

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

"METODO DE MONTE-CARLO APLICADO AL ANALISIS
DE REDES DE PUESTA A TIERRA DE UN S.E.P."

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL
TITULO DE INGENIERO ELECTRICO
EN LA ESPECIALIZACION DE SISTEMAS
DE POTENCIA

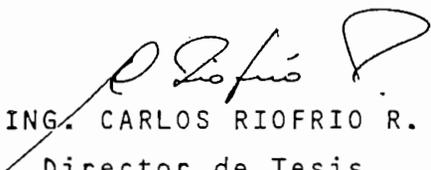


LUIS MARCELO CALDERON JARAMILLO

QUITO, JUNIO 1984

CERTIFICACION

Certifico que la presente Tesis ha sido, realizada en su totalidad por el Señor Luis Marcelo Calderón Jaramillo.


ING. CARLOS RIOFRIO R.
Director de Tesis

A G R A D E C I M I E N T O

Mi agradecimiento especial al Ing. Carlos Riofrío R., por su valiosa ayuda prestada a lo largo del desarrollo de este trabajo

Quiero dejar constancia de mi agradecimiento al Tecnólogo Marcelo Ramirez del Centro de Cómputo de la E.P.N., y a todas las personas que de una u otra forma me han brindado su colaboración

DEDICATORIA

A mis Padres -

I N D I C E

PÁGINA

CAPITULO I. CONSIDERACIONES GENERALES

1.1.	INTRODUCCION	1
1.2.	ANTECEDENTES	5
1.3.	OBJETIVO Y ALCANCE	7

CAPITULO II. DISTRIBUCION DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN LA RED DE PUESTA A TIERRA DE UN S.E.P.

2.1.	PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER	9
2.2.	MODELACION DE LOS ELEMENTOS Y CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA RED DE TIERRA	11
2.2.1.	Impedancia de puesta a tierra de rejillas en subestaciones y estaciones terminales	12
2.2.2.	Impedancia de puesta a tierra de torres de transmisión	13
2.2.3.	Impedancias propias y mutua de conductores de fase y neutros	14
2.2.4.	Impedancia de la fuente de generación	16
2.3.	SOLUCION ANALITICA DE LA DISTRIBUCION DE CORRIENTES DE FALLA EN UNA RED DE PUESTA A TIERRA	17
2.3.1.	Solución de un Problema Simple	17
2.3.2.	Caso General. Método de eliminación de doble lado	22
2.4.	DETERMINACION DE VOLTAJES PELIGROSOS EN LA RED	32
2.4.1.	Voltajes de Toque y Paso en subestaciones y Estaciones Terminales	33
2.4.2.	Voltajes de Toque y Paso en Torres de Transmisión	35

CAPITULO III. APLICACION DEL METODO DE MONTE-CARLO EN LA SIMULACION DEL EFECTO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LAS REDES DE TIERRA	
3.1.	JUSTIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE CALCULO TIPO PROBABILISTICO 39
3.2.	DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LAS RESISTIVIDADES DEL SUELO 41
3.3.	FORMULACION DEL METODO DE MONTE-CARLO EN LA SOLUCION DEL PROBLEMA 45
3.4.	DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE LA CORRIENTE DE FALLA Y VOLTAJES PELIGROSOS APLICANDO EL METODO DE MONTE-CARLO 48
3.5.	EVALUACION DE RESULTADOS 51
3.5.1.	Análisis de Resultados en forma <u>determinística</u> 51
3.5.2.	Análisis de Resultados en forma <u>probabilística</u> 54
CAPITULO IV. EJEMPLOS DE APLICACION	
4.1.	EJEMPLO TEORICO 56
4.1.1.	Conductores de tierra conectados a las Subestaciones 56
4.1.2.	Localización de la Falla 62
4.2.	RED DE PUESTA A TIERRA DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA 70
4.3.	EJEMPLO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION 83
CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 92	

ANEXO A. PROGRAMA DIGITAL DE APLICACION

A.1.	DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA DIGITAL	100
A.2.	DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL	101
A.3.	DESCRIPCION DE SUBRUTINAS	104
A.3.1.	Subrutina DATO1	104
A.3.2.	Subrutina DATO2	105
A.3.3.	Subrutina DATO3	105
A.3.4.	Subrutina SORT	106
A.3.5.	Subrutina HIST	107
A.3.6.	Subrutina INVER	108
A.3.7.	Subrutina MULT	108
A.3.8.	Subrutina GAUSS	108
A.3.9.	Subrutina CONTR1	109

ANEXO B. MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL

B.1.	OBJETIVO	121
B.2.	METODO DE SOLUCION	121
B.3.	DESCRIPCION DEL PROGRAMA	122
B.4.	NOMENCLATURA	122
B.4.1.	Variables de Entrada	122
B.4.2.	Variables de Salida	125
B.5.	FORMA DE PROPORCIONAR DATOS AL PROGRAMA	128
B.6.	FORMA DE UTILIZAR EL PROGRAMA GRABADO EN DISCO Y EN CINTA	132
B.7.	RESTRICCIONES	132
B.8.	EJEMPLO DE APLICACION	133

ANEXO C.	RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE REJILLAS EN SUBESTACIONES Y ESTACIONES TERMINALES	151
----------	---	-----

APENDICE D. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE
TORRES DE TRANSMISION

D.1.	TIPOS DE PUESTA A TIERRA: ALTERNATIVAS	154
D.2.	CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	156
D.3.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE TRANSMISION	159
D.4.	VOLTAJES DE TOQUE Y PASO DE TORRES DE TRANSMISION	160

APENDICE E. IMPEDANCIAS PROPIAS Y MUTUAS DE
CONDUCTORES DE FASE Y NEUTROS

E.1.	CALCULO DE LA IMPEDANCIA INDUCTIVA DE SECUENCIA CERO, MEDIANTE TABLAS DE CARAC TERISTICAS DE LINEAS AEREAS	162
E.2.	IMPEDANCIAS PROPIAS Y MUTUAS DE MULTIPLES CONDUCTORES DE TIERRA	166
E.3.	DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DE LOS PARA METROS DE LA RED	168

	BIBLIOGRAFIA	170
--	--------------	-----

C A P I T U L O I

CONSIDERACIONES GENERALES

1.1. INTRODUCCION

Durante condiciones normales de operación, una red de un sistema de potencia está balanceada, de tal manera que la corriente en el suelo puede, con seguridad, ser despreciada, la red se encuentra desacoplada de la tierra y sus características son independientes de la estructura y composición del suelo, un caso similar se presenta cuando en el sistema se producen fallas trifásicas; sin embargo, esta situación cambia el momento que se produce una falla a tierra. En este estudio se consideran fallas una fase-tierra, entre otras cosas, por su mayor probabilidad de ocurrencia, el método, sin embargo, puede extenderse para analizar fallas dos fases y tres fases-tierra.

Una forma de analizar una red de puesta a tierra de un sistema de potencia, consiste en emplear métodos similares a cálculos de cortocircuitos convencionales, donde cada nodo (unión del cable de guarda y una torre) es representado por una barra, de esta forma, se resuelve la red eléctrica por métodos directos o iterativos, por ejemplo, usando la matriz impedancia de

barra (R-14). Sin embargo, estos métodos presentan algunas desventajas, entre las cuales puede citarse el considerable espacio de memoria que se requiere en la resolución por medio de un computador. En la práctica, las líneas de transmisión tienen cientos de torres puestas a tierra, esto equivale a resolver matrices de orden igual al número de torres (o nodos) lo cual puede ser dificultoso aún empleando un computador.

En el presente estudio, el método que se desarrolla para analizar una red de tierra provee soluciones directas y requiere menos memoria del computador. En lo que se refiere al tiempo de ejecución, es variable, dependiendo de algunas alternativas como son:

- Análisis en forma determinística
- Análisis en forma probabilística

En el análisis probabilístico, el tiempo es variable de acuerdo al número de muestreos que se desee realizar.

En el capítulo II, se comienza modelando los elementos y parámetros que conforman una red de tierra, acotando que tanto las puestas a tierra de subestaciones y/o estaciones terminales (generadoras), como de las torres, varían en forma proporcional con la resis

tividad del terreno, de esta manera, se obtienen los factores de proporcionalidad para luego tratar a la resistividad como una variable aleatoria en el análisis probabilístico o como un valor fijo cuando se analiza determinísticamente. Similar situación se presenta en el cálculo de los parámetros de la línea, es decir, las impedancias propias y mutuas de conductores de fase y conductores de tierra (cables de guarda, contrapesos, neutros, etc.), que también dependen de la resistividad del terreno, empleando la teoría aproximada de Carson (R-2).

Una vez analizado y desarrollado el método empleado en la resolución de la red de tierra, en el capítulo III se justifica la adopción de un procedimiento probabilístico en la solución de la red, considerando que las características del suelo no son constantes a lo largo del recorrido de una línea de transmisión inclusive, en un mismo día la resistividad del suelo no es constante debido a efectos de la humedad, temperatura, presión, compactación, etc.; de tal manera que el análisis de la red en lo que se refiere al cálculo de la magnitud y distribución de las corrientes de falla a tierra, así como el cálculo de voltajes peligrosos se verá afectado por las variaciones de la resistividad del terreno.

Lo ideal sería disponer de datos estadísticos de valo

res de resistividad del terreno a lo largo del recorrido de una línea; es decir, haber realizado mediciones a distintas horas y en distintas épocas, para así saber con mucha aproximación la función que define la variación de la resistividad del terreno y de esta forma, emplear un método probabilístico (en este estudio se escoge el método de Monte-Carlo), para generar valores de la resistividad pero conociendo ya su variación. Sin embargo, no se dispone de esta información, por lo cual se escoge una variación normal o gaussiana de la resistividad. En el mismo capítulo III se justifica esta adopción así como el empleo del método de Monte-Carlo en el análisis probabilístico.

Finalmente, en los siguientes capítulos se analizan ejemplos de aplicación, la resolución está dada tanto en forma determinística como en forma probabilística, en este caso, los valores de corrientes y voltajes tendrán un valor medio y un rango de variación o incertidumbre. El desarrollo de la red se basa en el empleo de un programa digital de aplicación, el cual se lo describe en los Apéndices A y B de esta tesis, dicho programa básicamente se encarga de encontrar los elementos y parámetros de la red y, en su parte central, proporciona resultados de la magnitud y distribución de la corriente de falla a tierra, así como el cálculo de voltajes peligrosos en la red.

1.2. ANTECEDENTES

Durante fallas a tierra en líneas de transmisión, es probable que un determinado número de torres cercanas al punto de falla presenten altos voltajes a tierra, que si son excesivos pueden representar un peligro para personas o animales. En el pasado, el número de accidentes debido a tales voltajes ha sido bajo y, por consiguiente el peligro asociado con altos voltajes en las torres durante fallas a tierra se ha considerado despreciable; sin embargo, como las circunstancias cambian, esta conclusión puede necesitar ser revisada.

