



**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DEL LITORAL**
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

Diseño del aislamiento de líneas de transmisión
que atraviezan zonas agrícolas de alta contaminación
ambiental utilizando aisladores tipo poste

TESIS DE GRADO

Previa a la Obtención del Título de:

Ingeniero en Electricidad

Especialización: Potencia

Presentado por:

ANGEL OSWALDO QUEVEDO NOLIVOS

Guayaquil - Ecuador

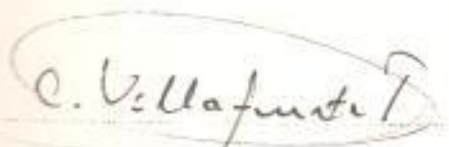
1.988

AGRADECIMIENTO

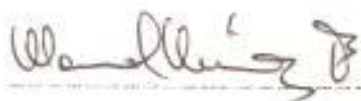
- Al Ing. MANUEL NUÑEZ BORJA, Director de Tesis, por su ayuda y colaboración para que este trabajo se realice.
- A la COMUNIDAD POLITECNICA, MAESTROS Y AMIGOS, que de una u otra forma ayudaron en la realización de este trabajo.
- A los Funcionarios de la EMPRESA ELECTRICA MILAGRO C.A., por la colaboración prestada para la feliz culminación de este trabajo.

DEDICATORIA

- A MIS PADRES
- A MIS HERMANOS
- A MIS FAMILIARES
- A MIS AMIGOS



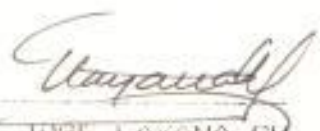
ING. CARLOS VALLAPUNTA
SUB-DECANO DE LA FACULTAD
DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. MANUEL NUMEZ B.
DIRECTOR DE TESIS



ING. CRISTÓBAL PARDO
MIEMBRO PRINCIPAL DEL
TRIBUNAL



ING. JOSE LAYANA CH.
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 EXAMENES Y TITULOS PROFESIONALES DE LA
ESPOL)

ANGEL OSWALDO QUEVEDO NOLIVOS

RESUMEN

1.- OBJETIVOS.

- Realizar un análisis sobre la influencia de la contaminación en los aisladores de las Líneas de Transmisión.
- Encontrar las causas y soluciones de perturbaciones que se producen en las líneas de Subtransmisión ya construidas pertenecientes a la Empresa Eléctrica Milagro C.A., las cuales atraviesan campos de caña de azúcar y utilizan aisladores tipo Line Post.
- Calcular la aislación de las L/ST de la EEMCA, de tal forma que no se presenten las perturbaciones e interrupciones típicas de estas líneas que atraviesan campos de caña de azúcar.
- Recomendar una solución factible, tanto técnica como económica para el caso analizado.

2.- METODOLOGIA.

Para la realización de este trabajo se seguirá la siguiente secuencia:

Primeramente se hace un análisis del problema de la contaminación en el sector eléctrico en general, para luego concentrarnos en los efectos de la contaminación sobre los aisladores, realizando una clasificación de las zonas de acuerdo al grado de contaminación de las mismas y describiendo algunos de los efectos perjudiciales que ocasiona la contaminación en los aisladores.

A continuación se procede a desarrollar un método de cálculo general para el aislamiento, considerando tanto los efectos de la contaminación, así como también los sobrevoltajes de frecuencia industrial, de maniobra y por descargas atmosféricas.

Luego se realiza la aplicación del método antes mencionado al Sistema Milagro, para lo cual se siguen los siguientes pasos:

- Recolección de datos de las líneas objeto de estudio tales como:

VIII

- Características de los aisladores instalados.
- Condiciones ambientales y meteorológicas de las zonas por las que atraviesan las líneas, con lo cual se puede determinar el tipo de contaminación para cada línea y así obtener las distancias de fuga apropiadas.
- También se necesita conocer los registros de las salidas de servicio de las líneas, causadas por fallas en los aisladores desde el momento en que fueron energizadas, para así tener una visión más clara del problema.

Posteriormente se realiza una comparación entre las características de los aisladores resultantes del cálculo, con las características de los aisladores instalados en las líneas, pudiendo así determinarse los posibles orígenes de las fallas del sistema.

Finalmente se realiza un análisis de algunas de las posibles alternativas de solución, para así proceder a recomendar la solución más factible tanto técnica como económica.

INDICE GENERAL

	Página
Resúmen.	VI
Índice general.	IX
Índice de figuras.	XIV
Índice de tablas.	XIX
Abreviaturas.	XXII
Introducción.	23

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACION

1.1. Antecedentes.....	25
1.2. La contaminación en los aisladores.....	26
1.3. Clases de depósitos contaminantes típicos.....	31
1.3.1. Cantidad equivalente de sal.....	31
1.4. Clasificación de las zonas de acuerdo al grado de contaminación.....	34
1.4.1. Niveles de contaminación.....	35
1.4.2. Distancia de fuga efectiva.....	38
1.5. Efecto de los depósitos contaminantes sobre los aisladores.....	42
1.5.1. Perturbaciones producidas por la conta- minación.....	42

1.5.2. Mecanismo de la descarga por contaminación.....	47
--	----

CAPITULO II

CALCULO TEORICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION.

2.1. Generalidades.....	52
2.2. Aislamiento por contaminación.....	54
2.2.1. Distancia de fuga mínima.....	55
2.3. Aislamiento para sobrevoltajes de frecuencia industrial.....	57
2.3.1. Efecto Ferranti.....	58
2.3.2. Fallas desbalanceadas.....	59
2.3.2.1. Cálculos de sobrevoltajes.....	60
2.3.2.2. Influencia de las condiciones meteorológicas.....	63
2.3.2.3. Aislación necesaria.....	64
2.4. Aislamiento para sobrevoltajes de maniobra....	66
2.4.1. Magnitudes de las descargas por maniobra en los sistemas de potencia.....	68
2.4.2. Influencia de las condiciones meteorológicas.....	71
2.4.3. Aislación necesaria.....	74

II

	Página
2.5. Aislamiento por descargas atmosféricas.....	77
2.5.1. Descargas sobre las estructuras y/d hilos de guarda.....	82
2.5.2. Método de cálculo alternativo para la aislación.....	85
2.5.3. Influencia de las condiciones metereo- lógicas.....	87
2.5.4. Sistemas de puesta a tierra.....	88
2.5.5. Aislación necesaria.....	89
2.6. Distancias libres.....	90

CAPITULO III

DESCRIPCION DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE S/T EXISTENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO MILAGRO.

3.1. Características de las zonas por donde atra- viesan las L/ST a estudiarse.....	97
3.2. Descripción del Sistema Eléctrico Milagro.....	98
3.3. Características de las L/ST a estudiarse.....	103
3.3.1. Longitud y tipos de aisladores instala- dos en las L/ST.....	105
3.3.2. Tipos de contaminación.....	106
3.3.3. Tiempo de servicio.....	106

2.4. Resumen de las salidas de servicio de las L/ST provocadas por fallas en los aisladores.....	109
--	-----

CAPITULO IV

CÁLCULO TEÓRICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE ST DEL SISTEMA MILAGRO.

4.1. Cálculo del aislamiento por contaminación.....	112
4.2. Cálculo del aislamiento por sobrevoltajes de frecuencia industrial.....	116
4.3. Cálculo del aislamiento por sobrevoltajes de maniobra.....	119
4.4. Cálculo del aislamiento por sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas.....	123
4.5. Distancias libres.....	141
4.6. Aislamiento resultante del diseño.....	143

CAPITULO V

ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA AISLACION EXISTENTE Y DE LA AISLACION CALCULADA PARA LAS L/ST DEL SISTEMA MILAGRO

5.1. Descripción detallada de las características del aislamiento calculado y del aislamiento existente en las L/ST.....	147
5.2. Análisis comparativo entre el aislamiento calculado en esta Tesis y el aislamiento existente en las L/ST.....	150
5.3. Conclusión sobre las posibles causas del problema que se analiza.....	155

CAPITULO VI

ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCION Y RECOMENDACIONES.

6.1. Análisis de las alternativas de solución más factibles.....	158
6.2. Recomendaciones para solucionar el problema...	162
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	164
ANEXOS.....	166
BIBLIOGRAFIA.....	222

INTRODUCCION

El efecto de la contaminación tiene repercusiones muy importantes sobre los equipos eléctricos, ya que afecta a las partes conductoras y a las aislantes. El sistema eléctrico en sí depende de las condiciones de su aislamiento, y si éste es dañado por efectos de la contaminación, lo disminuye provocando fallas en el sistema eléctrico.

Existen diferentes tipos de contaminantes así: sal, smog, gases químicos, fertilizantes para la agricultura, polvo, ceniza, neblinas, etc.

Como ya señalamos anteriormente, la parte del sistema eléctrico más afectada por este problema es el aislamiento, es decir todo lo que utilizamos como medio para aislar las instalaciones (porcelanas, vidrios, etc.), pero se debe indicar que también existen daños por corrosión en los conductores y en las estructuras de los sistemas tanto de distribución como de transmisión.

Tomando en cuenta las consideraciones anteriores se ha visto la necesidad de realizar este trabajo, ya que en la zona Litoral principalmente, existen líneas que cruzan zonas que podría considerárselas de alta contaminación durante ciertas épocas del año, tales como:

- Plantaciones bananeras, en las cuales es muy usual realizar fumigaciones aéreas en gran parte del año.
- Campos de caña de azúcar, en donde al producirse la quema de los cañaverales se contamina el aislador disminuyendo su resistencia dieléctrica, ocasionando arcos que provocan la destrucción de los aisladores, debido a la alta concentración de impurezas en los mismos.

Basandonos en todo lo anteriormente expuesto, se desea desarrollar un método de trabajo que pueda ser utilizado para el cálculo del aislamiento de líneas que atraviesen zonas de similares características de contaminación a las que presentan los campos de caña de azúcar.

CAPITULO I

EFFECTOS DE LA CONTAMINACION

1.1. EFECTOS.

La contaminación ha sido un problema para los equipos e instalaciones eléctricas, desde que estos empezaron a ser construidos en exteriores.

Los efectos de la contaminación en los equipos e instalaciones eléctricas son muy variados. Entre los más comunes pueden citarse los siguientes:

- 1.- Ataque químico a los componentes del concreto reforzado, lo cual culmina con la desintegración de los equipos construidos con este material. Por ejemplo: los postes para líneas aéreas, como se indica en la figura 1.1.
- 2.- Corrosión de herrajes y equipos de acero, con la consiguiente disminución de la vida útil de los mismos, como se aprecia en la figura 1.2.
- 3.- Corrosión de conductores, en especial de los conductores de aluminio con refuerzo de acero, lo que da lugar a la formación de "puntos calientes" que ocasionan pérdidas de energía y la eventual destrucción del conductor.

CAPITULO I

EL PROBLEMA DE LA CONTAMINACION

1.1. ANTECEDENTES.

La contaminación ha sido un problema para los equipos e instalaciones eléctricas, desde que estos empezaron a ser construidos en exteriores.

Los efectos de la contaminación en los equipos e instalaciones eléctricas son muy variados. Entre los más comunes pueden citarse los siguientes:

- 1.- Ataque químico a los componentes del concreto reforzado, lo cual culmina con la desintegración de los equipos construidos con este material. Por ejemplo: los postes para líneas aéreas, como se indica en la figura 1.1.
- 2.- Corrosión de herrajes y equipos de acero, con la consiguiente disminución de la vida útil de los mismos, como se aprecia en la figura 1.2.
- 3.- Corrosión de conductores, en especial de los conductores de aluminio con refuerzo de acero, lo que da lugar a la formación de "puntos calientes" que ocasionan pérdidas de energía y la eventual destrucción del conductor.

- 4.- Formación de incrustaciones en las cuchillas de interrupción, que frecuentemente producen falsos contactos e impiden el funcionamiento de las mismas.
- 5.- Formación de depósitos en los aisladores, los cuales producen corrientes de fuga, flameos y otros efectos adversos que dan como resultado la destrucción de los aisladores, figura 1.3.

De todos los fenómenos antes enumerados, nuestro estudio se concentrará en el último numeral, ya que en la aislación de una línea los elementos mayormente afectados por la contaminación son los aisladores.

1.2. LA CONTAMINACION EN LOS AISLADORES.

Quando los aisladores nuevos son puestos en contacto con el medio ambiente, se cubren paulatinamente con una capa contaminante. El origen, las características y la densidad de dicha capa son sumamente variados. Sin embargo, en la mayor parte de los casos ésta capa está formada por una sustancia inerte y ciertas sales, las mismas que en ausencia de humedad no son conductoras, sin embargo cuando las condiciones

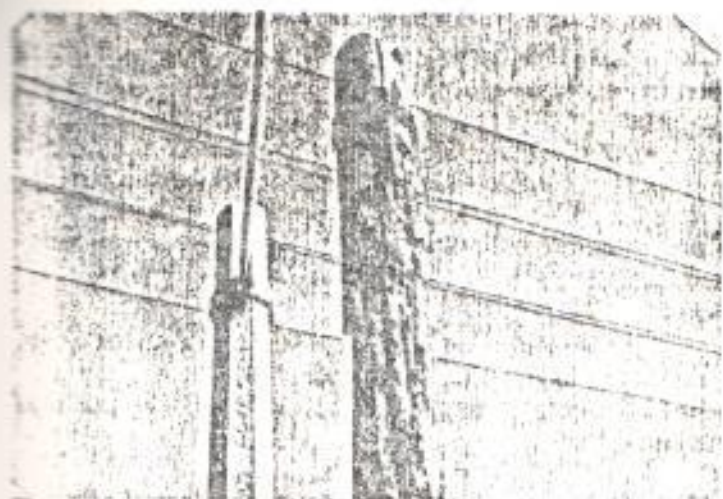


Figura 1.1

Efecto de la contaminación sobre el concreto reforzado

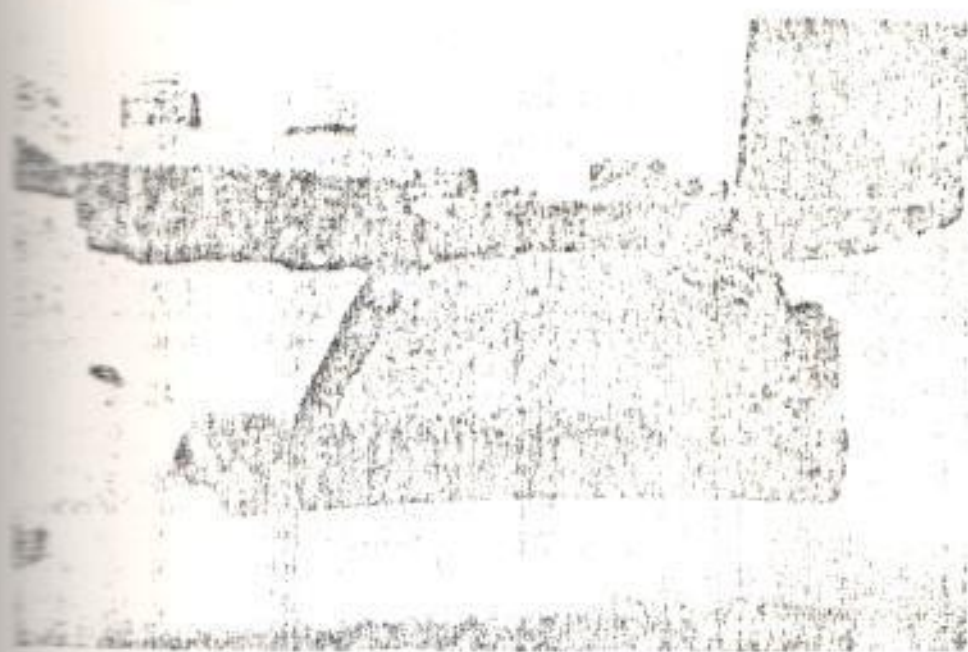
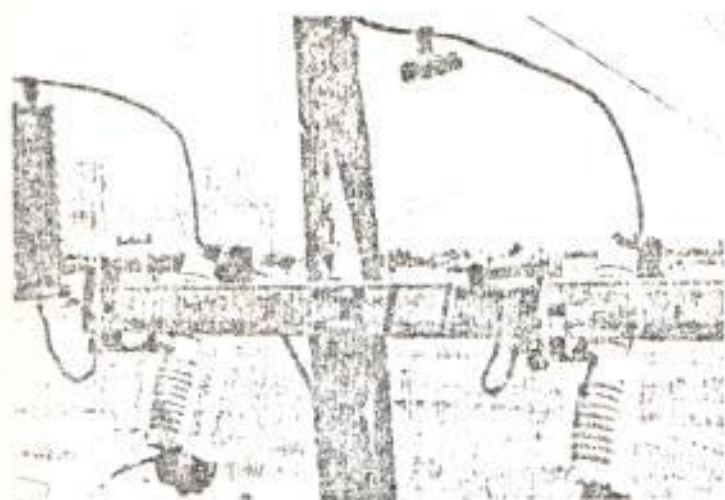


Figura 1.2

Efecto de la contaminación sobre los equipos de acero

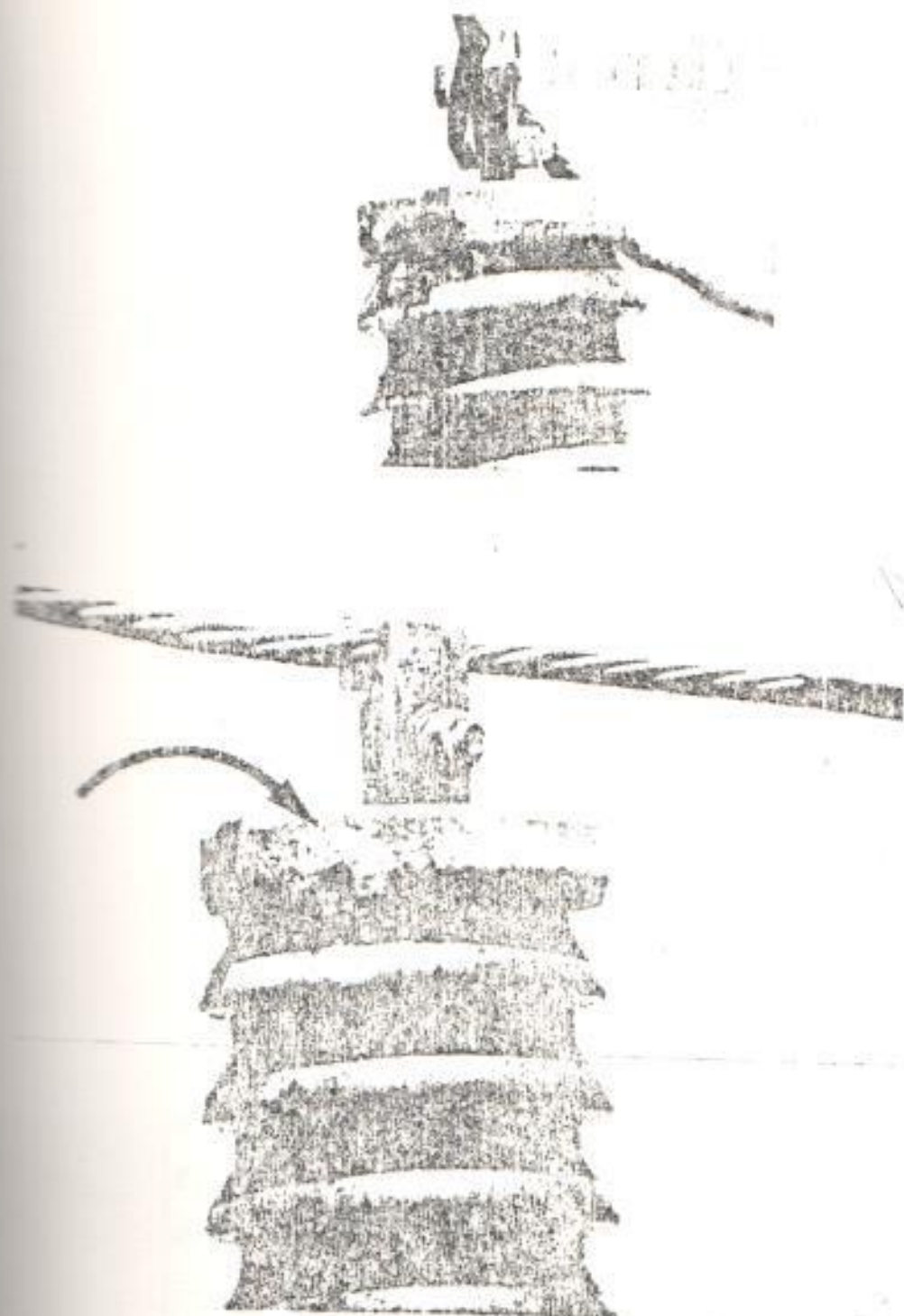


Figura 1.3

Efecto de la contaminación sobre los aisladores

metereológicas son propicias, la humedad del ambiente (procedente de la lluvia, rocío, niebla, brisa marina) se incorpora a la capa contaminante tornandola conductora.

