

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA PROBABILIDAD DE FALLA DE
UNA LINEA DE TRANSMISION DEBIDO A SOBREVOLTAJES
POR MANIOBRA"

D-2210

TESIS DE GRADO
PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO
DE
INGENIERO ELECTRICO

POR:

MARIO ORDÓÑEZ VILLAMAR

NOVIEMBRE, 1976

GUAYAQUIL-ECUADOR



INVENTARIADO - 7 ABR. 1980
RESPONSABLE:

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(Reglamento de Exámenes y Títulos Profesionales de la Escuela Superior Politécnica del Litoral).



BIBLIOTECA

DEDICATORIA

A mis padres

A los buenos amigos de mis años
de estudio.

INTRODUCCION GENERAL

Este trabajo enfoca un capítulo importante dentro de lo que constituye la coordinación del aislamiento de un sistema de transmisión. Específicamente trata sobre los requerimientos de aislamiento debido a sobrevoltajes de Maniobra y para el efecto se presenta como parte central de la Tesis un programa de computación (PROBP). Este programa es el primer intento hecho en el país para desarrollar un método exacto para el análisis del comportamiento de una línea de transmisión en cuanto a aislamiento por maniobra se refiere. Se lo debe mejorar especialmente en lo que respecta al tiempo de computación empleado como así también en el enfoque probabilístico, una vez que se cuenten con buenos datos estadísticos de operación del sistema nacional de transmisión.

En cuanto a la Tesis en su conjunto, ésta consta de seis capítulos:

- En los dos primeros se hace una revisión ligera de los diferentes tipos de sobrevoltajes en los sistemas de transmisión;
- En el tercer capítulo nos introducimos al cálculo del aislamiento enfocando la naturaleza del problema y los diversos factores que afectan al aislamiento de una estructura cualquiera;
- El cuarto capítulo se concreta en analizar el Voltaje crítico de Descarga de una estructura, con ejemplos simplificados de cálculo y se presenta un programa de com

putación sencillo para el caso de una estructura tipo (I);

- El capítulo quinto presenta un tratamiento probabilístico de la falla de aislamiento. Ocurrencia de sobrevoltajes, comportamiento del aislamiento de la estructura, diversos parámetros que intervienen, etc.
- Finalmente en el último capítulo se describe el programa (PROBF) el cual se basa en la teoría acumulada hasta aquí. En este capítulo también se presentan en forma gráfica resultados generales y un ejemplo de aplicación del programa. En especial debo mencionar que los resultados obtenidos para el diseño del aislamiento por maniobra (número de aisladores - distancias libres) para una línea tipo a 138 KV, Zona 2 del sistema nacional, son bastante interesantes puesto que concuerdan casi exactamente con un estudio similar realizado por W.S. Price - Consultor norteamericano - para INECEL.

Se incluye cinco ANEXOS los cuales cubre: definiciones eléctricas y estadísticas utilizadas; método numérico empleado en el programa de computación; referencias sobre el cálculo del aislamiento para el sistema nacional de transmisión y finalmente listados y salidas de computación.

Debo, para terminar, dejar constancia del valioso aporte brindado por el Ing. Juan Saavedra - Director de Tesis- tanto por sus observaciones como por haberme faci-

litado toda la información de fondo para este trabajo. Agradezco así mismo al personal del Centro de Computación de la ESPOL por su colaboración durante el procesamiento de los programas que presento.

CONTENIDO

	Pág.
1. SOBREVOLTAJES EN LOS SISTEMAS DE TRANSMISION.	
1.1. INTRODUCCION	1
1.2. TIPOS DE SOBREVOLTAJES	2
1.3. SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS	5
1.4. SOBREVOLTAJES ESTABLES	10
1.5. RECHAZO DE CARGA	12
1.6. EFECTO FERRANTI	15
1.7. SOBREVOLTAJES POR FALLAS A TIERRA	17
2. SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA	
2.1. INTRODUCCION	20
2.2. CARACTERISTICAS DE LOS SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA.	21
2.3. CAUSAS PRINCIPALES DE LOS SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA.	24
2.4. CONTROL DE LOS SOBREVOLTAJES DE ENERGIZACION.	27
3. INTRODUCCION AL CALCULO DEL AISLAMIENTO	
3.1. VOLTAJE SOSTENIDO Y ALGUNAS DEFINICIONES	36
3.2. COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO RECUPERABLE HACIA ONDAS POR MANIOBRA	37
3.3. FUNCION PROBABILISTICA DE DENSIDAD APLICADA A LOS SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA.	39
3.4. FACTORES PRINCIPALES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL DIELECTRICO A ONDAS POR MANIOBRA.	40

	Pág.
3.5. FACTORES METEOROLOGICOS	41
3.6. FORMA DE ONDA Y POLARIDAD	45
3.7. FACTORES GEOMETRICOS	46
3.8. CONTAMINACION	47
3.9. PRUEBAS PARA AISLAMIENTO RECUPERABLE	48
3.10. DIELECTRICOS EN PARALELO	55
4. CALCULO DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA DE UNA ESTRUCTURA.	
4.1. INTRODUCCION	58
4.2. DETERMINACION DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA (\bar{V}) DE UNA ESTRUCTURA. METODO SIMPLIFICADO.	59
4.3. TORRES TIPO (I)	61
4.4. PROGRAMA DE COMPUTACION (CFOF) PARA EL CALCULO DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA.	69
4.5. PRINCIPALES VARIABLES UTILIZADAS	70
4.6. DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL PROGRAMA (CFOF).	72
4.7. LIMITACIONES DEL PROGRAMA	86
4.8. ESTRUCTURAS EN "Ve"	86
4.9. CALCULO DEL RIESGO DE FALLA POR UN METODO SIMPLIFICADO.	91
5. FALLA DEL AISLAMIENTO POR SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA. TRATAMIENTO PROBABILISTICO.	93
5.1. INTRODUCCION	93
5.2. PROBABILIDAD DE DESCARGA TOTAL	93

	Pág.
5.3. EFECTO DE TRUNCACION	95
5.4. LIMITES DE INTEGRACION	98
5.5. PROBABILIDAD DE DESCARGA DE UNA TORRE	98
5.6. PARAMETROS QUE INTERVIENEN Y CRITERIO PARA LA SELECCION DE LIMITES.	99
5.7. INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR Y EL COEFICIENTE DE VARIABILIDAD DE SOBREVOLTAJES.	102
5.8. INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR Y EL COEFICIENTE DE VARIABILIDAD DE DESCARGAS.	103
5.9. INFLUENCIA DEL MAXIMO SOBREVOLTAJE	103
5.10. INFLUENCIA DEL NUMERO DE TORRES	104
5.11. INFLUENCIA DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA (\bar{V}).	104
5.12. INFLUENCIA DE LA MEDIDA DE SOBREVOLTAJES (U)	105
5.13. FORMA EN QUE TRABAJA (PROBF) Y CRITERIOS GENERALES.	105
6. DESCRIPCION DEL PROGRAMA (PROBF). ANALISIS DE RESULTADOS Y APLICACION	
6.1. INTRODUCCION	108
6.2. PRINCIPALES VARIABLES QUE UTILIZA Y SU REPRESENTACION.	108
6.3. DIAGRAMA DE FLUJO SIMPLIFICADO DEL PROGRAMA (PROBF).	110

6.4. ANALISIS DE RESULTADOS EN CUANTO A LA INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES PARAMETROS EN LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA.	125
6.5. EJEMPLO DE APLICACION PARA UNA LINEA DEL SISTEMA NACIONAL.	131
6.6. USO ESPECIAL DE LA SUBROUTINA (IFCT)	136
ANEXO 1	
DEFINICION DE TERMINOS Y FENOMENOS ELECTRICOS MENCIONADOS EN ESTA TESIS.	137
ANEXO 2	
NOCIONES ESTADISTICAS IMPORTANTES	141
ANEXO 3	
METODO DE INTEGRACION ROMBERG	150
ANEXO 4	
APUNTES SOBRE LA COORDINACION DE AISLAMIENTO DEL SISTEMA NACIONAL.	159
ANEXO 5	
LISTADOS Y RESULTADOS DE COMPUTACION	162
BIBLIOGRAFIA	

1. SOBREVOLTAJES EN LOS SISTEMAS DE TRANSMISION

1.1. INTRODUCCION

Un sistema de transmisión se encuentra sujeto probabilís-
ticamente a condiciones anormales que pueden producir suspen-
siones de servicio. La buena confiabilidad del suministro
eléctrico depende de que esto ocurra sólo ocasionalmente y
para ello es fundamental que tenga un buen desempeño ante
sobrevoltajes producidos repentinamente. La ruptura del ais-
lamiento es una de las principales causas de la interrupción
del servicio.

Además de lo anterior, se entiende que en un sistema es
vital conocer los sobrevoltajes que pueden producirse, para
la adecuada protección de los equipos que de otro modo po-
drían destruirse.

Si el aislamiento del sistema debiera soportar solamen-
te los voltajes nominales -que varían solamente dentro de lí
mites estrechos- no habría problema, sin embargo, debe so-
portar una gran variedad de sobrevoltajes en forma, magni-
tud y duración.

Sintetizando el problema hasta aquí, tenemos los siguien

tes interrogantes y necesidades que satisfacer:

- Lograr definir los sobrevoltajes en forma, magnitud, frecuencia de ocurrencia, duración y los cambios que sufren al viajar desde el punto de ocurrencia hasta el equipo afectado;
- Determinar las características de Voltaje Sostenido de los diferentes tipos de aislamiento;
- Seleccionar el aislamiento adecuado para que resista los esfuerzos electromagnéticos a los que va a estar sujeto.

Es evidente que no se puede proveer aislamiento para que resista todos los sobrevoltajes que se van a presentar, se debe llegar a un compromiso económico y este es aquel cuando el costo de aumentar el aislamiento es superior a las pérdidas que se ocasionarían por suspensión de servicio y/o daño de algún tipo. El peor daño se produce cuando se perfora aislamiento sólido que no puede recuperarse; el daño mínimo es el sufrido por el aislamiento auto recuperable y en cuyo caso no siempre hay operación de disyuntores.

1.2. TIPOS DE SOBREVOLTAJES

Los sobrevoltajes en los sistemas de transmisión se pueden producir por causas: Externas e Internas.

Como causas externas podemos citar: Descargas Atmosféricas; efectos ambientales; influencia de animales, accidentes, etc. Como causas internas tenemos básicamente, la operación de disyuntores. Intentando una clasificación que permita un estudio metódico del caso que nos preocupa, los podemos clasificar de acuerdo a su duración en el tiempo.

- Sobrevoltajes Transientes
- Sobrevoltajes Estables

Dentro de los Sobrevoltajes Transientes tenemos a su vez: Sobrevoltajes por descargas atmosféricas y por maniobra. Su duración es el orden de Micro segundos y Milisegundos respectivamente.

Los sobrevoltajes Estables o de Frecuencia Industrial tienen un rango de duración del orden de los segundos. Debemos aclarar que el criterio que utilizamos al llamarlos así a estos últimos no significa que todos ellos sean fenómenos de ESTADO ESTABLE sino que utilizamos la palabra ESTABLE en comparación a fenómenos mucho más rápidos - casi instantáneos - a los que llamamos TRANSIENTES.

La coincidencia de sobrevoltajes debidos a descargas Atmosféricas y maniobra es mínima para ser analizada, no así

la ocurrencia de sobrevoltajes Estables y los de Maniobra debido a su naturaleza de origen común.

Al aumentar el nivel de voltaje de los sistemas de transmisión estos van mejorando su resistencia a sobrevoltajes de origen atmosférico, debido a que el aislamiento es mayor y a que la magnitud de los mismos depende fundamentalmente de la intensidad de la descarga, en cambio los sobrevoltajes por Maniobra son proporcionales a estos niveles de voltaje, con lo que su efecto se va agravando conforme este aumento. De lo anterior se deduce que existe un nivel, pasado el cual un fenómeno es preponderante al otro. Este nivel de voltaje está aproximadamente entre 300 y 362 KV.

Sin embargo para un estudio específico se debe analizar ambos fenómenos y ver cual es el que predomina para los estudios de aislación.

Así por ejemplo, en la planificación del Sistema Nacional de Transmisión se incluyen la construcción de 230 y 138 KV. En el diseño de la línea a 138 KV la aislación ha sido fijada por sobrevoltajes de Maniobra para las zonas de 800 a 1000 mt sobre el nivel del mar, debiéndose esto, entre otras causas a: bajo nivel isocerámico, óptimas condiciones

de resistividad del suelo de la zona; ausencia de métodos - para la limitación de los sobrevoltajes por Maniobra.

El fenómeno de contaminación ambiental también en ciertos casos puede ser determinante, por lo que no hay que perderlo de vista en el estudio de la selección del aislamiento.

La importancia de las ondas de MANIOBRA se ve acentuada por el hecho de que la fortaleza dieléctrica del aire a partir de 1 MV, no se incrementa en proporción directa con la distancia del conductor a la torre, como si lo hace en el caso de descargas atmosféricas.

1.3. SOBREVOLTAJES POR DESCARGAS ATMOSFERICAS

1.3.1. Origen del Fenómeno

Pese a que no está dicha la última palabra al respecto, mucho de lo que ocurre dentro de las nubes en los momentos de tormenta eléctrica está ya en claro. Según Simpson-Scrase, cuando las gotas de agua se rompen adquieren una carga positiva y en el proceso imparten una carga negativa al aire en rededor. Mediante balones hechos flotar durante las

tormentas eléctricas y efectuando mediciones del campo eléctrico en la superficie de la tierra debajo de las nubes han logrado obtener un razonable acercamiento a la verdadera distribución de la carga dentro de la nube.



FIG. 1.1

La Fig. 1.1 muestra la teoría de estos investigadores.

El progreso de la nube es de derecha a izquierda y las corrientes de aire están representadas por las líneas sólidas. Es un hecho que la presencia de ventarrones precediendo a una tormenta tiene mucho que ver con la distribución eléctrica interna. La gran corriente de aire ascendente provoca el rompimiento de las gotas de agua que tendían a caer, haciendo que sólo las pesadas lleguen a tierra y que las livianas junto al aire circundante negativo asciendan al tope de las nubes. A esa altura la temperatura congela las pequeñas gotas de agua, las cuales en forma de cristales y mediante un proceso de fricción comienzan a cargarse positivamente mientras que el aire circundante se hace negativo. Posteriormente los cristales negativos empiezan lentamente a descender

en lo cual vuelve a iniciar el ciclo y obtenemos la distribución final observada.

Debido a esta separación de cargas el campo eléctrico crece inmensamente (del orden de los 100 MV) produciendo las descargas atmosféricas por la ruptura del dieléctrico aire a potenciales de 10 KV/cm. En condiciones normales el valor de ruptura es de 30 KV/cm. pero disminuye por la presión atmosférica, temperatura, etc.

3.2. Acción sobre las líneas de Transmisión

Se puede producir sobrevoltajes en las líneas tanto por descarga directa sobre ellas como por descargas inducidas. Respecto a las segundas el mecanismo de producción de sobrevoltajes es así: Al pasar una nube cargada eléctricamente sobre una línea de transmisión, induce en ellas por efecto electrostático cargas eléctricas positivas, -por cuanto en la generalidad de los casos la base de la nube es negativa- que se van acumulando a lo largo de la línea. Si se produce la descarga eléctrica de la nube a un punto cercano de la línea (a un árbol por ejemplo) estas cargas positivas se liberan en forma de ondas viajeras a través de la línea produciendo los sobrevoltajes. La presencia de hilos de guardia aten-

núan el voltaje inducido inicialmente.*

1.3.3. Forma de Onda

En el gráfico 1.2 aparece la forma conocida de una onda de esta naturaleza. Se justifica debido a las propias características del rayo y del medio. Se puede considerar a la nube y a la tierra como un gigantesco condensador de platos circulares y paralelos y al rayo como un inductor.

Así en una altura $H = 1$ Km. un diámetro de los platos $D = 1$ km, un radio del inductor $r = 10$ cm. tenemos $L = 2,18$ mH.

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{D} = 6.95 \times 10^{-9} \text{ F.} \quad Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = 540$$

Si asumimos una resistencia del campo ionizado de 5000Ω que se opone al paso de la corriente, el circuito va a comportarse como un típico formado por una inductancia, un condensador y una resistencia en paralelo.

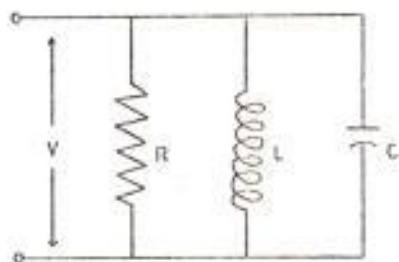
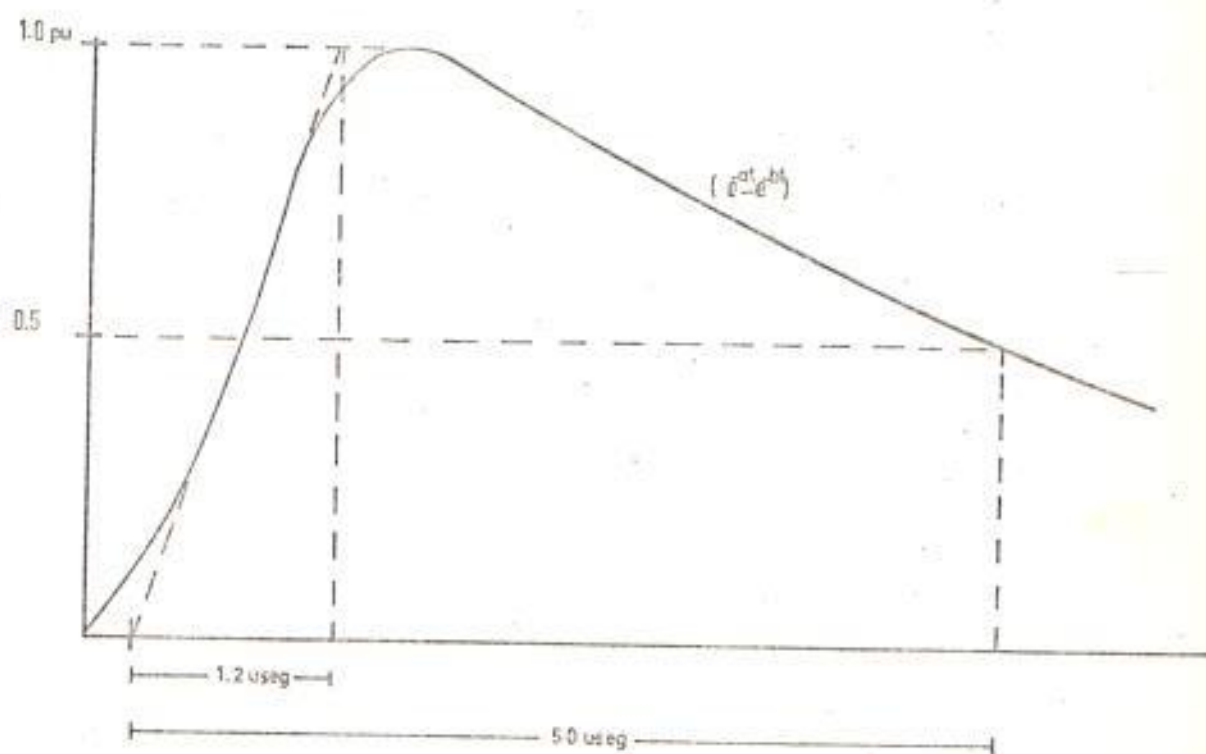


FIG. 1.3. Circuito elemental para la comprensión del fenómeno. La forma de onda de la corriente en el inductor depende de R/Z_0 .

FIG. 1.2



ONDA DE VOLTAJE DEBIDO A DESCARGAS ATMOSFERICAS

1.4. Magnitud de las descargas

Afortunadamente la mayoría de las descargas atmosféricas están dentro de un rango mediano y pequeño de K. amp. Es importante sin embargo conocer las magnitudes de las descargas atmosféricas que se esperan en una zona cualquiera y su frecuencia de ocurrencia. En general los datos estadísticos - demostrarán que la Fig. 1.4 representa un patrón general de ocurrencia. Se grafican valores sólo desde 5 K. Amp. en adelante porque valores menores no producen sobrevoltaje de cuidado.

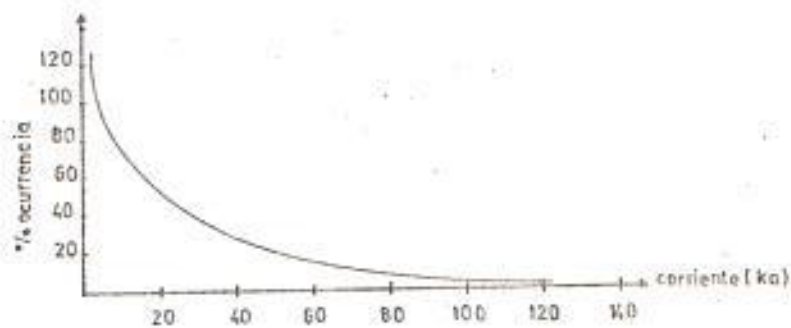


FIG. 1.4

1.4. SOBREVOLTAJES ESTABLES

El factor más importante de estos sobrevoltajes en relación a la coordinación de aislamiento, está en el hecho de que los aparatos de protección (pararrayos, tubos protectores) a colocarse no deben operar para estos niveles de voltaje. Si lo hacen corren el peligro de destruirse por la duración relativamente larga de los mismos. Por lo tanto el voltaje nominal de estos aparatos viene dado por el valor -

máximo posible de estos sobrevoltajes (considerando las probabilidades de ocurrencia pertinentes) en el punto donde van a ser colocados.

4.1. Causas que los originan

Las principales causas son:

- Pérdida brusqueda de carga
- Efecto Ferranti
- Fallas desbalanceadas que involucren tierra.

Puede ocurrir severos sobrevoltajes si se producen al mismo tiempo alguna de las causas mencionadas, por ejemplo:

Un rechazo total de carga (apertura de un disyuntor en el extremo final de un circuito) pasando de un circuito inductivo a otro capacitivo, con una falla de línea a tierra. Este rechazo total difícilmente ocurre en sistemas grandes generalmente mallados o con muchos ramales, en los cuales siempre hay carga que puede aceptar el flujo de potencia - aunque sea sólo en parte y en forma momentánea. También en líneas largas los reactores en paralelo ayudan a este fin.

Además se producen sobrevoltajes con frecuencias no muy diferentes a la de frecuencia industrial, cuando desconectamos líneas compensadas en paralelo, quedando cargas atrapadas que oscilan entre la capacitancia de la línea y las reactancias inductivas en paralelo. Finalmente conexiones y desconexiones monofásicas o conductores rotos, pueden producir sobrevoltaje de ferresonancia pero en estos y otros casos la prevención ayuda mucho en vez de invertir demasiado en aislamiento.

5. RECHAZO DE CARGA

Debemos aclarar que si bien este fenómeno se debe a una MANIOBRA de disyuntores, el hecho de que el voltaje crezca a un valor apreciable luego de un tiempo que se mide en segundos (en turbinas de vapor la velocidad crece 10% en 1 segundo y 60% en 10 segundos en turbinas hidráulicas) ha hecho que se lo incluya dentro de sobrevoltaje denominado ESTABLES.

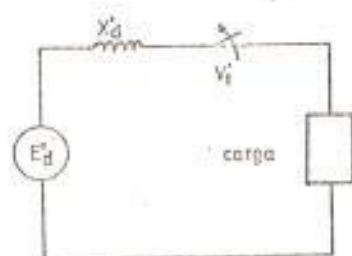
Los efectos inmediatos de este fenómeno son:

- Aumento de velocidad en los generadores y sobrevoltaje en sus terminales. En general existen dos casos típicos:
 - .- Rechazo de carga en los terminales del generador y,
 - .- Rechazo de carga en el extremo terminal.

1. Rechazo de carga en los terminales del Generador

Para el efecto presentamos el diagrama unifilar de un sistema elemental de transmisión formado por un generador y su carga. El rotor se lo asume cilíndrico (evitamos el problema de polos salientes), la resistencia de la armadura es despreciable y el único bobinado presente es el del campo principal.

El generador está tomando la carga que se presenta en la Fig. 1.5 y tiene un voltaje terminal V_t . El voltaje de excitación es E_d y está dado por la ecuación presentada.



$$E_d = V_t + jI x_d$$

$$E'_d = V_t + jI x'_d$$

- E_d = Volt. excitación
- V_t = Volt. Terminal
- E'_d = Volt. Transitorio
- x_d = Reactancia Sincrónica.
- x'_d = Reactancia transitoria.

FIG. 1.5

Si al disyuntor se lo abre repentinamente, la carga baja a cero inmediatamente. Consecuentemente la fuerza contra magneto matriz (fm m) se anula. Con el fin de que el flujo permanezca constante se produce un cambio en la corriente de campo el cual finalmente desaparece en forma exponencial y de acuerdo a la constante de tiempo del campo.

El efecto del cambio brusco de carga puede ser analizado

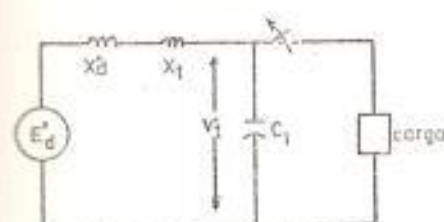
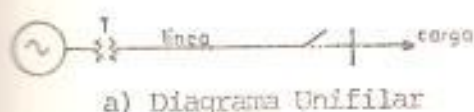
considerando que el voltaje E_d' permanece constante para un corto período de tiempo inmediatamente después del cambio súbito en las condiciones terminales. Como una consecuencia de lo anterior el voltaje en los bornes del generador en el instante siguiente a la apertura del disyuntor crece al valor E_d' .

Si no se hace nada en la excitación de la máquina el voltaje de armadura podría incrementarse conforme pasa el tiempo, alcanzando finalmente un valor de E_d , despreciando los efectos de saturación.

Si la máquina estaba operando a un factor de potencia cercano a la unidad, el incremento en el voltaje terminal cuando se pierde la carga será muy pequeño; si la carga en cambio tenía un factor de potencia muy bajo luego el brusco incremento de voltaje podría fluctuar entre 10%, 30% quizás más, dependiendo de la carga y el valor de la reactancia transiente.

1.5.2. Rechazo de carga en el extremo receptor

Consideremos el sistema presentado en la Fig. 1.6.



$$\frac{E_{d'}}{J(x_{d'} + x_t) - J x_{cl}} = \frac{V_{t1}}{-J x_{cl}}$$

$$V_t' = - \frac{E_{d'} x_{cl}}{x_{cl} - (x_{d'} + x_t)}$$

Ahora este valor es mayor que en el caso anterior.

FIG. 1.6

Como factores que afectan este sobrevoltaje tenemos:

- Longitud de la línea que pierde su carga;
- MVA de corto circuito en la barra
- Generación reactiva de la línea y,
- Compensación shunt .

1.6. EFECTO FERANTI

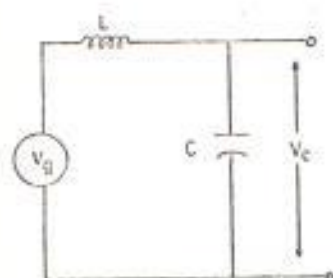


FIG. 1.7

Este es un típico sobrevoltaje de estado estable, siendo su causa la generación capacitiva de la línea. Así por ejemplo. En la Fig. 1.7, el hecho de que el condensador haga circular corriente, en adelante por la inductancia provoca que el

voltaje V_c sea mayor que V_g generado.

$$V_c = V_g - jIX_L$$

$$V_c = -jX_c I_c$$



El uso de reactores en derivación es muy empleado para la reducción de estos sobrevoltajes. Generalmente se los coloca en los terminales de la línea y debido a que reducen la corriente reactiva originada por la capacitancia de la línea, controlan los sobrevoltajes que pueden presentarse al estar operada en vacío o con carga reducida.

Evidentemente es un fenómeno que es proporcional a la longitud de la línea y según el tratamiento de ONDAS ESTACIONARIAS se llega a una fórmula que relaciona un voltaje V_2 de circuito abierto en el extremo receptor, con el voltaje V_1 de generación:

$$V_1 = V_2 \text{ Cos } \beta l$$

Siendo (β) la cte. de fase de la línea y (l) la longitud de la línea.

El hecho de incluir reactores en derivación mitiga en parte el fenómeno, lo mismo que el uso de capacitores serie.

El efecto combinado del efecto Ferranti y el rechazo de carga es muy serio.

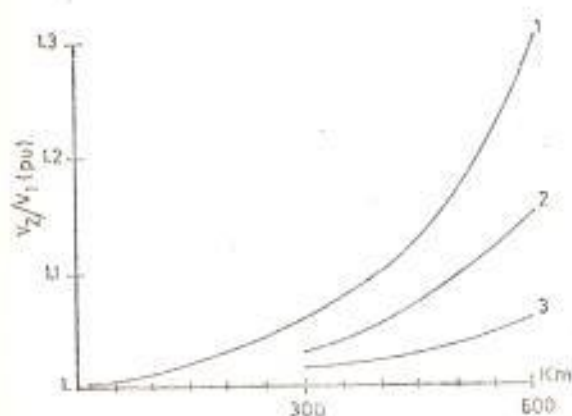


FIG. 1.8

1. Sin compensación.
2. 50% compensación capacitiva.
3. 50% compensación capacitiva serie.
70% compensación reactiva shunt.

1.7. SOBREVOLTAJES POR FALLAS A TIERRA

La falla de una línea a tierra causa un sobrevoltaje en las líneas que no han sido afectadas. El valor del mismo depende en gran medida del tipo de puesta a tierra existente. Para sistemas con neutro aislado o que utilizan bobinas de supresión (Peterson Coils) el sobrevoltaje presentado de L-T puede exceder al valor nominal de Línea a Línea; en sistemas solidamente puestas a tierra el voltaje se incrementa pero sin exceder un valor de 0.8 el voltaje nominal. En general los sobrevoltajes son menores para una falla 2L-T que para el caso simple L-T.

Una medida del incremento de voltaje producido por una falla de L-T es el llamado Factor de Falla a tierra definido como el cociente entre el mayor sobrevoltaje en las líneas no afectadas, para el voltaje L-T en el punto en condiciones normales.

Un factor menor de 1.4 es característico de un Sistema solidamente puesto a tierra en el cual se cumple además que

$$\frac{x_0}{x_1} < 3.0 \text{ y } \frac{R_0}{R_1} < 1.0 \text{ siendo:}$$

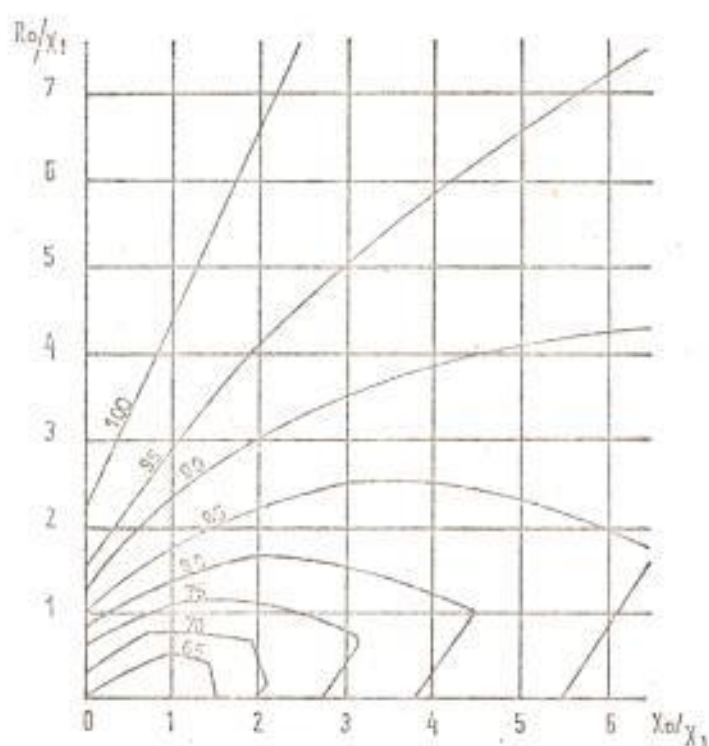
R_0 = Resistencia de secuencia cero

x_0 = Reactancia de secuencia cero

x_1 = Reactancia de secuencia positiva

R_1 = Resistencia de secuencia positiva.

FIG. 1.9



VOLT. MAXIMO LINEA A TIERRA PARA CUALQUIER LOCALIZACION Y TIPO DE FALLA PARA UN SISTEMA CON NEUTRO A TIERRA
 LOS NUMEROS EN LAS CURVAS SON EL PORCENTAJE DEL VOLTAJE DE LINEA

$$R_1=R_2=0.1 X_1 \quad X_1=X_2$$

R_0 = RESISTENCIA DE SECUENCIA CERO

X_0, X_1, X_2 = REACTANCIAS DE SECUENCIA

CERO POSITIVA Y NEGATIVA

2. SOBREVOLTAJES DE MANIOBRA

2.1. INTRODUCCION

Son el punto central del presente trabajo debido a la gran importancia que tienen en la selección del aislamiento de una línea de transmisión, sobretodo para niveles de voltaje en el campo llamado extra alto (ehv), que va aproximadamente desde los 230 hasta los 765 KV. La reducción de los sobrevoltajes por maniobra es entonces una necesidad económica.

En nuestro país recién con el sistema nacional interconectado se llegarán a niveles de voltaje considerable 138 y 230 KV, en los cuales este fenómeno ya es importante. Así vemos como en los estudios de la coordinación de aislamiento de las líneas que conforman el Sistema Nacional interconectado -realizados por W.S. Price y el final del Dpto. Técnico de INECEL-, el criterio de sobrevoltaje por maniobra si bien no es determinante para la selección del número de aisladores de las líneas y por ende en el dimensionamiento de las torres, si se acerca mucho a las limitaciones determinadas por descargas atmosféricas e inclusive los iguala para 138 KV en zona 1.

En países adelantados donde el ehv ha sido alcanzado hace muchos años se ha desarrollado mucha investigación al respecto. El diseño de disyuntores ha sufrido cambios: en un comienzo la preocupación estaba en los procesos de desconexión de circuitos; luego, los mayores sobrevoltajes ocurrían en las conexiones de líneas ehv y los disyuntores fueron diseñados y construídos para resistir estos sobrevoltajes. En el futuro se supone que los sobrevoltajes transientes que acompañan a los cortocircuitos van a ser el siguiente riesgo a superar.

Así mismo, el hecho de ir controlando poco a poco los sobrevoltajes por maniobra traerá nuevamente a un primer plano en esos países los problemas por descargas atmosféricas lo mismo que los sobrevoltajes producidos por la contaminación de los aisladores.

2.2. CARACTERISTICAS DE LOS SOBREVOLTAJES POR MANIOBRA

Las ondas de maniobra tienen una gran variedad de forma, magnitud y duración, dependiendo del tipo y condiciones del evento que las produjo.

