, Kv

d : Densidad relativa del aire

H : Factor de corrección por humedad

Los valores de d , H , y d/H a considerar serán los siguientes :

ALTITUD m	d	H	d/H
0	1.00	0.95	1.052
300	0.965	0.95	1.016
600	0.930	0.95	0.979
1000	0.886	0.95	0.933
1500	0.835	0.95	0.88
2000	0.799	0.95	0.84
2500	0.751	0.95	0.79
3000	0.705	0.95	0.74
3500	0.658	0.95	0.69

7.6 AISLACION EN LA ESTRUCTURA

La aislación deberá resistir las sollicitaciones indicadas en el Capítulo I, sección 1.2, y además en las condiciones señaladas para cada sollicitación hasta a qul vista en este capítulo.

7.7 DISTANCIAS MINIMAS A LA ESTRUCTURA

- a) Las distancias mínimas a la estructura deberán cumplirse entre los conductores y todos los elementos fijados a ellos, y la estructura u otros elementos conectados a tierra.

Para la aplicación de las distancias mínimas debe rá considerarse la posición de la cadena de aisla dores indicada para cada sollicitación.

- b) Al calcular el ángulo de desviación de la cadena de aisladores deberá sumarse al efecto del viento sobre los conductores el efecto de ángulo de la línea al cual se lo considerará que en cualquier estructura la línea tiene un ángulo mínimo de un grado. No se considerará el efecto del viento ni el peso de los aisladores para el cálculo del ángulo de desviación de la cadena.

- c) La distancia mínima por sobrevoltajes a frecuencia industrial deberá cumplir con los requisitos de 7.1.

Para la aplicación de esta distancia se considera rán los conductores desviados por acción del viento de la presión máxima. Para los sobrevoltajes de maniobra se respetarán dos distancias mínimas que deberán cumplir con los requisitos de 7.2.

Para la cadena desviada sin considerar el efecto del viento sobre los conductores, la distancia en aire debe resistir el sobrevoltaje con una probabilidad de 97.7%.

Para la cadena desviada por efecto de una presión de viento igual al 20% de la presión máxima sobre los conductores, la distancia en aire debe resistir el sobrevoltaje con una probabilidad de 84%.

La distancia mínima por sobrevoltaje de origen atmosférico deberá tener un voltaje crítico igual al número de aisladores que cumplen con los requisitos 7.3.

Para la aplicación de esta distancia se considera rán los conductores desviados por acción de una

presión máxima. Se asumirá que el viento máximo produce una presión efectiva sobre la superficie diametral de los conductores de 39 Kg/m^2 .

7.8 PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS

a) CABLES DE GUARDIA

Se instalarán cables de guardia a lo largo de todas las líneas. El ángulo máximo de protección se elegirá de modo que limite a un valor aceptable el número de perturbaciones debidas a falla de protección de los cables de guardia en el caso de las descargas atmosféricas, el valor del ángulo de protección no podrá ser mayor que 30° .

b) CONEXION A TIERRA

Todas las estructuras deberán llevar una conexión a tierra por lo menos. Se podrán exceptuar solamente aquellas estructuras provistas de fundiciones metálicas tipo grilla.

El valor máximo de la resistencia óhmica de puesta a tierra R de las estructuras incluyendo su conexión a tierra deberá ser tal que, su combinación con la aislación en la estructura (número de aisladores y espaciamiento en aire) permita cum-

plir con el número de fallas admisibles por sobre voltajes de origen atmosférico indicado en 7.3.

Se deberá tener en cuenta que, al atravesar la línea zonas con distintos valores de resistividad del terreno, lo que significa que para un mismo diseño de puesta a tierra se obtengan distintos valores de resistencia R; o en el caso en que se conozca la distribución de los valores de R a lo largo de toda la línea, se deberá cumplir lo siguiente :

$$F = \frac{F_1 * L_1 + F_2 * L_2 + \dots + F_n * L_n}{L}$$

donde:

F : Número de fallas anuales por circuito y 100 Km debidas a "back flashovers"

F_n : Ident. a F, para aquel sector de la línea de longitud L_n, cuyo valor de la resistencia de puesta a tierra esté comprendido entre ciertos valores.