Pero, hoy en día los aisladores modernos estan diseñados inicialmente para una limpieza natural mediante la lluvia y el viento, de tal manera que bajo condiciones normales de depósito de polvo actúan en forma satisfactoria.

Sin embargo, cuando los aisladores en su uso normal están en un medio ambiente con un grado de contaminación superior al normal, disminuye su aislamiento, produciendose el flameo, que en casos extremos causan interrupciones del suministro de energía eléctrica.

En los últimos años se ha logrado mucho progreso en el desarrollo de métodos para prevenir el flameo de los aisladores en servicio normal, así:

- Aumentando la distancia de fuga sobre la superficie total del aislador.
- Lavando los aisladores en caliente.

- Además se han desarrollado esmaltes semiconductores como una solución más definitiva al problema del flameo por contaminación.

1.3. CLASES DE DEPOSITOS CONTAMINANTES TIPICOS.

La variedad y distribución del tamaño de las diferentes partículas suspendidas en el aire y que forman parte de la contaminación transmitida por el mismo, se las clasifica como se aprecia en la tabla 1.1 (1).

1.3.1. Cantidad equivalente de sal.

Debido a que las descargas por contaminación con sal ocupan el mayor porcentaje en la frecuencia de ocurrencia entre todos los tipos de contaminaciones severas y también cubren una amplia área, mientras que otros tipos de contaminación están limitados a localizaciones particulares, se ha normalizado el hecho de expresar el grado de contaminación de un aislador como la cantidad de sal depositada en la superficie del mismo.

TABLA 1.1

RANGO DEL TAMAÑO DE LAS PARTICULAS CONTAMINANTES

Naturaleza del material suspendido.

Diámetro

(micrones)

1.- INORGANICA:

- a) Humos (gases de combustión)
- b) Vapores químicos - fungicidas
- c) Polvo, ceniza

0,001 -	0,300
0,010 -	1,000
1,000 -	100,0

2.- ORGANICA:

- a) Bacterias, microorganismos
- b) Esporas vegetales, gérmenes
- c) Polen, polinia

1,0 -	10,0
10,0 -	20,0
15,0 -	50,0

3.- ACUOSA (AGUA)

- a) Neblina, niebla
- b) Vapor de agua, rocío
- c) Llovizna
- d) Lluvia

1,0 -	50,0
10,0 -	100,0
50,0 -	400,0
400,0 -	4000,0

Cuando la contaminación se produce por otros materiales electricamente conductores diferentes a la sal, estos pueden ser convertidos a una cantidad de sal equivalente por medio de su resistividad, lo cual se conoce como "Cantidad equivalente de sal", y que es usualmente expresada como el peso del depósito por unidad de área de la superficie del aislador, asumiendo que posee una capa de contaminación con la misma cantidad de polvo ó ceniza insoluble.

En la figura 1.4 se muestra una curva que relaciona la concentración de sal con la resistividad del agua con sal a 18° C. (2)

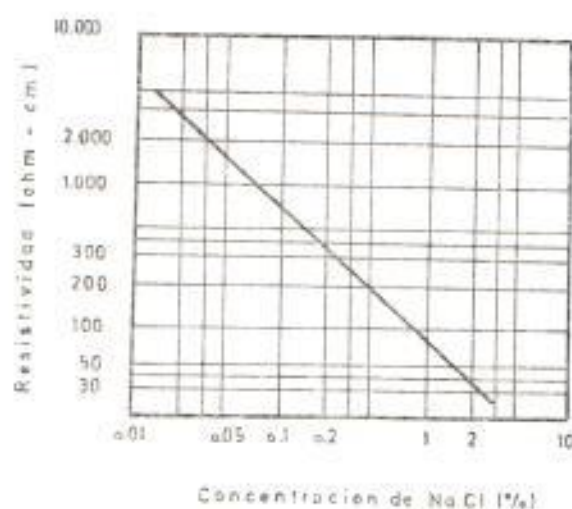


Figura 1.4

Concentración - resistividad del agua sal a 18° C.

Por ejemplo, todas las sustancias electrolíticas contenidas en una cantidad de lodo, pueden ser expresadas como una cantidad equivalente de sal, para esto es necesario preparar una solución de agua que tenga igual volumen y resistividad que la solución de lodo.

2.4. CLASIFICACION DE LAS ZONAS DE ACUERDO AL GRADO DE CONTAMINACION

Cuando se dispone de la medida del grado de contaminación de un sitio, es posible determinar el nivel de aislamiento con un factor de seguridad adecuado, teniendo en cuenta la variación del grado de contaminación con el tiempo y los errores inherentes tanto en las mediciones de las características de los aisladores como del grado de contaminación.

En vista de la gran variedad de aisladores que existen en el mercado, se emplea el factor "distancia de fuga por unidad de voltaje" para especificar el nivel de aislamiento. Así, para una cantidad constante de contaminación, el máximo voltaje de operación que un aislador puede resistir es directamente proporcional a la distancia de fuga del aislador.

1.4.1. Niveles de contaminación.

Según datos tomados de los folletos de aisladores de los fabricantes Gamma y NGK, dividimos las áreas contaminadas en cuatro categorías:

A. Categoría 1.

Áreas generales: Se pueden incluir en esta categoría las líneas rurales, principalmente cuando su trazado se desarrolla por zonas en las cuales se utilizan abonos químicos. Estos se mezclan con el polvo natural en forma extremadamente dividida y se depositan sobre la superficie del aislador.

En atmósfera seca, prácticamente no se modifica la tensión de flameo, pero en caso de lluvia, debido a la elevada conductividad eléctrica de las sales que constituyen los abonos, disminuye notoriamente la tensión de flameo.

En líneas próximas a vías de comunicación muy polvorrientas y de gran circulación de

vehículos. Los aisladores son también afectados por depósitos de esta naturaleza.

B. Categoría 2.

Áreas de mediana contaminación pero de niebla frecuente: Pertenecen a esta categoría las líneas rurales que atraviesan zonas de niebla frecuente, pero de baja precipitación acuosa que permita el lavado y autolimpieza del aislador.

El material contaminante se hace conductor debido a la humedad y ésta permite a su vez el depósito de nuevo material hasta formar incrustaciones.

En esta categoría también se consideran las líneas que pasan cerca a las plantaciones de caña de azúcar.

C. Categoría 3.

Áreas de extrema contaminación: En esta categoría se consideran las instalaciones en las

cuales se depositan sobre los aisladores un polvo grasiento en forma de película, que se va transformando con el tiempo en una capa adherente.

En líneas cercanas a zonas hulleras y regiones muy industrializadas, se forman depósitos que se superponen y se adhieren unos con otros, debido a la presencia de materias grasas. La lluvia y el viento solo los elimina parcialmente.

En esta categoría podemos incluir los depósitos que se forman sobre los aisladores en líneas próximas a fábricas de cemento, productos químicos y centrales termoeléctricas.

Aquí también se incluyen las líneas que cruzan por las plantaciones de caña de azúcar.

D. Categoría 4.

Zonas Costeras: En esta categoría se consideran las instalaciones ubicadas en las cercanías del mar, en las

cuales se forman depósitos de sal marina. Esta se deposita sobre los aisladores en estado seco y supone un verdadero peligro debido a que la conductividad superficial aumenta considerablemente, exagerándose aún más como consecuencia de la humedad existente.

Se consideran dentro de ésta categoría las instalaciones cercanas a grandes centrales de energía e industrias químicas y metalúrgicas, en las cuales la contaminación es muy severa debido a que los depósitos son conductores aún en atmósfera seca.

A continuación en la tabla 1.2 presentamos un resumen de la clasificación de las zonas según el tipo de contaminación, indicando además los valores de distancia de fuga sugeridos en cada caso.

1.4.2. Distancia de fuga efectiva.

Cada distancia de fuga indicada en la tabla 1.2 es la "distancia geométrica total" sobre la superficie del material aislante, sin embargo la forma de la superficie también

TABLA 1.3

CLASIFICACION DE LA CONTAMINACION

Clase de aislamiento	Categoría	Zona	Distancia de fuga mm/kv sistema
A	1	Agrícola, forestal, no industrial.	17 - 20
B	2	Ligera a mediana contaminación pero niebla frecuente. Lugares próximos a los cañaverales.	22 - 25
C	3	Áreas industriales, áreas de cañaverales, extrema contaminación.	26 - 36
D	4	Zonas costeras, contaminación con depósitos conductores.	38 - 45

influye en la resistencia eléctrica del aislante.

En la figura 1.5 (3) se ilustra que momentos antes de la descarga por contaminación, la distribución de voltaje a través de un aislador puede ser bastante irregular, ocasionando que la "distancia de fuga efectiva" sea mucho menor que la distancia geométrica.

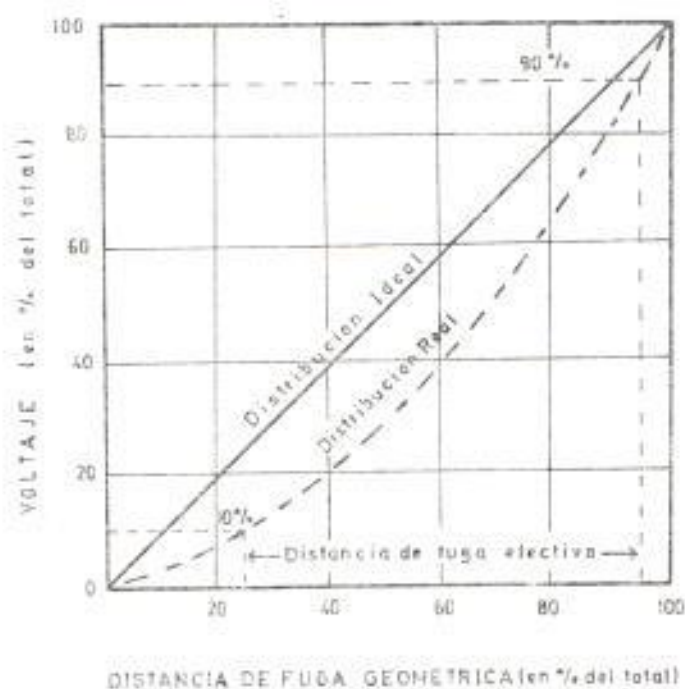


Figura 1.5

Definición de distancia de fuga efectiva

Experimentos han demostrado que la forma de esta distribución varía de un aislador a

otro, pero que el voltaje de descarga es estrechamente proporcional a la distancia comprendida entre el 10% y 90% de la curva de distribución de voltaje. (4)

La tabla 1.3 (3) nos muestra como los aisladores de suspensión de porcelana tienen una considerable variación en su resistencia a la contaminación y su distancia de fuga efectiva.

TABLA 1.3

RESISTENCIA DE FUGA EFECTIVA PARA AISLADORES DE PORCELANA
TIPO DISCO ESTANDAR. *

	Distancia de fuga geométrica. (mm)	Distancia de fuga efectiva. (mm)
66 x 5 3/4"	305	184
72 x 6 1/4"	370	203
82 5/8 x 7 3/4"	415	224

* Para una contaminación mixta con una densidad de sal de 0,005-0,15 mg/cm² y 40 g/l de caolín.

Pruebas realizadas sobre aisladores de porcelana tipo Poste y de Barra Larga, indican una

variabilidad similar en la resistencia a la contaminación: comparados entre ellos y con una cadena de suspensión normal. Esto se ilustra en la figura 1.6 (3).

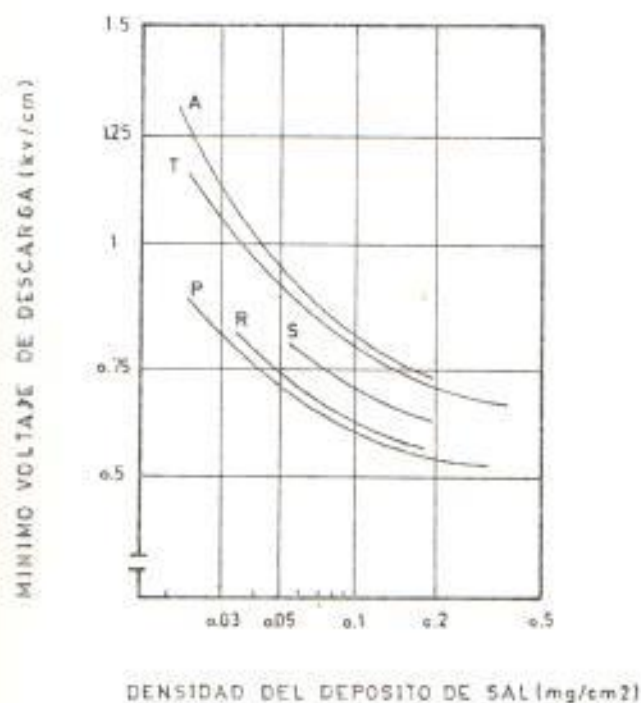
En la figura 1.6 se muestra que los aisladores tipo Poste (curva P) tienen una más baja resistencia a la contaminación, que una cadena de aisladores de suspensión de la misma longitud.

Esto es desafortunado para la construcción de líneas compactas en áreas donde la contaminación es un problema, particularmente debido a que los "aisladores tipo neblinero" no son prácticos para construirlos en los aisladores de porcelana tipo Poste. (3)

1.5. EFECTO DE LOS DEPOSITOS CONTAMINANTES SOBRE LOS AISLADORES.

1.5.1. Perturbaciones producidas por la contaminación.

Las principales perturbaciones ocasionadas por la acumulación de depósitos contaminantes



	Tipo	Longitud (pulg.)	Diámetro (pulg.)	Distancia de fuga geom(t. (pulg.)
A	Susp. Norm.	5 3/4	10	12
T	Barr. Larga	47 1/16	8 1/8	114 1/2
P	Barr. Larga	50	5 7/8	110
R	Barr. Larga	50	5 7/8	74 1/2
S	Poste	28 1/2	11	49 1/2

Figura 1.6

Comparación de la resistencia a la contaminación de
varios tipos de aisladores de porcelana

son:

a) Excesiva corriente de fuga.

A medida que se humedece la superficie del aislador, disminuye su resistencia y se presenta una corriente de fuga apreciable de caracter intermitente.

b) Flameos continuos.

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

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

El primer caso es el más común y en esta circunstancia el aislador se comporta según lo anotado en el literal (a).

En el segundo caso, se puede presentar el flameo antes de alcanzar la estabilidad térmica; y en el tercer caso siempre se presenta el flameo antes de llegar a la estabilidad térmica.

c) Perforación.

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

d) Corrosión

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

- 1) Efectos electrolíticos debidos a la corriente de fuga.
 - 2) Perdida de la capa de zinc (galvanizado), quedando expuesto a la acción corrosiva del medio.
 - 3) Generación de ácido nítrico a partir del ozono producido por el efecto corona y el calentamiento.
- e) Interferencias en las transmisiones de radio y televisión

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

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

La figura 1.7 (1) ilustra la reducción del voltaje de flameo en los aisladores contaminados.

1.5.2. Mecanismo de la descarga por contaminación

Como ya se señaló antes, las condiciones meteorológicas juegan un papel preponderante en el problema de la contaminación de los aisladores:

- La presión atmosférica hace variar las características dieléctricas del aire que rodea a los aisladores.
- La temperatura altera la conductividad de las capas contaminantes.
- Exceptuando algunos casos muy especiales de contaminación, en los cuales el depósito es conductor en atmósfera seca, tales como polvo de óxidos metálicos y coque, es necesaria la presencia de la humedad para tornar conductora la costra contaminante. En ese momento aumentan significativamente las corrientes de fuga a través de la superficie contaminada.

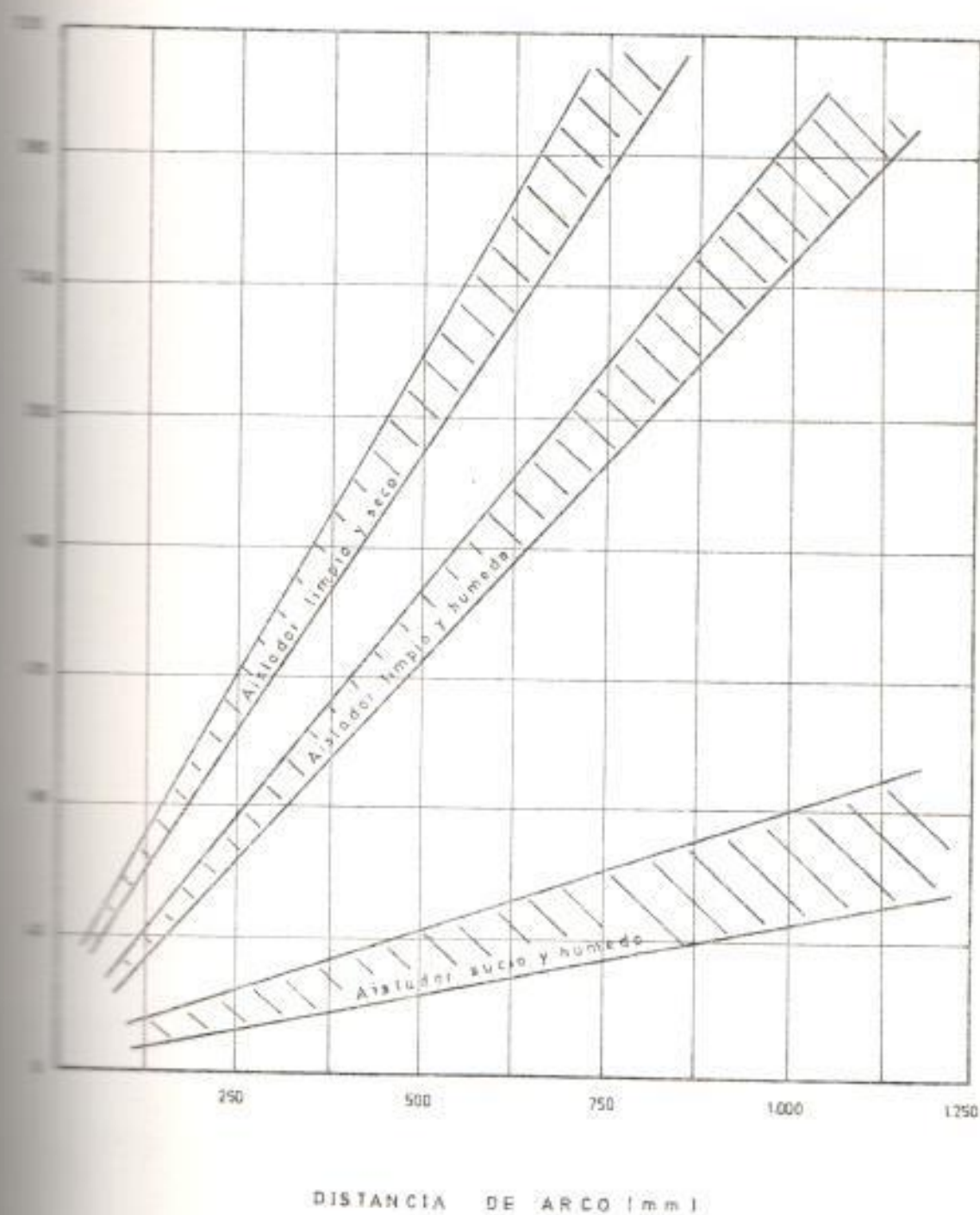


Figura 1.7

Tensión de flamação de los aisladores contaminados

La energía disipada por estas corrientes produce calor, sobre todo en las regiones que tienen más densidad; dicho calor evaporará la humedad dando lugar a la formación de bandas secas. La resistividad de estas bandas es muy variable en todo su trayecto, pues como se indicó antes, no podría esperarse que la acumulación de depósitos y la condensación sobre el aislador fuese uniforme.

En relación con lo anterior, puede suceder que en ciertos puntos de una trayectoria por la cual esté circulando una corriente de fuga relativamente alta, la resistividad aumente a un valor tal que la caída de voltaje alcance en ese punto la magnitud necesaria para producir la ionización del aire cercano. Esto da origen a pequeños arcos en la banda seca.

Si las condiciones son apropiadas, dichos arcos pueden extenderse a lo largo de todo el aislador, con la consiguiente falla de la aislación, lo que a su vez provocará la pérdida del servicio de energía debido a la operación de las protecciones de la línea.

