

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica

" ANALISIS DE SOBRETENSIONES EN LOS SISTEMAS DE  
DISTRIBUCION"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

Especialización: POTENCIA

Presentada por:

WASHINGTON DECIO RUIZ LEON

GUAYAQUIL - ECUADOR

1988

## AGRADECIMIENTO

Al ING. ADOLFO SALCEDO GUERRERO,  
Director de tesis por la gentileza  
que tuvo al colaborar, dirigir y  
revisar el presente trabajo.

Al ING. GUSTAVO BERMUDEZ FLORES,  
por las facilidades prestadas  
para la culminación de esta tesis.

Al ING. MARTIN CORDONEL GARCES, por  
su sincero apoyo para la  
elaboración de este trabajo.

## DEDICATORIA

### A MIS PADRES:

Por su abnegada decisión de sacrificio para ver realizado mis sueños.

### A MIS HERMANOS Y AMIGOS:

Que en ocasiones apremiantes me brindaron apoyo de toda índole.

C. Villafuerte D

ING. CARLOS VILLAFUERTE  
SUBDECANO DE LA FIE

Salcedo G

ING. ADOLFO I. SALCEDO G.  
DIRECTOR DE TESIS

Jorge Flores M

ING. JORGE FLORES M.  
MIEMBRO PRINCIPAL  
DEL TRIBUNAL

Leo Salomon Fash

ING. LEO SALOMON FASH  
MIEMBRO PRINCIPAL  
DEL TRIBUNAL

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 títulos profesionales de  
1a ESPOL ).

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Washington Ruiz", is written over a horizontal line. The signature is stylized and includes a large loop at the beginning.

WASHINGTON DECIO RUIZ LEON

## RESUMEN

Uno de los principales problemas que ha tenido la Electrificación Rural es el alto grado de inflación que han sufrido los costos de materiales y la mano de obra para la construcción de líneas y redes de distribución, situación que nos ha llevado a un serio cuestionamiento de los criterios de diseño aplicados en la elaboración de un proyecto de electrificación.

Este trabajo presenta un procedimiento sistemático para la selección y dimensionamiento de la protección de sobrevoltajes debido a descargas atmosféricas aplicable a líneas de distribución. Para lo cual se considera las características de la zona a electrificar, el tipo de configuración de la estructura, etc., de tal forma que produzca un ahorro substancial en los costos de construcción de la protección de sobrevoltajes por descargas atmosféricas. Debe tomarse en consideración que la protección de sobrevoltajes representa de 1 a 2% del costo total de la construcción de un proyecto de electrificación; por lo tanto, un criterio que tome en consideración las variables que juegan en el diseño de la protección pueden conseguir un ahorro significativo en los costos de los Proyectos de Electrificación.

El análisis de los sobrevoltajes, los tipos existentes y sus causas se estudian en el capítulo I; en el capítulo II se realiza una evaluación del aislamiento y el tipo de protección contra sobrevoltajes para cada uno de los equipos utilizados en las líneas de distribución. El aislamiento y la protección resultante de la línea de distribución es analizado en los capítulos III y IV, aquí se recomiendan varias alternativas con el propósito de conseguir un mejor aislamiento de la línea y consecuentemente una protección contra sobrevoltajes más económica.

En el capítulo V se presenta una metodología para la evaluación económica de las tres alternativas de protección de sobrevoltajes propuestas, con el propósito de seleccionar y dimensionar el tipo de protección que resulte más favorable a un proyecto y que mantenga los índices de confiabilidad adecuados, como el de 4 salidas por 100 millas de línea al año (1).

## INDICE GENERAL

	Pag.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL .....	VIII
INDICE DE FIGURAS .....	XIV
INDICE DE TABLAS .....	XIV
INTRODUCCION .....	XXII
CAPITULO I	
GENERALIDADES	
1.1 DEFINICION Y CLASIFICACION DE LAS SOBRETENSIONES .....	24
1.2 CAUSAS DE LAS SOBRETENSIONES .....	25
1.3 INFLUENCIAS DE LAS SOBRETENSIONES .....	26
1.4 CONSIDERACIONES SOBRE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS .....	31
1.5 ONDAS VIAJERAS .....	38
1.6 RELACION ESTADISTICA ENTRE DENSIDAD DEL RAYO Y LAS SOBRETENSIONES EN LA LINEA DE DISTRIBUCION .....	48

## CAPITULO II

PROTECCION DE LOS EQUIPOS DE LA LINEA DE  
DISTRIBUCION

	Pag.
2.1 NECESIDAD DE PROTECCION DE LOS EQUIPOS CONTRA LAS SOBRTENSIONES .....	51
2.2 AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION .....	53
2.2.1 TRANSFORMADORES .....	54
2.2.2 REGULADORES .....	59
2.2.3 CAPACITORES .....	61
2.2.4 RECONECTADORES .....	61
2.2.5 SECCIONALIZADORES .....	63
2.3 PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES .....	66
2.3.1 PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES USANDO DESCARGADORES AEREOS .....	67
2.3.2 PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES USANDO PARARRAYOS .....	69
2.4 PROTECCION DE LOS REGULADORES .....	72
2.5 PROTECCION DE LOS CAPACITORES .....	74
2.6 PROTECCION DE LOS RECONECTADORES .....	76
2.7 PROTECCION DE LOS SECCIONALIZADORES .....	76
2.8 EFECTOS DE LOS CAPACITORES DE LOS RAYOS EN LOS PORTAFUSIBLES .....	77

## CAPITULO III

## AISLAMIENTO DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

	Pag.
3.1 AISLADORES .....	82
3.2 AISLAMIENTO PROPORCIONADO POR LA MADERA .....	92
3.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL AISLAMIENTO DE LA LINEA DE DISTRIBUCION .....	86
3.4 ESTRUCTURA ACTUALMENTE UTILIZADAS .....	106
3.5 EXPERIENCIA PRACTICAS .....	111
3.6 CONCLUSION SOBRE EL PROYECTO DE UNA ES- TRUCTURA .....	113

## CAPITULO IV

## PROTECCION DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

4.1 PRINCIPIOS BASICOS .....	120
4.1.1 TASA NORMAL DE TENSION DE CONTORNEO PRODUCIDA POR DESCARGAS ATMOSFERICAS .	121
4.1.2 NUMERO DE IMPACTOS DE DESCARGAS ATMOS- FERICAS EN LA LINEA .....	124
4.1.3 FACTORES INVOLUCRADOS EN LA DETERMINA- CION DEL PORCENTAJE DE DESCARGAS ATMOSFERICAS A LA LINEA QUE CAUSAN UN CONTORNEO .....	133

Pag.

4.2	METODO USADO PARA OBTENER EL RESULTADO DEL ESTUDIO .....	154
4.3	EQUIPOS DE PROTECCION CONSIDERADOS .....	157

## CAPITULO V

## APLICACION PRACTICA

5.1	ACUMULACION DE DATOS .....	159
5.2	PROCEDIMIENTO A SEGUIR .....	161
5.2.1	NUMERO DE IMPACTOS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS POR MILLA CUADRADA .....	162
5.2.2	FRANJA DE TIERRA PROTEGIDA POR LA LINEA .....	163
5.2.3	NUMERO DE IMPACTOS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS POR 100 MILLAS DE LINEA .	164
5.2.4	PORCENTAJE DE IMPACTOS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS POR 100 MILLAS POR AÑO CON PROTECCION .....	164
5.2.5	PROBABILIDAD DE CONTORNEO CON AISLAMIENTO DE MADERA .....	165
5.2.6	PORCENTAJE DE IMPACTOS DE DESCARGAS ATMOSFERICAS .....	165
5.3	EJEMPLO DE APLICACION .....	169
5.3.1	CONDICION I - SIN AISLAMIENTO DE MADERA .....	172

	Pag.
5.3.2 CONDICION II - CON AISLAMIENTO DE MADERA PARA DOS LONGITUDES DIFERENTES.	
5.4 OBSERVACIONES PERTINENTES .....	176
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	184
ANEXOS .....	234
ANEXO A	
APLICACION DE AISLADORES PARA CONSTRUCCIONES DE 13 KV., 23 KV. ....	194
ANEXO B	
CONSTRUCCION DE LINEAS PRIMARIAS MONOFASICAS .....	196
ANEXO C	
CRUCETA DE CONSTRUCCION TANGENTE .....	198
ANEXO D	
INSTRUCTIVO PARA LA UTILIZACION DE LAS "NORMAS PARA LA SELECCION DE LA PROTECCION DE SOBREVOLTA- JES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS DE UNA LINEA DE DISTRIBUCION .....	200
BIBLIOGRAFIA .....	238

## INTRODUCCION

El presente trabajo fué realizado con la finalidad de ofrecer una forma viable de obtener una reducción en los costos de los Proyectos de Electrificación, a través de la selección y dimensionamiento de un sistema de protección contra sobrevoltajes por descargas atmosféricas, que resulte más conveniente para un sector a electrificarse.

El procedimiento desarrollado consiste en evaluar cada uno de los factores que influyen sobre el comportamiento de la línea frente a los sobrevoltajes por descargas atmosféricas, tales como: configuración de la estructura, nivel de aislamiento, resistividad del terreno donde se va a electrificar, nivel de descargas atmosféricas de la zona, etc., con la finalidad de establecer el tipo y magnitud de la protección cuya construcción resulte más favorable, manteniendo un nivel de confiabilidad establecido de 4 salidas por 100 millas de líneas de distribución al año (1).

Uno de los principales problemas que se presenta en la realización del estudio de protección de sobrevoltajes es el relacionado con la obtención de un registro preciso del nivel isoceraunico de las regiones del país y

de una identificación clara de las causas que originan las fallas en las líneas de distribución construidas, sobre todo en sistema rurales, por esta razón se recomienda llevar una estadística apropiada del nivel isoce- raunico de las regiones del país y una identificación clara de las razones que producen fallas en un sistema de distribución.

## CAPITULO I

### GENERALIDADES

#### 1.1 DEFINICION Y CLASIFICACION DE LAS SOBRETENSIONES

Las sobretensiones se definen como el voltaje que se presenta en un sistema eléctrico, con un valor superior a un voltaje de referencia, que esta relacionado con el máximo voltaje nominal de operación del sistema y con el nivel de aislamiento. Las sobretensiones se clasifican como de origen externo y de origen interno.

Sobretensiones de origen externo.- Son aquellas originadas fuera del sistema eléctrico y que prácticamente son independientes del voltaje de operación. Bajo esta clasificación se tiene a las sobretensiones de origen atmosférico, las cuales serán el punto central del estudio en este trabajo.

Sobretensiones de origen interno.- Son aquellas que se originan dentro del mismo sistema, como resultado del cambio en las condiciones operativas del mismo y que tienen relación con la configuración y tensión nominal del sistema. Bajo esta clasifica-

ción se tienen a las sobretensiones de frecuencia industrial, tales como: fallas a tierra, ferroresonancia, pérdidas de carga, etc. y, a las sobretensiones de maniobra a frecuencia natural del sistema (energización, recierre, etc.).

## 1.2 CAUSAS DE LAS SOBRETENSIONES

Las sobretensiones en un sistema eléctrico son originadas básicamente por dos causas:

- 1) Externas.— Estas son de origen atmosférico y comúnmente toman la forma de un impulso unidireccional, la amplitud máxima que se puede presentar no tiene ninguna relación con la tensión de operación del sistema.

Estas sobretensiones se deben a las siguientes causas:

- a) Descargas directas de rayos.
- b) Tensiones inducidas por una descarga a tierra en un lugar cercano a la línea.
- c) Tensiones inducidas debido a variaciones atmosféricas a lo largo de la línea de distribución.

## 2) Internas.

Estas se pueden dividir en dos clases:

### a) Sobretensiones internas de alta frecuencia.-

Estas sobretensiones se deben a fenómenos transitorios que aparecen cuando el estado de una red se cambia por operaciones de maniobra (switched) o por una condición de falla. La tensión resultante que toma la forma de una onda senoidal amortiguada, tiene una frecuencia del orden de 20 KHz. (2) y de hecho está gobernada por la inductancia y capacitancia inherentes al circuito.

### b) Sobretensiones internas de baja frecuencia.-

Estas ocurren a la frecuencia nominal del sistema e incluyen la tensión en estado permanente que pueda resultar, con pequeñas variaciones por la desconexión de una carga, particularmente se presentan en el caso de las líneas de transmisión largas.

Desde el punto de vista de la protección es importante disponer de datos estadísticos sobre la ocurrencia de fallas, a fin de poder aplicar mejor los criterios de protección.

Un ejemplo de las estadísticas de fallas en un sistemas eléctrico se dará en el siguiente subcapítulo.

### 1.3 INFLUENCIAS DE LAS SOBRETENSIONES

La influencia de las sobretensiones en los sistemas de distribución como causa de interrupciones, puede ser analizada tomando en cuenta el nivel isoce-  
raunico, criterio que tiene fundamental importancia dentro de este análisis.

El nivel isoceraunico de una zona está definido como el número de días al año que se escucha el trueno en esa zona.

Conforme a los registros obtenidos en la sección de Meteorología del Aeropuerto "Simón Bolívar" de la dirección de Aviación Civil se obtuvo la tabla 1.1, referente al nivel isoceraunico en el área de Guayaquil.

En las figuras 1.1 y 1.2 se presentan los mapas que contienen las curvas de niveles isoceraunicos máxi-  
mos y mínimos para las distintas regiones del país.

Tabla 1.1

## Nivel Isoceraunico en el Area de Guayaquil

ANO	NIVEL ISOCERAUNICO
1961	5
1962	2
1963	14
1964	12
1965	12
1966	1
1967	4
1968	2
1969	5
1970	1
1971	0
1972	no hay registros
1973	no hay registros
1974	0
1975	1
1976	0
1977	no hay registros
1978	0
1979	6
1980	9
1981	2
1982	8
1983	74
1984	-
1985	-
1986	-
1987	-

A falta de datos estadísticos de interrupciones por sobretensiones debido a descargas atmosféricas por parte de las Empresas Eléctricas del país, tenemos la dificultad de presentar un análisis detallado de como estas interrupciones afectan al sistema eléctrico.



FIG. 13. NIVELES ISOCERAUNICOS MAXIMOS.



FIG. 1.2 NIVELES ISOCERAUNICOS MINIMOS.

Ref.(3)

#### 1.4 CONSIDERACIONES SOBRE LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS

Casi la totalidad de las sobretensiones transitorias que ocurren en los sistemas de distribución son debidas a los rayos. Una pequeña parte restante puede ser debida a otros fenómenos como: cortocircuito, energización de capacitores, corte brusco de corriente y ferresonancia (4).

El conocimiento de las características principales del rayo es de fundamental importancia para establecer medios eficaces de protección, aunque es evidente la enorme dificultad que representa la determinación cuantitativa de las características del rayo, ya que este hecho es un fenómeno casual difícilmente reproducible y que tiene magnitudes que no pueden ser fácilmente valoradas a priori.

A continuación presentamos algunos resultados prácticos de investigaciones realizadas hasta el momento:.

##### a.) Polaridad del Rayo

Aproximadamente un 90% de las corrientes del rayo son negativas (nube negativa, suelo positivo) y un 10% con polaridad contraria; pero,

éstas últimas representan las más severas. Encontrándose, en general, magnitudes de corrientes entre 5 y 100 ka., llegándose a valores de 200 ka. (5).

b.) Tensión Causada por el Rayo

La tensión de un rayo puede inicialmente llegar a centenares de millones de voltios entre la nube y la tierra; sin embargo, cuando un rayo se extingue a tierra la compensación de las cargas reduce un poco esta tensión y, aun así, varios millones de voltios pueden ser aún transferidos al objeto impactado por el rayo. La tensión real depende de la cantidad de corriente de rayo, de la conductibilidad del objeto impactado y de la impedancia existente entre el punto impactado y la tierra.

Es importante citar, que en el caso de las líneas de distribución no es necesario que un rayo entre en contacto con la línea para producir sobretensiones peligrosas para el aislamiento de los equipos.

Así, es normal la ocurrencia de descargas inducidas en las líneas de distribución por rayos

que caen en puntos cercanos, que pueden alcanzar en la forma de ondas viajeras tensiones hasta de 500 kv.

Más adelante, se presenta en este trabajo un breve resumen sobre las ondas viajeras, donde se muestra que un ingeniero de distribución, al proyectar las redes y líneas de distribución debe preocuparse de las reflexiones que ocurren en algunas configuraciones típicas de circuitos.

c.) Magnitudes de las Descargas Atmosféricas, (2).

Por medio de numerosas experiencias que han permitido medir intensidades de crestas con diversidad de rayos, se muestra la siguiente distribución aproximada para la magnitud de corriente de descarga directa de los rayos:

Descargas directas de rayos

0,1% excede 200ka

0,7% excede 100ka

5,0% excede 60ka

50 % excede 15ka

A continuación se grafican los datos presentados arriba.

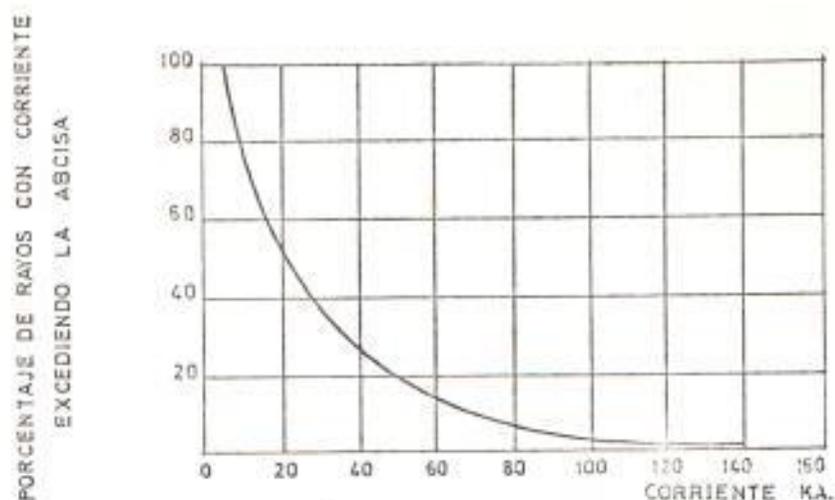


Fig. 1.3 Porcentaje de rayos en función de la corriente de descarga

Conociendo el valor de la intensidad en (KA) de la onda de corriente producida por la descarga, al llegar ésta al conductor se puede encontrar el valor del sobrevoltaje al multiplicar la corriente en (KA) por la impedancia equivalente que presenta el punto de descarga.

$$V = Z_{eq} \cdot I \text{ (KV)}$$

Donde: V : Valor del sobrevoltaje (KV).

$Z_o$ : Impedancia equivalente que presenta el punto de descarga ( $\Omega$ ).

I : Corriente de la descarga (KA).

La impedancia característica de onda de la línea es aproximadamente igual a 500 ohms.

d.) Duración de la Corriente del Rayo

El tiempo de duración del flujo de la corriente del rayo es generalmente de decenas a centenas de microsegundos. Para efecto comparativo, conviene recordar que 1/2 ciclo de la onda de 60 Hz., equivale a 8,333ms. Típicamente la corriente del rayo se eleva al máximo en dos a diez microsegundos, decreciendo la mitad con el valor en 20 a 50 us. y cae a cero dentro de 100 a 200 microsegundos.

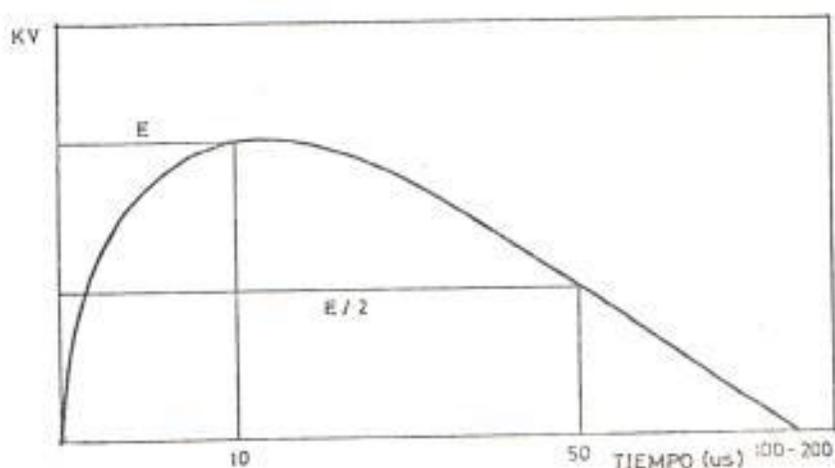


Fig. 1.4 Tiempos de duración de un rayo típico

e.) Rayos Múltiples

Aproximadamente el 50% de las descargas atmosféricas son múltiples (4). Los rayos múltiples

son originados por un rápido recargamiento de la nube responsable por la primera descarga tras la ocurrencia del primer rayo; parte de la carga eléctrica de las nubes adyacentes reabastecen el área descargada, fluyendo los electrones hacia la tierra a través del camino previamente ionizado.

Estadísticas sobre la multiplicidad de los rayos, indican lo siguiente:

- 50% - 1 solo componente.
- 13% - 2 componente en rápida sucesión.
- 25% - 3 componente en rápida sucesión.
- 12% - 4 o más componentes en rápida sucesión.

La duración total de los rayos múltiples puede ser hasta 1.5 segundo, la energía total acumulada y la correspondiente fuerza destructiva puede ser muchas veces mayor al de un rayo común unitario.

f.) Corriente que fluye por los Pararrayos de Distribución

Es pequeña la probabilidad que un pararrayo de distribución reciba directamente el impacto de

un rayo, que lo sometería a soportar corrientes elevadas según lo expuesto en el literal c.. De este modo normalmente el pararrayo no se verá expuesto directamente a corriente de descarga atmosférica; pero, está expuesto a corrientes menores debido a atenuaciones a lo largo de la línea que llegan generalmente por inducciones; también se incrementan las atenuaciones debido a la disrupción de los aisladores, distribución de la corriente en ambos sentidos de la línea para cada lado y atenuaciones debidas al fenómeno de predescargas.

Mediciones efectuadas en más de 1000 pararrayos instalados (fig. 1.5), muestran las siguientes curvas de magnitudes probables de descarga por pararrayo por año para circuitos rurales (6).

Donde:

Curva 1 - Pararrayos instalados en redes urbanas.

Curva 2 - Pararrayos instalados en redes suburbanas.

Curva 3 - Pararrayos instalados en zona rural con alguna protección natural.

Curva 4 - Pararrayos instalados en zona rural sin protección natural.

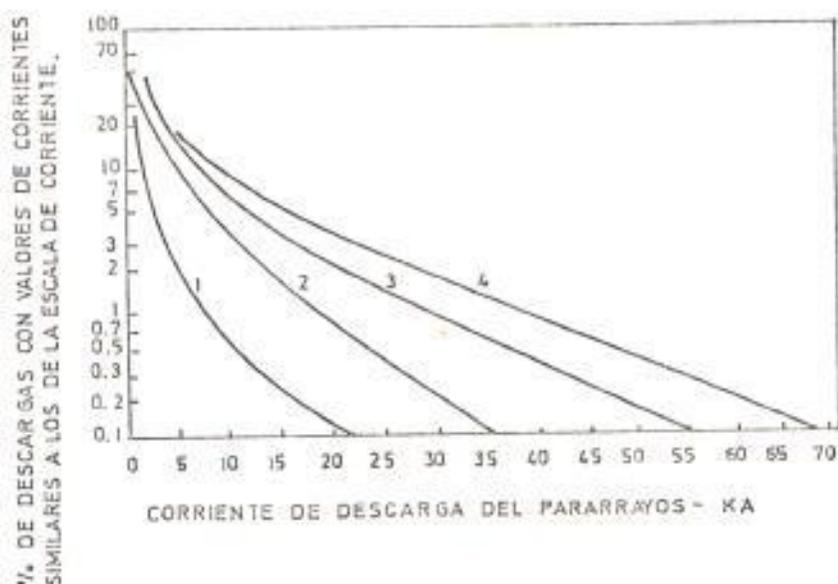


Fig. 1.5 Curvas de magnitudes probables de descargas por pararrayo por año para circuitos rurales

### 1.5 ONDAS VIAJERAS

Las ondas viajeras se mueven a lo largo de las líneas aéreas con una velocidad muy próxima a la velocidad de la luz  $V = 1 / LC$ , ocasionando ondas reflejadas en la terminaciones de las líneas, donde la tensión y la corriente de la onda están relacionadas con la impedancia característica  $Z_c = L/C$ . Una onda viajera se caracteriza por cuatro factores (Figura 1.4):

- Cresta de onda
- Frente de onda
- Cola de onda
- Polaridad

La cresta de onda es la máxima amplitud y suele darse en voltios o kilovoltios; el frente de onda es el tiempo desde su inicio hasta la cresta y se mide en microsegundos; la cola de onda es el tiempo entre la cresta y el punto donde la onda ha descendido hasta la mitad de su valor máximo; y la polaridad depende del tipo de cargas eléctricas.

Las principales y más simples propiedades de las ondas viajeras son las siguientes.

a.) Línea terminada en una Resistencia

Es el caso de una onda viajera que va en dirección al final de una línea que termina en una resistencia.

Tensión incidente  $V^+$

Tensión reflejada  $V^- = \frac{R - Z_c}{R + Z_c} V^+$

Tensión resultante  $V = V^+ + V^-$

$$V = \frac{2R}{R + Z_c} V^+$$

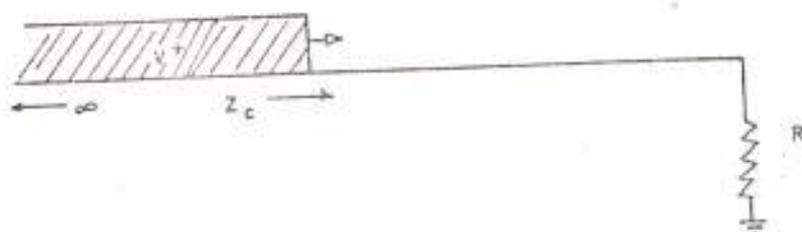


Fig. 1.6 Línea terminada en una resistencia

b.) Línea Terminada en Circuito Abierto

Se trata de una línea terminal o de una interconexión de alimentadoras o líneas que funcionan normalmente abiertas. En este caso basta considerar el mostrado en el literal a., con una resistencia infinita  $R = \infty$ .

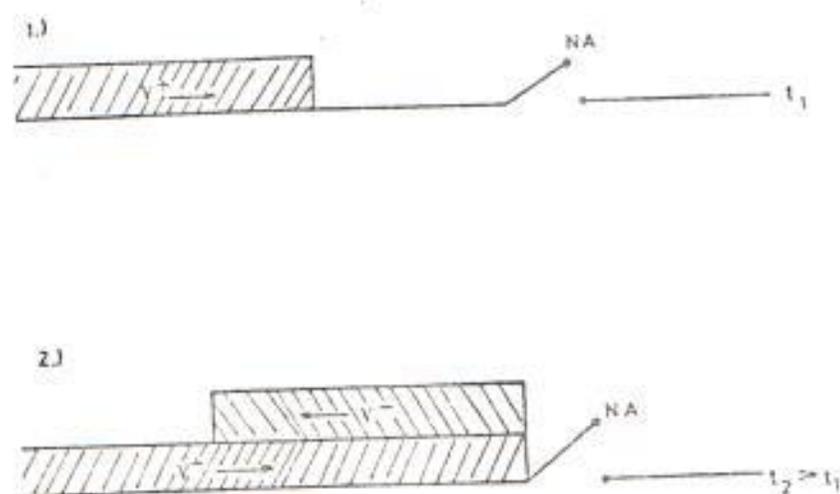


Fig. 1.7 Línea terminada en circuito abierto

Para este caso:

$$\begin{array}{l} \text{Tensión incidente } V \quad + \\ \text{Tensión reflejada } V = V \quad - \quad + \\ \text{Tensión resultante } V = 2V \quad + \end{array}$$

Cuando una onda de sobrevoltaje viajando a lo largo de una línea alcanza un punto en el cual existe un circuito abierto, ésta se refleja con el mismo signo, elevándose el voltaje en dicho punto en un valor igual al doble del valor de la onda incidente. Esto se ilustra en la figura 1.7 donde 1) es el origen de la sobretensión, 2) es la reflexión positiva de la onda cuando alcanza el terminal de la línea en circuito abierto.