L : Longitud total de la línea, Km

L_n : Longitud de un sector de la línea, Km

La expresión anterior permite asumir que el valor máximo de la resistencia de puesta a tierra R, de terminado según los métodos de cálculo, corresponde a una especie de valor promedio para la línea,

pudiéndose aceptar sectores de ellas en que el valor de R sea mayor, siempre que se cumpla con el número prefijado de las fallas anuales F y tomando en cuenta que en otros sectores de la línea se pueden obtener menores valores de R.

En el suelo de alta resistividad donde, para tratar de obtener el valor de R, se recurre al empleo de contrapesos, éstos deberán disponerse como estrellas de cuatro puntas.

En todo caso el valor máximo admitido para la resistencia de puesta a tierra de una estructura tomada individualmente deberá ser tal que el número de fallas por sobrevoltajes atmosféricos sea inferior a 3 veces el número de fallas admisibles.

La conexión de la puesta a tierra se debiera dimensionar de modo que resista térmicamente la corriente máxima prevista para las descargas atmosféricas durante 0,001 seg. y la corriente máxima de cortocircuito fase tierra durante 0.1 seg.

7.9 AISLACION EN EL VANO

7.9.1 DISTANCIA ENTRE FASES

La distancia mínima admisible entre fases en

el centro del vano se deberá calcular, de acuerdo a la siguiente expresión :

$$Dv = K * \sqrt{fc + Lc} + \frac{Kv}{150 d}$$

donde :

Dv : separación entre conductores, m

K : 0.75 para reparación vertical

K : 0.65 para separación horizontal

fc : flecha final del conductor en metros, para la condición de transmisión de la potencia nominal máxima de la línea.

Lc : longitud de la cadena, m

d : densidad relativa del aire

7.9.2 DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES Y CABLES DE GUARDIA.

La distancia mínima admisible en el centro del vano será igual a la especificada en 7.9.1 para la distancia entre fases.

7.9.3 DISTANCIA HORIZONTAL ENTRE CABLES DE GUARDIA

La distancia mínima admisible en el centro del vano se deberá calcular, de acuerdo a la siguiente expresión :

$$D_h = 0.65 * f_{cg}$$

donde :

D_h : separación horizontal entre cables de guardia, (m)

f_{cg} : flecha final de cable de guardia en metros, correspondiente al vano máximo hacia cualquier lado de cada tipo de estructura. Esta flecha se calculará para una temperatura de 45°C en la zona 1 y 30°C en la zona 2.

7.9.4 DISTANCIAS MINIMAS DEL CONDUCTOR AL SUELO

Antes de dar los valores de las distancias mínimas del conductor al suelo, nos referiremos a la flecha máxima final de los conductores. Se considerarán dos condiciones que determinan las correspondientes flechas máximas finales de los conductores :

- Transmisión de la potencia nominal máxima de la línea.
- Transmisión de la potencia de emergencia de la línea.

Para la condición de transmisión de la potencia nominal máxima de la línea se considerará

la mayor de las flechas que resulten de las siguientes condiciones :

CONDICION 1	TEMPERATURA	PRESION DE VIENTO
Zona 1	60°C	sin viento
Zona 2	45°C	sin viento
CONDICION 2		
Zona 1	T_1 (*)	sin viento
Zona 2	T_2 (*)	sin viento

(*) Las temperaturas T_1 y T_2 corresponden a las calculadas para el conductor, considerando la transmisión de la potencia nominal máxima de la línea, un viento de 0.61 m/seg. (2ft/seg), efecto de sol, emisividad de 0.5, la cota máxima de la línea, y las siguientes temperaturas ambientes :

Zona 1	25°C	Zona 2	12°C
--------	------	--------	------

Para condición de transmisión de la potencia de emergencia de la línea se considerará la flecha que resulte para la siguiente condición :

	TEMPERATURA	PRESION DE VIENTO
Zona 1	T_3 (*)	sín viento
Zona 2	T_4 (*)	sín viento

(*) Las temperaturas T_3 y T_4 corresponden a las calculadas para el conductor suponiendo la transmisión de la potencia de emergencia de la línea, un viento de 0.61 m/seg. (2 ft/seg), efecto de sol, emisividad de 0.5, la cota máxima de la línea, y las siguientes temperaturas ambientes :

Zona 1	25°C	Zona 2	12°C
--------	------	--------	------

Las distancias mínimas admisibles serán las indicadas en la Tabla III del Capítulo I.