En la figura 1.8 se ilustra el proceso anteriormente descrito:

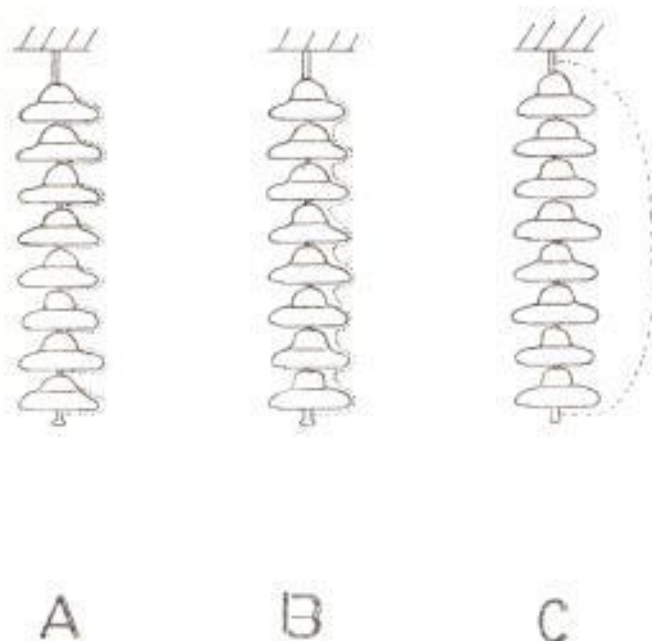


Figura 1.8

Descarga en los aisladores debido a la contaminación

En síntesis, según lo descrito en éste capítulo, podemos darnos cuenta que el problema de la contaminación es muy serio y debe ser analizado cuidadosamente.

samente, para así tomar las medidas correctivas necesarias al realizar el diseño del aislamiento de una línea.

Según lo observado en la figura 1.5, que nos da la distribución del voltaje a lo largo de un aislador, vemos que la distancia de fuga geométrica de un aislador sufre una reducción considerable cuando se tiene un alto grado de contaminación, dando origen a la denominada distancia de fuga efectiva. A su vez ésta reducción de la distancia de fuga da como resultado la disminución del voltaje soportable del aislador.

Así mismo si analizamos la figura 1.6, la cual resume el comportamiento de diferentes tipos de aisladores para diversos grados de contaminación, vemos que el aislador tipo Poste no es el más indicado para usarse en las zonas que presentan un elevado grado de contaminación. Pues se observa que una cadena de aisladores de suspensión de la misma longitud presenta un mejor rendimiento.

Pero si se desea utilizar aisladores tipo Poste en una zona contaminada, lo más adecuado será sobredimensionar el aislador.

CAPITULO II

CALCULO TEORICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION

2.1. GENERALIDADES

La aislación de una L/T debe ser determinada después de un cuidadoso estudio de las sollicitaciones eléctricas a que estará sometida durante su servicio, pero considerando las condiciones meteorológicas y ambientales de las zonas por donde cruzan las líneas.

Por lo general, la aislación de una L/T para su estudio se la divide en dos partes:

a) aislación en la estructura.

b) aislación en el vano.

En la figura 2.1 puede apreciarse la ubicación respectiva de estas dos partes de la aislación de la línea.

Para nuestro caso particular nos interesa realizar el estudio del aislamiento en la estructura, ya que del primer análisis de los datos recolectados se

determina que los orígenes del problema se hallan en esta parte.

El aislamiento en la estructura queda definido fundamentalmente por dos aspectos:

- Tipo y número de aisladores.
- Distancia en aire entre los conductores de fase y la estructura.

En el caso de líneas provistas de hilos de guardia, se debe considerar además el valor de la resistencia de puesta a tierra de la estructura.

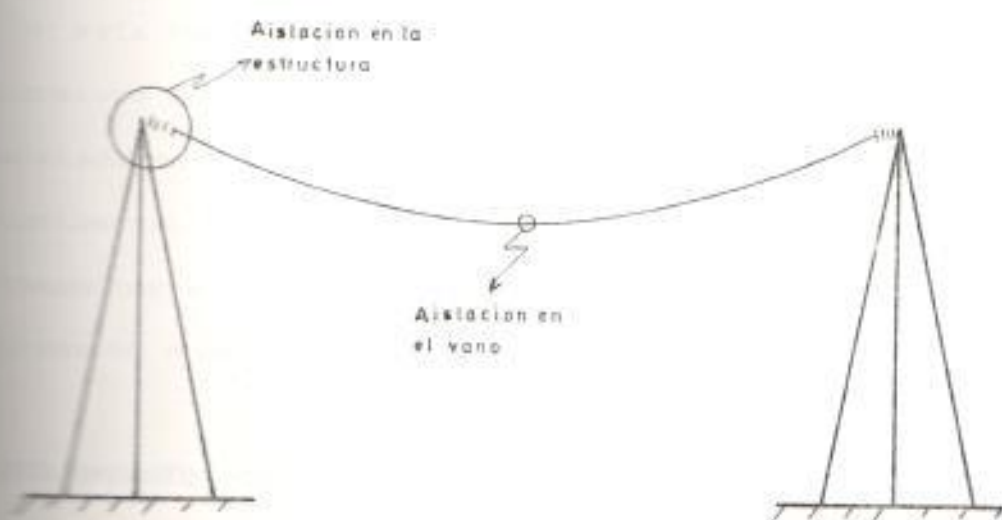


Figura 2.1

Aislación de una línea de transmisión

Para determinar los requerimientos de aislamiento de las L/T, se deben considerar los voltajes que pueden ser aplicados al mismo, bajo condiciones normales y transientes, incluyendose entre estos:

- Sobrevoltajes de frecuencia industrial
- Sobrevoltajes por maniobra
- Sobrevoltajes por descargas atmosféricas.

Después de hallar las magnitudes de estos voltajes, se podría seleccionar el tipo de aislador apropiado, pero debido a los graves efectos de la contaminación sobre el rendimiento de la aislación se deberá también tomar medidas correctivas en este aspecto.

Por esta razón, en muchos países la práctica usual consiste en determinar primero el tipo y cantidad de aisladores requeridos para un diseño dado por contaminación y a partir de esto verificar el comportamiento de la aislación frente a los otros tipos de sobrevoltajes.

III. AISLAMIENTO POR CONTAMINACION

Se ha determinado experimentalmente que para una cantidad constante de contaminación el máximo voltaje de operación que un aislador puede resistir

es directamente proporcional a su distancia de fuga.

2.2.1. Distancia de fuga mínima

La distancia de fuga mínima necesaria del aislador requerido por contaminación puede ser determinada así:

1) Del libro de aisladores de la NGK tenemos:

$$D_{fnT} = \frac{V_{ln \text{ máx}}}{fnVR} \times MS \times D \quad (2.1)$$

Donde:

D_{fnT} = Distancia de fuga necesaria total en milímetros.

$V_{ln \text{ máx}}$ = Voltaje de línea a neutro máximo (kv). Este voltaje se lo asume igual a 1.1 veces el voltaje nominal.

MS = Margen de seguridad (10 %)

D_{fnVR} = Distancia de fuga necesaria por voltaje resistido (mm/kv)

2) Del libro de Líneas de Transmisión de la ESPOL (5), sección Aislamiento tenemos:

$$D_{FT} = \frac{V \times D_{fo}}{d} \quad (2.2)$$

Donde:

- D_{FT} = Distancia de fuga total.
- D_{fo} = Distancia de fuga para un cierto grado de contaminación (mm/kv). Ver tabla 1.2.
- d = Densidad relativa del aire. Ver sección 2.3.2.2.
- V = Voltaje máximo entre fases (kv). Este voltaje de línea se lo asume igual a 1.1 veces el voltaje nominal.

Para mayores detalles ver el Anexo A.

Luego de calcular la distancia de fuga total por cualesquiera de los métodos antes indicados, se procede a revisar los catálogos de los diferentes fabricantes de aisladores, para así poder hallar el aislador tipo Poste que cumpla con ésta distancia de fuga mínima.

REQUERIMIENTO PARA SOBREVOLTAJES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL

Con cualquier aislamiento de línea, la selección de aisladores para líneas compactas debe ser tal que resista los sobrevoltajes de frecuencia industrial durante las condiciones de operación normal y de falla.

Los sobrevoltajes de frecuencia industrial pueden ser causados por varias condiciones del sistema,

- Sobrevoltajes debido a la capacitancia de las líneas de transmisión (Efecto Ferranti).
- Fallas desbalanceadas.
- Sobre frecuencia resultante de los rechazos de carga.
- Sobrevoltajes ferromagnéticos producidos por la presencia de elementos de hierro saturable en el sistema.

Las características de la aislación deberán estar basadas en las condiciones que den como resultado el máximo sobrevoltaje línea-tierra en el sistema.

2.3.1. Efecto Ferranti

Cuando el voltaje en la recepción de una L/T abierta es mayor que el voltaje de envío, se habla de la presencia del efecto Ferranti.

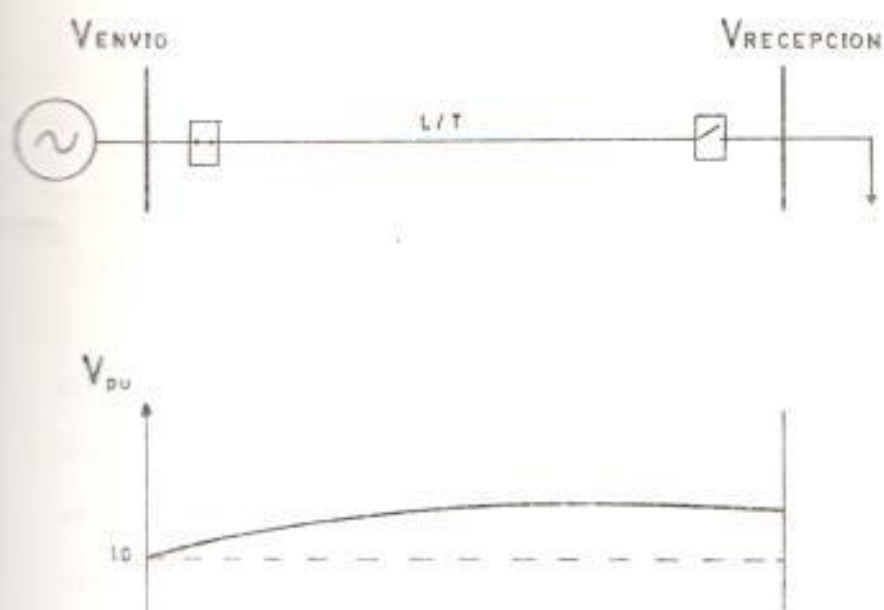


Figura 2.2

Efecto Ferranti

El voltaje de envío final de una L/T depende de algunos factores, entre estos tenemos: la carga a ser transportada por la línea, las fuentes de reactancia, la compensación paralela de la línea, etc.

Una L/T en circuito abierto representa una

carga capacitiva, la cual causa la elevación del voltaje. El mayor ó menor efecto de la capacitancia de una línea está dada principalmente por la longitud de la misma.

Las L/T se clasifican de acuerdo a su longitud en:

- Líneas cortas (menores a 50 millas).
- Líneas medias (50 - 150 millas).
- Líneas largas (mayores a 150 millas).

En nuestro caso de estudio todas las líneas son cortas y como para éstas aún no se toma en cuenta la influencia de la capacitancia, debido a que sus efectos son mínimos, no trataremos nada más del tema.

2.3.2. Fallas desbalanceadas

El más común de los sobrevoltajes de 60 Hz. es aquel producido por las fallas desbalanceadas tales como : las fallas de una y dos fases a tierra.

En general, los sobrevoltajes debidos a fallas de dos fases a tierra son poco

comunes, por lo que es costumbre trabajar solo con los sobrevoltajes producidos por fallas de una fase a tierra.

2.3.2.1. Cálculos de sobrevoltajes

Los sobrevoltajes de frecuencia industrial son de magnitud reducida, razón por la cual no ponen en peligro la aislación del sistema, ya que generalmente el nivel de aislación debido a las otras causas de sobrevoltajes es superior.

Debemos considerar los valores de sobrevoltaje crítico (CFO: critical flash over) y resistido (withstand voltage). Ver anexo B.

Para proceder al cálculo de los sobrevoltajes a frecuencia industrial, generalmente se considera que el valor de este sobrevoltaje oscila entre 1 y 2 veces el voltaje máximo de servicio de línea a tierra. Se obtiene éste rango luego de

analizar los resultados provenientes de un estudio de fallas, donde la variación del sobrevoltaje está dentro de este rango; cuando se presenta el efecto Ferranti, su magnitud también está dentro de este rango.

Los valores utilizados por el SNI para este caso son de 1,43 y 1,38 para niveles de voltaje de 138 y 230 kv respectivamente. Analizando estos datos vemos que a medida que el nivel de voltaje disminuye, el valor de la constante aumenta, en base a esto podemos tomar un valor de 1,6 para 69 kv.

El valor del sobrevoltaje es determinado mediante la siguiente expresión:

$$V_{fi} = K \frac{V}{f_i} \quad (2.3)$$

43

Donde:

- V_{fi} = Sobrevoltaje de frecuencia industrial en kv.
- K_{fi} = Número de veces el voltaje máximo de línea a tierra.
- V_l = Voltaje máximo de servicio entre fases en kv. Este voltaje se lo asume igual a 1.1 veces el voltaje nominal.

El valor del voltaje resistido por la aislación es: (Anexo B)

$$V_r = V_{fi} = V_c (1 - n\delta) \quad (2.4)$$

Donde:

- V_r = Es el voltaje resistido por la aislación en kv.
- V_c = Voltaje crítico de la aislación.
- δ = Valor de la desviación normal, dado en porcentaje del voltaje crítico.
- n = Número de las desviaciones normales (δ).

Los valores de la desviación normal utilizados son los recomendados por el Libro de L/T de la ESPOL y son:

- Para aisladores bajo condiciones de lluvia $\delta = 6 \%$ del voltaje crítico.
- Para el espaciamiento en el aire en condiciones secas $\delta = 3 \%$ del voltaje crítico.

2.3.2.2. Influencia de las condiciones meteorológicas

La resistencia del aislamiento externo está influenciado por las condiciones meteorológicas tales como: densidad relativa del aire, humedad y lluvia. (Ver anexo C)

La expresión que toma en cuenta la influencia de las condiciones meteorológicas distintas a las normales viene dada por:

$$V_{c1} = \frac{V_c \times d^n \times K}{H} \quad (2.5)$$

Donde:

V_{c1} = Voltaje crítico en condiciones anormales en kv.

V_c = Voltaje crítico para condiciones atmosféricas normales en kv.

d = Densidad relativa del aire.

K = Factor de corrección por efecto de la lluvia.

n = Exponente empírico que depende de la longitud de la aislación.

H = Factor de corrección por efecto de la humedad.

2.3.2.3. Aislación necesaria

El aislador tipo Poste necesario para resistir el máximo sobrevoltaje de frecuencia industrial, es determinado mediante el siguiente procedimiento:

Con el valor de voltaje crítico ya corregido con las diferentes constantes que representan las condiciones atmosféricas anormales, procedemos a calcular el número de aisladores de suspensión estandar necesarios, para luego hallar la distancia de fuga total de esta cadena de aisladores simple y así encontrar un aislador tipo Poste equivalente en cualquier catálogo de las diferentes casas fabricantes.

Ahora para hallar el número de aisladores de suspensión necesarios para un cierto valor de sobrevoltaje de frecuencia industrial, tenemos dos alternativas:

- Utilizando las curvas características de los aisladores de suspensión mostradas en la figura F.1.
- Hacerlo a partir de la tabla F.1, la cual nos indica el número de aisladores de suspensión necesarios para diferentes valores de sobrevoltajes.

Debemos señalar que es norma general añadir uno ó dos aisladores adicionales al total ya calculado, dependiendo de la importancia de la L/T, para de ésta manera compensar la posibilidad de los aisladores destrozados ya sea por vandalismo ó por falla propia del aislador.

Finalmente debemos hacer notar el hecho de que no se considera la influencia de la contaminación en el valor calculado del sobrevoltaje a frecuencia industrial, sino que se los considera independientemente.

EL ASESAMIENTO PARA SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA

Los sobrevoltajes transientes ó de maniobra se producen como consecuencia de la operación de los interruptores, a los cuales la aislación debe responder eficazmente.

El análisis del comportamiento de las líneas compactas frente a las descargas por maniobra sigue el mismo procedimiento de un diseño convencional,

por lo menos cuando se habla del aislamiento fase a tierra.

Los espaciamientos fase a tierra son similares a los de un diseño convencional, es decir con aisladores de suspensión; sin embargo la reducción del espaciamiento fase a fase relacionado con los diseños compactos requiere consideraciones especiales para el correcto funcionamiento durante las descargas por maniobra.

El análisis puede variar en sofisticación desde una simple comparación de máximo y mínimo esfuerzo (valores definidos para condiciones atmosféricas y locales específicos), hasta un tratamiento probabilístico de las magnitudes de las descargas por maniobra y de las formas de onda, acopladas con la intensidad de los parámetros dependientes del tiempo (humedad, presión barométrica, etc.) para el área específica por donde cruce la línea.

Pero en nuestro caso de estudio no se justifica una discusión detallada de estos aspectos, ya que los ensayos tienen gran importancia a niveles de extra alto voltaje (EHV) y ultra alto voltaje (UHV), es decir a niveles de voltaje mayores a 345 kv., los cuales que aún no se tienen en el país.

2.4.1. Magnitudes de las descargas por maniobra en los sistemas de potencia

La mayoría de las investigaciones miden las magnitudes de las descargas por maniobra y su forma de onda para fallas de fase a tierra, con muy poca atención a los valores de fase a fase.

Sin embargo, en las líneas que utilizan aisladores tipo Poste, estos valores de descarga fase-fase son importantes, debido a las configuraciones que se utilizan en las estructuras (figura 2.3), las cuales hacen más crítica la situación por la reducción de las distancias fase-fase. Por este motivo se debe realizar el cálculo de esta distancia.

De recientes investigaciones (3) se ha obtenido una curva (figura 2.4) que muestra las descargas fase-fase como función de las descargas fase-tierra. Así, con datos apropiados de fase-tierra, esta curva puede ser usada para aproximar las magnitudes de fase-fase.

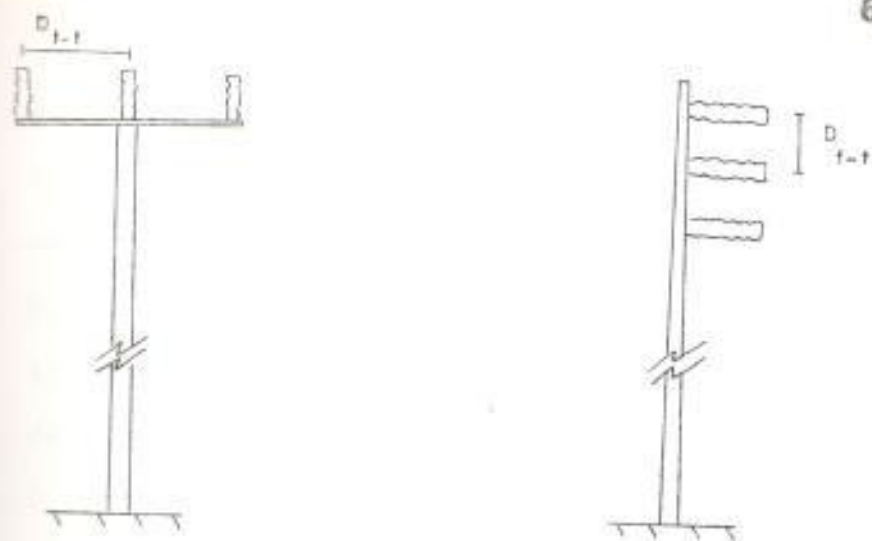
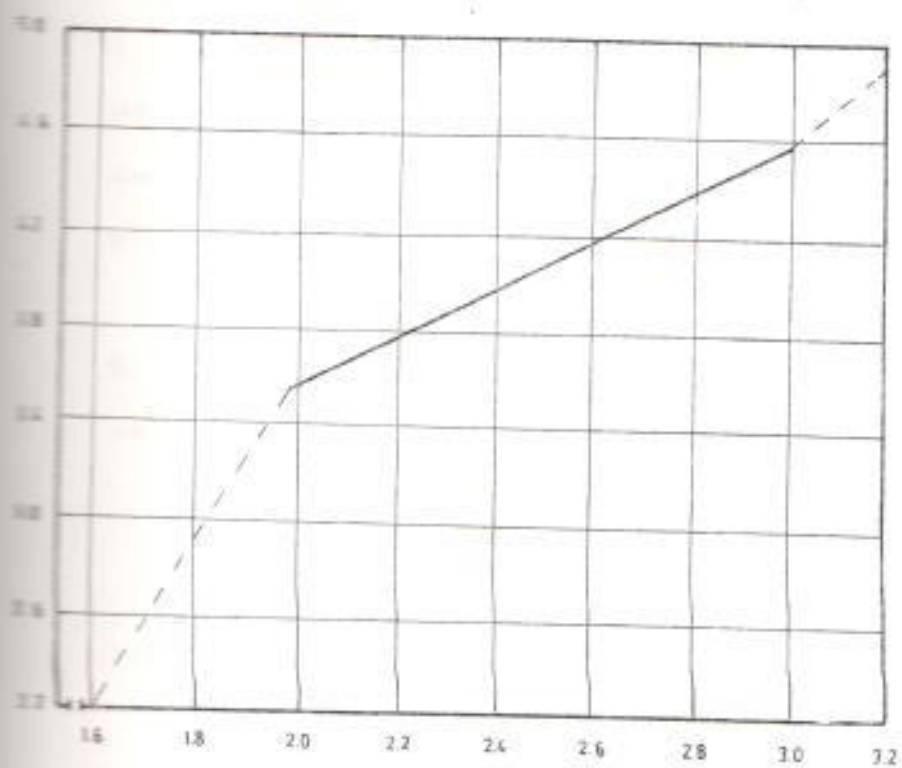


Figura 2.3

estructuras típicas que utilizan aisladores tipo Poste.