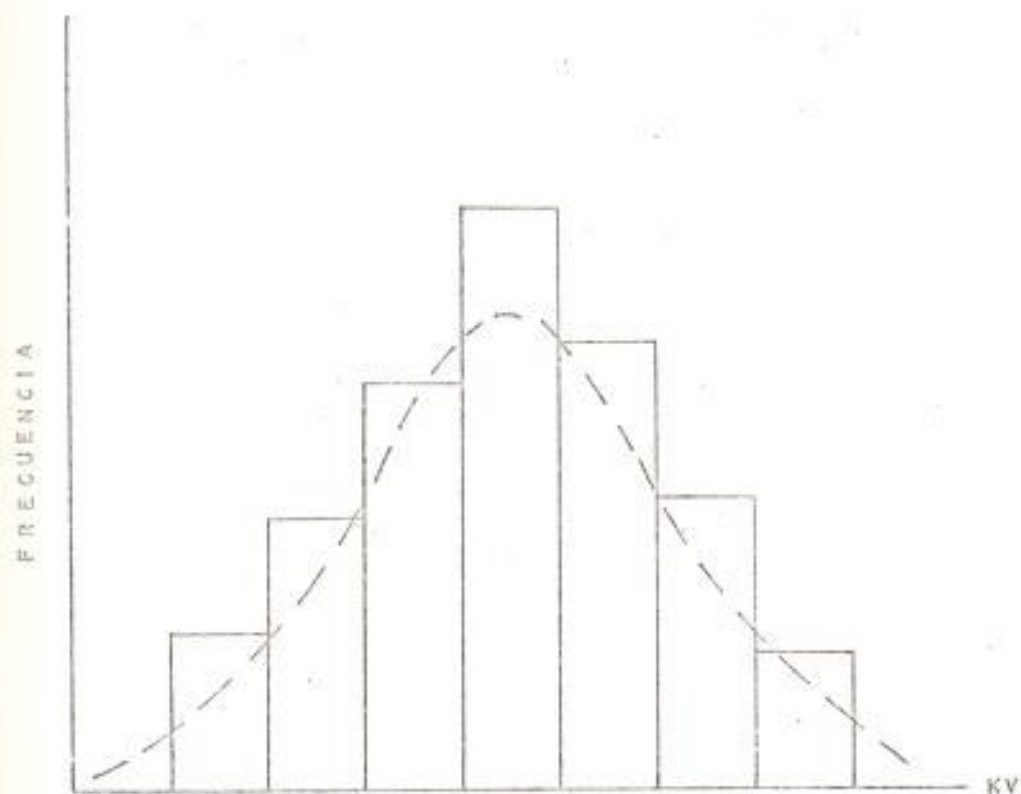
Para un tipo particular de eventos (por ej. desconexión de una línea) sus parámetros están determinados por las ca-

racterísticas tanto del sistema como de los aparatos de maniobra.

La forma es realmente muy irregular pero se la representa típicamente similar en una manera que aparece en la Fig. 1.2 de descargas atmosféricas. Además las ondas pueden estar superpuestas a los voltajes temporales de frecuencia industrial. Las ondas con frentes de onda (100 - 300 μ seg) producen menores sobrevoltajes que aquellos con frentes de onda de (1000 - 1500 μ seg). Las primeras son las comunes y se deben a maniobras en alta tensión mientras que las otras son por maniobras en el lado de baja del transformador.

La magnitud depende del punto de la onda del voltaje y/o corriente cuando ocurre el fenómeno. Las condiciones bajo las cuales se producen los peores sobrevoltajes son raras - siendo necesario entonces el estudio probabilístico de su ocurrencia, las curvas que lo hacen se denominan curvas de distribución de frecuencia o simplemente curvas de frecuencia.

FIG. 2.1



TIPICA RECOPIACION DE DATOS Y CURVA GAUSSIANA ACOPLADA

2.3. CAUSAS PRINCIPALES DE LOS SOBREVOLTAJES

Uno de los eventos que mayores sobrevoltajes provoca es la interrupción brusca de corriente inductiva antes de que pase por un cero natural. Probabilísticamente ocurre más con corrientes pequeñas, tales como corrientes de magnetización de transformadores o reactores shunt. La energía involucrada es pequeña para poder ser absorbida por los limitadores de sobretensión normalmente colocados cerca de transformadores importantes. El uso de resistencia en paralelo en la maniobra reduce su peligrosidad.

La interrupción de corriente capacitiva ya sea de corrientes de carga de bancos de condensadores o corrientes de acumulación de líneas de transmisión largas pueden originar un gran incremento de voltaje si en los disyuntores vuelve a saltar el arco en un punto desfavorable de la onda de voltaje. Los disyuntores modernos están probabilísticamente libres de este fenómeno por lo cual esta causa de sobrevoltaje es mínima.

Las operaciones de maniobra más importantes en lo que respecta a sistemas de ehv pueden sintetizarse en:

- Energización de líneas estando abiertas en su extremo final o conectadas a un transformador sin carga;

- Re-energización con carga atrapada en la línea debido a una previa interrupción.
- Maniobra de transformadores sin carga o con carga secundaria de reactores en paralelo.
- Maniobra de reactores en alto voltaje.

3.1. Energización de líneas

La magnitud y forma de estos transientes depende de muchos factores, tales como: Longitud de la línea (impedancia característica; atenuación; capacidad de la línea), carga atrapada, configuración del sistema (impedancia característica, acoplamiento magnético, atenuación), características de la fuente, etc.

El caso típico es energización de una línea de transmisión monofásica desde una barra infinita; supongamos que la energización se produce para un valor de generación de $V \cos \phi$ que instantáneamente recorre la línea como una onda viajera a una velocidad próxima a la de la luz y de magnitud $V \cos \phi$. Si la línea está abierta en su extremo final, la onda de voltaje se duplica en valor y la onda de corriente se anula (onda de corriente igual a la de voltaje sólo que de magnitud V/Z_0). La siguiente reflexión de la onda de voltaje en el extremo emisor tiene un factor de reflexión de -1. El volta-

je en el extremo receptor está por lo tanto compuesto de una superposición de ondas alternadas en polaridad, de impulsos instantáneos de $2V \cos \phi$ y cada una retrasada de la otra en un tiempo $2T$, siendo T el tiempo que se demora en viajar una onda de un extremo a otro.

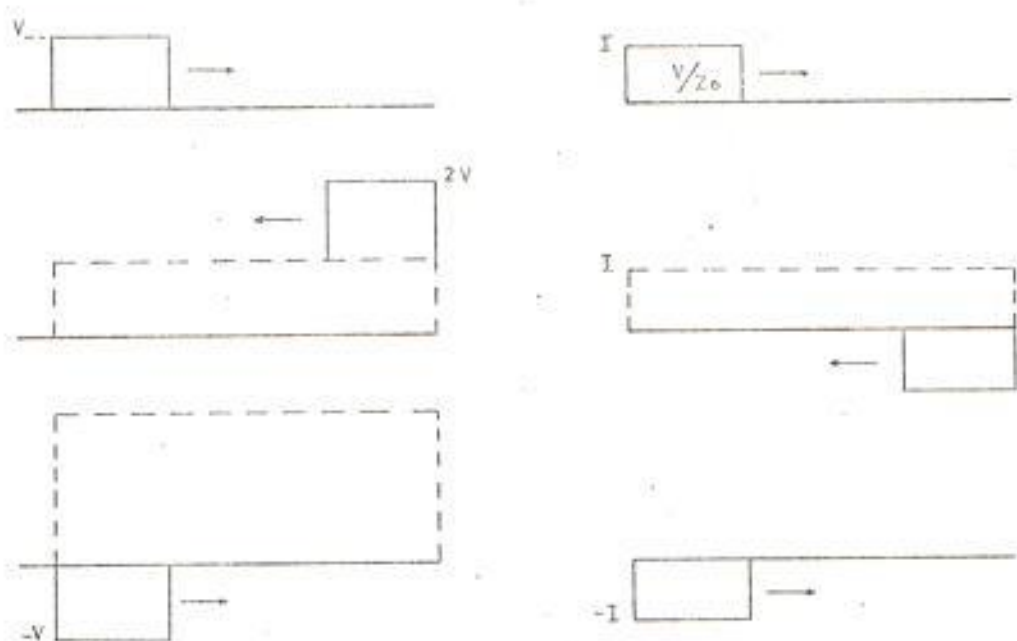


FIG.2.2. REFLEXION DE ONDAS (Sucesos instantáneos y sin amortiguación)

La magnitud del voltaje o corriente en un punto cualquiera (x), luego de un tiempo (t) se puede determinar fácilmente mediante el diagrama de Lattice .

3.2. Energización con cargas atrapadas

Si hemos desconectado una línea momentáneamente (por la presencia de una falla, un error, etc.) se debe tener presente que se puede haber quedado cargada por su capacidad a tierra (efecto Ferranti que inclusive puede provocar que el voltaje terminal remanente sea mayor al de la fuente). Al volver a conectar la línea que no alcanzó a descargarse (la descarga de una línea se realiza fundamentalmente en forma de corrientes de fuga a través de los aisladores, pudiendo demorarse hasta algunos minutos si las condiciones atmosféricas -como un tiempo seco- lo favorecen) se producen grandes sobrevoltajes.

Por ej. si la línea en el momento de volver a conectar tiene un $V_T = 1 \text{ pu}$ y la fuente $V_G = -1 \text{ pu}$ se produce una onda de magnitud 2 pu que se duplica en el extremo abierto provocando un sobrevoltaje de $+ 3 \text{ pu}$.

Los valores típicos de sobrevoltaje de este tipo son para energización de líneas abiertas 2.0 pu sin carga atrapada y 4.5 pu con carga.

2.4. CONTROL DE VOLTAJES DE ENERGIZACION

Las medidas para el control y la reducción de los sobre

voltajes de maniobra se basan en la forma estudiada de producción del fenómeno. Estos son:

- Energización por pasos, mediante el empleo de resistencias de preinserción.
- Conexión controlada de los disyuntores.
- Drenaje de la carga atrapada antes de reconectar.
- Uso de reactores en derivación.
- Limitación de las ondas de maniobra mediante limitadores de sobretensión (pararrayos, tubos protectores).

Detallaremos a continuación algunos de los métodos anteriores.

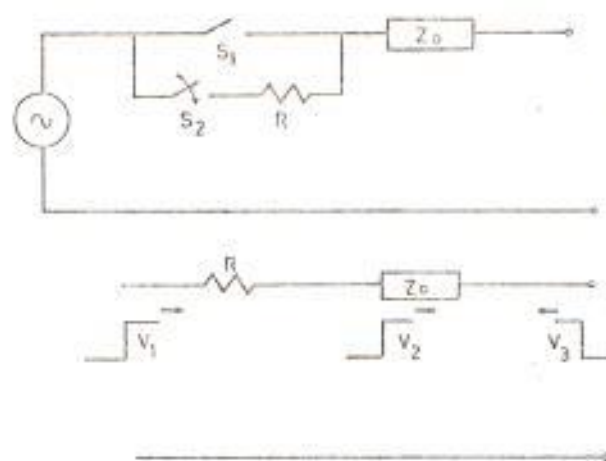
4.1. Resistencias de Preinserción

La manera más común de reducir los transientes de energización es la de conectar una o varias resistencias en serie en el primer momento y luego cortocircuitarlas.

La impedancia de la fuente es pequeña en comparación a la resistencia y puede despreciarse.

Viéndolo bajo el análisis de ondas viajeras se cumple la secuencia descrita ya anteriormente, pero con la sustancial diferencia que la onda cuando regresa del extremo

receptor (V_3) se amortigua mucho en su valor debido a R .



Z_0 = impedancia caract.

$$V_2 = b_1 V_1 = \left(\frac{2 Z_0}{R + Z_0} \right) V_1$$

$$V_3 = a_1 V_2 = 2 b_1 V_1$$

Si: $R = Z_0$, $V_1 = 1$ p.u.

$$V_2 = 1 \text{ p.u.} \quad V_3 = 2 \text{ p.u.}$$

FIG. 2.3

En la segunda etapa cuando R es cortocircuitada, una onda impulso de voltaje igual en magnitud a la caída de voltaje, a través de la resistencia, entra a la línea. Si se la cortocircuita antes de que la onda retorne y se amortigue en ella, el sobrevoltaje producido será el mismo el existente sin usar resistencia (siempre que como en el ej. $R = Z_0$). Un tiempo usual de preinserción dentro del circuito es de 7 mseg. a 50 Hz, correspondiente aproximadamente a 120° eléctricos que permite dos viajes de retorno de la onda en una línea de 500 Km. de longitud.

$$t = \frac{e}{V} = \frac{500 \text{ km}}{300 \times 10^3 \frac{\text{km}}{\text{seg.}}} = 1.66 \text{ mseg} \times 4 = 7 \text{ mseg.}$$

V = velocidad de la luz

Mientras mayor sea la resistencia, menor será el sobrevoltaje de la primera etapa (inserción) pero mayor el sobre

voltaje de la segunda etapa (retiro de la resistencia).

Según esto existe una relación óptima R/Z_0 que produce los menores sobrevoltajes. La reducción del sobrevoltaje y la relación óptima de R/Z_0 , varían con la longitud de la línea, la frecuencia y la configuración del sistema.

El hecho de que se debe cortocircuitar se debe a que los valores necesarios de resistencias son lo suficientemente altos como para producir pérdidas Joule si se los dejara en servicio continuo. En la práctica esta técnica reduce los sobrevoltajes línea a línea a 2.5 y 2 pu con carga atrapada y sin ella respectivamente.

La conexión de líneas mediante el cierre de disyuntores en el lado de baja de un transformador produce también los mismos sobrevoltajes en el extremo receptor si es que $R \approx Z_0$ referida.

Los tiempos de inserción se escogen regularmente entre 6 y 10 mseg. Mientras más tiempo dure la inserción es mejor eléctricamente puesto que entramos a estado estable, pero los disyuntores tienen limitaciones térmicas que deben tenerse en consideración. (Ver anexo 1, voltaje ultra al-

to).

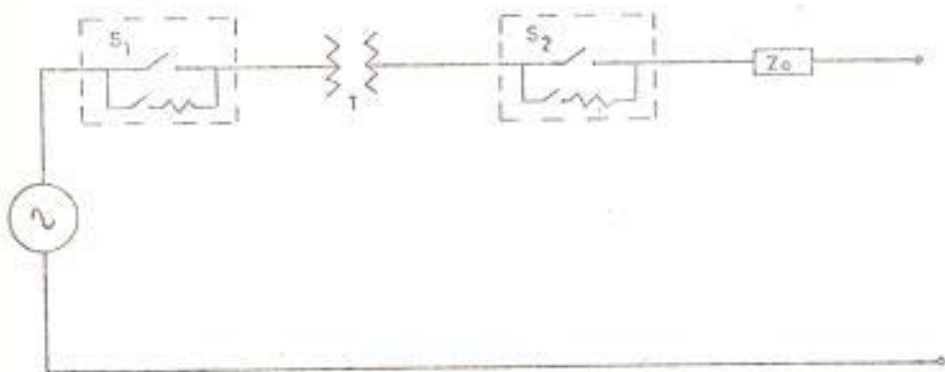


FIG. 2.4. MANIOBRA EN BAJA TENSION

Para sistemas en los niveles de UHV se han diseñado disyuntores con resistencias múltiples de pre-inserción, puesto que en esos niveles de voltaje no son permitidos los sobrevoltajes producidos en la técnica de una sola resistencia de inserción.

4.2. Control de Fase en la Maniobra

La solución ideal es evidentemente eliminar el impulso de voltaje aplicado a la línea al momento del cierre. Para ello es necesario un control fino de los disyuntores lo que es difícil de mantener en todas las condiciones del tiempo y am-

bientales a que están sujetos, además de que los fenómenos aleatorios de reignición del arco también impiden este exacto control. Sin embargo un control de fase regular y una técnica de pre-inserción adecuada reducen los sobrevoltajes a una máxima de 1.5 pu.

En un circuito trifásico en el cual los tres contactos se cierran simultáneamente tendremos los mismos sobrevoltajes L-T que para el caso monofásico. Sin embargo el cierre instantáneo casi nunca ocurre, debido a que siempre hay un pequeño retraso (ms) en el cierre debido a diferentes características internas de los disyuntores y porque los circuitos tienen pequeños desbalances debidos a corrientes a tierra. Además el acoplamiento mutuo influye en la producción de complicadas ondas de voltaje.

En general los sobrevoltajes en circuitos trifásicos son mayores a aquellos en circuitos monofásicos y especialmente son función de la diferencia del tiempo de cierre del primero al último contacto. Para líneas abiertas son menores para menor diferencia en el tiempo de cierre, pero para terminaciones con transformador la relación no es muy clara, la presencia de devanados en detla por ej. afecta el acoplamiento

entre fases. Una diferencia de 3 mseg. entre el cierre del primero al último contacto es considerado bueno desde el punto de vista del diseño de un disyuntor. (Ver gráfico 2.5).

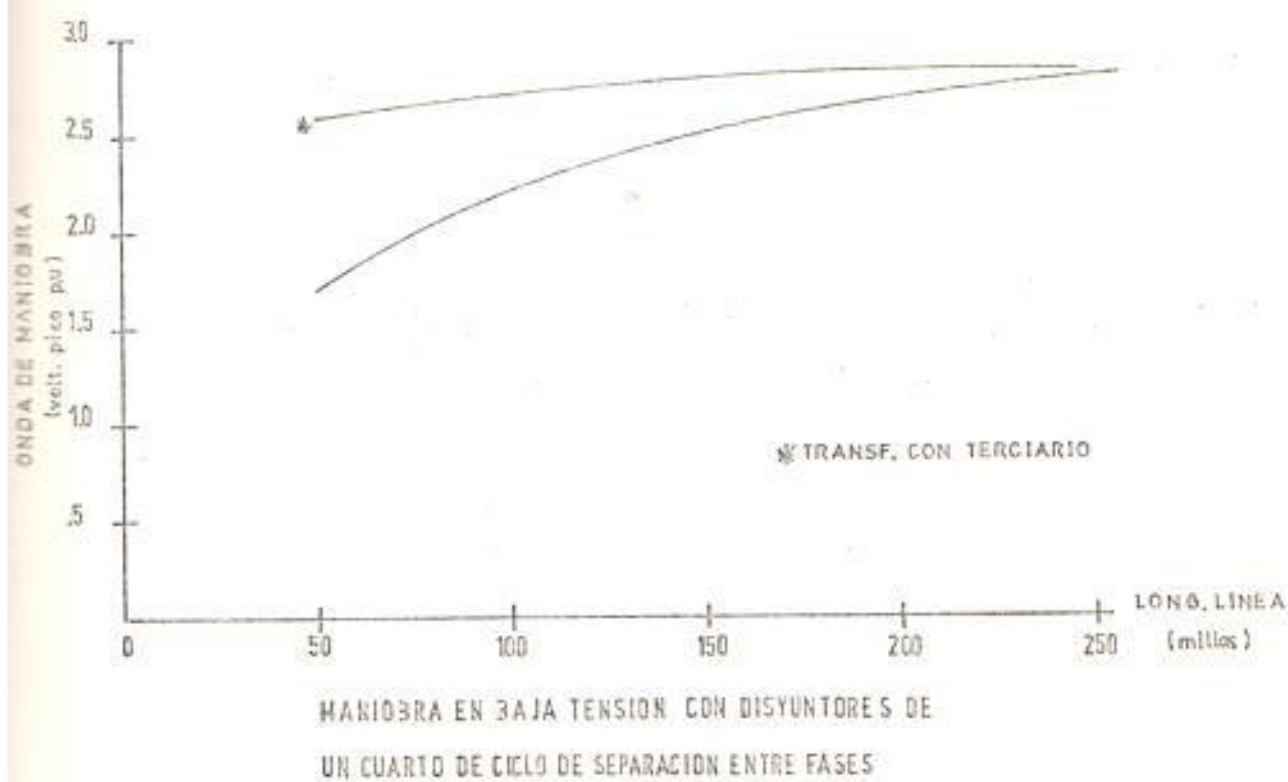
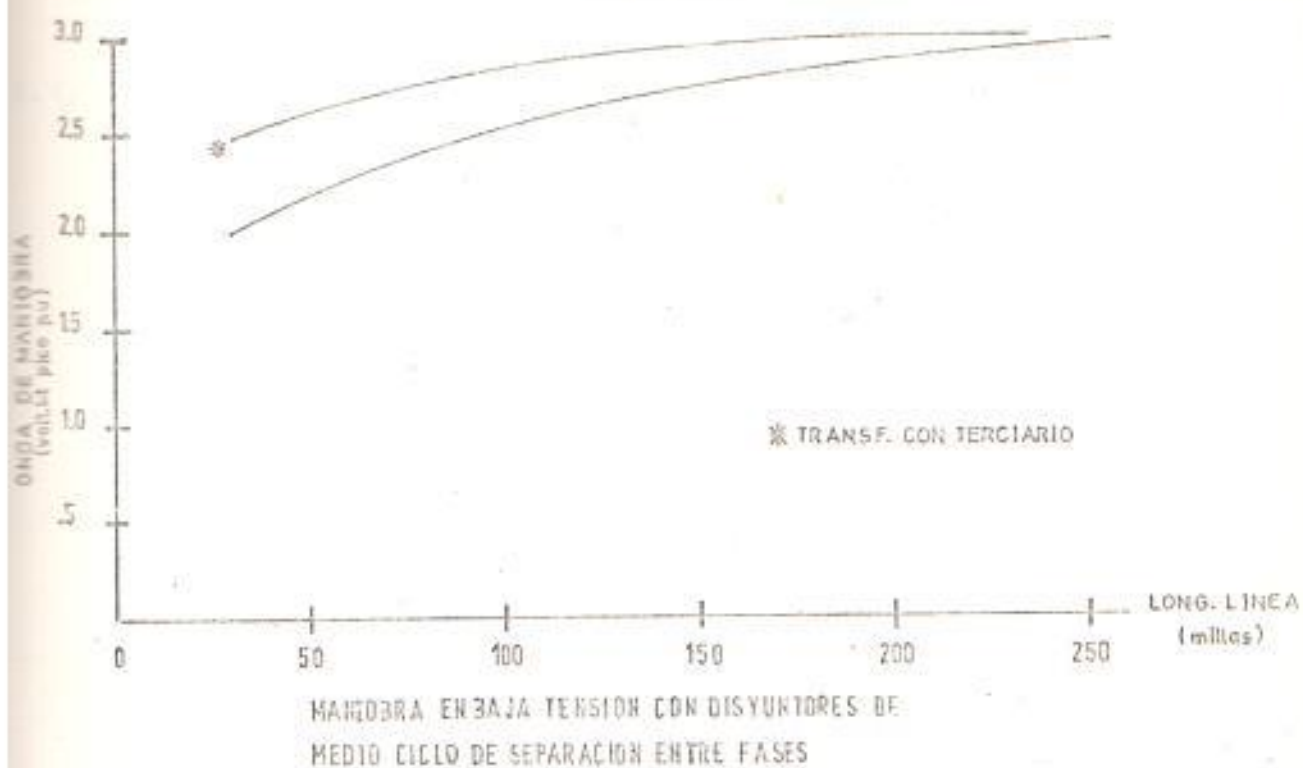
4.3 Reactores en Derivación

Los reactores se usan frecuentemente en líneas de sistemas EHV debido a su papel en fenómenos de estado estable, tal como el efecto Ferranti discutido con anterioridad.

Su papel en la reducción de los sobrevoltajes de maniobra es fundamentalmente indirecto por medio de la reducción de los sobrevoltajes temporales. Un recierre durante un sobrevoltaje temporal produciría grandes sobrevoltajes de maniobra, de aquí su importancia. En general comparando una línea sin compensación y otra con reactores se encuentra que esta última se comporta mejor se producen menores sobrevoltajes en operaciones de cierre, recierre, apertura de fases falladas, etc.

Además se suelen insertar temporalmente resistencias en serie con los reactores para que amortiguen más las ondas. Con valores óptimos de resistencias se pueden limitar los sobrevoltajes de recierre y cierre a 2 y 1.5 pu respectivamente.

FIG. 2.5



4.4. DRENAJE DE CARGAS ATRAPADAS

La remoción efectiva de cargas atrapadas reduce la magnitud de los sobrevoltajes de re-cierre a los niveles de voltaje de energización.

Técnicas similares a los de pre-inserción pero que consisten en conectar una(s) resistencias al momento de abrir el circuito hacen que se reduzca la carga atrapada. En este caso la reducción depende del valor de la resistencia, longitud de la línea y el tiempo que está en el circuito. En un ambiente húmedo las corrientes de fuga de los aisladores también ayudan.

3. INTRODUCCION AL CALCULO DEL AISLAMIENTO

1. VOLTAJE SOSTENIDO Y ALGUNAS DEFINICIONES

Antes de entrar a la coordinación de aislamiento en sí, es necesario tener claros una serie de conceptos, al mismo tiempo que conocer ciertos datos y principios estadísticos fundamentales.

El voltaje SOSTENIDO podría ser definido en primera instancia, como el voltaje pasado el cual se produce con 100% de probabilidad la falla del aislamiento y justo antes de el así mismo hay la certeza de que el aislamiento resistirá (Ver anexo 1, Falla de Aislamiento). Según este criterio, si igualmente se conociera con absoluta seguridad el máximo sobrevoltaje, bastaría con hacer que el voltaje sostenido sea un tanto mayor al anterior y así nuestro problema de cálculo de aislamiento estaría en buena parte solucionado. Sin embargo ninguno de los dos voltajes están para cada caso perfectamente definidos, siendo necesario entonces entrar a un tratamiento estadístico del problema.

El voltaje SOSTENIDO está propiamente definido entonces como el voltaje al cual la probabilidad de una descarga es

muy pequeña; el voltaje al que justamente se produce la descarga se denomina voltaje DISRUPTIVO. Combinando este criterio con la concepción también estadística de DISTRIBUCION - DE SOBREVOLTAJES, se llega a un tratamiento total estadístico del fenómeno de falla del aislamiento.

Los resultados que se obtienen se expresan generalmente como: probabilidad de falla o número probable de descargas en un período.

El tratamiento difiere según se trate de aislamiento recuperable o no recuperable. El primero como su nombre lo indica se refiere al aislamiento que puede sufrir muchas descargas, al cabo de los cuales siempre recobra su característica original (aisladores, limitadores de sobretensiones, - etc.), se les puede hacer por lo tanto muchas pruebas con el objeto de recopilar información estadística.

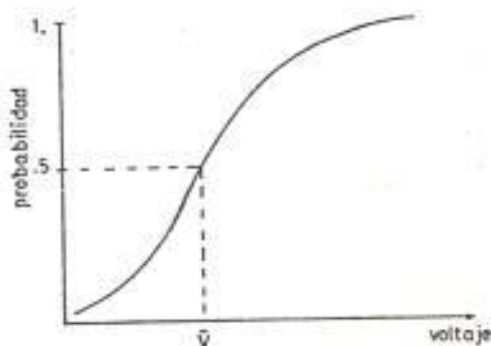
3.2. COMPORTAMIENTO DEL AISLAMIENTO RECUPERABLE HACIA ONDAS POR MANIOBRA.

Aplicando impulsos de voltaje se puede determinar una característica de descarga para cada aislamiento. Las ondas de impulso se las hace variar de magnitud, pero conservando su

forma y polaridad. Por ejemplo, podemos aplicar 30 impulsos de voltaje para un nivel (x) de voltaje; el número de descargas para cada nivel dividido por el número de impulsos aplicados nos dá la probabilidad (p) de descarga en ese aislamiento para cada nivel de voltaje. Mientras mayor sea el número de pruebas, mayor exactitud tendrá la probabilidad calculada.

Si la probabilidad de descarga (p) la graficamos en relación al voltaje nos resulta una curva de distribución de frecuencia NORMAL. (Ver anexo 2).

FIG. 3.1
Distribución Normal
acumulativa



El punto 0.5 define al voltaje llamado \bar{V} o voltaje crítico de descarga. La probabilidad de descarga para cualquier voltaje (V) puede ser representada por la ecuación:

$$P = \int_{-\infty}^Z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} z^2} dz \quad (3.1)$$

En donde la variable (V) ha sido reemplazada por la va

riable normalizada (Ver anexo 2). La desviación estandar en nuestro caso mide la dispersión de las observaciones (V) alrededor de la media \bar{V} . El coeficiente de variabilidad es aquí σ/\bar{V} (llamado también desviación estandar por unidad). Conocidas la media y la desviación estandar se puede determinar para cualquier voltaje la probabilidad de falla.

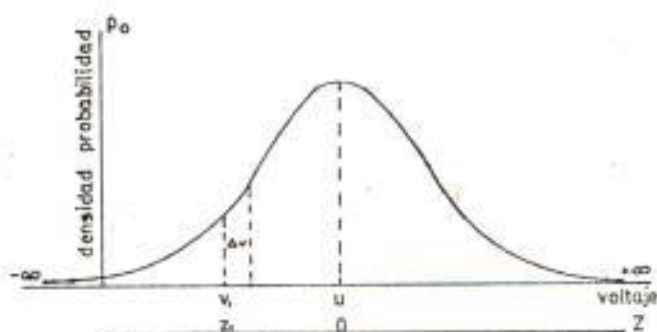
Suele definirse también al voltaje de SOSTENIDO como el CFO-2 o 3 desviaciones estandar.

3. LA FUNCION PROBABILISTICA DE DENSIDAD APLICADA A LOS SOBREVOLTAJES POR MANIOBRAS.

La ocurrencia de sobrevoltaje por maniobra puede representarse por curvas de distribución de frecuencia que se aproximan mucho a la distribución normal. Los conceptos estadísticos vistos hasta aquí y aplicados al voltaje SOSTENIDO pueden aplicarse directamente también a la definición de sobrevoltajes máximos posibles en un sistema de transmisión. Definimos la función probabilística de densidad entonces como:

$$p_o = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}z^2} \quad (3.2)$$

que es la derivada de la ecuación (3.1)



u = Media de sobrevoltajes
 Z = Variable normalizada.

FIG. 3.2

La probabilidad de que la función (V) tenga valores entre V_1 y $V_1 + dV$ está dada por $(p_0 \cdot dZ)$. Integrando desde $-\infty$ a Z_1 bajo la curva de (p_0) obtenemos la probabilidad de que la función (V) tenga valores de por lo menos $V(Z_1)$. El integral de $-\infty$ a $+\infty$ si todos los valores de (V) han sido considerados es, naturalmente 1. (Ver anexo 2).

3.4. FACTORES QUE INFLUYEN EN LA RESISTENCIA DEL DIELECTRICO A ONDAS DE MANIOBRA.

La fortaleza del dieléctrico de una línea de transmisión es desafortunadamente una función estadística. Su resistencia se ve afectada por una serie de factores de naturaleza externa o interna que hacen que la resistencia sea diferente inclusive de una onda a otra.

Los principales factores a los que nos referimos son:

- Factores meteorológicos;
- Factores geométricos

- Contaminación
- Forma de onda y polaridad

5. FACTORES METEOROLOGICOS

Dentro de estos factores debemos señalar los siguientes:

1. Lluvia

Reduce la resistencia de aislamiento de las cadenas de aisladores y también reduce aunque en grado menor, la resistencia de los dieléctricos de aire. De procesos experimentales se ha concluido que las ondas de polaridad positiva dan a la mayoría de los casos los menores valores de resistencia del aislamiento para cualquier dieléctrico o configuración de aislador. La lluvia sin embargo puede reducir la resistencia a ondas negativas tanto como en un 25% con lo cual se llega a niveles inferiores a los de ondas positivas.

Esto último casi exclusivamente para cadenas verticales en los cuales la lluvia cae sobre ellas como en cascada. La conductividad del agua es muy importante porque estaríamos en cierto caso practicamente cortocircuitando la cadena.*

* Por esto es que como práctica se recomienda colocar los aisladores con cierta inclinación para que así la lluvia, al contrario favorezca nuestro aislamiento al lavar totalmente la superficie del aislador.

Pero en general para ratas medias y altas de lluvia como es de 0.2 plg. por minuto la resistencia del aislamiento se reduce en un 5%. A falta de información se puede asumir que la disminución es una función lineal de la rata de lluvia.

5.2. Viento

La mayoría del tiempo no causa reducción de la resistencia del aislamiento de la línea. Esto es resultado de la práctica usual de dejar suficientes márgenes de aire de modo que la cadena de aisladores tendría que moverse a ángulos extremos antes que la resistencia el dieléctrico aire sea menor a la de la cadena misma.

5.3. Humedad

El valor del voltaje disruptivo para dieléctricos de aire y de aisladores depende de la humedad del aire. Se puede describir el contenido de humedad como gramos de agua por metro cúbico de aire, o también como presión de vapor en pulgadas de mercurio. El valor estandard a 25°C y 760 mm Hg es de 15 gr/mt³.

Mientras mayor el número de moléculas de agua en el aire, mayor es la probabilidad de captura de electrones libres

que podrían iniciar una descarga a través del aislador. Hasta cierto límite la humedad es beneficiosa pero cuando se comienzan a depositar partículas de agua por condensación - sobre una cadena de aisladores, esto reduce rápidamente la resistencia del aislante.

5.4. Densidad relativa al aire

El voltaje de descarga es función directa de la densidad del aire. Esto se debe a que al incrementar su densidad se dificulta el camino para las partículas cargadas.

En función de la presión barométrica estándar (B) y de la temperatura en grados Fahrenheit (T) se determina la densidad relativa del aire (RAD) para cualquier condición, como:

$$RAD = \frac{17.93}{460 + T^{\circ}} \quad \begin{array}{l} \text{(en pulg. de Hg)} \\ \text{(en grados F)} \end{array} \quad (3.3)$$

El voltaje de descarga (V) para cualquier condición:

$$V = V_{RAD} \times RAD \quad \text{donde } V_{RAD} = \text{Voltaje descarga para } RAD = 1$$

Además la influencia del RAD varía según la longitud del dieléctrico de acuerdo a un coeficiente (n). Este factor de corrección es el mismo para condiciones húmedas o secas y pa

ra dieléctricos de aire o cadenas de aisladores.

El efecto de la densidad del aire decrece con el incremento de la longitud del dieléctrico (que es similar a hablar de mayores voltajes) y en una mayor cercanía a planos de tierra.

5. Efecto combinado del RDA y de la Humedad

La ecuación del voltaje de descarga para el efecto combinado es:

$$V = \frac{V_{RAD} \times (RAD)^n}{H} \quad (3.4)$$

donde:

V_{RAD} = voltaje descarga cond. estándar

H = Factor de corrección por humedad

RAD = Densidad relativa del aire.

n = Factor función longitud del dieléctrico.

A medida que la humedad aumenta, aumenta el voltaje de descarga (H es un factor de corrección definido en función inversa al aumento de humedad), pero normalmente al mismo tiempo disminuye la densidad relativa del aire con lo cual el efecto combinado de ambos factores ambientales tiende a compensarse.