Se nota que la tensión resultante en el caso de circuito abierto será igual al doble de la tensión incidente.

c.) Línea Terminada en Corto Circuito

En este caso basta considerar lo citado en el literal a., con resistencia  $R \rightarrow 0$ .

Tensión incidente	$V^+$
Tensión reflejada	$V^- = -V^+$
Corriente incidente	$I^+$
Tensión resultante	$V = 0$
Corriente resultante	$I = 2I^+$



Fig. 1.8 Representación del cortocircuito

Su característica es la imposibilidad de desarrollar un voltaje a través de él. (Figura 1.8). En consecuencia, cuando una onda viajera llega a un cortocircuito, la onda reflejada debe cancelar la onda incidente de tal forma que la resultante sea cero. La corriente que circula por la línea y que regresa (corriente reflejada) se dobla.

d.) Empalmes de Líneas Diferentes

Gráficamente se representa así:



Fig. 1.9 Empalmes de líneas diferentes

En este caso simplemente se deben aplicar las ecuaciones:

$$V = \frac{Z_{ca} - Z_c}{Z_{ca} + Z_c} V^+$$

$$V = \frac{2Z_{ca}}{Z_{ca} + Z_c} V^+$$

Para las corrientes:

$$I = -\frac{V}{Z_c}$$

$$I = \frac{V}{Z_{ca}}$$

Como ejemplo tenemos: una línea con impedancia característica  $Z_c = 500 \Omega$ , ligada a un cable con impedancia característica igual a  $50 \Omega$ .

Consideramos una onda viajera incidente  $V^+$ , siguiendo en dirección de la unión línea-cable, las tensiones resultantes serán:

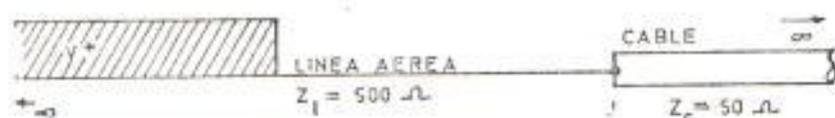


Fig. 1.10 Línea aérea - cable

Tensión incidente en la Unión  $V^+$   
 Tensión reflejada en la unión  $V^-$

Donde:

$$V^- = \frac{50 - 500}{50 + 500} V^+ = -0.818 V^+$$

Tensión resultante  $V = V^+ + V^- = 0,182V^+$

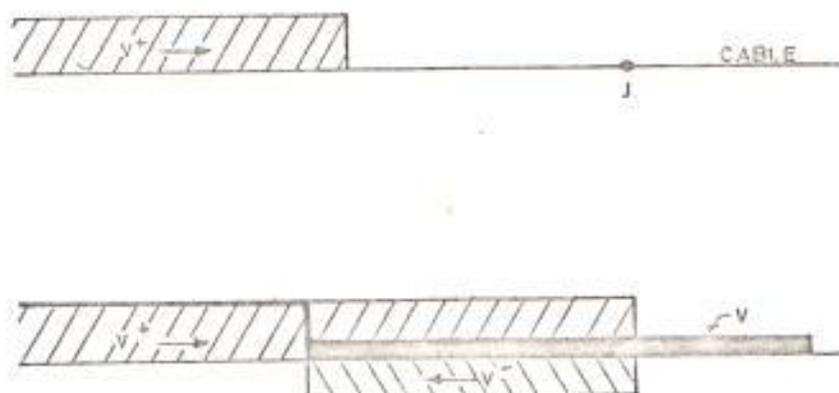


Fig. 1.11 Descripción línea aérea -- cable

Conviene destacar que el cable atenúa la tensión resultante que inicialmente era igual a  $V^+$  y pasa a ser de  $0,182V^+$ .

e.) Derivación de una Línea de la misma Impedancia Característica

Consiste en un caso muy común en los sistemas de distribución considerando que existen muchas derivaciones en las alimentadoras y líneas, siempre utilizando el mismo patrón de construcción.

Cuando una onda viaja a lo largo de la línea 1 y llega a un punto de unión de dos o más líneas diferentes que están separadas una distancia

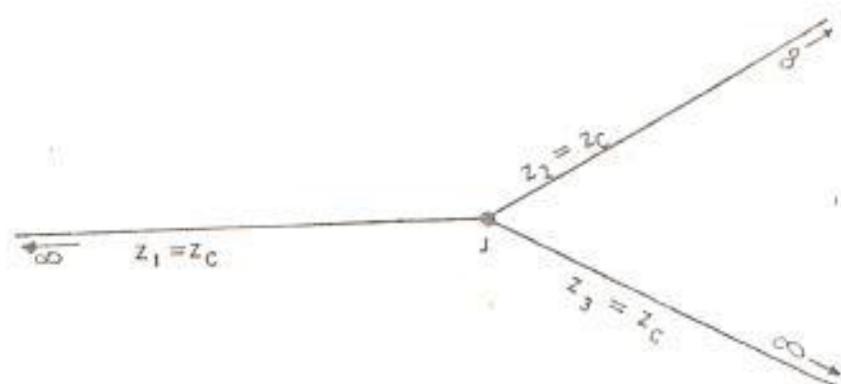


Fig. 1.12 Representación de derivación de líneas

suficiente para que el acoplamiento mutuo sea despreciable, entonces los voltajes reflejados y transmitidos pueden ser calculados reemplazando las líneas a la derecha del punto de unión por una impedancia en paralelo, donde su valor es la impedancia característica equivalente de las líneas a la derecha de la unión.

$$Z_{eqv} = \frac{Z_c \times Z_c}{Z_c + Z_c} = Z_c/2$$

La tensión reflejada en J será:

$$V = \frac{Z_{eqv} - Z_c}{Z_{eqv} + Z_c} V$$

$$V^- = \frac{Z_c/2 - Z_c}{Z_c/2 + Z_c} V^+$$

$$V^- = -\frac{1}{3} V^+$$

Donde:

$$V = V^+ + V^- = \frac{2}{3} V^+$$

Se verifica que toda derivación atenúa la onda viajera de tensión.

f.) Aparato Conectado en una Línea Continua

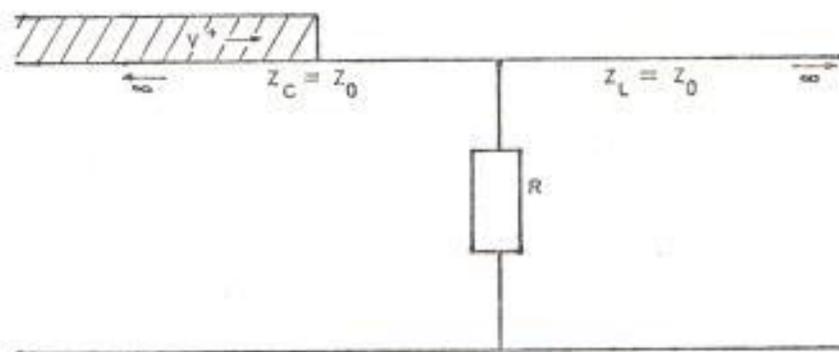


Fig. 1.13 Aparato conectado en una línea continua

La tensión reflejada será dada por:

$$V^- = \frac{Z_0}{Z_0 + 2R} V^+$$

Y la tensión resultante por:

$$V = \frac{2R}{Z_0 + 2R} V^+$$

Se verifica que para valores elevados de R el aparato no influye en la onda incidente, atenuando sensiblemente la onda de tensión con una disminución de R.

#### 1.6 RELACION ESTADISTICA ENTRE LA DENSIDAD DE RAYO Y LAS SOBRETENSIONES EN LAS LINEAS DE DISTRIBUCION

A continuación se presenta un análisis sobre la densidad del rayo y el número de días tormentas por año (I.L.) que afectan sobre una cierta área en la línea de distribución. Mediante estudios prolongados desarrollados por Técnicos Ingleses (4), en base a datos estadísticos tomados en las Islas Británicas, Europa y Australia; mostraron la siguiente relación entre la densidad anual de rayos a tierra ( $N_g$ ) y el número de tempestades día por año (I.L.) registrado por un observador.

$$N_g = (2.6 + 0.2) \times 10^{-3} \quad (\text{I.L.}) \quad (1.9+0.1) \quad \text{por km}^2 \text{ - año}$$

Considerando, en un primer análisis, esta relación para un nivel isoceraunico de 30, se tiene.

$$N_g = 2.8 \times 10^{-3} (30)^{2.0}$$

$$N_g = 2.52 \text{ por Km}^{-2}\text{-año}$$

Aún basándose en las Mismas investigaciones inglesas, se tiene:

a.) Cualquier rayo que caiga a una distancia de 16 Mt. de una línea clase 15 kv. es atraído por ella.

b.) Cualquier rayo que caiga hasta 275 Mt. de una línea clase 15 Kv., estructura de madera, induce una tensión suficientemente alta para causar disrupción del aislador a tierra.

De este modo, se puede hacer una estimación de la expectativa media de sobretensiones que llegan 1 Km de línea clase 15 Kv. en estructura de madera, localizado en nuestro medio:

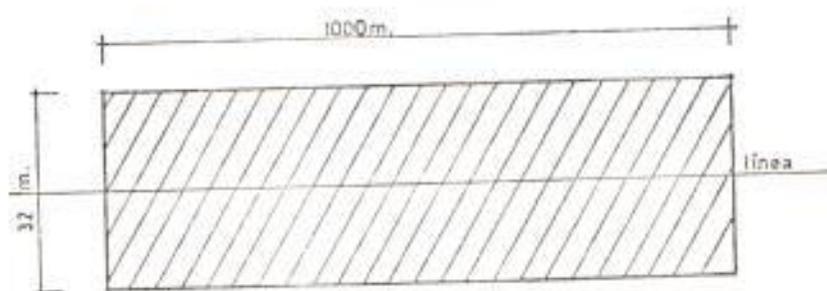


Fig. 1.14 Area de incidencias de impactos de descargas directas

- a.) Area de incidencia de impactos directos  
 $= 0,032 \text{ Km}^2$   
 Cantidad de impactos directos por Km  
 $= 0,032 \times 2.52$   
 Cantidad de impactos directos por Km = 0.08

Lo que implica la posibilidad de que ocurra una descarga directa por año en cada 12 Km de línea.

Si no hubiera protección adecuada contra sobretensiones, casi la totalidad de las descargas directas conducirían a fallas permanentes.

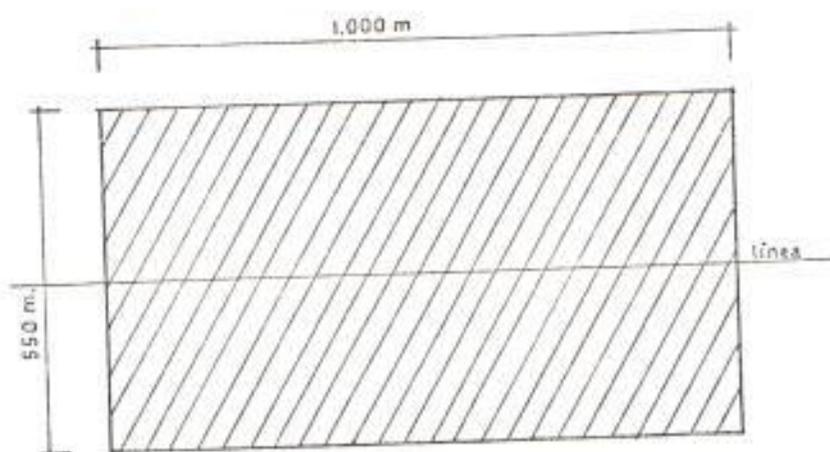


Fig. 1.15 Area de incidencias de impactos de descargas indirectos

- b.) Area de incidencia para impactos indirectos.  
 $0.55 \times 1 = 0.55 \text{ Km}^2$   
 Cantidad de disrupción debida a impactos indirectos =  $0.55 \times 2.52 = 1.4$

## CAPITULO II

### PROTECCION CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS DE LOS EQUIPOS DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

#### 2.1 NECESIDAD DE PROTECCION DE LOS EQUIPOS CONTRA LAS SOBRETENSIONES

Las sobretensiones pueden ser causadas por descargas atmosféricas, conexión o desconexión de elementos de un sistema, o por inicio o interrupción de fallas.

Las descargas atmosféricas generan sobrevoltajes por contacto directo con las líneas, o inducidos por impactos cercanos a la mismas. Los sobrevoltajes debidos a impactos directos pueden llegar a muchos millones de voltios y con corriente de descarga de muchos miles de amperios, en cambio los sobrevoltajes inducidos más frecuentes son del orden de pocos cientos de miles de voltios con corriente de descarga entre 50 y 2000 Amps. Los sobrevoltajes por maniobra rara vez superan en 2 veces el voltaje de línea, por lo que a niveles de voltaje de operación no representa peligro (valores menores a 300 Kv. ).

Conforme a lo anteriormente expuesto es frecuente la ocurrencia de descargas directas e indirectas de rayos, que pueden inducir en las líneas, ondas viajeras de centenas de millones de voltios y miles de amperios.

De este modo, por ejemplo, puede ser admitido ondas de impulso viajando a lo largo de una línea con las siguientes características.

- Tensión de cresta del orden de 400 Kv.
- Corriente con cresta del orden de 10.000 amperios
- Velocidad de 300.000 Km/seg o 300 m/useg.
- Frente de onda de tensión con inclinación de 500 a 1000 Kv por useg.

Si no existiera un dispositivo de protección instalado; por ejemplo, en un transformador, esta onda de impulso llevaría con gran seguridad al equipo al colapso, conforme a lo expuesto en la figura 2.1. Para proteger las líneas y los equipos contra estos sobrevoltajes se utilizan pararrayos.

Para determinar la protección adecuada es muy importante conocer los niveles de aislamientos de los equipos a proteger, debido a que la causa más frecuente de interrupción en un sistema es la rup-

tura del aislamiento, en el siguiente subcapítulo se estudia este aspecto.

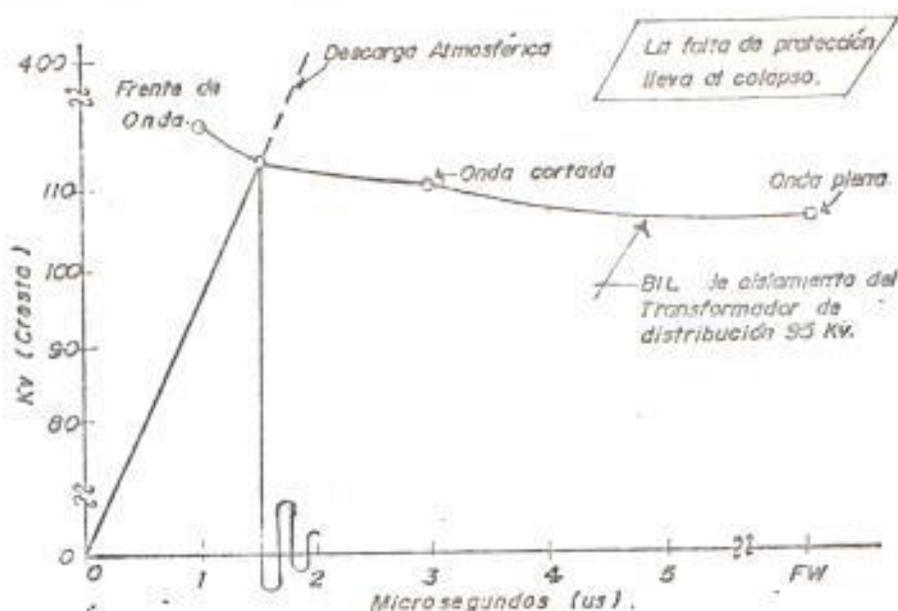


Fig. 2.1 Coordinación de aislamiento

## 2.2 AISLAMIENTO DE LOS EQUIPOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCION

En la década del 40, fueron normalizados los niveles básicos de aislamiento (BIL) de los equipos del sistema de distribución, para hacer posible una comparación entre las tensiones soportadas por los aparatos y la protección dada por el parrarayo.

El Nivel Básico de Aislamiento, (BIL), es expresado por AIEE - EEI - NEMA en la siguiente forma:

"Es un nivel de referencia, expresado en voltaje de impulso de cresta con una onda standard no mayor de

1.5 x 40 micro-segundos. El nivel de aislamiento de los aparatos será igual o mayor que el BIL correspondiente."

A continuación se detalla el nivel básico de aislamiento para diferentes equipos de distribución.

### 2.2.1 Transformador

En un transformador el aislamiento es el elemento más importante, puesto que tiene que resistir constantemente los efectos producidos por todos los fenómenos que se presentan en las líneas de transmisión y distribución, que producen tensiones muy variables y de gran intensidad. Todo esto ocurre mientras el material se deshidrata químicamente y consume su vida que es la del transformador.

Puesto que el fluido dieléctrico que rodea el núcleo, los devanados y el aislamiento sólido de un transformador determina la clasificación de los transformadores en secos y sumergidos en líquidos.

Los transformadores sumergidos en líquido, de acuerdo al medio aislante pueden clasificarse en los siguientes tipos:

TIPO I: Aceite mineral no inhibido.

TIPO II: Aceite mineral inhibido.

TIPO III: Askarel.

El enfriamiento o refrigeración de estos transformadores puede ser por aire o por agua.

Los transformadores tipo seco, tienen como medio aislante lo siguiente:

- Aire, gases (R-113, nitrógeno, etc)
- Compuesto seco (papel, resina, barniz, etc.)

Tanto los transformadores sumergidos en líquido, como los tipos secos, requieren de materiales aislantes sólidos especialmente en las partes donde existe una gran diferencia de potencial.

Los materiales sólidos deben poseer dos propiedades fundamentales para que cumplan su

función satisfactoriamente:

- a.) Deben resistir las sollicitaciones tanto eléctricas como mecánicas debidas a los voltajes de operación.
- b.) Deben ser un aislamiento de tan baja conductividad (muy mal conductor) que disipe cualquier corriente por pequeña que sea.

De acuerdo a estas propiedades el sistema de aislamiento debe estar formado por materiales que cumplan las siguientes funciones:

- Resistir los sobrevoltajes que ocurren en operaciones normales de cargas. Aquí se incluyen las ondas transientes y de impulso.
- Resistir las sollicitaciones mecánicas y térmicas (calor) debidas a un cortocircuito.
- Ser un material que permita una buena transferencia de calor hacia el medio refrigerante, no permitiendo una acumulación excesiva de calor.

La elección del aislamiento se hace generalmente en base a los posibles sobrevoltajes a que pueda estar sometido y considerando las pérdidas de sus propiedades originales al transcurrir cierto tiempo bajo solicitudes normales de operación que podría denominarse tiempo de envejecimiento normal del aislamiento. Para que el aislamiento se mantenga en condiciones aceptables se requiere alcanzar lo que se denomina la coordinación de aislamiento, objetivo que se logra al conocer las partes y características más importantes del sistema de aislamiento.

Inicialmente la clase de aislamiento de los devanados primarios y secundarios dependía del voltaje nominal de operación. Este aislamiento no podía resistir los sobrevoltajes transientes causados por descargas atmosféricas, maniobras en el sistema, etc. Actualmente es más importante expresar el aislamiento en termino del nivel básico de aislamiento ( o simplemente BIL ) en vez de la clase de aislamiento.

El BIL es el valor de cresta de la onda de sobrevoltaje que pueda resistir satisfactoriamente el sistema de aislamiento de una unidad.

Un transformador diseñado y aislado para una clase de 15 Kv., con un nivel básico de aislamiento (BIL) 95 Kv., debe ser capaz de soportar un impulso de  $1.2 \times 50$  usg (Figura 2.2) de 95 Kv de cresta, de polaridades positiva o negativa, sin que sufra daño en el aislamiento, como perforación o ruptura.

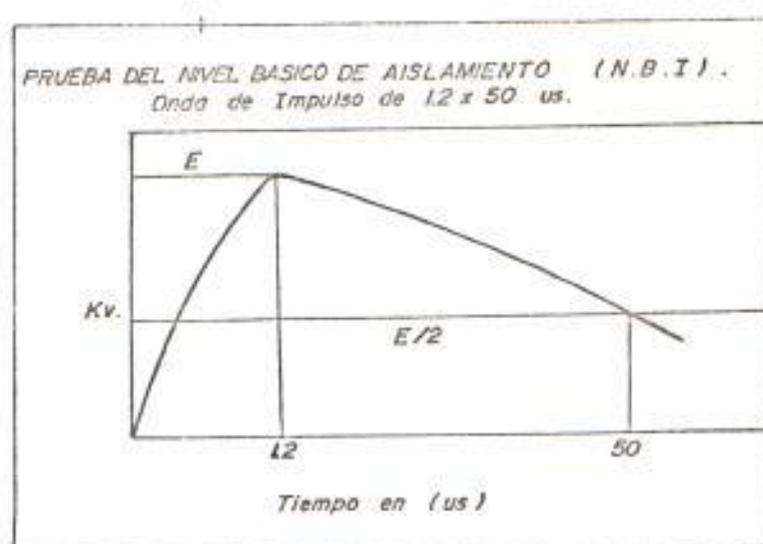


Fig. 2.2 Prueba del nivel básico de aislamiento

Otra prueba que indica la calidad del aislamiento es la de espira a espira, en la cual el transformador es sometido a frentes de

ondas rápidas y con un ensayo de ondas cortas. El transformador clase 15 Kv, debe ser capaz de soportar una onda de 1.2 a 50 usg, valor de cresta 110 Kv, cortada en 1.8 usg.

La tabla 2.1 muestra las características relativas del aislamiento de transformador de varias clases de tensión de distribución.

### 2.2.2 Reguladores

El regulador de voltaje mantiene la tensión de línea constante dentro de un límite predeterminado, asegura una eficiente operación de los equipos eléctricos y disminuye la posibilidad de daño debido a sobre o bajos voltajes.

Unos de los fabricantes de R.V., la McGraw-Edinson suministra reguladores de voltaje de tres tipos: el VR-32, el SR-32 y el autorregulable. El regulador recomendado para sistema de distribución es el VR-32, cuyas características de aislamiento se mencionan a continuación.

Tabla 2.1  
Prueba estandar para aislamiento de Transformadores  
de Aceite

		ENSAYO DE IMPULSO	
		ONDA CORTADA : ONDA PLENA	
Clase de Voltaje Nominal Kv. ras	Rango de Voltaje de Impulso Disruptivo Kv. cresta	Prueba del Nivel: de aislamiento Disruptivo a baja frecuencia Kv. ras	Tiempo minimo de disrupción (us)
		Kv. Cresta	1.2 x 50 us Kv. cresta
TIPO		TIPO	TIPO
Dist.	Pot.	Dist. ; Pot.	Dist. ; Pot.
1.2	30 ; 45	10 ; 10	1.0 ; 1.5
2.5	45 ; 60	15 ; 15	1.3 ; 1.5
5.0	60 ; 75	19 ; 19	1.5 ; 1.6
8.7	75 ; 95	26 ; 26	1.6 ; 1.8
15.0	95 ; 110	34 ; 34	1.8 ; 2.0
25.0	150 ; 150	60 ; 60	3.0 ; 3.0
34.5	200 ; 200	70 ; 230	3.0 ; 200

Tabla 2.2

## Características de Aislamiento del Regulador

Capacidad KVA.	Capacidad Amp.	Nivel Básico de Aislamiento (BIL)Kv.
-	219	95
288	200	150

Este tipo de regulador puede ser usado en los circuitos de distribución con voltajes nominales de 2400 hasta 19920 en delta o 2400/4160 hasta 34500/19920 V. estrella multiterrizado.

### 2.2.3 Capacitores

Los capacitores deben ser diseñados de tal forma que puedan resistir una onda de impulso de 95 Kv. de valor de cresta y de 1.2 por 50 useg. de duración.

### 2.2.4 Reconectores

Un reconector automático es un equipo con la suficiente inteligencia para sentir y medir la duración de una sobrecorriente e interrumpir la sobrecorriente y recerrarse

automáticamente reenergizando la línea, si la falla es permanente, el reconectador se bloqueará después de un número prefijado de operaciones generalmente 3 ó 4 y así aislar la sección fallada de la parte no afectada del sistema.

Los valores nominales de los reconectadores consideran los siguientes parámetros.

Voltaje Máximo.

Frecuencia.

Corriente Continua.

Mínima Corriente de Disparo.

Corriente Simétrica de Interrupción.

Corriente Máxima.

BIL.

El parámetro que define la característica de aislamiento de los reconectadores es el nivel básico de aislamiento (BIL).

El nivel básico de aislamiento que se usa para reconectadores conectados al sistema de distribución es de 95 Kv hasta 150 Kv. El impulso de voltaje al que es sometido en las pruebas de aislamiento este equipo es  $1.2 \times$

50 usg. En la Tabla 2.3 se presentan las características del reconector de aceite, entre las que destaca el nivel de aislamiento.

#### 2.2.5 Seccionalizadores

Se define como, un equipo automático que puede abrir el circuito principal al que esta conectado, después de sensar y responder a un número predeterminado de impulsos sucesivos de corrientes de igual o mayor valor a una magnitud predeterminada: se abre mientras el circuito principal está desenergizado, también puede ser operado para interrumpir cargas.

El nivel básico de aislamiento (BIL) de un seccionalizador, será escogido de tal forma que sea consistente con el nivel de aislamiento de otros equipos del sistema donde el seccionalizador va a ser aplicado.

En la tabla 2.4 se encuentran las características del seccionalizador entre las que se destaca su nivel de aislamiento (Kv).

Tabla 2.3  
Características de Voltajes y Corriente de Diseño  
de los Reconectores

Línea No.	Clase de Voltaje Nominal Kv ras	Rango Máximo de Voltaje	Rango de Voltaje de Impulso Disruptivo Kv. Cresta	Prueba de Nivel de Anclamiento Disruptivo a baja Frecuencia		Rango de Corriente en Amperios 60 Hz (A)	
				Kv ras (4)	1 min : 10 seg : Seco : húmedo (5) : (6)	Capacidad Continua (7)	Capacidad de Corriente Simétrica de Interrupción ras (8)
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)
Reconectores Monofásicos							
1	14.4	15.0	95	35	30	50	1250
2	14.4	15.5	110	50	45	100	2000
3	14.4	15.5	110	50	45	280	4000
4	14.4	15.5	110	50	45	560	8000
5	24.9	27.0	150	70	60	100	2.500
6	24.9	27.0	150	60	50	280	4000
7	34.5	38.0	150	60	50	560	8000
Reconectores Trifásicos							
8	14.4	15.0	95	35	30	50	1250
9	14.4	15.5	110	50	45	100	2000
10	14.4	15.5	110	50	45	280	4000
11	14.4	15.5	110	50	45	400	4000
12	14.4	15.5	110	50	45	560	16000
13	14.4	15.5	110	50	45	1120	16000
14	24.9	27.0	150	60	50	100	2.500
15	24.9	27.0	150	60	50	560	16000
16	34.5	38.0	150	70	60	400	6000
17	34.5	38.0	200	80	70	1120	12000
18	46.0	49.3	250	105	95	560	10000

Tabla 2.4  
Características de Voltajes y Corriente de Diseño  
de los Seccionalizadores

Identificación		Rango	Rango de Voltaje de	Prueba de Nivel de Aislamiento	Rango de Corriente en Amperios		
Línea No.	Clase de Voltaje Nominal Kv ras	Máximo de Voltaje	de Impulso Disruptivo Kv. Cresta	Disruptivo a Baja Frecuencia Kv rms (1)	60 Hz (2)		Capacidad de Corriente Simétrica de Interrupción ras
(1)	(2)	(3)	(4)	(5) : (6)	(7)	(8)	(9)
Seccionalizadores Monofásicos							
1	14.4	15.0	95	35 : 30	200	440	
2	14.4	15.0	125	42 : 36	200	200	
3	14.4	15.0	125	42 : 36	200	440	
4	24.9	27.0	125	60 : 50	200	---	
Seccionalizadores Trifásicos							
5	14.4	15.5	110	50 : 45	200	440	
6	14.4	15.5	110	50 : 45	400	880	
7	14.4	15.5	110	50 : 45	600	1320	
8	34.5	38.0	150	70 : 60	400	880	

### 2.3 PROTECCION DE LOS TRANSFORMADORES

Las descargas atmosféricas directas o indirectas sobre las líneas aéreas que conforman el sistema al que pertenece un transformador, significan la fuente más importante de sobretensiones.