MAXIMAS DESCARGAS POR MANIOBRA (FASE A TIERRA) P.U. *
 * PU. DEL VOLTAJE DE CRESTA DE FASE A TIERRA

Figura 2.4

Relaciones aproximadas entre las descargas por maniobra de fase a fase y fase a tierra.

Por ejemplo, las máximas descargas de fase a tierra por energización usando la asunción más pesimista, puede alcanzar desde 2,75 hasta 3,0 pu. Pero tomando el caso de una línea de 138 kv de longitudes e impedancias de fuente usuales, los valores varían desde 2,0 hasta 2,5 pu. del voltaje pico del sistema de fase a tierra.

Usando las últimas magnitudes de fase a tierra y las relaciones de la figura 2.4, la máxima descarga de fase a fase a ser esperada será de 3,57 a 4,10 pu. (Expresado sobre el pico del voltaje de línea a tierra).

El valor máximo del sobrevoltaje por maniobra se expresa de la siguiente manera:

$$V_{sw} = K \frac{\sqrt{2} V}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

Donde:

V_{sw} = Valor máximo del sobrevoltaje transiente que se pretende proteger en kv.

- V_1 = Voltaje máximo de servicio entre fases en kv. Este voltaje se lo asume igual a 1,1 veces el voltaje nominal.
- K = Valor del transiente. Otros valores aproximados de K se dan en la tabla 2.1

Este sobrevoltaje transiente está dado en condiciones meteorológicas diferentes de las normales, por lo tanto debemos aplicar los respectivos factores de corrección.

TABLA 2.1

VALORES PARA LA CONSTANTE DE SOBREVOLTAJES TRANSIENTES

kv	K
69	4,0
138	3,5
230	3,0
345	2,5

2.4.2. Influencia de las condiciones meteorológicas

Antes de aplicar los factores de corrección por las condiciones metereológicas diferentes a las normales, hallaremos el voltaje crítico de la aislación, fijándole en estas condiciones el grado de seguridad de la aislación para un determinado número de desviaciones normales:

En esta forma se tiene que:

$$V_c = \frac{V_{SW}}{(1 - n\delta)} \quad (2.7)$$

Donde:

- V_{SW} = Voltaje resistido por la aislación en condiciones metereológicas normales en kv.
- V_c = Voltaje crítico de la aislación en condiciones metereológicas normales en kv.
- n = Número de desviaciones (δ) que representa el grado de seguridad de la línea.
- δ = Valor de la desviación normal. Se toma un $\delta = 5\%$ del V_c .

El voltaje crítico es el valor que se determina experimentalmente y del cual existen curvas ó tablas para los distintos tipos de aisladores.

Una vez que hemos calculado el valor del voltaje crítico en condiciones atmosféricas normales, procedemos a corregir este valor con los factores de corrección indicados en el Anexo C; su forma de aplicarlos se indica en la relación siguiente:

$$V_{swl} = V_c \frac{d^n}{H} \quad (2.8)$$

Donde:

V_{swl} = Valor del sobrevoltaje crítico corregido por condiciones meteorológicas distintas de las normales en kv.

V_c = Valor del sobrevoltaje crítico en condiciones meteorológicas normales en kv.

b) Líneas de voltaje mayores a 220 kv.

Entonces tenemos:

a) En el caso de líneas con niveles de voltaje menores ó iguales que 220 kv. se calcula la aislación a partir del voltaje crítico. Con este valor del voltaje crítico corregido se determina el número de aisladores necesarios a través de los datos que se obtienen de curvas experimentales correspondientes a ensayos con transientes.

Si no se dispone de estas curvas experimentales, se puede transformar dicho valor de voltaje crítico en un voltaje de impulso equivalente del tipo $1,5 \times 40 \mu s$, multiplicándolo por un factor que varía entre 1,15 y 1,25.

$$V_i = K \times V_{swl} \quad (2.9)$$

Donde:

V_i = Voltaje de impulso equivalente en

condiciones metereológicas anormales en kv.

V_{swl} = Voltaje crítico de la aislación en condiciones metereológicas anormales en kv.

K = Factor entre 1,15 y 1,25

Con este valor de voltaje de impulso se determina el número de aisladores de la cadena simple, utilizando la tabla F.1.

Se debe añadir uno ó dos aisladores extra a la cadena por suponerlos rotos en servicio.

b) Para líneas con niveles de voltaje superiores a los 220 kv., la aislación necesaria se calcula de curvas experimentales que tomanen cuenta el efecto de la proximidad de la estructura, que relacionan el voltaje crítico con el número de aisladores necesarios y la longitud del espaciamiento en aire para una cierta configuración de la cadena de aisladores.

2.3. AISLAMIENTO POR DESCARGAS ATMOSFERICAS

Al caer una descarga atmosférica sobre una L/T protegida con hilos de guarda, inyecta una corriente transiente de algunos miles de amperios. Esta corriente fluye a través de la impedancia característica de los hilos de guarda y de la estructura hasta la tierra, aumentando así el potencial de la estructura relativa a los conductores de fase. Si la corriente de la descarga es lo suficientemente grande, puede suceder que el voltaje de la torre al conductor exeda el nivel de aislamiento y cause una descarga.

El diseño por descargas atmosféricas de una línea compacta puede variar de un diseño convencional por las siguientes razones:

- La reducción del ancho de la configuración reduce la exposición a las descargas, y por lo tanto la tasa de salidas de la línea.
- La reducción de los espaciamientos de fase a fase incrementa la posibilidad de las descargas fase a fase, incrementandose un poco la tasa total de descargas.

Número de descargas eléctricas

Sabemos que las perturbaciones de una L/T varían de acuerdo al número de descargas que caen sobre ésta. Pero a su vez, el número de descargas de una línea se determina empíricamente y puede variar de región a región y año a año.

Para determinar el número de perturbaciones debemos conocer el nivel isoceraunico de la zona por donde pasa la línea. En las figuras 2.5 y 2.6 se indican los mapas isoceraunicos con los valores medios y máximos.

El número anual de descargas atmosféricas que caen en una longitud de 100 millas de L/T, utilizando el modelo aproximado de la figura 2.7 es:

$$N = \frac{T \times K_m \times (4h + b)}{5280} \times 100 \quad (2.10)$$

Donde:

N = Número anual de descargas atmosféricas que caen sobre una longitud de 100 millas de línea aérea.

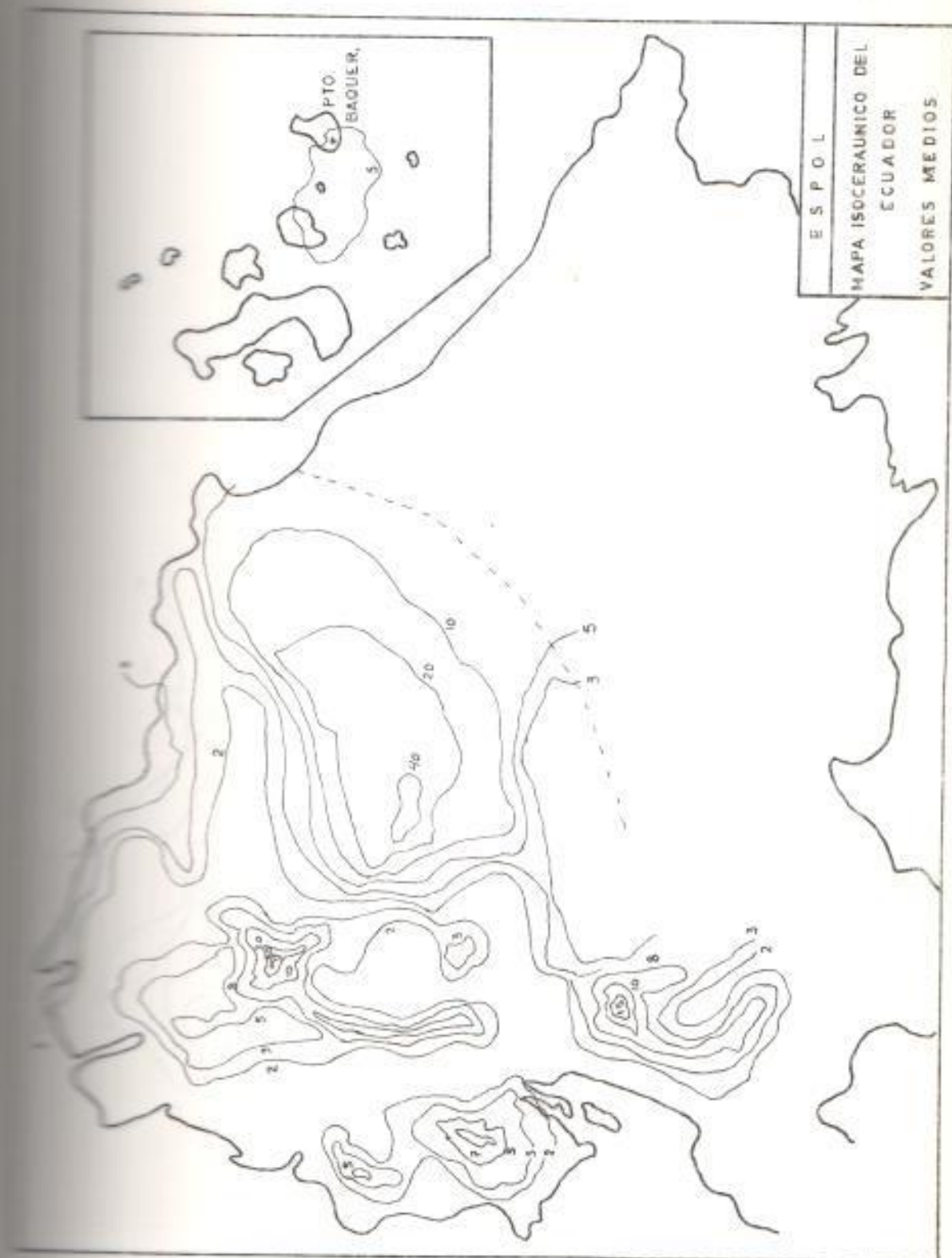


Figura 2.5

Mapa isoceraunico de valores medios

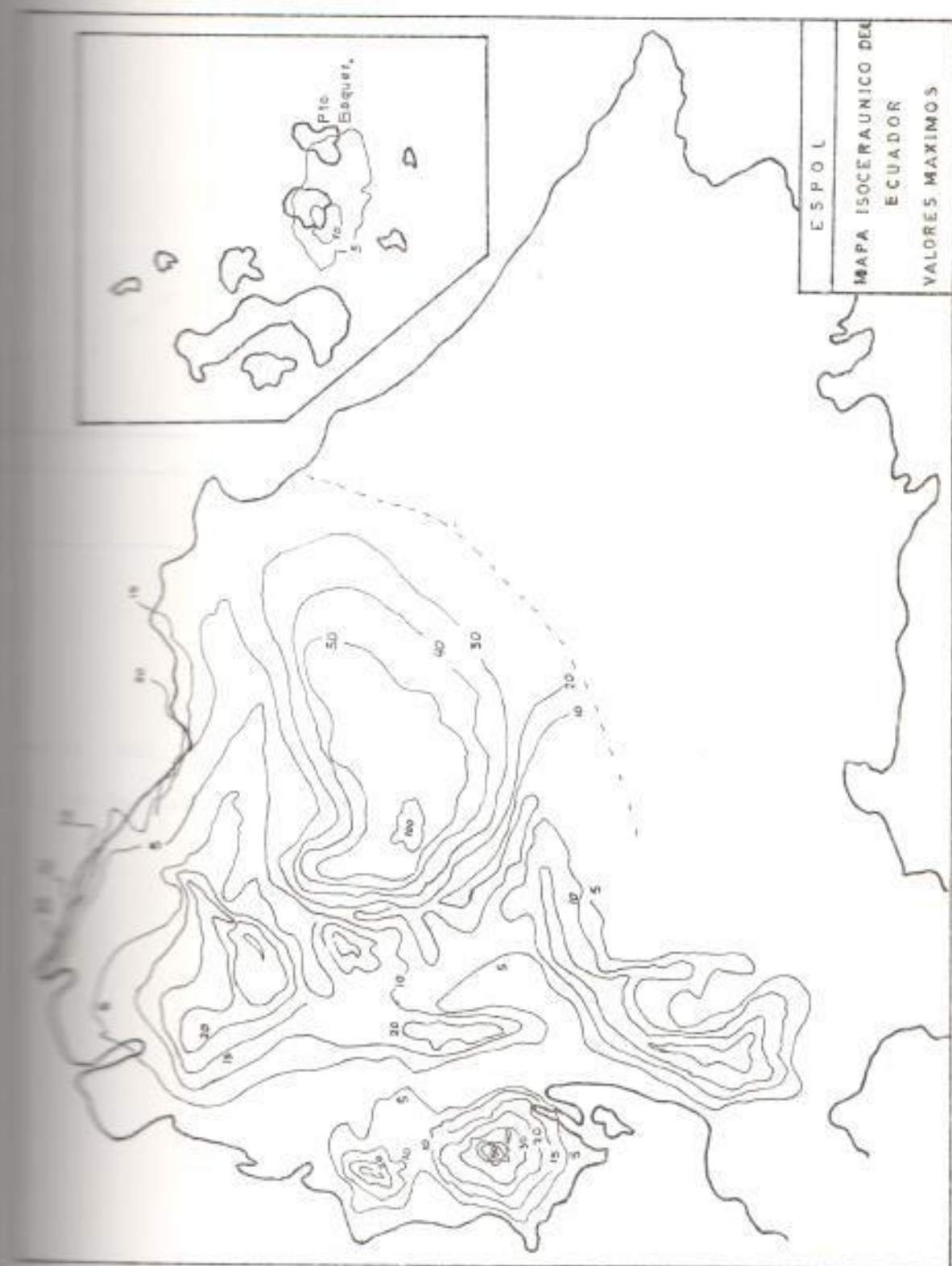


Figura 2.6

Mapa isocerunico de valores máximos

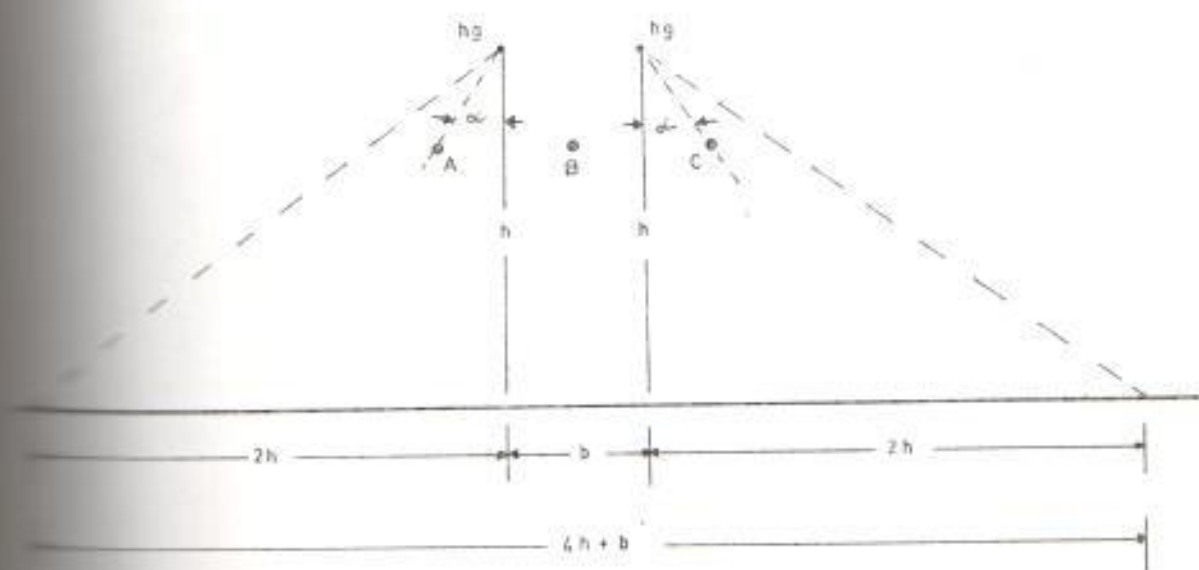


Figura 2.7

Sección del terreno influenciado por la ubicación de los torres de guarda.

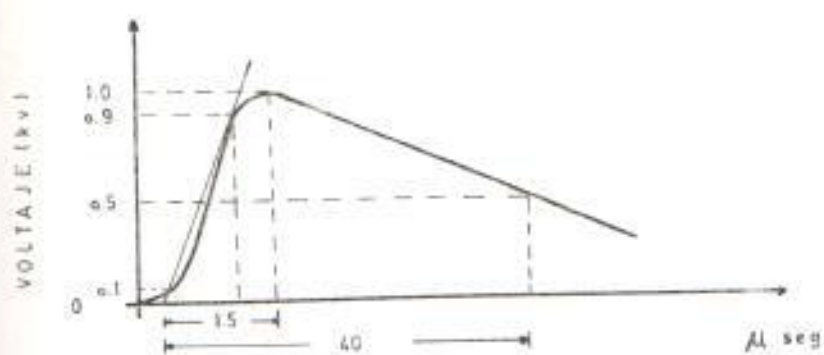


Figura 2.8

Forma de onda de impulso de $1,5 \times 40$ microsegundos

- α = Indica el rango de descargas a tierra y varía entre 0,25 y 0,5.
- h = Es la altura efectiva del hilo de guarda en pies.
- b = Es la distancia entre los hilos de guarda en pies. ($b=0$ para un hilo de guarda)

Para el cálculo de h tenemos:

$$h = h_t - 0,66 \times \left(\frac{h_t - h_c}{t} \right) \quad (2.11)$$

Donde:

- h_t = Altura de los hilos de guarda ó conductores en la estructura.
- h_c = Altura de los hilos de guarda ó conductores superiores en el medio del vano.

2.5.1. Descargas sobre las estructuras ó hilos de guarda

Analizaremos dos métodos:

- 1) Cuando las líneas llevan hilos de guarda,

así como en las salidas de las S/E, el voltaje que debe resistir la aislación durante una descarga atmosférica se puede expresar mediante la siguiente expresión:

$$V_r = (1 - C_n) \times \alpha_c \times R_{pt} \times I_d \quad (2.12)$$

Donde:

V_r = Voltaje a través de la aislación.

R_{pt} = Onda de voltaje.

C_n = Factor de acoplamiento (Depende del número, configuración y espaciamiento de los conductores, siendo también modificado por la presencia del efecto corona).

α_c = Factor de cresta (Depende de la longitud del vano, la resistencia de puesta a tierra, el frente de onda de descarga y la impedancia característica de los conductores).

R_{pt} = Resistencia efectiva de puesta a tierra (Depende del valor que tenga la resistencia de tierra y la impedancia característica de las des

cargas eléctricas y de los conductores).

I_d = Corriente de descarga.

Para mayor detalles ver Anexo D.

- 2) Existe un método más sencillo para determinar la confiabilidad de una L/T con hilo de guarda, en lo relacionado a las descargas atmosféricas (15).

Este método utiliza un conjunto de curvas que expresan el funcionamiento de una línea en términos de cuatro parámetros principales: la resistencia de puesta a tierra, el aislamiento de una línea, la separación en el medio vano y la longitud del vano.