La rata baja de accidentes, puede atribuírse específicamente a una circunstancia, la probabilidad de concurrencia con una persona que estaría en contacto con una torre en el momento de la falla, es generalmente muy baja; sin embargo, no se debe tener una completa confianza de que esto no va a suceder, para lo cual es necesario disponer o instalar sistemas de puestas a tierra seguros.

Por otro lado, los derechos de vía de una línea de transmisión, actualmente son localizados en áreas popularmente densas, de tal manera que la probabilidad de una persona que toque una torre a cualquier hora se ha aumentado, como consecuencia, últimamente se ha pues

to interés en el estudio y análisis de las redes de puesta a tierra (R-1).

Anteriormente, se ha desarrollado métodos para calcular la distribución y magnitud de la corriente de falla a tierra, como son:

a) Método de las ecuaciones de diferencias

Si la línea es suficientemente grande (línea infinita) y si las impedancias de: las torres, las impedancias propias y mutuas de conductores de fase y de tierra, se asumen iguales en todas las secciones de la línea de transmisión (es decir, si no se considera el efecto de la variación de la resistividad del suelo), entonces se aplica el método de las ecuaciones diferenciales finitas (R-13). La solución es proporcional a una función exponencial del número de torres.

b) Método del factor de corrección para líneas finitas

Si la línea no puede ser considerada como infinita, la impedancia de su red de tierra depende directamente del terminal de la línea; es decir, del valor de la impedancia en el terminal opuesto a la localización de la falla, en este caso, se emplea el método

de los parámetros distribuidos, usando factores semi empíricos (R-1).

c) Método del cálculo de cortocircuitos convencionales

Es posible resolver el problema, sin simplificaciones de ninguna clase, usando el teorema de Thevenin's para cálculos de corto circuitos. Existen varias técnicas; por ejemplo, el método de la matriz impedancia de barra o de lazo (R-14). Desafortunadamente, el requerimiento de espacio de la memoria del computador puede causar serias limitaciones cuando el número de secciones es grande.

Considerando las acotaciones previas, en esta tesis se emplea el método de eliminación de doble lado, que, al igual que los anteriores, se basa en la aplicación de las leyes fundamentales de Kirchoof's, radicando la diferencia en la metodología usada para obtener la solución final.

1.3. OBJETIVO Y ALCANCE

Cuando ocurre una falla fase-tierra en una red de potencia, la corriente retorna a las fuentes generadoras a través del suelo y los conductores neutros, la

magnitud de la corriente de falla y su distribución en el suelo y conductores neutros son de primordial importancia para diseñar instalaciones de tierra seguras, calcular la inducción electromagnética en circuitos cercanos y determinar la calibración óptima de los Relays de protección.

En el presente estudio, se desarrolla un método analítico para determinar la magnitud y distribución de la corriente de falla a tierra, además, se calcula los voltajes en las redes de puesta a tierra de los sistemas de potencia, tomando en cuenta todos los parámetros de la red, justificando la adopción de un procedimiento de cálculo de tipo probabilístico, el de Monte-Carlo, por el elevado número de puntos de puesta a tierra y la incertidumbre en cuanto al valor de resistividad local en cada uno de ellos, por una parte; y por otra, por la necesidad de tomar decisiones generales respecto a la seguridad proporcionada por la red de tierra, basadas aquellas, en un análisis estadístico de la situación general existente.

C A P I T U L O I I

DISTRIBUCION DE LAS CORRIENTES DE FALLA EN LA RED DE PUESTA A TIERRA DE UN S.E.P.

2.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA A RESOLVER

Cuando ocurre una falla fase-tierra en un sistema de potencia, parte de la corriente de falla retorna a las fuentes a través de la tierra y el resto lo hace por los cables de guardia. La magnitud de la corriente de falla a tierra y su distribución entre sus trayectorias de retorno dependen de una serie de factores, los más importantes de los cuales son:

1. Fuentes de Voltaje o su Impedancia equivalente
2. Parámetros de la(s) línea(s) de transmisión y cable(s) de guardia
3. Impedancia de las rejillas de puestas a tierra de estaciones terminales y subestaciones intermedias
4. Impedancias de las torres de transmisión

1. Las fuentes de voltaje están localizadas en las llamadas estaciones terminales. Cada fuente puede ser un generador real o puede representar una porción de la red del sistema de potencia por medio de una impedancia equivalente.

2. Existen líneas de transmisión conectando a cada una de las estaciones terminales con la torre o subestación en la cual se simula una falla fase a tierra (FIG. 2.1.). Es importante acotar que cada una de las líneas puede conectar a subestaciones de transmisión o distribución antes de arribar a la localización de la falla.

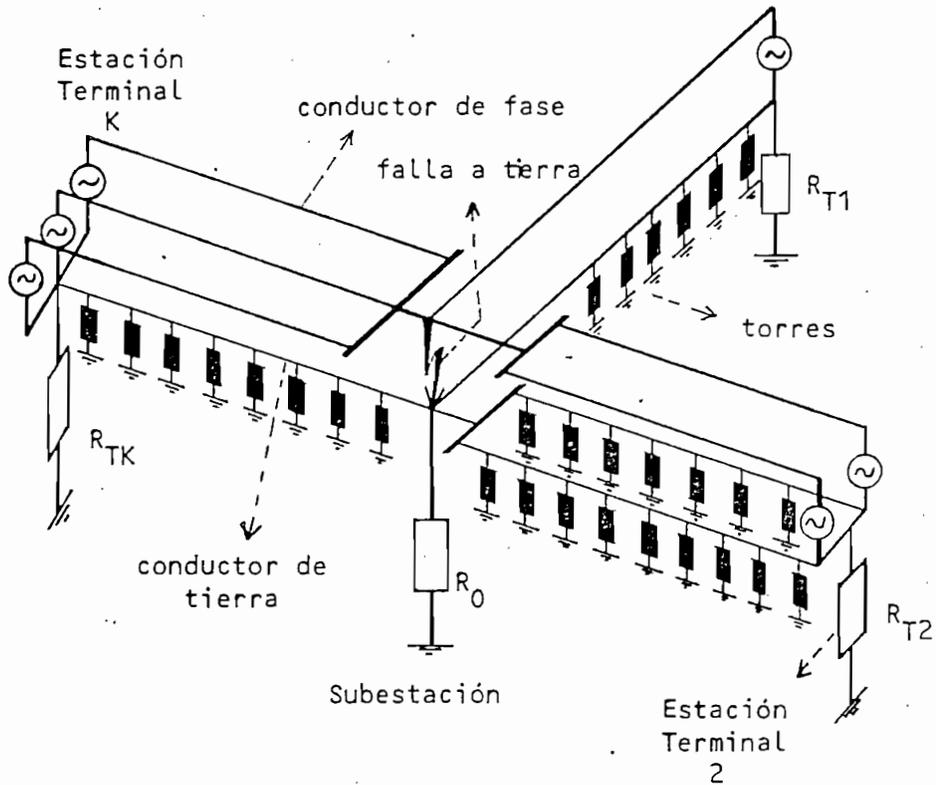


FIG. 2.1. CONFIGURACIÓN DE UNA RED DE POTENCIA

Las impedancias propias y mutua de los conductores de fase y cables de guardia, son afectadas por las características del suelo, de acuerdo con la teoría de Carson, son funciones de la resistividad del terreno, tal como se tratará en el numeral 2.2.

3. Las impedancias de las rejillas son funciones de la resistividad del suelo y de la configuración geométrica de la malla de puesta a tierra.
4. Las torres de transmisión presentan una impedancia la cual comprende la impedancia de la torre misma, la impedancia de la cimentación (pie de torre), cualquier capacitancia a tierra en el caso de que su valor sea significativo. Al igual que en el caso anterior, esta impedancia es función de la resistividad del suelo.

En el presente capítulo se detalla un método analítico para encontrar la magnitud y distribución de la corriente de falla en una red de puesta a tierra de un S.E.P.. Se realizan cálculos adicionales encaminados a obtener voltajes en las torres, subestaciones o estaciones terminales para dar una idea de cuan peligrosos pueden ser. Previamente se modela los diferentes elementos y parámetros de la red necesaria para realizar el análisis.

2.2. MODELACION DE LOS ELEMENTOS Y CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA RED DE TIERRA

El análisis de la red de tierra de un S.E.P., involucra el conocimiento de todos los elementos y parámetros que conforman la red. Como se notará posterior

mente todos estos elementos y parámetros, son funciones de la resistividad del suelo. En los siguientes numerales se detallará la metodología a ser empleada en el cálculo de las impedancias propias y mutua de cables de guardia y conductores de fase, impedancias de puesta a tierra de torres, subestaciones y estaciones terminales.

2.2.1. IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA DE REJILLAS EN SUBESTACIONES Y ESTACIONES TERMINALES

Las impedancias de las rejillas de tierra de estaciones terminales y subestaciones, al igual que las impedancias de las torres de transmisión, pueden representarse por la siguiente expresión (REF. 6):

$$Z = f(s) + j g (t)$$

donde s representa un grupo de parámetros que describen la estructura del suelo y la configuración de los electrodos de tierra y, t representa el grupo de parámetros que describen el arreglo de los conductores de tierra. La parte imaginaria, $g(t)$, se asume constante en muchos casos, y es despreciable con respecto a $f(s)$ (REF. 6). Esto, sin embargo, no es cierto para grandes instalaciones de tierra. Por otro lado, $f(s)$ es función de la resistividad del suelo.

La resistencia total de un sistema, compuesto de una combinación de electrodos horizontales (rejilla) y verticales (varillas), será menor que cualquiera de los componentes considerados aisladamente, pero siempre mayor que aquella de su combinación en paralelo.

En la Referencia (REF. 9), se encuentra detallada la forma de calcular la resistencia de puesta a tierra de rejillas en estaciones o subestaciones. Para efectos de este estudio, en el apéndice C se presenta, en forma aproximada, las fórmulas que definen la resistencia como una función de la resistividad del suelo, encaminados a ser ampliados en el programa digital.

2.2.2. IMPEDANCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE TRANSMISION

La impedancia entre el conductor de fase falloso y los conductores de tierra, es igual a la suma de la impedancia de la sección superior de la torre y la resistencia de contacto entre la torre y los cables de guardia, esta suma generalmente es despreciable, de tal manera que la impedancia entre el conductor de fase fallado y la tierra es aproximadamente igual a la resistencia de pie de torre (REF. 11).

En torres de transmisión el tipo de toma más conveniente será aquel que a juicio del profesional proyectista, se adecúe mejor a las condiciones del terreno,

cumpliendo las exigencias requeridas y teniendo presente las máximas diferencias de voltaje aceptables en una instalación de tierra.

La instalación de tierra puede estar constituida por conductores y electrodos, los elementos principales serán los conductores que constituyen una malla y, el complemento lo constituyen los electrodos que por lo general son varillas de copperweld (REF. 22).