3.6. FORMA DE ONDA Y POLARIDAD

Las formas de onda son prácticamente infinitas en variedad y tienen una influencia decisiva en la resistencia del dieléctrico.

El patrón general de las ondas observadas es del tipo de las producidas por descargas atmosféricas pero con parámetros diferentes: 100-500 useg de tiempo de frente de onda (o tiempo de cresta) y un tiempo de valor medio de 2000-3000 useg.

En cuanto a la polaridad, la falta del aislamiento está dominada por los eventos positivos en los cuales se forman más fácilmente los flujos de corriente. Cuando el electrodo superior es positivo (la línea la consideramos un electrodo explicado posteriormente en PRUEBAS), se aumenta el gradiente de potencial en los extremos de los flujos debido a la acción del otro electrodo (tierra) cargado negativamente.

Mientras más cerca se mueve el plano de tierra hacia la línea, más fácil es que se produzca la descarga.

Al revés para el caso del electrodo superior negativo (línea), los flujos por polaridad positiva tienden a formar

se en tierra, con un potencial mucho más débil. El efecto de acercar el plano de tierra en este caso ejerce sólo una pequeña influencia sobre el voltaje de descarga y esta influencia es contraria al caso anterior, esto es, que hace aumentar el valor del voltaje de descarga.

Del análisis de la figura 3.5 se desprende esquemáticamente la siguiente tabla:

Caso (+)	$D = \text{cte}$	(H) tiende a cero	(V) disminuye
(-)	$D = \text{cte}$	(H) tiende a cero	(V) aumenta
(+)	$H/D = \text{cte}$	(D) tiende a cero	(V) disminuye
(-)	$H/D = \text{cte}$	(D) tiende a cero	(V) aumenta

3.7. FACTORES GEOMETRICOS

Sí el electrodo línea es no uniforme, la presencia de grandes planos de potencial de tierra es particularmente dañina, causando pronunciadas reducciones en la fortaleza del aislamiento para ondas de polaridad positiva. Por esta razón el tamaño físico de la torre puede influir adversamente en la característica de su aislamiento, particularmente cuando la torre se aproxima al nivel potencial de tierra (torre con una buena puesta a tierra). Como una conclusión de lo

Último, las torres más livianas tienen una fortaleza de aislamiento Mayor que las torres más pesadas, para un mismo espaciamiento de dieléctrico.

Los anillos protectores corona (corona shields) y los conductores en haces (bundle) reducen la resistencia del aislador. Los anillos de corona reducen en un 10% el (\bar{V}) para cadenas verticales y en un 5% para configuraciones en V_e , estas reducciones se deben a que acortan la distancia libre de conductor a torre.

Dentro de este mismo fenómeno de proximidad, se debe anotar que la altura a la que se cuelga la cadena, también tiene una pequeña influencia en el (\bar{V}) . Una mayor altura de colgado dá un mayor (\bar{V}) , pero se limita debido a las distancias mínimas de conductor a tierra que hay que respetar. (Ver gráficos 3.3, 3.7, 3.8)

3.8. CONTAMINACION

Una gran variedad de agentes la causan: carbón, polvo de cemento, ceniza, ambiente salino, fertilizantes, etc.

Hasta recientemente la influencia de la contaminación en la resistencia del aislamiento a ONDAS POR MANIOBRA no era

bien conocida. Se han logrado conclusiones en lo suficiente como para formar BANDAS SECAS (Ver anexo 1) necesarios para comenzar el fenómeno de centelleo que generalmente precede a una descarga en una cadena de aisladores.

Investigaciones recientes de Udo y Johnson demuestran - que la resistencia a ondas de maniobra se reduce cuando el contaminante está mojado. Udo concluye que el voltaje de descarga para ondas de maniobra es 1.9 - 2.3 veces el voltaje de descarga pico para 60 Hz. con la misma cantidad de contaminante.

3.9. PRUEBAS PARA AISLAMIENTO RECUPERABLE

Los estándares norteamericanos prescriben la aplicación de tres ondas de impulso de magnitud del voltaje de SOSTENIDO. Si se resisten los tres, se ha pasado la prueba exitosamente; ocurre si una descarga se repite el test y esta vez no se permite ninguna falla; si ocurren dos o tres descargas la prueba ha fallado. La probabilidad q_T de pasar la prueba se la expresa en base a la probabilidad de éxito, q_w de cada aplicación. Así para cuatro eventos favorables siendo E(éxito), f(falla) tenemos:

$$EEE \dots = q^3$$

$$FEE \dots EEE = q^5 (1-q)$$

$$EFE \dots EEE = q^5 (1-q)$$

$$EEF \dots EEE = q^5 (1-q)$$

con lo que la probabilidad total de éxito resulta $q_T = 3q^5(1-q) + q^3$.

La gran variedad de formas de onda de maniobra y los correspondientes rangos grandes de voltajes de descarga vuelven difícil el hecho de escoger una onda en particular. La tendencia es la de escoger aquella que nos produzca los menores voltajes de descarga.

Generalmente se utiliza un tipo doble exponencial de onda de polaridad positiva que tiene un tiempo de cresta de 100 a 500 useg. El tiempo para la mitad del valor tiene menor importancia debido a que la descarga en caso de existir siempre se produce antes o en la cresta. El impulso estandard de MANIOBRA recomendado por IEC tiene 250 useg. de tiempo de cresta y un tiempo de valor medio de 2500 useg. Cabe anotar que los dieléctricos resisten un mayor voltaje instantáneamente que un voltaje de magnitud menor pero que dure más tiempo, de acuerdo a la curva de la Fig. 3.9.

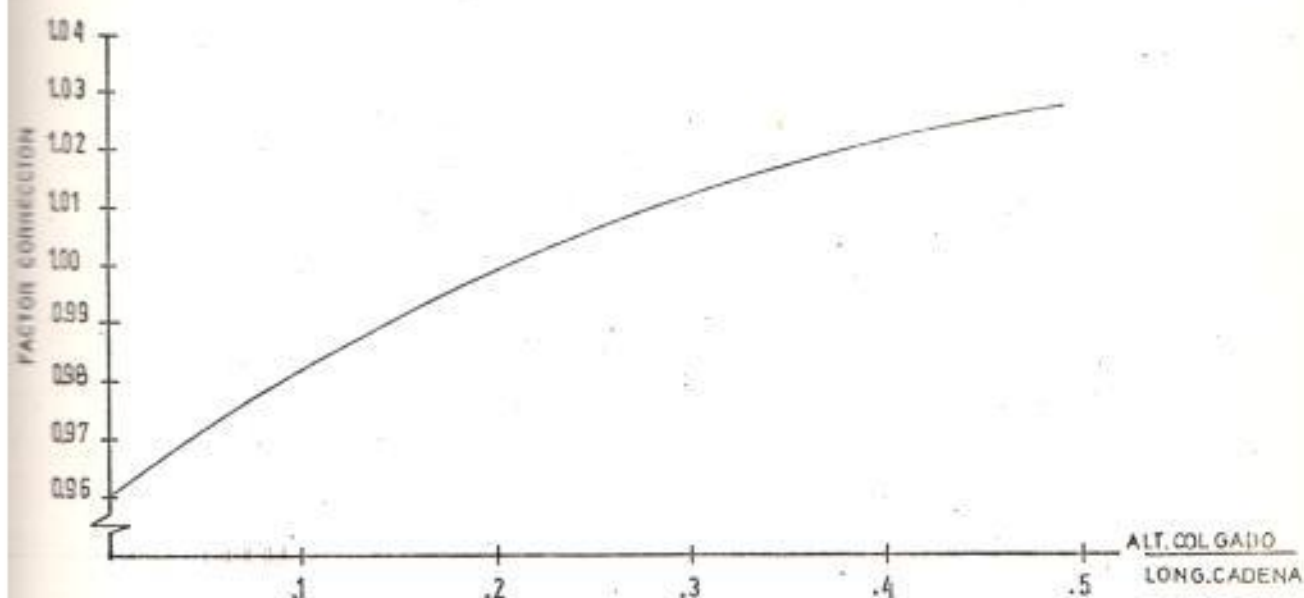


FIG. 3.3 CORRECCION POR ALTURA DE COLGADO PARA AISLADORES TANGENTES
ONDAS DE MANIOBRA POSITIVAS

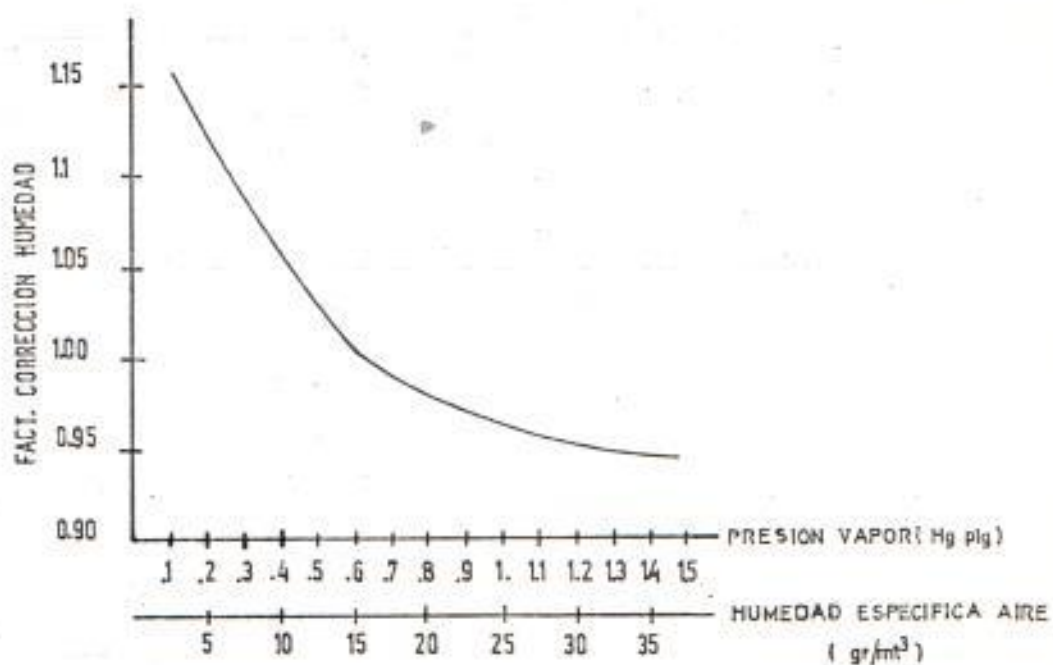
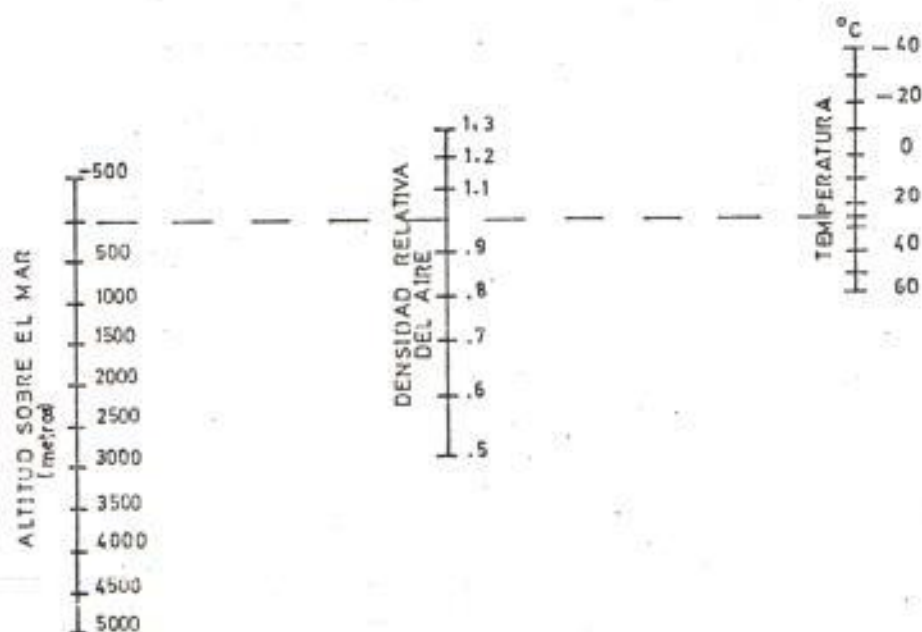


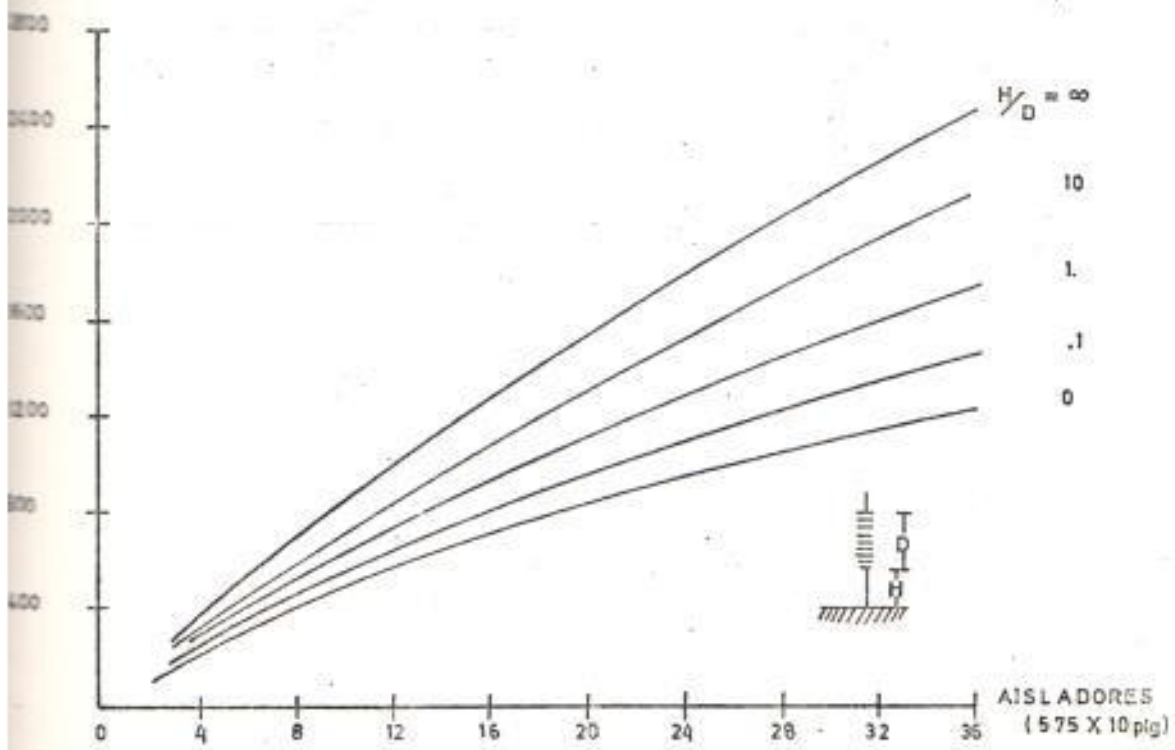
FIG. 3.4. CORRECCION POR HUMEDAD PARA CADENAS LARGAS DE AISLADORES
ONDAS DE MANIOBRA POSITIVAS

FIG. 3.5



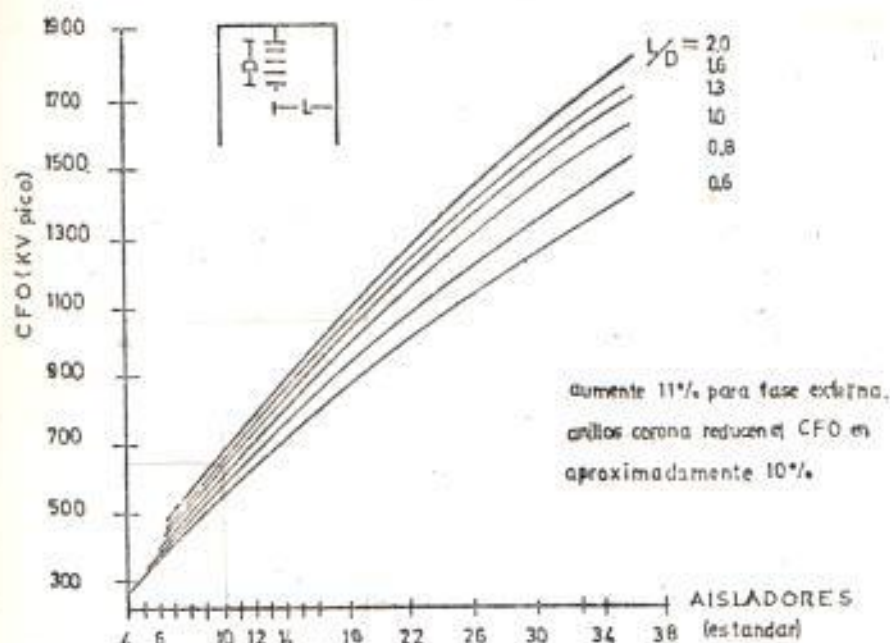
NOMOGRAMA PARA DETERMINAR LA DENSIDAD RELATIVA DEL AIRE

FIG. 3.6

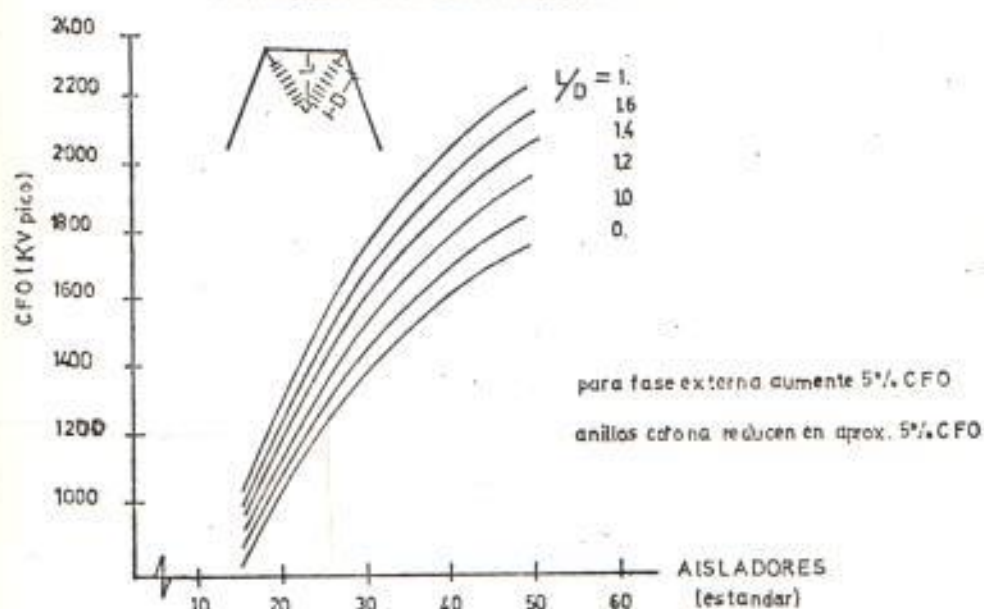


RESISTENCIA A LA DESCARGA CADENA DE AISLADORES VERTICAL

ONDAS DE MANTOIRA POSITIVAS CONDICION HUMEDA



a) CURVAS DE DESCARGA ATRAVES DE CADENAS TANGENTES DE AISLADORES FASE CENTRAL TORRES DE ACERO ONDAS DE MANOJERA POSITIVAS CONDICION SECA



b) CURVAS DE DESCARGA PARA CADENAS DE AISLADORES EN VE FASE CENTRAL TORRES DE ACERO ONDAS DE MANOJERA POSITIVAS CONDICION SECA

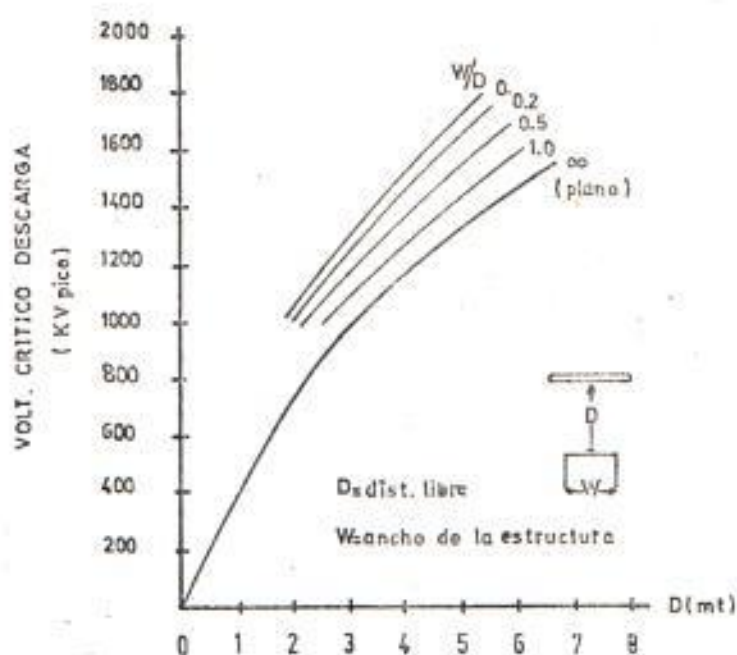


FIG. 3.8. CURVAS DE DESCARGA A TRAVES DEL DIELECTRICO ENTRE CONDUCTOR Y EL CUERPO O PATAS DE LA ESTRUCTURA ONDAS DE MANIOBRA POSITIVAS CONDICION AMBIENTAL SECA

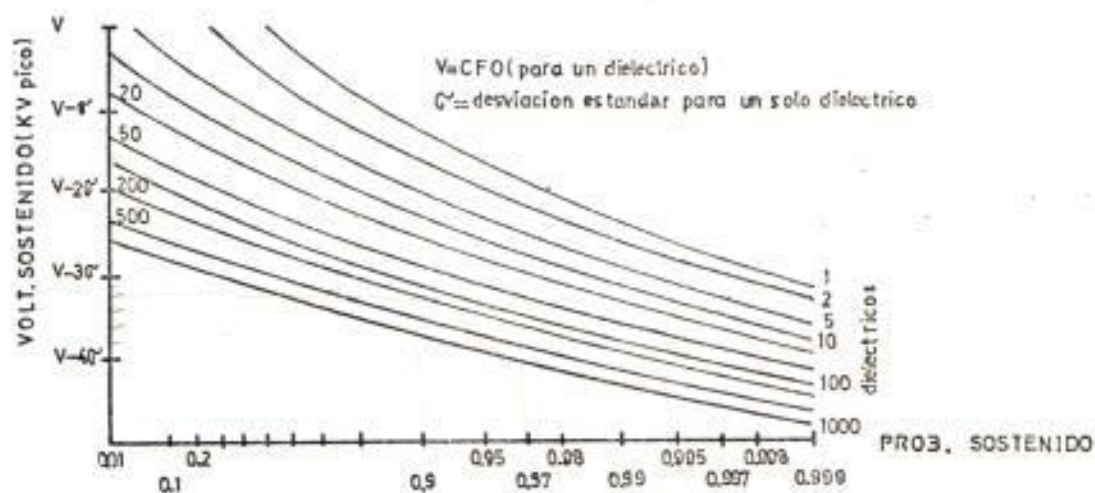


FIG. 3.11. REDUCCION DEL VOLTAJE DE SOSTENIDO DEBIDO A DIELECTRICOS EN PARALELO

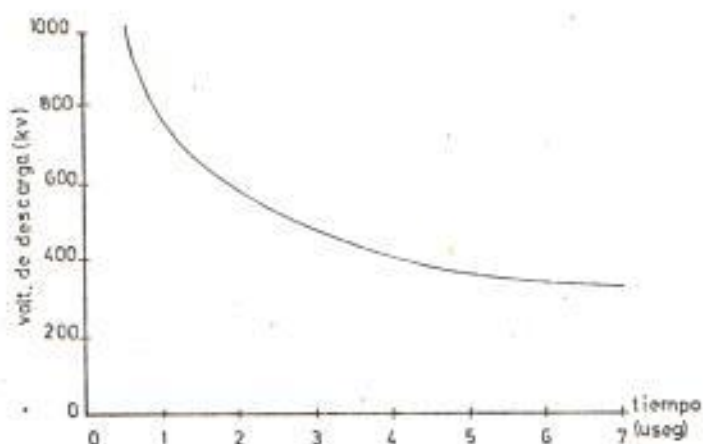


FIG. 3.9

La simulación que se hace en laboratorios de las líneas, la tierra, los aisladores, las estructuras, es un tanto compleja, pero podemos señalar que la realizan con diferentes arreglos de electrodos tipo VARILLA o PLANO, y se aplican las ondas de acuerdo a condiciones específicas.

Así por ejemplo, una línea con su cadena de aisladores y la tierra pueden representarse por una configuración de electrodos varilla-plano de acuerdo a la Figura 3.10.

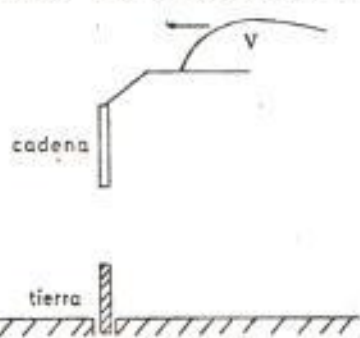


FIG. 3.10

10. DIELECTRICOS EN PARALELO

La fortaleza de oposición de una cadena de aisladores a ondas de maniobra sigue una distribución de frecuencia tipo

NORMAL, para valores cercanos al (\bar{V}) . Sin embargo en base a pruebas de laboratorio se puede generalizar lo anterior sin cometer un error grande.

Si la probabilidad de sostenido para un dieléctrico de aire es P_1 , la probabilidad de sostenido para N dieléctricos iguales será $P_N = P_1^N$. Esto es cierto también para el caso de cadenas de aisladores.

La conclusión obvia de lo anterior es que la resistencia de un sistema de transmisión disminuye conforme aumenta el número de dieléctricos en paralelo, sin embargo efectos tales como la atenuación de la onda de sobrevoltaje favorecen al sistema.

En una torre hay normalmente algunos dieléctricos en paralelo, los cuales no pueden ser tratados como independientes entre sí. Así por ejemplo, entre el extremo final de una cadena de aisladores hay dieléctricos de aire con relación a las patas de la torre y a su estructura, aparte del camino a través de la cadena misma. Para una configuración V_e habrán dos caminos a través de las cadenas.

Sin embargo viendo el sistema como un todo se puede con-

siderar a cada torre como un dieléctrico único y el número de torres vienen a definir por lo tanto el número de dieléctricos en paralelo.

4. VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA DE UNA ESTRUCTURA

4.1. INTRODUCCION

El aislamiento para sistemas de transmisión debe ser escogido luego de un estudio cuidadoso y comparativo entre los principales tipos de sobrevoltajes, tanto de naturaleza transiente como de naturaleza temporal.

El fenómeno de contaminación regularmente determina la longitud mínima de la cadena de aisladores en zonas donde existen grandes centros industriales, en nuestro país este fenómeno no es decisivo en modo alguno, aunque hay que hacer notar la necesidad de que se haga un estudio a nivel nacional para conocer con exactitud los índices de contaminación actuales y futuros para una mejor evaluación del fenómeno.

En cuanto a los sobrevoltajes transientes y su influencia en el aislamiento debemos anotar lo siguiente:

- ⊕ Los sobrevoltajes producidos por descargas atmosféricas - son determinantes en sistemas de transmisión a voltajes me

nores de 360 o 300 KV. Así mismo su efecto se acentúa en sistemas con alta resistencia de tierra o en regiones de un elevado nivel isocerámico.

- ⊕ Los sobrevoltajes por maniobra en cambio son de decisiva importancia en niveles superiores a los 362 KV. Así mismo su influencia aumenta en sistemas con baja resistencia a tierra o aquellos en los cuales no se utiliza algunos de los métodos descritos anteriormente para limitar los sobrevoltajes de MANIOBRA a niveles permisibles.

El aislamiento utilizado en torres EHV debe ser suficiente para garantizar una confiable operación de la línea todo el tiempo.

- El tamaño de las torres a voltajes de 700 KV es ya tan grande que no es práctico diseñarlos con dieléctricos de aire demasiado sobredimensionados, lo que se agrava por el fenómeno de saturación de ellos a estos niveles de voltaje, con lo que realmente se gana poco en resistencia del dieléctrico al aumentar los espaciamentos.

2. DETERMINACION DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA DE UNA ESTRUCTURA. METODO SIMPLIFICADO.

Para entrar al cálculo en sí se deben considerar en primer término las posibilidades que tenemos con diferentes es

estructuras, diferentes tanto en forma como en material.

En cuanto al material usado en las estructuras, este es básicamente acero y madera. Una estructura de madera presenta aproximadamente el mismo comportamiento hacia las ondas por Maniobra que las de acero (tienen realmente un \bar{V} insignificamente mayor); un mejor comportamiento para ondas - por descarga atmosférica; un igual comportamiento para ondas por sobrevoltaje Temporales. En todo caso el escoger entre una u otra (tomando en cuenta su comportamiento hacia Maniobra) cae a un campo de comparación del rendimiento mecánico ante esfuerzos producidos por: longitud del vano, calibre del conductor, condiciones meteorológicas, etc. De acuerdo a lo anterior podemos aplicar los mismos criterios eléctricos a ambas estructuras.

En lo referente a la forma o configuración de la estructura, hay una gran variedad, pero se las puede estudiar específicamente, conociendo el cálculo para dos estructuras básicas esquematizadas a continuación, y cuyos modelos naturales se los presenta en las figuras 4.2 y 4.3. Estas torres son llamadas tipo (I) y tipo (Ve) respectivamente.



FIG. 4.1

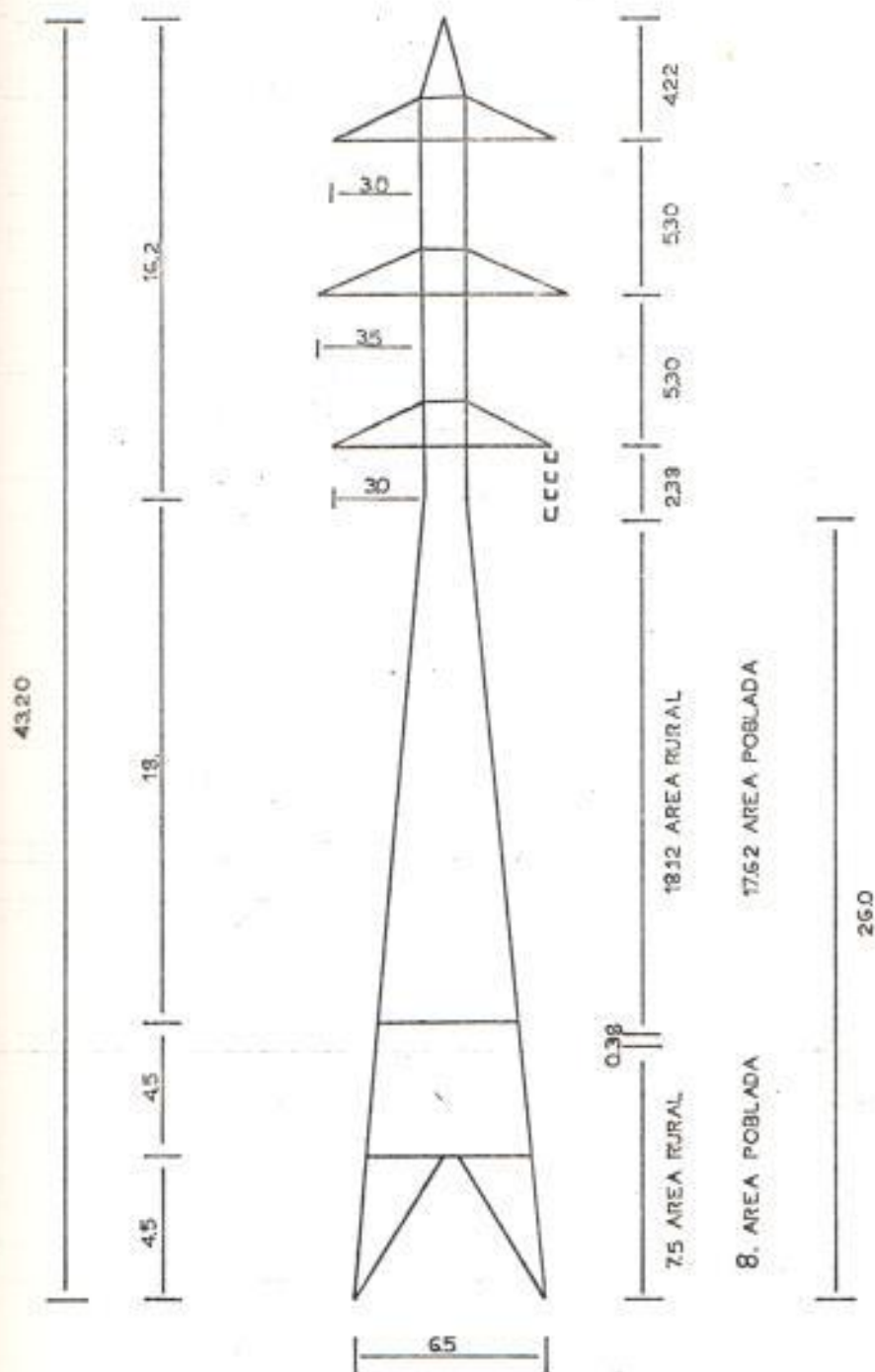
4.3. TORRES TIPO (I)

En primer lugar hacemos notar que las torres escogidas para el sistema Nacional a los niveles 138-230 KV se encuadran dentro de este tipo, haciendo notar de que se debe introducir cierto factor al calcular el (\bar{V}) cuando nos referimos a fases externas de la estructura.