Un grupo de curvas nos dan la probabilidad del número de descargas en la torre, mientras que otro grupo nos da la probabilidad del número de descargas en el medio vano. Para obtener la probabilidad de las perturbaciones por 100 millas por año, hacemos un promedio entre los dos valores mencionados anteriormente.

También se puede hallar de estas curvas la posible corriente de descarga que se produciría en una línea, ya sea en el medio vano ó en la torre.

Para mayor detalle ver el anexo D.

Forma de onda de las descargas atmosféricas

El tipo de onda es dependiente del medio en el cual se propaga, puede llegar a tener la velocidad de la luz, se pueden producir reflexiones y refracciones ó una combinación de las dos, dependiendo del cambio que se suscite en el medio que se propagan.

Debido a que las descargas atmosféricas pueden ocasionar una gran variedad de formas de onda, se ha normalizado un tipo de onda de impulso de $1,5 \times 40 \mu s$. Este tipo de onda se lo presenta en la figura 2.8.

2.5.2. Método de cálculo alternativo para la aislación

Donde:

F = Número de perturbaciones anuales por 100 millas de línea.

F_1 = Número de perturbaciones anuales por cada 100 millas de línea debido a descargas que caen directamente en los conductores.

F_2 = Número de perturbaciones anuales por cada 100 millas de línea, debido a las descargas que caen sobre las estructuras y los hilos de guarda.

Para mayor detalle ver Anexo D.

2.5.3. Influencia de las condiciones meteorológicas

Cuando necesitemos obtener el valor propio del voltaje que resiste la aislación debido a que las condiciones meteorológicas son distintas a las normales, se utilizarán los valores y fórmulas que se desarrollaron en el Anexo C.

2.5.4. Sistemas de puesta a tierra

Este es uno de los temas de mayor consideración e importancia en las L/T, ya sea desde el punto de vista técnico como el de la seguridad de operación del sistema y de las personas.

Generalmente, en los proyectos de líneas aéreas se debe analizar el valor de la resistencia de puesta a tierra para cada línea, ya que esta varía con las características del terreno por donde atraviesa la línea.

Las estructuras que disponen de un buen sistema de puesta a tierra y que además poseen hilos de guarda, hace más fácil la circulación de la corriente de descarga I_d producida por los impulsos que se presentan debido a las descargas atmosféricas.

Pero para que exista una buena puesta a tierra, el valor de la resistencia de puesta a tierra que depende fundamentalmente de la resistividad del terreno, no debe exceder la relación que existiría entre el voltaje de

impulso de prueba y la intensidad de descarga I_d que atravieza el soporte del hilo de guarda en cierto momento, luego de producirse una descarga atmosférica.

Debemos si tener presente que obtener un cierto valor de resistencia de puesta a tierra para un tipo de terreno, puede significar un incremento muy grande del costo de la puesta a tierra de la estructura, el cual puede ser superior al mayor costo que representaría un aumento de la aislación de la estructura, como por ejemplo agregar un aislador más a una cadena. De aquí que para la determinación del valor máximo de resistencia de puesta a tierra para un determinado nivel de aislación se requiere un estudio económico para cada línea en particular.

Para mayor información ver el anexo E.

3.3. Aislación necesaria:

Para determinar el aislador tipo Poste que resista los sobrevoltajes por descargas

atmosféricas, procederemos de manera similar que en la sección 2.3.2.3., es decir primeramente hallamos el número de aisladores de suspensión estandar necesarios, para así obtener la distancia de fuga total con la cual se podría encontrar el aislador tipo Poste equivalente.

2.4. DISTANCIAS LIBRES

Se consideran las siguientes distancias libres:

- 1.- Distancias libres verticales.
- 2.- Distancias libres horizontales.

Las distancias libres verticales ha ser consideradas son:

- Distancia entre conductores.
- Distancia de los conductores al terreno.

La distancia libre horizontal ha ser considerada es la mínima que debe existir con respecto a la vegetación, edificaciones, etc.

a.- Distancia entre conductores

La distancia libre mínima entre conductores se define como aquella que existe entre dos conductores de fase en la mitad del vano, para condiciones finales y a la temperatura máxima del conductor.

Para la determinación de la distancia entre conductores se utilizan la siguiente expresión:

$$D_{mc} = K \sqrt{\frac{f}{c} + \frac{L}{c}} + V/150 \quad (2.14)$$

Donde:

D_{mc} = Distancia libre vertical mínima entre conductores en medio del vano en metros.

K = Factor que depende del ángulo máximo de desviación del conductor debido al viento, varía entre $0,65 > K > 0,58$

$\frac{f}{c}$ = Flecha final del conductor en metros.

$\frac{L}{c}$ = Longitud de la cadena de aisladores en metros. Para el caso de estructuras terminales ó de estructuras de suspensión con aisladores tipo Poste, se considera esta longitud igual a cero.

V = Voltaje nominal máximo entre fases en kv.

Para calcular el valor aproximado de la flecha utilizamos la siguiente relación:

$$f = \frac{w \times l^2}{8 \times T} \quad (2.15)$$

Donde:

f = Flecha en metros.

w = Peso en kg/km.

l = Vano en metros.

T = Tensión máxima del conductor (15% UTS)

2.- Distancia de los conductores al terreno

La distancia libre mínima de los conductores al terreno para una disposición vertical de conductores se define como aquella que debe existir desde el conductor inferior al terreno, medida desde la parte más baja de la catenaria formada por el conductor, para condiciones finales y a temperatura máxima del mismo.

Para la determinación de la distancia libre mínima del conductor al terreno, se utilizan las siguientes relaciones:

1.- Para regiones poco transitadas:

$$D_{mct} = 6 + 0,006 V. \quad (2.16)$$

2.- Para regiones transitables:

$$D_{mct} = 7 + 0,006 V. \quad (2.17)$$

Donde:

- D_{mct} = Distancia libre vertical mínima del conductor al terreno en metros.
- V = Voltaje nominal máximo entre fases en kv.

En la tabla 2.2 presentamos un resumen de las distancias mínimas del conductor al suelo, sugeridas por el manual de L/T de INECEL (5).

Esta tabla está basada en la división geográfica del Ecuador mostrada en la figura C.7

Para los conductores desviados por acción del viento en ángulos mayores a 10° , se podrán aceptar distancias entre el conductor y el

suelo inferiores a las ya indicadas, tomando en cuenta el grado de accesibilidad de tales terrenos, por ejemplo el caso de acantilados ó cerros con pendientes fuertes.

TABLA 2.2

DISTANCIAS MINIMAS DEL CONDUCTOR AL SUELO (m)

	Zona 1	Zona 2
Distancia normal.	6.8	6.8
Distancia transitado y cerros de segunda categoría.	7.8	8.3
Distancia de primera categoría.	9,0	9,5
Distancia de ferrocarril, distancia al riel.	9,0	9,5

c.- Distancias libres horizontales

La distancia libre mínima horizontal de los conductores se define como aquella que debe existir entre los conductores y la parte más saliente de la vegetación, construcciones, etc. Así por ejemplo para niveles de 69 kv., no debe ser menor de 4 metros.

Para el supuesto caso en que tengamos que calcular el aislamiento para una L/T que pase por una zona contaminada y no utilice hilo de guarda, el proceso a seguir es el siguiente:

En lo que respecta al cálculo del aislamiento por contaminación, se lo hace siguiendo el mismo procedimiento indicado en este trabajo.

Para el cálculo del aislamiento por sobrevoltajes de frecuencia industrial y de maniobra, también se procede de la manera indicada en este trabajo.

Al realizar el cálculo del aislamiento para sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas en una línea sin hilo de guarda, tenemos que realizar las siguientes consideraciones:

El diseño se lo realiza independientemente de la tensión de operación e involucran análisis estadísticos de probabilidad.

Caso no existe hilo de guarda, la probabilidad de que una descarga caiga en la estructura o en el mismo hilo es prácticamente cero, quedando por lo tanto solo la probabilidad de las descargas sobre los conductores. Debido a esto, vemos que el valor de la resistencia de puesta a tierra de la estructura es independiente del terreno, lo cual viene a representar una ventaja económica adicional.

Por otra parte, cuando una descarga atmosférica cae sobre los conductores, el flameo de los aisladores invariablemente ocurre. Esto es porque el voltaje del conductor aumenta tanto que la descarga pasa a tierra a través de una resistencia igual a la mitad de la impedancia "surge" del conductor (aproximadamente de 200 a 250 ohmios).

Debido al elevado valor de la resistencia, se requerirá solamente una descarga atmosférica de un rango de corriente moderado para dar un flameo en los aisladores. En base a éste principio, el dar aislamiento adicional por descargas atmosféricas no tendría sentido.

De acuerdo a esto, el criterio para la selección del aislamiento mínimo por sobrevoltajes por descargas atmosféricas, se reduce a que el impulso de flameo de los aisladores sea como máximo igual al BIL del equipo terminal. Este valor puede ajustarse en el momento de realizar la coordinación del aislamiento, con el objeto de darle al aislamiento de la línea la función de respaldo de los pararrayos que protegen el equipo terminal.

Como se realizar todos estos cálculos, se escogerá el aislamiento que brinde la mayor confiabilidad a la línea.

CAPITULO III

DESCRIPCION DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION EXISTENTES EN EL SISTEMA ELECTRICO MILAGRO

3.1. CARACTERISTICAS DE LAS ZONAS POR DONDE ATRAVIESAN LAS L/ST A ESTUDIARSE

Las características básicas a considerarse son:

- Condiciones meteorológicas.
- Tipos de contaminación.

Las condiciones meteorológicas promedio para las zonas de estudio se indican en la tabla 3.1.

TABLA 3.1

CONDICIONES METEOROLOGICAS PROMEDIO PARA MILAGRO

Temperatura del aire	30 C.
Presión barométrica	747 mm Hg.
Humedad	84 %
Tasa de precipitación	0,20 pulg/min.
Altura sobre nivel del mar	150 m.

Como se ve la zona es cálida y húmeda.

Las zonas objeto de estudio pueden considerarse como rurales, ya que están dedicadas en su gran mayoría a la agricultura.

Las vías de acceso son lastradas, existen caminos polvorientos, los cuales también influyen en la contaminación de las líneas.

Los tipos de contaminación que se presentan son variados, desde la contaminación agrícola en las zonas bananeras, hasta la extrema contaminación que se da en los cañaverales. Sobre este aspecto se ampliará un poco más posteriormente.

Los terrenos por los que cruzan las L/ST son llanos, con algunas secciones de suelo pantanoso, lo que da como resultado una baja resistividad del suelo tal como se aprecia en la figura 3.1.

3.2 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO MILAGRO

El Sistema de Subtransmisión de la Empresa Eléctrica Milagro C.A. (EEMCA) está compuesto por líneas de un solo circuito a 69 kv, las cuales transmiten energía desde la S/E Milagro del Sistema Nacional Interconectado (SNI) hasta varios puntos de recepción como se indica en la figura 3.2.

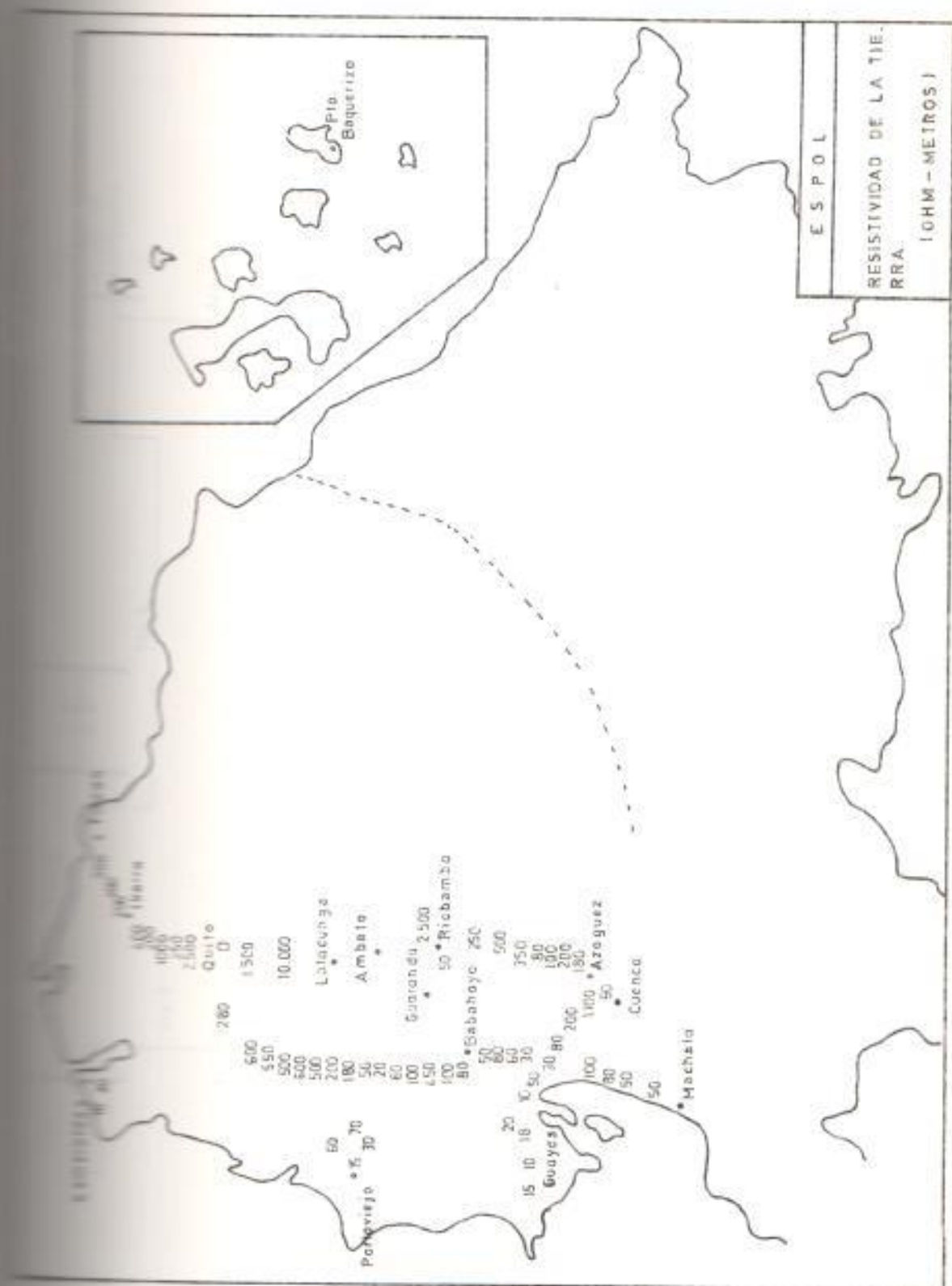


Figura 3.1

Mapa de resistividades del suelo

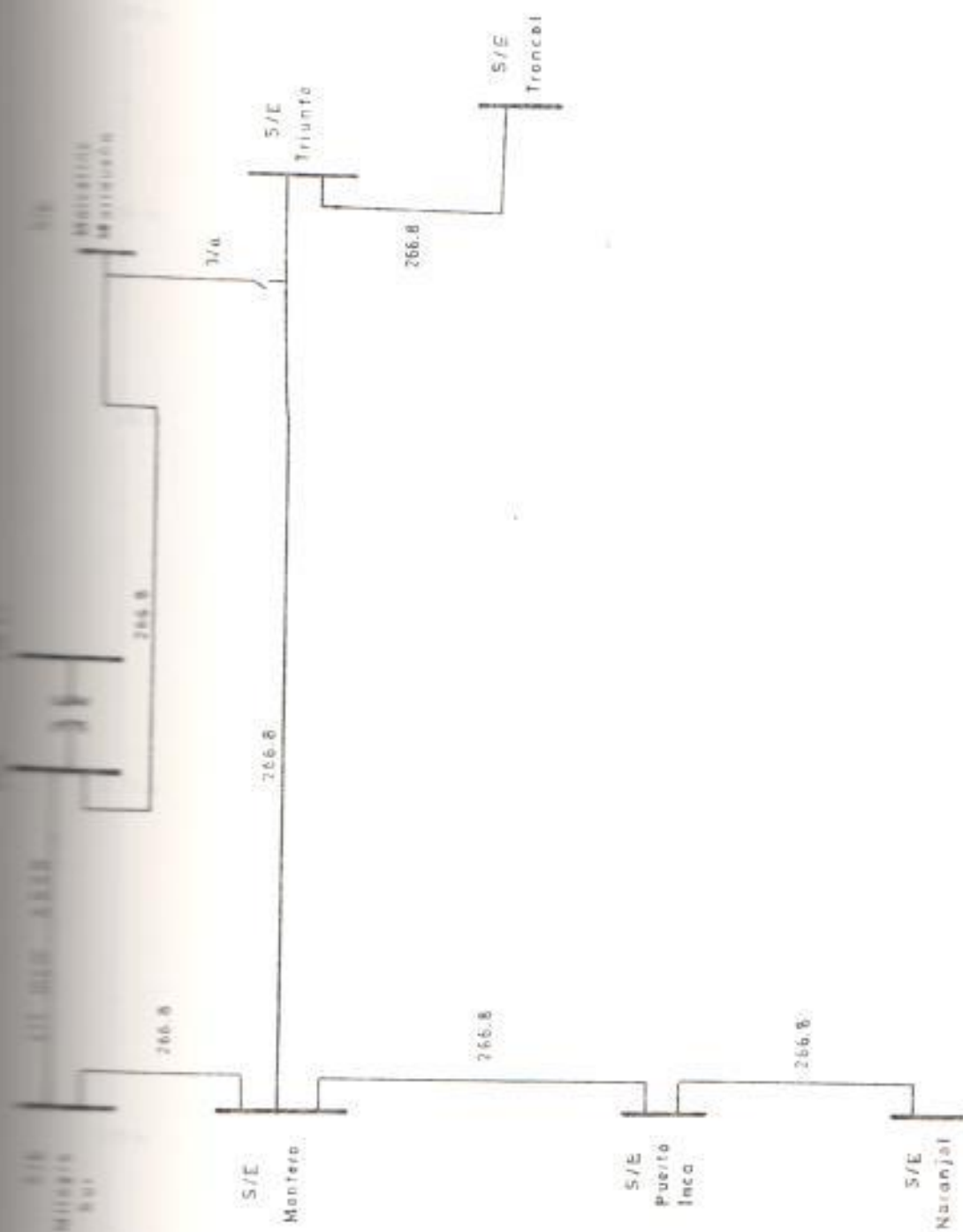


Figura 3.2

Sistema de Subtransmisión Milagro a 69 kv.