En el apéndice D de este estudio, se presentan algunas alternativas de puesta a tierra de torres de transmisión, así como, las fórmulas para encontrar la resistencia que es función directa de la resistividad del terreno. Como una recomendación, adicionalmente se presenta un tipo de puesta a tierra denominado "enrejado", en el cual se emplean tablas universales para encontrar la resistencia como función en especial de la resistividad del terreno con sus respectivas fórmulas correctivas.

2.2.3. IMPEDANCIAS PROPIAS Y MUTUA DE CONDUCTORES DE FASE Y NEUTROS

La corriente de falla a tierra retornará por tierra a través de una serie de caminos irregulares y de sección variable; sin embargo, suponiendo que la tierra tiene una resistividad uniforme y es de extensión

infinita, se puede sustituir el circuito real a través de tierra, por otro ideal constituido por un conductor ficticio, colocado bajo tierra a una distancia D_e de los conductores de la línea, que es función de la resistividad del terreno y la frecuencia (REF. 4).

$$D_e = 658 \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad [\text{m}]$$

Considérese el circuito trifásico de la FIG. 2.2. formado por tres conductores iguales.

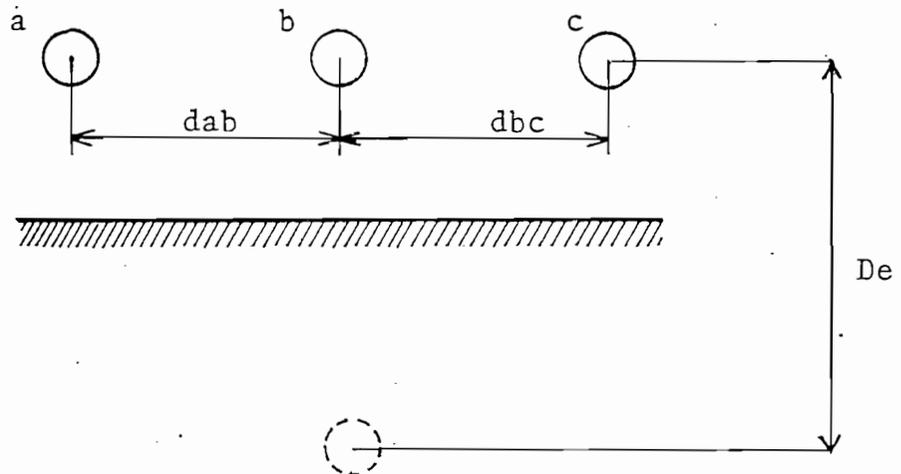


FIG. 2.2. CIRCUITO TRIFASICO CON RETORNO POR TIERRA

De acuerdo con la teoría simplificada de Carson (REF. 2)

- La impedancia propia de cada conductor de fase incluyendo el efecto del circuito de tierra es:

$$Z_s = (R_a + 0.000988f) + j(0.002892f \log \frac{D_e}{R_{MG}}) \quad \Omega / \text{Km}$$

Ra - Resistencia del conductor a en Ω/Km

RMG - Radio medio geométrico del conductor a en m.

- La impedancia mutua entre conductores, incluyendo el efecto del circuito de tierra es:

$$Z_m = 0.000988f + j(0.002892f \log \frac{D_e}{d_{ab}}) \quad \Omega/\text{Km}$$

dab - Distancia entre los conductores a y b, en m.

- La impedancia propia del conductor equivalente formada por los tres conductores en paralelo con regreso común por tierra está dado por:

$3\phi \rightarrow$

$$Z = \left(\frac{R}{3} + 0.000988f \right) + j(0.002896f \log \frac{D_e}{\gamma_p}) \quad \Omega/\text{Km}$$

$1\phi \rightarrow \frac{R}{3}$

$$\gamma_p = \sqrt[3]{\text{RMG} (\text{DMGabc})^2} \quad [\text{m}] \quad ?$$

$$\text{DMGabc} = \sqrt[3]{d_{ab} \cdot d_{ac} \cdot d_{bc}} \quad [\text{m}] \quad ?$$

R - Resistencia de cada conductor en Ω/Km .

En el apéndice E se presenta las fórmulas que definirán los parámetros de la red, naturalmente no se profundiza por cuanto se dispone detalladamente en las Referencias REF. 2, REF. 5, y REF. 4.

2.2.4. IMPEDANCIA DE LA FUENTE DE GENERACION

La impedancia de la fuente, incluyendo la impedan-

cia del transformador se añade a la impedancia de la sección de la línea de transmisión, adyacente a la estación terminal en el caso de representar una porción de una red eléctrica, caso contrario, únicamente se reemplaza con el valor del voltaje fase neutro.

2.3. SOLUCION ANALITICA DE LA DISTRIBUCION DE CORRIENTES DE FALLA EN UNA RED DE PUESTA A TIERRA

El método analítico desarrollado en este estudio, es una solución directa, las soluciones son obtenidas en un número definido de operaciones aritméticas, a diferencia de lo que sucede en los métodos iterativos, donde el número de operaciones es función de la exactitud deseada. En la primera parte se presenta el desarrollo de un problema simple para luego generalizar en el método.

2.3.1. SOLUCION DE UN PROBLEMA SIMPLE

El problema a analizarse se indica en la FIG. 2.3., se simula una falla en la subestación 0, se tiene una estación terminal con una fuente de voltaje que alimenta la corriente de falla a tierra. El cable de guardia de la línea de transmisión está puesto a tierra en intervalos regulares (o irregulares) a través de las torres. (REF. 6).

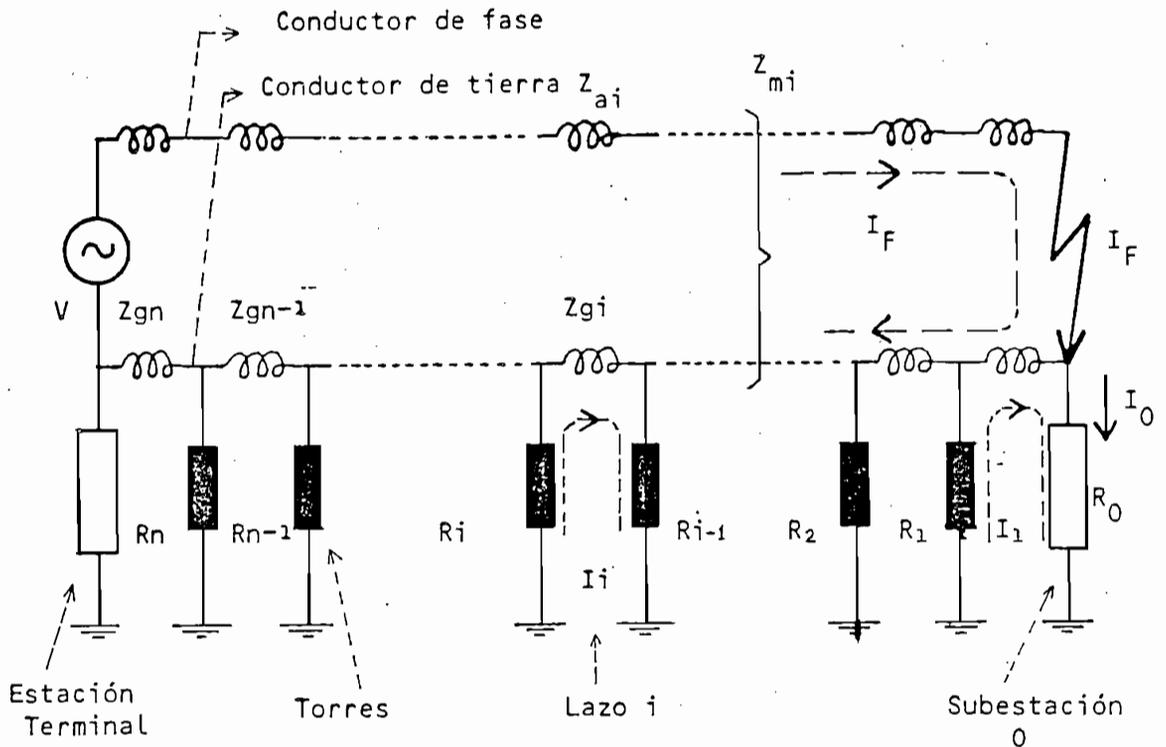


FIG. 2.3. PLANTEAMIENTO DE UN PROBLEMA SIMPLE

La solución se basa en la aplicación de las leyes de Kirchoof. Las ecuaciones de lazo para el sistema de la FIG. 2.3. son las siguientes:

LAZO:

$$(0) \quad H_F I_F - \sum_{i=1}^n (S_i I_i) = V$$

$$(1) \quad - S_1 I_F + T_1 I_1 - R_1 I_2 = 0$$

$$(2) \quad - S_2 I_F - R_1 I_1 + T_2 I_2 - R_2 I_3 = 0$$

----- (2.1)

$$(i) \quad - S_i I_F - R_{i-1} I_{i-1} + T_i I_i - R_i I_{i+1} = 0$$

$$(n-1) \quad - S_{n-1} [I_F - R_{n-2} I_{n-2} + T_{n-1} I_{n-1} - R_{n-1} I_n = 0$$

$$(n) \quad - S_n I_F - R_{n-1} I_{n-1} + T_n I_n = 0$$

$$\text{donde: } H_F = \sum_{i=1}^n (Z_{ai} + Z_{gi} - 2 Z_{mi})$$

$$S_i = Z_{gi} - Z_{mi} \quad (2.2)$$

$$T_i = R_{i-1} + Z_{gi} + R_i$$

Del grupo de ecuaciones de (2.1), se puede expresar las corrientes de lazo como funciones de la corriente de falla total y de la corriente en la torre o subestación fallada; es decir,

$$I_i = f(I_F, I_{i-1})$$

De la ecuación de lazo ($i-1$), despejando I_i , se tiene

$$I_i = - \frac{S_{i-1}}{R_{i-1}} I_F - \frac{R_{i-2}}{R_{i-1}} I_{i-2} + \frac{T_{i-1}}{R_{i-1}} I_{i-1}$$

$$i = 3, n-1 \quad (2.3.)$$

Esta expresión es válida para $i=3, n-1$, es necesario deducir una ecuación generalizada para $i=2, n-1$, entonces se procede como sigue:

En la ec. (2.3) para $i=3$

$$I_3 = - \frac{S_2}{R_2} I_F - \frac{R_1}{R_2} I_1 + \frac{T_2}{R_2} I_2 \quad (2.4)$$

De la ecuación de lazo (1) de (2.1).

$$I_1 = \frac{S_1}{T_1} I_F + \frac{R_1}{T_1} I_2 \quad (2.5)$$

reemplazando (2.5) en (2.4)

$$I_3 = \left(-\frac{S_2}{R_2} - \frac{R_1}{R_2} \frac{S_1}{T_1} \right) I_F + \left(\frac{T_2}{R_2} - \frac{R_1}{R_2} \frac{R_1}{T_1} \right) I_2 \quad (2.6)$$

generalizando:

$$I_i = C_i I_F + B_i I_{i-1} \quad i=2, n-1 \quad (2.7)$$

$$\text{donde: } C_i = -\frac{S_{i-1}}{R_{i-1}} - \frac{R_{i-2}}{R_{i-1}} \frac{S_{i-2}}{T_{i-2}}$$

$$B_i = \frac{T_{i-1}}{R_{i-1}} - \frac{R_{i-2}}{R_{i-1}} \frac{R_{i-2}}{T_{i-2}} \quad (2.8)$$