Podemos anotar también ciertas características que inducirían a utilizar este tipo de estructura en lugar del tipo en V_e :

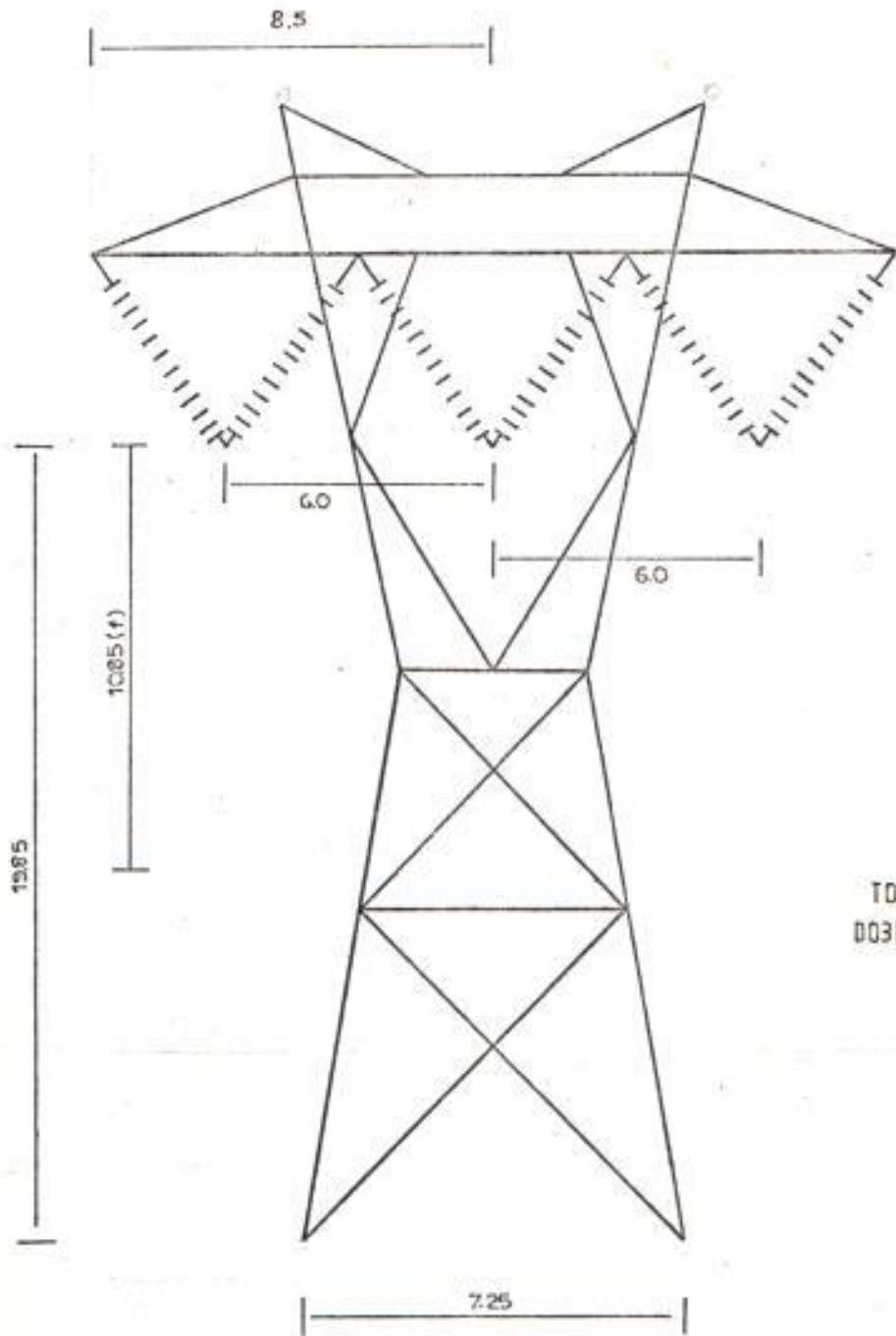
- Condiciones climatológicas suaves , es decir sin rigurosidades presentes en otros países como: vientos huracanados, nevadas, etc.
- Menor costo, puesto que son más livianas y necesitan una sola cadena de aisladores;
- Nivel de voltaje no muy alto;
- Ningún costo de derecho de vía, rublo muy importante en otros países y que generalmente es el que dá una ventaja a las torres en V_e .

Debido a que el tipo (I) va a ser utilizado en el Sistema Nacional de Transmisión, nos detendremos más en este cálculo simplificado. Sin embargo para la estructura



ESTRUCTURA DE SUSPENSIÓN
LIVIANA TIPO SLI
ÁNGULO 0-2GRADOS 230KV

FIG. 4.2



TORRE TIPO PORTICO
DOBLE HILO DE GUARDIA
345 KV

FIG. 4.3

en V_e también se hace un ejemplo y se describe el método sencillo que se deberá seguir para calcular por computadora el (\bar{V}) .

3.1. EJEMPLO DE APLICACION

Supongamos que se quiere determinar el número de aisladores por maniobra para las torres de la línea Boliche-Quevedo KV(L-L). El máximo sobrevoltaje esperado es de 2.55 pu, las torres son de acero del tipo analizado.

El procedimiento a seguir, se puede analizar paso a paso:

a) Máximo sobrevoltaje línea a tierra:

$$2.55 * \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} * 230 = 478.87 \text{ KV}$$

b) Como tenemos dos parámetros desconocidos es conveniente inicialmente escoger el más sencillo que es el número de aisladores. Debemos aclarar que el número de aisladores que seleccionemos inicialmente no tiene importancia, ya que con esta selección lo que realmente hacemos es iniciar un proceso iterativo de varias selecciones de cadenas de aisladores, hasta satisfacer nuestro nivel de diseño deseado. Así entonces, escogemos una cadena de 10 aisladores estándar de suspensión (14,605 cm. x 25.4 cm.).

c) Longitud de la cadena: $D = 14.605 * 10 = 146.05$ cm. Asu mimos una altura de colgado de 10 cm. y además que el herraje de la línea se proyecta 15 cm. por debajo de la cadena de aisladores. Ambas asunciones serán útiles posteriormente.

d) Criterio del ángulo de oscilación:

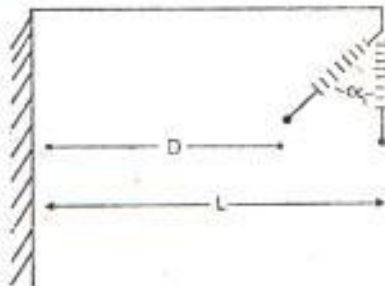


FIG. 4.4

Este criterio determina la mínima distancia libre del con ductor a la extensión de ladera de la estructura el ángulo de oscilación se lo toma generalmente como 15° en base a la experiencia en otros países aunque en el nuestro no se ha experimentado realmente en este campo.

La distancia mínima según este criterio debe ser igual a la longitud de la cadena de aisladores. Por lo tanto:

$$L = D + (D + 15) \text{ Sen } \alpha_1$$

donde: L = distancia total a la estructura

D = longitud de la cadena

α_1 = ángulo de oscilación

1

$$\begin{aligned}
 L &= 146.05 + (146.05 + 15) \text{ Sen } 15^\circ \\
 &= 146,05 + (161,05) 0.2588 \\
 &= 146.05 + 41.68 \\
 &= 187,73 \text{ cm.}
 \end{aligned}$$

- e) Para introducir el efecto de proximidad (proximidad de la masa de la torre que se asume al potencial de tierra) es necesario utilizar una figura experimental, en donde:

$$L/D = 187,73/146,05 = 1,28 \quad (\text{Figura 3.7.a})$$

$$\bar{V} \text{ (cresta)} = 629 \text{ (KV)}$$

En este punto es conveniente aumentar el porcentaje al que nos referíamos anteriormente por considerar el análisis - para fases externas: ese porcentaje es 11%, con lo cual tenemos:

$$\bar{V} = 698.19 \text{ KV}$$

- f) La corrección por la altura de colgado en base a la Fig.33 da un factor de corrección de 0.97 siendo

$$H/D = \frac{\text{altura colgado}}{\text{long. cadena}} = \frac{10 \text{ cm}}{146.05} = 0.068$$

con lo cual: $\bar{V} = 677.24$

- g) Factores meteorológicos

- Densidad relativa del aire: Para una altitud de 1000 m. (valor máximo de la altitud de la zona por donde cruza

la línea) y a una temperatura de 25°C, el valor del RAD es 0.87 (Fig.35). Debido a que la longitud de la cadena es relativamente pequeña, el exponente (n) se lo puede ajustar a 1 (de acuerdo a la Fig. 630 del EHV, se desprende que para voltajes de 230 KV e inferiores es siempre 1).

- Lluvia: En el estudio similar que realizó W.S. Price - del Sistema Nacional, no considera en esta parte del diseño la influencia de la lluvia, probablemente por el hecho que conservadoramente se toma en 1000 m. toda la altitud de la línea y también siendo esto muy importante porque su experiencia en este tipo de cálculos le permite hacer asunciones correctas. En el estudio final realizado por el Depto. Técnico de INECCEL si se considera su influencia en un 5%.
 - Humedad: W.S. Price tampoco considera este factor. En el estudio de Inecel al que hacemos referencia si se utiliza un factor de corrección por humedad de 0.95 que representa una humedad absoluta de 30. gr./m³. Fig.34
- Por lo tanto, debido a estos factores tenemos:
- reducción por RDA = $\bar{V} * 0.87 = 589.2$
 - reducción por lluvia: $\bar{V} * 0.95 = 559.74$
 - reducción por humedad: $\bar{V} * 0.95 = 531.75$

Si definimos el voltaje SOSTENIDO de una cadena como:
 Voltaje SOSTENIDO = $\bar{V} - 2 \sigma_P$, donde $\sigma_P = 0.05 * \bar{V}$, tene-
 mos que el Voltaje SOSTENIDO para 287 torres que compo-
 nen la línea Bolíche - Quevedo, es de acuerdo al gráfi-
 co 3.11.

$$\begin{aligned} \text{Volt. Sostenido} &= \bar{V} (1.0 - K \sigma_P / \bar{V}), \text{ donde } K = 3.8 \\ &= 531,75 (1 - 3.8 * 0.05) \\ &= 430.71 \text{ (KV)} \end{aligned}$$

El gráfico al que nos referimos se lo obtiene sim-
 plemente del siguiente criterio: Si para un voltaje
 (V) una cadena tiene una probabilidad (x) de sostenido,
 dos cadenas tendrán una probabilidad (x^2); así también
 para un Voltaje (V- σ) una cadena tiene una probabili-
 dad (y) de sostenido y 50 cadenas una probabilidad (y^{50}),
 etc.

1.4. PROGRAMA DE COMPUTACION CFOF PARA EL CALCULO DEL VOLTAJE CRITICO DE DESCARGA.

El (\bar{V}) de una estructura tipo I, está determinado por dos tipos de factores ya mencionados anteriormente geométricos y meteorológicos. La relación distancia libre para la longitud de la cadena es un factor geométrico, lo mismo que la altura de colgado; la lluvia, humedad, RAD, son factores meteorológicos. La necesidad del programa surge debido a que en cada estudio de aislación se deben analizar muchas alternativas de dimensionamiento de las torres (nos referimos en este caso específicamente a requerimientos por Maniobra), combinando longitudes de cadenas con distancias libres para registrar cual es la que produce un mejor comportamiento y cumple con el criterio de diseño previamente establecido.

El programa que hemos implementado CFOF, es sencillamente una aplicación de la teoría de mínimos cuadrados para la estimación de parámetros (el método se lo explica con detalle en el Anexo 5), de esta manera dando como datos las longitudes de cadena (o lo que es lo mismo el número de unidades estandar que la componen) y las distancias libres que

deseamos, además de los factores de variación que se estimen necesarios, determinan todos los voltajes críticos de descarga.

Debemos anotar - como referencia solamente- que hemos implementado también dos programas adicionales; el uno que aplica el mismo método pero utiliza para situar las diferentes curvas de los voltajes críticos la relación L/ρ directamente y el otro que se emplea un proceso diferente: el método iterativo de interpolación AITKEN-NEVILLE. He presentado sólo éste (CFOF) debido a que es más práctico para trabajar que el primero nombrado ya que da resultados un tanto mejores que el último.

1.5. PRINCIPALES VARIABLES UTILIZADAS

Para su mejor comprensión esta parte debe ser complementada con la revisión de los comentarios del listado del programa que se adjunta en el Anexo 5.

Los principales variables que intervienen son:

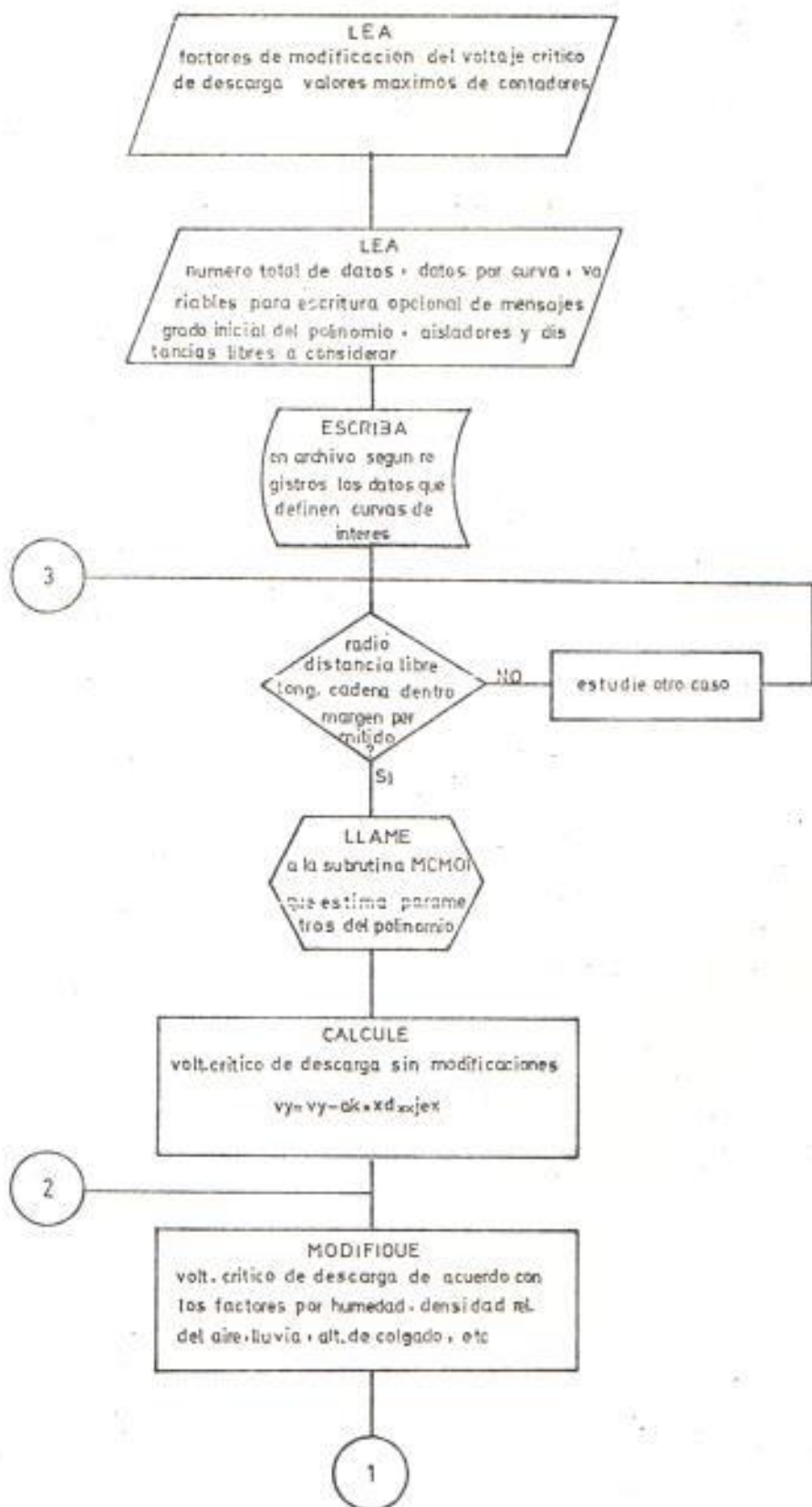
CFON : Voltaje crítico de descarga, Kilo Voltios pico.

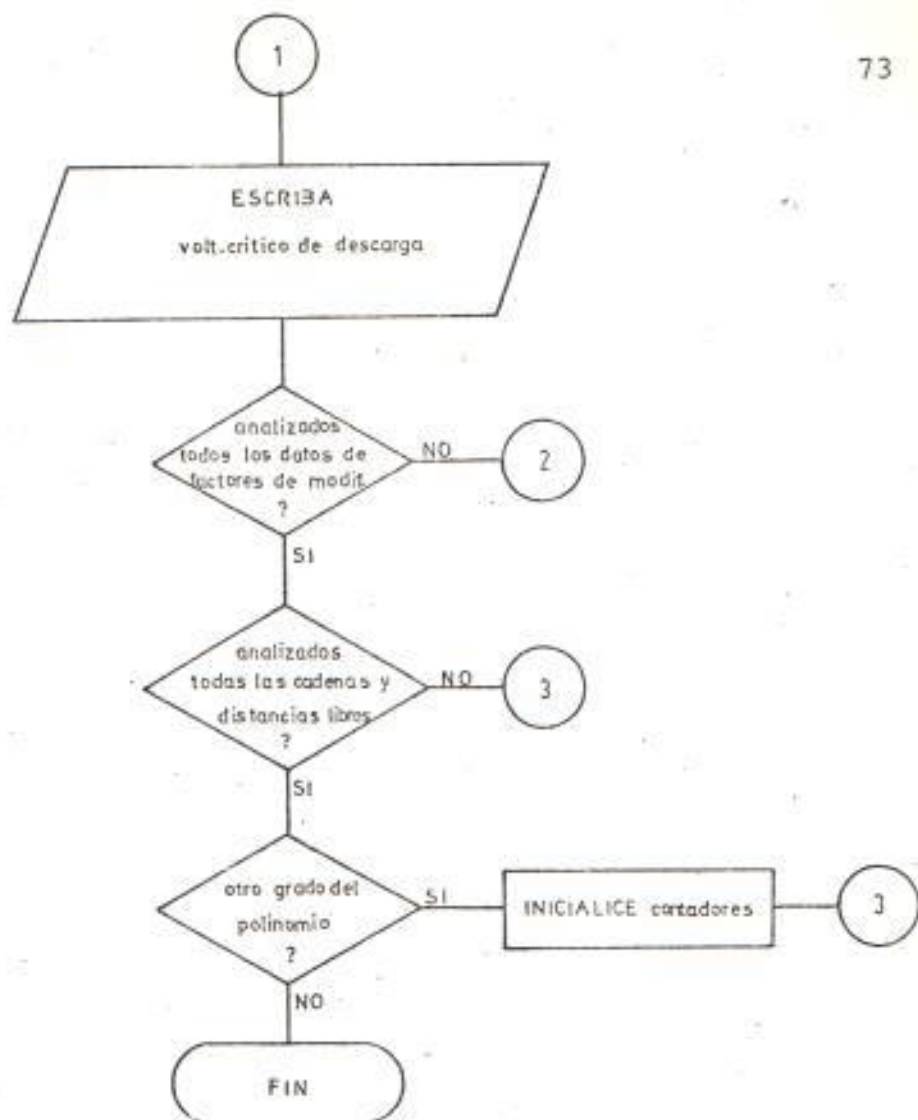
FRAD : Factor conexión por Densidad relativa del aire.

- FHU : Factor corrección por humedad.
- FLL : Factor corrección por lluvia
- FPRO : Factor corrección por proximidad de la estructura.
- FALT : Factor corrección por altura de colgado.
- XD : Aisladores estandard
- DL : Distancia libre a la torre.
- M : Grado deseado del polinomio.
- AK : Arreglo que contiene los coeficientes del polinomio.
- x,y : Puntos que representan aisladores y voltajes críticos respectivamente, en las curvas de entrada.

VER DIAGRAMAS DE FLUJO EN
LAS PAGINAS SIGUIENTES

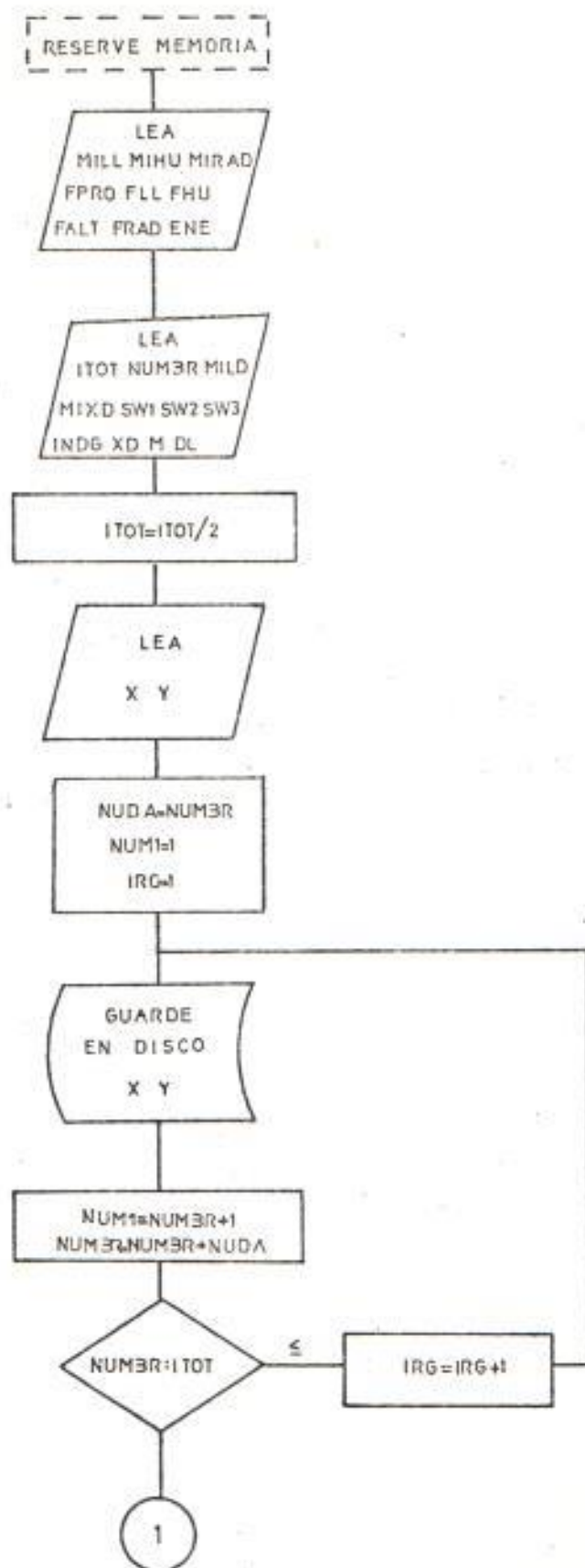
4.6. Diagrama de Flujo simplificado del programa (CFOF)

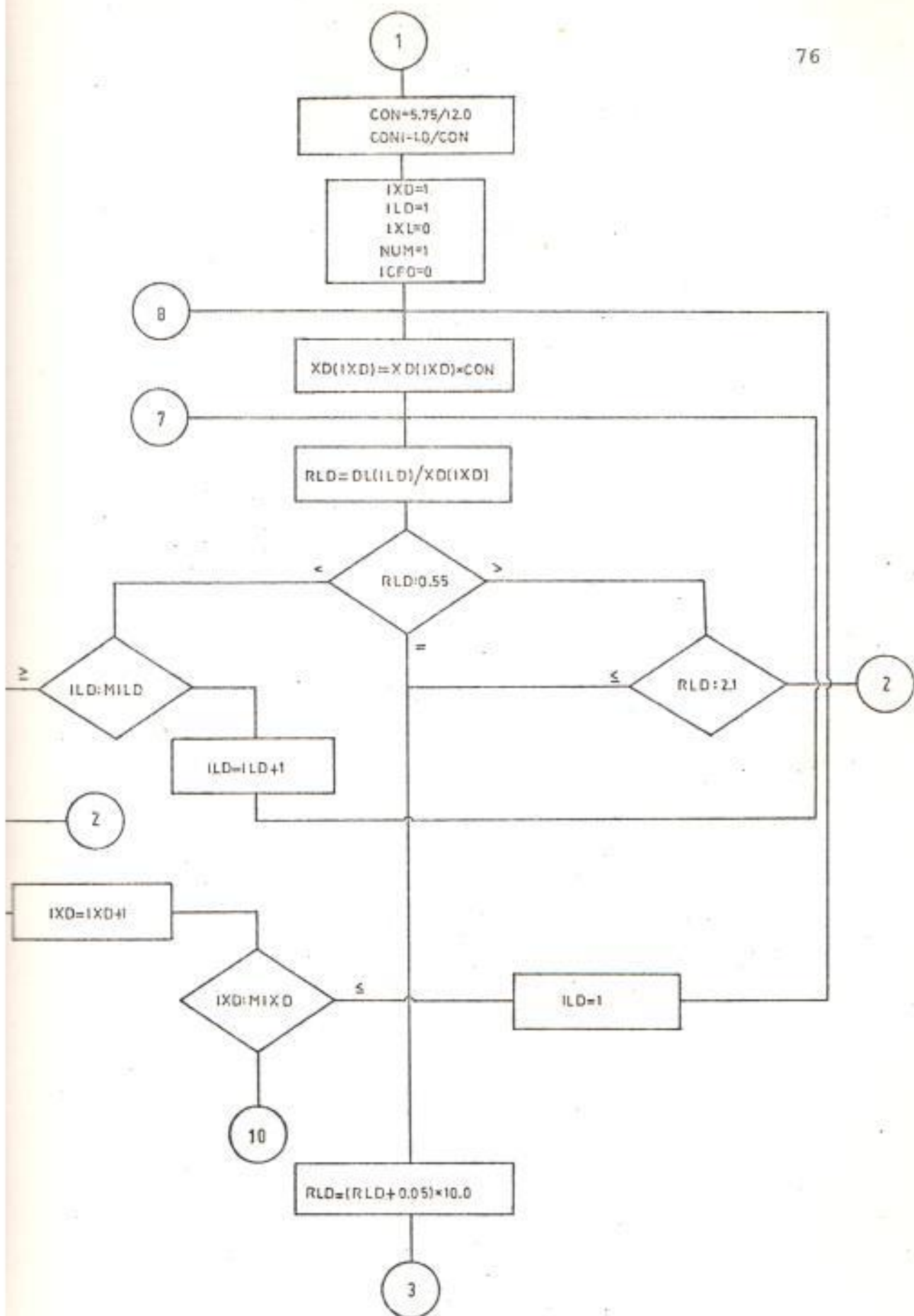


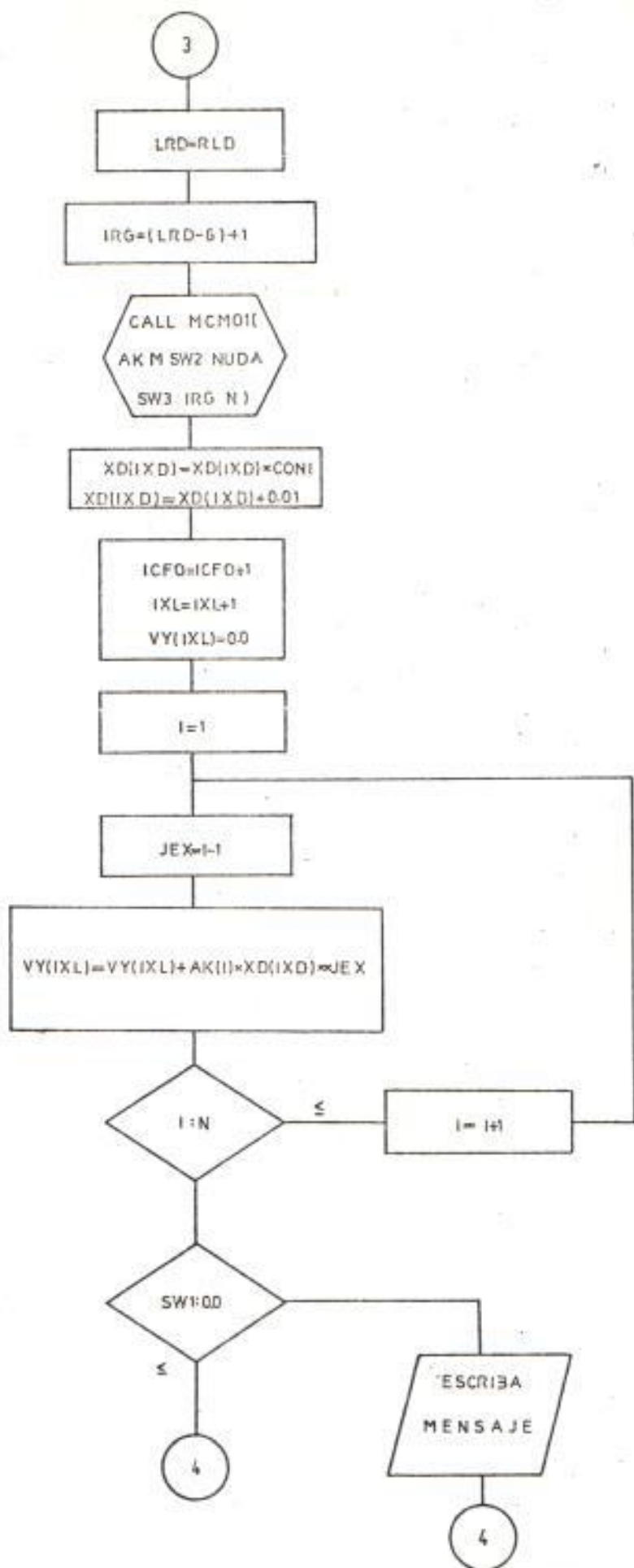


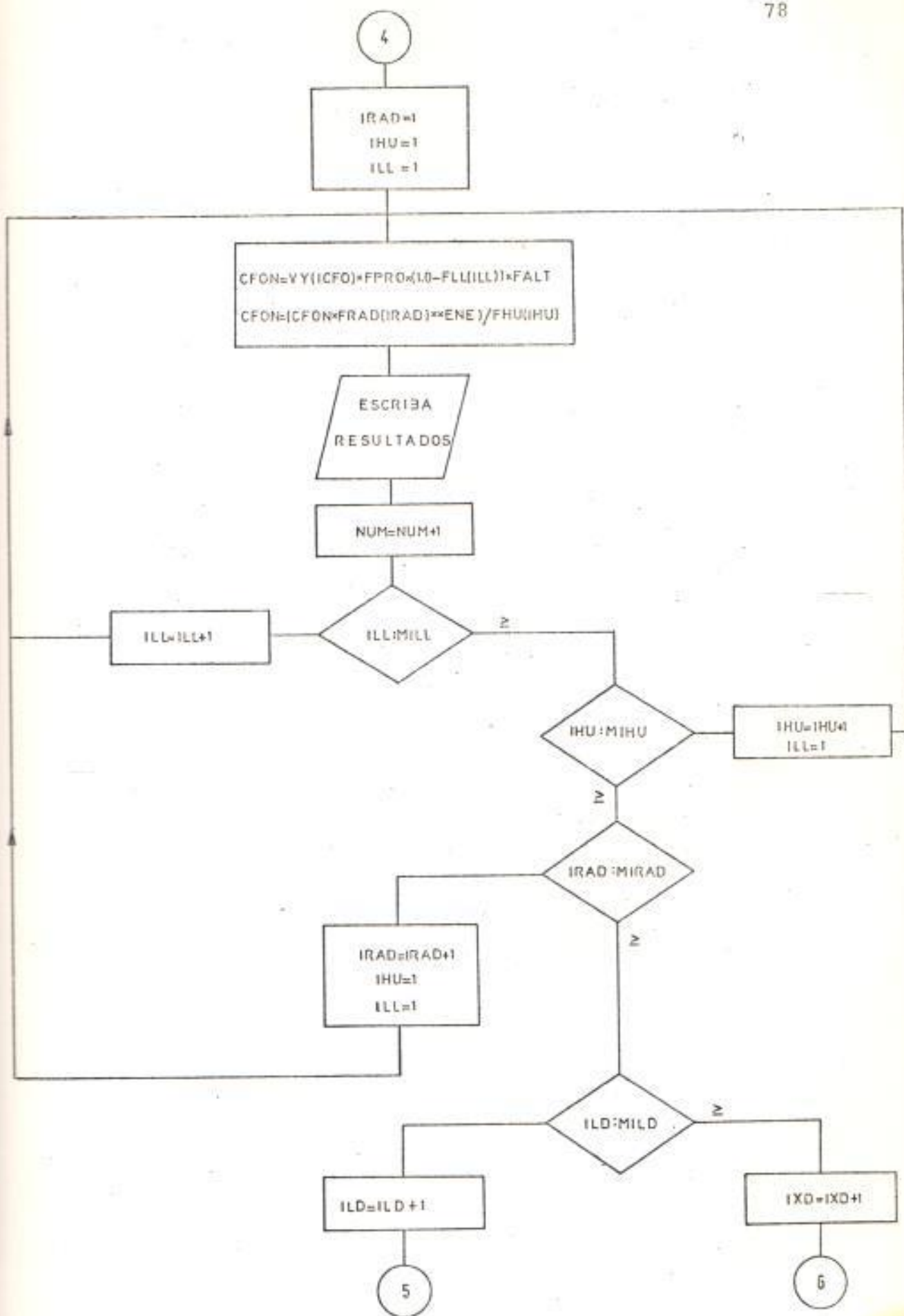


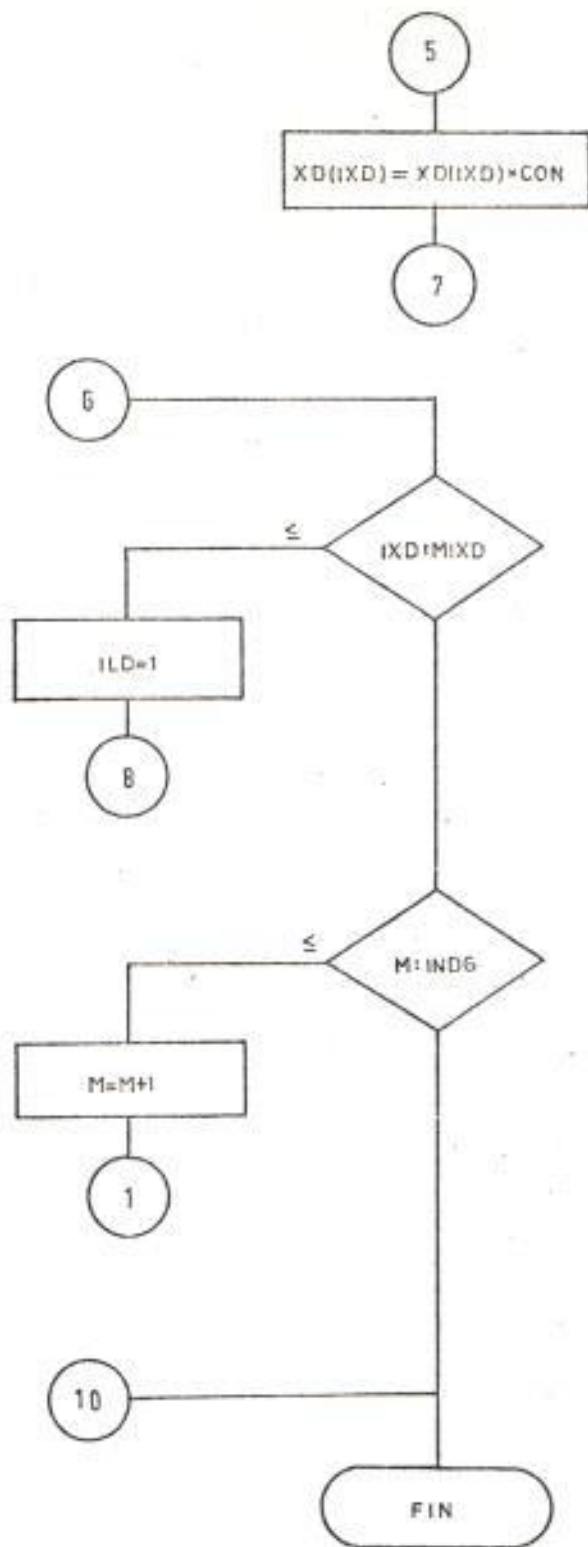
6.2. Diagrama de Flujo detallado del Programa (CFOF)