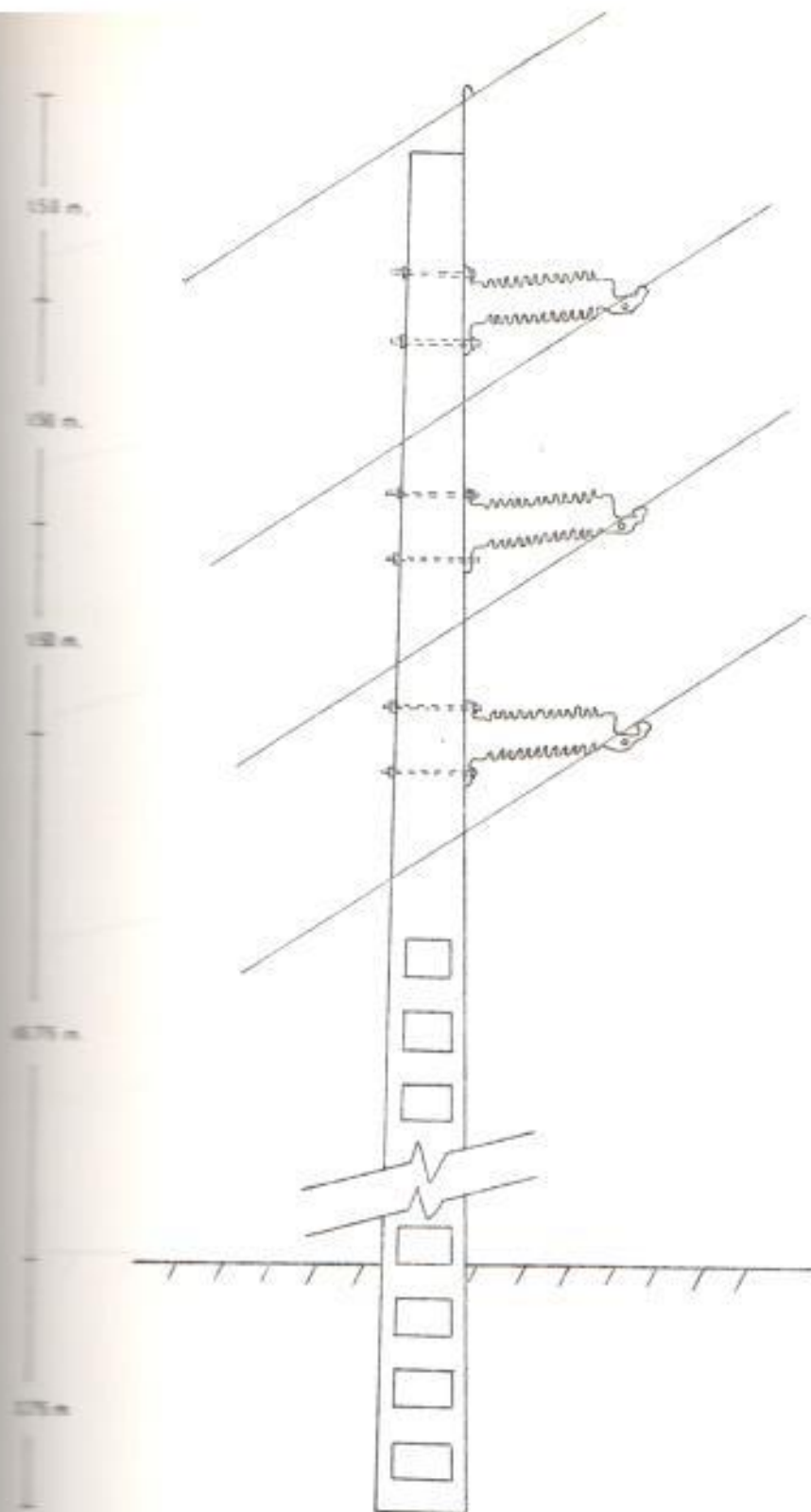


Figura 3.3

Estructura de suspensión sencilla con aisladores tipo Poste ó Soporte

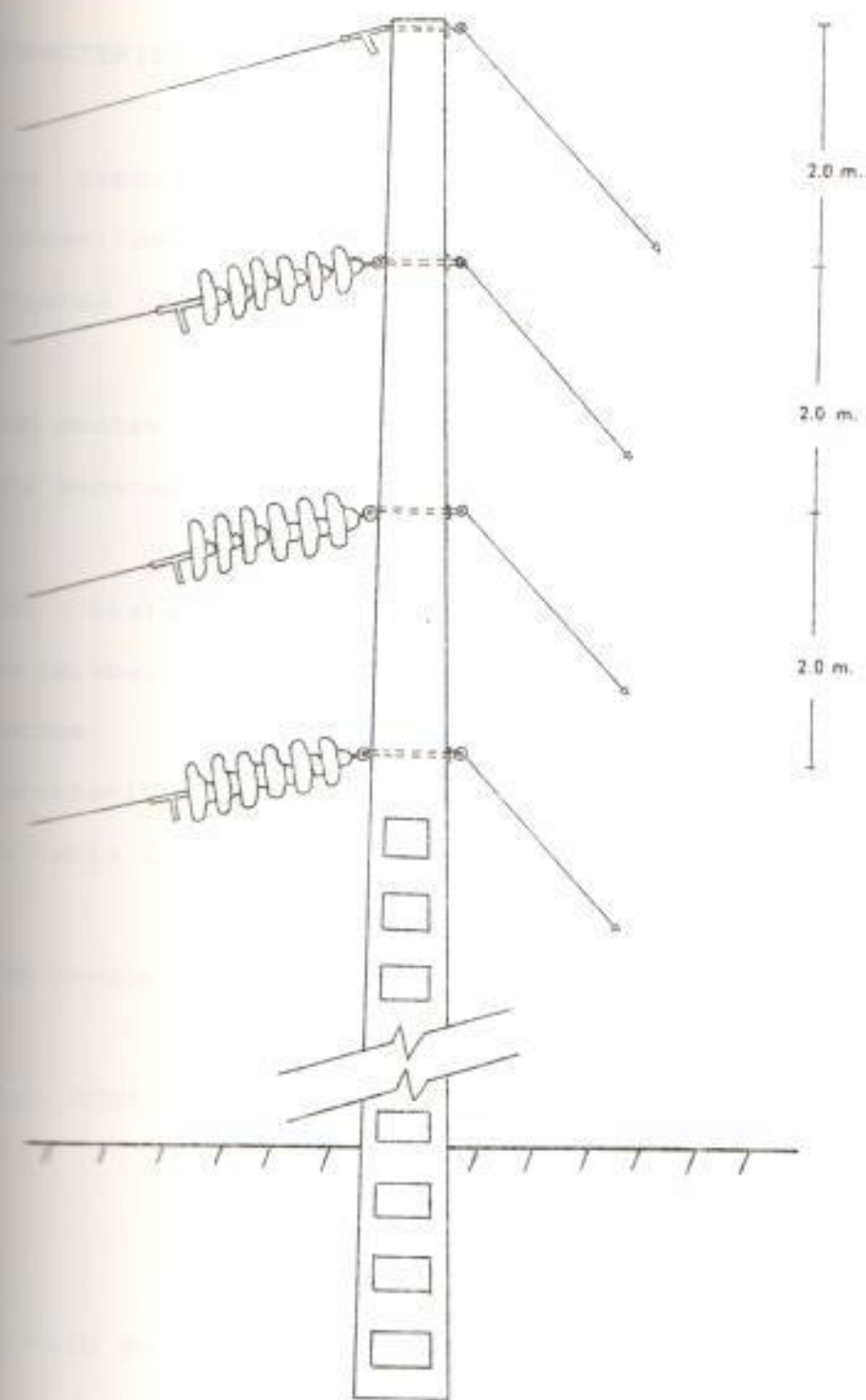


Figura 3.4

Estructura terminal sencilla con aisladores de suspensión

III. CARACTERISTICAS DE LAS L/ST A ESTUDIARSE

Los tipos de estructuras más utilizados en las líneas del Sistema Milagro se muestran en las figuras 3.3 y 3.4.

Los postes son de hormigón armado de 18 m. y tienen una separación promedio de 150 m.

Los aisladores utilizados son tipo Poste de porcelana, marca LAPP 4788 y NGK DA-85199 de 13 y 12 falda respectivamente. Las principales características de estos aisladores se muestran en la tabla 3.2.

Los conductores de fase de las L/ST son:

Tipo ACSR : 266,8 mcm
 477 mcm
 3/0

El hilo de guarda es de acero galvanizado de 5/16"

El tipo de aterrizamiento utilizado es por medio de varillas, obteniéndose un valor de resistencia de puesta a tierra en condiciones normales de 20 ohmios.

	MOJK	LAPP
Tipo de aislador	DA-85199	4788
Distancia de fuga (mm)	1.345	1.345
Distancia del arco en seco (mm)	489	489
Voltaje de línea recomendado (kv)	46	88
Resistencia del volado (kg)	1.270	1.270
Resistencia a la tensión (kg)	2.270	2.270
Voltaje de descarga promedio	Seco (kv) Húmedo (kv) Positivo (kv) Negativo (kv)	200 180 330 425
Voltaje no disruptivo	Seco (kv) Húmedo (kv)	160 145
Datos de voltaje de interferencia de radio	Baja frecuencia Impulso (kv)	250
	Prueba del voltaje a tierra (kv)	44
	Máximo RIV a 1.000 Kc (v)	200
Peso neto (kg)		31,8
		34,1

3.3.1. Longitud y tipo de aisladores instalados en las L/SI

Las líneas en las cuales se usan aisladores tipo Poste son las siguientes:

- a) Línea Milagro 2, desde la S/E Milagro del SNI hasta la S/E Milagro Sur con una extensión de 10 km. y con aisladores NGK.
- b) Línea Milagro 3, desde la S/E Milagro del SNI hasta los interruptores de aire situados en el sector de las Bodegas de San Carlos. Aquí en una longitud de 12,5 km. se usan aisladores NGK y en otro tramo de 13 km. se usan aisladores LAPP.
- c) Línea S/E Sur-Montero-Puerto Inca, con una extensión de 50 km, con aisladores de suspensión en el primer tramo y con aisladores NGK en el segundo.
- d) Línea Triunfo-Troncal, con una extensión de 15 km. y con aisladores NGK.
- e) Línea Puerto Inca-Naranjal, con una extensión de 19 km., de los cuales un 50 %

tienen aisladores de suspensión y el otro 50 % tiene aisladores LAPP.

3.3.2. Tipos de contaminación

En la tabla 3.3 se muestran en forma resumida las características de contaminación que presenta cada línea. (11)

3.3.3. Tiempo de servicio

- a) La línea Milagro 2 fué energizada en Mayo de 1983.
- b) La línea Milagro 3 fué energizada en dos tramos; el que va desde Marcelino Maridueña hasta las bodegas de San Carlos fué energizado a fines de 1979, y el que va desde la S/E Milagro del SNI hasta Marcelino Maridueña fué energizado en Marzo de 1985.
- c) La línea Montero-Puerto Inca fué energizada en Septiembre de 1984.
- d) La línea Puerto Inca-Naranjal fué energizada

ORDENES

Línea a
69 kv

Tipo de
contaminación

Milagro 2

Contaminación
agrícola intensa

- Pasa por zonas cercanas al Ingenio Valdez, en cuyos terrenos se produce la quema de cañaverales, los cuales originan densas humaredas que elevan grandes cantidades de partículas de carbón en suspensión.
- Fumigación aérea con productos químicos.
- Los caminos de acceso a recintos de la zona son lastrados y polvorientos.

Milagro 3

Contaminación
extrema

- Atraviesa los terrenos del Ingenio San Carlos, en los que todos los años se produce la quema de cañaverales.
- Fumigación aérea con productos químicos.
- Los caminos de tránsito dentro de San Carlos son lastrados y polvorientos.
- La cercanía de la fábrica Papelera Nacional y del Ingenio San Carlos.
- Excrementos de las aves.

Montero-P. I.-Naranjal

Contaminación
moderada

- Pasa por terrenos con poca vegetación.
- Va junto a una carretera asfaltada.
- No tiene fábricas a sus alrededores.

Triunfo-Troncal

Contaminación
media

- Cruza terrenos aledaños al Ingenio Aztra, donde también se produce la quema de cañaverales.
- Zona de niebla frecuente.
- Fumigación aérea con productos químicos.
- Va junto a una carretera asfaltada.

zada en Mayo de 1986.

- e) La línea Triunfo-Troncal fué energizada en Junio de 1987.

RESUMEN DE LAS SALIDAS DE SERVICIO DE LAS L/ST PROVOCADAS POR FALLAS EN LOS AISLADORES

Con los datos obtenidos en la EEMCA (11) realizamos las tablas 3.4 y 3.5, en las cuales se resúmen las salidas de servicio de las líneas Milagro 3 y Milagro 2 respectivamente.

Después de haber revisado los datos recolectados sobre el Sistema Eléctrico Milagro, podemos ir obteniendo las siguientes conclusiones sobre las posibles causas de los problemas que se presentan en las líneas así:

Las líneas en donde se presenta la mayor cantidad de problemas son la Milagro 2 y Milagro 3, siendo más crítico en esta última.

Los problemas se presentan por una posible insuficiencia de la distancia de fuga de los aisladores, causados por una gran contaminación. Se llega a esta conclusión luego de haber realizado los trabajos de mantenimiento en estas dos líneas y haber cambiado un gran número de

asuladores fogoneados, principalmente en las zonas de los cañaverales.

De los datos registrados se concluye que no existen problemas de contaminación en las líneas Montero-Puerto Roca-Haranjal y Triunfo-Troncal.

RESUMEN DE LOS SUCESOS DE DEBITO DE LA LINEA DELIBERADO A PROBLEMAS POR FALLAS EN LOS AISLADORES

#	Fecha	Ubicación	Tipo de falla	Hora de inicio	Duración	CAUSAS	Trabajos realizados
1	1985	Cruce con la línea Paute-Milagro 230 kv	f-t			Ave que se posó en un aislador tipo Poste causó la rotura del conductor.	Reparación conductor
2	20/8/86		f-t	18:59 H.	6 min.	Desconocida	Inspección
3	14/9/86		f-t	17:40 H.	60 min.	Desconocida	Inspección
4	17/9/86	Terrenos de San Carlos.	f-t			Quema de cañaverales.	Cambio de 18 aislad. fogueados.
5	19/9/86	Roberto Astudillo.	f-t	3:15 H.			Cambio de 1 aislador fogueado
6	20/9/86		f-t	5:11 H.			Inspección

NOTA: Hasta el 23/10/86 se han cambiado 20 aisladores tipo Poste marca LAPP. Todos los aisladores presentan huellas de descargas en el contorno y algunos tienen fundida parte de la grapa de suspensión.

TABLA 3.8

RESUMEN DE LAS SALIDAS DE SERVICIO DE LA LÍNEA MILAGRO 2 PROVOCADAS POR FALLAS EN LOS AISLADORES

#	Fecha	Ubicación	Tipo de falla	Hora de inicio	Duración	CAUSAS	Trabajos realizados
1	30/9/86		f-t			Desconocida	Inspección
2	10/10/86		f-t			Desconocida	Inspección

NOTA: Aprovechando el mantenimiento de la S/E Milagro del SNI, entre los días 18 y 19 de Octubre de 1986, se procedió a realizar el mantenimiento de la línea, arrojando como resultado el cambio de 16 aisladores tipo Poste fogoneados, marca NGK.

CAPITULO IV

CÁLCULO TEÓRICO DEL AISLAMIENTO DE LAS LINEAS DE TRANSMISION DEL SISTEMA MILAGRO

El objetivo de este capítulo es el de realizar el cálculo del aislamiento, utilizando el procedimiento detallado en el capítulo II. El hecho de llamarlo cálculo teórico es porque se calcula el aislamiento de líneas que ya están construidas y en operación, con la finalidad de realizar un estudio comparativo del aislamiento.

4.1. CALCULO DEL AISLAMIENTO POR CONTAMINACION

Como se describió en el capítulo II, vamos a realizar este cálculo por dos métodos:

- 1) Para utilizar el método recomendado en el libro de aisladores de la NGK (2), tenemos que determinar primeramente el diámetro promedio aproximado de los aisladores tipo Poste a utilizarse, para lo cual hacemos uso de la ecuación A.3.a con los valores observados en los catálogos del mismo fabricante, obteniendose:

$$D = 190,5 \text{ mm.}$$

$$d = 114,3 \text{ mm.}$$



$$D_{\text{pro}} = \frac{D + d}{2} \quad (\text{A.3.a})$$

$$D_{\text{pro}} = \frac{190,5 + 114,3}{2} = 152,4 \text{ mm.}$$

Ahora utilizando la figura A.1, que nos indica la distancia de fuga necesaria por voltaje resistido en función del diámetro promedio para distintos grados de contaminación, y la ecuación 2.1, obtenemos los resultados que se muestran en la tabla 4.1.

$$D = \frac{V}{f_n T} = \frac{V}{I_n \max} \times MS \times \frac{D}{f_n VR} \quad (2.1)$$

- 2) Para aplicar el método sugerido por el Libro de L/T de la ESPOL (5), en la sección correspondiente al cálculo del aislamiento, hacemos uso de la ecuación 2.2 con los siguientes datos:

TABLA 4.1

DISTANCIA DE FUGA NECESARIA SEGUN LA NGK

Línea a del bus.	Categoría contaminación	DfnVR mm/kv	DfnT mm
Mastaro-Naranjal	1	25	1205,1
Cruceño-Troncal	1	25	1205,1
Mastaro 2	2	29	1397,9
Mastaro 3	3	35	1687,1

$$DfT = \frac{V \times Dfo}{d} \quad (2.2)$$

$d = 0,968$; de la tabla de densidad relativa del
aire (C.3)

$V = 1,1$ veces el voltaje nominal

Obteniendose los resultados que se muestran en la
tabla 4.2.

De los resultados obtenidos para las distancias
de fuga por los dos métodos anteriores, tomamos
las magnitudes mayores, con las cuales procedemos

TABLA 4.2

DISTANCIA DE FUGA NECESARIA SEGUN EL LIBRO DE LA ESPOL

Linea a distancia	Categoría contaminación	Dfo mm/ky	DfT mm
Santero-Naranjal	1	17	1332,96
Santero-Troncal	1	18	1411,4
Santero 2	2	22	1725,0
Santero 3	3	26	2038,7

a revisar los folletos de los aisladores LAPP y el libro de la NGK, para determinar que los aisladores necesarios desde el punto de vista de la contaminación son los indicados en la tabla 4.3.

TABLA 4.3

AISLADORES REQUERIDOS POR CONTAMINACION

Linea a distancia	Distancia de fuga mm.	NGK	LAPP
Santero-Naranjal	1332,96	DA-85199	4788
Santero-Troncal	1411,4	DA-85200	58707
Santero 2	1725,0	DA-85201	58707
Santero 3	2038,7	DA-85202	---

CÁLCULO DEL AISLAMIENTO POR SOBREVOLTAJES DE FRECUENCIA INDUSTRIAL

Los sobrevoltajes de frecuencia industrial más comunes son los causados por las fallas desbalanceadas, para calcular estos sobrevoltajes hacemos uso de la ecuación 2.3 con los siguientes datos así:

$K_{fi} = 1,6$: Valor sugerido por el estudio de sobretensiones realizado por INECEL (6).

$V_1 = 1,1$ veces el voltaje nominal

$$V_{fi} = K_{fi} \frac{V_1}{\sqrt{3}} \quad (2.3)$$

$$V_{fi} = \frac{1,6 \times 1,1 \times 69}{\sqrt{3}} = 70,12 \text{ kv}$$

Debemos ahora calcular el voltaje crítico de la aislación usando la ecuación 2.4.

$n = 3,7$. De la figura B.1 para una probabilidad de resistir de 97,7 % y aproximadamente 200 estructuras por línea.

$\delta = 6 \%$ Para aisladores bajo condiciones de lluvia (5).

$$V_c = \frac{V_{fi}}{(1 - n \delta)} \quad (2.4)$$

$$V_c = \frac{70,12}{(1 - 3,7 \times 0,06)} = 90,13 \text{ kv.}$$

A este valor de sobrevoltaje lo debemos corregir por condiciones meteorológicas distintas de las normales, para ello utilizamos la ecuación 2.5 con los siguientes datos:

- $n = 1$ De la tabla C.2 que nos da los valores para esta constante.
- $d = 0,968$ De la tabla C.3 que nos da los valores de la densidad relativa del aire.
- $w = 1,03$ Se obtiene de la figura C.5, que es la que proporciona los valores de la constante de la humedad, para esto utilizamos un valor promedio de la humedad del 84 %.
- $k = 0,70$ Se obtiene de la figura C.8 con una razón de precipitación normal de 0,20 pulgadas/min.

$$V_{cl} = \frac{V \times d^n \times K}{c \times 11} \quad (2.5)$$

$$V_{cl} = \frac{90,13 \times 1,03}{0,968 \times 0,7} = 137 \text{ kv}$$

Con este valor de voltaje crítico a frecuencia industrial determinamos el número de aisladores necesarios, para lo cual utilizamos la tabla F.1; obteniéndose que el número requerido es de 3 aisladores normales de suspensión. A esto sumamos un aislador para prevenir roturas en servicio, lo que nos da un total de 4 aisladores.

Ahora utilizando la tabla F.2, la cual nos indica las características de los aisladores de suspensión, procedemos a determinar la distancia de fuga equivalente total de estos 4 aisladores, la cual nos da 1.168,4 mm.

Con este valor de distancia de fuga consultamos los libros de aisladores tipo Poste de los fabricantes, obteniéndose los resultados mostrados en la tabla 4.4.

TABLA 4.4

AISLADORES REQUERIDOS POR SOBREVOLTAJES A 60 Hz.

Línea a 69 kv.	Distancia de fuga mm.	NGK	LAPP
Mont-Narani.	1.168,4	DA-85199	4788
Triunf-Tron.	1.168,4	DA-85199	4788
Milagro 2	1.168,4	DA-85199	4788
Milagro 3	1.168,4	DA-85199	4788

4.2. CALCULO DEL AISLAMIENTO POR SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA

Para el cálculo del aislamiento por sobrevoltajes de maniobra utilizamos la ecuación 2.6 con los siguientes datos:

$K = 4$ De la tabla 2.1 que nos da los valores para la constante transiente.

$V = 1,1$ veces el voltaje nominal

$$V_{SW} = \frac{K \times \sqrt{2} \times V}{\sqrt{3}} \quad (2.6)$$

$$V_{sw} = \frac{4 \times 42 \times 1,1 \times 69}{43} = 247,9 \text{ kV.}$$

Con este valor de voltaje resistido por la aislación, determinamos el voltaje crítico de la misma, para lo cual utilizamos la ecuación 2.7 con los siguientes datos:

$n = 3,7$ De la figura B.1 para una probabilidad de resistir de 97,7 % y aproximadamente 200 estructuras por línea.