Si el valor de estas sobretensiones es demasiado alto, puede ocurrir que el aislamiento no pueda resistir y se perfore. Por esta razón, se deben tomar medidas para disminuir los efectos de estos tipos de sobretensiones. Todas estas medidas tienden a reducir la magnitud y la pendiente del frente de onda, que alcanza la máquina protegida, a valores que puedan ser tolerados por el aislamiento (BIL).

Previamente a la decisión sobre que tipo de dispositivos se va a utilizar, para la protección de un determinado transformador, se deberá evaluar la frecuencia y magnitud de las ondas de sobretensiones.

La frecuencia de las descargas es función del nivel isoceraunico de la zona y del área de atracción de las líneas integrantes del sistema.

La magnitud de voltaje depende de los kilo-amperios de la descarga, de la presencia de líneas a tierra, del nivel de aislamiento de las líneas, de las características de los pararrayos ubicados en el sistema y de la configuración del mismo.

### 2.3.1 Protección de los Transformadores Usando Descargadores Aéreos.

El dispositivo más simple, está constituido por varillas conectadas entre un punto de tensión y tierra, dejando entre ellas una separación ajustada de acuerdo al valor máximo de tensión que se desea aceptar. Estas varillas así instaladas constituyen un camino a tierra en paralelo con los aisladores de porcelana propios del sistema. Si bien es cierto, que este dispositivo es muy barato, tiene algunas desventajas entre las que podemos citar:

1. No protege aislamiento reducido de los transformadores.
2. Cuando opera representa una falla de línea a tierra, causando innecesariamente quema de fusibles.

3. El descargador aéreo opera con una lentitud inicial, por lo que parte de la sobretensión alcanza al equipo que se supone está protegido. En esta forma, puede ocurrir que algún sistema aislante líquido o sólido, no sea capaz de resistir el esfuerzo a que resulta sometido.

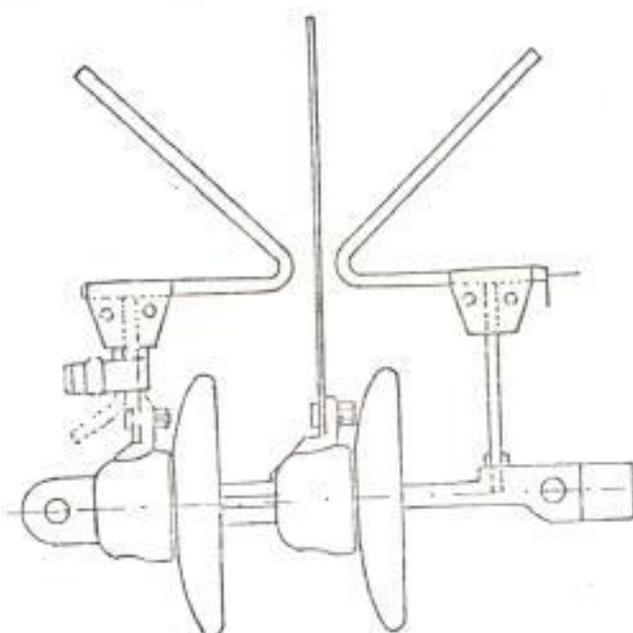


Fig. 2.3 Descargador aéreo

A continuación se presentan los gráficos demostrativos sobre la protección dada por un descargador aéreo.

En el caso de una onda de impulso, tomada como ejemplo en el numeral 2.1., el descargador aéreo corta la onda a 80 KV protegiendo el transformador.

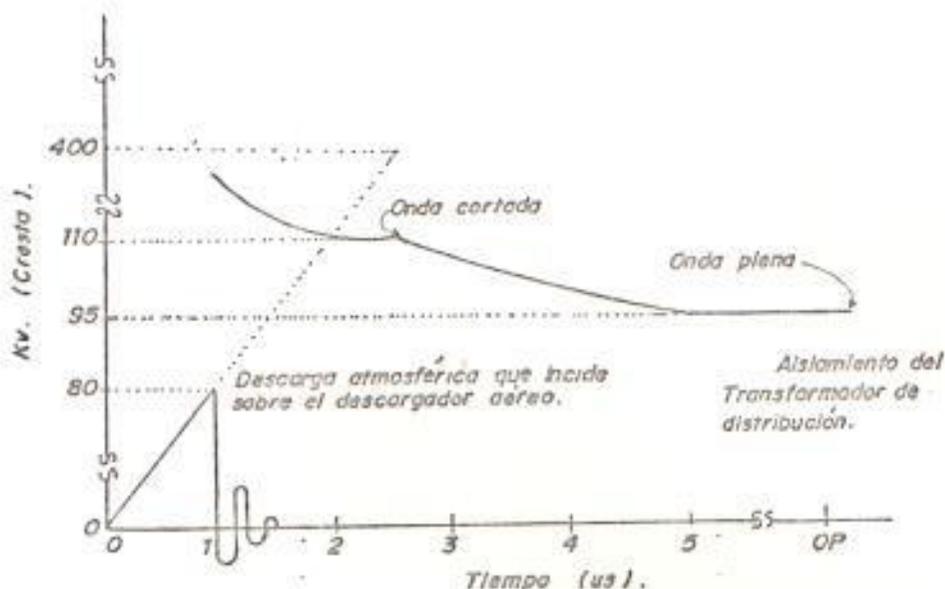


Fig. 2.4 Protección por un descargador aéreo

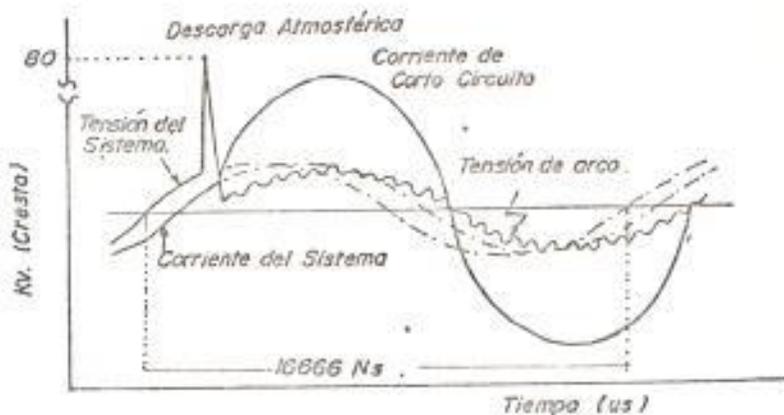


Fig. 2.5 Corriente y tensión del sistema en el momento de la descarga

### 2.3.2 Protección de los Transformadores Usando Pararrayos

Los pararrayos modernos, son constituidos de varios bloques o cadena de descargadores en

serie, con bloques de material de resistencia no lineal, envueltos por porcelana. La característica de estas resistencias son tales que su valor es pequeño cuando son recorrido por altas corrientes y aumentan su valor con pequeñas corrientes.

Cuando una onda de sobretensión alcanza al pararrayo se inicia la conducción a través de él al iniciarse la descarga en sus elementos. Apenas esto ocurre, el valor de la sobretensión se reduce al dado por  $I \times R$  en que  $R$  es la resistencia del pararrayo con altas corrientes, e  $I$  el de la intensidad de descarga. Al final de la descarga cuando  $I$  baja,  $R$  sube, terminando la operación con el corte de cualquier pequeño valor de corriente que pueda quedar, originado por la tensión nominal de la red.

De este modo: un pararrayo debe tener las siguientes características.

1. Proteger los transformadores contra descarga, con un margen superior de 20%.
2. Limitar la corriente subsiguiente de 60Hz a nivel bajo.

3. Eliminar la operación de los equipos de protección.

A continuación se presentan los gráficos demostrativos sobre la protección dada por un pararrayo, cuando llega una onda de impulso, tomada del ejemplo en el numeral 2.1.

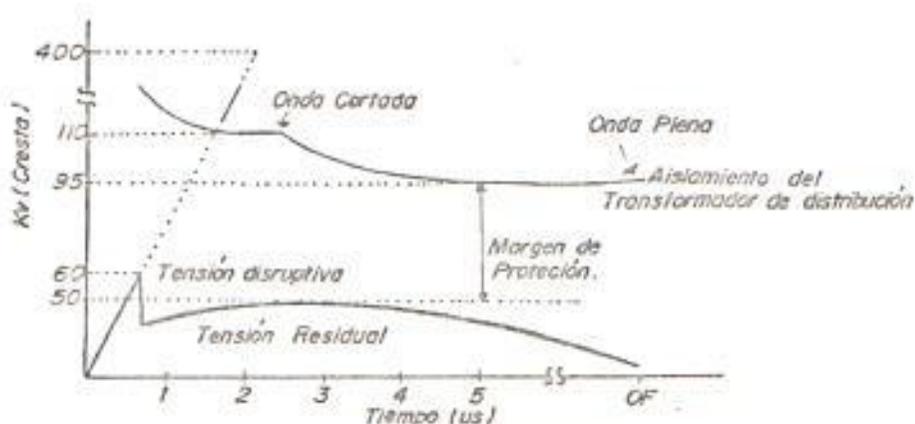


Fig. 2.6 Protección dada por un pararrayo

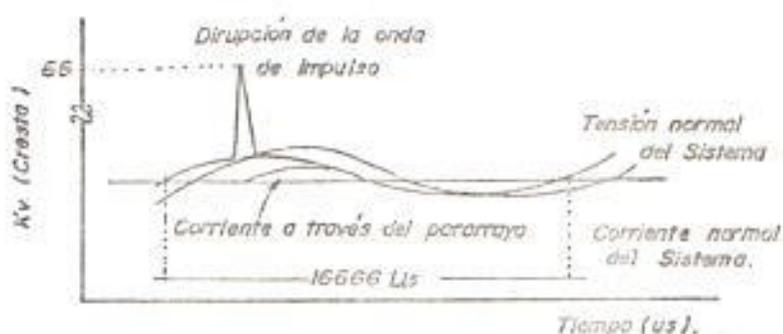


Fig. 2.7 Corriente y tensión en el momento de la descarga

De esta forma: para verificar si un pararrayo protege adecuadamente un transformador, deberán ser comparadas las siguientes características.

1. La tensión disruptiva máxima para frente de onda de los pararrayos, deberá ser inferior a 0.8 veces la tensión soportada de la onda cortada del transformador.
2. La tensión de descarga del pararrayo, deberá ser inferior a 0.8 veces el nivel básico de aislamiento (BIL) del transformador.

## 2.2 PROTECCION DE LOS REGULADORRES

La protección contra sobretensiones de equipos instalados en los sistema de altos costos o responsabilidad, tales como: reguladores de tensión, cables submarinos, entrada subterránea de aeropuerto u hospitales, etc., puede ser mejorada con la adopción de un esquema a seguir para regulador de tensión:



Fig. 2.8 Protección del regulador

El regulador de tensión normalmente se encuentra instalado en líneas largas y por lo tanto está sujeto a un elevado número de sobretensiones provenientes de ambos lados del circuito. Además de la protección normal realizada en el punto de instalación del regulador que consiste en: pararrayos en el lado de la fuente, pararrayos en el lado de la carga y pararrayos en serie acoplados al tanque y convenientemente aplicados dos conjuntos de pararrayos ubicados en sitios adyacentes al punto de instalación de los reguladores. Este conjunto de pararrayos instalados en la parte adyacente son llamados "pararrayos exploradores", tienen la función de eliminar y atenuar la casi totalidad de las sobretensiones a las que estaría sometido el aislamiento del equipo. Conviene que los dispositivos instalados junto al regulador tengan la tarea de eliminar solamente las tensiones no extinguidas por los pararrayos exploradores.

## 2.5 PROTECCION DE CAPACITORES

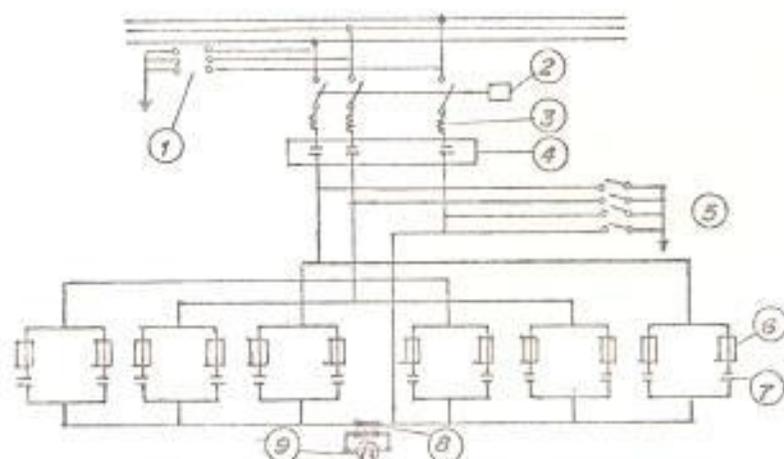
La protección de capacitores contra sobretensiones debido a descargas atmosféricas se la realiza por medio de pararrayos de tipo distribución (ver figura 2.9).

Los pararrayos son recomendados para los siguientes conexiones de capacitores independientemente de su capacidad: banco conectado en delta, banco conectado en estrella con neutro flotante, banco conectado en estrella sin neutro aterrizado y banco conmutable sin considerar la conexión. Los pararrayos son recomendados también para todas las conexiones estrella, para neutro solidamente aterrizado, bancos trifásicos con 500 KVAR nominales o menos. Pero, por encima de los 500 KVAR, bancos sin interruptores, de este tipo deberían ser estudiados individualmente para determinar la necesidad de protección por pararrayo.

Los bancos grandes sin interruptor solidamente aterrizado no son fácilmente cargables a un voltaje peligroso, por un impulso de descarga atmosférica. La protección de pararrayos podría ser innecesaria sobre estos bancos, debido a que los impulsos por descarga atmosférica que tienen una magnitud sufi-

ciente para cargar una o mas fases de un banco de 500 KVAR, ocurren con poca frecuencia.

Los pararrayos deberían estar instalados sobre el lado de la fuente del switch del capacitor de todos los bancos conmutables. Esta ubicación es practicada generalmente debido a posibles sobrevoltajes en el capacitor desde el switch de reconexión (un arco). Tales sobrevoltajes pueden causar graves daños sobre los pararrayos de impulso y podrían inclusive a una falla en el pararrayo.



- 1- PARARRAYOS - CONTRA SOBRETENSIONES Y DESCARGA ATMOSFERICAS
- 2- SECCIONADORES - AISLAMIENTO DEL BANCO.
- 3- REACTOR - LIMITACION DE LA CORRIENTE DE CONEXION.
- 4- INTERRUPTOR / DISYUNTOR - OPERACION DEL BANCO.
- 5- SECCIONADOR DE PUESTA A TIERRA - MANTENIMIENTO.
- 6- FUSIBLE - PROTECCION DEL CAPACITOR.
- 7- CAPACITOR.
- 8- TRANSFORMADOR DE CORRIENTE - PROTECCION.
- 9- CONTACTOR DE SOBRECORRIENTE - PROTECCION.

Fig. 2.9 Protección de banco de capacitores

## 2.6 PROTECCION DE LOS RECONECTADORES

La protección de reconectores se realiza de la siguiente manera: los pararrayos son recomendados para el lado de la fuente y el lado de la carga de cada fase de un reconector, para suministrar una completa protección contra descarga atmosférica. Si solamente un pararrayo va ser usado por fase-reconector, debería estar instalado del lado de la fuente. Un impulso de descarga atmosférica podría producir un contorno sobre el bushing del lado de la fuente y causar una falla en el sistema de línea a tierra, la cual podría ser despejada por un reconector de respaldo. Un pararrayo sobre el lado de la fuente podría manipular impulso de descargas atmosféricas por si mismo y podría despejar la corriente que sigue a la frecuencia de potencia.

## 2.7 PROTECCION DE LOS SECCIONALIZADORES

La protección del seccionalizador dependerá de la importancia de la carga, lo que determinará que se coloque o no protección contra sobrevoltaje debido a descargas atmosféricas.

## 2.8 EFECTOS DE LAS CORRIENTES DE LOS RAYOS EN LOS PORTAFUSIBLES

Generalmente debido a tormentas eléctricas se producen en los sistemas eléctricos de distribución la quema de un elevado número de fusibles.

La casi totalidad de la quema de los fusibles es motivada por fenómenos transitorios, los circuitos vuelven a su normalidad con un simple cambio de los fusibles quemados. Mientras tanto, con el incremento de sistemas eléctricos rurales, el aumento del costo de combustible y la exigencia de los consumidores de una adecuada continuidad en el suministro de energía, resulta altamente inconveniente una quema excesiva en los fusibles.

La solución técnica recomendada para la eliminación del problema es la instalación de los reconectores y seccionalizadores, a lo largo de la línea de distribución o de los ramales rurales más extensos.

Considerando, sin embargo, un elevado índice iso-ceraunico y una tasa de falla por kilómetro de línea primaria elevada, resulta apremiante que los fusibles continúen siendo utilizados para proteger

ramales rurales de extensión corta y media, para la protección usual de transformadores de distribución y circuitos secundarios.

De esta manera los fusibles que serán utilizados deben asociarse tanto a las corrientes de los rayos como a la corriente posterior proveniente de las operaciones de los pararrayos.

La causa principal de la quema de los fusibles es provocada por una onda viajera de tensión que sobrepasa la resistencia de impulso de la estructura de distribución, provoca una ruptura de aislamiento y el probable cortocircuito entre fase y tierra, que en estas condiciones ocasiona la fusión del fusible.

Otra causa importante de la quema de fusibles es el camino de la corriente de impulso a través de sí mismo, provocando una fusión. La resistencia de los fusibles a la corriente de rayo es un fenómeno que necesita mayor investigación.

Con el propósito de suministrar alguna información sobre el tema, se presenta una serie de datos obtenidos en uno los artículos de la General Electric Company. (ver fig. 2.10).

A continuación (tabla 2.5), se presenta la equivalencia entre los fusibles tipo K-T y N, tanto para la protección de sobrecorriente (ondas de 60 Hz) como las corrientes de impulso.

Conviene recordar que la colocación de un pararrayo en una estructura antes y después de las cajas fusibles, evitará un camino de corriente debido a descargas atmosféricas a través de ellos.

Otra causa de la quema de los fusibles es debido a la operación de los pararrayos de distribución, cuando las corrientes de sobretensión sobrepasan la tensión disruptiva de los equipos. Es conocido que la duración máxima de corriente posterior a la operación del pararrayo no tiene mas que medio ciclo y no es muy elevada (tabla 2.6), debido a la atenuación provocada por la resistencia no lineal del pararrayo.

Es necesario destacar que un pararrayo puede no estar desempeñando adecuadamente sus funciones y demorar algunos ciclos para la interrupción de la corriente posterior. Esta condición presentada en la tabla anterior no puede ser aplicada y seguramente serán necesarios valores menores de corriente para destruir el fusible. Este defecto

Tabla 2.5  
Equivalencia entre los fusibles tipo K-T y N

EET NEMA TIPO "K"	EQUIVALENCIA ENTRE TIPO "K" Y TIPO "N"	
	Para (†) Protección de Sobrecorriente	Para Valor aproximado de corriente de impulso
1 K	1 N	1 N
2 K	2 N	2 N
3 K	3 N	3 N
6 K	8 N	8 N
8 K	10 N	10 N
10 K	15 N	15 N
12 K	20 N	20 N
15 K	25 N	30 N
20 K	30 N	40 N
25 K	40 N	45 N
30 K	45 N	50 N
40 K	50 N	-

EET NEMA TIPO "T"	EQUIVALENCIA ENTRE TIPO "T" Y TIPO "N"	
	Para (†) Protección de Sobrecorriente	Para Valor aproximado de corriente de impulso
1 HS (†††)	1 N	5 N
2 HS (†††)	2 N	5 N
3 HS (†††)	3 N	5 N
6 T	8 N	15 N
8 T	10 N	20 N
10 T	15 N	30 N
12 T	20 N	40 N
15 T	25 N	45 N
20 T	30 N	50 N
25 T	40 N	-
30 T	45 N	-
40 T	50 N	-

(†) Basados en las características típico corriente de 300 segundos, y la equivalencia de corriente que pasa continuamente por el portafusible.

(††) Fusible GE de 5 A "Hi-Surge", encontrados en las Normas EET-NEMA para valores nominales 1T, 2T, y 3T.

de los p... también la causa de la  
 quema excesiva... operación normal de  
 los equipos de... automática.

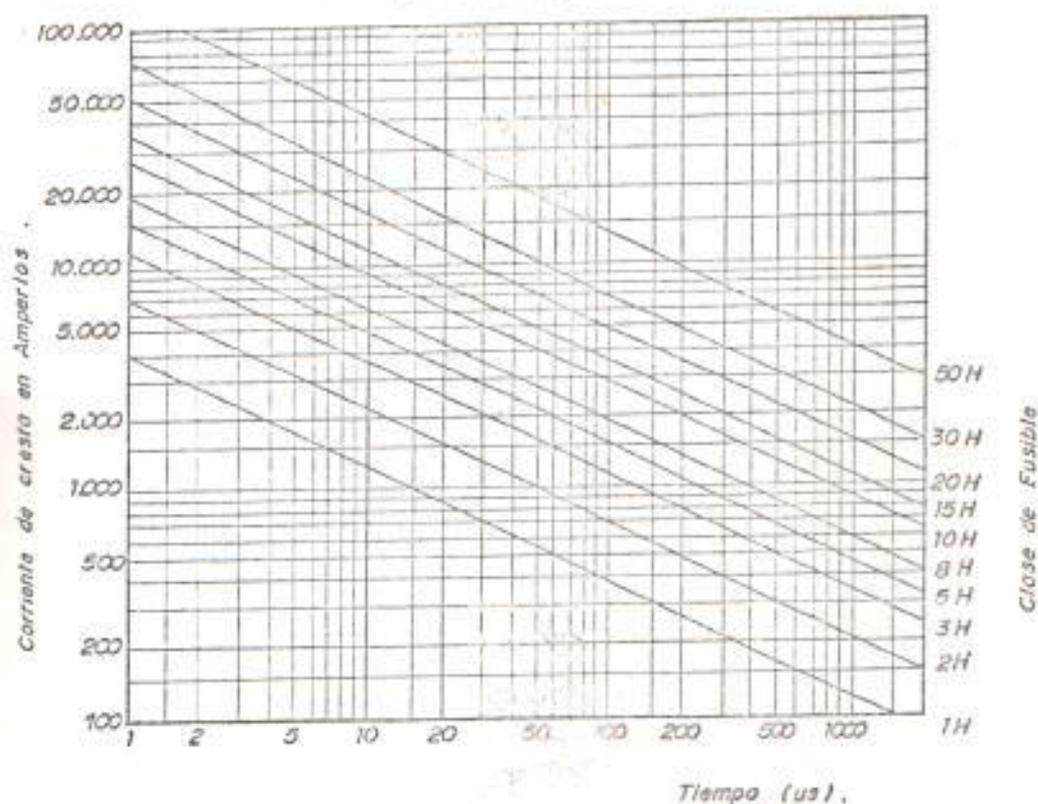


Fig. 2.10 Relación entre la corriente de impulso y el tiempo de fusión de los fusibles

Tabla 2.6

Relación entre la máxima corriente eficaz con duración de 1/2 ciclo que no destruye el fusible indicado.

FUSIBLE	3H	6K	8K	10K	12K	15K	20K	25K	40K
MAX. AMP. EFICAZ	103	160	200	262	320	405	520	650	1120

## CAPITULO III

### AISLAMIENTO DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

El aislamiento de una estructura de una línea de distribución esta compuesto del aislamiento proporcionado por el aislador, por el tipo y longitud de la cruceta, por la posición del brazo pie de amigo, por el tipo de poste utilizado y por un diseño de la estructura completa.

#### 3.1 AISLADORES

Los aisladores tipo pin normalmente utilizados en las líneas de 15 Kv, presentan una tensión crítica de descarga bajo impulso (en seco) del orden de 100 Kv., donde cada unidad de disco tiene 76 Kv. (4). (son siempre instaladas mínimo dos unidades).

La influencia de la lluvia en la tensión crítica de descarga, en zonas con polución, puede ser evaluada en una reducción del valor de arriba cerca del 35%.

#### 3.2 AISLAMIENTO PROPORCIONADO POR LA MADERA

Además de las características mecánicas de las cru-

cetas y de los postes de madera, ya bien conocidas y poco utilizadas por las Empresas Eléctricas Regionales del Ecuador. La madera posee excelentes propiedades eléctricas, que adecuadamente usadas, resultan en una sensible mejoría en la continuidad del suministro de energía y en la disminución del costo de mantenimiento de las redes y líneas de distribución.

Basado en las referencias bibliográficas citadas en (7), (8), (1), son presentadas a continuación algunas propiedades de la madera:

a. La resistencia de impulso de la madera depende directamente de la longitud y de la humedad, siendo poco influenciada por el clima (seco), por el tratamiento de la madera y por el tipo de madera.

Basado en la referencia bibliográfica mencionada en (7) se presenta a continuación, en la Fig. 3.1., un gráfico que relaciona la resistencia de impulso de la madera con la longitud de la madera.

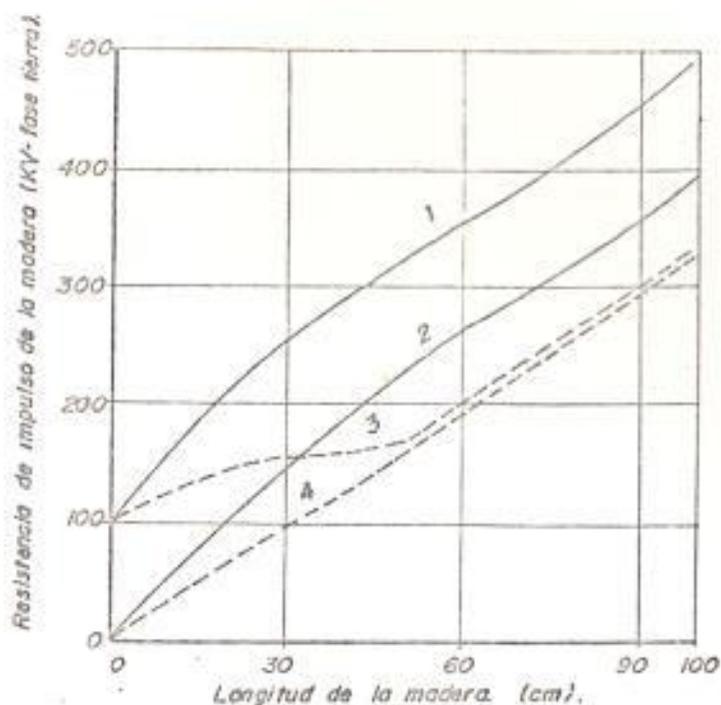


Fig. 3.1 Resistencia de impulso de la madera

1. Aislador de porcelana 15 Kv + madera seca.
2. Madera seca.
3. Aislador de porcelana 15 Kv + madera húmeda.
4. Madera húmeda.

b. Otra propiedad importante y poco conocida de la madera es su capacidad de extinguir la corriente de descarga, evitando que muchas de las disrupciones que ocurren en las redes y líneas sean seguidas por la corriente posterior de 60 Hz., que provoca daños e interrupciones en el sistema de distribución.