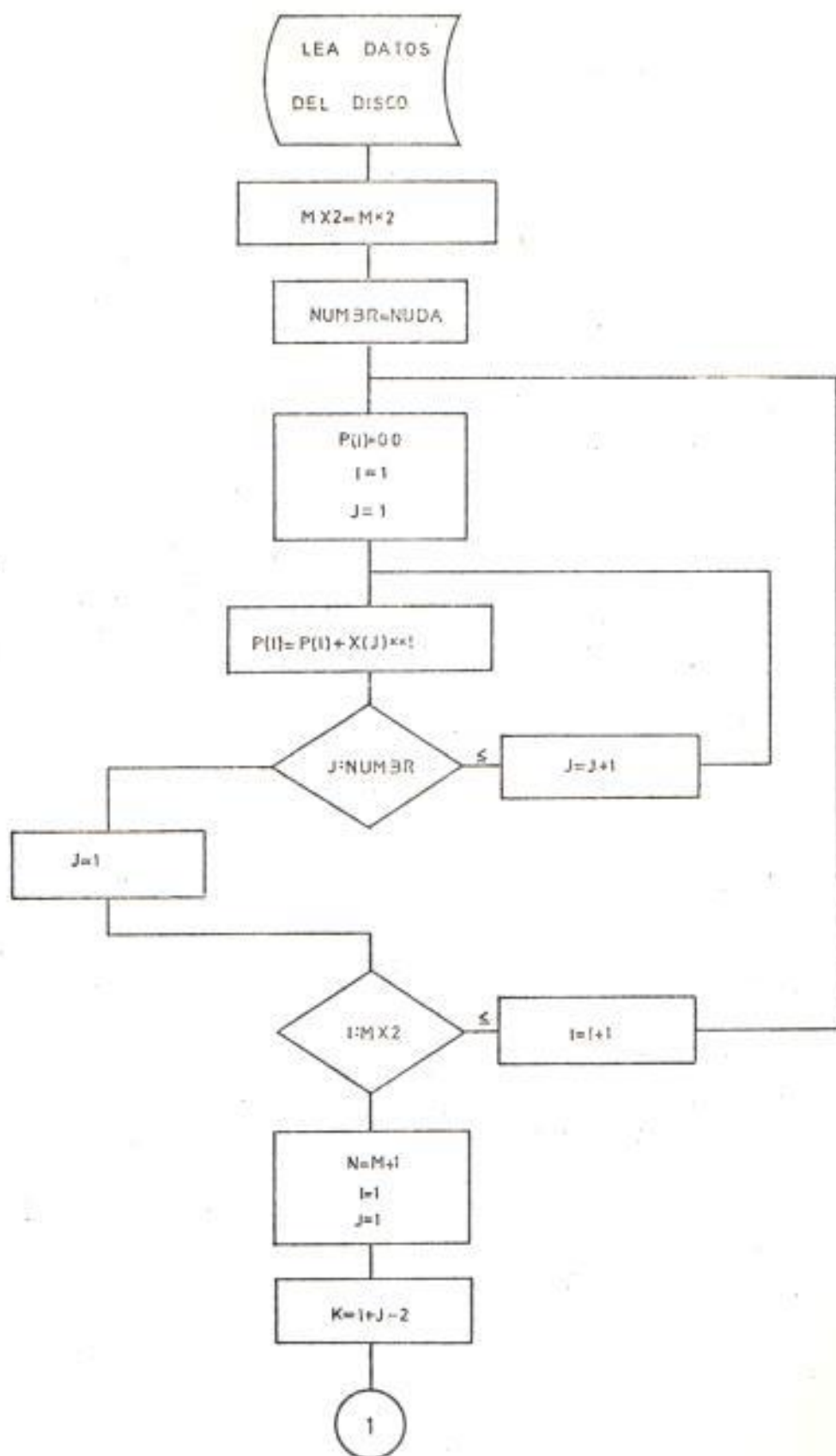


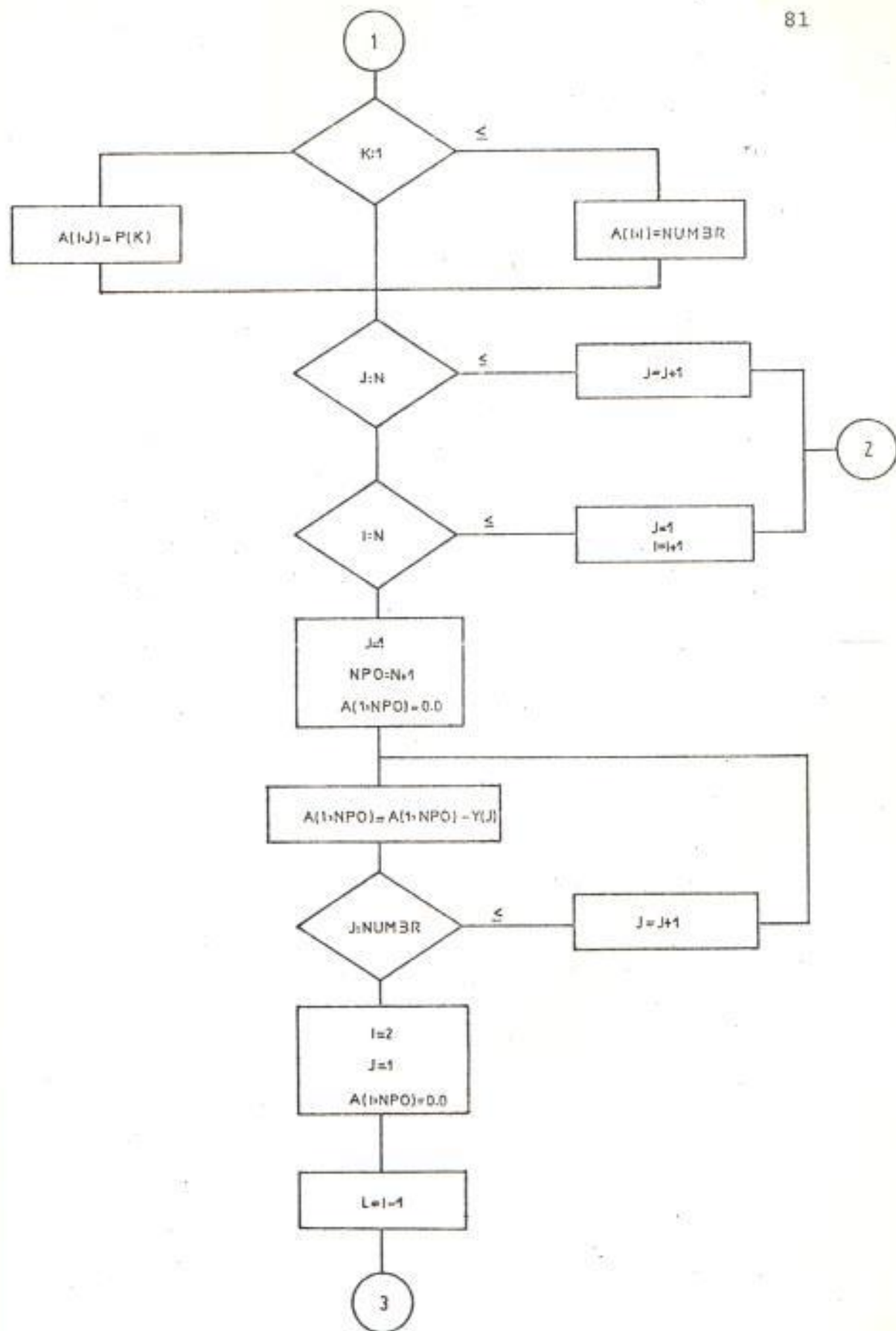


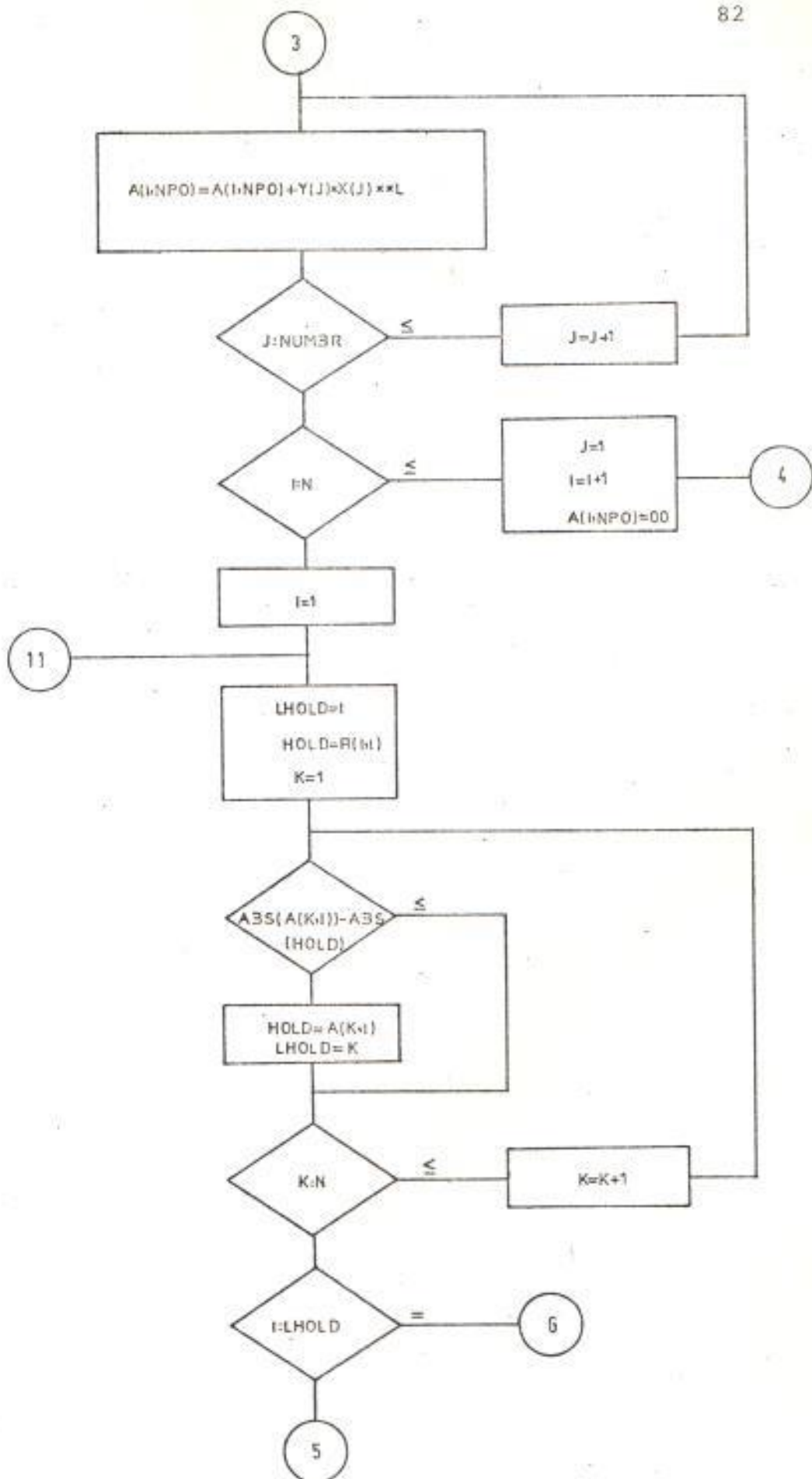


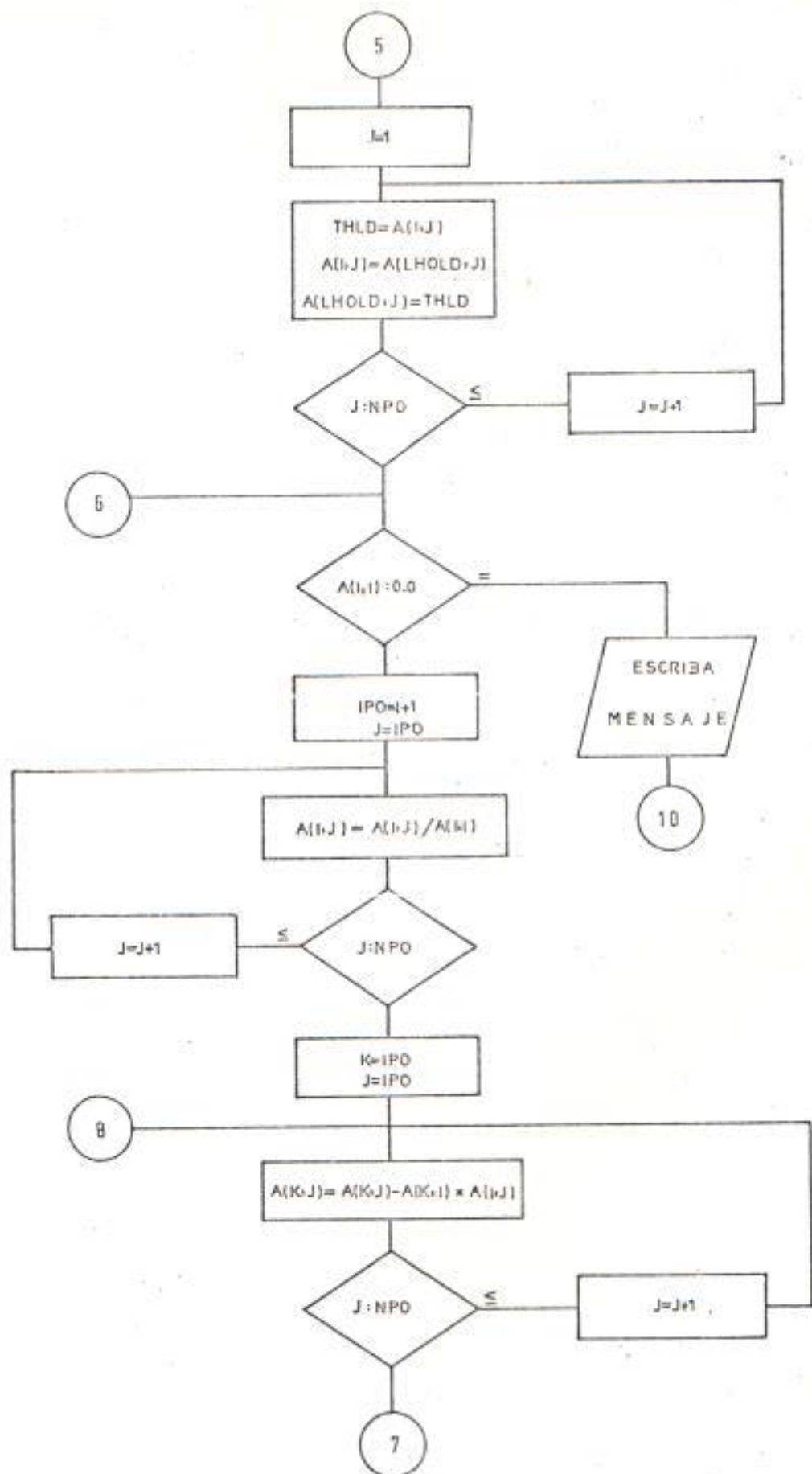


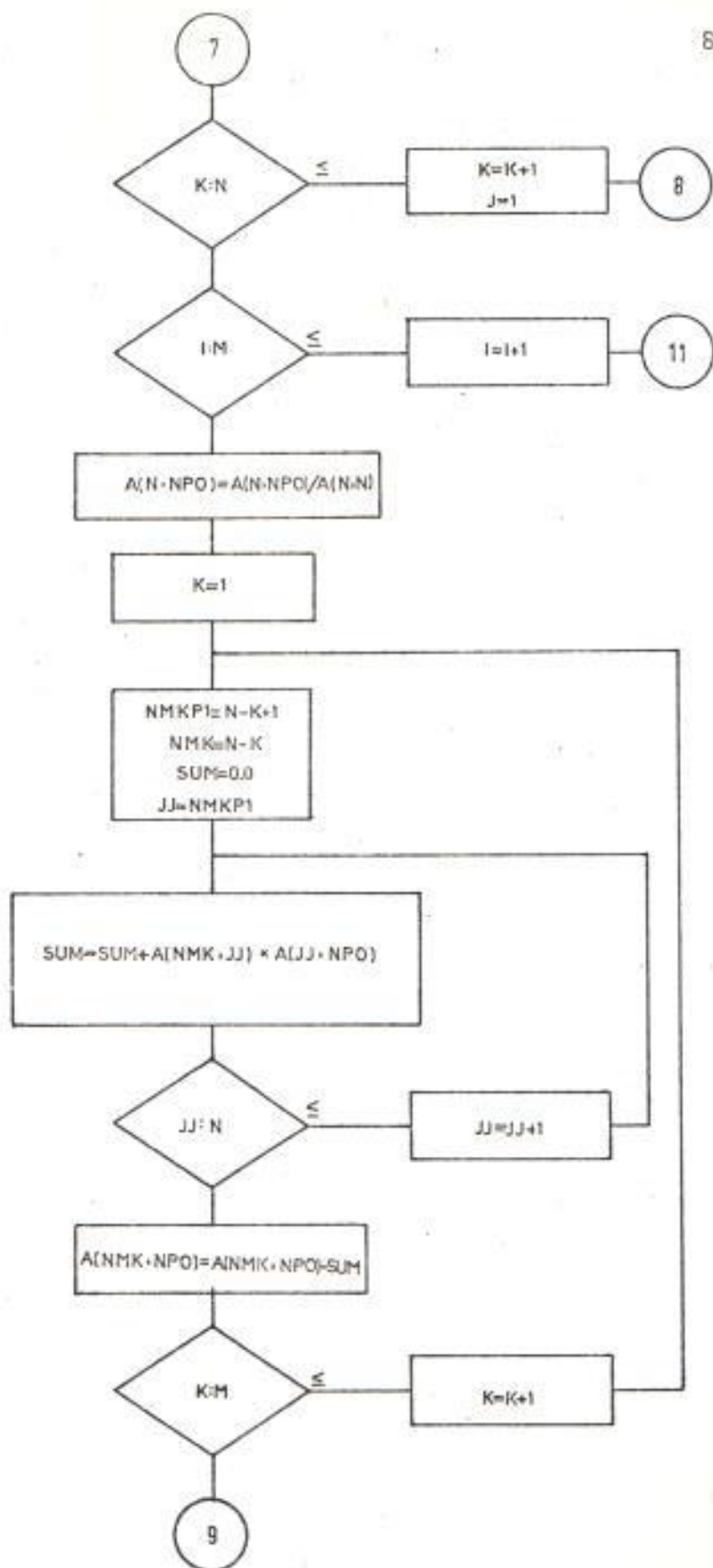


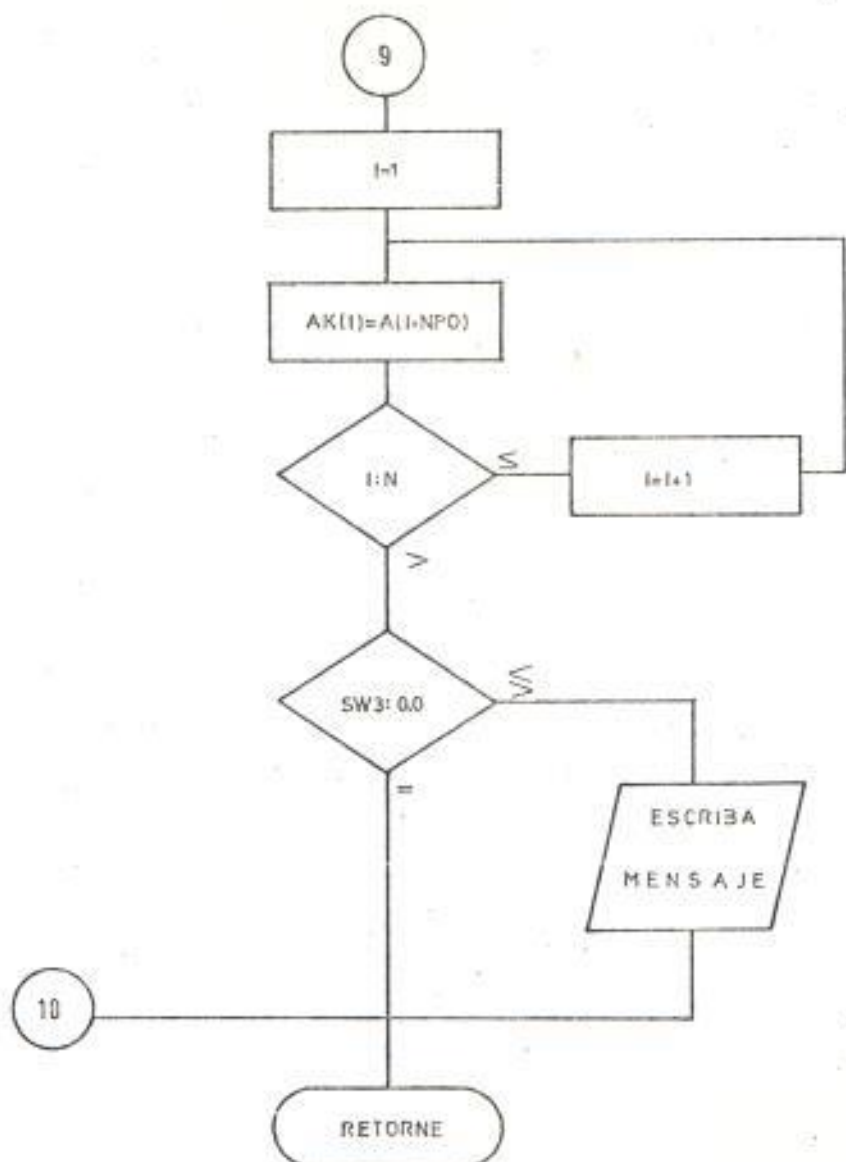












4.7. LIMITACIONES DEL PROGRAMA:

Debido a que se deben utilizar las curvas experimentales que dan el (\bar{V}) . Para estructuras tipo I, las limitaciones están dadas precisamente por la fuente de donde sacamos las curvas (EHV).

Se pueden mediante el programa, obtener (\bar{V}) para una cadena compuesta de 8 + 16 unidades (número de unidades comunmente requeridos por Maniobra en nuestros niveles de Voltaje) y para una distancia libre de ≈ 3 a 12 - pies (relación L/D de 0.6 + 2.1).

4.8. ESTRUCTURAS EN $\langle Ve \rangle$

Pese a que este tipo de estructuras no se utilizará en el Sistema Nacional - probablemente por los criterios anotados anteriormente- conviene dar una pauta del cálculo a realizarse. En este caso no se hace el análisis en base a un ángulo de oscilación, debido a que el ángulo está ya fijo y es generalmente de 45° , sino que el cálculo se basa en el efecto del die-

léctrico y luego el (\bar{V}) total.

Probabilidad total de falla (PTOT) = $P_{D1} * P_{D2} * P_{D3} \dots * P_{DN}$
para cada voltaje estudiado.

Los dieléctricos que intervienen para cada configuración de este tipo son:

- Dieléctrico fin de la cadena a la extensión de la ladera.
- Dieléctrico fin de la cadena hacia la estructura misma; y
- Dieléctrico a través de las cadenas.

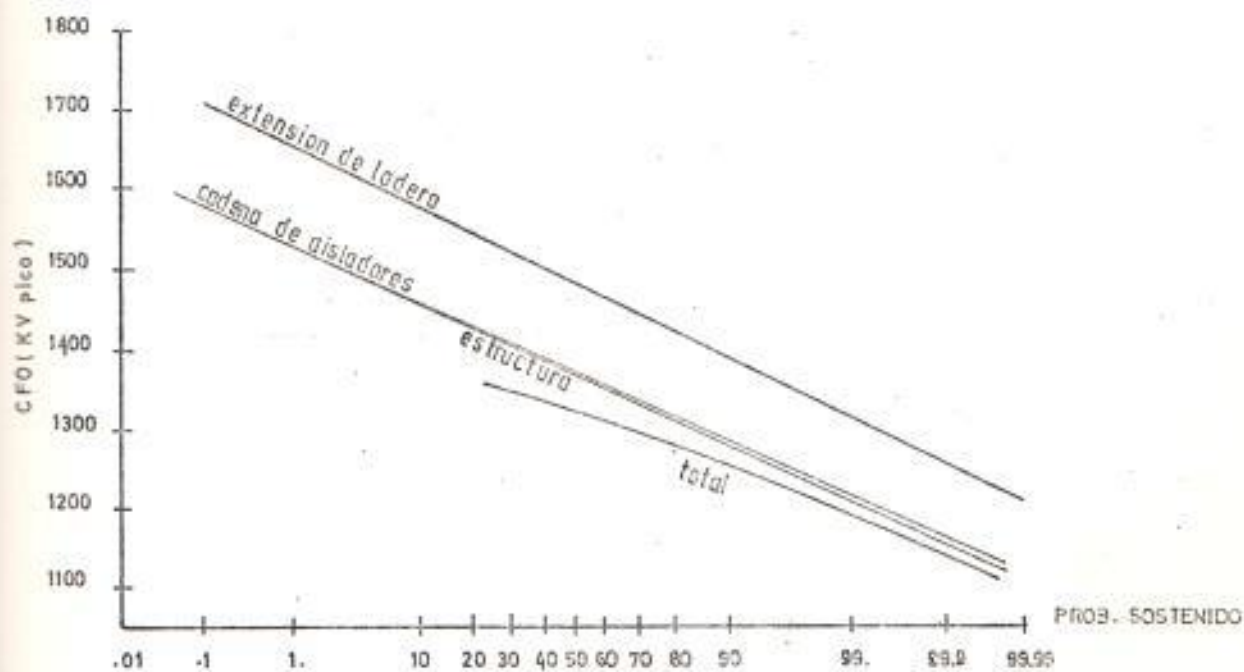
1. \bar{V} Debido a la distancia a la extensión de la Ladera

De acuerdo al gráfico 3.8 en donde se introduce el efecto de proximidad al intervenir W_1 (ancho de la torre) se obtiene un \bar{V}_1 , para una relación W_1/D_1 siendo D_1 la distancia del conductor libre a la extensión de la ladera. Se observa que a medida que $W \rightarrow 0$ el \bar{V} aumenta por cuanto el efecto de proximidad disminuye. Se debe anotar que los Anillos Corona (ver Anexo 1) reducen la distancia libre en unos 20 cm.

2. \bar{V} debido a la proximidad del cuerpo de la estructura

La distancia del conductor a la estructura (siempre hablamos de las distancias más cortas (D_2 y el ancho de la misma W_1 vuelven a determinar un $\bar{V}_{(2)}$ con los mismos comentarios - del caso anterior.

FIG. 4.5



PROBABILIDAD DE SOSTENIDO PARA UNA CONFIGURACION EN

"Ve" DE AISLADORES FASE CENTRAL

3. \bar{V} Debido a las cadenas

Del gráfico 3.6 en el cual L (la distancia más corta del conductor a la torre) y D (longitud de la cadena) se obtiene, luego de la reducción por anillos corona un $\bar{V}_{(3)}$.

Cabe anotar que el hecho de utilizar dos cadenas en V_e tiene un efecto más pronunciado en la reducción del \bar{V} que si fueran simplemente dos cadenas tangentes en paralelo. Este efecto se debe probablemente a la mayor influencia de la proximidad de la torre. Lo anterior es un inconveniente de este tipo de estructura puesto que requiere de un mayor número de aisladores para la fase central que en el caso de la otra estructura analizada.

4. \bar{V} y probabilidad de sostenido

Una vez encontrados los \bar{V} individuales se puede para cada caso obtener una curva probabilística la cual se grafica con ejes VOLTAJE DE DESCARGA Vs PROBABILIDAD DE SOSTENIDO asumiendo un coeficiente de variabilidad único (por ej. 5%) el gráfico 4.5 representa lo anterior.

Un programa sencillo para obtener estas curvas se lo explica más adelante. En esta parte podemos mencionar que un método rápido para encontrar esos valores consiste en calcu

lar valores de unidades estandar (z) para distintos voltajes y acudir a tablas estadísticas, en las cuales se dan las áreas bajo la curva NORMAL ESTANDAR para cada valor (z) calculado.

Así por ejemplo, para la curva del caso b) del Apéndice 6.2 del EHV, tenemos:

$$\bar{V}: 1367 \qquad V = 1400 \qquad G_F = 0.05 \times 1367$$

$$z = \frac{1400 - 1367}{68.35} = 0.4828$$

En las tablas de cualesquiera de los libros de estadística de referencia encontramos: B(área entre la media y z) = 0.1844. Por lo tanto la probabilidad de sostenido será igual a: $1 - (0.5 + 0.1844) = 0.3154$, que es el valor que aparece en el gráfico citado. La probabilidad total de sostenido para cada voltaje no es más que:

$$P_{TOT} = P_{aisladores} \times P_{torre} \times P_{ext. ladera}^2$$

Graficando punto a punto llegamos a la curva final que nos dá el comportamiento de la estructura en conjunto. El diseño para una fase externa es en forma, exactamente el mismo, sólo que con los cambios particulares en cada paso,

por el hecho de disminuir la influencia de la proximidad en el comportamiento del aislamiento.

9. CALCULO DEL RIESGO DE FALLA POR UN METODO SIMPLIFICADO

En realidad es difícil, simplemente mediante un cálculo simplificado llegar a una solución verdadera para el cálculo del riesgo de falla. Lo que se puede hacer es tener una idea más o menos acertada del Comportamiento del sistema - bajo ciertos supuestos (Max. sobrevoltaje, probabilidad de máximos sobrevolts, etc.) Unicamente el tratamiento estadístico - que veremos posteriormente - nos puede llevar a una solución valedera.

Sin embargo veamos como con ciertos datos básicos podemos darnos una idea del comportamiento del aislamiento: Así del ejemplo anterior para la línea Boliche - Quevedo tenemos que $\bar{V} = 531,7 \text{ KV}^{\circ}$, número torres 287; máximo sobrevoltaje en (p.u) 2.55; y asumiendo que los sobrevoltajes mayores a este tienen una probabilidad de ocurrencia del 2% - ($\approx U + 2 \sigma_0$).

El Volt. de sostenido para los 287 torres suponiendo que la onda se aplica a todas ellas con su valor máximo, es: 430.71 KV. Comparando este valor con el voltaje máximo espe

rado de 478.9 KV se aprecia que no existe un buen factor de seguridad (factor seguridad = $\frac{\text{Volt. Sost.}}{\text{Max. Sobrevolt.}}$), por lo

cual deberíamos volver a nuestro cálculo original del Volt. de sostenido considerando ahora una nueva longitud de cadena, aumentando el número de unidades de la misma. Es decir, debemos realizar este proceso repetitivo hasta satisfacer nuestro nivel de diseño adecuado, un factor de seguridad de aproximadamente 1 (0.95 - 1.05). Una vez cumplido el nivel deseado se puede considerar que se ha alcanzado cierto grado de seguridad: de acuerdo a la Fig.3.11 vemos que la prob. de falla es de aproximadamente 2% y la probabilidad de ocurrencia de mayores sobrevoltajes también 2%.

5. FALLA DEL AISLAMIENTO POR SOBREVOLTAJE DE MANIOBRA. TRATAMIENTO PROBABILISTICO

1. INTRODUCCION

Habíamos anotado anteriormente que sólo un método estadístico podría darnos un cálculo confiable del comportamiento del aislamiento de una línea. Esto es así debido a que sólo en esta forma se puede tratar el fenómeno de sobrevoltajes y de fallas en su misma naturaleza, esto es, aleatoria, con eventos sujetos a probabilidades. Así la distribución de sobrevoltajes la habíamos aproximado en el Capítulo 3 a una distribución normal, con una media y una desviación conocidas. El comportamiento del aislamiento también lo asimilamos a una distribución Gaussiana y ahora nos resta tratar a los dos eventos en forma conjunta.

2. PROBABILIDAD DE DESCARGA TOTAL

En base a lo anterior podemos definir una PROBABILIDAD DE DESCARGA como la probabilidad de que el esfuerzo eléctrico aplicado a las estructuras (ondas de maniobra) exceda a la resistencia de los mismos.

$$P_D = \int f(v) \times F(v) \, dv \quad (5.1)$$

donde $f(v)$ es la función Normal de Densidad, $F(v)$ es la distribución Normal Acumulativa de los sobrevoltajes de las descargas para una estructura.

Consideremos un caso para tres torres de transmisión sujetas a una operación de maniobra. Supongamos que se conoce la distribución de voltaje en la posición de cada torre (Graf. 5.1) y la Distribución Normal Acumulativa de una torre que es similar para las tres. En el instante que el voltaje V_R ocurre en el extremo de recepción, ocurre en las otras dos torres los voltajes V_{R2} y V_{R1} . Por lo tanto la probabilidad de ocurrencia de esos tres voltajes es igual.

$$f(V_R) = f(V_{R2}) = f(V_{R1}) = f(v)$$

La probabilidad de descarga en los puntos R, R_{-2} y R_{-1} será entonces:

$$P_R f(V_R) = P_R f(v)$$

$$P_{R-2} f(V_{R-2}) = P_{R2} f(v)$$

$$P_{R-1} f(V_{R-1}) = P_{R-1} f(v)$$

Definiendo: $P_R = (1 - q_R)$

q_R = Probabilidad sostenido tenemos:

$$P_{RTOT} = f(v) [P_R q_{R1} q_{R2} + P_{R2} q_{R1} + P_{R-1} q_{R2}]$$

$$\begin{aligned}
& + P_R P_{R1} P_{R2} + P_{R2} q_R q_{R1} + P_{R2} P_{R1} q_R \\
& + P_{R1} q_R q_{R2}] \\
& = f(v) (1 - q_R q_{R1} q_{R2}) \quad (5.2)
\end{aligned}$$

Ahora si expandemos nuestro análisis de tres torres a (n) torres y asumimos que P_K (probabilidad de descarga para una torre) es la misma para todas las torres, tanto porque las torres son idénticas como porque son impactadas al mismo tiempo por una onda de igual magnitud $ES/ER = 1$

$$P_{TOT} = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (1 - \prod_1^n q_K) f(v) dv \quad (5.3)$$

donde $\frac{1}{2}$ interviene debido al hecho de que la resistencia a la descarga para ondas negativas excede en una cantidad apreciable a aquella para ondas positivas y por lo tanto sólo éstos necesitan ser consideradas. Gráfico 5.2.

3. EFECTO DE TRUNCACION

Por la característica, misma de la curva Normal, no es necesario integrar desde cero a infinito, sino que (K) desviaciones estandar a ambos lados de la media dan casi la totalidad del área involucrada.