La Ec. (2.7) se cumple para $i=2, n-1$ si se define $T_0 = \infty$ y $S_0 = 0$, la corriente en la subestación o torre fallada I_0 se puede expresar así:

$$I_0 = I_i = \alpha_0 I_F + \gamma_0 I_1 = \alpha_1 I_F + \gamma_1 I_0$$

$$\text{donde: } \alpha_0 = \alpha_1 = 0 \quad ; \quad \gamma_0 = \gamma_1 = 1 \quad (2.9)$$

de tal manera que:

$$I_i = \alpha_i I_F + \gamma_i I_0 \quad (2.10)$$

Si se reemplaza la Ec. (2.10) en la Ec. (2.7) para $i-1$, se tiene

$$I_i = (C_i + B_i \alpha_{i-1}) I_F + B_i \gamma_{i-1} I_0 \quad (2.11)$$

Comparando las ecuaciones (2.11) y (2.10), se define:

$$\begin{aligned} \alpha_i &= C_i + B_i \alpha_{i-1} \\ \gamma_i &= B_i \gamma_{i-1} \end{aligned} \tag{2.12}$$

Reemplazando I_i dado por la Ec. (2.10) en las ecuaciones de lazo (o) y (n) de (2.1), se obtienen las siguientes expresiones:

$$(o) \quad [HF - \sum_{i=1}^n (S_i \alpha_i)] I_F - \sum_{i=1}^n (S_i \gamma_i) I_o = V \tag{2.13}$$

$$(n) \quad [-S_n - R_{n-1} \alpha_{n-1} + T_n \alpha_n] I_F + [T_n \gamma_n - R_{n-1} \gamma_{n-1}] I_o = 0$$

La solución del sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas de (2.13) nos da I_F e I_o . Las corrientes de lazo I_i se obtienen directamente por medio de la ecuación (2.10). Los coeficientes α_i y γ_i se comienza calculando en la torre o subestación fallada ($i=1$); sin embargo, es posible un algoritmo similar comenzando a calcular en la estación terminal ($i=n$), debido a esto, este algoritmo se ha denominado "Método de Eliminación de un lado".

La debilidad del método de eliminación de un lado radica en el algoritmo de cálculo de los coeficientes α_i y γ_i . Este algoritmo comienza en un terminal ($i=1$) y continúa hasta n ; por lo tanto, pueden existir errores de redondeo significativos con valores gran

des de n y/o ciertos valores de las impedancias ($R_i / Z_i < 1$).

2.3.2. CASO GENERAL. METODO DE EILIMINACION DE DOBLE LADO

El método de eliminación de un lado puede aplicarse en la resolución de un sistema más general como el de la FIG. 2.4.; sin embargo, es posible cometer errores de redondeo debido al algoritmo de cálculo que se caracteriza por resolver en forma separada la línea a un lado de la localización de la falla para luego calcular al otro lado.

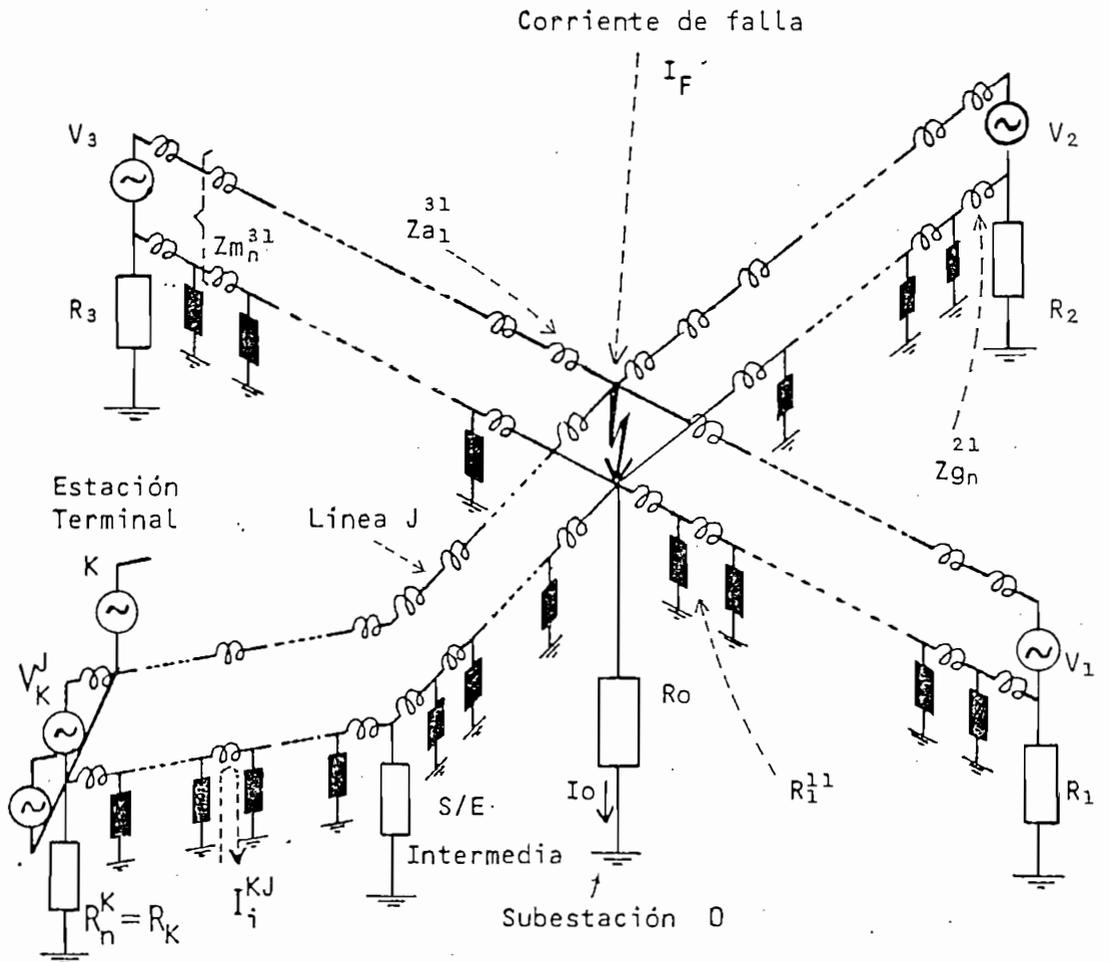


FIG. 2.4. CASO GENERAL. RED EQUIVALENTE

El método de eliminación de doble lado calcula simultáneamente la distribución de corrientes en ambos lados de la falla. En (R.6) se encuentra sintetizado el método de solución; sin embargo, aquí se lo detalla para su mejor comprensión.

Las ecuaciones que gobiernan la ley de la distribución de las corrientes de lazo en la FIG. 2.4., son las siguientes:

NOTA: Se indica únicamente las ecuaciones relacionadas a la línea J de la estación terminal K, por facilidad de notación, el número de secciones en esta línea N_{KJ} es escrito como n.

1001.

LAZO

$$(0) \quad H F^{KJ} \quad I F^{KJ} - \sum_{i=1}^n (S_i^{KJ} I_i^{KJ}) = V_K^J$$

$$(1) \quad -S_1^{KJ} I F^{KJ} + T_1^{KJ} I_1^{KJ} - R_1^{KJ} I_2^{KJ} + R_0(I_0 - I_1^{KJ}) = 0$$

$$(i) \quad -S_i^{KJ} I F^{KJ} - R_{i-1}^{KJ} I_{i-1}^{KJ} + T_i^{KJ} I_i^{KJ} - R_i^{KJ} I_{i+1}^{KJ} = 0 \quad (2.14)$$

$$(n) \quad -S_n^{KJ} I F^{KJ} - R_{n-1}^{KJ} I_{n-1}^{KJ} + T_n^{KJ} I_n^{KJ} + R_k(I_k - I_n^{KJ}) = 0$$

donde:

$$H_F^{KJ} = \sum_{i=1}^n (Z_{ai}^{KJ} + Z_{gi}^{KJ} - 2 Z_{mi}^{KJ})$$

$$S_i^{KJ} = Z_{gi}^{KJ} - Z_{mi}^{KJ} \quad (2.15)$$

$$T_i^{KJ} = R_{i-1}^{KJ} + Z_{gi}^{KJ} + R_i^{KJ}$$

Del grupo de ecuaciones de (2.14), se puede generalizar:

$$I_i^{KJ} = A_i^{KJ} I_{i-1}^{KJ} + B_i^{KJ} I_{i+1}^{KJ} + C_i^{KJ} I_F^{KJ},$$
$$i = 2, \quad n-1 \quad (2.16)$$

donde:

$$A_i^{KJ} = R_{i-1}^{KJ} / T_i^{KJ}$$

$$B_i^{KJ} = R_i^{KJ} / T_i^{KJ} \quad i=2, \dots, n-1 \quad (2.17)$$

$$C_i^{KJ} = S_i^{KJ} / T_i^{KJ}$$

Los valores de A_i^{KJ} , B_i^{KJ} , C_i^{KJ} son positivos y siempre menores que 1, esto ya representa una ventaja comparada con los valores dados por (2.8) en el método de eliminación de un lado donde su valor absoluto es superior a 1.

De las ecuaciones de lazo (1) y (n) de (2.14), se define:

$$\begin{aligned}
 A_1^{KJ} &= - \frac{R_o}{T_1^{KJ} - R_o} ; & A_n^{KJ} &= \frac{R_{n-1}^{KJ}}{T_n^{KJ} - R_n^{KJ}} \\
 B_1^{KJ} &= \frac{R_1^{KJ}}{T_1^{KJ} - R_o} ; & B_n^{KJ} &= - \frac{R_n^{KJ}}{T_n^{KJ} - R_n^{KJ}} \\
 C_1^{KJ} &= \frac{S_1^{KJ}}{T_1^{KJ} - R_o} ; & C_n^{KJ} &= \frac{S_n^{KJ}}{T_n^{KJ} - R_n^{KJ}}
 \end{aligned} \tag{2.18}$$

Con estas definiciones, la ecuación (2.16) es válida para $i=1, \dots, n$. Siguiendo la metodología descrita previamente, I_i puede escribirse como:

a) Para $i=2, \dots, n$

$$I_i = \delta_i I_{i-1} + \gamma_i I_K + \alpha_i I_F \tag{2.19}$$

NOTA: Por facilidad de notación, se suprime los superíndices K y J, recordando que se está refiriendo a ecuaciones de la línea J entre la estación terminal K y la torre o subestación fallada.