Sin embargo, para conseguir utilizar con éxito estas propiedades, hay la necesidad de efectuar

un diseño adecuado de la estructura, dado que la probabilidad de disrupción acontece seguida del arco de 60 Hz. que está relacionado con el gradiente de tensión eficaz por metro de madera que la estructura esta operando.

Recientes investigaciones efectuadas en Australia conforme a la referencia (9), muestran que esta propiedad de la madera es muy afectada por la humedad como se muestra en la Fig. 3.2., válido para poste de madera y para crucetas de madera húmeda.

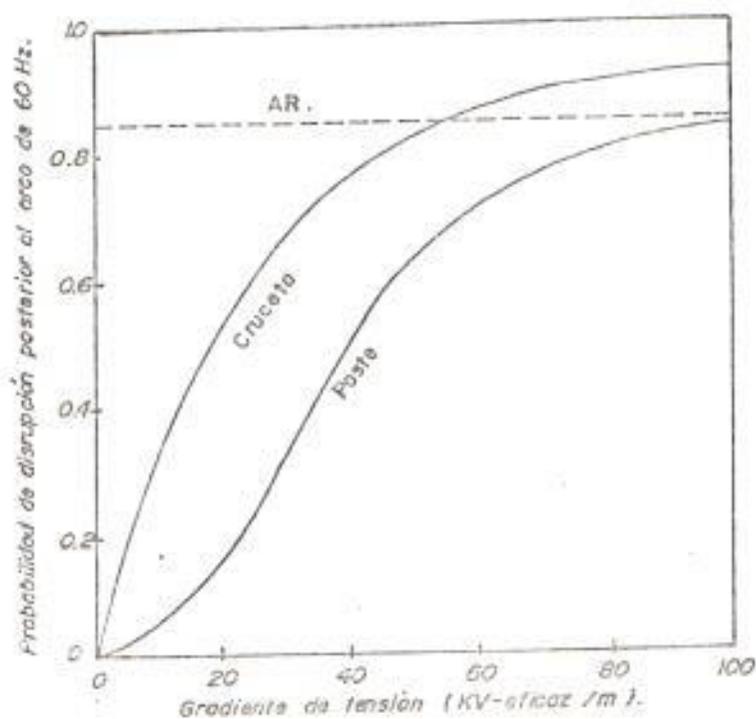


Fig. 3.2 Probabilidad de disrupción posterior al arco de 60 Hz.

Notas:

1. Curvas válidas para un único camino de disrupción.
2. Para el aire la probabilidad es de 0.85 independiente del gradiente.
3. En el caso de la madera seca las probabilidades son bastante menores a las presentadas arriba.

### 3.3 CONSIDERACIONES SOBRE EL AISLAMIENTO DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

En la práctica, el aislamiento de la línea a cierta distancia de un poste es aproximadamente el mismo como la de una distancia entre varilla con un espaciamiento igual a aquel entre los conductores. En un poste, el nivel de aislamiento es determinado por el aislamiento sólido entre los conductores e incluye el valor del aislamiento de la madera a emplearse. El aislamiento en el poste es casi invariablemente menor que el nivel de aislamiento a cierta distancia de el poste.

En un poste, el aislamiento de la estructura consistirá de aisladores de porcelana (o su equivalente) y porciones de la cruzeta o poste, si uno u otro es de madera. Si el herraje es acoplado y

conectado a conductores aterrizados, el nivel de aislamiento será el mismo como si poste de acero y cruceta de acero fueran usados. Si el herraje no fuerá conectado, habra una cierta cantidad de aislamiento ofrecida por la madera. Además el valor del aislamiento de la madera, podría también ser efectiva en prevenir los contorneos por descargas atmosféricas de la porcelana, desde el desarrollo de arco a la frecuencia de la red las cuales requerirán una operación del reconectador hasta despejar.

La madera tiene un muy pobre valor de aislamiento para operar al voltaje de frecuencia de duración larga. Aun a los esfuerzos de voltaje de unos pocos Kv por metros de madera, el riesgo de ignición de la madera es considerable debido al efecto de calentamiento de la corriente de fuga. Entonces, el aislamiento a la frecuencia de la red debe ser contenido en el aislamiento de la porcelana (o su equivalente).

Los niveles de aislamiento en general son usados para aisladores tipo pin que se muestran en la figura 3.3. Las curvas son trazadas como bandas para cubrir el rango de niveles normalmente utilizados. Las curvas están basada sobre las pruebas

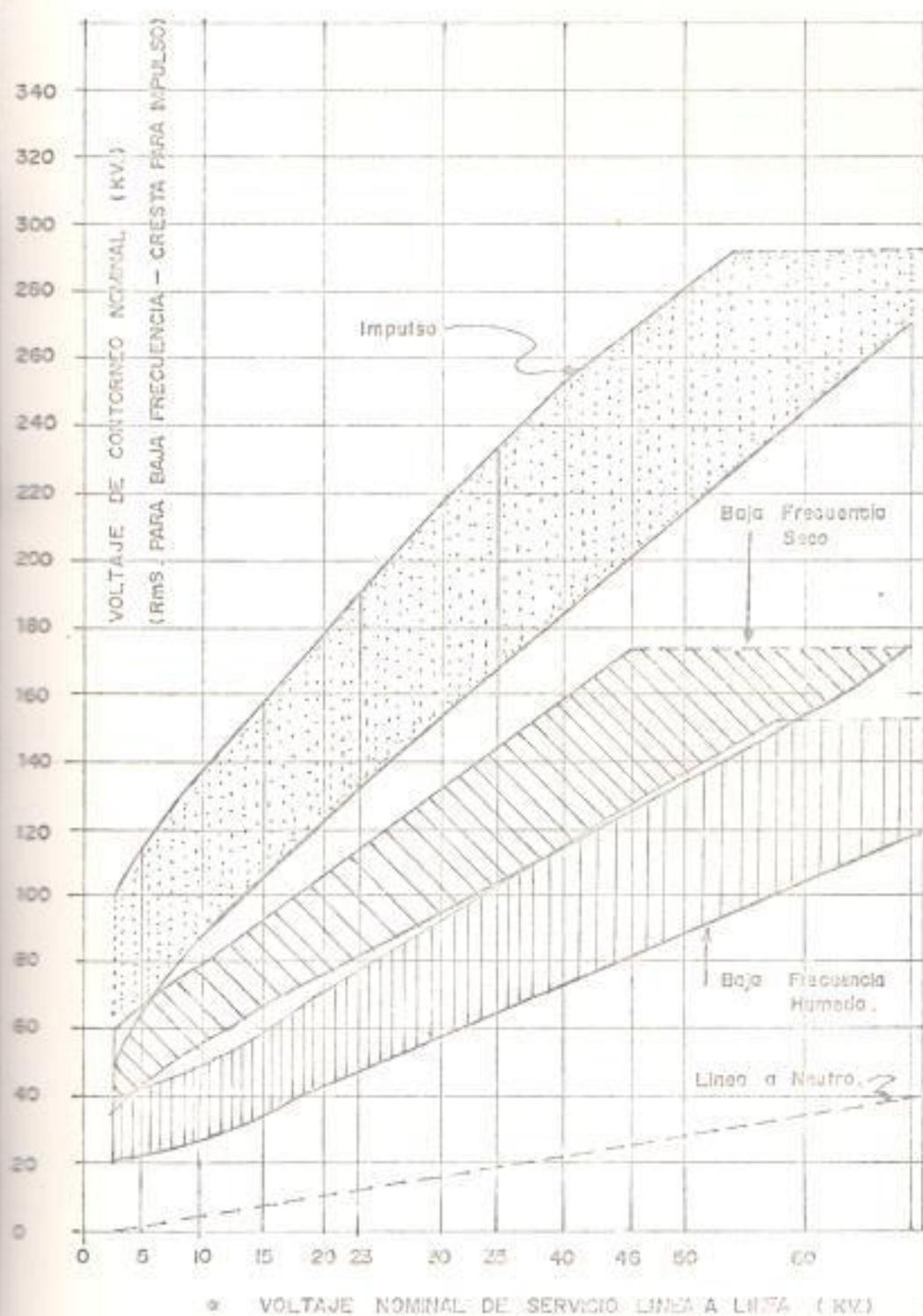


Fig. 3.3. Voltaje de contorno en el conductor.  
Comunmente usado en aplicaciones de conductores tipo p.c.

Standar USASI. y las bandas de impulso representan un impulso critico del contorno de voltaje que resulta de la polaridad la cual produce los valores más bajos (polaridad positiva, en la mayoría de los casos). Los niveles seleccionados dentro de la banda serán influenciados por la severidad del servicio, importancia de la línea y consideraciones económicas.

a. Valor del Aislamiento de la Madera en Combinación con la Porcelana

Las propiedades del aislamiento de la madera están fuertemente influenciadas por la humedad contenida de la madera y también por la naturaleza y duración de los esfuerzos de voltajes a través de ellos. El aislamiento de la madera tiene propiedades un poco diferentes cuando es combinado con el aislamiento de la porcelana que cuando se hace con madera sola. Como se mencionó anteriormente, a la frecuencia de la red, la madera ofrece un aislamiento muy pobre por lo cual el aislamiento debe ser suministrado por la porcelana. El beneficio de la madera como aislante, sin embargo, radica en su valor durante condiciones de impulso.

#### b. Propiedades de Extinción de Arco de la Madera

Varios investigadores han observado que los oscilogramas de voltaje de impulso de ruptura de la madera difieren significativamente de la ruptura normal del aire o a través de la porcelana. En el instante de una falla de aislamiento, el voltaje a través de la madera cae a un valor relativamente bajo, mientras que el aire o porcelana, cae a cero. El arco de voltaje a través de la madera luego crece gradualmente a medida que la corriente de descarga decrece. Después de la extinción del arco, un voltaje residual sale a través del camino del arco anterior. El esfuerzo dieléctrico de la madera desde este instante debe ser más grande que este voltaje residual si el arco es para prevenir la reignición. Esta información es la base para el siguiente criterio de diseño.

La probabilidad de un contorneo por descarga atmosférica desarrolla un arco de potencia como una función del gradiente de la frecuencia de potencia a través de la madera (se muestra en la figura 4.8). El gradiente de la frecuencia de potencia está dado en Kv rms dividido para la longitud del camino de la madera en pulgada,

Durante cierto tiempo es probable que la madera este sujeta a impulso de voltaje, esto es que la madera este húmeda debido a la lluvia que acompaña las tormentas. Entonces, el valor de aislamiento de la madera podría ser su valor húmedo. Estos valores húmedos, sin embargo, varían ampliamente y de manera general podrían tener un valor dentro del rango de 50 a 70% del valor de aislamiento seco. Debido a que los valores medidos bajo condiciones secas son más consistentes, se acostumbra a usar los valores secos como una base para determinar el valor del aislamiento de la madera y luego para multiplicar estos valores por un factor aproximadamente 0.65 para conseguir los valores equivalente a las condiciones húmedas.

Frecuentemente se utilizan los datos mostrado en las figuras 3.4 a 3.6 para las contribuciones de voltajes de aislamiento de la madera en combinación con la porcelana. Estos valores son añadidos al valor de impulso para la porcelana. El dato señala que 2 useg van a ser utilizado para representar directamente las condiciones de descarga atmosférica y los valores de contorneos críticos para voltajes inducido y otras condiciones de onda larga.

Por examen de la curva, se observa que el gradiente de 0.8 Kv por pulgada da una probabilidad de arco de potencia del 22% y que un gradiente de 0.5 Kv por pulgada da una probabilidad del 6%. Las propiedades de extinción del arco de la madera son también afectadas para alguna extensión por los valores instantáneos de los voltajes del sistema de la red en el momento del contorno y también por la corriente de falla disponible. Las condiciones más favorables da resultado los cuales concuerdan con los datos de la figura 4.8. Otros materiales podrían también tener efecto de extinción de un arco. Para el mismo efecto, la longitud de fibra de vidrio debería ser alrededor del 40% más grande que la longitud de la madera.

c. Fallas Mecánicas a la Madera debido a Corriente de Impulso

El uso de la madera como un aislador implica la posibilidad de falla mecánica de los efectos disruptivos de las corrientes de impulso. La mayoría de trabajadores infieren que es necesario controlar los caminos de contorneos cerca de la madera de tal manera que el daño mecánico será minimizado; esto es particularmente reco-

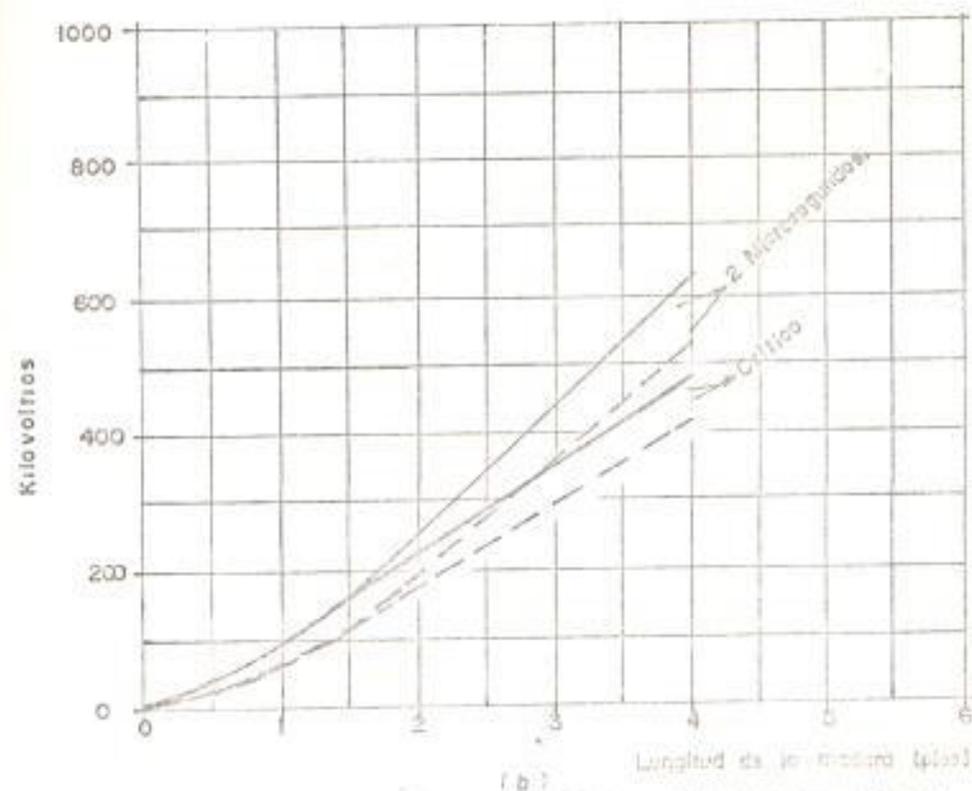
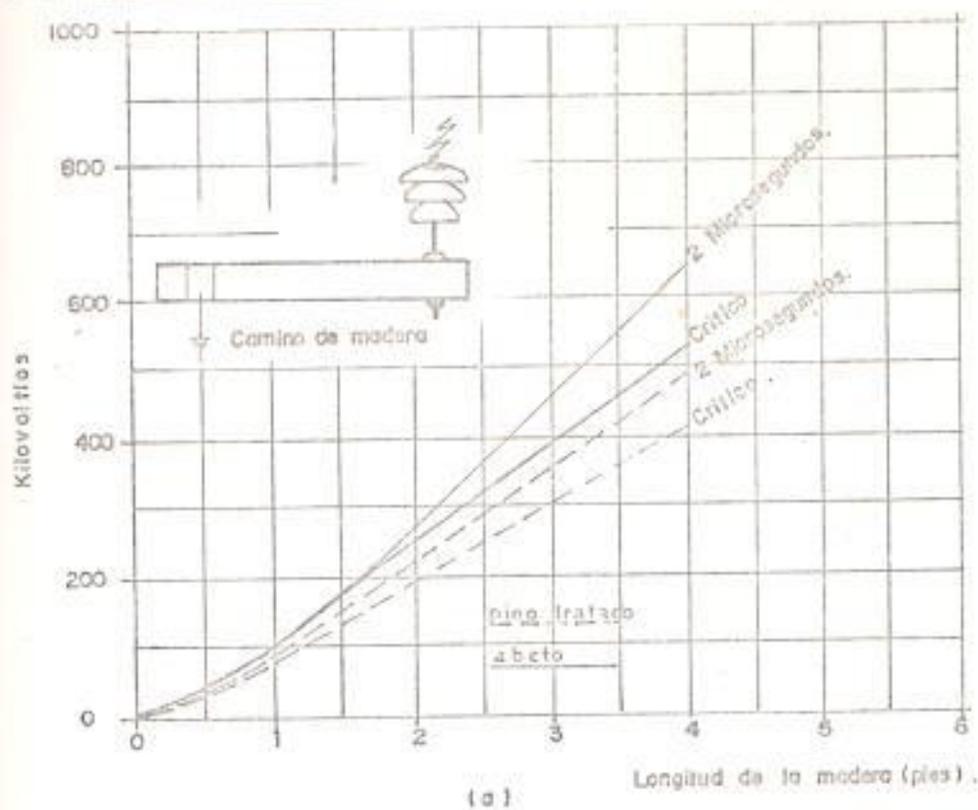


Fig. 3.4. Abstracción de energía en el punto crítico a los circuitos tipo pin por la conexión del extremo de longitud positiva 15 x 45 us (a), onda de polaridad negativa 15 x 45 us.

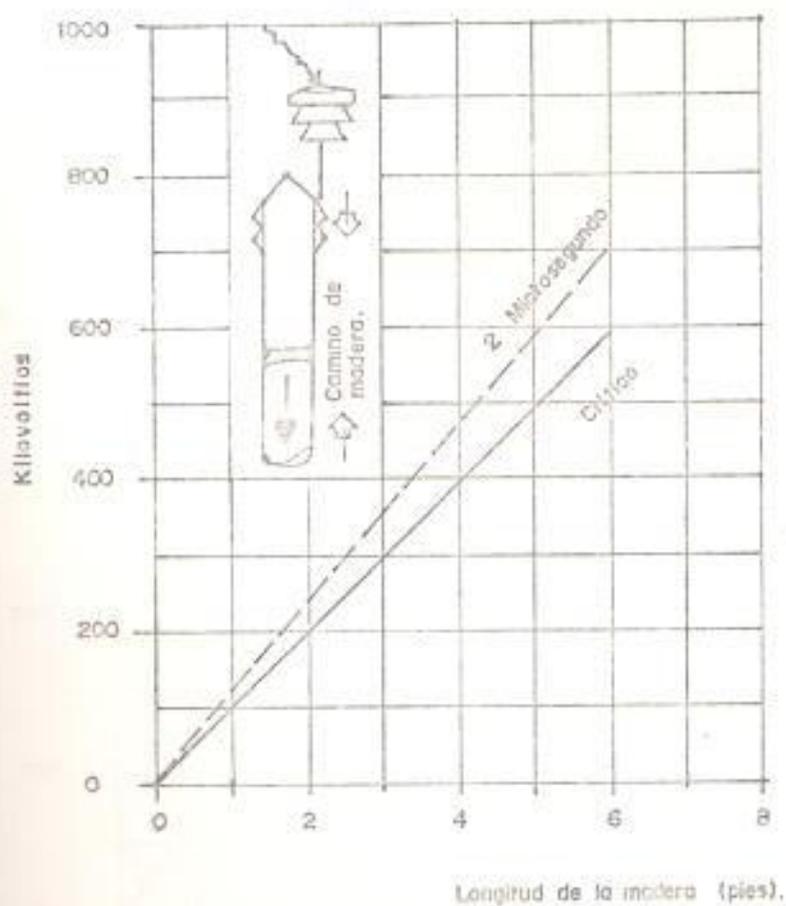


Fig 3.5 Aislamiento de Impulso distribuido a los aisladores tipo pin por secciones de poste (pino tratado).  
Onda polaridad positiva y negativa de  $15 \times 40$  us.

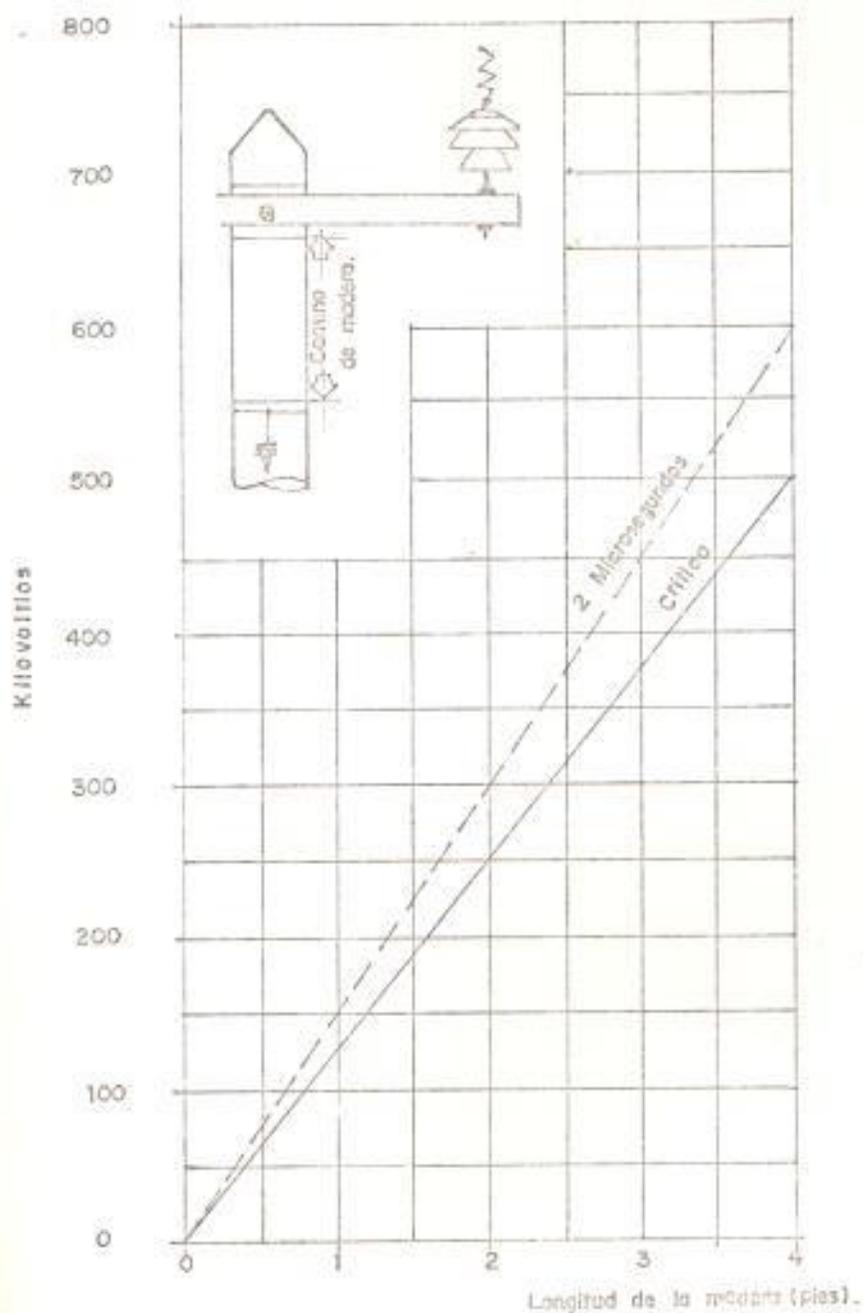


Fig. 3.6. Aislamiento de impulso añadido a combinaciones de disyuntores. Tipo pin y crucetas por asociaciones de postes (pino tratado).  
Onda de polaridad positiva y negativa  $15 \times 40 \mu s$ .

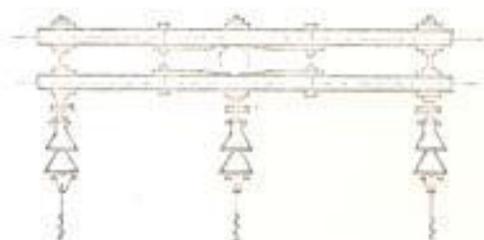
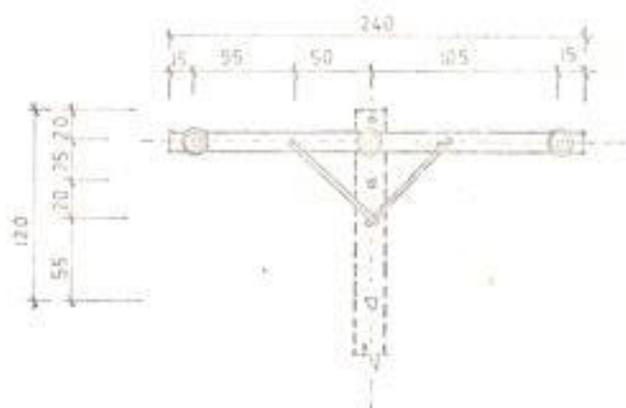
mendado para estructura desprotegida. Sin embargo, para usar la propiedad de extinción de arco, el diseño de la estructura debería ser tal que el camino de contorno involucrará varios miembros de madera.

Se ha encontrado que, se confirma que para el centro de la madera, 10/20 usg de corriente de impulso menor 10 Ka destruye completamente las crucetas de tamaño normal. En general, la destrucción de la madera se hace mas fácilmente debido a arcos internos de la madera verde y esta conclusión es sostenida por pruebas de impactos mecánicos.

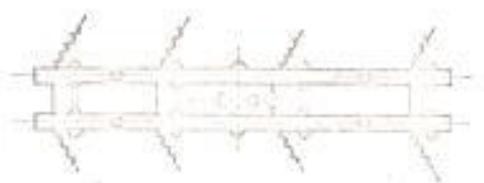
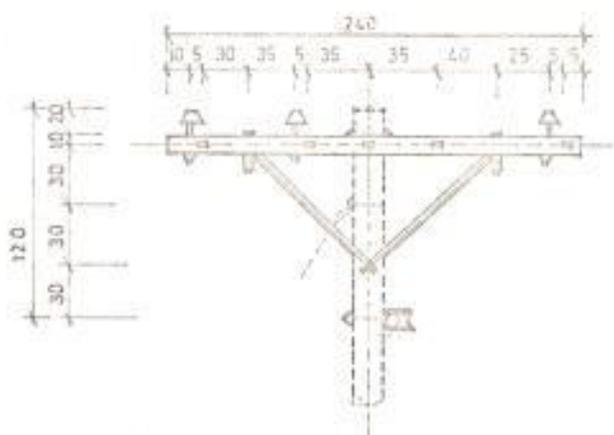
Sin embargo, el daño debido a las corrientes de impulso dependerá sobre el camino real del contorno; si es interno, daños severos resultarán; si es en "la cercanía de la superficie" relativamente un daño menor ocurrirá.