En la condición 1 estas distancias mínimas se deberán verificar considerando la flecha máxima final correspondiente a la condición de transmisión de la potencia nominal máxima de la línea, definida al comienzo de este punto, y para desviación de los conductores por efecto del viento en ángulo comprendido entre 0° y 10°.

En la condición 2 estas distancias mínimas se deberán verificar considerando la flecha máxi

ma final correspondiente a la condición de transmisión de la potencia de emergencia de la línea definida ya arriba.

Para la condición de conductores desviados por acción del viento en ángulos mayores que 10° se podrán aceptar distancias entre el conductor y el terreno inferiores a las indicadas, tomando en consideración el grado de accesibilidad de tales terrenos (Ejemplo: en el caso de acantilados o cerros con pendiente fuerte).

7.9.5 DISTANCIAS MINIMAS EN CRUCES CON LINEAS DE COMUNICACION O DE POTENCIA.

Las distancias verticales mínimas admisibles en cruces con líneas de comunicación o de potencia serán las indicadas a continuación :

TIPO DE CRUCE	DISTANCIA VERTICAL MINIMA
- con líneas de potencia hasta 15 Kv (*)	2.50 m
- con líneas de potencia mayores de 15 Kv y hasta 138 Kv (*)	3.20 m
- con líneas de 230 Kv (**)	3.70 m
- con líneas de comunicaciones (*)	3.30 m + 1.003 m por cada metro sobre 50 m en distancia desde el punto de cruce a la estructura más próxima de la línea de 138 Kv.

(*) En estos cruces la línea de 138 Kv deberá pasar por encima de la otra línea. Se deberá considerar que la línea inferior está a la temperatura ambiente y para la línea superior de 138 Kv, la flecha máxima final correspondiente a la condición de transmisión de la potencia de emergencia de la línea.

(**) En estos cruces la línea de 138 Kv deberá pasar por debajo de la línea de 230 Kv se deberá considerar para la línea de 230 Kv la flecha máxima final.

7.9.6 DISTANCIAS MINIMAS A OTRAS LINEAS DE TRANSMISION.

En el caso que el trazado de la línea corra

paralela al de otra línea ya existente deberá respetarse una distancia mínima entre los ejes de dichos trazados, tal que al dividirse el conductor de una de las líneas por acción del viento de presión igual al 50% de la máxima y considerando la flecha máxima final correspondiente a la condición de transmisión de la potencia nominal máxima de la línea. La separación entre dicho conductor y cualquier elemento de la otra línea sea mayor que:

Zona 1 \longrightarrow 2.0 m

Zona 2 \longrightarrow 3.0 m

7.10 CALCULO DE UNA LINEA DE TRANSMISION DE 138 KV

- CARACTERISTICAS GENERALES DE LA LINEA

Nivel de voltaje 138 Kv

Longitud de la línea 1.3455 m

Máxima caída permisible 5%

Potencia nominal 80 Mw

- TIPO DE CONDUCTOR Y SUS CARACTERISTICAS

Mallard 795 MCM

$W=1.84 \text{ Kg/m} = 6521 \text{ lb/mi}$

30 Alambre de aluminio

Tensión rotura (T_R)=17136.36

19 Alambre de acero

Kg

Diámetro: 1.14 pulg.