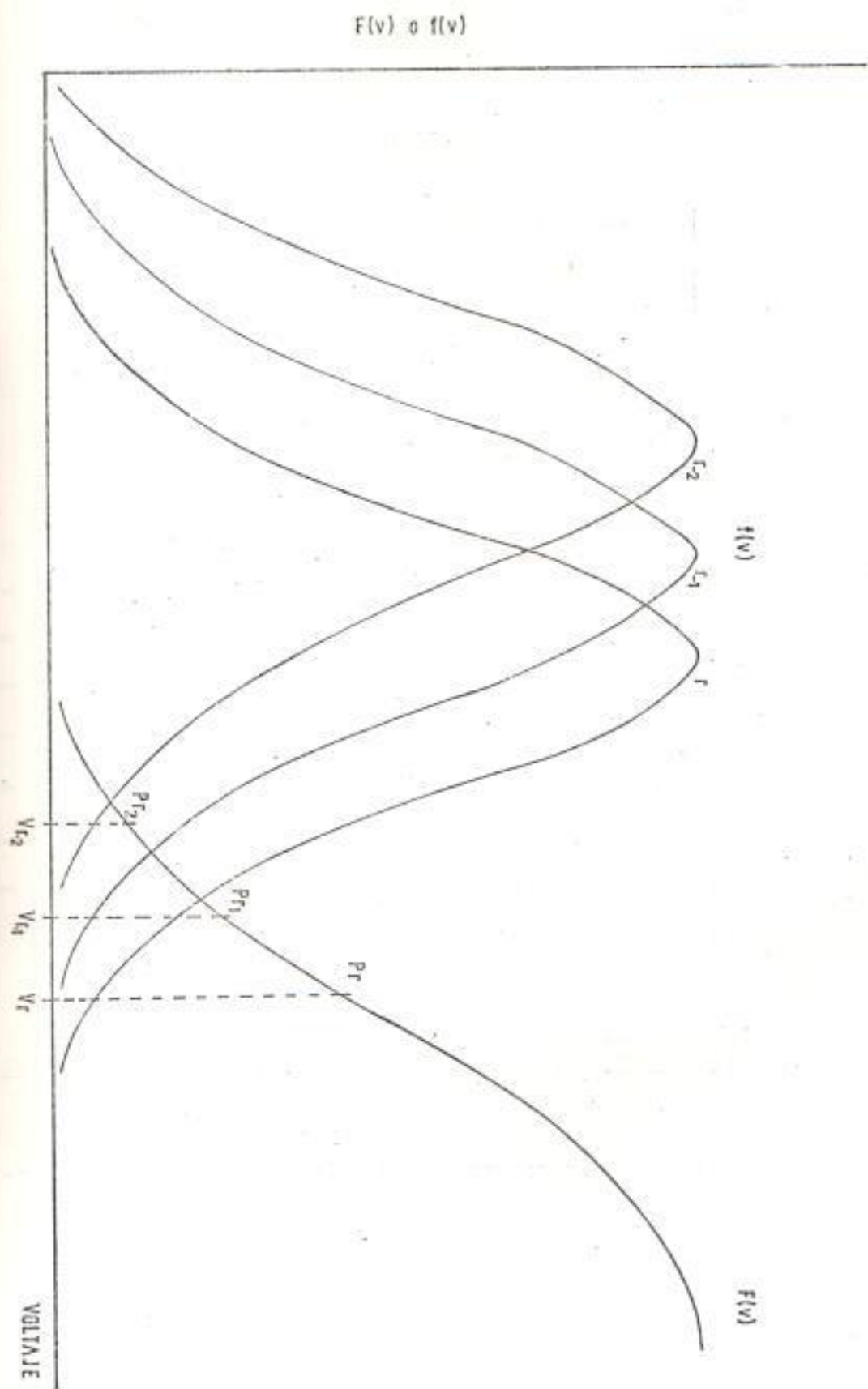


FIG. 5.1

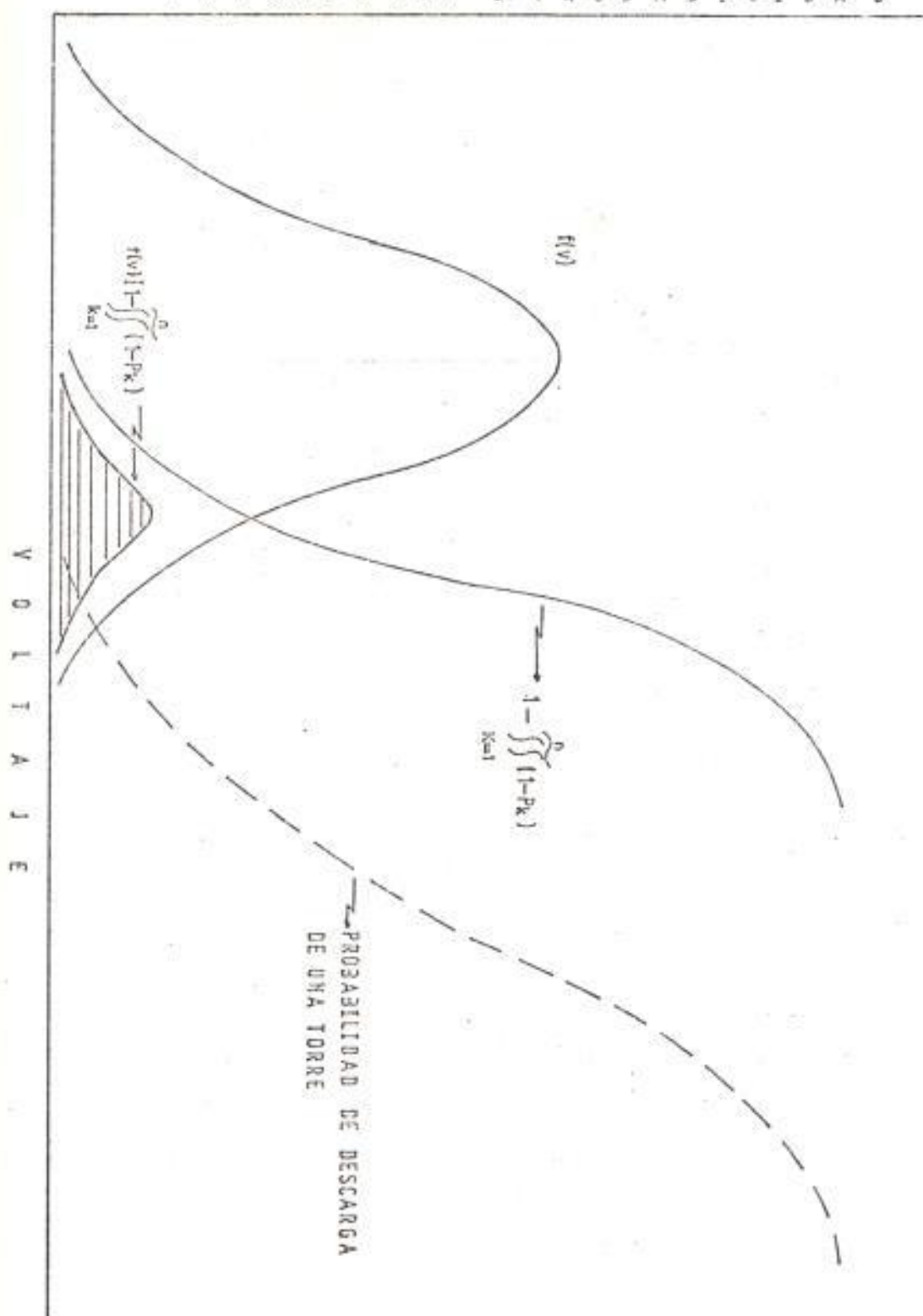


FIG. 5.2

Así dentro de cuatro unidades estandar hacia cada lado de la media existe el 99.994% del área total; dentro de 3 unidades estandar hay el 99,74%, etc.

El efecto de truncación introducirá entonces un error - prácticamente despreciable si escogemos unos límites adecuados.

4. LIMITES DE LA INTEGRACION

El límite está dado por la media de la distribución de sobrevoltajes menos (K) desviaciones estandar, donde (K) lo escogemos de acuerdo a la exactitud deseada. El límite superior viene dado por el máximo sobrevoltaje esperado en el sistema.

5. PROBABILIDAD DE DESCARGA (P_K) DE UNA TORRE

La probabilidad de descarga de una estructura dada, a un voltaje determinado es en realidad una "probabilidad acumulativa", es decir, que hablamos en términos de: la probabilidad de descarga es de $x\%$ para un voltaje de a lo mucho V_y , debido a que puede producirse una descarga para cualquier valor comprendido entre cero y V_y , por la naturaleza misma aleatoria del comportamiento del aislamiento. Estamos hablando entonces de otra integración dentro de la integración ge-

neral y con los mismos límites.

Para su análisis específico con un sobrevoltaje máximo - conocido y un límite inferior también determinado, se debe entonces evaluar antes que todo el valor de P_K . Como utilizamos un método numérico - que se analiza posteriormente- para las integraciones, para cada valor de voltaje se calcula un valor de $(1 - \prod_{k=1}^n q_k)$ se lo multiplica por el valor que para ese voltaje tenga $f(v)$ y se continúa con la integración total.

6. PARAMETROS QUE INTERVIENEN Y CRITERIO PARA LA SELECCION DE LIMITES

Para la distribución de sobrevoltaje los parámetros son:

- Media de sobrevoltajes (U)
- Desviación estandar de sobrevoltajes (σ_U)
- Coeficiente de variabilidad de sobrevoltaje (σ_U/U)

Para la distribución de descargas los parámetros son:

- Media de la distribución de descarga (\bar{V} , "voltaje crítico de descarga).
- Desviación estandar de descarga (σ_V)
- Coeficiente de Variabilidad de descarga (σ_V/\bar{V})

Valores típicos para los coeficientes de variabilidad son:

$$\sigma_U/U = 0.09 \pm 0.03$$

$$\sigma_v/\sigma = 0.05 \pm 0.02$$

Al no haber existido en nuestro país líneas en operación de 138/230 KV, no se ha podido contar con información estadística que permita conocer exactamente cual es la media de los sobrevoltajes que se pueden esperar. Para hacer el diseño del sistema nacional S.W. Price pidió los máximos sobrevoltajes de maniobra que se esperan en cada tramo del sistema. De esta manera -dependiendo del buen criterio del diseñador- se puede asumir una media (u) en base a asignar una probabilidad de ocurrencia a esos máximos sobrevoltajes.

Así: Para la línea Sto. Domingo-Esmeraldas 138 KV, el máximo sobrevoltajes esperado es de 4.03 pu.

Asumo que (sobrevoltajes mayores a este tendrán solo una probabilidad de ocurrencia) del 2.28% por lo tanto:

$$\begin{aligned}
 U &= \text{Max. Sob.} - 2 \sigma_0 \\
 \sigma_0 &= \sigma_{0/u} * U \\
 \text{y } U &= \frac{\text{Max. Sob}}{1.0 - 2.0 * \sigma_0} \quad (5.4)
 \end{aligned}$$

Continuando, el límite inferior de integración será entonces:

$$\text{Min } U = U - K * \sigma_0 \quad (5.5)$$

en el programa P B R O F que hemos desarrollado trabajamos - con un valor de K de 4.0.

Según tablas estadísticas para valores de (z) de 4.00 el área bajo la curva gaussiana que queda fuera del límite es del orden 10^{-5} .

Debemos anotar además que en la subrutina de PLOT incluimos una variable $\text{MINCF} = \bar{V} - K_1 \sigma_F$ que se compara con el valor MINU del programa principal y que en caso de ser menor dá directamente probabilidad de falla cero. Este paso de programación lo hemos incluido por dos motivos principales:

- a) Porque el método de integración necesita en su parte inicial que los valores límites de la función que evalúa, tengan una diferencia mayor a la tolerancia admitida.
- b) Porque el tiempo de computación depende directamente de la cobertura de los límites de integración, si bien será tanto, más exacto cuando menos restricciones les hagamos.

Como acotación adicional en este punto de bemos anotar que en forma experimental se ha determinado que el comportamiento del aislamiento de una estructura a sobrevoltajes por manobra sigue una forma gaussiana hasta cierto límite a partir de su media, por lo cual no se puede integrar de cero a infinito, sino que necesariamente hay que hacer restricciones a los límites.

Hemos trabajado con valores de MINCF del 80 y 66.25% del

del (\bar{V}) es decir con valores de K_1 de 4 y 6.75 respectivamente. En el primer caso cada salida del programa es decir un cálculo de probabilidad de falla toma de 1.5 a 2.5 minutos.

Para MINCF de 66.25% el tiempo sube exponencialmente a lapsos de 5 - 15 minutos. Las curvas que demuestran la influencia de los diversos parámetros en el comportamiento de la línea se han obtenido con MINCF de 80% y en el ejemplo de diseño de la línea 138 KV zona 2 se ha trabajado con un K_1 de 6.75 buscando mayor exactitud.

Es recomendable utilizar este último valor sólo para rangos $R = \frac{(\bar{V})}{\text{Max. Sob.}}$ iguales o mayores a 1.2, teniendo en consideración tanto la exactitud como el tiempo de computación necesarios.

5.7. INFLUENCIA DE σ_0 y σ_0/U

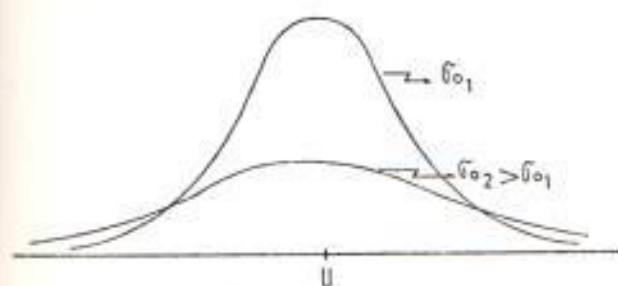


FIG. 5.3

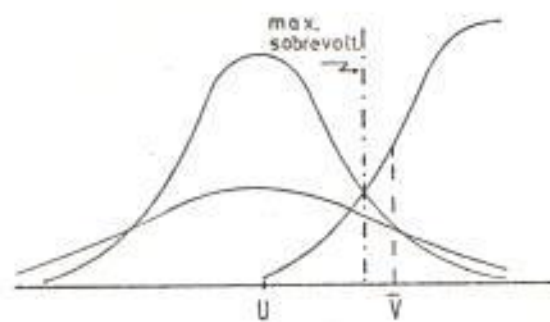


FIG. 5.4

Se ve claramente como disminuye el área para σ_0 en comparación de σ_0 .

8. INFLUENCIA DE σ_F y σ_F/\bar{V}

A σ_F lo definimos como:

$$\sigma_F = \sigma_{F/\bar{V}} \bar{V} \quad (5.6)$$

por lo tanto el aumentar $\sigma_{F/\bar{V}}$ o (\bar{V}) aumenta el valor de la desviación estándar de descargas.

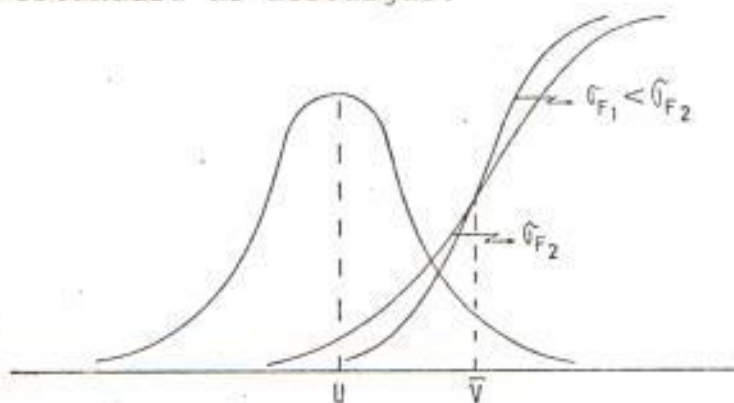


FIG. 5.5

La probabilidad total de falla disminuye al disminuir σ_F como se desprende de la Fig. 5.5. Por lo tanto mientras menor sea σ_F mayor será el número de ondas necesarias para producir una falla.

9. INFLUENCIA DEL MAXIMO SOBREVOLTAJE

Como es lógico un mayor sobrevoltaje produce una mayor probabilidad de falla para cualquier condición que analicemos.

II. INFLUENCIA DEL NUMERO DE TORRES

De acuerdo a la teoría ya desarrollada sabemos que al aumentar el número de dieléctricos en paralelo aumenta la probabilidad de falla de aislamiento.

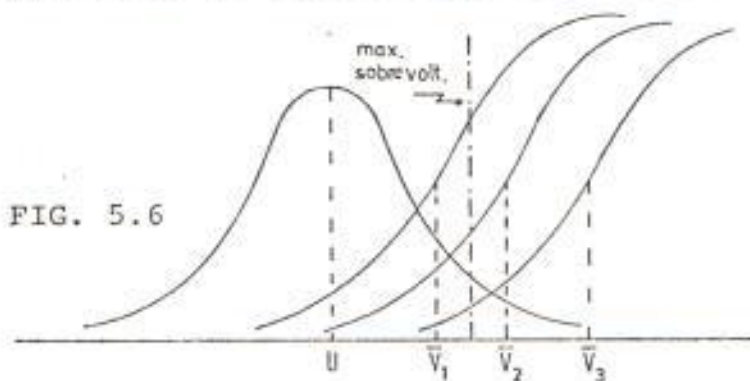
Así de la ecuación:

$$PTOT = \frac{\text{max. sobrevol.}}{U - 4\sigma_0} \int \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_0} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{x-U}{\sigma_0}\right)^2} \times \left(1 - \left(1 - \frac{\text{max. sob.}}{\sqrt{2\pi}\sigma_F} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y-\bar{V}}{\sigma_F}\right)^2}\right)^N\right) dy \quad (5.7)$$

DONDE N = Número de torres, se deduce que mientras mayor sea N, será PTOT menor.

III. INFLUENCIA DEL \bar{V}

A medida que una estructura es más resistente a las ondas de maniobra es de esperar que la probabilidad de falla de la misma y por ende de toda la línea sea menor.



De la figura anterior se deduce que para $\bar{V}_{(3)}$ la probabilidad de sostenido es mucho mayor que para los otros casos mostrados.

12. INFLUENCIA DE U

A medida que la media de los sobrevoltajes disminuye y si mantenemos cte. σ_o , disminuye también la probabilidad de falla de la línea, por cuanto equivale a decir que disminuimos el máximo sobrevoltajes al haber definido de esa forma el valor de U.

13. FORMA EN QUE TRABAJA PROBF Y CRITERIOS GENERALES

El programa de computación PROBF se basa fundamentalmente en la aplicación repetitiva de un proceso de integración numérica (descrito en detalle en el anexo 3) para la resolución de la ecuación 5.7.

Dentro de la subrutina IFCT se utiliza este método de integración para encontrar la probabilidad acumulativa de que se produzca una falla del aislamiento. Para cada voltaje llama a su vez a la función FCT para que calcule una probabilidad puntual de falla. El valor resultado de IFCT es utilizado en la función PTOT la cual evalúa así mismo para cada voltaje la probabilidad de falla de la línea.

Dentro del programa principal se utiliza el método numérico de integración para encontrar finalmente la probabilidad total de falla de la línea, basándose en los valores que

para cada voltaje le proporciona la función PTOT.

Esta somera explicación de la forma en que trabaja el programa se complementa con los diagramas de flujo y los comentarios en el listado del programa.

En los estudios específicos que se hagan en el país - siempre se topará con el problema de ausencia de datos estadísticos. Había notado ya ciertos valores recomendados - por autores norteamericanos en la literatura consultada y que son producto de la experiencia de muchos años en este campo, por lo cual son datos valiosos cuando no se tiene información. Sin embargo voy a anotar los criterios que a mi manera de ver se deben adoptar al trabajar con fenómenos de esta naturaleza y por ende con programas de computadora como el presentado.

3.1. Selección del Máximo Sobrevoltaje

Asignar una probabilidad del 2% de ocurrencia para sobrevoltajes superiores al máximo sobrevoltaje que se espera, me parece bastante seguro, especialmente si se considera que en el cálculo realizado anteriormente de los sobrevoltajes de maniobra ya deben estar incluidos ciertos márgenes de tolerancia.

1.2. Selección de la media de los sobrevoltajes

Si conocemos un máximo sobrevoltaje y le hemos asignado una probabilidad nos resta definir un σ_0/U inicial para situar a la media. En este caso vale adoptar un criterio medio de seguridad y lo que hemos hecho es trabajar con un valor medio de σ_0/U 9% por ejemplo. Si se quiere trabajar conservadoramente se debe elegir un σ_0/U mayor (12, 11, 10%).

1.3. Selección de los valores $\sigma F/\bar{V}$ y σ_0/U

El valor de $\sigma F/\bar{V}$ es determinante en el cálculo total, un cambio de 1% en su valor introduce cambios considerables. Nuevamente se sugiere un valor intermedio de 5%.

El parámetro σ_0/U no sólo influye en la ubicación de la media de los sobrevoltajes según la hemos definido, sino que en la propia forma de la distribución. Su influencia no es decisiva en esta segunda parte y puede trabajarse con valores bajos de σ_0/U (6%, 7%).

6. DESCRIPCION DEL PROGRAMA (PROF), ANALISIS DE RESULTADOS Y APLICACION

1. INTRODUCCION

Antes de entrar a los diagramas de flujo del programa y el análisis de resultados (en base a gráficos que se adjuntan), anotamos aquí el procedimiento seguido para comprobar el comportamiento del aislamiento cuando vamos variando los parámetros que intervienen:

a) Al cambiar $\sigma F/\bar{V}$ no cambia \bar{V} .

Con esto analizamos como influye en la probabilidad de falla el hecho de variar la distribución de descargas.

b) Al cambiar σ_0/U no cambia U , con el mismo criterio anterior.

c) Al variar (\bar{V}) mantenemos constante ($\sigma F/\bar{V}$) por cuanto este coeficiente es el que sirve como comparativo entre dos distribuciones de parámetros diferentes.

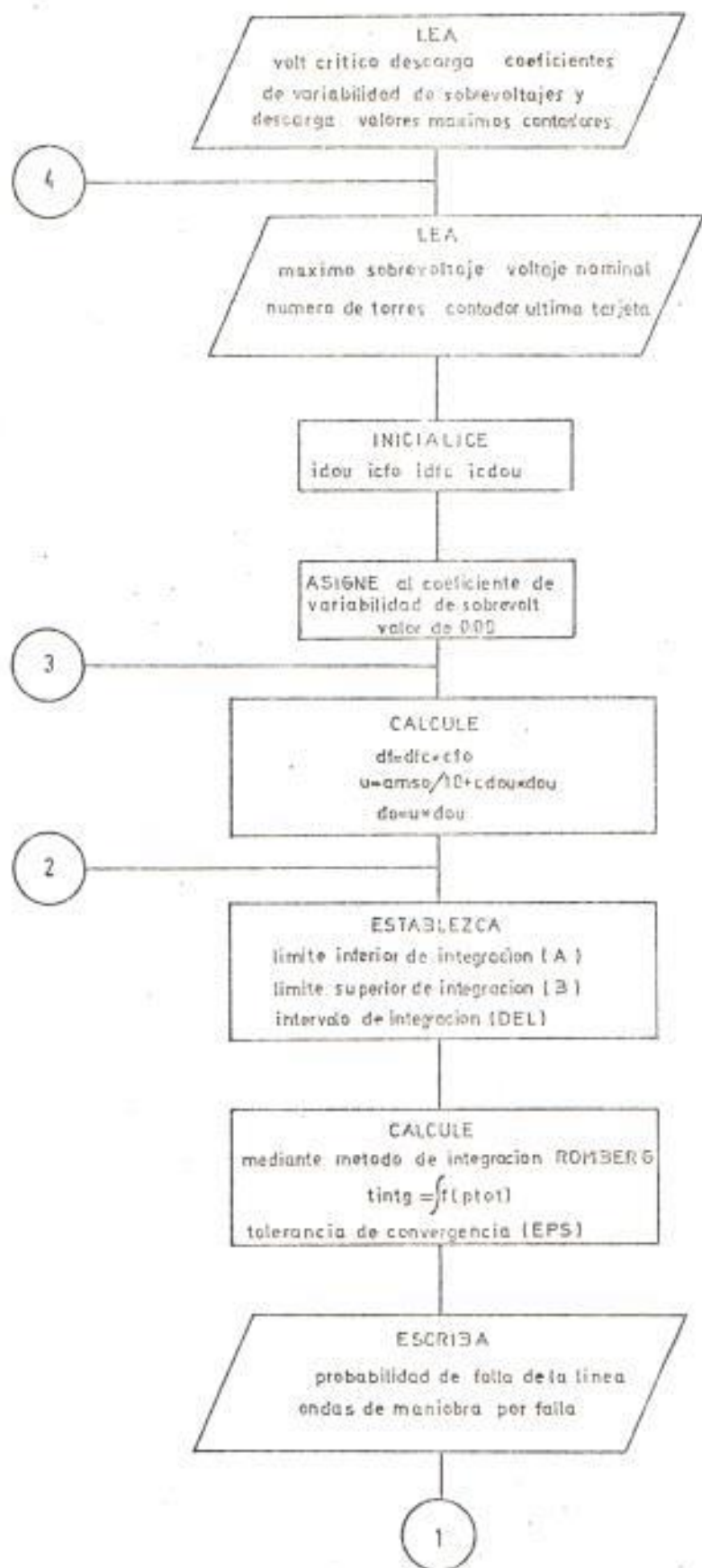
d) Al cambiar (U) mantenemos cte. σ_0/U con el mismo criterio anterior.

2. PRINCIPALES VARIABLES QUE UTILIZA Y SU REPRESENTACION

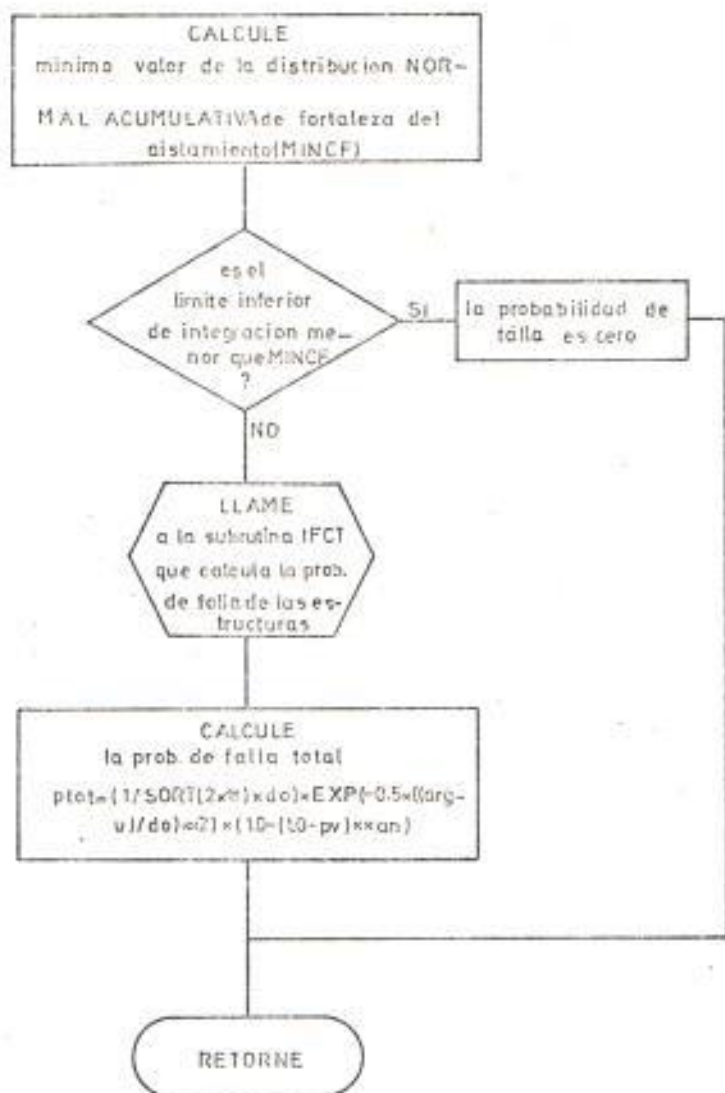
Para su mejor comprensión esta parte debe ser complementada tanto con los diagramas de flujo como con los comentarios del listado del programa que se adjunta en el anexo 5. Las principales variables que utiliza el programa principal y sus

subprogramas son:

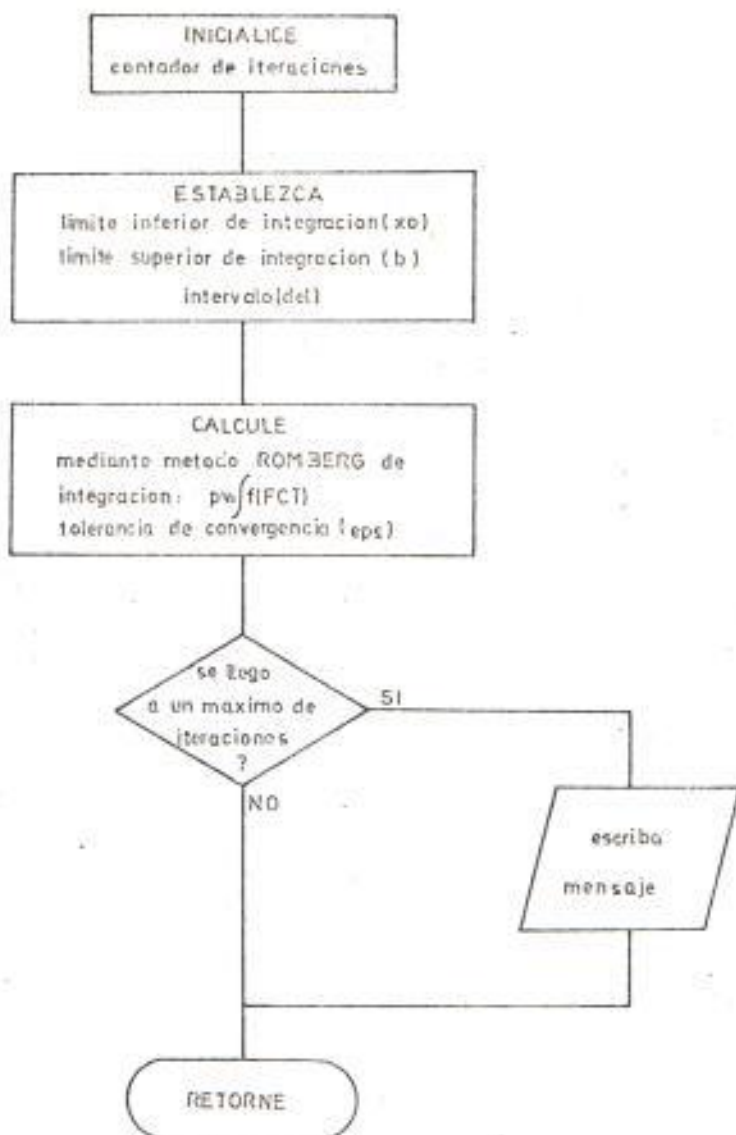
- VN : Voltaje Nominal del sistema en kilo Voltios línea a línea.
- AMSO: Máximo sobrevoltaje en por unidad.
- AN : Número de torres que componen la línea.
- CDOU: Probabilidad de sobrevoltajes mayores al máximo.
- CFO : Voltaje crítico de descarga, en kilo voltios pico.
- DFC : Coeficiente de variabilidad de descargas.
- DOU : Coeficiente de variabilidad de sobrevoltajes.
- U : Media de los sobrevoltajes.
- MINU: Límite mínimo de sobrevoltajes
- DO : Desviación estandar de sobrevoltajes.
- DF : Desviación estandar de descargas.
- EPS : Tolerancia del método de integración
- MINCF: Límite mínimo de descargas
- FCT : Probabilidad de descarga para cada voltaje.
- PV : Probabilidad de descarga de una estructura.
- PTOT : Probabilidad de descarga de la línea.