#### 3.4 ESTRUCTURAS ACTUALMENTE UTILIZADAS

Es de fundamental importancia para la estimación del BIL de una estructura o su diseño, que prácticamente irá a determinar el gradiente de tensión de operación, conforme a lo mostrado. En la Fig 3.7.,

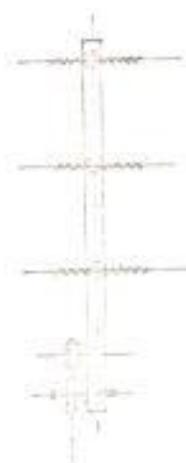
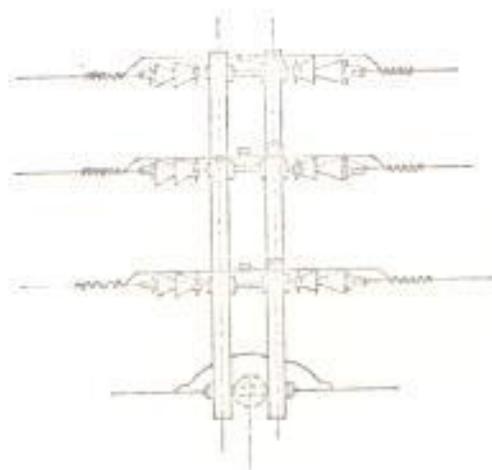
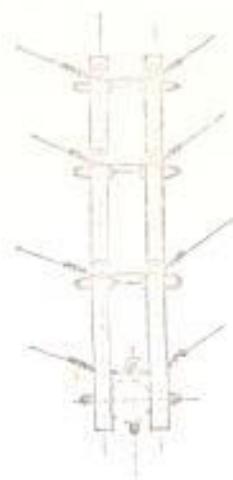
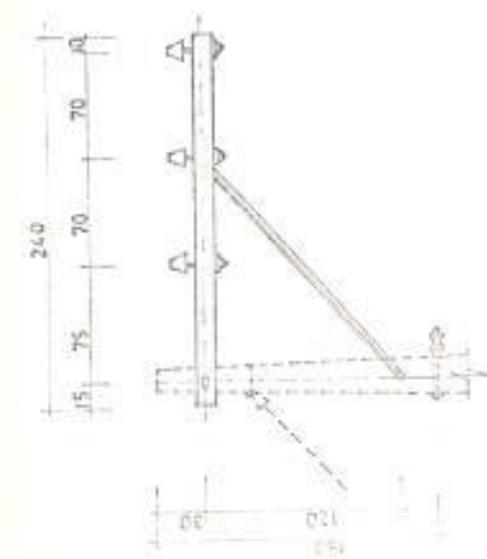
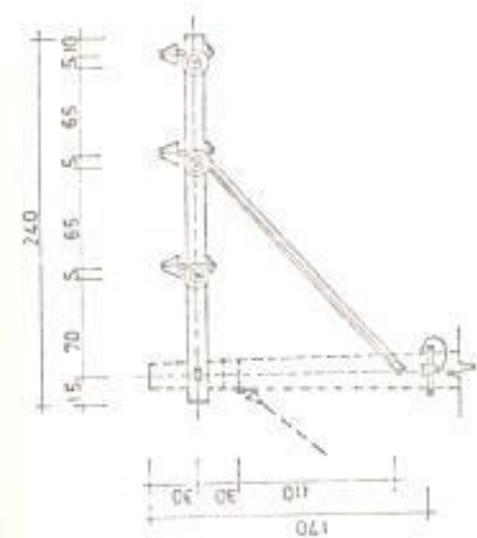
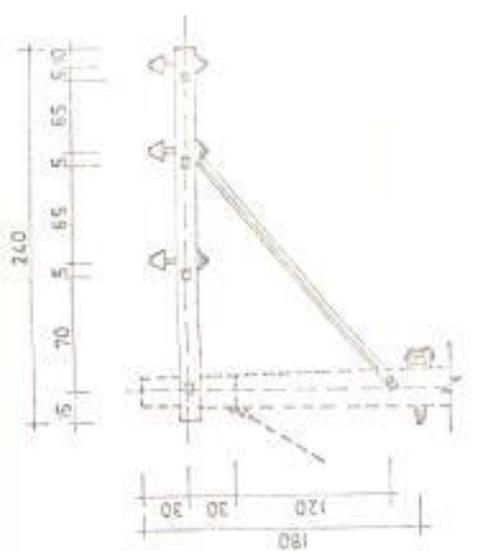


CRUCETA CENTRADA EN UNA CADENA DE RETENCION TIPO "CR"



CRUCETA CENTRADA DOBLE PIN, ESPECIAL "CPE2"

FIG. 3.9 CRUCETA CENTRADA EXISTENTE



CRUCETA EN VOLADO EN DOBLE PIN "VP2"

CRUCETA EN VOLADO EN DOBLE CADENA DE RETENCION. "VR2"

CRUCETA EN VOLADO EN UN PIN "VP"

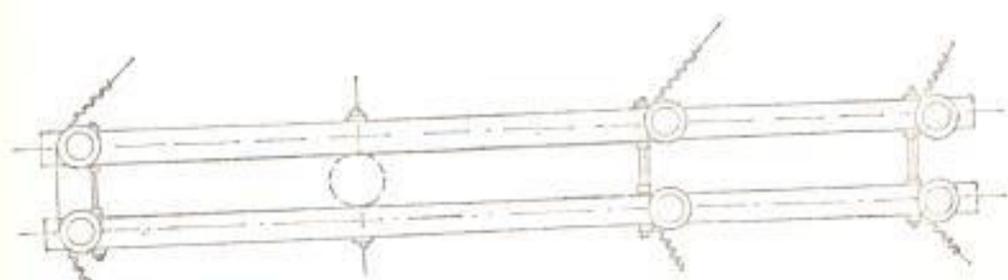
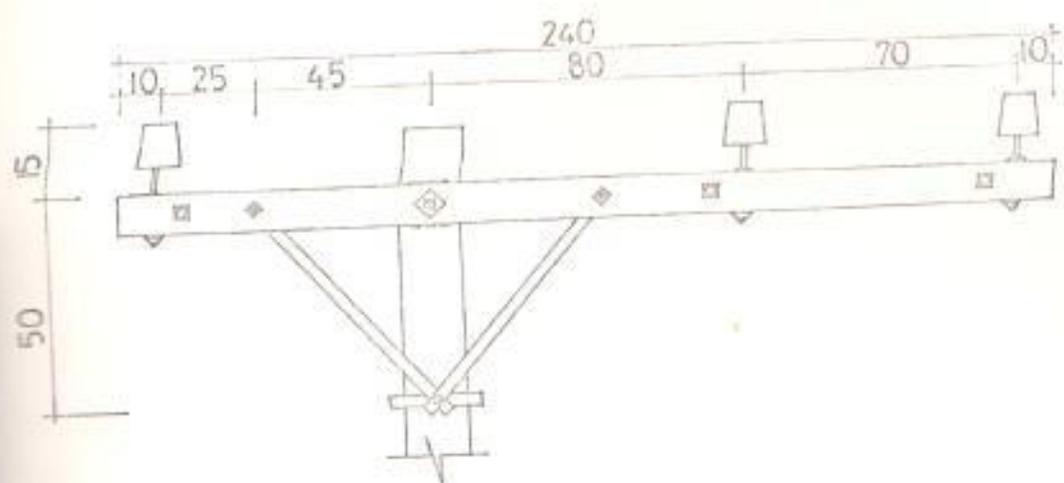
FIG. 3-6 CRUCETA EN VOLADO EXISTENTE.

3.8., donde son presentadas algunas estructuras normalmente utilizadas por INECEL ( Normas para Distribución Rural), con crucetas de 2.4 Mts.

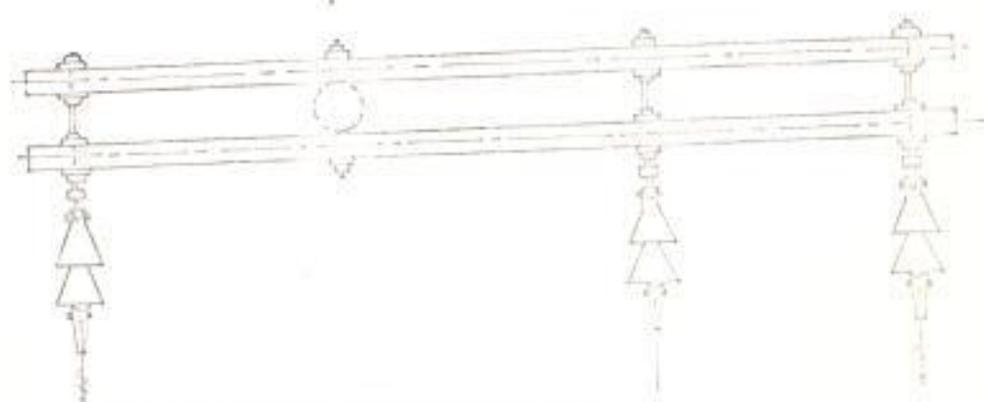
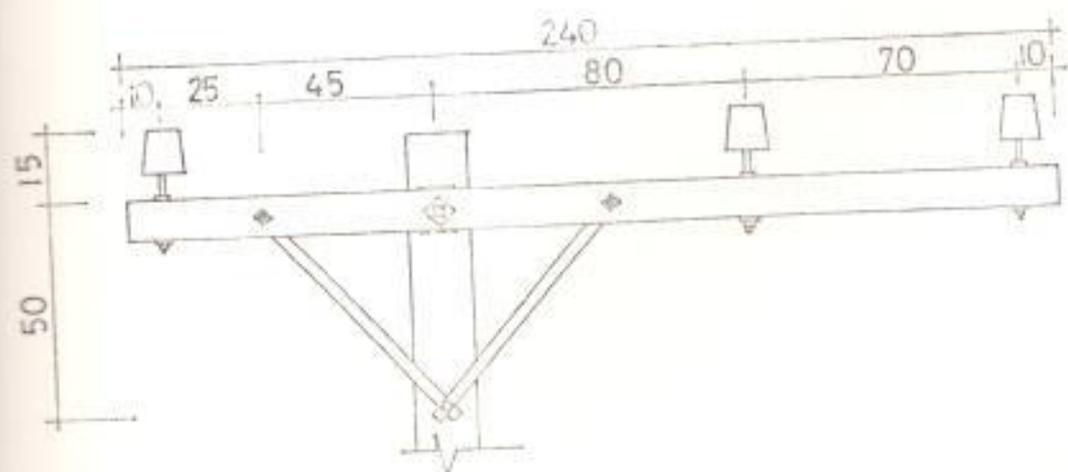
Analizando las estructuras presentadas, se verifica que las crucetas centradas y crucetas en volado son totalmente inadecuadas en cuanto a las sobretensiones. Como el brazo pie de amigo y el poste de concreto prácticamente nada contribuyen para el aumento del BIL de la estructura y para la disminución del gradiente de tensión, y aún considerando los casos de cruceta centrada y cruceta en volado el aislador tipo pin de la fase de en medio está cerca del declive en el brazo pie de amigo, la resistencia de las sobretensiones prácticamente se resumirá en las propiedades del aislador utilizado.

En el caso del poste de madera, estas estructuras también presentan problemas en cuanto los estacamientos de los postes.

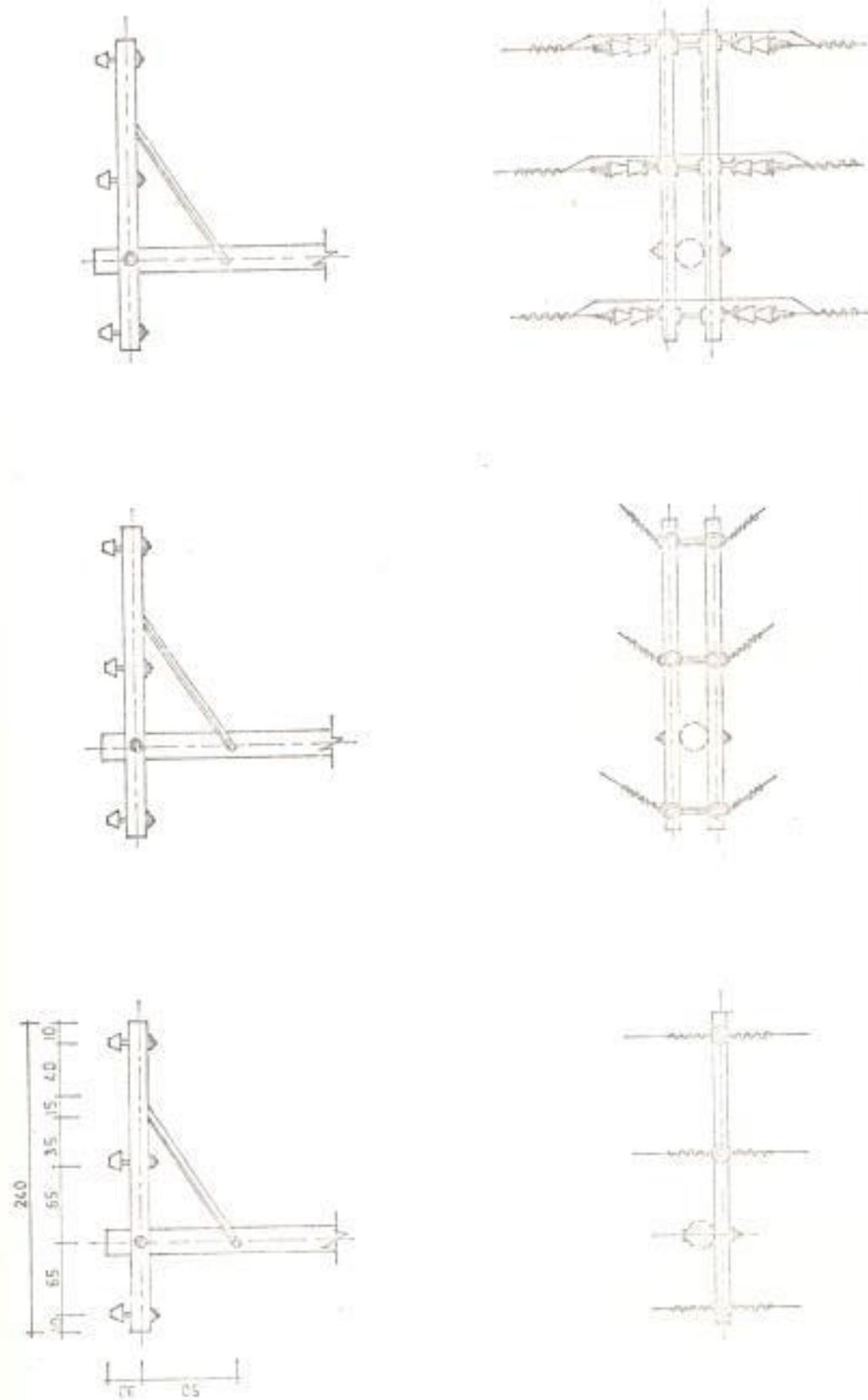
Para el caso de cruceta centrada y cruceta en volado propuesta en este trabajo (figura 3.9,.3.10), se estima que el actual diseño es más favorable que la cruceta centrada y cruceta en volado existente, no obstante, permite sin gasto de recursos, mejorando apreciablemente el comportamiento bajo descargas



CRUCETA CENTRADA EN UNA CADENA DE RETENCION.



CRUCETA CENTRADA SOBRE PIN ESPECIAL  
FINES: CRUCETA CENTRADA PROPIETA



CRUCETA EN VOLADO DOBLE PIN

CRUCETA EN VOLADO EN DOBLE CADENA A DE

FIG. 3.10 CRUCETA EN VOLADO PROPUESTA

atmosféricas.

### 3.5 EXPERIENCIA PRACTICA

La utilización de las propiedades de la madera en el diseño de las estructuras de distribución es una práctica empleada hace algunas décadas por varias compañías de otros países. Como por ejemplo, serán mostradas algunas estructuras utilizadas por la FLORIDA POWER LIGHT COMPANY, que atiende una región de la USA afectada por un elevado índice isoceraurico ( del orden de 100 días por año ).

A continuación se presenta en el anexo A un patrón E-3 de la Florida Power Light Company " Aplicación de Aisladores para construcciones de 13 Kv., 23 Kv" donde pueden ser escogidas las siguientes observaciones.

- a. Para el sistema 13 Kv, poste de madera y cruceta de madera son utilizados aisladores de 23 y 25 Kv con tensión crítica de impulso del orden de 175 a 225 Kv.
  
- b. Para el sistema 13 Kv, poste de concreto y cruceta metálica, son utilizados aisladores de 35 Kv, con tensión crítica de impulso de orden

de 200 a 265 kv.

- c. Para el sistema 13 Kv, regiones contaminadas, independiente del tipo de poste, son utilizados aisladores de 35 Kv.

En el anexo B se presenta un patrón E-4-A " Construcción de Líneas Primaria Monofásica " donde puede ser notado lo siguiente:

- Para el sistema  $13 \text{ Kv}/\sqrt{3}$  monofásico, utiliza 3 disco, con tensión crítica de impulso del orden de 220 a 230 Kv.

Como anexo C se presenta el patrón E-6 " Cruceta de construcción tangente ", donde son escogidas las siguientes observaciones.

- a. Para utilizar las propiedades eléctricas de la madera, se instala brazo pie de amigo de fibra de vidrio junto a la fase de en medio y el otro brazo pie de amigo de hierro (ver Fig. a de E-6).
- b. Otra sugerencia ( ver Fig. b de E-6 ) es la utilización de brazo pie de amigo de madera.



Cálculo del gradiente de tensión de operación

Distancia del aislador bajo lluvia:	40 mm
Longitud de la madera:	250 mm
	-----
	290 mm

$$\text{Gradiente} = \frac{13,8 \times \sqrt{2}}{0,290 \cdot \sqrt{3}} = 38,85 \text{ Kv/metro}$$

Cálculo de la probabilidad

De la curva presentada en la fig. 3.2, se tiene:

Probabilidad de disrupción = 73%

Los cálculos efectuados indican que las sobretensiones fase tierra que sobrepasen 143 Kv provocarán disrupción de la estructura cruceta centrada propuesta y aún el 73 % de estas disrupciones probablemente se tornará falla de fase a tierra de 60 Hz.

b. Segundo caso:

Cruceta en Volado Propuesta

Actual = Cruceta de 2.0 metros

Con la colocación del brazo pie de amigo de un

solo lado de la estructura, el punto critico pasaria a ser la fase de en medio, que queda a 35 cm del brazo pie de amigo.

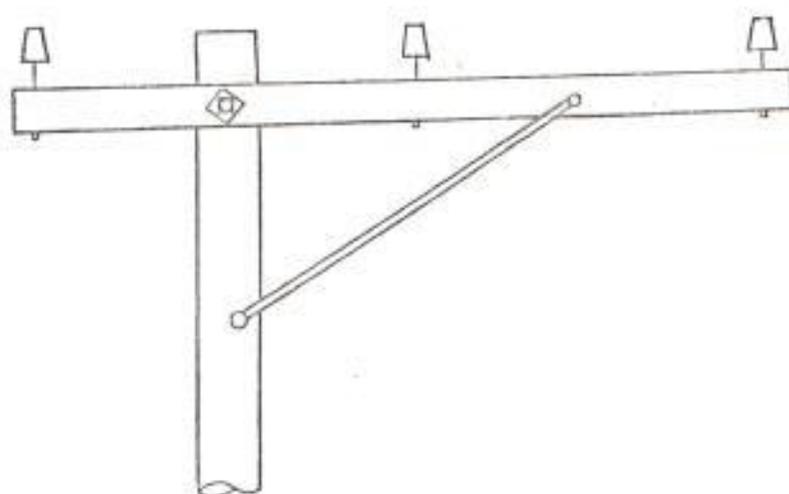


Fig. 3.12 Cruzeta en volado

El B11 de la nueva estructura sería:

Tensión crítica estimada del aislador clase 15Kv.	100 Kv
Aislamiento adicional estimado de 35 cm de madera seca (ver fig. 3.1)	175 Kv
Total aproximado:	275 Kv
Factor de reducción bajo lluvia:	0.65
Valor estimado bajo lluvia:	179 Kv

Cálculo del gradiente de tensión de operación

Distancia del aislador bajo lluvia:	40 mm
Longitud de la madera:	350 mm
	-----
	390 mm

$$\text{Gradiente} = \frac{13,8 \times \sqrt{2}}{0,390 \cdot \sqrt{3}} = 28,89 \text{ Kv/metro}$$

Cálculo de la probabilidad

De la curva presentada en la fig. 3.2, se tiene:

Probabilidad de disrupción = 66%

Los cálculos efectuados indican que las sobretensiones fase tierra que sobrepasen 179 Kv, provocarán disrupción de la estructura cruceta en volado propuesta y aún el 66 % de estas disrupciones probablemente se tornaran falla de fase a tierra de 60 Hz.

Se verifica que a pesar de que se ha disminuido la longitud de la cruceta, las características de la estructura en cuanto a las sobretensiones fueron mejoradas. Evidentemente un adecuado rediseño de la actual estructura con cruceta de

2.40 m, presentará mejores resultados que los expuestos en el segundo caso.

## CAPITULO IV

### PROTECCION DE LA LINEA DE DISTRIBUCION

Los circuitos de distribución deben ser protegidos contra las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas y a operaciones de maniobra de interruptores (switching surges). De las dos, la protección contra las descargas atmosféricas es de mayor importancia puesto que los niveles de aislamiento normalmente usados en los circuitos de distribución pueden soportar sobretensiones por operaciones de maniobra de varias veces el voltaje normal de operación.

Básicamente, entonces, una vez que se ha colocado el pararrayo para la protección contra descarga atmosférica, el equipo y los circuitos están también protegidos contra operaciones de maniobra con un margen bastante adecuado.

Los circuitos de alimentación primaria no están adecuadamente diseñados con protección contra descarga atmosférica. Por tal motivo, tales circuitos experimentarán un gran número de salidas (flashover) en comparación con las líneas de transmisión de alta tensión. En algunos casos, la línea de distribución en el rango de 13.8 a

34.5 Kv ha sido equipada con hilo de guarda para limitar las salidas de servicio por descarga atmosférica. Esta protección es adecuada cuando se han obtenido práctica y económicamente bajo valores de resistencia de tierra (10 ohms o menos) y por el uso de miembros estructurales de madera que incrementan la resistencia de aislamiento de la línea como se mencionó en el capítulo III. Un método de estimar el comportamiento de las descargas atmosféricas en la línea de distribución con hilo de guarda o pararrayos, para diferentes configuraciones de la línea aparece en la referencia (1). Se presentará a continuación un estudio pertinente relacionado con la protección de la línea de distribución.

#### 4.1 PRINCIPIOS BASICOS

En el estudio del comportamiento de las descargas atmosféricas en los circuitos de distribución, los siguientes pasos fueron tomados: Primero, la línea de distribución de varias configuraciones y protecciones fueron estudiadas sin considerar el equipo que será ubicado sobre estos circuitos. Segundo, los efectos de los equipos y su protección son considerados de tal modo que la operación total del circuito puede ser evaluada.

#### 4.1.1 Tasa Normal de Tensión de Contorneo Producida por Descarga Atmosférica

En el estudio del comportamiento de la descarga atmosférica de un circuito de distribución es conveniente tener algún punto de referencia, el cual será una medida de operación aceptable del circuito de distribución. En el estudio del comportamiento por descargas atmosféricas de línea de transmisión, un valor de operación aceptable que se ha aplicado, es menor que un contorneo por año para 100 millas de línea como promedio.

Para los circuitos de distribución, el número de contorneos de 4 es empleado como un número razonable de contorneos debido a descarga atmosférica por año para 100 millas de línea como promedio. Sin embargo, en los métodos que se desarrollan en los siguientes ejemplos cualquier valor de tasa de salida puede ser usado (1).

Debido a que no todos los contorneos producidos por descargas atmosféricas desarrollan una tensión de arco, el comportamiento del circuito podría ser definido como el número

de operaciones instantáneas del reconector, donde estos son tomados para ser el número de contorneos, los cuales desarrollan una tensión de arco. Esta última definición es usada para este estudio.

La protección natural de los circuitos de distribución podría ser un factor en mantener tasas de contorneos bajos. Aquello es, si los impactos de las descargas atmosféricas pueden ser desviados lejos de un circuito de distribución para una parte de su longitud, una tasa de contorneo más alta puede ser resistida sobre las partes expuestas de la línea y aún mantener la tasa deseada de contorneo. La protección natural ocurre en un más alto grado sobre los circuitos urbanos que en rural. La protección natural es provista por grandes construcciones y estructuras y ocasionalmente por los circuitos de transmisión que están sobre los circuitos de distribución.

Como quedó establecido en el capítulo III, cuando los postes y crucetas de madera son sometidos bajo los esfuerzos de voltaje, parte del aislamiento de la estructura pue-

den prevenir un número significativo de contorneos debido a descargas atmosféricas, que podrían desarrollar un arco de potencia. Esto, a su vez, reducirá el número de operaciones del reconectador o interruptor (disyuntor), necesario para despejar estas fallas no permanentes. Dentro del resultado del estudio, no se usará esta información debido a que no todas las configuraciones de la línea usarán aislamiento de madera.

Para la parte del circuito de distribución sin protección natural, el número de contorneos producidos por descargas atmosféricas por año para 100 millas de líneas es determinado ampliamente por dos factores independientes: El primer factor es el número de impactos de descargas atmosféricas, el cual terminará en cualquier punto de 100 millas de la línea en cada año como promedio y el segundo factor es el porcentaje de estos impactos que terminan sobre la línea, la cual causará un contorneo debido a descargas atmosféricas. La determinación de estos dos factores representa ampliamente la información deseada a ser alcanzada por este estudio. El producto de los dos factores podría

no ser más grande que la tasa de referencia de 4 contorneos debido a descargas atmosféricas como se mencionó anteriormente.

Los efectos de la protección natural y también los efectos de postes y crucetas de maderas pueden ser considerados por el usuario, si desea modificar los resultados del estudio, el cuál no considera estos efectos.

#### 4.1.2 Número de Impactos de Descarga Atmosférica en la línea

El número de contorneos debido a descargas atmosféricas de una línea de distribución es directamente proporcional al número de impactos en la línea. El número de impactos a la línea (llamado incidencia de impactos), sólo puede ser determinado aproximadamente, debido a que el número total de impactos a cualquier línea de distribución es difícil de, obviamente, a mayor número de tormentas que ocurran más grande es la incidencia de los impactos a la línea; por consiguiente, un buen punto de partida es el nivel isoceraunico de la región donde la línea está ubicada.

El nivel isoceraunico es el promedio anual del número de días en que la tormenta es escuchada.

Las horas tormentas por año podrían ser una mejor medida que los días tormentas, porque más de una tormenta puede ocurrir en un día. Los mapas de nivel isoceraunico no reflejan este factor de múltiples tormentas por día.

El nivel isoceraunico (designado por I.L.) en días de tormentas por año, es usado para hallar el número esperado de impactos de descargas atmosféricas (N) a tierra por milla cuadrada por año. Una fórmula de esto es:

$$N = K(I.L.)$$

Donde K es una constante a ser determinada.

El rango del valor de K es desde (0.25-0.50), según la referencia (8). El valor de K que dentro de este rango se le asigne depende de la distribución estadística usada para las magnitudes de los impactos producidos por descargas atmosféricas (fig 4.1). En

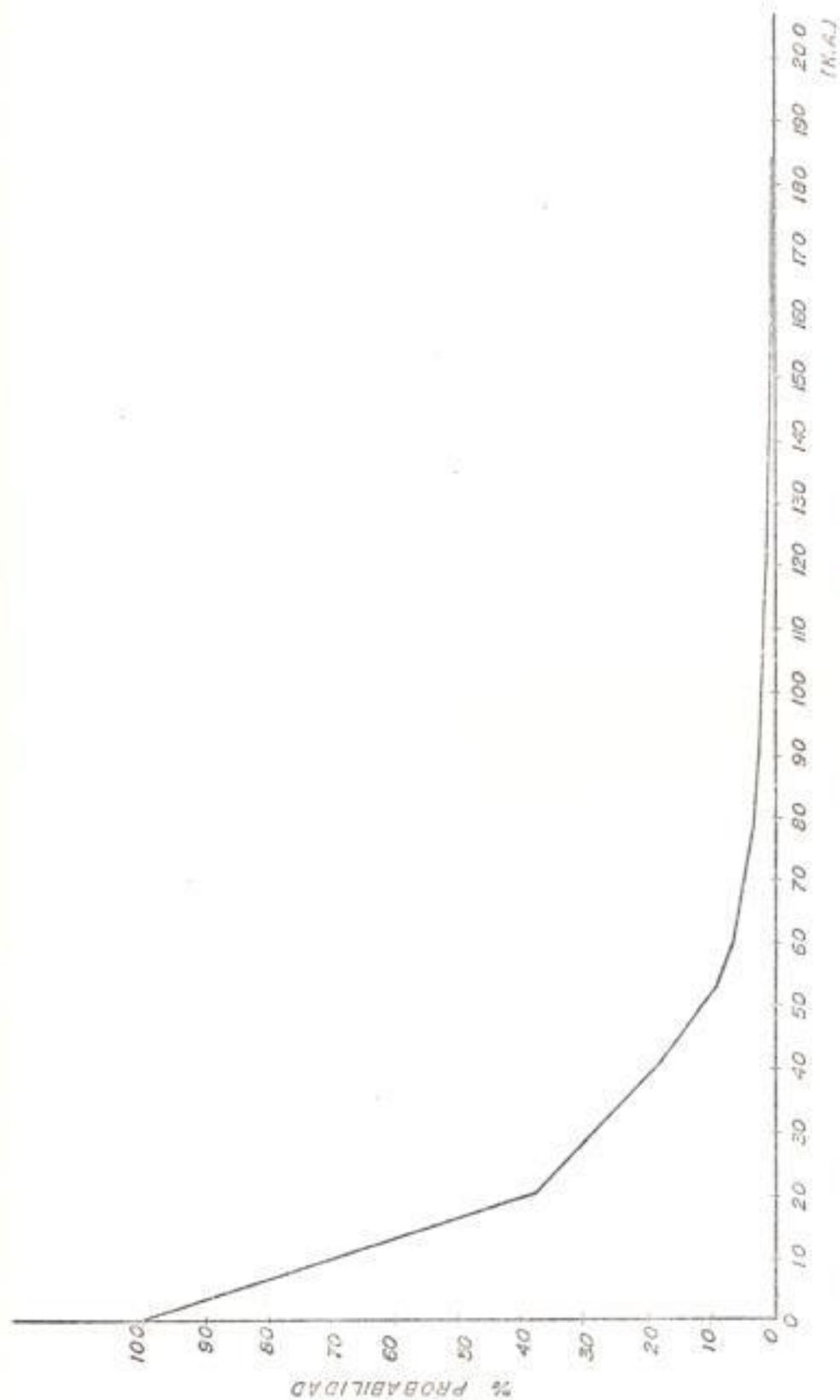


Fig. 41 DISTRIBUCION DE LA AMPLITUD DE CORRIENTE DEL IMPACTO DE DESCARGA ATMOSFERICA.

este estudio, un valor de 0.50 fué usado para K. La magnitud corriente de los impactos de descargas atmosféricas usada es la conocida distribución AIEE (9).