$H = 0.2 T_R = 3427.27 \text{ Kg}$

Corriente nominal :1010 A

$E = 9427.84 \text{ Kg/mm}^2$

$R_{DC} = 0.111 \text{ } \Omega/\text{mi}$ a 25° C

$\alpha = 18.03 * 10^{-6} \text{ (}^\circ\text{C)}^{-1}$

Area de aluminio = 0.6244 pulg²

Area de acero = 0.1424 pulg²

Area total = 494.71 mm²

$R_{AC} (\Omega/mi)$			
25°C	50°C	75°C	100°C
0.114	0.125	0.137	0.147

- CONDICIONES ATMOSFERICAS

ZONA 1

TEMPERATURA AMBIENTE °C			TEMPERATURA MAXIMA CONDUCTOR
MINIMA	NORMAL	MAXIMA	
5°	25°	45°	60°

JUPIJAPA :

$h = 300 \text{ m}$

$t = 25^\circ\text{C}$

CONTAMINACION: CLASE C

$b = 739.28 \text{ mm Hg}$

$\delta = 0.97$

$\delta_{\text{terreno}} = 4000\Omega - \text{cm}$

$$b = 25.4 \text{ antilog } \{1.47967 - 0.5232 \times 10^{-4} h\}$$

$$b = 739.28 \text{ mm Hg}$$

$$\delta = \frac{3.926b}{273 + t^{\circ}} = 0.97$$

-TIPO DE AISLADORES

standard 10" x 5 3/4" (254 mm * 146 mm)

$$Df_0 = 1.93 \text{ cm/Kv}$$

$$df = 29.21 \text{ cm.}$$

OTROS DATOS

$$\underline{t} \text{ frente de onda} = 1.5 \mu \text{ seg.}$$

$$R_{\text{terreno}} = 20 \Omega$$

$$Kv = 0.75$$

$$Kh = 0.65$$

ANGULO DE DESVIAC.. (VIENTO) $\alpha = 60^{\circ}$

HERRAJES = 30% L_c

$$l \text{ medio} = 350 \text{ m.}$$

ANGULO APANTALLAMIENTO $\beta = 30^{\circ}$

FACTOR DE HUMEDAD = 0.84 (en precipitación standard)

FACTOR DE LLUVIA = 0.715

$$K_T = 4.03 \text{ (Para L/T reconectada)}$$

$$K = 1.2$$

FACTOR DE SEGURIDAD = 5%

$K_f i = 1.43$ (para 138 Kv)

$e = 3.5$ m (para 132 Kv en zona de seg.)

-DISEÑO PRELIMINAR

CALCULO DE LONGITUD DE CADENA

$L_{cad} = C_a + H_e$ $C_a =$ longitud neta de cadena de aisladores

$H_e =$ herraje

Aisladores = 10 (en base a contaminación) $L_c = 10$ (146) (1.03)

$L_c = 1.9$ m

-CALCULO DE FLECHA MAXIMA

$$\delta N = \frac{wL^2}{8H}$$

$H = 20\%$ TR para una temperatura de 60°
(normas INECEL)

$$\delta N = \frac{(1.84) (350)^2}{(8) (3427,27)}$$

-CALCULO DE LA DISTANCIA ENTRE CONDUCTORES

$$D_v = K \sqrt{\delta N + L_c} + \frac{K_v}{150\delta} \quad (m) \quad K = 0.75$$

$$D_v = 0.75 \sqrt{8.22 + 1.9} + \frac{138}{150 (0.97)}$$

$$D_v = 3.33 \text{ m}$$

$$D_h = K_h \sqrt{\delta N + L_c} + \frac{K_v}{150\delta}$$

$$Dh = 0.65 \sqrt{822 + 1.9} + \frac{138}{150 (0.97)}$$

$$Dh = 3.02 \text{ m}$$

$$Do = \frac{Kv}{150 \delta} = \frac{138}{150 (0.97)} \quad Do = 0.95$$

Do = radio de separación para protección del conductor con respecto a la torre y a la cruceta que sostiene a los aisladores.