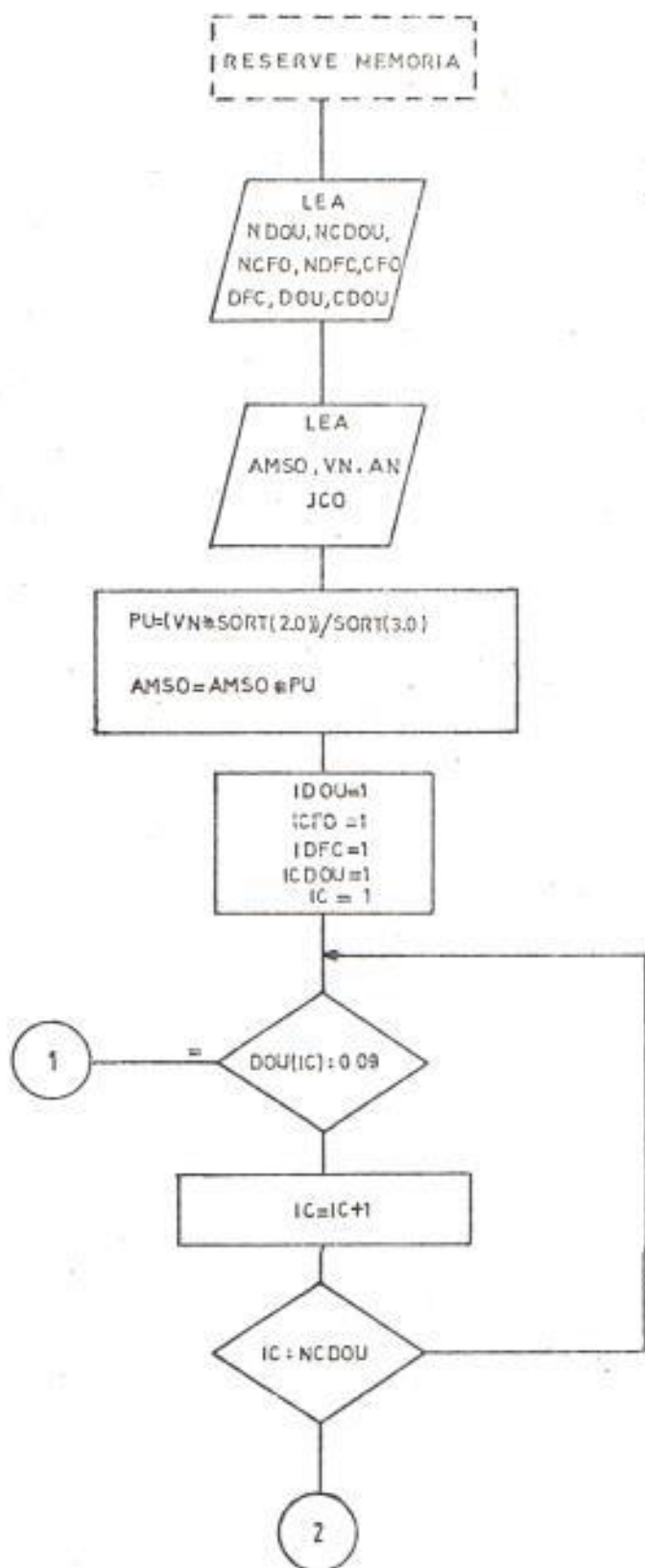
6.3.1. Diagrama de Flujo simplificado de la función (PTOT)

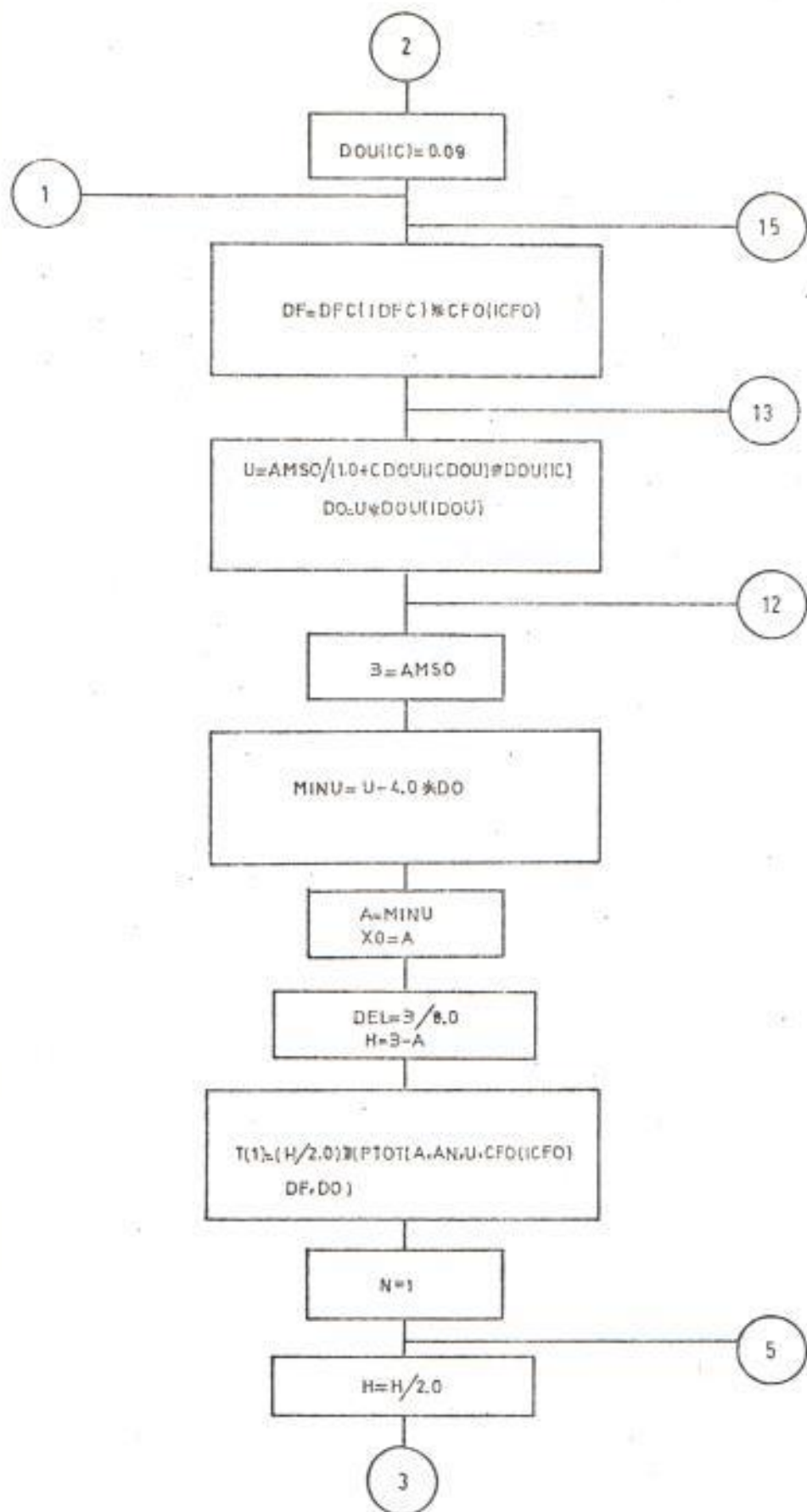


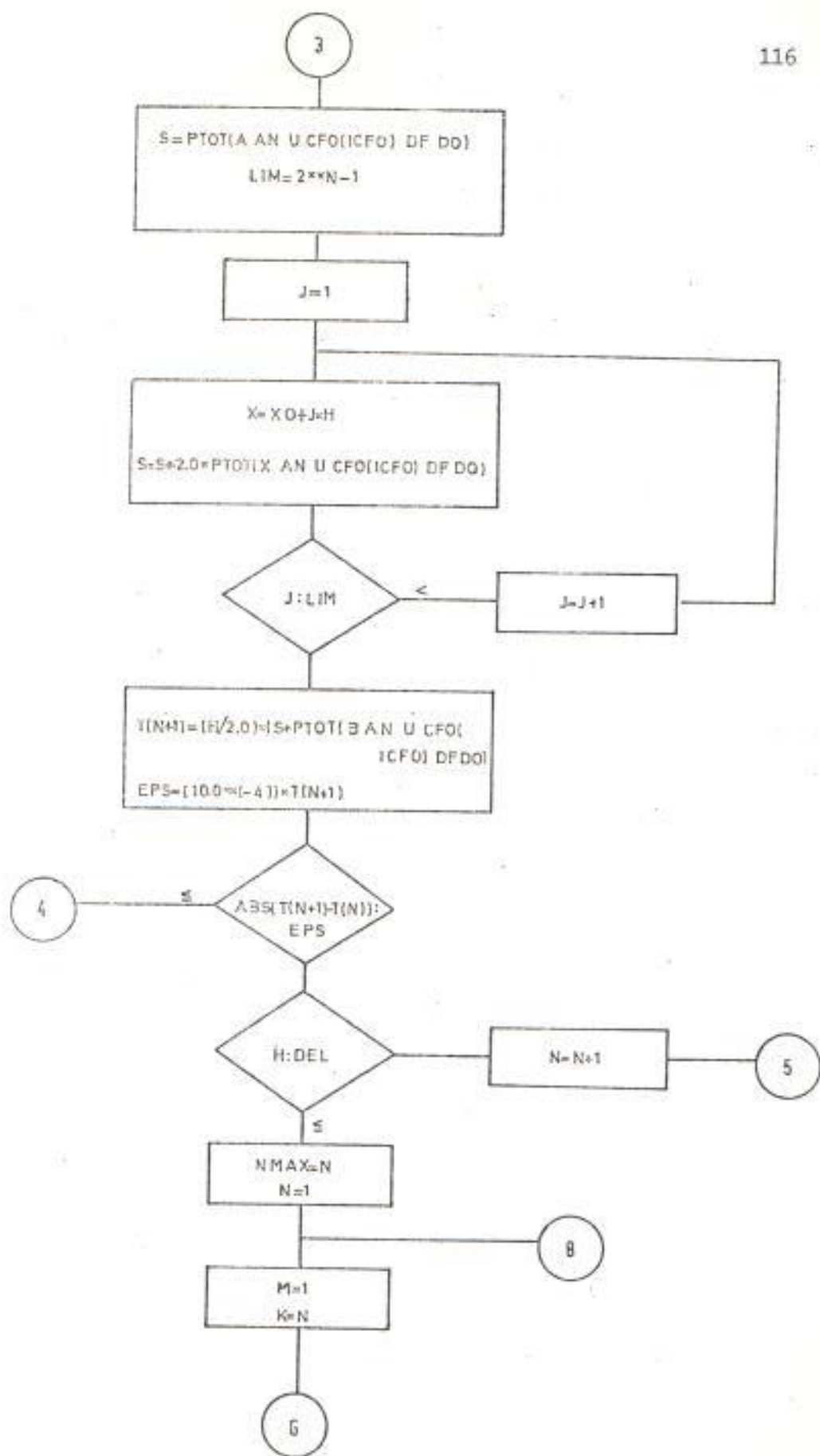
6.3.2. Diagrama de flujo simplificado de subrutina (IPCT)

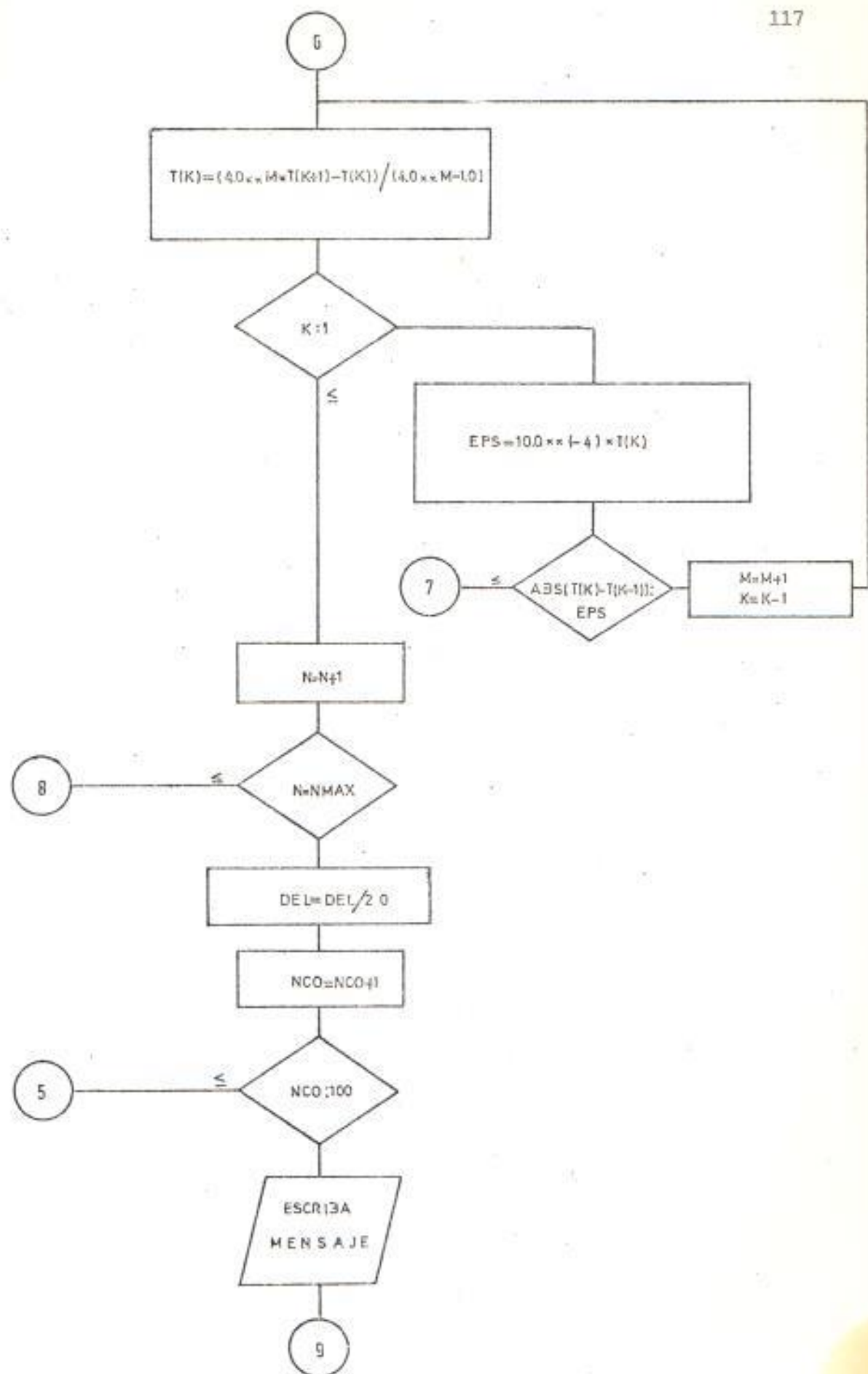


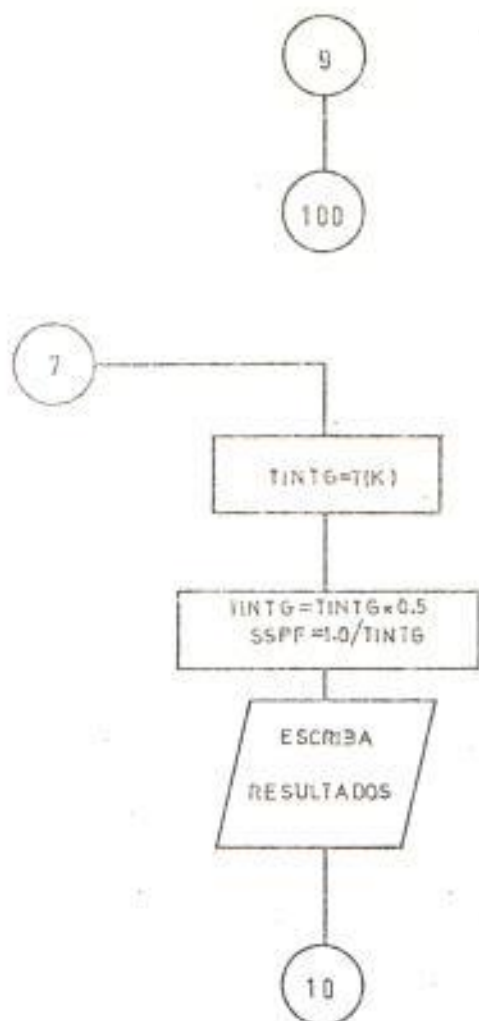
6.3.3. Diagrama de Flujo detallado del programa (PROBF)

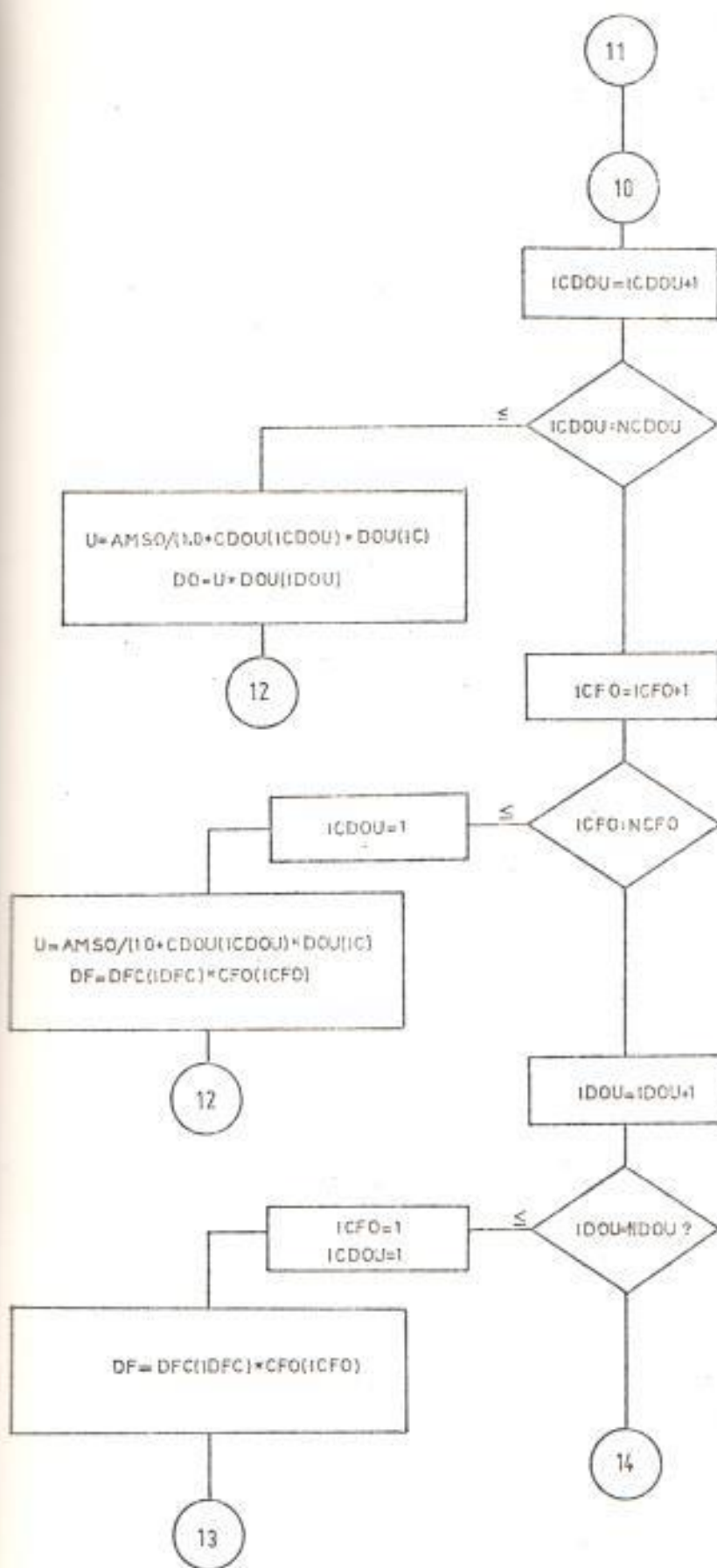


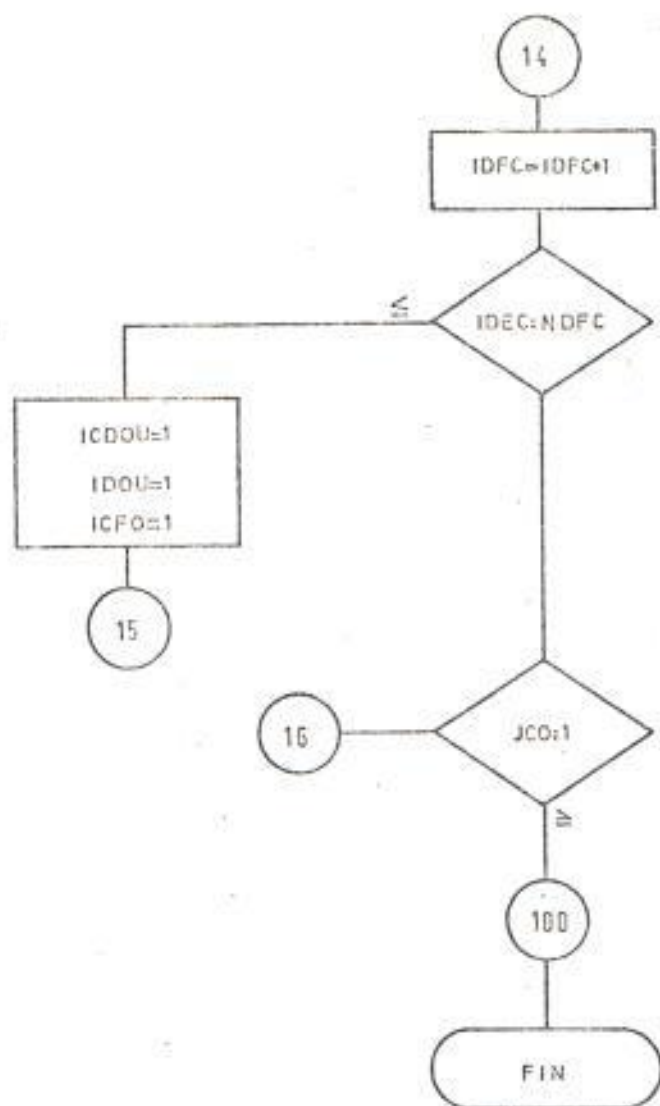




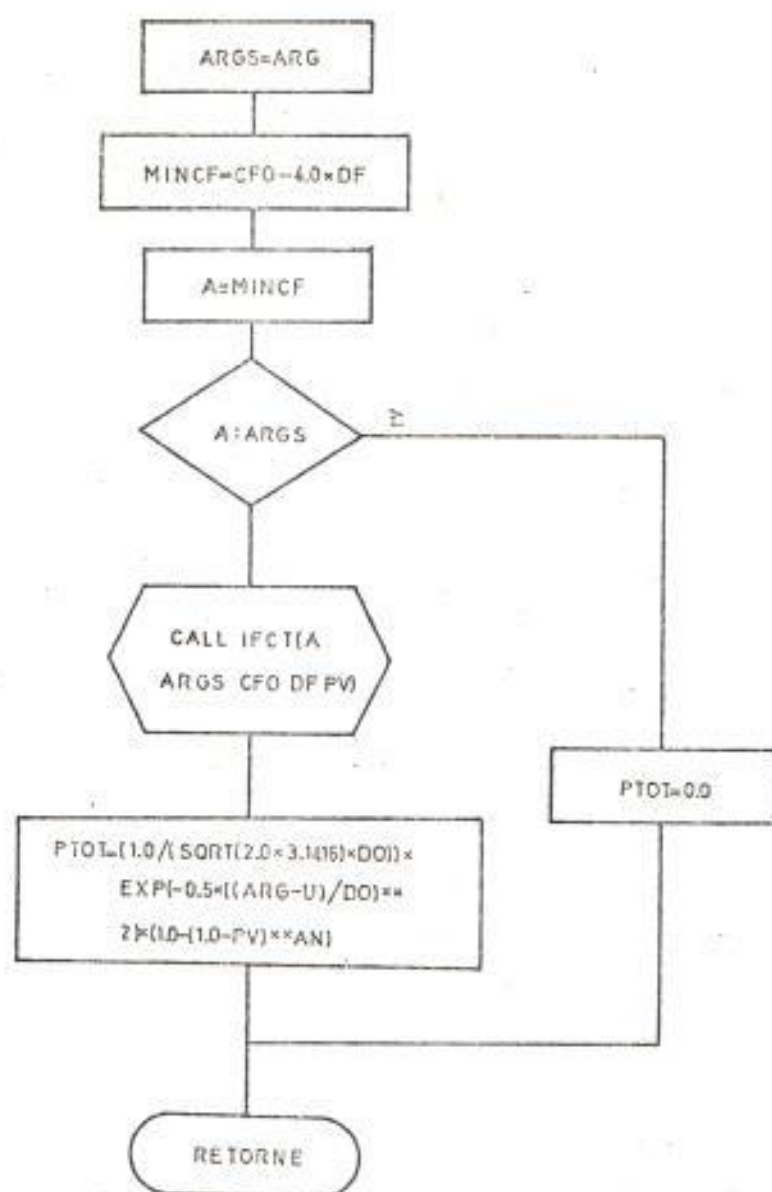




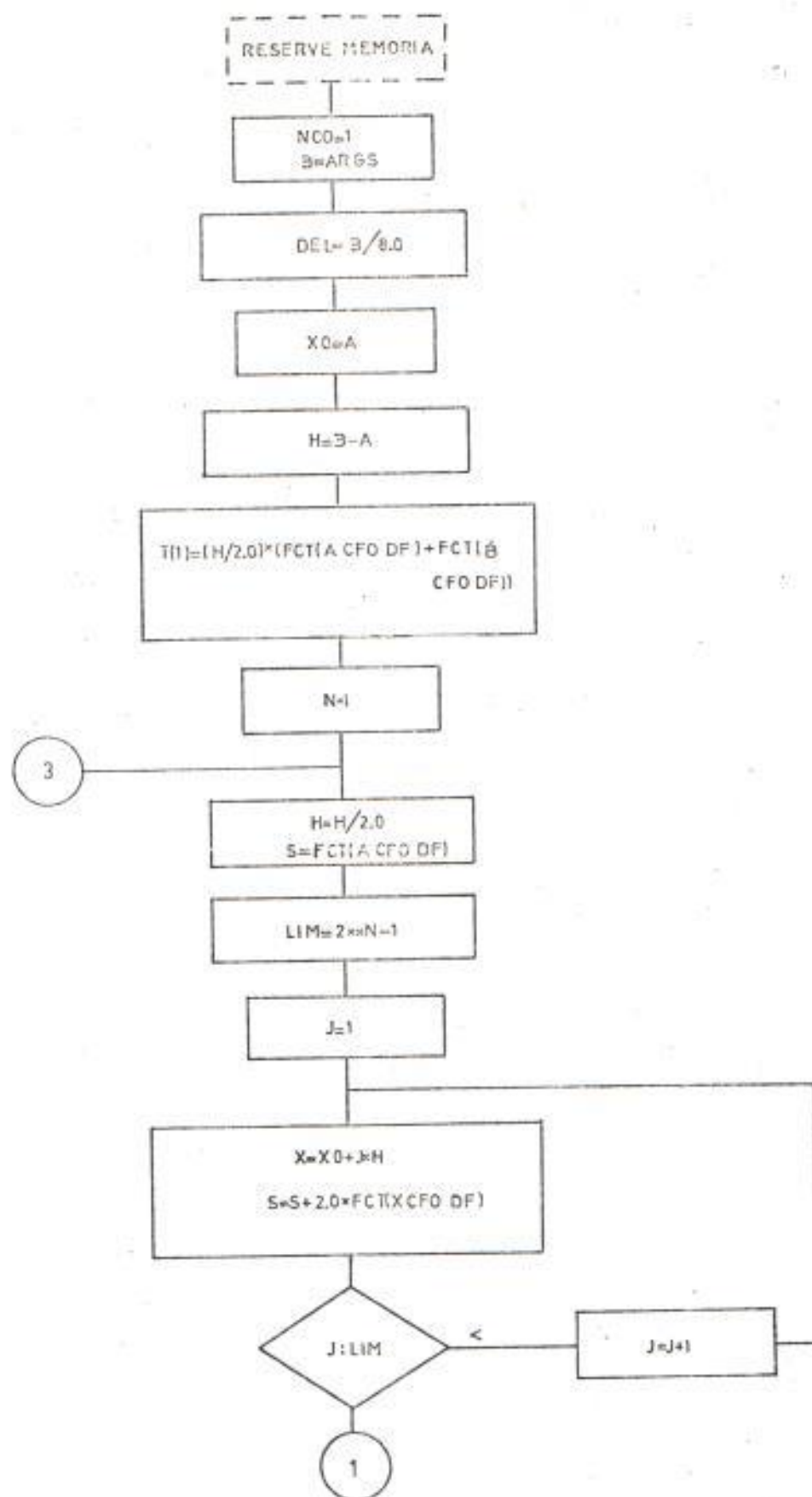


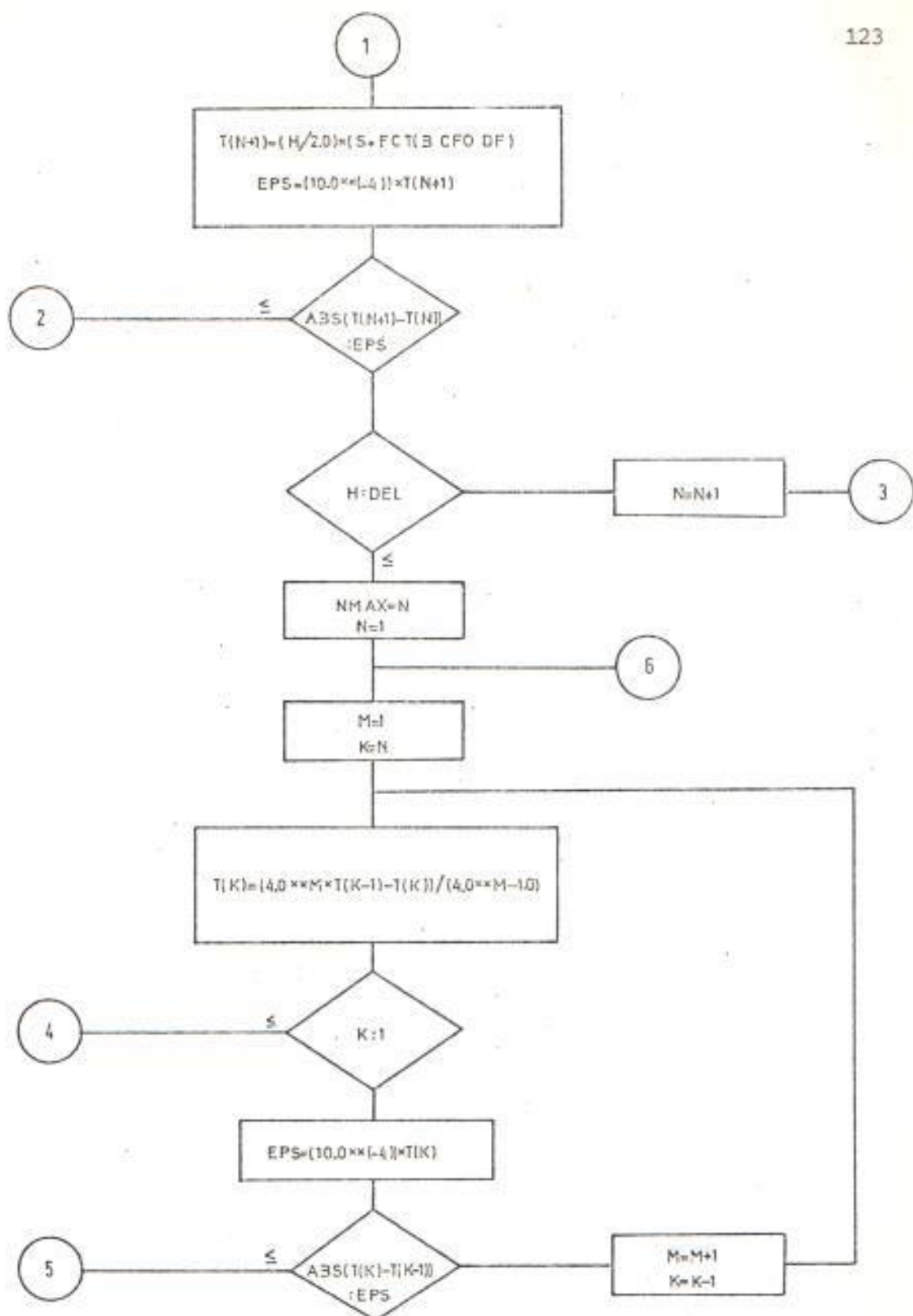


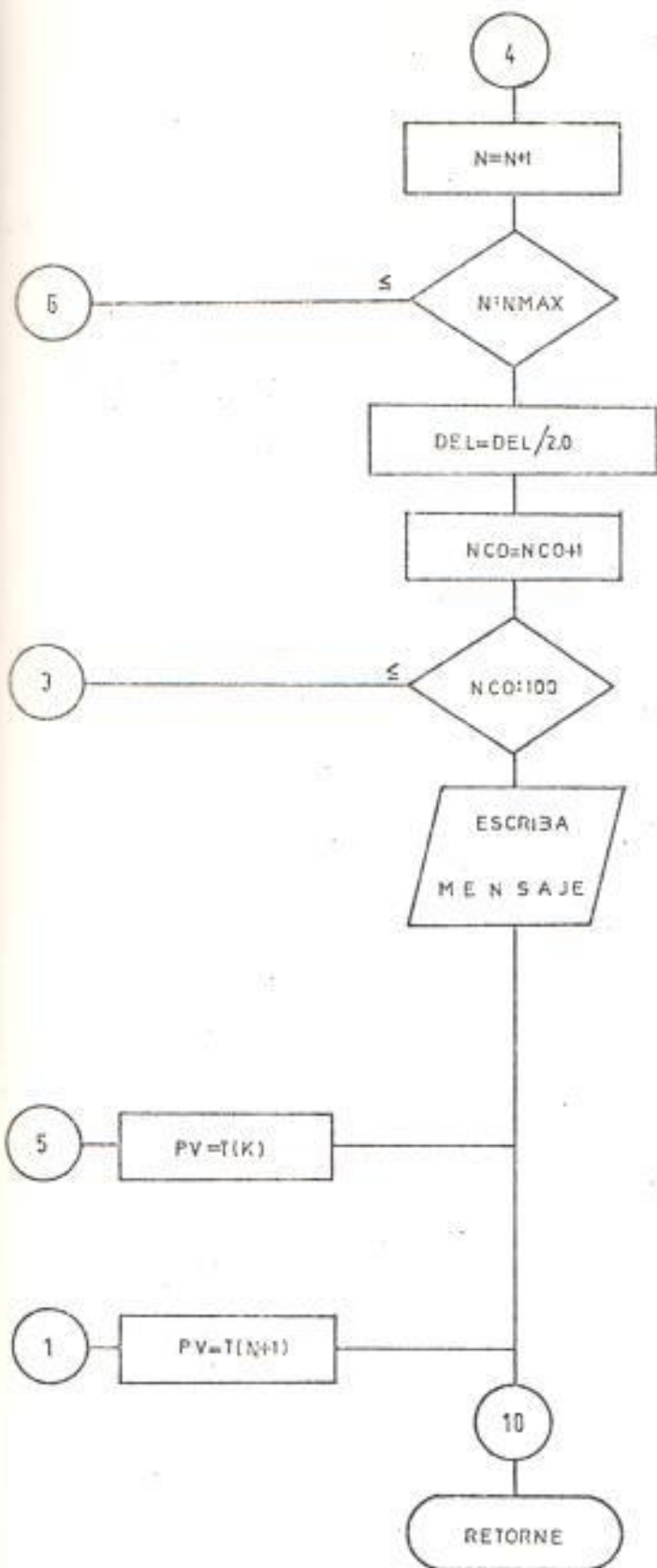
6.3.4. Diagrama de Flujo detallado de la función (PTOT)



6.3.5. Diagrama de Flujo detallado de la función (IFCT)







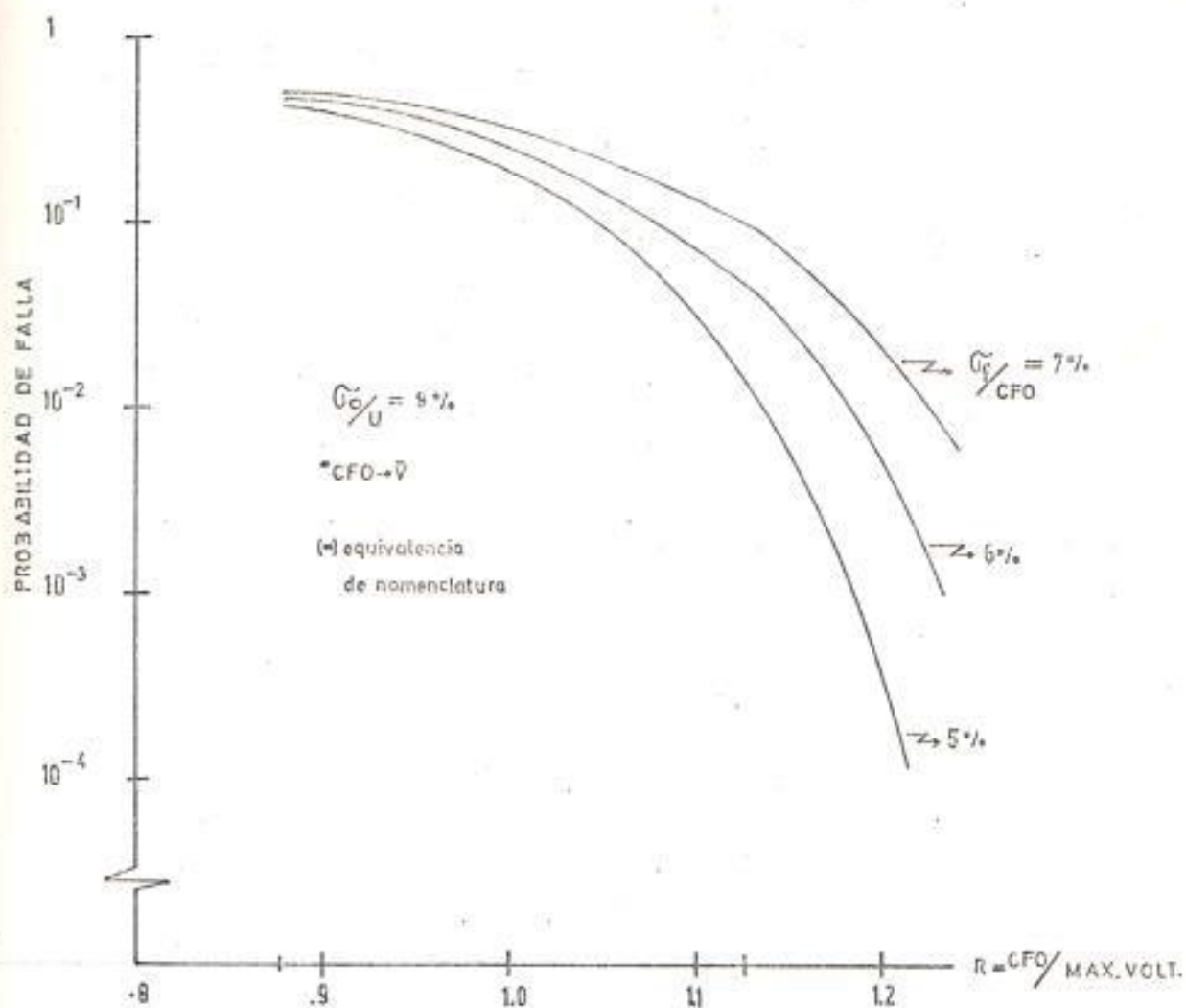
6.4. ANALISIS DE RESULTADOS EN CUANTO A LA INFLUENCIA DE LOS DIFERENTES PARAMETROS EN LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA.