Una vez que el número de impactos a tierra por milla cuadrada ha sido obtenido, una línea de distribución teórica sin protección natural puede ser ubicada sobre la tierra donde los impactos están ocurriendo, y el número de impactos que caen sobre la línea puede decirse que protegerá una cierta área de la tierra; esto es, todos los impactos que podrían normalmente impactar en cierta área a lo largo del trayecto en lugar de impactar a la línea. El área protegida en millas cuadradas por 100 millas de línea multiplicada por el número de impactos a tierra por milla cuadrada y por año, es el número promedio de impactos por 100 millas de línea por año.

$$\frac{\text{milla}^2}{100 \text{ milla}} \times \frac{\# \text{ impactos}}{\text{milla-año}} = \frac{\# \text{ impactos}}{100 \text{ milla-año}}$$

El ancho de la franja a lo largo de la ruta protegida por la línea puede ser determinado

de la siguiente manera. Una disposición horizontal del conductor con respecto al suelo, se asume que va a ser impactada por la mayoría de las descargas atmosféricas que caen en una franja con un ancho igual a 4 veces su altura sobre el suelo. La Fig 4.2 muestra esta área para un solo conductor y también para múltiples conductores. Un segundo conductor paralelo al primero y a la misma altura sobre el suelo, se podría esperar que contribuirá con un ancho adicional a la franja igual a su espaciamiento al primer conductor. Un tercer conductor entre el primero y el segundo y suficientemente alto sobre estos podría aumentarse el ancho de franja a un valor mayor al que corresponde para los dos conductores que están más bajos. Podría ser una razonable conclusión de esta discusión sugerir que este conductor superior también interceptará los impactos de descargas atmosféricas, los que de otra manera podrían ser interceptados por los otros conductores. Las configuraciones usuales que se utilizan sobre línea de distribución tienen un conductor superior el cual podría adaptarse a esta descripción.

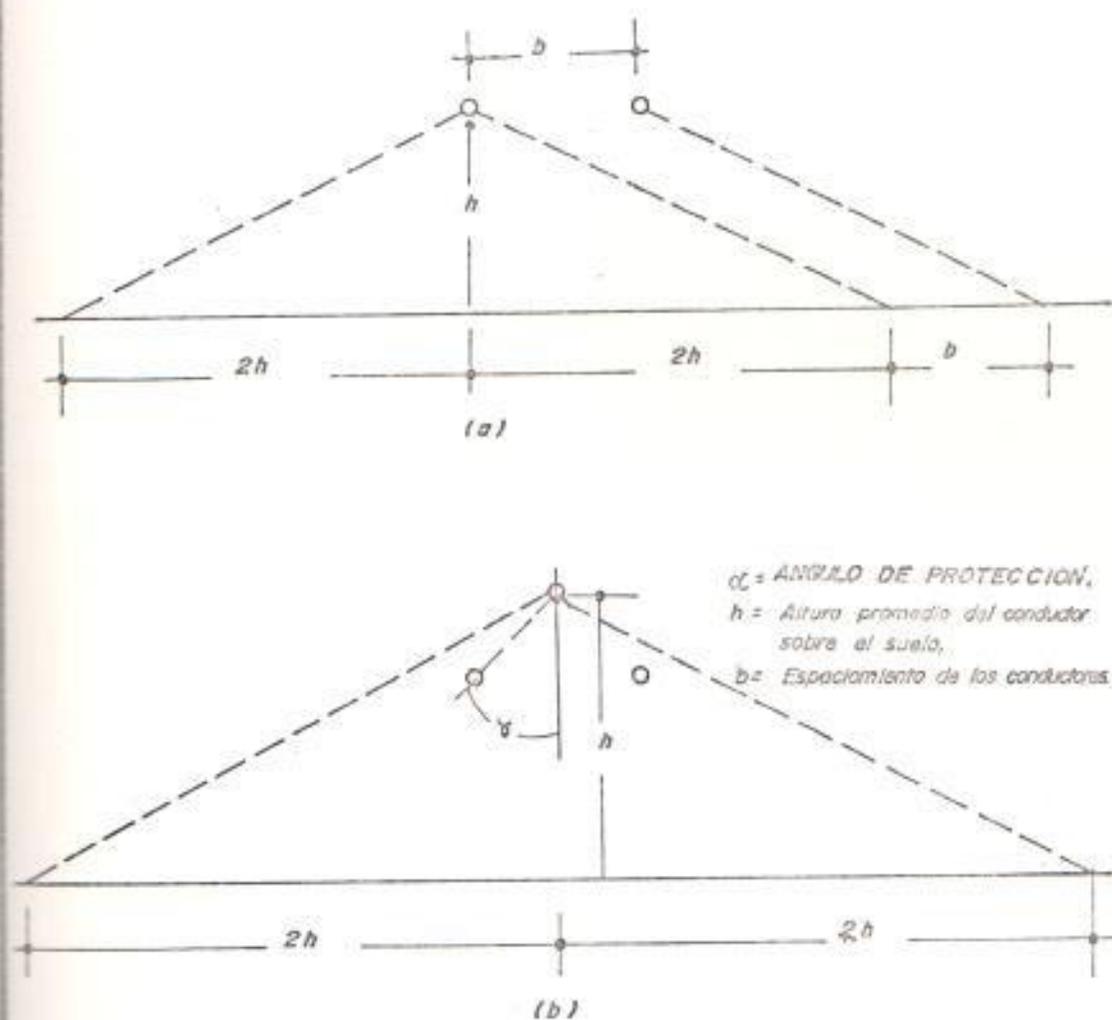


Fig. 4.2 FRANJA DE LINEA PROTEGIDA POR LA LINEA.

La altura  $h$  sobre el suelo para el conductor, es la altura efectiva del conductor sobre el suelo, cuando el efecto de la flecha entre los vanos esta incluido, esto es aproximadamente:

$$h = ht - 2/3 (ht - hms)$$

Donde  $H_t$  es la altura del conductor en el poste y  $H_{ms}$  es la altura del conductor en el punto de flecha máxima.

Figura 4.2 implica que los postes con partes metálicas aterrizadas, conductores de fases y alambre de tierra; protegerán un área de tierra igual a 4 veces su altura sobre el suelo.

El número total de impactos  $N_L$  para 100 millas de línea por año como promedio es:

$$N_L = \frac{0.5(I.L.)100}{5280} \left[ 4[ht - 2/3 (ht - hms)] + b \right]$$

$$= I.L [0.0126ht + 0.0252hms + 0.0094b]$$

Donde  $b$  es el espaciamiento horizontal de los conductores si es aplicable.

Los resultados del uso en esta ecuación son mostrados en la figura 4.3. Ahí el número de impactos para una línea de 100 millas por año es mostrado como una función del nivel isoceraunico y la altura sobre el suelo del conductor más alto. Usando estos datos, una idea aceptable puede ser obtenida del porcentaje de referencias de impactos a la línea, el cual podría resultar en un contorno. Los datos son mostrados a continuación:

Tabla 4.1

TASA DE SALIDA PROPUESTA		
NIVEL ISOCERAUNICO	35 PIES DE ALTURA NUMERO DE IMPACTOS POR AÑO	% DE IMPACTOS QUE CAUSAN UN CONTORNEO DADO 4 SALIDA POR AÑO.
30	39.8	10.05
60	79.6	5.02
90	119.4	3.35

Se observa que el producto de las cifras de la columna central y la derecha es 4, el cual es el número propuesto anteriormente como una tasa aceptable de salidas de contorneos debido a descargas atmosféricas.

Otras asunciones concernientes a la tasa de salida propuesta y altura del conductor so-

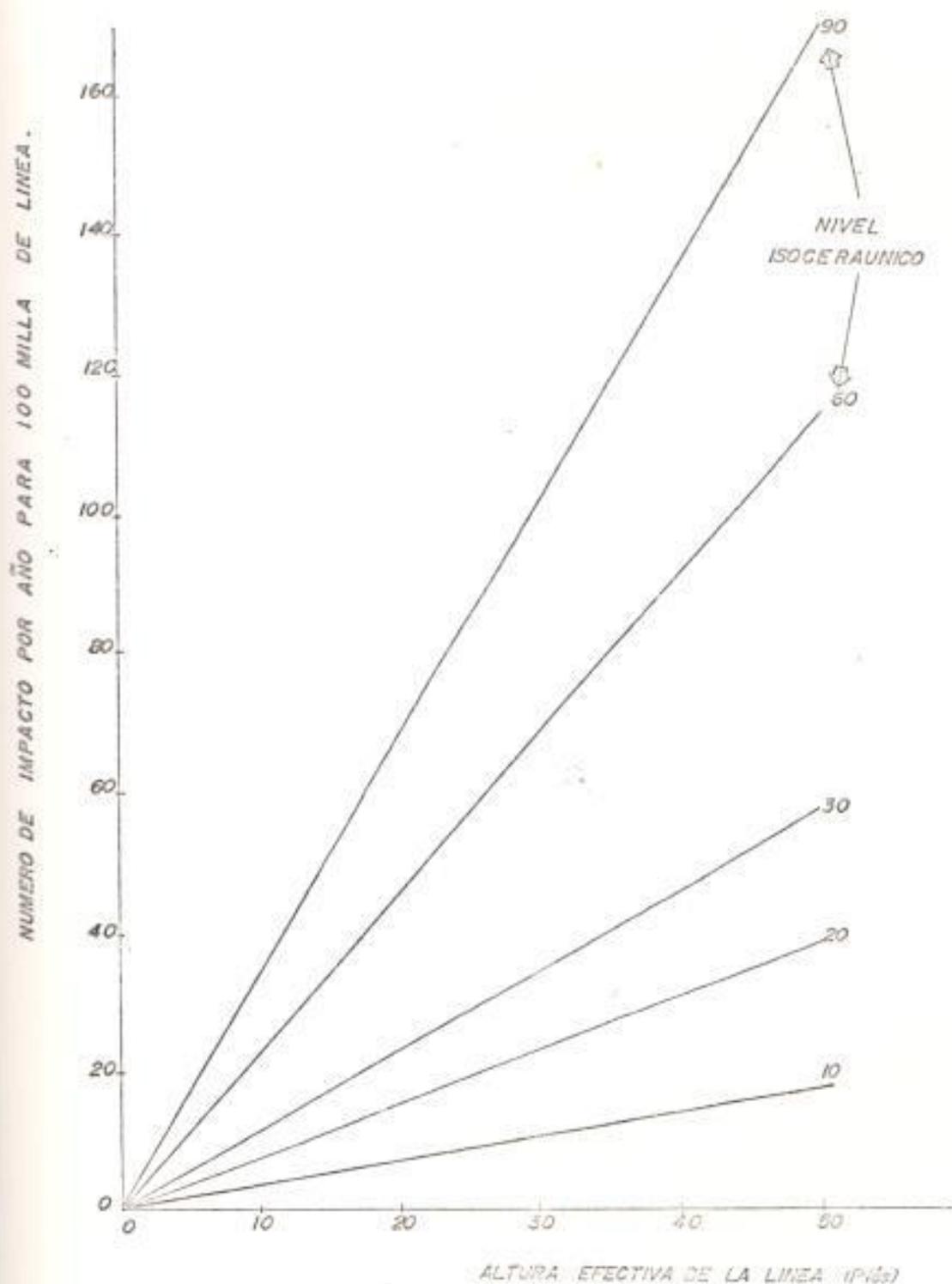


Fig. 4.3. TASA DE INCIDENCIA DE IMPACTO

bre la tierra pueden ser cambiadas. Aquellas mostradas en la tabla 4.1., sin embargo, son suficientes por el momento. Por ejemplo, será necesario proveer suficiente protección a la línea de tal manera que los porcentajes de impactos de descarga atmosférica que resultan en un contorneo sean limitados entre 3.4 y 10 por ciento, aproximadamente. Las desviaciones de las asunciones hechas anteriormente cambiarán estos valores solo moderadamente. En otras palabras, la protección debe ser tal que solamente un pequeño porcentaje de los impactos a la línea puedan ser permitidos para que causen contorneos.

#### 4.1.3 Factores Involucrados en la Determinación del Porcentaje de Impactos de Descarga Atmosférica a la Línea que Causen un Contorneo

En los párrafos anteriores, una tasa de salida de 4 contorneos debido a descargas atmosféricas por año y por 100 millas de línea fué sugerido como un razonable valor para circuitos de distribución. Además, un método fué descrito, de como el número de impactos para 100 millas de línea por año

puede ser obtenido en función del nivel isoceraunico y el promedio de la altura del conductor. De estos valores, fueron obtenidos porcentajes aceptables de impactos de descargas atmosféricas a la línea, los cuales causan contorneos.

La tarea que falta, consistente de la porción principal del estudio, es para determinar el porcentaje de impactos de descargas atmosféricas a la línea que causan un contorneo como una función de las variables del diseño de la línea, las cuales están bajo el control del diseñador de la línea, así como de aquellas variables que no están bajo su control.

Cada variable es discutida brevemente a continuación; pero, con suficiente detalle para permitir un entendimiento de sus efectos sobre la salida de operación. El énfasis es aplicado hacia los efectos que conducen a esfuerzos de tensión sobre el aislamiento y sobre el porcentaje de impactos por descarga atmosférica a la línea que causan un contorneo.

a. Configuración de la Línea, Dimensiones

Las 12 configuraciones de líneas usadas en el estudio fueron suministradas en la referencia (1). Aunque dimensiones específicas, niveles de aislamientos, vanos, etc., fueron definidos, los resultados del estudio abarcan un amplio rango de tal manera que los cambios en estas cantidades pueden ser evaluados.

La figura 4.4 muestra en forma condensada las configuraciones las estructuras estudiadas, junto con los tipos de protección contra descargas atmosféricas aplicados a cada uno. Allí se ve que existen 24 combinaciones de configuraciones de líneas y del tipo de protección contra descargas atmosféricas estudiados. Estas combinaciones representan una buena sección de las construcciones de las líneas y las protecciones actuales en uso y también esto está contemplado para los próximos años.

Cada una de las 12 configuraciones de líneas usadas en la referencia (1), con la

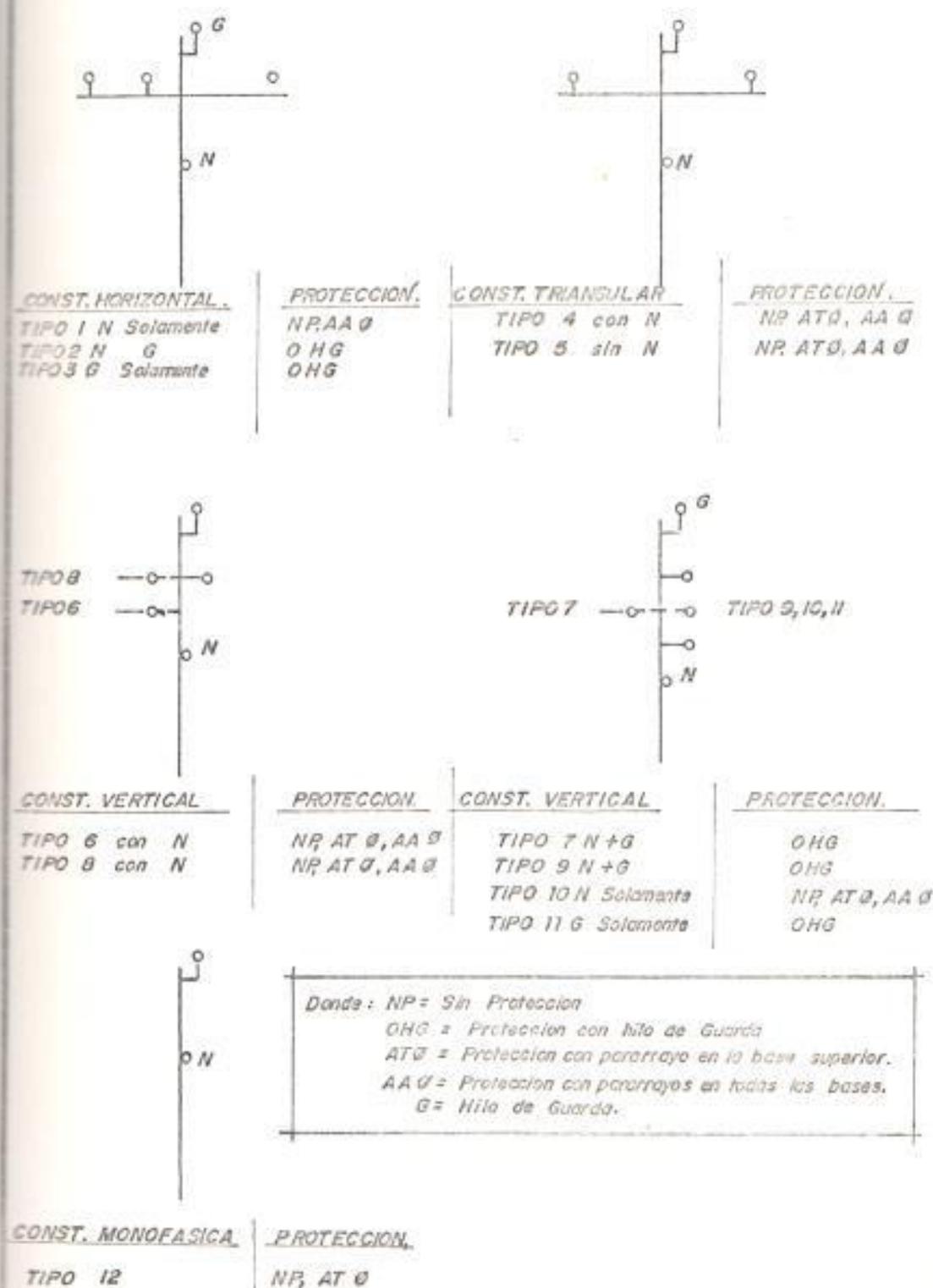


Fig. 4.4. CONFIGURACIONES Y TIPOS DE PROTECCIONES CONTRA DESCARGAS ATMOSFERICAS.

protección contra descargas atmosféricas aplicable fué erigida en forma de modelo.

- La escala escogida permite la erección de 5 a 6 vanos dentro el rango disponible. Para cada línea fué determinada su impedancia característica para hacer que la línea aparezca más larga. Los modelos geométricos y las técnicas asociadas permiten la evaluación de muchas variables involucradas de una manera conveniente.

b. Nivel de Aislamiento de la Línea

El nivel de aislamiento de los tipos de construcción de líneas usadas en el estudio fue variado para cubrir un rango de 100 Kv a 700 Kv. Los datos presentados sobre los contorneos por 100 impactos a la línea, asume que la línea tiene un valor uniforme de resistencia de aislamiento a lo largo de la misma. En la práctica, el nivel de aislamiento de la línea a cierta distancia de un poste es aproximadamente el mismo como aquel de una distancia entre varillas con un espaciamiento igual a aquel entre los con-

ductores. En un poste el nivel de aislamiento es menor que aquel que resulta sobre el vano. El nivel de aislamiento de la línea es determinado por el aislamiento sólido entre conductores y podría incluir el valor del aislamiento de la madera usada.

Se asume que el nivel de aislamiento en los postes puede ser variado independientemente del espaciamiento del conductor. Obviamente, esto no es completamente verdad. Es fácil diseñar el herraje (equipo) de la línea de una manera que reduzca el nivel de aislamiento de la línea; pero, el espaciamiento entre los conductores permanecen en un límite superior al nivel de aislamiento que puede ser obtenido. Por consiguiente, el hecho de que la operación de la línea ha sido calculado para niveles de aislamiento tan alto, como 700 Kv debería no ser tomado como alguna indicación de que una línea particular puede ser diseñada con tal nivel de aislamiento.

c. Tipos de Protección contra Descarga Atmosférica

Protección con hilo de guarda

Este tipo de protección es común en línea de transmisión aérea. En línea de distribución no es usado frecuentemente. Algunas veces es llamado un alambre blindado (apantallado) o alambre aéreo, puede ser el conductor neutro del sistema, si está ubicado en la parte superior y si es aterrizado frecuentemente a lo largo de la línea.

Cuando es adecuadamente instalado, el hilo de guarda interceptará cercanamente todos los impactos por descarga atmosférica las cuales terminarán sobre la línea.

Ocasionalmente, un impacto terminará sobre un conductor de fase debido a una falla en la protección. Las fallas en la protección son una función de la altura sobre el suelo y el ángulo de protección (10). Para las alturas de los conductores esperadas en el área de distribución, las

fallas en la protección no se esperan que sean un problema, con tal que el ángulo de protección sea menor que 40 a 50 grados. El ángulo de protección es el ángulo (medido desde la vertical) desde el conductor de tierra al conductor de fase (ver figura 4.2).

Los voltajes a través de los aisladores en los postes no aterrizados, no son afectados por la presencia de postes y sus equipos asociados. El nivel de aislamiento en estos postes, sin embargo, es un poco menor que aquellos entre conductores de fase sobre el vano. Esto significa que un contorneo del aislador podría ocurrir en uno de estos postes si las ondas viajeras de voltajes son más grandes que el nivel de aislamiento en poste; pero, menos que el nivel de aislamiento de la línea. Se espera, sin embargo, que la mayoría de contorneos aislados ocurrirán en cualquier lugar debido al efecto de reducción de voltaje por reflexiones de poste que están aterrizados.

Protección con pararrayo en la fase superior.

Este tipo de protección es muy similar a aquella protección dada por un hilo de guarda. La combinación del conductor de fase superior y los pararrayos actúan como un sistema de protección de hilo de guarda, en la cual, la resistencia de contacto a tierra es incrementado por la cantidad de resistencia del pararrayo.

Los pararrayos, en muchos casos, formarán un arco antes que el impacto de descarga atmosférica haga contacto con la línea, con la cual, se completa la analogía con el sistema de protección con hilo de guarda (8).

Es de interés investigar por qué los pararrayos formarán un arco antes de que los impactos de descarga atmosférica impacten sobre la línea. La respuesta radica en el hecho de que los hilos de fase no están aterrizados, excepto quizás a través de un transformador bobinado. Una nube de tormenta, usualmente de polaridad

negativa, que pasa por la línea producirá un campo electrostático de polaridad negativa en los alrededores de la atmósfera y, en particular, entre él mismo y la tierra. El impacto de descarga atmosférica, el cual puede ser visto como una extensión de la nube, producirá un campo electrostático de magnitud grandemente incrementada debido a la ley del inverso de los cuadrados la cual se aplica. Un conductor no aterrizado paralelo a tierra ubicado en este campo incrementará un voltaje negativo con respecto al potencial de tierra, igual a la intensidad efectiva de campo multiplicado por la alturas sobre la tierra en unidades adecuadas. Si los conductores fueron aterrizados, muy poco voltaje podría aparecer entre el conductor y tierra porque las cargas negativas podrían fluir dentro de la tierra suficiente para liberar una carga positiva sobre la línea; la cual, cuando es combinada con la capacitancia a tierra, sólo cancelará el voltaje inducido por el impacto.

Protección con pararrayos en todas las fases.

Con los pararrayos instalados sobre todas las fases y sus conexiones a tierra, podrían ser enlazadas junto a la parte superior del poste y una conexión común a tierra instalada en el pie del poste. El conductor sobre la fase impactada podría actuar semejante a la protección con hilo de guarda aterrizado a través de pararrayos. Los pararrayos sobre las otras fases podrían prevenir los contorneos entre los conductores en los postes. La corriente a través del pararrayo sobre la fase afectada podría descargar la corriente alcanzada en la misma manera como aquella descrita por el pararrayo en la protección de la fase superior. La corriente descargada por este pararrayo podría ser compartida por los pararrayos sobre las otras fases y con el hilo de tierra. La división de corriente podría ser inversamente proporcional a la impedancia de cada trayectoria.

El trayecto de la resistencia de contacto a tierra podría probablemente tomar la mayor parte de la corriente, porque cada trayecto del pararrayo podría consistir de la resistencia del pararrayo en serie con la mitad de la impedancia característica de la línea del conductor de fase. El efecto de la impedancia característica podría ser cancelado ampliamente después del tiempo de un viaje de ida y vuelta de la onda del punto de reflexión más cercano en cada trayecto.

d. Intervalo de Puesta a Tierra

El intervalo de puesta a tierra es la distancia entre los puntos sobre la línea donde ya sea hilos de guarda, pararrayos o neutro suspendidos son aterrizados. Esta es una importante variable bajo el control del diseñador de la línea. Mientras más frecuentes aterrizamientos son hechos, una menor tasa de salida es obtenida para la mayor parte. Recíprocamente, entre más frecuentes aterrizamientos sean hechos se logra un más alto costo de la línea. Los intervalos de aterrizamientos

usados en el estudio cubre el rango desde (100 a 1200 pies).

e. Resistencia de contacto a tierra

La resistencia de contacto a tierra es la resistencia desde el extremo del hilo de guarda a la tierra a través del sistema de aterrizamiento. La resistencia de contacto a tierra es importante para la protección contra descargas atmosféricas del hilo de guarda y pararrayos sobre la fase superior. Para una gran extensión, el tipo de protección de descarga atmosférica con pararrayos en todas las fases no es afectado por el valor de la resistencia de contacto a tierra debido a que los pararrayos previenen los contorneos de los aisladores entre fases. La resistencia de contacto a tierra debería ser baja sobre equipos montados en postes de tal manera que excesivos voltajes en secundarios sean evitados.

La resistencia de contacto a tierra está bajo el control del diseñador de la línea para un gran rango de valores, debido a

la oportunidad de reducir la resistencia de contacto a tierra por el manejo de la profundidad de varilla de aterrizamiento o por el uso de más de una varilla en un poste. En regiones cuya resistividad del terreno es alta aún estas medidas podrían ser insuficientes para obtener razonablemente bajos valores de resistencia de contacto a tierra. Entonces, la protección necesitará ser basada sobre aquellos que tienen grandes valores de resistencia de contacto a tierra.