$\delta = 5 \%$ Dato tomado del estudio de sobretensiones realizado por INECEL (6).

$$V_c = \frac{V_{sw}}{(1 - n \delta)} \quad (2.7)$$

$$V_c = \frac{247,9}{(1 - 3,7 \times 0,05)} = 304,2 \text{ kV}$$

Ahora aplicamos los factores de corrección debido a las condiciones meteorológicas distintas a las normales, para lo cual utilizamos la ecuación 2.8 con los siguientes datos:

$d = 0,968$ De la tabla C.3 que nos da los valores de la densidad relativa del aire.

$n = 1$ De la tabla C.2 que nos da los valores para esta constante que varía con la distancia.

$H = 1,03$ Se obtiene de la figura C.5 con un valor de humedad del 84 %.

$$V_{sw1} = V_c \frac{n}{d \cdot H} \quad (2.8)$$

$$V_{sw1} = 304,2 \frac{1,03}{0,968} = 323,7 \text{ kv}$$

Por efecto de la lluvia, a este voltaje se lo altera en un 5 %, obteniéndose:

$$V_{sw1} = 340,0 \text{ kv}$$

Ahora para determinar el aislador tipo Poste que resista los sobrevoltajes por maniobra procedemos de la siguiente manera:

En primer lugar transformamos el valor del voltaje crítico en un voltaje de impulso equivalente, usando

la relación 2.9:

$K = 1,25$ Tomado del libro de L/T de la ESPOL,
sección aislamiento (5).

$$V_i = K \times V_{sw1} \quad (2.9)$$

$$V_i = 1,25 \times 340,0 = 425,0 \text{ kv}$$

Con este valor de voltaje de impulso y la tabla F.1 determinamos el número de aisladores de la cadena, obteniéndose 4 aisladores de suspensión. A estos sumamos un aislador para prevenir daños posteriores, lo que nos da un total de 5 aisladores normales de suspensión.

Ahora utilizando la tabla F.2, la cual resume las características de los aisladores de suspensión obtenemos la distancia de fuga equivalente total de estos cinco aisladores, la cual da 1.460,5 mm.

Con este valor de distancia de fuga consultamos los libros de aisladores tipo Poste de los fabricantes, obteniéndose los resultados que se muestran en la tabla 4.5.

TABLA 4.5

AISLADORES REQUERIDOS POR SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA

Línea a 69 kv.	Distancia de fuga mm.	NGK	LAPP
Mont-Naranj.	1.460,5	DA-85200	58707
Triunf-Tronc.	1.460,5	DA-85200	58707
Milagro 2	1.460,5	DA-85200	58707
Milagro 3	1.460,5	DA-85200	58707

CÁLCULO DEL AISLAMIENTO POR SOBREVOLTAJES PRODUCIDOS POR DESCARGAS ATMOSFÉRICAS

Para calcular el aislamiento que resista este tipo de sobrevoltajes, primeramente debemos obtener el número de descargas atmosféricas que caen sobre una longitud de 100 millas de línea aérea, para lo cual utilizamos la ecuación 2.10. Pero previamente a esto calculamos la altura efectiva del hilo de guarda. Para calcular esta altura utilizamos las ecuaciones 2.11 y 2.14 con los datos que nos proporciona la figura 3.3, que representa la estructura de una línea típica con aisladores tipo Poste.

Para un cálculo referencial trabajaremos con los datos de la línea Milagro 3:

- Características de la línea (Proporcionados por la EEMCA).

Conductor: 266,8 mm 26/7 ACSR Partridge.

Longitud: 25 km.

Vano: 150 m.

Peso: 0,5454 kg/m.

Tensión máx. 0,15 (5100) kg.

Con estos datos podemos hallar el valor aproximado de la flecha.

$$f = \frac{w \times l^2}{8 \times T} \quad (2.15)$$

$$f = \frac{0,5454 \times (150)^2}{8 \times 0,15 \times 5100} = 2 \text{ m.}$$

$$= 6,597 \text{ pies}$$

Con esto podemos calcular la altura efectiva del hilo de guarda:

$$ht = 16 \text{ m.} = 52,50 \text{ pies}$$

$$hc = 14 \text{ m.} = 45,93 \text{ pies}$$

Entonces:

$$h = h_t - 0,66 (h_t - h_c) \quad (2.11)$$

$$h = 52,50 - 0,66 * (52,50 - 45,93) = 48,16 \text{ pies.}$$

- Ahora el número anual de descargas atmosféricas que caen en una longitud de 100 millas de L/T será:

$T = 10$ Tomado de la figura 2.5, la cual nos da los valores isoceraunicos máximos.

$K = 0,5$ Indica el rango de descargas a tierra;

este valor es resultado de la experiencia y es sugerido por el libro de Diseño de Líneas compactas (3).

$b = 0,0$ Distancia entre los hilos de guarda en pies. ($b=0$ para un hilo de guarda)

$$N = \frac{T * Km * (4h + b)}{5280} * 100 \quad (2.10)$$

5280

$$N = \frac{10 * 0,5 * (4 * 48,16) * 100}{5280} = 18,24 \text{ Des./100 mill.}$$

$$= 11,34 \text{ Des./100 km}$$

- Cálculo del voltaje resistido

Utilizando la relación b/a (donde "b" representa la distancia entre el conductor inferior y el hilo de guarda dibujado en imagen y "a" representa la distancia entre el conductor superior y los hilos de guarda) y la figura D.2 que nos da el factor de acoplamiento entre un grupo de conductores y un conductor aislado, podemos obtener el valor de este factor de acoplamiento C_n :

Entonces con $b/a=10$, que es un valor resultante de la experiencia (Anexo D) y la curva de la figura D.2 que corresponde a un hilo de guarda obtenemos que: $C_n = 0,28$

También podemos hallar el valor de la impedancia característica de la línea Z_n , para lo cual utilizamos la relación D.2 con los siguientes datos:

$Z = 500 \ \Omega$	Impedancia característica promedio de los n conductores.
$Z' = 125 \ \Omega$	Impedancia característica promedio mutua entre pares de n conductores.
$n = 1$	Un hilo de guarda.

$$Z_n = \frac{Z + (n - 1) Z'}{n} \quad (D.2)$$

$$Z_n = \frac{500 + (1 - 1)125}{1} = 500 \ \Omega$$

Ahora podemos hallar el valor de la resistencia de puesta a tierra efectiva R_{pt}' , para lo cual utilizamos la relación D.1 con los siguientes datos :

$Z_0 = 400 \ \Omega$ Impedancia característica de la descarga eléctrica.

$Z_n = 500 \ \Omega$ Impedancia característica de la línea.

$R_{pt} = 20 \ \Omega$ Resistencia de puesta a tierra en condiciones normales.

$$R_{pt}' = \frac{1}{\frac{1}{Z_0} + \frac{2}{Z_n} + \frac{1}{R_{pt}}} \quad (D.1)$$

$$R_{pt}' = \frac{1}{\frac{1}{400} + \frac{2}{500} + \frac{1}{20}} = 17,7 \ \Omega$$

La R_{pt} se la puede obtener también de la figura D.1, en la cual se tienen curvas para diferente número de hilos de guarda.

Ahora para obtener el valor del factor de cresta α_c tanto en la estructura como en el medio vano, tenemos que hallar primeramente las relaciones " l/f " y " R_{pt}/Z_0 ", para conjuntamente con la figura D.6 hallar los respectivos valores del factor de cresta. Así:

$l = 492,13$ pies. (Longitud del vano)

$f = 1,5$ seg. (Frente de onda)

$$\frac{l}{f} = \frac{492,13}{1500} = 0,328$$

$R_{pt} = 20 \ \Omega$ Resistencia de puesta a tierra en condiciones normales.

$Z_0 = 500 \ \Omega$ Impedancia característica de la línea.

$$\frac{R}{Z_0} = \frac{20}{500} = 0,04$$

Entonces los valores obtenidos para el factor de cresta utilizando la figura D.6 son los siguientes:

Para la estructura:

$$\alpha_c = 0,95$$

En la mitad del vano:

$$\alpha_c = 0,29$$

Para hallar el número de aisladores requeridos en la estructura, y el espaciamiento libre en el medio vano, se ha descrito en el capítulo II dos métodos de trabajo. El primero va calculando varios parámetros independientemente, mientras que el segundo lo hace de una forma más sencilla a partir de un grupo de curvas ya estandarizadas.

Primer Método

- Aislamiento necesario en la estructura

Para hallar el voltaje resistido en la estructura,

debemos conocer que magnitud de corriente es la que se va a producir con las descargas atmosféricas y el porcentaje de descarga de las mismas, para esto utilizamos la figura D.4.

Utilizando el parámetro $(1 - Cn) = Rpt'$, cuyo valor es:

$$(1 - 0,28) \times 17,7 = 12,744$$

Vamos a la figura D.4, y del cruce de las dos curvas obtenemos los siguientes valores:

Intensidad de corriente: 42.000 Amperios

Porcentaje de descargas: 26 %

Entonces el voltaje resistido en la estructura se lo calcula con la relación 2.12

$$V_e = (1 - Cn) \times \alpha_c \times I_d \times Rpt \quad (2.12)$$

$$V_e = (1 - 0,28) \times 0,95 \times 42.000 \times 17,7$$

$$= 508,5 \text{ kv}$$

Corrigiendo este valor por un factor que representa las condiciones metereológicas

distintas a las normales, tenemos:

$$V_r = 508,5 \times 1,06 = 539 \text{ kv}$$

Pero como lo que nosotros necesitamos conocer es el número de aisladores que resistan este voltaje, utilizaremos la figura D.3, para lo cual necesitamos conocer la relación " V_r/α_c " y la longitud del vano, así:

$$l = 500 \text{ pies} \quad (\text{Longitud del vano})$$

$$V_r = 508,5 \text{ kv} \quad (\text{Voltaje resistido})$$

$$\alpha_c = 0,95 \quad (\text{Factor de cresta})$$

Entonces:

$$\frac{V_r}{\alpha_c} = \frac{539,0}{0,95} = 567,4 \text{ kv}$$

Con estos datos vamos a la figura D.3, de donde obtenemos que el número de aisladores necesarios es cinco.

Adicionalmente le agregamos un aislador por supuesto roto en servicio, con lo que el número de aisladores será de seis.

La distancia de fuga total de estos seis aisladores lo determinamos haciendo uso de la tabla F.2, la cual contiene las características de los aisladores de suspensión; obteniéndose 1.752,6 mm.

Los resultados obtenidos para todas las líneas luego de consultar los libros de aisladores tipo Poste de los fabricantes se los resume en la tabla 4.6.

- Aislamiento necesario en la mitad del vano.

Considerando la figura D.6 (a), que es la que nos proporciona los tiempos de descarga en el medio vano, cuando se conoce la longitud del vano y el valor de la resistencia de puesta a tierra, obtenemos que el tiempo de descarga es $t = 1,5$

Ahora para determinar la separación en la mitad del vano, debemos determinar primeramente el valor del coeficiente $\alpha_c Id$ desde la figura D.9, además se puede determinar también la corriente de descarga y el porcentaje de descargas. Para realizar esto, solo necesitamos conocer el valor del factor de cresta α_c en el medio vano. Entonces

con $\alpha_c = 0,29$ y del cruce de las dos curvas de la figura D.9 obtenemos los siguientes datos:

Corriente de descarga = 52.000 Amperios

Porcentaje de descargas = 15 %

Coefficiente $\alpha_c I_d = 29.000$

Con el valor de este coeficiente $\alpha_c I_d$ y el tiempo de descarga en el medio vano hallado previamente, podemos ir a la figura D.8 y hallar la separación en la mitad del vano.

Los datos necesarios son:

$\alpha_c I_d = 29.000$

$t = 1,5$

La separación en la mitad del vano es de 7 pies.

Segundo Método

Este segundo método utiliza las curvas del T y D (15). A pesar de ser un método bastante sencillo, tiene una desventaja, la cual es de que no presenta curvas de trabajo para todos los vanos posibles.

Es por esta razón que no podemos aplicar el método a nuestro caso de estudio (vano = 500 pies). Sin embargo para ilustrar el método lo aplicaremos al vano más próximo (600 pies), que vendría a representar una condición más crítica, pues varias pruebas han demostrado que para un mismo valor de Rpt, a medida que el vano aumenta, el sobrevoltaje por amperio también aumenta (15), especialmente en el medio vano.

La aplicación de este método lo vamos a hacer para hallar el número de perturbaciones que se van a presentar en una línea que contenga la misma cantidad de aisladores de suspensión calculados por el método anterior, y con el mismo valor de resistencia de puesta a tierra.

También se podría trabajar de otra manera, por ejemplo fijándose un número de perturbaciones aceptables para una línea y conociendo el valor de la Rpt podríamos hallar el número de aisladores necesarios.

Para proceder al cálculo necesitamos los siguientes datos:

l = 600 pies (longitud del vano)

- $R_{pt} = 20 \Omega$ (Resistencia de puesta a tierra)
 $N = 6$ (Número de aisladores de suspensión)
 $a = 7$ pies (Separación entre el hilo de guarda
 y el conductor en el medio vano)

Entonces de las curvas (c) de la figura D.10, en base a los datos anteriores obtenemos los siguientes resultados para las descargas en las torres:

Corriente de descarga promedio = 50.000 Amperios
 Probabi. de perturb./100 millas/año = 7,5

Ahora, utilizando las curvas (i) de la figura D.10 con los mismos datos anteriores, obtenemos los siguientes resultados para las descargas en el medio vano:

Corriente de descarga promedio = 65.000 Amperios
 Probabi. de perturb./100 millas/año = 4

Como se indicó en el capítulo II, el número de perturbaciones totales en la línea se obtendrá realizando un promedio de las perturbaciones en la estructura y en el medio vano.

$$\begin{aligned} \text{Perturb. tot. línea/100 millas/año} &= \frac{7,5 + 4}{2} \\ &= 5,75 \end{aligned}$$

Pero como se habla señalado antes, todos estos datos están basados en un nivel isoceraunico de 30 días de descargas por año, por lo que debemos corregir proporcionalmente este valor para un nivel isoceraunico de 10 descargas que es el de nuestro caso de estudio; quedandonos:

$$\begin{aligned} \text{Perturb. tot. línea/100 millas/año} &= \frac{5,75}{3} \\ &= 1,916 \end{aligned}$$

Tercer Método

- Cálculo del número de perturbaciones por milla y por año.

Como ya señalamos en el capítulo II, este método se utiliza cuando no se disponen de datos estadísticos ni de curvas de líneas con características similares. Aquí se considera tanto las descargas en el hilo de guarda, así como también las fallas del apantallamiento.

En la estructura:

Partiendo del ángulo de protección y de acuerdo a la altura de la torre, con la figura D.13 obtenemos la probabilidad de que las descargas caigan en los conductores:

$$P_1 = 0,005$$

Utilizando la ecuación D.5, podemos hallar el número de perturbaciones en 100 millas de longitud por año, debido a las descargas directas en los conductores:

$$F_1 = P_1 \times N_1 \quad (D.5)$$

$$F_1 = 0,005 \times 18,24 = 0,0912$$

En la mitad del vano:

De la figura D.14 hallamos un coeficiente β , que depende de la relación entre el vano del caso de estudio y un vano base. En nuestro caso se tomó igual valor para estos vanos, por lo que se obtuvo el valor de $\beta = 1$.

De la figura D.15, podemos hallar el régimen de

perturbaciones P_2^2 , cuando se conoce la resistencia al pie de la torre y el número de aisladores, así:

Número de aisladores = 6

Resistencia al pie de la torre = 20 Ω

Número de hilos de guarda = 1

En base a estos valores tenemos que $P_2^2 = 60$

Reemplazando los siguientes valores en la ecuación D.6 podemos hallar las perturbaciones en 100 millas de longitud de línea por año, debido a descargas en la estructura y/o en los hilos de guarda.

$a =$ Constante experimental de valor 0,5

$l_1 =$ Longitud del vano del diseño buscado 492 pies

$l_2 =$ Longitud de un vano base 492 pies

$T = 10$ Nivel isoceraunico

$k = 1$ Coeficiente que depende de la relación entre el vano de estudio y un vano base.

Reemplazando estos valores en la ecuación D.6:

$$P = 0,0165 \times \beta \times e^{-a \times (l_1/l_2)} \times P_2^2 \times T \quad (D.6)$$

$$F_2 = 0,0165 \times 1 \times e^{-0,5 \times (492,13/492,13)} \times 10 \times 60$$

$$= 6$$

La probabilidad de descargas se obtiene de la relación D.7 :

$$P_2 = \frac{2,9 \times F_2}{N_t} \quad (D.7)$$

$$P_2 = \frac{2,9 \times 6}{18,24} = 0,9539$$

Y de la figura D.5 tenemos la siguiente corriente de descarga:

$$I_d = 16.000 \text{ Amperios.}$$

El número total de perturbaciones será:

$$F = F_1 + F_2$$

$$F = 0,0912 + 6 = 6,0912$$

Para conocer a que valor de voltaje corresponde la I_d hallada, utilizamos la ecuación 2.11.

$$V_r = (1 - C_n) \times \alpha_c \times I_d \times R_{pt} \quad (2.11)$$

$$\begin{aligned} V_r &= (1 - 0,28) \times 0,95 \times 26.000 \times 17,7 \\ &= 339 \text{ kv} \end{aligned}$$

Corrigiendo este valor por un factor que representa las condiciones metereológicas distintas a las normales tenemos:

$$V_r = 339 \times 1,06 = 360 \text{ kv.}$$

Transformando este valor de voltaje resistido a un voltaje de impulso:

$$V_i = 360 \times 1,25 = 450 \text{ kv.}$$

Revisando en la tabla F.1 tenemos que a este valor de voltaje de impulso le corresponde cinco aisladores de suspensión normales, a los cuales se les suma un aislador por suponerlo roto en servicio, obteniendose en total seis aisladores, los que nos dan una distancia de fuga total de 1752,6 mm.

Revisando los catálogos obtenemos los siguientes resultados:

TABLA 4.6

AISLADORES REQUERIDOS POR DESCARGAS ATMOSFERICAS

Línea a 69 kv.	Distancia de fuga mm.	NGK	LAPP
Monte-Naranj.	1752	DA-85201	---
Triunf-Tronc.	1752	DA-85201	---
Milagro 2	1752	DA-85201	---
Milagro 3	1752	DA-85201	---

DISTANCIAS LIBRES

Las distancias libres mínimas a ser consideradas:

a) Distancia entre conductores.

Para calcular esta distancia tenemos los siguientes datos:

$K = 0,65$ Dato tomado del libro de L/T de la
ESPOL.

$f_c = 2,0$ m Flecha calculada en la sección 4.4

$V = 1,1$ veces el voltaje nominal.

Utilizando la ecuación 2.14 tenemos:

$$D_{mc} = K \times \sqrt{fc} + \frac{V}{150} \quad (2.14)$$

$$\begin{aligned} D_{mc} &= 0,65 \times \sqrt{2} + \frac{1,1 \times 69}{150} \\ &= 1,426 \text{ m} \\ &= 4,7 \text{ pies} \end{aligned}$$

b) Distancia de los conductores al terreno.

La distancia libre mínima del conductor más bajo al suelo lo calculamos para dos tipos de terrenos:

1) Regiones poco transitadas (Ecuación 2.16)

$$D_{mct} = 6 + 0,006 \times V \quad (2.16)$$

$$\begin{aligned} D_{mct} &= 6 + 0,006 \times 1,1 \times 69 \\ &= 6,455 \text{ m.} \end{aligned}$$

2) Regiones transitables (Ecuación 2.17)

$$D_{mct} = 7 + 0,006 \times V \quad (2.17)$$

$$\begin{aligned} D_{mct} &= 7 + 0,006 \times 1,1 \times 69 \\ &= 7,455 \text{ m.} \end{aligned}$$

c) Distancias libres horizontales.

Según datos tomados de INECEL, la distancia libre horizontal para niveles de 69 kv debe ser como mínimo de cuatro metros entre los conductores y el obstáculo más cercano, edificación, vegetación, etc.

Para otros niveles de voltaje, estas distancias pueden ser calculadas proporcionalmente al dato anterior.

También podemos señalar que en caso de tratarse de terrenos agrícolas, estos pueden seguir siendo normalmente cultivados, pero teniendo siempre la precaución de que la vegetación no alcance demasiada altura. Por ejemplo, que las plantas de banano y caña de azúcar tengan una altura inferior a 5 metros.