-CALCULO DE LA LONGITUD DE CRUCETA

$$G = Lc \text{ Sen} \alpha + Do$$

$$G = 1.9 \text{ Sen } 60^\circ + 0.95$$

$$G = 2.60 \text{ m}$$

-SEPARACION DEL CONDUCTOR A LA CRUCETA INFERIOR

$$A = Lc + Do + 0.5 \quad A = 1.9 + 0.95 + 0.5$$

$$A = 3.35 \text{ m}$$

$$Ds = \frac{N+1}{2} = \frac{11+1}{2} \text{ pies} \quad Ds = 1.68 \text{ m}$$

$$Ds = \frac{\text{Número de aisladores} + 1}{2}$$

Para L/T 138 Kv S= 1m. S= ancho de la estructura

$Dtc = 2 Ds \quad Dtc = 3.36\text{m}$ Dtc = separación mínima del hilo de guardia al conductor.

$$Dv = 2 Ds = 3.36\text{m}$$

$$Dh = 3 Ds = 5.04 \text{ m}$$

$$G = 1.5 Ds \quad G = 2.52 \text{ m}$$

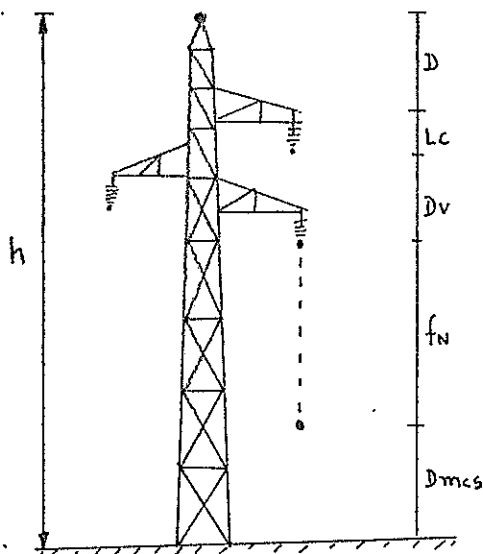
Ds = radio de separación para protección del conductor con respecto a la cruceta inferior bajo la fase en análisis.

$$D = D_{tc} - L_c = 3.3 - 1.9 \quad D = 1.46 \text{ m}$$

$$D_{mcs} = 6 + \frac{Kv - 110}{1508} = 6 + \frac{138 - 110}{(150)(0.97)} = D_{mcs} = 6.19 \text{ m}$$

(para terrenos normales)

$$\begin{aligned} \text{Zona de seguridad} &= 2e + 2v + Dh = 2e + 2(L_c + fN) \text{ Sen } \alpha + Dh \\ &= 2(3.5) + 2(1.7 + 8.22) \text{ Sen } 60^\circ + 5.04 \\ &= \text{Zona seg} = X = 29.56 \text{ m} \end{aligned}$$



$$h = D + L_c + D_v + fN + D_{mcs}$$

$$h = 1.46 + 1.9 + 3.33 + 8.22 + 6.19$$

$$h = 21.10 \text{ m}$$

$$L = \frac{2H}{w} \text{ Sen } h \left(\frac{wL}{2H} \right) = \frac{2(3427.27)}{1.84}$$

$$\text{Sen } h \left[\frac{1.84 (350)}{2(3427.27)} \right]$$

$$L = 361.52 \text{ m}$$

-CALCULO DEL NUMERO DE AISLADORES

*Condiciones normales de operación

$$V_{m\acute{a}x} = (1.05) (138) = 144.9 \text{ Kv}$$

Contaminación (Clase C o moderada)

$$N = \frac{(1.05) (138) (1.93)}{(0.97) (29.21)} = 9.87 \quad 10 \text{ aisladores}$$

$$N = \frac{V_L \cdot D_{fo}}{d \cdot d_f}$$

N : Número de aisladores

 V_L : Voltaje máximo entre líneas Kv D_{fo} : Distancia de fuga dependiendo del grado de contaminación cm/Kv

d : Densidad relativa del aire

 d_f : Distancia de fuga del tipo de aislador, dado por el fabricante cm.