Debido a la complejidad y gran alcance del estudio, sólo tres valores de resistencia de contacto a tierra fueron usados. Estos fueron 10, 33 y 100 ohmios. En la práctica la resistencia de contacto a tierra variará aleatoriamente a lo largo del trayecto de la ruta y un rango amplio de valores podrían encontrarse. En principio, la operación de tal línea realística podría ser aproximada desde los resultados del estudio usando los valores de pruebas. En algunas áreas, la distribución de los valores de resistencia de contacto podrían centrarse cerca de uno

de los tres valores entre dos de ellos. En estos eventos, podría ser lógico estimar el comportamiento correspondientemente. Para amplias variaciones podrían ser agrupadas en rangos centrados sobre los tres valores y la operación basada sobre valores relativos en cada rango. En muchos casos prácticos, sin embargo, tales mejoramientos o refinamiento no serán necesarios. En la síntesis de los resultados del estudio al final de este capítulo, se mostrará que muchas veces la variación en porcentajes de los impactos a la línea que resultan en un contorno debido a la resistencia de contacto a tierra es pequeña.

f. Características de los Impactos de Descargas Atmosféricas

La amplitud y tiempo de los valores de cresta de onda para el impacto de descarga atmosférica, son las características del impacto que interesan en este estudio. Las características de los impactos usadas son mostradas en las figuras 4.1 y 4.5. La distribución de la amplitud de

corriente del impacto de las descargas atmosféricas es mostrada en la figura 4.1, es la llamada distribución AIEE. Como se dijo anteriormente, esta distribución ha sido coordinada con el multiplicador  $k$  sobre el nivel isoceraunico de modo que las tasas de salidas serán realistas.

Los tiempos para la distribución de corriente cresta de onda, figura 4.5 representan los mejores datos disponibles según los datos ofrecidos. Aunque el frente de la onda de corriente de impacto se asume que crece linealmente desde cero a la cresta (punto máximo), usualmente los frentes de onda son cóncavos. Esto podría causar que la componente de voltaje inducido magnéticamente esté más cerca en fase con la componente de voltaje a través de la resistencia de contacto a tierra. Esto es, la corriente de cresta de onda y la tasa máxima de cambio de corriente podrían estar más cerca de coincidir. Datos suficientes sobre este aspecto de las características de impacto de descargas atmosféricas no han sido

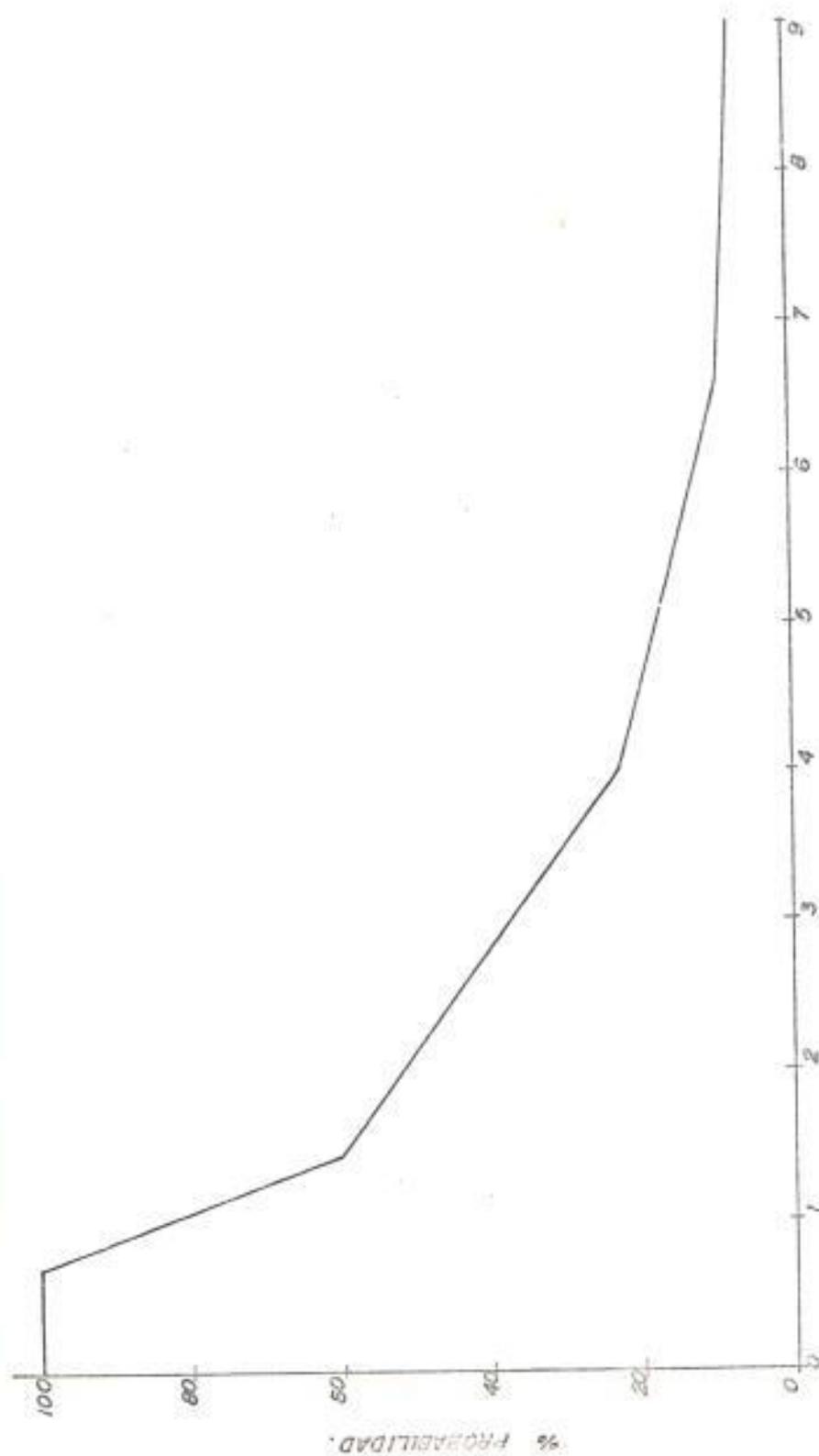


Fig. 4.5. TIEMPOS PARA LA DISTRIBUCION DE CORRIENTE CRESTA DE ONDA.

obtenidos para ser de valor en nuestro estudio. Un ascenso directo del frente es el más conveniente que aquel que se usa. Los efectos de desviaciones de éste por frentes reales se espera que tengan solo un pequeño efecto.

Las Figuras 4.1 y 4.5 representan distribuciones de amplitudes de corriente de impacto y tiempo del frente de onda que serán asumidos independientes uno de otro. Esta supuesta independencia probablemente no sea cierta. Hay alguna evidencia que los impactos de descargas atmosféricas con amplitudes de corriente alta tienden a tener tiempos más grandes para la cresta. En los cálculos una compensación han sido hechos por este efecto por el uso de una curva de probabilidad del tiempo de frente de onda modificada.

g. Distribución de la Ubicación de los Impactos a lo Largo de la Línea

Las ubicaciones a lo largo de la línea donde los impactos por descargas atmos-

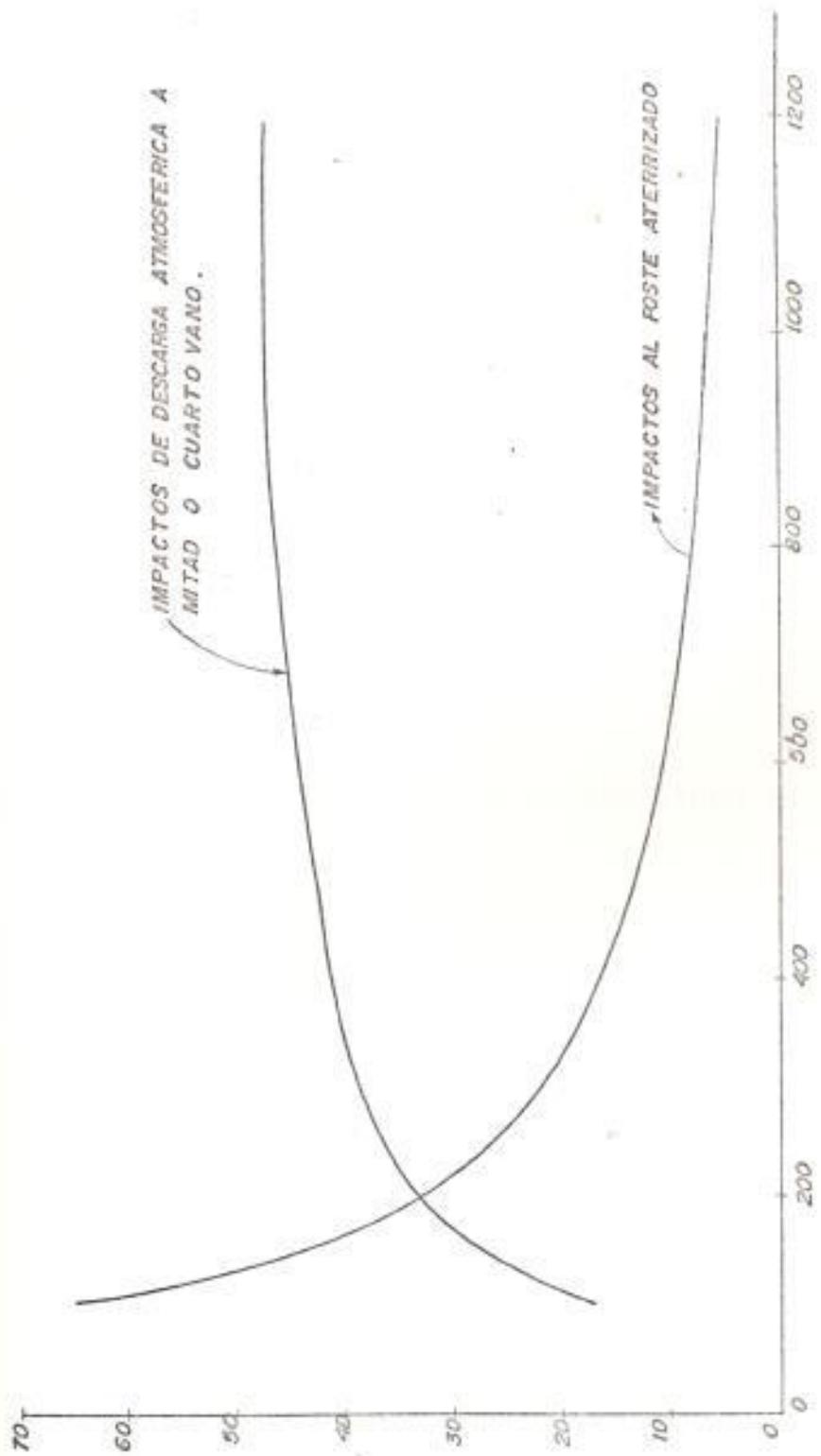
féricas terminarán, serán asumidos a ser igualmente probables. Aunque el conductor realmente afectado podría ser influido por otros conductores los cuales pueden protegerse y por aterrizamiento de objetos metálicos, las localizaciones de los puntos de impactos a lo largo de la línea serán asumidos a ser igualmente probables. Debido a que la localización del punto afectado tiene un efecto en la determinación sobre los esfuerzos de tensión sobre el aislamiento, es necesario determinar estos esfuerzos de tensión para un número de localizaciones afectadas. Las localizaciones seleccionadas fueron impactadas en la mitad de la línea entre los postes aterrizados, el impacto a la línea a un cuarto de distancia entre los postes aterrizados y un impacto a la línea en un poste.

El comportamiento de la línea que es afectado por la localización del impacto a lo largo de la línea, puede ser determinado de estos tres valores por la combinación de ellos en adecuadas proporciones. La figura 4.6 muestra las propo-

rciones asumidas para líneas que tienen distancias entre aterrizamiento de postes de 100 pies hasta 1200 pies. Por ejemplo, si los postes aterrizados fueron apartados 400 pies, la operación de la línea debería ser aproximada por asumir que el 41.5 % de los impactos terminados en la mitad del intervalo de puesta a tierra, un número igual en el intervalo de la cuarta parte del aterrizamiento y el resto en los postes aterrizados.

#### h. Efectos del Aislamiento de la Madera

La madera, cuando es usada como material aislante actúa en dos formas para reducir la tasa de salida de la línea. Primero, la resistencia de la madera se agrega a la resistencia de la porcelana, de este modo se incrementa la resistencia del aislamiento total de la línea. En el capítulo III da la información detallada sobre como determinar la resistencia de aislamiento de una línea, incluyendo la resistencia de aislamiento de la madera.



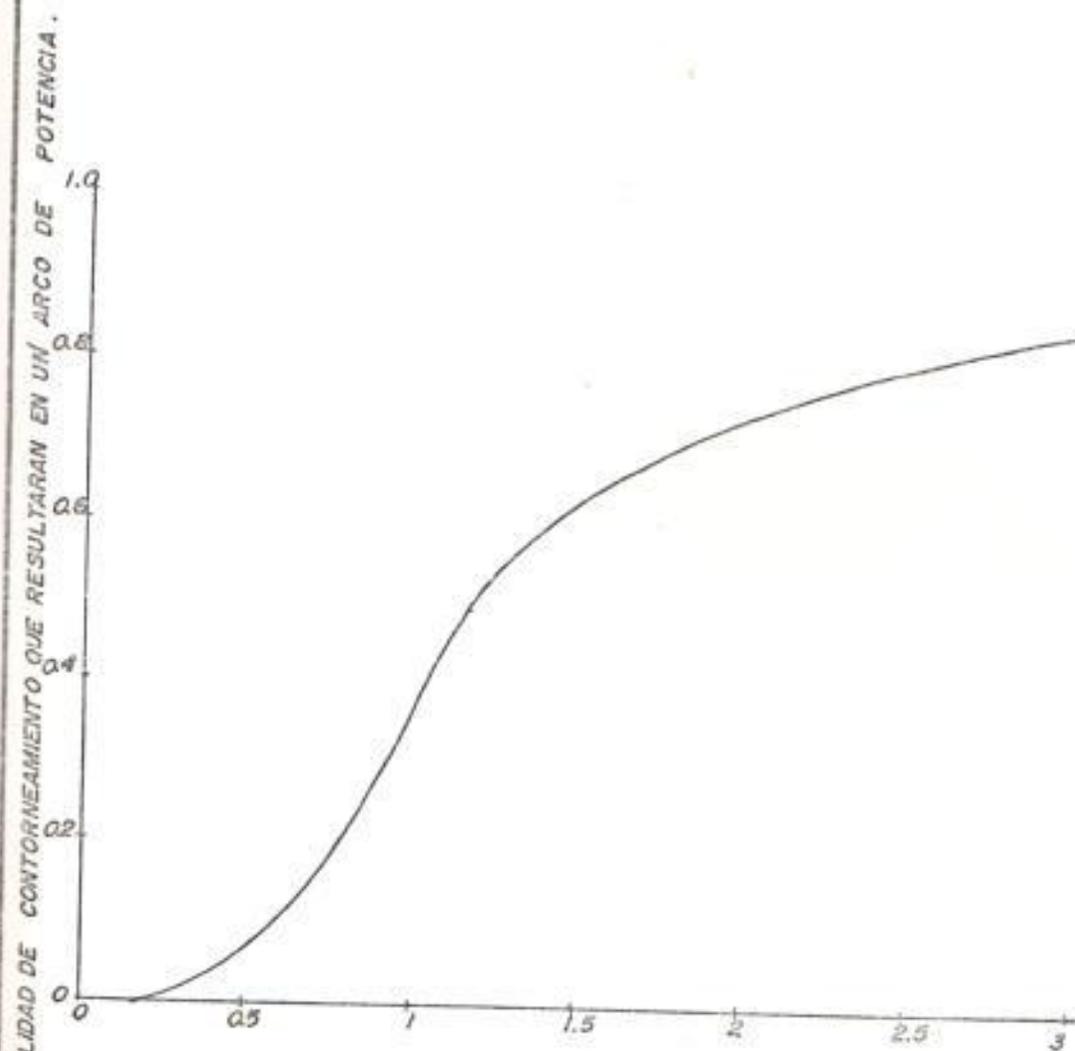
PORCENTAJE DE TODOS IMPACTOS DE DESCARGA ATMOSFERICA A LA LINEA.

ESPACIAMIENTO ENTRE PARTES ATERRIZADO (PIES)  
Fig. 4. 6. DISTRIBUCION DE LA LOCALIZACION DE IMPACTOS DE DESCARGA ATMOSFERICAS.

Además, el aislamiento de la madera, si es parte del trayecto de contorno, tiende a prevenir un impulso de contorno que se desarrolla en un arco de 60 ciclos. El grado para el cual la madera posee tales efectos depende básicamente sobre el voltaje del sistema y la longitud de madera involucrada en el trayecto del contorno. La Figura 4.7 muestra los mejores datos disponibles relacionados con el gradiente de voltaje y la probabilidad de un contorno por descarga atmosférica se convierte en un arco de potencia.

#### 4.2 METODO USADO PARA OBTENER EL RESULTADO DEL ESTUDIO

Para un tipo particular de configuración de líneas, un tipo de protección contra descargas atmosféricas y una resistencia de contacto a tierra, se selecciona un intervalo de aterrizamiento. Para esta línea, los impactos de descargas atmosféricas son aplicados a medio intervalo de aterrizamiento, para un cuarto de intervalo de aterrizamiento y para un poste aterrizado, en cada caso para impactos que tienen tiempo de cresta que varían de 0.5 a 8 microsegundo.



GRADIENTE DE VOLTAGE A LA FRECUENCIA DE POTENCIA  
KV-RMS POR PULGADA DE MADERA.

Fig. 4.7 CALCULO DE LA PROBÁBILIDAD DE CONTORNEO  
QUE RESULTAN EN UN ARCO DE POTENCIA.

En lugares críticos sobre las líneas, los voltajes son medidos. Este dato es determinado de las pruebas del modelo. Se indica sobre las hojas voltios por amperios de corriente de impacto de descargas atmosféricas, encontrado en los datos. Una hoja de datos separados de este tipo se necesita para cada intervalo de aterrizamiento para un tipo en particular de configuración de líneas y tipo de protección de descargas atmosféricas probados.

Estas hojas de datos forman una parte de los datos. Los cuales son procesados por técnicas de Montecarlo por un especial programa de computadora digital desarrollado para este estudio. La técnica consiste en seleccionar una amplitud de corriente de impacto de descargas atmosféricas y tiempo para la cresta de una forma aleatoria y aplicar a la línea en localizaciones de impacto seleccionadas, las mismas que son escogidas en forma aleatoria. El voltaje producido en las localizaciones significantes son calculados y los efectos de la corriente de predescarga son incluidos en este punto. Los voltajes obtenidos son comparados con el nivel de aislamiento de la línea seleccionada (la cual tiene una curva voltios-tiempo) y si un voltaje excede del nivel de aislamiento aplicado, un contorno se asume que ocurre. Luego otro impacto por descarga

atmosférica y el límite de la descarga atmosférica son seleccionados y el proceso es repetido.

El proceso es repetido hasta un número suficiente de impactos de descargas atmosféricas que han sido aplicados a la línea para una tasa de contorno a ser establecido. Estas tasas de contorno son archivadas sobre las hojas-contorno por cien impactos en las líneas. Ahí es visto que para cada configuración de línea y tipo de protección contra descargas atmosféricas e intervalo de aterrizamiento, el efecto de resistencia de contacto a tierra y el nivel de aislamiento de la línea son identificados junto con el porcentaje de contorno que ocurre debido a cada localización de impacto. El número total de contorno por cien impacto en la línea es obtenido por el uso de la información sobre las curvas de la figura 4.6, previamente descrito bajo G-distribución of Stroke Locations Along Line.

#### 4.3 EQUIPOS DE PROTECCION CONSIDERADOS

El mayor esfuerzo en este estudio es dirigido hacia la determinación de los requerimientos de protección contra descargas atmosféricas de la línea de distribución misma. Los resultados estan dados en términos de contorno por año y por 100 millas, o

en términos de porcentajes de impactos a la línea que resultan en un contorneo del aislamiento, durante el estudio, los equipos no fueron ubicados sobre la línea.

Se asumió que los equipos tenían su propia protección contra descargas atmosféricas y podría por lo tanto mejorar el comportamiento del circuito completo.

## CAPITULO V

### APLICACION PRACTICA

#### 5.1 ACUMULACION DE DATOS

En las secciones anteriores fue posible obtener un buen entendimiento del fenómeno de descarga atmosférica y su efecto sobre la operación del circuito de distribución.

Esta sección presenta la aplicación del procedimiento del diseño, etapa por etapa, para permitir al diseñador establecer una cierta configuración de estructura, la que tendrá una tasa de operación de descargas atmosféricas prevista, esto es, un número predeterminado de contorneos que podrían resultar en una operación de breaker o el reconectador del circuito.

Las técnicas a ser empleadas en el diseño de un circuito de distribución partirán del hecho que la tasa de salida será limitada a un número predeterminado. Por ejemplo, una tasa de referencia de 4 salidas por 100 millas de línea por año podría pa-

recer razonable. Esto fue descrito en el numeral 4.1.1.

El numeral 4.1.2 suministra la información necesaria para determinar el número total de impactos de descarga atmosférica a la línea por 100 millas y también el porcentaje permisible de estos impactos de descargas atmosféricas que pueden causar un contorneo. Esto será una función de la altura del conductor sobre el suelo, el nivel isoceraunico, la protección natural y el aislamiento de la madera.

Con esta información básica el diseñador de la línea seleccionará ahora una configuración de las estructuras del circuito, tales como: horizontal, triangular, o construcción vertical. De los resultados del estudio presentados en el anexo D y los métodos de protección deseados para ser empleados, esto es, hilo de guarda, un pararrayo sobre la fase superior, o pararrayos sobre todas las fases; es posible determinar los intervalos de aterrizamiento, el valor ohmico del aterrizamiento y la resistencia del aislamiento de la línea, necesario para obtener la tasa de salida prevista.

Este procedimiento, como se lo ha perfilado, ofrece al diseñador la oportunidad para hacer una evalua-

ción económica de los distintos métodos de protección con el mismo comportamiento de la descarga atmosférica.

A continuación se presenta un análisis del procedimiento etapa por etapa y la evaluación económica de las diferentes alternativas de protección contra sobrevoltajes, para una línea de distribución.

### 3.2 PROCEDIMIENTO A SEGUIR

- a). Establecer el porcentaje permisible de impactos de descargas atmosféricas para una línea de distribución que resulta en una operación de un breaker o reconectador del circuito.
- b). Establecer la configuración y método de protección que suministrará la tasa de salida deseada.

$$N_0 = \left[ \frac{100 - X}{100} \right] \cdot N_1 \quad Y \quad \left[ \frac{Z}{100} \right]$$

$$\sigma \quad Z = \frac{N_0 \cdot 100^2}{(100-X) (N_1) (Y)}$$

Donde:

$N_0$  = Tasa de salida de referencia o el número tolerable de salida por 100 millas por año.

$N_1$  = Número de impactos de descargas atmosféricas a la línea por año, asumiendo que no hay protección natural.

$X$  = Porcentaje de línea que tiene protección natural.

$Y$  = Tasa de contorneo por descargas atmosféricas por unidad que causan un arco de potencia, como una función del gradiente de la frecuencia de potencia a través del aislamiento de la madera.

$Z$  = Porcentaje de impacto de descarga atmosférica a la línea que resultan en un contorneo.

### 5.2.1 Número de Impactos de Descargas Atmosféricas por Milla Cuadrada

El número de impactos por milla cuadrada dentro de un área dependerá del nivel isoceraunico y de una constante estadística.

$$N = K (I.L.)$$

$$N = 0.5 (I.L.)$$

Donde:

$k$  = Factor 0.25 a 0.50, se selecciona 0.50

I.L. = Nivel Isoceraunico.

### 5.2.2 Franja de Tierra Protegida por la Línea

Encontrar el área de una franja de tierra protegida por 100 millas de línea:

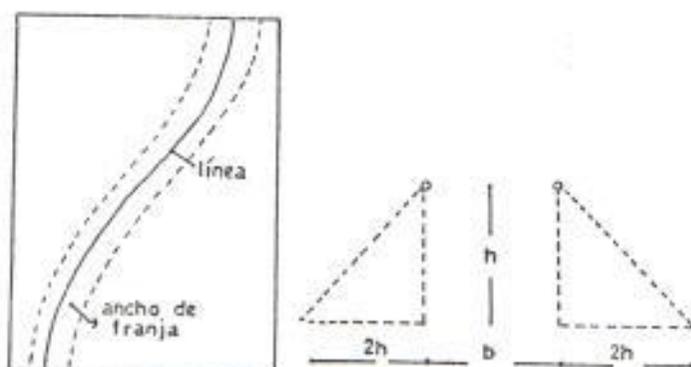


Fig 5.1 Area protegida por la línea

$$\text{Ancho de la franja} = 4h + b$$

$h$  = Altura promedio del conductor sobre el suelo.

$$o \quad h = h_t - \frac{2}{3} (h_t - h_{ms})$$

Donde:

ht = Altura del conductor en el poste.

hms = Altura del conductor en el punto de flecha máximo.

b = Espaciamiento de los conductores.

### 5.2.3 Número de Impactos de Descarga Atmosférica por 100 millas de Línea

Para encontrar el número de impactos por descargas atmosféricas para 100 millas por año:

$$N_1 = \frac{0.5 (I.L.) \cdot 100}{5.280} [4h + b]$$

$$N_1 = IL [.0379h + .0094b]$$

### 5.2.4 Porcentaje de Impactos de Descarga Atmosférica por 100 millas por Año con Protección

Para encontrar el porcentaje de impactos por descarga atmosférica para 100 millas de línea por año considerando protección natural, debido a grandes edificios y árboles.

Se tiene  $X$  = Porcentaje de línea protegida en forma natural.

$N_s$  = Porcentaje de impactos por descarga atmosférica para 100 millas de línea por año que incluye protección natural.

$$N_s = \left[ \frac{100 - X}{100} \right] N_1$$

#### 5.2.5 Probabilidad de Contorneo con Aislamiento de Madera

Si el aislamiento de la madera es considerado, el factor  $Y$  indica la probabilidad de contorneo que resultarán en un arco de potencia. Esto será determinado usando la curva, fig. 4.7, donde el gradiente de voltaje a la frecuencia de potencia de la madera es el  $K_v$  rms dividido por la longitud de camino de la madera en pulgada.

#### 5.2.6 Porcentaje de Impactos de Descarga Atmosférica en la Línea que Resultan en un Contorneo

El valor calculado " $Z$ " definido anteriormente es el porcentaje de impacto debido a

descarga atmosférica a la línea, que resulta en un contorno. Este valor será usado con los datos del estudio, en el capítulo IV, anexo D, dependiendo del tipo de protección y la configuración del poste como esta indicado en la tabla S.1.

Tabla 5.1  
RESUMEN DE LOS TIPOS DE PROTECCIONES  
Y CONFIGURACIONES USADO EN EL ESTUDIO

Tipo de Protección	TIPO DE CONFIGURACION DEL CIRCUITO				"D"
	"A"	"B"	"C"	"D"	
	Horizontal	Triangular	Vertical		Monofásica
Hilo de guarda	2 - 3		7 - 9 - 11		
Pararrayo en la fase superior		4 - 5	6 - 8 - 10		12
Pararrayos en todas las fases	1	4 - 5	6 - 8 - 10		

El método que se va a utilizar en la evaluación económica de las diferentes alternativas de protección contra sobrevoltajes, de una línea de distribución es el "Metodo de Análisis Incremental" (12).

El método de análisis incremental determina el impacto económico neto, que se obtiene en la construcción de cada una de las alternativas de protección ( en el caso analizado son 3 ), comparando el cambio resultante en los ingresos totales con respecto al cambio de los costos totales. Lo que interesa es el efecto neto de las decisiones o sea el cambio en los ingresos netos.