Para $i+1$, la ecuación (2.19) será

$$I_{i+1} = \delta_{i+1} I_i + \gamma_{i+1} I_K + \alpha_{i+1} I_F$$

Reemplazando en (2.16), se obtiene:

$$\begin{aligned}
 I_i &= \frac{1}{1 - B_i \delta_{i+1}} [A_i I_{i-1} + B_i \gamma_{i+1} I_K + \\
 &+ (B_i \alpha_{i+1} + C_i) I_F]
 \end{aligned} \tag{2.20}$$



comparando las ecuaciones (2.20) y (2.19), se define:

$$\begin{aligned}\delta_i &= A_i / (1 - B_i \delta_{i+1}) \\ \gamma_i &= B_i \gamma_{i+1} / (1 - B_i \delta_{i+1}) \\ \alpha_i &= (C_i + B_i \alpha_{i+1}) / (1 - B_i \delta_{i+1})\end{aligned}\tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}y; \quad \delta_{n+1} &= 0 & ; & \quad \delta_n = A_n \\ \gamma_{n+1} &= 1 & ; & \quad \gamma_n = B_n \\ \alpha_{n+1} &= 0 & ; & \quad \alpha_n = C_n\end{aligned}\tag{2.22}$$

b) Para $i = 1, \dots, n-1$

$$\begin{aligned}I_i &= \epsilon_i I_{i+1} + \theta_i I_0 + \eta_i [F \\ I_{i-1} &= \epsilon_{i-1} I_i + \theta_{i-1} I_0 + \eta_{i-1} [F\end{aligned}\tag{2.23}$$

Reemplazando en la Ec. (2.16)

$$\begin{aligned}I_i &= \frac{1}{1 - A_i \epsilon_{i-1}} [A_i \theta_{i-1} I_0 + B_i I_{i+1} \\ &\quad + (A_i \eta_{i-1} + C_i) [F]\end{aligned}\tag{2.24}$$

comparando las ecuaciones (2.24) y (2.23), se define:

$$\begin{aligned}\epsilon_i &= B_i / (1 - A_i \epsilon_{i-1}) \\ \theta_i &= A_i \theta_{i-1} / (1 - A_i \epsilon_{i-1}) \\ \eta_i &= (C_i + A_i \eta_{i-1}) / (1 - A_i \epsilon_{i-1})\end{aligned}\tag{2.25}$$

$$\begin{aligned} y; \epsilon_0 = 0 & ; \epsilon_1 = B_1 \\ \theta_0 = 1 & ; \theta_1 = A_1 \\ \eta_0 = 0 & ; \eta_1 = C_1 \end{aligned}$$

De las ecuaciones (2.19) y (2.23) eliminamos I_{i-1} y I_{i+1} de la siguiente manera:

$$\text{De (2.23): } I_{i-1} = \epsilon_{i-1} I_i + \theta_{i-1} I_0 + \eta_{i-1} [F$$

$$\text{En (2.19): } I_i = \frac{1}{1 - \delta_i \epsilon_{i-1}} [(\alpha_i + \delta_i \eta_{i-1}) [F + \gamma_i [K + \delta_i \theta_{i-1} I_0]$$

$$I_i = U_i [F + V_i [K + W_i I_0 \quad i=2, \dots, n \quad (2.26)$$

$$\text{donde: } U_i = (\alpha_i + \delta_i \eta_{i-1}) / (1 - \delta_i \epsilon_{i-1})$$

$$V_i = \gamma_i / (1 - \delta_i \epsilon_{i-1})$$

$$W_i = \delta_i \theta_{i-1} / (1 - \delta_i \epsilon_{i-1})$$

$$i=2, \dots, n \quad (2.27)$$

$$\text{De (2.19) } I_{i+1} = \delta_{i+1} I_i + \gamma_{i+1} [K + \alpha_{i+1} [F$$

$$\text{En (2.23) } I_i = \frac{1}{1 - \epsilon_i \delta_{i+1}} [(\epsilon_i \alpha_{i+1} + \eta_i) [F + \epsilon_i \gamma_{i+1} [K + \theta_i I_0]$$

$$I_i = \mu_i [F + v_i [K + \omega_i I_0$$

$$i=1, \dots, n-1 \quad (2.28)$$

$$\text{donde: } \mu_i = (\eta_i + \epsilon_i \alpha_{i+1}) / (1 - \epsilon_i \delta_{i+1})$$

$$v_i = \epsilon_i \gamma_{i+1} / (1 - \epsilon_i \delta_{i+1})$$

$$\omega_i = \theta_i / (1 - \epsilon_i \delta_{i+1})$$

$$i=1, \dots, n-1 \quad (2.29)$$

Reemplazando las ecuaciones (2.26) y (2.28) en las ecuaciones de lazo (o), (1) y (n) del grupo de ecuaciones de (2.14), se tiene:

$$(o): \quad (H_F - S_1 U_1 - \sum_{i=2}^n S_i U_i) [F - (S_1 V_1 + \sum_{i=2}^n S_i V_i)] [K - (S_1 \omega_1 + \sum_{i=2}^n S_i \omega_i)] I_o = V_K^J \quad (2.30)$$

para $J = 1, \dots, M_k$

$K = 1, P$

donde: P es el número de estaciones terminales,

M_k es el número de líneas entre la estación K y la localización de la falla

$$(n) \quad \sum_{m=1}^{M_k} (-S_n^{K_m} I_F^{K_m}) - \sum_{m=1}^{M_k} (R_{n-1}^{K_m} I_n^{K_m}) + \sum_{m=1}^{M_k} (T_n^{K_m} I_n^{K_m}) +$$

$$R_k \left[\sum_{m=1}^{M_k} I_k - \sum_{m=1}^{M_k} I_n^{K_m} \right] = 0$$

Puesto que $I_k = \sum_{m=1}^{M_k} I_n^{K_m}$ tal como se puede apreciar

en la Figura (2.4), el término $R_k \left[\sum_{m=1}^{M_k} I_k - \sum_{m=1}^{M_k} I_n^{K_m} \right]$

se transforma en $\left(\sum_{m=1}^{M_k} R_k - R_k \right) I_k$ realizando opera-

ciones elementales, se llega a obtener:

$$\sum_{m=1}^{M_k} (-S_n^{K_m} - R_{n-1}^{K_m} \mu_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} U_n^{K_m}) [F^{K_m}] + \left[\sum_{m=1}^{M_k} (-R_{n-1}^{K_m} \right]$$

$$v_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} V_n^{K_m}) + \sum_{m=1}^{M_k} (R_k) - R_k] I_k + \sum_{m=1}^{M_k} (-R_{n-1}^{K_m} \omega_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} W_n^{K_m}) I_o = 0 \quad (2.31)$$

Esta última expresión puede simplificarse, considerando que $R_n^{K_m} = R_n^K = R_k$ para cualquier valor de m , esto se desprende de la configuración de la Figura 2.4.

Reemplazando los valores dados por las ecuaciones (2.27), (2.29) y (2.18) en el primer término de la ecuación (2.31) se obtiene:

$$\sum_{m=1}^{M_k} (-S_n^{K_m} - R_{n-1}^{K_m} \mu_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} U_n^{K_m}) I F^{K_m} \equiv R_k \sum_{m=1}^{M_k} (U_n^{K_m}) I F \quad (2.32)$$

de igual manera los segundo y tercer términos se simplifican a:

$$\begin{aligned} & \left[\sum_{m=1}^{M_k} (-R_{n-1}^{K_m} v_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} V_n^{K_m}) + \sum_{m=1}^{M_k} R_k - R_k \right] I_k \equiv \\ & \left[\sum_{m=1}^{M_k} (V_n^{K_m} - 1) R_k + \sum_{m=1}^{M_k} R_k - R_k \right] I_k \equiv \\ & R_k \left[\sum_{m=1}^{M_k} (V_n^{K_m}) - 1 \right] I_k \end{aligned} \quad (2.33)$$

$$\sum_{m=1}^{M_k} (-R_{n-1}^{K_m} \omega_{n-1}^{K_m} + T_n^{K_m} W_n^{K_m}) I_o \equiv R_k \sum_{m=1}^{M_k} (W_n^{K_m}) I_o \quad (2.34)$$

empleando las identidades (2.32), (2.33), y (2.34), la ecuación (2.31) se convierte en:

$$\sum_{m=1}^{Mk} (U_n^{Km} I_F^{Km}) + \left[\sum_{m=1}^{Mk} (V_n^{Km}) - 1 \right] I_k + \sum_{m=1}^{Mk} (W_n^{Km}) I_o = 0 \quad (2.35)$$

para $K = 1, P$

$$(1) \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (-S_1^{Km} I_F^{Km}) + \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (T_1^{Km} I_1^{Km}) - \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (R_1^{Km} I_2^{Km}) +$$

$$R_o \left[\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (I_o) - \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (I_1^{Km}) \right] = 0$$

puesto que $I_o = \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (I_i^{Km})$ según la figura

2.4., el último término de la expresión anterior se convierte en $\left[\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (R_o) - R_o \right] I_o$, realizando operaciones elementales se obtiene:

$$\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (-S_1^{Km} + T_1^{Km} u_1^{Km} - R_1^{Km} U_2^{Km}) I_F^{Km} +$$

$$\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (T_1^{Km} v_1^{Km} - R_1^{Km} V_2^{Km}) I_k + \left[\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (T_1^{Km} w_1^{Km} - R_1^{Km} W_2^{Km}) +$$

$$\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (R_o) - R_o \right] I_o = 0 \quad (2.36)$$

Reemplazando los valores dados por las ecuaciones (2.29), (2.27), y (2.18) en el primer término de la ecuación (2.36), se obtiene:

$$\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (-S_1^{Km} + T_1^{Km} u_1^{Km} - R_1^{Km} U_2^{Km}) I_F^{Km} \equiv R_o \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{Mk} (u_1^{Km} I_F^{Km}) \quad (2.37)$$

de igual manera los segundo y tercer términos de (2.36)

$$\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{M_k} (T_1^{K_m} v_1^{K_m} - R_1^{K_m} V_2^{K_m}) I_k \equiv R_0 \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{M_k} (v_1^{K_m}) I_k \quad (2.38)$$

$$\left[\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{M_k} (\omega_1^{K_m} - 1) R_0 + \sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{M_k} R_0 - R_0 \right] I_0 \equiv R_0 \left[\sum_{k=1}^P \sum_{m=1}^{M_k} (\omega_1^{K_m} - 1) \right] I_0 \quad (2.39)$$

empleando las identidades (2.37), (2.38) y (2.39), la ecuación (2.36) se convierte en:

$$\sum_{k=1}^P \left[\sum_{m=1}^{M_k} (u_1^{K_m} [F^{K_m}]) \right] + \sum_{k=1}^P \left[\sum_{m=1}^{M_k} (v_1^{K_m}) I_k \right] +$$

$$\left[\sum_{k=1}^P \left\{ \sum_{m=1}^{M_k} (\omega_1^{K_m}) \right\} - 1 \right] I_0 = 0 \quad (2.40)$$

Resolviendo el grupo de ecuaciones de (2.30), (2.35), y (2.40) se puede encontrar las incógnitas; es decir, la corriente de falla fase-tierra total I_F^{KJ} en cada línea de transmisión J, la corriente en la subestación o torre fallada I_0 y las corrientes de retorno I_k en cada estación terminal K.