DESCARGAS ATMOSFERICAS

$$a = \frac{D_{tc}}{\cos \beta} = \frac{3.36}{\cos 30^\circ} = 3.88 \text{ m}$$

$$b = \sqrt{(2h - D_{tc})^2 + G^2} = \sqrt{\{2(21.10) - 3.36\} + 2.52^2} = 38.92 \text{ m}$$

$$\frac{b}{a} = 10.03 \quad C_n = 0.27$$

$$\frac{\ell}{b} = \frac{1148 \text{ pies}}{1500} = 0.77 \quad \alpha_c \left(\frac{1}{2} \text{ vano} \right) = 0.72$$

$$R = 20\Omega$$

$$\frac{\ell}{b} = 0.77 > 0.5 \quad \alpha_c (\text{estructura}) = 1$$

$$R = 20 \Omega$$

$$\# \text{ HG} = 1$$

$$R_{pt} = 17.5 \Omega$$

$$\text{-PROB DE DESCARGA} = 30\% \quad I_D = 39 \text{ KA}$$

$$\frac{V_L}{\alpha_c} = (1 - C_n) \cdot R_{pt} \cdot I_D + e$$

$$\frac{V_L}{\alpha_c} \begin{cases} (1-0.27)(17.5)(39) + \frac{138^2}{0.72} = 769.28 \text{ Kv} & \# \text{ aisl} = 8 \frac{1}{2} \text{ vano} \\ (1-0.27)(17.5)(39) + 138^2 = 693.39 \text{ Kv} & \# \text{ aisl} = 7 \text{ (estructura)} \end{cases}$$

POR MANIOBRA

$$V_{st} = \sqrt{\frac{2}{3}} \text{ KT VL (1.05)} = \sqrt{\frac{2}{3}} (4.03)(138)(1.05) \quad V_{st} = 476.79 \text{ Kv}$$

(KT = valor dado en 7.2)

$$V_{stfN} = V_{st} \frac{HKLL}{n} = 476.79 \frac{(0.84)(0.715)}{(0.97)^{0.9}} \Rightarrow V_{stfN} = 294.32 \text{ Kv}$$

KLL = factor de corrección por lluvia

V_{stfN} = sobrevoltaje transiente aplicando condiciones meteorológicas distintas que las normales.

$$\frac{L}{\ell} = \frac{14000}{350} = 40$$

$$Pob = 97.7\%$$

$$n = 3.3$$

$$V_c = \frac{V_{stfN}}{1-n0} = \frac{294.32}{1-(3.3)(0.05)}$$

$$V_c = 352.48 \text{ Kv}$$

$$VI = KVC = (1.2)(352.48) \quad VI = 422.98 \text{ kv}$$

$$VI = 422.98 \quad \begin{cases} D_{st} = 0.68 \text{ m} \\ \# \text{ aisl} = 5 \end{cases}$$

POR FRECUENCIA INDUSTRIAL

$$V_{fi} = K_{fi} \frac{V_L}{\sqrt{3}} (1.05)$$

$$V_{fi} = (1.43) \frac{138}{\sqrt{3}} (1.05)$$

$$V_{fi} = 119.63 \text{ Kv}$$

K_{fi} = valor de veces el voltaje máximo de línea a tierra

V_L = voltaje máximo entre fases

De los resultados obtenidos sugerimos que para el diseño
10 aisladores para la cadena de suspensión.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los criterios técnicos y teóricos establecidos aquí son recopilaciones de normas, datos del fabricante y de las experiencias obtenidas en dicho campo, en la que se pretende dar una información adicional para la solución de una determinada aislación de una línea de transmisión.

La intención del autor en el desarrollo de esta tesis es hacer factible el montaje de líneas de transmisión, en cualquier lugar del Ecuador, empleando los sistemas de protección aquí desarrollados, por lo cual, se deberán aplicar las características físicas geográficas y atmosféricas propia de esa región a los factores de diseño de la línea que se proyecta.

En el cálculo de altura y separación de conductores, hemos asumido valores promedio de acuerdo a la realidad de nuestro medio; siendo el Ecuador un país de pequeños contrastes geográficos cualquier ligera modificación de los valores promedios respecto a temperatura, vientos, cargas livianas de conductores, ángulo de protección 30° (estos datos que nos sirven para el cálculo de flechas, altura, y separación de conductores) no afectará el rendimiento previsto de la línea.