El Análisis Incremental centra su atención en aquellos efectos que son relevantes, en el sentido de que se ven afectados por las decisiones que se están considerando, pasando por alto los elementos fijos de una situación los cuales se consideran constantes, puesto que no se ven afectados por las alternativas que se consideran. Por esta razón en la evaluación económica de la protección contra sobrevoltajes los ingresos que se obtienen y los componentes de costos de la línea de distribución que son iguales para todas las alternativas, no se consideran, de aquí la alternativa que se seleccione será aquella que tenga el menor Valor Presente

te del Costo Total.

Debido al valor del dinero en el tiempo los costos e ingresos que se tienen en diferentes momentos de tiempo, deben ajustarse a sus valores equivalentes en un momento de tiempo común, mediante una tasa de descuento, antes de realizar una comparación con las otras alternativas. La tasa de actualización recomendada por Instituciones Financieras Internacionales, para la evaluación de proyectos es 15% (11).

### 5.3 EJEMPLO DE APLICACION

El Proyecto de Electrificación que se ha seleccionado para la Evaluación Técnica y Económica de la Protección de Sobrevoltaje es la Línea de Distribución Balzar - Hda. Guayaquil, que está localizado en el cantón Balzar, Provincia del Guayas, perteneciendo este proyecto a la zona de concesión de la Empresa Eléctrica Regional Guayas - Los Ríos. (ver figura 5.2).

Las poblaciones que se incorporan al servicio de energía eléctrica con este proyecto son:

Población

H. Sta Mónica

Los Boyales

La Linda

La Delicia

Juanina

Para electrificar estas poblaciones se ha considerado la construcción de una línea de alta tensión trifásica de 12 Kms de longitud, cuyas características son:

Línea de alta tensión.

Fases: 3

Calibre: 2/0

Tensión: 13.8 Kv.

Configuración de la estructura: triangular.

Nivel Isoceraunico: 5

Longitud: 12 Kms.

Para proteger la línea de distribución señalada anteriormente contra sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas, se van a considerar 3 alternativas de protección, la primera alternativa es la protección que actualmente se encuentra instalada y las dos restantes, son las alternativas obtenidas a partir del presente estudio.

PROCEDIMIENTO DE PROYECTOS  
DISEÑO SIMPLIFICADO

NOMBRE: BALZAR - Hcda. GUAYAQUIL

NUMERO

ST-85

SISTEMA

DAULE

DESCRIPCION DEL PROYECTO Y TRAZADO DE LINEA DE ALIMENTACION

FECHA

SEPTIEMBRE / 85

PUNTO DE ALIMENTACION

NOMBRE DE SUBESTACION

CAPACIDAD (MVA)

BALZAR

BALZAR

2.5

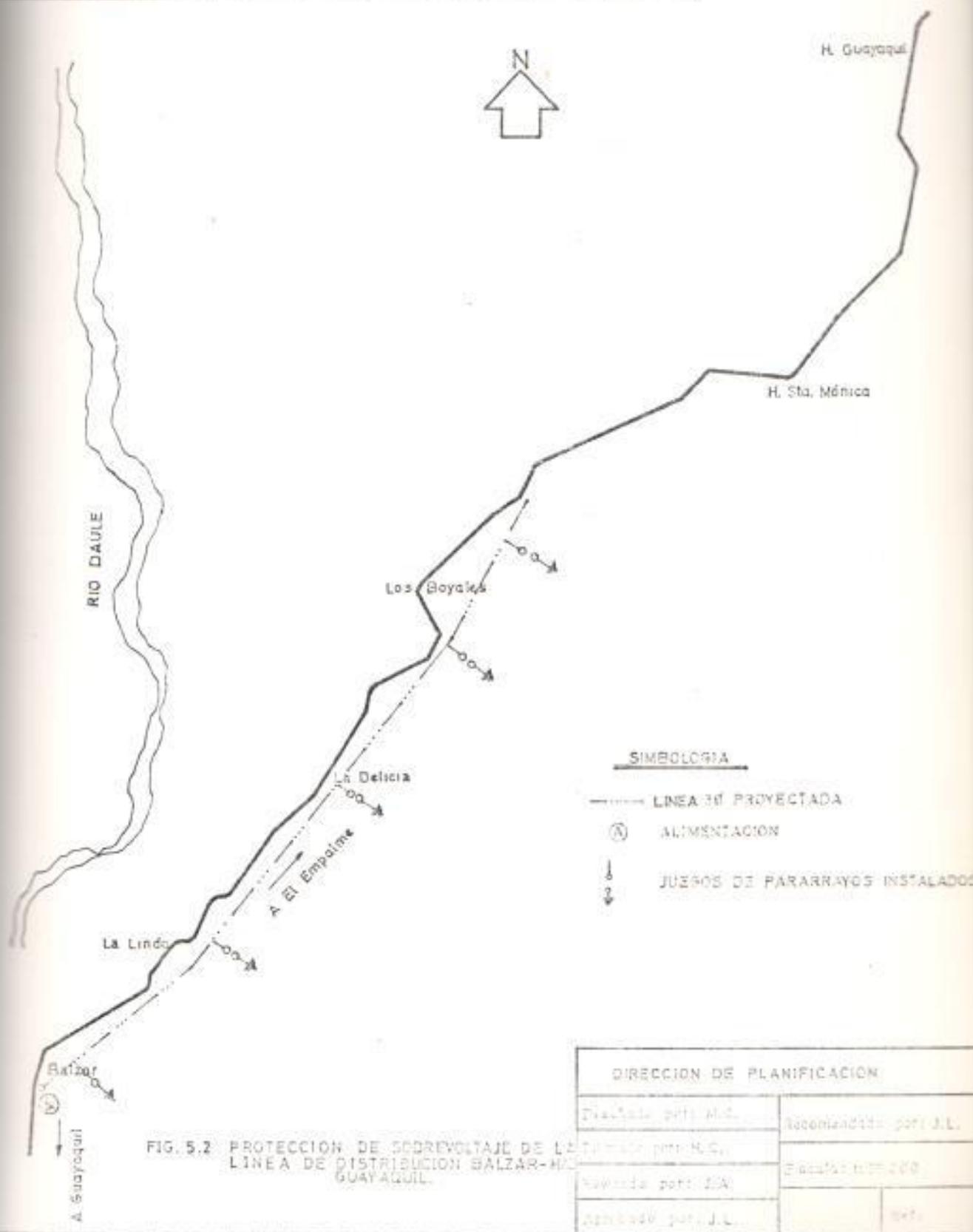


FIG. 5.2 PROTECCION DE SOBREVOLTAJE DE LA LINEA DE DISTRIBUCION BALZAR-HCDA. GUAYAQUIL.

5.3.1 Condición I - Sin Aislamiento de Madera

Alternativa I:

Protección Pararrayo en Todas las Fases  
(sistema actual).

Esta protección se encuentra actualmente implementada y consiste en la instalación de 5 juegos de pararrayos a lo largo de los 12 Kms de recorrido. Cada juego de pararrayos consta de 3 unidades, uno en cada fase.

Alternativa II:

Protección Pararrayo en la Fase Superior.

Tipo de configuración: Triangular

Kv: 13.8

Altura del Conductor sobre el Poste: 32'

Protección Natural: 0

Aislamiento de madera 0"

Nivel Isoceraunico (IL): 5

Tasa de Salida (No): 4

Etapa I: Nivel Isoceraunico IL = 5

$$N = 0.5 \times 5$$

$$N = 2.5$$

Etapa II: Area Protegida por 100 millas de Línea.

$$h = h_t - 2/3 (h_t - h_{ms})$$

$$h = 32 - 2/3 (32 - 30) = 30,67$$

Etapa III: Número de Impactos de Descargas Atmosféricas Esperados por 100 millas de Línea.

$$N_1 = \frac{(0.5)(IL)(100)}{5280} (4h + b)$$

$$N_1 = \frac{0.5 \times 5 \times 100}{5280} 4(30.67) + 0$$

$$N_1 = 5.81$$

Etapa IV: Porcentaje de Impactos de Descargas Atmosféricas a 100 millas de Línea por año, considerando protección natural.

$$X = 0\%$$

$$N_s = \left[ \frac{100 - X}{100} \right] N_1$$

$$N_s = \left[ \frac{100 - 0}{100} \right] 5.81$$

$$N_s = 5.81$$

Etapa V: Probabilidad de que un Contorneo por Descargas Atmosféricas cree un Arco de Potencia sobre el Aislamiento de Madera.

G: Gradiente de voltaje en la madera, a la frecuencia de potencia.

G= kv/ pulgadas de madera.

Para 0" de madera

$$Y = 1.0$$

Etapa VI: Porcentaje de Contorneo por Descargas Atmosféricas "Z". que causarán una interrupción.

$$Z = \frac{100^2 \times N_s}{(100 - X) N_1 Y}$$

$$Z = \frac{100^2 \times 5}{(100 - 0) 5.8 \times 1.0}$$

$$Z = 86.2 \text{ (valor teórico)}$$

De la curva Z vs Intervalo de  
Aterrizamiento (Kv= 500) R=10  
anexo D.

Z= 86.2%            I = 899.6 pies  
                         I = 274.3 metros

Intervalo de Aterrizamiento

I = 280 metros

### Alternativas III:

Protección Pararrayos en todas las Fases.

Del cálculo anterior Z = 86.2%.

De la curva anterior vs intervalo de  
aterrizamiento (Kv 500) R= 10

I = 7545.7 pies

I = 2300.0 metros

3.3.2 Condición II - Con Aislamiento de Madera para dos Longitudes Diferentes

Aislamiento de Madera 12"

Alternativa I:

Proteccion Pararrayo en todas las Fases (sistema actual).

Esta protección se encuentra actualmente implementada y consiste en la instalación de 5 juegos de pararrayos a lo largo de los 12 Kms de recorrido. Cada juego de pararrayos consta de 3 unidades, uno en cada fase.

Alternativa II:

Protección Pararrayo en la Fase Superior.

Tipo de configuración: Triangular

Kv: 13.8

Altura del Conductor sobre el Poste: 32'

Protección Natural: 0

Aislamiento de madera 12"

Nivel Isoceraunico (IL): 5

Tasa de Salida (No): 4

Etapa I: Nivel Isoceraunico IL = 5

$$N = 0.5 \times 5$$

$$N = 2.5$$

Etapa II: Area Protegida por 100 millas de Línea.

$$h = ht - \frac{2}{3} (ht - hms)$$

$$h = 32 - \frac{2}{3} (32 - 30) = 30,67$$

Etapa III: Número de Impactos de Descargas Atmosféricas esperados por 100 millas de Línea.

$$N1 = \frac{(0.5)(IL)(100)}{5280} (4h + b)$$

$$N1 = \frac{0.5 \times 5 \times 100}{5280} 4(30.67) + 0$$

$$N1 = 5.81$$

Etapa IV: Porcentaje de Impactos de Descargas Atmosféricas a 100 millas de Línea por año, considerando protección natural.

$$X = 0\%$$

$$N_s = \frac{100 - X}{100} N_1$$

$$N_s = \frac{100 - 0}{100} 5.81$$

$$N_s = 5.81$$

Etapa V: Probabilidad de que un Contorneo por Descargas Atmosféricas cree un Arco de Potencia sobre el Aislamiento de Madera.

G: Gradiente de voltaje en la madera, a la frecuencia de potencia.

G= kv/ pulgadas de madera.

$$G = 13.8 / 12" = 1.15$$

Y de la figura 4.7,

$$Y = 0.49$$

Etapa VI: Porcentaje de Contorneo por Descargas Atmosféricas "Z". que causarán una interrupción.

$$Z = \frac{100^2 \times N_o}{(100 - X) N_1 Y}$$

$$Z = \frac{100^2 \times 5}{(100-0) 5.8 \times 0.49}$$

$$Z = 176 \text{ (valor teórico)}$$

Entonces  $Z = 100\%$  (máximo porcentaje permisible)

De la curva  $Z$  vs Intervalo de Aterrizamiento ( $K_v = 500$ )  $R=10$  anexo D.

$$\begin{aligned} Z = 100\% & \quad I = 2350 \text{ pies} \\ & \quad I = 716,3 \text{ metros} \end{aligned}$$

Intervalo de Aterrizamiento

$$I = 720 \text{ metros}$$

### Alternativas III:

Protección Pararrayos en todas las Fases.

Del cálculo anterior  $Z = 100\%$ .

De la curva anterior vs intervalo de aterrizamiento ( $K_v = 500$ )  $R = 10$

I = 9920 pies

I = 3320 metros

Aislamiento de Madera 18"

Alternativa I:

Protección Pararrayo en todas las Fases  
(sistema actual).

Esta protección se encuentra actualmente implementada y consiste en la instalación de 5 juegos de pararrayos a lo largo de los 12 Kms de recorrido. Cada juego de pararrayos consta de 3 unidades, uno en cada fase.

Alternativa II:

Protección Pararrayo en la Fase Superior.

Tipo de configuración: Triangular

Kv: 13.8

Altura del Conductor sobre el Poste: 32'

Protección Natural: 0

Aislamiento de madera 18"

Nivel Isoceraunico (IL): 5

Tasa de Salida (No): 4

Etapa I: Nivel Isoceraunico  $IL = 5$

$$N = 0.5 \times 5$$

$$N = 2.5$$

Etapa II: Area Protegida por 100 millas de Línea.

$$h = ht - \frac{2}{3} (ht - hms)$$

$$h = 32 - \frac{2}{3} (32 - 30) = 30,67$$

Etapa III: Número de Impactos de Descargas Atmosféricas esperados por 100 millas de Línea.

$$N1 = \frac{(0.5)(IL)(100)}{5280} (4h + b)$$

$$N1 = \frac{0.5 \times 5 \times 100}{5280} (4(30.67) + 0)$$

$$N1 = 5.81$$

Etapa IV: Porcentaje de Impactos de Descargas Atmosféricas a 100 millas de Línea por año, considerando protección natural.

$$X = 0\%$$

$$N_s = \frac{100 - X}{100} N_1$$

$$N_s = \frac{100 - 0}{100} 5.81$$

$$N_s = 5.81$$

Etapa V: Probabilidad de que un Contorneo por Descargas Atmosféricas cree un Arco de Potencia sobre el Aislamiento de Madera.

G: Gradiente de voltaje en la madera, a la frecuencia de potencia.

G= kv/ pulgadas de madera.

$$G = 13.8 / 18" = 0.77$$

Y de la figura 4.7,

$$Y = 0.20$$

Etapa VI: Porcentaje de Contorneo por Descargas Atmosféricas "Z". que causarán una interrupción.

$$Z = \frac{100 \times N_s}{(100 - X) N_1 Y}$$

$$Z = \frac{100^2 \times 5}{(100-0) 5.8 \times 0.2}$$

$$Z = 431 \text{ (valor teórico)}$$

Entonces  $Z = 100\%$  (máximo porcentaje permisible)

De la curva  $Z$  vs Intervalo de Aterrizamiento ( $K_v = 500$ )  $R=10$  anexo D.

$$Z = 100\% \quad I = 2350 \text{ pies}$$

$$I = 716,3 \text{ metros}$$

Intervalo de Aterrizamiento

$$I = 720 \text{ metros}$$

### Alternativas III:

Protección Pararrayos en todas las Fases.

Del cálculo anterior  $Z = 100\%$

De la curva anterior vs intervalo de aterrizamiento ( $K_v = 500$ )  $R = 10$

$$I = 9920 \text{ pies}$$

$$I = 3320 \text{ metros}$$

#### 5.4 OBSERVACIONES PERTINENTES

Dentro del Análisis Económico se ha escogido la condición II con aislamiento de madera 18" para su respectiva evaluación.

En las tablas No. 5.2, 5.3 y 5.4 se presentan los presupuestos para los tres tipos de protección de sobrevoltajes por descargas atmosféricas: hilo de guarda, pararrayo en la fase superior, pararrayo en todas las fases, debe observarse que en estos cuadros no están presentados todos los componentes del costo de un Proyecto de Electrificación Rural, sino sólo aquellos que varían dependiendo de la alternativa que se este considerando, tal como se mencionó en la descripción del método de Análisis Incremental.

La Evaluación Económica por medio del Método de Análisis Incremental, para cada una de las alternativas se la presenta en las tablas No. 5.5, 5.6 y 5.7. Según el Método Incremental la alternativa que se debe seleccionar, es aquella que tenga el menor valor presente del costo total; por lo tanto, la alternativa seleccionada es la No. 3.

Un resumen de los resultados de la evaluación económica de cada una de las alternativas se muestra en la tabla No. 5.8.

Tabla 5.2  
PRESUPUESTO UNITARIO DE LA PROTECCIÓN DE HILO DE GUARDA

TENDIDO DE 1 KM DE HILO DE GUARDA

MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Cable de acero galvanizado de 5/16" de diámetro, 7 hilos recubrimiento galvanizado clase B * high strenght* resistencia a la rotura 8.000 lbs. Ref. Cat. Joslyn 101-78 Sección F1	Km	1	215,000	215,000
Conector de aluminio rango de ajuste del # 2 al 1/0 AWG.	c/u	6	457	2,742
				217,742
MANO DE OBRA Y HERRAMIENTAS				
Tendido de cable de acero galvanizado.	Km	1	5,000	5,000
				5,000
Costo Directo				222,742
COSTO INDIRECTO (18% de costo directo)				40,094
TOTAL				262,836

ATERIZAMIENTO DEL HILO DE GUARDA

MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Conductor Cu desnudo para bajante.	Mt	12	295	3,540
Varilla de copperweld de puesta a tierra galvanizada en caliente 5/8"x6' con conector para sujetar cable de puesta a tierra. Cat Joslyn 101-78	c/u	1	1,100	1,100
				4,640
MANO DE OBRA Y HERRAMIENTAS				
Aterrizamiento del hilo de guarda por medio de una varilla de copperweld.	c/u	1	1,000	1,000
				1,000
Costo Directo				5,640
COSTO INDIRECTO (18% de costo directo)				1,015
TOTAL				6,655

$$C = 262,836L + 6,655N$$

Donde: C= Costo de la Protección Hilo de Guarda  
L= Longitud de línea en Km.  
N= Número de Aterrizamiento

Tabla 5.3  
PRESUPUESTO UNITARIO DE LA PROTECCION DE PARARRAYO  
EN LA FASE SUPERIOR

MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Pararrayo de distribución de 10 Kv conectado directo tipo válvula, completo con accesorios. Mc Graw Edison 77019 tipo E7.	c/u	1	27,366	27,366
Grapa de compresión doble ranura paralela rango de ajuste #2 a 1/0 AWG	c/u	1	2,851	2,851
Conductor Cu desnudo para bajante.	Mt.	12	295	3,540
Varilla copperweld de puesta a tierra galvanizada en caliente 5/8" x 6' con conector para sujetar cable de puesta a tierra. Cat Joslyn 101-78 #J8326	c/u	1	1,100	1,100
				34,857
<b>MANO DE OBRA Y HERRAMIENTAS</b>				
Instalación de pararrayo.	c/u	1	1,200	1,200
Instalación de puesta a tierra.	c/u	1	600	600
				1,800
<b>Costo Directo</b>				36,657
<b>COSTO INDIRECTO (18% de costo directo)</b>				6,598
<b>TOTAL</b>				43,255

Tabla 3.4  
PRESUPUESTO UNITARIO DE INSTALACION DE UN JUEGO DE TRES  
PARARRAYOS EN UNA LINEA DE DISTRIBUCION

MATERIALES	Unidad	Cantidad	Precio Unitario	Costo Total
Pararrayo de distribución de 10 Kv conectado directo tipo válvula, completo con accesorios. Mc Graw Edison 77019 tipo E7.	c/u	3	27,366	82,098
Grapa de compresión doble ranura paralela rango de ajuste #2 a 1/0 AWG	c/u	3	2,851	8,553
Conductor Cu desnudo para bajante.	Mt.	15	295	4,425
Varilla copperweld de puesta a tierra galvanizada en caliente 5/8" x 6' con conector para sujetar cable de puesta a tierra. Cat Joslyn 101-78 #JB326	c/u	1	1,100	1,100
				-----
				96,176
MANO DE OBRA Y HERRAMIENTAS				
Instalación de pararrayo.	c/u	3	1,200	3,600
Instalación de puesta a tierra.	c/u	1	600	600
				-----
				4,200
Costo Directo				-----
				100,376
COSTO INDIRECTO (10% de costo directo)				-----
				10,038
TOTAL				-----
				110,414
				-----

Tabla 5.5

## ANALISIS ECONOMICO METODO INCREMENTAL

Tasa de Des-  
cuento: 15%

ALTERNATIVA No. I				
SISTEMA ACTUAL				
ARO	Inversión	Costo de Op. y Mant.	Costo Total	Valor Presente Neto del Costo Total
	(1)	(2)=3X(1)	(3)=(1)+(2)	Total
0	592,220	0	592,220	592,220
1	0	17,767	17,767	15,449
2	0	17,767	17,767	13,434
3	0	17,767	17,767	11,682
4	0	17,767	17,767	10,158
5	0	17,767	17,767	8,833
6	0	17,767	17,767	7,681
7	0	17,767	17,767	6,679
8	0	17,767	17,767	5,808
9	0	17,767	17,767	5,050
10	0	17,767	17,767	4,392
VALOR PRESENTE NETO DEL COSTO TOTAL DE LA ALTERNATIVA No. I:				681,386

Tabla 5.8  
RESUMEN DE LOS RESULTADOS DE LA EVALUACION ECONOMICA DE LA  
PROTECCION DE SOBREVOLTAJE POR DESCARGAS ATMOSFERICAS

Alternativa	Intervalo de aterrizamiento (Mts)	# de aterrizamientos	Período de evaluación (años)	Precio Unitario de la Protección	Costo Total de la Obra	Valor Presente del costo
	(1)	(2)	(3)	(4)	(5) = (2)+(4)	
I	2,400	5	10	118,444	592,220	681,186
II	720	17	10	43,255	735,335	816,049
III	3,020	4	10	118,444	473,776	545,109

Tabla 5.6

## ANALISIS ECONOMICO METODO INCREMENTAL

Tasa de Des-  
cuento: 15%

ALTERNATIVA No. II				
PROTECCION PARARRAYO FASE SUPERIOR				
ARO	Inversión (1)	Costo de Op. y Mant. (2)=3X(1)	Costo Total (3)=(1)+(2)	Valor Presente Neto del Costo Total
0	735,335	0	735,335	735,335
1	0	22,060	22,060	19,183
2	0	22,060	22,060	16,681
3	0	22,060	22,060	14,505
4	0	22,060	22,060	12,613
5	0	22,060	22,060	10,968
6	0	22,060	22,060	9,537
7	0	22,060	22,060	8,293
8	0	22,060	22,060	7,211
9	0	22,060	22,060	6,271
10	0	22,060	22,060	5,453
VALOR PRESENTE NETO DEL COSTO TOTAL DE LA ALTERNATIVA No. II:				846,049

Tabla 5.7

ANALISIS ECONOMICO METODO INCREMENTAL

Tasa de Des-  
cuento: 15%

ALTERNATIVA No. III				
PROTECCION PARARRAYOS EN TODAS LAS FASES				
ANO	Inversión	Costo de Op. y Mant.	Costo Total	Valor Presente Neto del Costo Total
	(1)	(2)=3%(1)	(3)=(1)+(2)	Total
0	473,776	0	473,776	473,776
1	0	14,213	14,213	12,359
2	0	14,213	14,213	10,747
3	0	14,213	14,213	9,345
4	0	14,213	14,213	8,126
5	0	14,213	14,213	7,067
6	0	14,213	14,213	6,145
7	0	14,213	14,213	5,343
8	0	14,213	14,213	4,646
9	0	14,213	14,213	4,040
10	0	14,213	14,213	3,513
VALOR PRESENTE NETO DEL COSTO TOTAL DE LA ALTERNATIVA No. III:				545,109

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. En la evaluación económica de las alternativas de protección de sobrevoltajes contra descargas atmosféricas, la alternativa seleccionada fue la III, la cual es propuesta en este trabajo, y consiste en la instalación de pararrayos en todas las fases, en 4 puntos diferentes a lo largo de la línea de distribución escogida. La alternativa I, que corresponde al criterio del diseño actual, a pesar de utilizar el mismo sistema de protección de pararrayos en todas las fases, no es económicamente recomendable, porque sugiere 5 juegos de pararrayos.

La diferencia de criterio en cuanto al dimensionamiento de la protección de sobrevoltajes por descarga atmosférica, radica en que según el criterio actual el intervalo de instalación de pararrayos se encuentra estandarizado; mientras que en el sistema de protección propuesto se consideran los factores que influyen sobre la protección, incluyendo las particularidades de la zona a electrificarse, tales como: resistividad, nivel isoceraunico, configuración de la línea, etc., lo cual en algunos casos determina que las normas estandarizadas de protección resultan

muy conservadoras y que sea factible una protección de sobrevoltajes, que manteniendo una buena confiabilidad sea más económica.

2. La inversión realizada en la protección de sobrevoltajes, en un proyecto de electrificación representa alrededor del 1 al 2% del costo total del proyecto; por lo tanto, en la selección y en el dimensionamiento de la protección es necesario considerar características particulares del sector a electrificar con la finalidad de obtener un ahorro significativo en la construcción de las líneas y redes de distribución.
3. Para facilitar los estudios de protección de sobrevoltajes, se recomienda llevar un mejor registro de las descargas atmosféricas. Paralelamente, en los reportes de fallas se debe distinguir claramente la causa que las originaron, en el caso particular del estudio, las producidas por descargas atmosféricas.

## BIBLIOGRAFIA

1. G. G. Auer, R. H. Hopkinson "Lightning Protection of Distribution Circuits" (General Electric Company), capítulo II, IV. (1972)
2. G. Enriquez Harper, Técnica de las altas tensiones Volumen II (segunda edición; México: Limusa S.A., 1978 ), pp. 58-346
3. Instituto Ecuatoriano de Electrificación (Quito-Ecuador). Mapas de nivel isoceraunico.
4. Campinas, Análisis dos sistemas de distribución quanto as sobretensoes (Marco de 1980).
5. G. Enriquez Harper, Elementos de diseño de Subestaciones Eléctricas (Limusa-Wileg, 1980), p.p
6. H. Barcia "Protección Eléctrica del Proyecto Santo Domingo de los Colorados Fase B". ( Tesis, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1980).
7. Mat Darveniza, G.T. Linnbourn, and S.A. "Line Design and Electrical Propertie of Wood". Prentice IEEE, Vol.PAS-86, No.11-(November 1967), pp. 1344-1367.

8. J. M. Clayton, A. R. Hileman, " A Method of Estimating Lightning Performance Of Distribution Lines", AIEE Transactions, Vol. 73, pt. III-B, 1954, pp. 933-945.
9. AIEE Committee Report, "A Method of Estimating Lightning Performance of Transmission Lines", AIEE Transactions, Vol. 69, pt. II, 1950, pp. 1187-1196.
10. H. R. Armstrong, E. R. Whitehead, "A Lightning Stroke Path Finder," AIEE PA&S Transactions, vol. 83, 1964, pp. 1223-27.
11. Julio Melnick, Manual de Proyectos de Desarrollo Económico (Naciones Unidas, México, D. F., diciembre de 1958)
12. Henry William y Warren Haynes, Economía de la Empresa (Cuarta Edición, Agosto de 1982), pp. 45-49.
13. Westinghouse Electric Corporation. "Surge Protection of Power Systems". Power Systems (Capítulo I, VII, March 1975).
14. Allan Greenwood. "Electrical Transients in Power Systems" (Media, Pennsylvania, Marzo 1970), pp. 193-251.
15. Franco Vázquez Praderi. Sobretensiones, Coordinación de la Aislación" (CIER, Montevideo: Junio de 1974), pp. 23-35.

16. Stephen A. Sebo. "Sobrevoltajes y Coordinación de Aislamiento en los Sistemas de Potencia", ESPOL 1986.
17. Victor H. Orejuela. "Protección contra Sobrevoltajes en Subestaciones" IEEE sección - Ecuador, Julio-1978, Quito-Ecuador).
18. Westinghouse Electric Company. Electrical Transmission and Distribution Reference Book (1964).