Las corrientes de lazo para cada línea estarán dadas directamente por las ecuaciones (2.26) y (2.28).

El sistema de ecuaciones a resolver (por algún método) es de orden t, donde t está dado por:

$$t = \sum_{k=1}^P M_k + P + 1$$

Por ejemplo para resolver un sistema con 4 estaciones terminales y 2 líneas de transmisión por terminal, el sistema de ecuaciones a resolver será de 13x13 (invirtiendo una matriz compleja, de 13x13) lo cual es fácil hacerlo en un computador. La solución de las ecuaciones originales (2.14) debería requerir la inversión (o técnica similar) de una matriz compleja de 800 x 800 asumiendo 100 secciones por cada línea de transmisión, lo cual requeriría excesiva memoria en el computador, si se empleara cualquier otro método conocido. De lo anotado, se desprende la importancia y utilidad del algoritmo de eliminación de doble lado tratado en este estudio.

2.4. DETERMINACION DE VOLTAJES PELIGROSOS EN LA RED

Como un complemento al análisis de una red de puesta a tierra en lo que se refiere al cálculo y distribución de la corriente de falla fase-tierra, en lo que sigue se analiza y calcula los voltajes peligrosos en la red, tomando en cuenta que la mayor elevación de voltaje, y por tanto, sus mayores voltajes de toque y paso se producirá en la torre o subestación fallada.

2.4.1. VOLTAJES DE TOQUE Y DE PASO EN SUBESTACIONES Y ESTACIONES TERMINALES

El cálculo de voltajes peligrosos en una rejilla de puesta a tierra de subestaciones o estaciones terminales, en este estudio, considera un suelo uniforme dentro del área que ocupa la rejilla y sigue el lineamiento de acuerdo a la norma IEEE 80. De acuerdo a esto, se definen los voltajes de toque y paso así (REF.9).

$$V_{\text{toque}} = K_T K_{i_T} \rho \frac{I}{L} \quad (2.41)$$

$$V_{\text{PASO}} = K_S K_{i_S} \rho \frac{I}{L} \quad (2.42)$$

donde: ρ = Resistividad del suelo en ohms-m

I = Corriente de falla en la subestación o estación terminal en Amperios, esta corriente es alterada por factores de corrección que contemplan la ampliación del sistema y la duración de la falla (REF. 9).

L = Longitud total de los conductores que forman la rejilla, en m. ($L = an + bm$)

K = Coeficientes definidos así

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{D} \sum_{j=3}^n \frac{1}{j-1} \right] \quad (2.43)$$

$$K_T = \frac{1}{\pi} \ln \frac{(H^2 + X^2)(D+X)^2}{Hd D^2} + \frac{1}{\pi} \ln \prod_{j=3}^n \left[\frac{(j-1) D+X}{(j-1) D} \right] \quad (2.44)$$

a) Para rejillas cuadradas:

$$Kis_C = (0.069 n + 0.556) \cdot [1 + 0.49 \left(\frac{1}{aH^2} - 0.005 \right)^{0.33}] \quad (2.45)$$

donde: $n = \frac{a+D}{D}$

$$Kit_C = 0.58 + 0.155 n + \Delta Ki \quad (2.46)$$

donde:

$$0.155 \alpha ; \quad \alpha \leq 16.3$$

$$\Delta Ki = \{$$

$$0.68 \alpha - 8.55 ; \quad \alpha > 16.3$$

$$\alpha = n^3 a^{-1.25} H^{10/a}$$

b) Para rejillas rectangulares:

$$Kis_R = \left[1 + 0.149 \frac{n}{\sqrt{a}} \right] Kis_C \quad (2.47)$$

$$Kit_R = [0.86 + 0.066 (n-2)^{0.33}] Kit_C \quad (2.48)$$

donde Kit_C , Kis_C son los factores calculados para rejillas cuadradas, con los mismos H , n y a igual al lado más largo de la rejilla rectangular.

D Espaciamiento entre conductores principales, m.

H Profundidad de entierro, m.

- d diámetro del conductor, en m.
- n número de conductores principales.
- a ancho de la rejilla, en m.
- m número de conductores secundarios.

En la ecuación (2.44), el valor de X es la posición dentro de la rejilla o el patio donde se desea obtener el voltaje de toque de acuerdo a un sistema de referencia, los valores para las distintas localizaciones dentro del patio se lo puede consultar en la REF. 9 en donde se analiza detalladamente los perfiles de voltaje de toque. Para efectos del presente estudio, se considerará $X = D/2$, que especialmente para rejillas con muchas cuadrículas, es aquí donde se tiene el mayor voltaje de toque (REF. 15).

2.4.2. VOLTAJES DE TOQUE Y DE PASO EN TORRES DE TRANSMISION

La medida del peligro asociado con los voltajes de las torres es el máximo voltaje de toque o de paso que puede ser contactado por una persona que se encuentre cerca de la estructura. Asumiendo que la máxima distancia a la cual una torre puede ser tocada, es de 1 metro, el máximo voltaje de toque puede definirse como la mayor diferencia de potencial medida entre la estructura de la torre y cualquier punto en la superficie de la tierra a una distancia de 1 metro de la estructura.

Por otro lado, considerando que un paso humano de 1 metro es relativamente grande y que los potenciales de paso debido a la circulación de corriente en un electrodo de tierra son máximo justamente cerca al electrodo, la definición anterior también describe el máximo voltaje de paso. De estas definiciones se concluye que los voltajes de toque y de paso a los cuales una persona puede exponerse cerca de una torre son solamente una fracción de la elevación de voltaje total en las torres.

En la REF. 16 se presentan curvas de uso universal de voltajes de toque y de paso en torres de transmisión con puesta a tierra tipo enrejado, en el presente estudio se hace referencia a dichas curvas, las cuales se las encuentra en las figuras 2.5, 2.6., 2.7, y 2.8, para ciertas condiciones como son:

- Puesta a tierra con varillas adicionales
- Puesta a tierra sin varillas

En dichas figuras se encuentra los voltajes de toque, y de paso como función del factor K (suelo de dos capas), de la altura de la capa superior y se las ha realizado, escogiendo como datos base los siguientes:

Ibase = 1000 A (corriente en la torre)

δbase = 100 ohms-m (Resistividad del terreno)

Lbase = 12.2 m. (Longitud de la estructura, ver
FIG. D.4)

Sin embargo, la siguiente ecuación proporcionará el verdadero valor de los voltajes de toque y paso, cuando los datos son distintos de aquellos escogidos como base:

$$V = V_{\text{curvas}} \cdot \frac{\rho_{\text{REAL}}}{100} \cdot \frac{I_{\text{REAL}}}{1000} \cdot \frac{12.2}{L_{\text{REAL}}} \quad (2.49)$$

Para efectos del cálculo de los voltajes peligrosos en una torre fallada, a través del programa digital de aplicación, se emplea la subrutina DATO2 para calcular el factor de proporcionalidad de los voltajes de toque y paso, de tal manera de generar luego, valores de resistividad del suelo, obteniendo resultados probabilísticos de los voltajes de toque y de paso. (Ver Apéndice D).

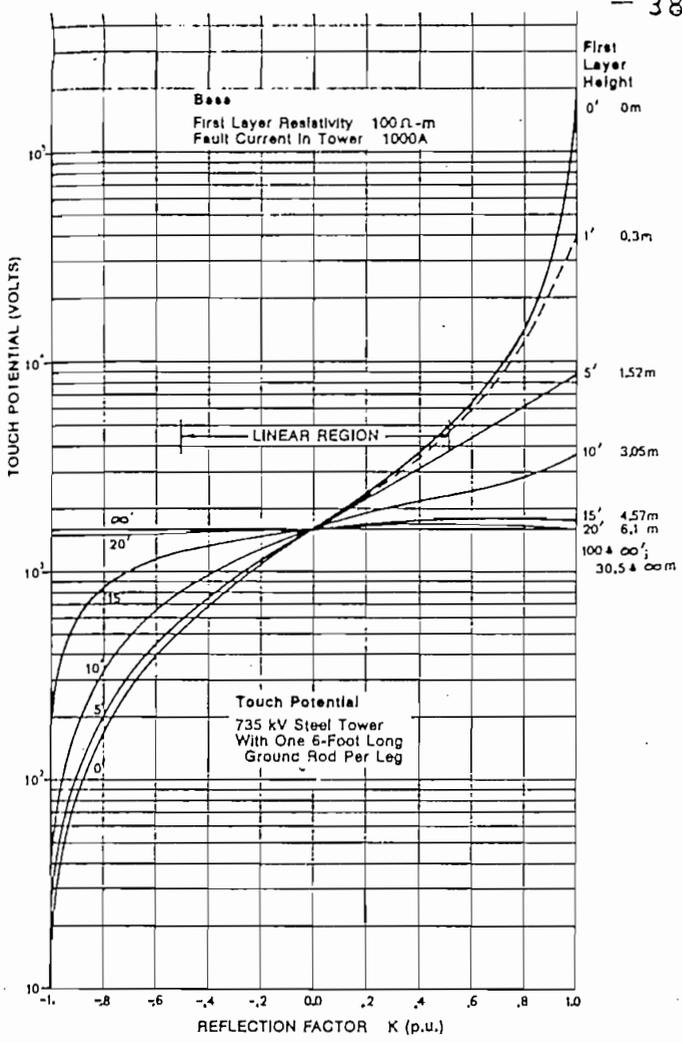


FIG. 2.5. VOLTAJES DE TOQUE (varillas de tierra)