La resistividad del terreno se ha considerado de acuerdo

a la naturaleza del mismo, pero creemos que es necesario tener medidas precisas de ellas en todo el país, porque es precisamente este detalle el que influirá en gran parte en la ruta que tome la línea.

La resistencia de puesta a tierra, es quizás uno de los factores de diseño que más afectan a la línea en cuanto se refiere a su protección contra descargas atmosféricas, tiene por objeto de ofrecer la menor resistencia eléctrica posible entre cables de guarda, facilitar la más rápida dispersión de la corriente del rayo en el terreno mismo y evitar la formación de fuertes gradientes de potencial que darían lugar a la formación de arcos.

Desde el punto de vista económico, sólo un alto valor de resistencia de puesta a tierra se recomienda disminuirlo, para conseguir una mejora considerable en el aislamiento de la línea, en cambio si este valor es pequeño (15 ohms o menos) no se justifica tal esfuerzo, ya que la ganancia que se obtiene es mínima en relación a los gastos que exige.

El factor económico influye decididamente en la selección de los sistemas de puesta a tierra, nivel de aislamiento y en consecuencia en la probabilidad de fallas de la línea, pero también es cierto que, consideraciones técnicas y funcionales sacrifican algunos sucesos en pro del buen

rendimiento de la misma. veamos algo al respecto.

-El sistema de contrapeso (especialmente si se compone de 1 y 2 alambre) se prefiere al sistema de estacas o varillas porque garantiza :

- a) Menos costo
- b) Fácil instalación y mantenimiento
- c) Mejora el factor de acoplamiento en aproximadamente un 10%.
- d) Niveles de baja resistencia que no se consigue lineando varillas normales de 10 pies de longitud.

Para una interpretación más efectiva del método empleado en proteger una línea contra las descargas atmosféricas, es necesario un breve análisis de las características que rodean al tema y de la forma que éstas influyen en el diseño y cálculo de fallas de líneas.

Decíamos en los capítulos anotados que el rayo es un fenómeno imprevisto y no reproducible en el laboratorio; las teorías que explican el proceso de cargas y descargas no satisfacen totalmente. Las magnitudes características del rayo, como la intensidad de corriente y voltaje son fundamentales para el nivel de protección de las líneas pero el conocimiento de éstas tiene una serie de dificultades que le da un carácter probabilístico.

Así, una línea se diseña para soportar la descarga de un rayo de valores de tensión, corriente y duración determinadas pero no excluye la posibilidad de que esta misma línea tenga que recibir descargas de características distintas a la prevista; por esta razón es necesario aceptar el concepto de que el cálculo en una línea de transmisión, no es matemáticamente exacto sino probabilístico.

BIBLIOGRAFIA

1. A.E. Knowlton, Manual standard del ingeniero electricista (Standard handbook for electrical engineers), vol. 2.
 2. Westinghouse Electric Corporation, Electrical transmission and distribution, reference book.
 3. Gaudencio Zoppetty Jádez, Estaciones transformadoras y de distribución (Madrid : Gustavo Gili)
 4. Arnold Roth, Técnica de alta tensión (Barcelona: Labor, 1966).
 5. W.W. Lewis, The protection of transmission systems against lightning (New York : John Wiley, 1950)
 6. Walter C. Johnson, Transmission line and networks (New York : McGraw-Hill)
 7. Escuela Superior Politécnica del Litoral, Determinación y selección de la aislación de líneas de transmisión (Guayaquil : ESPOL, 1984)
 8. José Ramírez Vásquez, Instalaciones eléctricas generales (Enciclopedia Ceac de Electricidad)
-

9. Juan Gallo Galarza, "Proyecto de líneas de transmisión de alta tensión" (Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, 1981).
 10. Pedro Ortuondo (CIER), Metodología para el cálculo y diseño de puesta a tierra (Chile: Empresa Nacional de Electricidad, 1974), Vol. V.
 11. INECEL, Sistema nacional de transmisión : normas de proyecto para las líneas de 138 KV.
 12. Electroporcelana Gamma S.A., Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación atmosférica.
-