4. AISLAMIENTO RESULTANTE DEL DISEÑO

Como ya se observó, en este capítulo se calculó el aislamiento para varios tipos de sollicitaciones eléctricas, entre estas la contaminación y los sobrevoltajes, obteniéndose de la misma manera

diferentes tipos de aisladores para cada caso.

En las siguientes tablas reproducimos las tablas que contienen los aisladores calculados.

TABLA 4.3

AISLADORES REQUERIDOS POR CONTAMINACION.

Línea	Dist. fuga	NGK	LAPP
kV	mm		
Naranj.	1.345	DA-85199	4788
Tronc.	1.411	DA-85200	58707
Cable 2	1.725	DA-85201	58707
Cable 3	2.039	DA-85202	-----

TABLA 4.4

AISLADORES REQUERIDOS POR SOBREVOLTAJES A 60 HZ.

Línea	Dist. fuga	NGK	LAPP
kV	mm		
Naranj.	1.168	DA-85199	4788
Tronc.	1.168	DA-85199	4788
Cable 2	1.168	DA-85199	4788
Cable 3	1.168	DA-85199	4788

TABLA 4.5

AISLADORES REQUERIDOS POR SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA

Línea	Dist. fuga	NGK	LAPP
69 kv	mm		
Mont.-Naranj.	1.460	DA-85200	58707
Trunc.-Tronc.	1.460	DA-85200	58707
Milagro 2	1.460	DA-85200	58707
Milagro 3	1.460	DA-85200	58707

TABLA 4.6

AISLADORES REQUERIDOS POR SOBREVOLTAJES ATMOSFERICOS

Línea	Dist. fuga	NGK	LAPP
69 kv	mm		
Mont.-Naranj.	1.752	DA-85201	---
Trunc.-Tronc.	1.752	DA-85201	---
Milagro 2	1.752	DA-85201	---
Milagro 3	1.752	DA-85201	---

En base a las diferentes tablas de aisladores calculados, presentamos la tabla 4.7, en la cual se colocan los aisladores requeridos por cada línea, de tal forma que se proteja para la máxima contingencia que podría causar fallas en el aislamiento. En la misma tabla se indica además el criterio de selección de aislamiento que predominó en cada línea.

TABLA 4.7

AISLADORES RESULTANTES DE LOS CALCULOS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO

Línea	Dist. fuga mm	NGK	LAPP	Criterio predomin.
Dist.-Maranf.	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Tranc.-Tronc.	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Salgado 2	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Salgado 3	2.039	DA-85202	--	Contamin.

CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO DE LA AISLACION EXISTENTE Y DE LA AISLACION CALCULADA PARA LAS LINEAS DE SUBTRANSMISION DEL SISTEMA MILAGRO

5.1. DESCRIPCION DETALLADA DE LAS CARACTERISTICAS DEL AISLAMIENTO CALCULADO Y DEL AISLAMIENTO EXISTENTE EN LAS LINEAS DE SUBTRANSMISION

a) Aislamiento existente.

Como ya se señaló en la sección 3.3, los aisladores tipo Poste instalados en las L/ST del Sistema Eléctrico Milagro son:

- NBK DA-BS199 de 12 faldas
- LAPP 4788 de 13 faldas

La distribución de los aisladores en las líneas del sistema se puede ver en la tabla 5.1, además las principales características de estos aisladores se resumen en la tabla 5.2.

TABLA 5.1

DISTRIBUCION ACTUAL DE LOS AISLADORES TIPO POSTE EN EL SISTEMA MILAGRO

Línea a 69 kv	Dist. fuga mm	NGK	LAPP
Mont.-P.I.-Narani.	1345,0	DA-85199	4788
Triunfo-Troncal	1345,0	DA-85199	--
Milagro 2	1345,0	DA-85199	--
Milagro 3	1345,0	DA-85199	4788

TABLA 5.2

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS AISLADORES TIPO POSTE INSTALADOS EN EL SISTEMA ELECTRICO MILAGRO

	NGK DA-85199	LAPP 4788
Material	Porcelana	Porcelana
Dist. fuga (mm)	1.345	1.345
Dist. arco en seco (mm)	489	489
Dist. impulso no disrupt. (kv)	250	--
Dist. línea recomendado (kv)	46	88*

* CONSIDERANDO POSTES DE MADERA.

Para mayor detalle sobre las características ver

tabla F.3

b) Aislamiento calculado en esta tesis.

Como ya se observó, en el literal 4.7 se obtuvo una tabla de resultados que nos indicaba los aisladores resultantes del cálculo realizado en esta tesis, los cuales protegían las líneas contra las diferentes sollicitaciones eléctricas que se presentan en las mismas, tales como los efectos de la contaminación y los diversos tipos de sobrevoltajes.

En la tabla 5.3 reproducimos estos resultados y en la tabla 5.4 se indican las principales características de estos aisladores.

TABLA 5.3

AISLADORES RESULTANTES DE LOS CÁLCULOS REALIZADOS EN ESTE TRABAJO

Línea en kv	Dist. fuga mm	NGK	LAPP	Criterio predomin.
Med.-Naranj.	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Tronc.-Tronc.	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Alcorno 2	1.752	DA-85201	--	Des. Atm.
Alcorno 3	2.039	DA-85202	--	Contamin.

TABLA 5.4

CARACTERISTICAS PRINCIPALES DE LOS AISLADORES TIPO POSTE
CALCULADOS PARA EL SISTEMA ELECTRICO MILAGRO

	NGK	
	DA-85201	DA-85202
Material	Porcelana	Porcelana
Dist. fuga (mm)	1.805	2.085
Dist. arco en seco (mm)	689	889
Dist. impulso no disrupt. (kv)	350	450
Dist. línea recomendado (kv)	69	92

Para mayores detalles sobre las características ver la tabla F.4.

5.2. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE EL AISLAMIENTO CALCULADO EN ESTA TESIS Y EL AISLAMIENTO EXISTENTE EN LAS L/S

Como podemos observar, en las tablas 5.1 y 5.3 se presenta un resumen de los aisladores tipo Poste instalados y calculados para el Sistema Milagro.

Realizando un análisis individual de las líneas,

veamos que la distancia de fuga calculada en esta tesis es mayor que la distancia de fuga de los aisladores instalados en las líneas. Se debe indicar que las distancias de fuga presentadas en la tabla 5.3, son las mayores de todas las distancias calculadas para las diferentes condiciones analizadas (contaminación y sobrevoltajes), así tenemos que las distancias de fuga para las tres primeras líneas correspondieron a las de sobrevoltajes por descargas atmosféricas, mientras que a la última línea le correspondió la de contaminación.

También podemos señalar que al comparar las distancias de fuga de los aisladores instalados con los calculados, estos últimos son superiores en lo relacionado al cálculo de los sobrevoltajes de maniobra, descargas atmosféricas y también por los efectos de la contaminación.

En lo relacionado con los sobrevoltajes de frecuencia industrial, vemos que en los dos casos los aisladores utilizados tienen igual distancia de fuga, lo que nos indica que los aisladores instalados solamente tienen capacidad para soportar sobrevoltajes de frecuencia industrial, produciéndose descargas en los aisladores para cualquier valor superior de sobrevoltaje.

Con esto se confirma la hipótesis general de que para niveles de voltaje inferiores a 220 kv., los criterios predominantes en el cálculo de la aislación son los relacionados con la contaminación y las descargas atmosféricas. En cambio para valores superiores a este nivel, generalmente el criterio que predomina es el relacionado con los sobrevoltajes de maniobra.

Si ahora nosotros realizamos un análisis comparativo entre las tablas 5.2 y 5.4, que son las que contienen las principales características de los aisladores tipo Poste instalados y calculados respectivamente, vemos que el valor del voltaje de impulso no disruptivo de los aisladores instalados es mucho menor que el de los aisladores calculados.

En lo que respecta al nivel básico de aislamiento podemos hacer las siguientes anotaciones:

- El BIL que se recomienda para una línea de 69 kv es de 350 kv, valor que sí cumplen los aisladores calculados.
- El BIL de los aisladores instalados es de 250 kv, el cual es un valor recomendado para una línea de 46 kv (Tabla B.2).

Al examinarse las tablas 5.2 y F.3 que contienen las características de los aisladores instalados, se observa la ausencia del valor de voltaje de impulso no disruptivo (soportable) de los aisladores LAPP y que solo se presentan los voltajes críticos de descarga (50 % ruptura y 50 % resistido).

Entonces, al proceder a revisar los valores de los voltajes de ruptura y las distancias de fuga de los aisladores LAPP Y NGK, se logró formar la tabla 5.5, en la cual se determina la equivalencia de los aisladores de estos dos fabricantes.

TABLA 5.5
AISLADORES EQUIVALENTES

NGK	LAPP
DA-55012	4735
DA-65015	4745
DA-85197	4755
DA-85198	4766
DA-85199	4788
---	58707
DA-85201	---
DA-85202	---

Ahora, en la tabla 5.6 se demuestra que estos mismos aisladores equivalentes se utilizan según sus fabricantes en diferentes niveles de voltaje. Se logró formar esta tabla con ayuda de la tabla B.2, la cual nos da los niveles del BIL para diferentes niveles de voltaje.

TABLA 5.6

VOLTAJES DE LAS L/ST RECOMENDADOS PARA LA UTILIZACION DE LOS AISLADORES TIPO POSTE (PEDESTAL)

Realizados por esta tesis		Según fabricantes	
NGK	Voltaje kv	LAPP	Voltaje * kv
DA-55012	23	4735	35
DA-65015	—	4745	45
DA-85197	34.5	4755	55
DA-85198	—	4766	66
DA-85199	46	4789	88
—	—	58707	115
DA-85201	69	—	—
DA-85202	92	—	—

CONSIDERANDO SOLO POSTES DE MADERA.

En lo que respecta a las distancias libres, vemos que las utilizadas en las estructuras del Sistema Milagro (figura 3.2) son mayores a las calculadas, por lo que en este aspecto no se tienen inconvenientes, pudiendo mantenerse los mismos valores.

3.2. CONCLUSIONES SOBRE LAS POSIBLES CAUSAS DEL PROBLEMA QUE SE ANALIZA

Después de haber realizado el análisis comparativo entre las características de los aisladores tipo Poste instalados y los aisladores calculados, podemos obtener las siguientes conclusiones sobre las posibles causas que originaron el problema de los aisladores fallados en el Sistema Eléctrico Milagro:

- La distancia de fuga de los aisladores tipo Poste instalados en el Sistema Eléctrico Milagro es demasiado pequeña, para las condiciones ambientales imperantes en ciertos sectores durante determinadas épocas del año. Esta situación se hace más crítica para las L/ST Milagro 2 y Milagro 3, puesto que estas tienen una condición más severa de contaminación, ya que su recorrido lo

hacen cerca y a través de las plantaciones de caña de azúcar, que como ya se señaló antes, son quemadas en ciertos periodos del año, ocasionando los problemas antes señalados.

- El valor del voltaje de impulso no disruptivo (Withstand Voltage: soportable) de los aisladores tipo POSTE colocados en el sistema, no es adecuado para el nivel de voltaje utilizado en las L/ST del sistema, pues los aisladores colocados tienen un voltaje soportable de 250 kv, el cual corresponde a una línea de 45 kv f-f. En cambio de los aisladores calculados el de menor distancia de fuga tiene un voltaje no disruptivo de 350 kv, el cual corresponde a una línea de 69 kv f-f. (Tabla B-2, la cual nos indica el BIL para diferentes niveles de voltaje).
- Después de analizar la tabla B.5, en la cual se indican los voltajes normalizados por los fabricantes para los distintos tipos de aisladores, podemos concluir que los aisladores tipo Poste marca LAPP solo son utilizables en sistemas con costera o crucetas de madera, en los cuales no se aterriza el aislador: razón por la cual el aislamiento de impulso de la madera puede ser añadido al voltaje de impulso soportable del aislador a razón de 150 kv/m. (2).

Como en el Sistema Eléctrico Milagro tenemos estructura de hormigón armado y además la base metálica de los aisladores es aterrizada, los aisladores con las características descritas en la tabla 5.2 no deben ser utilizados, pues sus magnitudes son insuficientes para las condiciones que presentan las zonas de estudio.

CAPITULO VI

ESTUDIO DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCION Y RECOMENDACIONES

ANALISIS DE LAS ALTERNATIVAS DE SOLUCION MAS FACTIBLES

Una vez que se ha llegado a la conclusión de que los problemas que se originan en las L/ST del Sistema Eléctrico Milagro, se deben a una insuficiencia de aislamiento en las mismas, nuestro siguiente paso será analizar algunas de las posibles alternativas de solución.

Pero como se observó en los datos recolectados en la EEMCA, los problemas debido a los aisladores fogoneados no se presentan en todas las líneas.

Las líneas con mayores problemas son la Milagro 3 y Milagro 2, razón por la cual no se cree conveniente presentar las soluciones en forma generalizada para todas las líneas, sino hacerlo particularmente. Esta consideración se la hace debido a que las soluciones recomendadas deben también tomar en cuenta el aspecto económico.

Para las líneas Montero-Puerto Inca-Naranjal y Triunfo - Troncal podemos hacer un análisis en conjunto, debido a que para las dos líneas se presentan iguales características de solución:

- Como en los datos recolectados no se encuentra ningún indicio de que se hayan producido fallas en los aisladores instalados en estas líneas, se puede hacer la siguiente recomendación:

El cambio al nuevo tipo de aislador, calculado para brindar una mayor confiabilidad a la operación de la línea, no es tan apremiante como en los otros casos, por lo que se lo podrá realizar cuando las condiciones económicas de la empresa se lo permitan, pero mientras eso suceda, será una buena práctica el realizar inspecciones y mantenimiento preventivo periódicamente.

Para la línea Milagro 3 que es la que presenta la mayor cantidad de problemas debido a que cruza alrededor de 7 km la zona de mayor contaminación, podemos indicar que las soluciones deben implementarse inmediatamente, para así evitar todos los inconvenientes que causa a su zona de influencia.

- Debido a la alta inversión que representa la ad-

quisición de los aisladores calculados, se ha considerado conveniente plantear la siguiente alternativa de solución:

Según lo calculado en el capítulo IV, el aislador ha instalarse en ésta línea debería ser uno que cumpla con las características eléctricas del NGK DA-85202, el cual es recomendado para un voltaje de línea de 92 kv en condiciones normales; pero debido a las características de contaminación de las zonas de estudio, es el resultante de nuestro cálculo.

Pero considerando que las zonas por donde cruza la línea Milagro 3 presentan las características de alta contaminación durante cortos periodos de tiempo, y además el alto costo de los aisladores NGK DA-85202, podría pensarse en la adquisición e instalación de un grupo de aisladores que reúnan las características eléctricas del NGK DA-85201, el cual tiene un voltaje de línea recomendado de 69 kv y además es el que cumple las características eléctricas exigidas por los sobrevoltajes atmosféricos.

Si al cabo de un tiempo prudencial de prueba esta línea presenta todavía problemas, se tendrían

que instalar forzosamente los aisladores inicialmente calculados.

Una alternativa adicional derivada de la anterior podría ser la de instalar los aisladores NGK DA-85202, únicamente en la zona en que la línea cruza la plantación de cañaverales, manteniendo en el resto de la línea los NGK DA-85201.

Quizá esta alternativa de solución sea un poco complicada, pero debemos pensar que de esta experiencia podríamos obtener interesantes conclusiones sobre la forma de aplicar los aisladores tipo Poste, para así en un futuro evitar caer en los errores que hoy tratamos de corregir.

Para la línea Milagro 2, llegamos a la conclusión de que el aislador requerido era aquel que reuniese las características del NGK DA-85201, que fué el que se obtuvo como resultado del cálculo de sobrevoltajes ocasionados por descargas atmosféricas.

Debido a que los problemas en esta línea no se presentan con la misma frecuencia que en la Milagro 3, se podría empezar a trabajar en esta línea luego de haber realizado todos los cambios requeridos en

la Milagro 3, para así poder utilizar el material sobrante de la misma (aisladores NGK DA-85201), en caso de que existiese.

2. RECOMENDACIONES PARA SOLUCIONAR EL PROBLEMA

Como ya se describieron en el literal anterior algunas de las posibles alternativas de solución, lo que nos corresponde ahora es recomendar una solución factible tanto técnica como económica para cada una de las líneas:

- Para las líneas Montero-Puerto Inca-Naranjal y Triunfo-Troncal, en base a lo analizado anteriormente pueden seguir trabajando en las condiciones actuales, pero realizando periódicamente trabajos de mantenimiento, mientras la Empresa tenga la facilidad económica para adquirir los nuevos aisladores resultantes del cálculo.
- Para la línea Milagro 3, debido a su alta tasa de interrupciones recomendamos realizar el cambio de los aisladores actuales (NGK DA-85199) a los aisladores NGK DA-85202, ó cualquier otro de similares características, lo antes posible.

especialmente en las zonas en que las líneas cruzan los cañaverales, para posteriormente completar el cambio de aisladores en el resto de la línea con los NBI DA-85201, ó cualquier otro de similares características.

- En la línea Milagro 2, pueden realizarse los trabajos de reemplazo de los aisladores actuales por los aisladores NBI DA-85201, cuando ya se hayan concluido los trabajos en la línea Milagro 3, para así no perjudicar la operación y eficiencia del Sistema.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Es importante considerar las condiciones de alta contaminación que pueden presentarse en ciertos sectores durante determinadas épocas del año, al momento de realizar el diseño del aislamiento de una línea.

Deben considerarse las condiciones específicas de los lugares por donde cruzan las líneas, al momento de realizar el diseño de las mismas, evitando generalizar resultados, lo cual finalmente representará un menor costo.

Al utilizar aisladores tipo POSTE (Pedestal), debe tenerse en cuenta el tipo de material con que está constituido el poste a utilizar (madera, concreto, etcétera), ya que los fabricantes recomiendan el uso de los aisladores con un determinado tipo de material como soporte.

Debe tenerse presente que los términos: Voltaje de impulso no destructivo o resistido (Impulse Withstand Voltage) y Voltaje de descarga de impulso crítico (Flashover Voltage Critical Impulse) representan dos características distintas de un aislador, por lo que debe

debe cuidarse al hacer uso de los mismos.

Se confirma la hipótesis general de que para niveles de voltaje menores a 220 kv. los criterios predominantes en el cálculo de la aislación son los relacionados con la contaminación y los sobrevoltajes causados por las descargas atmosféricas.

Para las Líneas de Transmisión que se hallan en etapa de estudio y utilicen aisladores tipo Poste, se recomienda considerar también como alternativa de diseño, la construcción de dichas líneas utilizando aisladores de suspensión. Entonces luego de realizar un análisis comparativo tanto técnico como económico entre las diferentes alternativas de solución, podremos escoger la alternativa que presente mayores ventajas económicas y al mismo tiempo cumpla con las condiciones técnicas exigidas por las futuras zonas de influencia.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- Consideraciones en la selección de aisladores bajo condiciones de contaminación atmosférica.

Electroporcelana Gamma S.A.

- 2.- Selection and application of insulators under polluted conditions.

Libro de aisladores de la NGK.

- 3.- Transmission Line Reference Book 115 - 138 kv
Compact Line Design.

Electric Power Research Institute.

- 4.- A study on dynamic voltage distribution on contaminated insulator surfaces.

Paper IEEE Sept/Oct. 1973

- 5.- Líneas de Transmisión y Subestaciones.

Escuela Superior Politécnica del Litoral 1986

- 6.- Sobretensiones transitorias y permanentes por energización a plena tensión de las Líneas del Sistema Nacional de Transmisión.

Angel Montalvo A.

7.- Proyecto de Líneas de Transmisión de Alta Tensión.

Tesis de Grado 1981, Ing. Juan Gallo G.

8.- Instituto de Investigaciones Eléctricas.

Boletín IIE 1979

9.- EHV Transmission Line Reference Book.

Edison Electric Institute 1968

10.- Normalización de la construcción de Líneas de Subtransmisión a 69 kv y de Redes de Distribución a 13,8 kv para la ciudad de Guayaquil.

Tesis de Grado 1985, Ing. Bolívar Astudillo.

11.- Informe del estado de los aisladores tipo Line Post.

Empresa Eléctrica Milagro C.A. 1986

12.- Folleto de los aisladores tipo Line Post.

Libro de aisladores de la LAPP.

13.- Uso de aisladores Tipo Poste con ventajas económicas en Líneas de 69 kv.

Sistema Eléctrico Regional de Manabí.

14.- Normas para Diseño de L/ST a 69 kv.

INECEL, Quito 1979

15.- Electrical Transmission and Distribution Reference
Book.

Westinghouse.