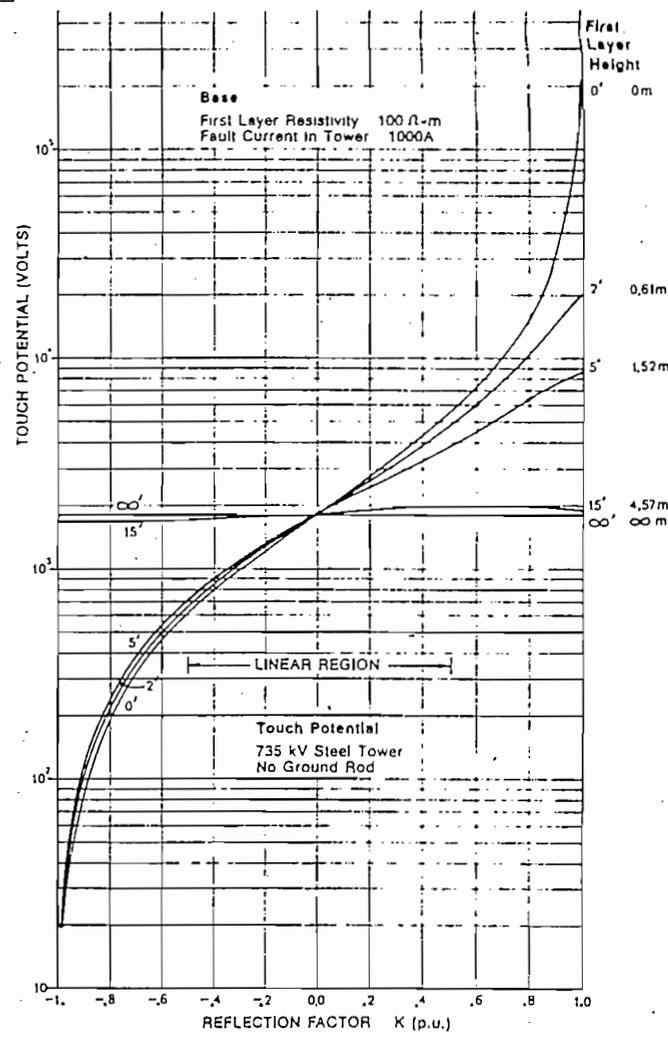


FIG. 2.6. VOLTAJES DE TOQUE

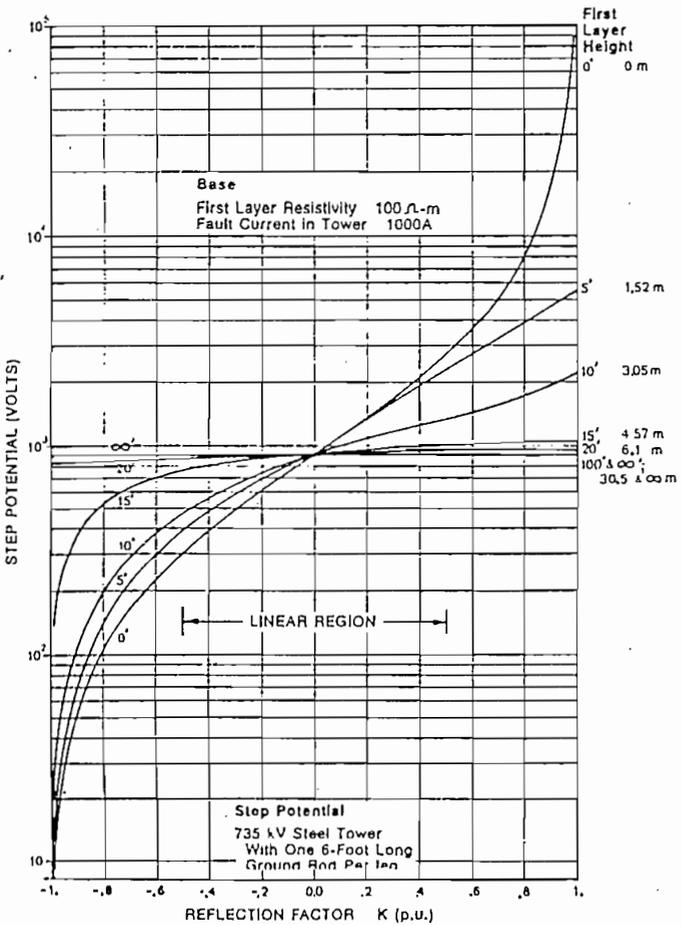


FIG. 2.7. VOLTAJES DE PASO (varillas de tierra)

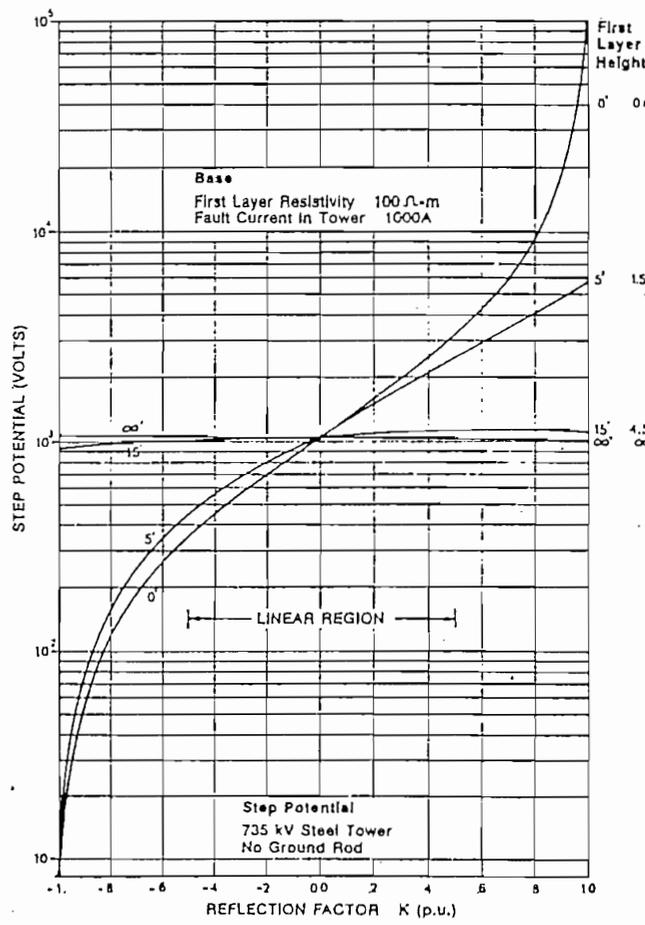


FIG. 2.8. VOLTAJES DE PASO

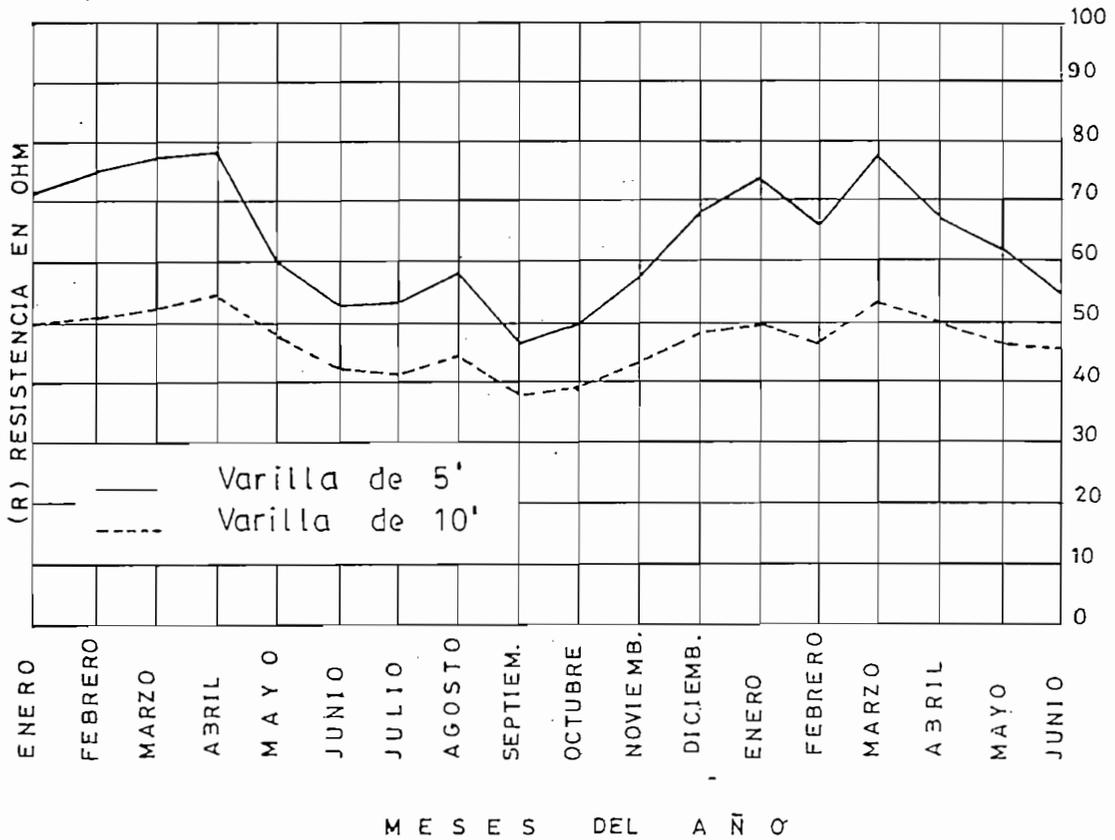
C A P I T U L O I I I

APLICACION DEL METODO DE MONTE-CARLO EN LA SIMULACION DEL EFECTO DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO EN LAS REDES DE TIERRA

3.1. JUSTIFICACION DEL PROCEDIMIENTO DE CALCULO TIPO PROBA BILISTICO

Al tratar de representar una red de puesta a tierra de un sistema de Potencia, nos encontramos con una característica física cuyo valor es muy difícil de predecir con exactitud. El valor de la resistividad del terreno, en una subestación o estación terminal o a lo largo del recorrido de una línea de transmisión depende de muchos factores, tales como: tipo del terreno (composición y compactación), contenido de humedad, contenido salino, temperatura, etc., la mayoría de estos factores, son normalmente muy variables con el tiempo y, por lo tanto, es también variable la resistividad del suelo, tal como se puede apreciar en la figura 3.1. (tomada de la R.19).

Es la incertidumbre que se acaba de describir respecto al valor de resistividad del terreno a considerar en una subestación o estación terminal o en una torre



$$R = K \cdot \rho$$

FIG. 3.1. VARIACION DE LA RESISTIVIDAD LOCAL EN DIFERENTES EPOCAS

de transmisión determinada, lo que obliga a la adopción de un procedimiento probabilístico para la asignación de un valor de resistividad a cada una de las torres o subestaciones conectadas a la red de tierra. Se escoge el método de Monte-Carlo por ser un procedimiento de muestreo que simula el comportamiento de variables aleatorias y de fácil aplicación en programas digitales.

3.2. DISTRIBUCION ESTADISTICA DE LAS RESISTIVIDADES DEL SUELO

En el análisis de la red de puesta a tierra, la resistividad del terreno es una variable que cambia de valor numérico debido a muchos factores o fenómenos de la naturaleza, como la lluvia, el sol, las estaciones del año, etc., en la R-19 se muestran gráficos de las variaciones de la resistividad del terreno en función ya sea del contenido de humedad, de la temperatura, de la composición o compactación del suelo, etc., observándose que estas curvas no son constantes, al contrario, varían inclusive en un mismo día el valor de la resistividad de una localización no es el mismo.

Una vez justificada la adopción de un método probabilístico para el análisis de la red de tierra de un SEP, se trata a la resistividad del suelo, que es una variable aleatoria, como el resultado de una serie de factores, que afectan su valor, llámase por ejemplo, humedad, presión, compactación, temperatura, etc., donde se considera que cada uno de estos factores tienen una variación independiente en el efecto sobre la resistividad del suelo, esta variación puede ser de cualquier manera. Si se aplica la teoría de probabilidades (R.20) que dice que una variable aleatoria x (resistividad) puede representarse como la suma de n

variables aleatorias independientes (efectos de los diferentes factores), esta suma tiene una distribución aproximadamente normal. Este resultado notable se conoce como el teorema del límite central de las probabilidades.