En general todos los resultados concuerdan con la teoría expuesta hasta aquí y están sintetizados en las figuras: 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 y 6.5; los cuales son el resultado de graficar las correspondientes salidas del programa de computación.

Vale analizar si, lo que ocurre cuando al aumentar σ_0/U paulatinamente, hay un cierto valor $R = \frac{\bar{V}}{\text{Max. Sob.}} 1.05$, pasado el cual la probabilidad de falla ya no disminuye sino que comienza a aumentar.

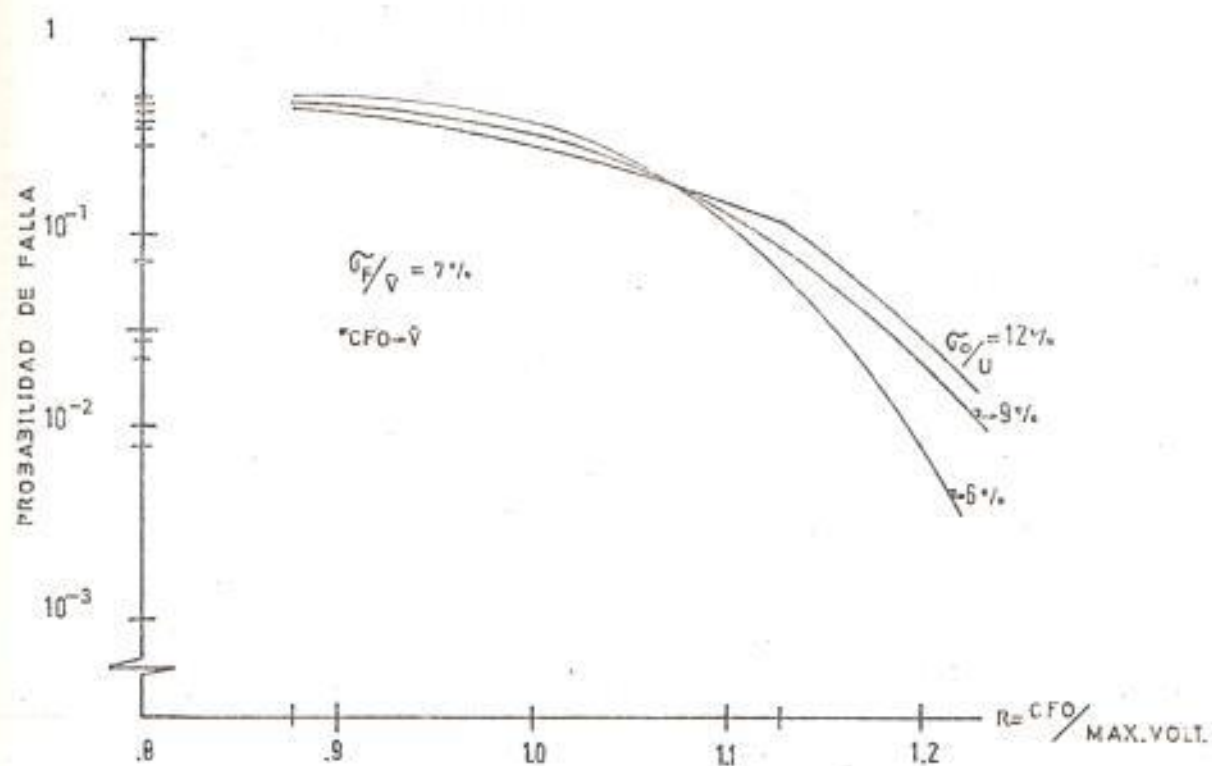
De la Fig. 6.6 se observa que para un \bar{V}_1 predomina la distribución con σ_{01} y por lo tanto la probabilidad de falla total de la línea es mayor mientras menor sea σ_0 . Para un \bar{V}_2 mayor al anterior, entramos a un área donde la predominante es la distribución con σ_{02} y consecuentemente la probabilidad de falla disminuye mientras menor sea σ_0 . Este efecto se hace más notorio a medida de que (R) aumenta.

FIG. 6.1



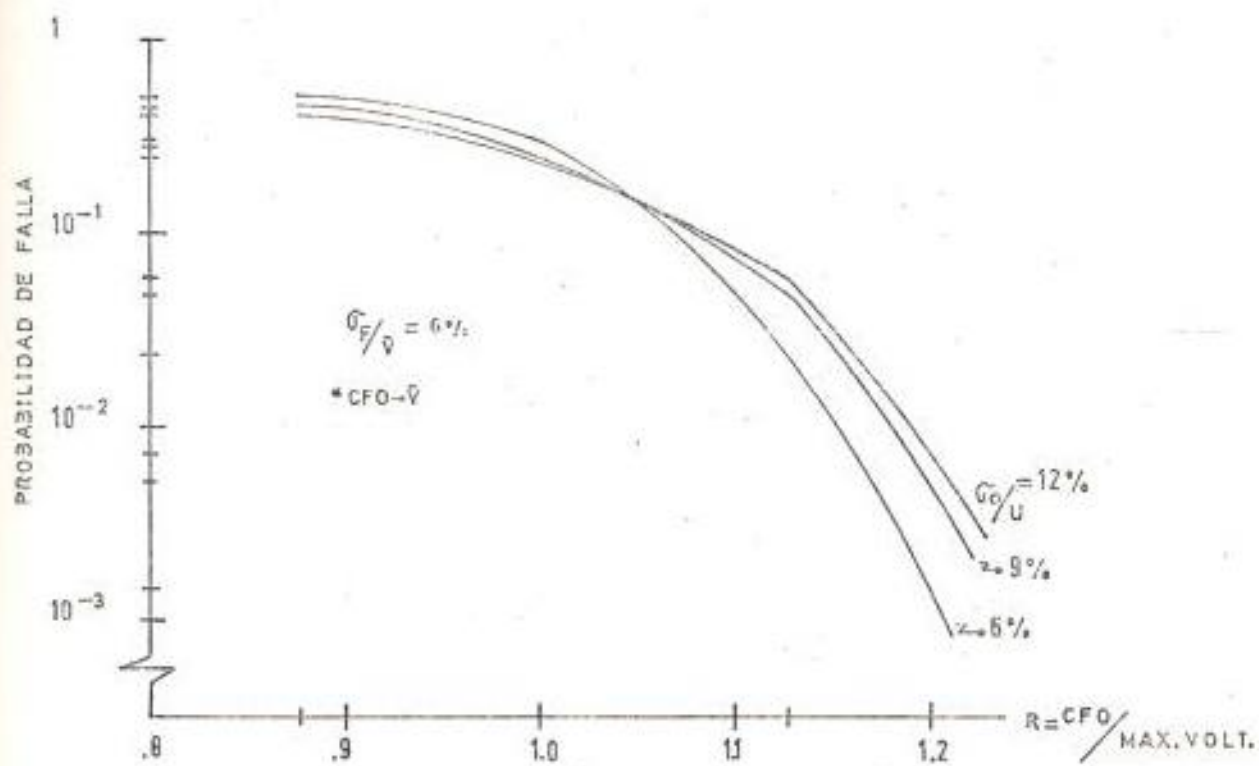
INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR DE DESCARGAS
 EN LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA DE UNA LINEA DE
 TRANSMISION

FIG. 6.2



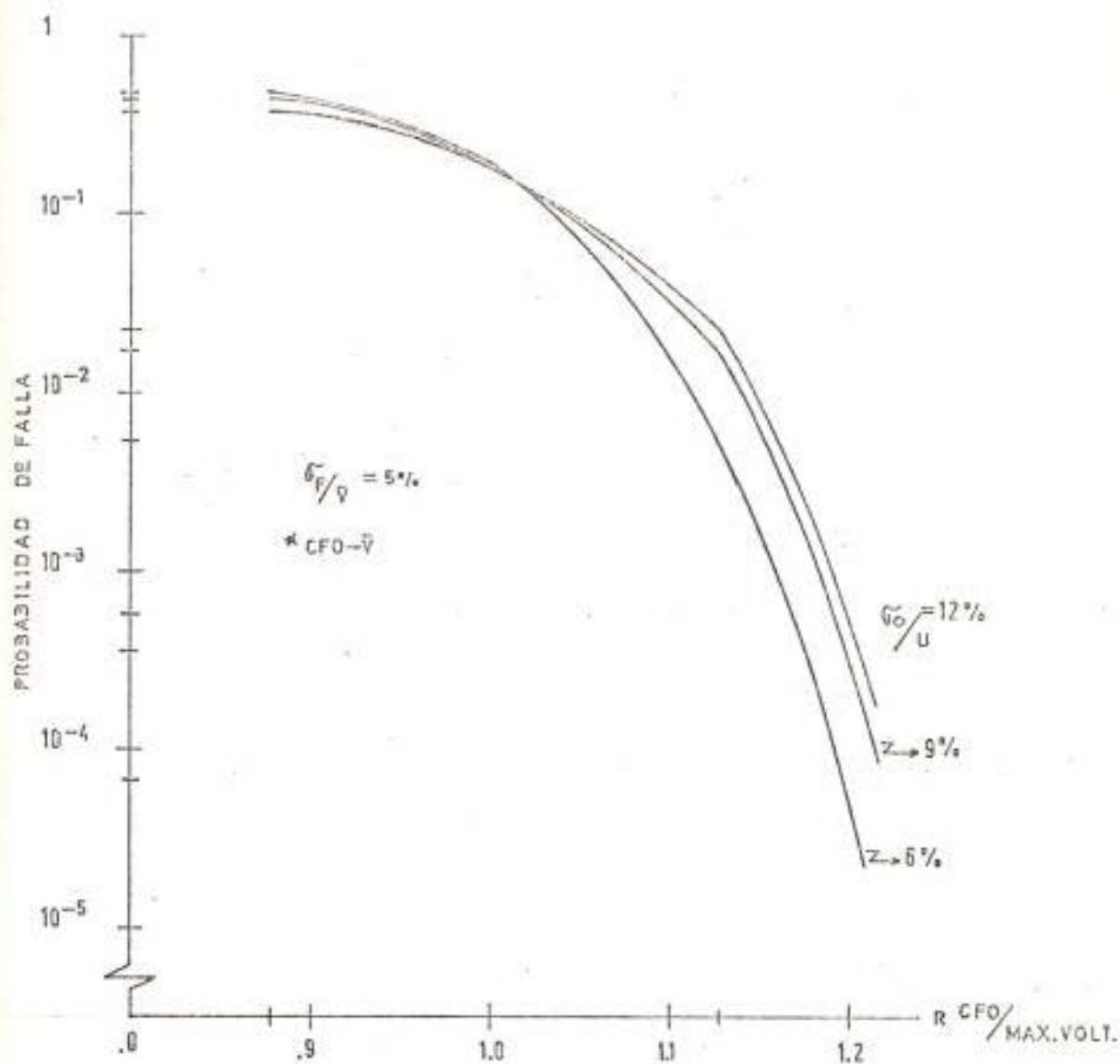
INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR DE SOBREVOLTAJES
 EN LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA DE UNA LINEA DE
 TRANSMISION

FIG. 6.3



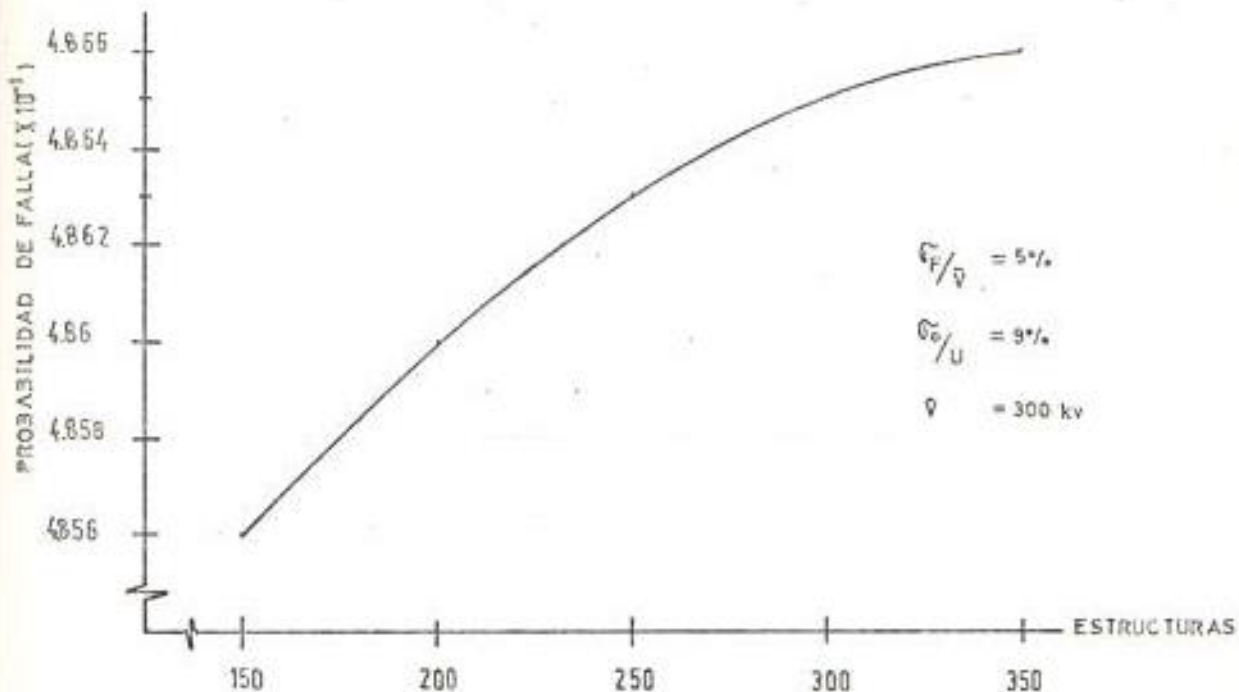
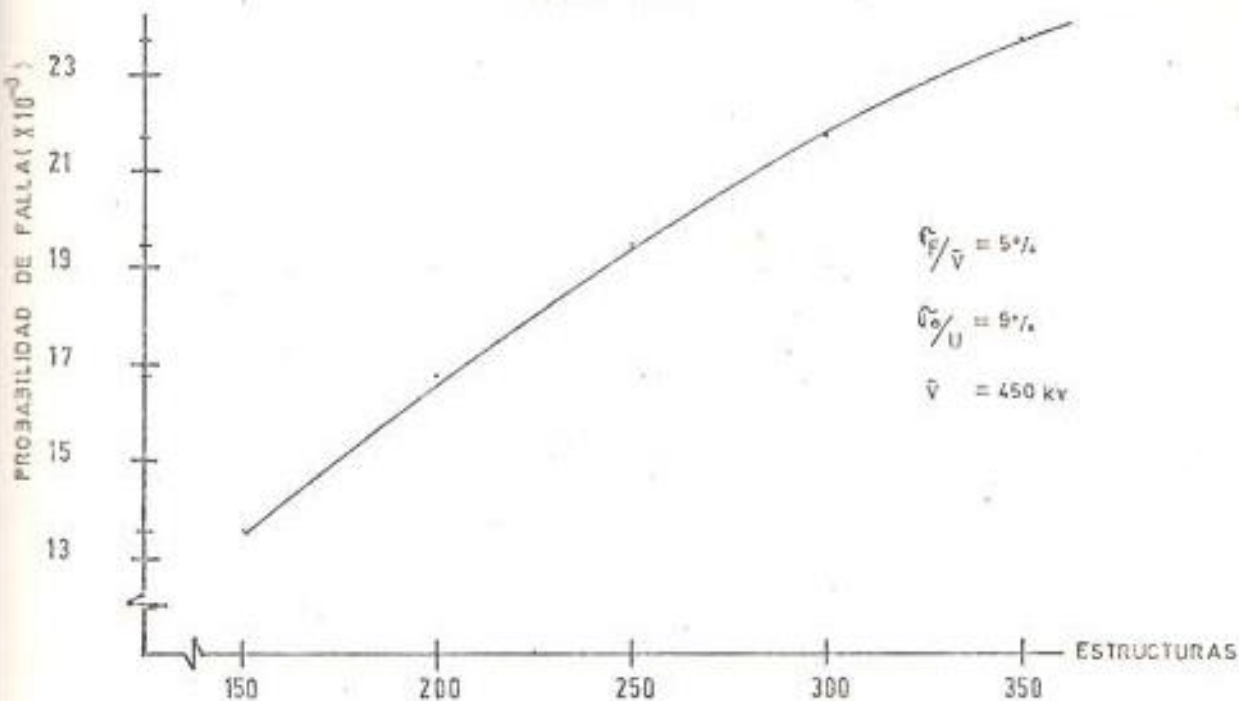
INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR DE SOBREVOLTAJES
 EN LA PROBABILIDAD TOTAL DE FALLA DE UNA LINEA DE
 TRANSMISION

FIG. 6.4



INFLUENCIA DE LA DESVIACION ESTANDAR DE SOBREVOLTAJES
EN LA PROBABILIDAD DE FALLA TOTAL PARA UNA LINEA DE
TRANSMISION

FIG. 6.5



INFLUENCIA DEL NUMERO DE ESTRUCTURAS EN LA PROBABILIDAD DE FALLA DE UNA LINEA DE TRANSMISION

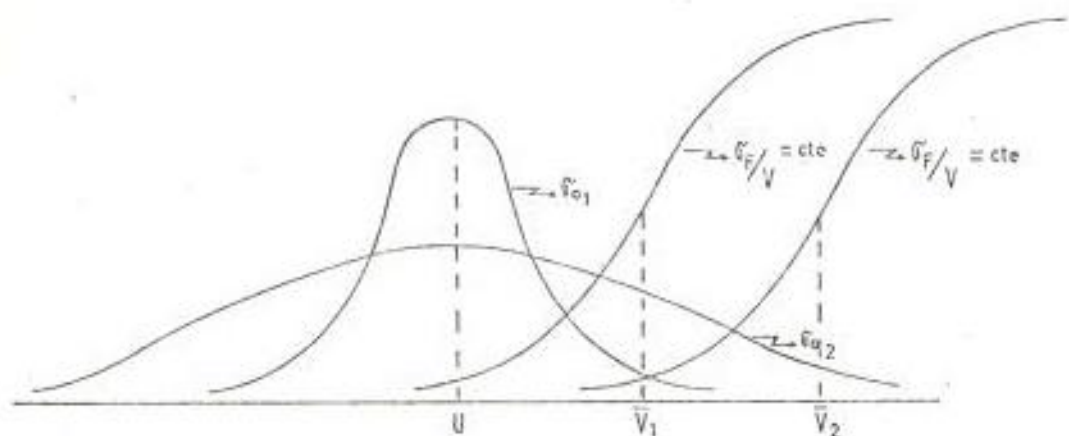


FIG. 6.6

6.5. EJEMPLO DE APLICACION PARA UNA LINEA DEL SISTEMA NACIONAL

Para probar nuestro programa con un diseño específico, hemos escogido una línea a 138 KV Zona 2 cuyo estudio correspondiente realizó W.S. Price consultor Norteamericano y con cuyos resultados comparé los míos a manera de referencia.

5.1. Datos necesarios

- Voltaje Nominal (L-L) ;
- Máximo sobrevoltaje (p.u)
- Probabilidad de ocurrencia de sobrevoltaje mayores al máximo;
- Número de torres que componen la línea;

- e) Diferentes voltajes críticos de Descarga a considerar (KV pico).
- f) Coeficiente de Variabilidad de sobrevoltajes;
- g) Coeficiente de variabilidad de descargas.

En el orden mencionado los datos son:

a. 138 KV

b. 3.54

c. 2%

d. 200

e. 370	391	397	414	418	422	439	440
442	444	461	465	474	480	484	487
509	511	521	535	555	568	563	580
598							

f. 0.05

g. 0.12

5.2. Nivel de diseño

El nivel de diseño adoptado es de 1000 ondas de maniobra por una falla, eligiéndose con este criterio combinación óptima de aisladores y distancias libres en base a un criterio netamente económico.

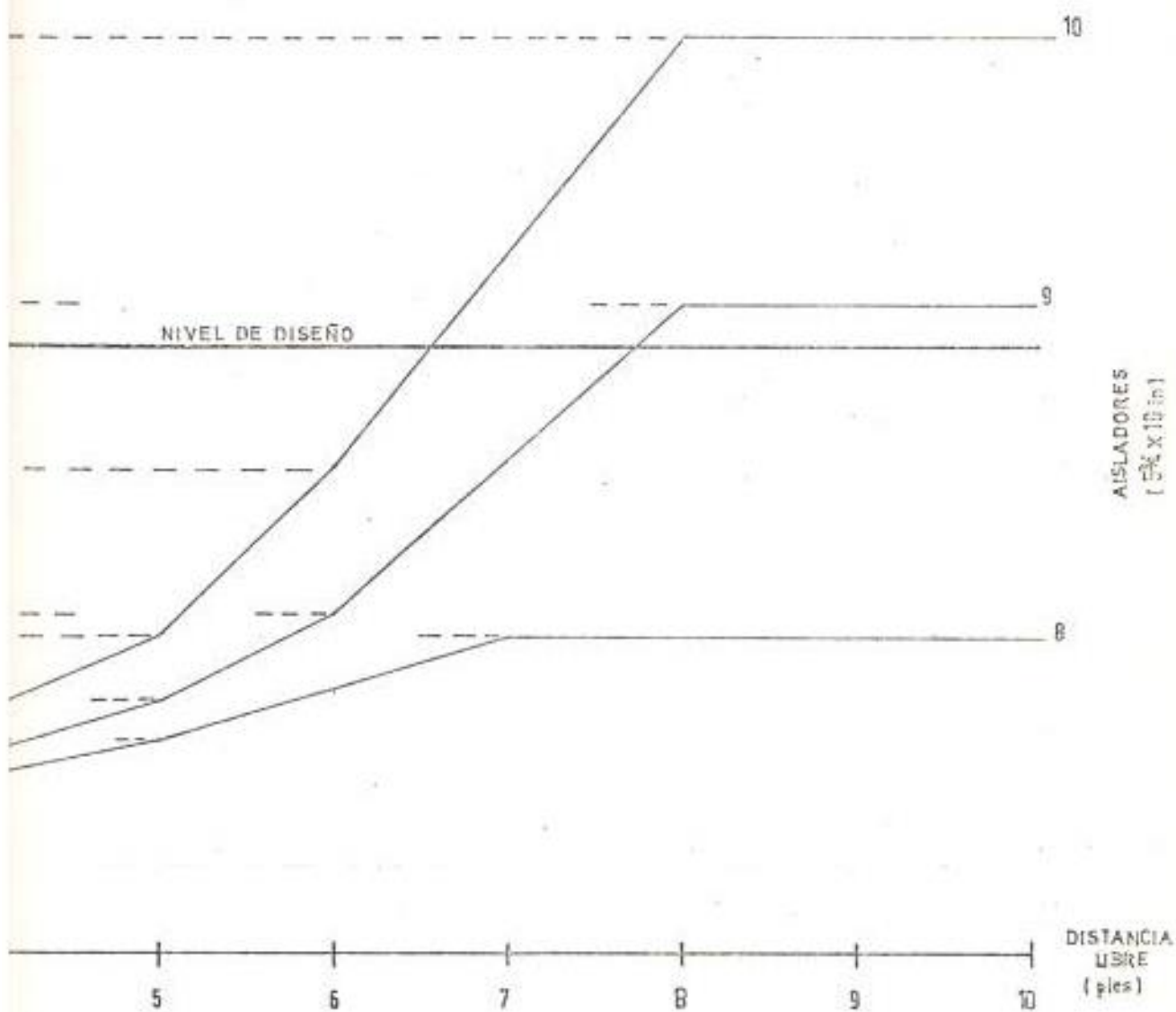
Como se comprobará con la tabla que presentamos a continuación, nuestros resultados son muy aproximados a los obtenidos por el consultor norteamericano y si nos basamos en criterios económicos iguales se debe llegar naturalmente a una misma selección óptima de dimensionamiento.

5.3. Resultados obtenidos

Los resultados obtenidos se encuentran graficados en las figuras 6.7 y 6.8 y para su mejor apreciación los comparamos con los resultados obtenidos por Price como lo anotábamos anteriormente.

Número aisladores requeridos	Programa W.S Price distancia libre a la torre, pies (metros)	Programa PROBF. Distancia libre a la torre, pies (metros)
8	No satisface nivel diseño.	No satisface nivel diseño.
9	7.35 (2.24)	7.72 (2.35)
10	6.25 (1.9)	6.56 (1.99)
11	5.4 (1.64)	5.69 (1.73)
12	3.75 (1.14)	4.5 (1.37)

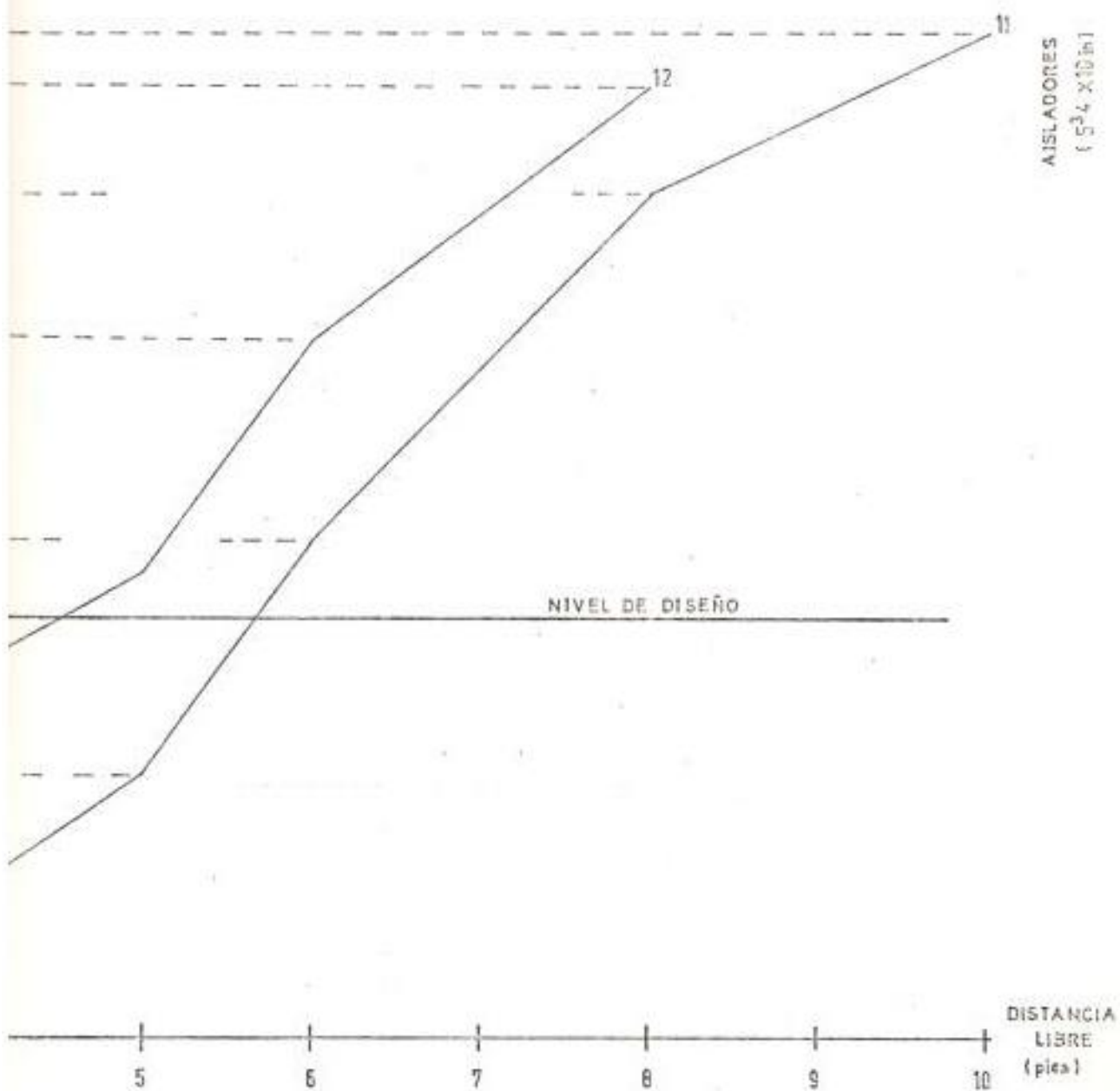
FIG. 6.7



CALCULO DEL NUMERO DE AISLADORES DE UNA LINEA DE TRANSMISION

EJEMPLO DE APLICACION

FIG. 6.8



CALCULO DEL NUMERO DE AISLADORES DE UNA LINEA DE TRANSMISION
EJEMPLO DE APLICACION

6. USO ESPECIAL DE LA SUBROUTINA IFCT

Habíamos anotado en la parte correspondiente al cálculo del (\bar{V}) en estructuras en portico o tipo V_e , que presentaríamos un programa para este cálculo. Pues bien, mediante la subrutina IFCT se lo puede hacer de una manera simple. Se dan como datos los límites de integración (rango de voltajes a los que va a estar sujeta la aislación); el coeficiente de variabilidad de descargas; el (\bar{V}) del dieléctrico en cuestión (cadenas, extensión de la ladera, estructura misma) y se obtienen todos los puntos que deseamos graficar.

La característica total de la estructura en V_e será el producto de cada una de las probabilidades encontradas para cada dieléctrico y para iguales voltajes.

Este pequeño programa lo corrimos cuando probabamos la eficiencia de la subrutina, con resultados muy exactos (comprobamos fig. 6.60 del EHV). No lo incluimos en detalle mencionando sólo a manera de referencia porque se sale un tanto del tema central que nos ocupa.

BIBLIOGRAFIA

1. ELECTRICAL TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS. Allan Greenwood.
2. ELECTRIC POWER SYSTEMS. B. Weedy.
3. TRANSIENTS IN POWER SYSTEMS. Harold A. Peterson
4. INSULATION CORDINATION IN HIGH VOLTAGE ELECTRIC POWER SYS
TEMS. W. Diesendorf.
5. EHV TRANSMISION LINE REFERENCE BOOK. Edison Electric Ins-
titute.
6. THE PROTECTION OF TRANSMISSION SYSTEMS AGAINST LIGHTNING.
W. Lewis.
7. CALCULUS AND STATISTICS. M. Gemignani
8. BASIC STATISTICS. B. Parl.
9. STATISTICS FOR SCIENTIST AND ENGINEERS. R. Lowell.
10. ELEMENTOS DE PROBABILIDAD Y ESTADISTICA. E. Mode.
11. GENERAL STATISTICS. Haber Runyon.
12. SEMINAR ON PROBABILITY METHODS APPLIED TO POWER SYSTEMS.
A. Hileman.
13. THE APPLICATION OF INSULATION FLASHOVER STATISTICS TO THE
SWITCHING SURGE DESIGN OF TRANSMISSION LINES. General Electric.
14. ESTUDIO DE AISLACION DEL SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISION.
Inecel.

15. EFECTIVIDAD DE LA PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES. CIER Tomo II. 1970.
16. PROBABILISTICS ASPECTS OF TRANSMISSION SYSTEM SWITCHING SURGE RELIABILITY. IEEE Agosto 1967. Mc Elroy Charkow.
17. THE STATISTICAL COMPUTATION OF LINE PERFORMACE USING "METIFOR". IEEE Junio 1966/ Anderson - Thompson.
18. ESTIMATING THE SWITCHING SURGE PERFORMACE OF TRANSMISION LINES. IEE Oct. 1970/ Hileman - Leblanc.
19. A STATISTICAL ASPECT OF THE COORDINATION OF TWO GAPS. IEE Marzo 1965/G. Garrara.
20. DETERMINATION OF CHARACTERISTICS VOLTAGES IN IMPULSE AND SWITCHING SURGE TESTING. IEE Agosto 1967/J. Bakken.
21. SWITCHING SURGES INSULATION COORDINATION: Switches, "Anomalous" Sparkovers and Possible Generalization. IEE. Sep. 1966/Carrara - Dellera.
22. EVALUATION OF SURGE SUPPRESION RESISTORS IN HIGH VOLTAGE CIRCUIT BREAKERS. IEEE Junio 1967/Wagner-Bankoske.
23. INFLUENCE OF SHUNT REACTORS IN SWITCHING SURGES. IEE Diciembre 1970/Clerici - Stuhl - Vian.
24. CORRECTION OF SWITCHING IMPULSE FLASHOVER VOLTAGES FOR AIR HUMIDITY. IEEE Marzo 1970/Kucera - Fiklik.
25. SWITCHING SURGE SPARKOVER CHARACTERISTICS OF AIR GAPS AND INSULATORS UNDER PRACTICAL CONDITIONS. IEEE Agosto 1966/ T. UDO.



A.F. 142426