En el procedimiento de cálculo, en el análisis de la red, se considerará a la resistividad del suelo como una variable aleatoria distribuída normalmente, justamente fundamentándose en el teorema del límite central. Lo ideal sería disponer de cuadros estadísticos de valores de resistividad medidos periódicamente a lo largo del tiempo para una localización dada, de esta manera, la función de distribución de la resistividad en una zona específica, sería fijada y en este caso reemplazaría la función gaussiana o normal. Desafortunadamente, estos datos no se disponen en el País; sin embargo, INECEL cuenta con un mapa resistivo del Ecuador (FIG. 3.2.), en el que se observan valores medios de resistividad del suelo a lo largo del recorrido de las líneas de transmisión. Este mapa resistivo permite tener criterio de un valor promedio de la resistividad que es un dato necesario cuando se define una función normal, al igual que la desviación standard del valor medio de la variable aleatoria(σ).

La probabilidad de que la variable aleatoria (resistividad del terreno), distribuída normalmente, tome va

lores comprendidos entre $\rho_{media} \pm 3 \sigma$, es del 99,7%, en otras palabras, la probabilidad de que la magnitud absoluta de la desviación sea mayor que el triple de la desviación cuadrática media es muy pequeña. Esto significa que sólo el 0,3% de los casos puede ocurrir así, estos sucesos, partiendo del principio de imposibilidad de los sucesos poco probables, pueden considerarse prácticamente inciertos o imposibles. En esta regla reside la justificación del uso de la distribución normal de probabilidades en casos prácticos, en los cuales no existen valores más allá de determinados límites, aún cuando la teoría los incluya, no se introduce error apreciable.

De acuerdo a lo anotado, la desviación standard de la resistividad media en una zona determinada, puede ser máximo el 33,3% de la media estimada, de tal manera de poder abarcar el rango máximo de variación de la resistividad del suelo. En la práctica, y de acuerdo a los gráficos de los efectos de factores naturales sobre la resistividad, disponibles en la R.19, la desviación standard está alrededor de 20-30% de la media.

Una vez especificados los parámetros que definen la distribución normal, se procede a generar valores de resistividad del suelo, empleando el programa digital de aplicación y utilizando el método de Monte-Carlo que a continuación se describe.

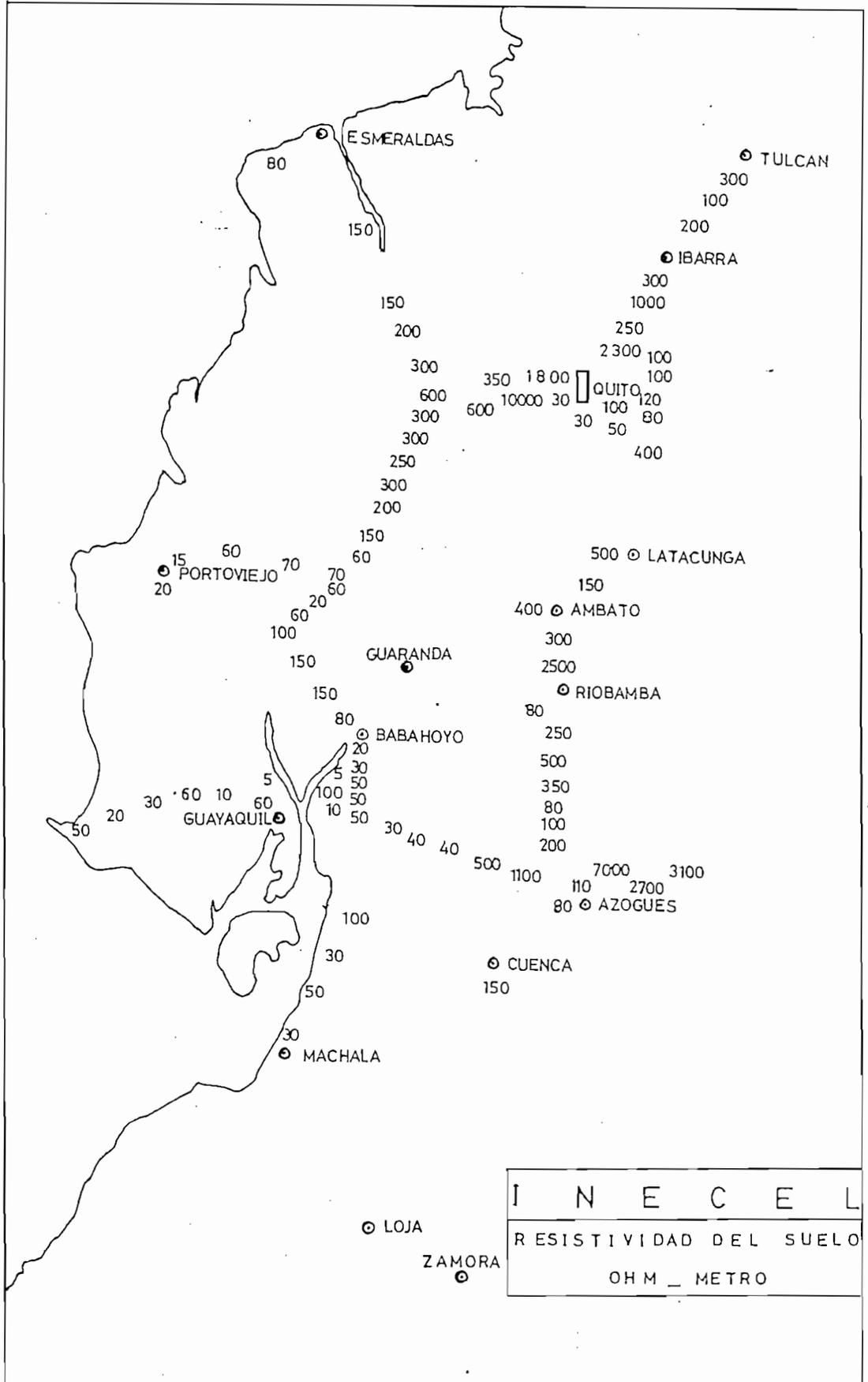


FIG. 3.2. MAPA RESISTIVO DEL ECUADOR

3.3. FORMULACION DEL METODO DE MONTE-CARLO EN LA SOLUCION DEL PROBLEMA

A menudo se presentan situaciones en las que es indicado utilizar algún método de muestreo. Típicamente, el método simulado implica el reemplazo del universo real de elementos, por el universo teórico correspondiente, descrito por una cierta distribución de probabilidad (en esta tesis se ha tratado a la variable aleatoria resistividad del suelo como distribuída normalmente) que se supone adecuada, y la selección de una muestra de esta población teórica, mediante una tabla de números aleatorios. Los métodos para tomar esa muestra, así como la discusión de los problemas de decisión que dependen fundamentalmente de dichos métodos de muestreo, se recoge bajo el título genérico de métodos de Monte-Carlo. Parafraseando la expresión de J.G. Anderson (R.17) cuando se trata de modelar un sistema cuyas características se conocen en forma estadística, el método de Monte-Carlo consiste en tratar de distribuír las "cartas de juego" (es decir, las características), en la misma forma en que la naturaleza lo hace.

El método de Monte-Carlo consiste en tomar un valor al azar de la resistividad del terreno descrita por la función de probabilidad $f(\rho)$, como sigue: (R.18).

- Se grafica la función acumulativa de probabilidad

$$y = F(\rho) = \int_0^{\rho} f(x) dx$$

- Se escoge al azar un número entre 0 y 1, (con tantos decimales como se desee), mediante una tabla de dígitos aleatorios.
- Se encuentra la función inversa:

$$\rho = \bar{F}^{-1}(y)$$

donde se obtiene el valor muestreado de ρ

Vale anotar que y es un número aleatorio distribuído uniformemente comprendido entre 0 y 1, para cada valor de y corresponde un valor de ρ . En el programa digital de aplicación, se emplea la subrutina GAUSS que proporciona la resistividad muestreada para cada llamada que se realice, partiendo de una semilla primitiva (número entero impar menor o igual a 9 dígitos), que se encarga de generar números aleatorios con distribución normal mediante llamadas a la subrutina RANDU (generación de números aleatorios reales entre 0 y 1 distribuídos uniformemente), incluida o empleada por GAUSS.

Para justificar el procedimiento empleado en el método de Monte-Carlo, es necesario demostrar que cualquier elemento en la población tiene la misma probabilidad de ser tomado que en su propia distribución

aleatoria. En forma equivalente, se debe demostrar que la probabilidad de obtener una medida entre ρ_1 y $\rho_1 + d\rho$ es proporcional a la densidad $f(\rho_1)$. En la figura 3.4. se grafica la función acumulativa de probabilidad inversa, de donde se concluye que:

$$P \{ \rho_1 < \text{resultante} < \rho_1 + d\rho \} = dy_1$$

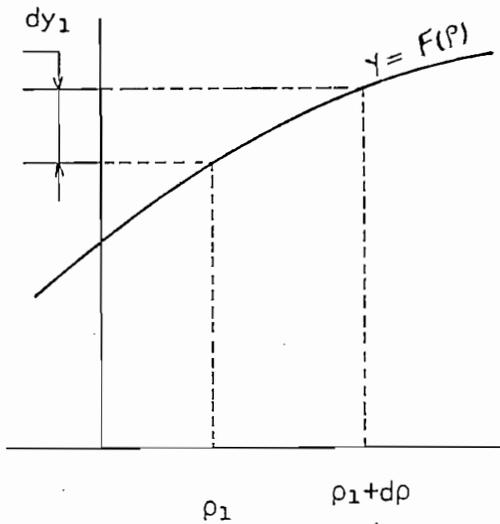


FIG. 3.4. FUNCION ACUMULATIVA DE PROBABILIDAD INVERSA

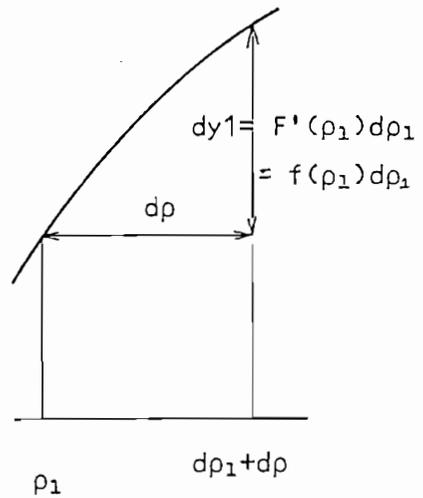


FIG. 3.5. AMPLIACION

De la figura 3.5., se tiene que:

$$d y_1 = f(\rho_1) d \rho$$

de este modo:

$$P \{ \rho_1 < \text{resultante} < \rho_1 + d\rho \} \sim f(\rho_1) d\rho$$

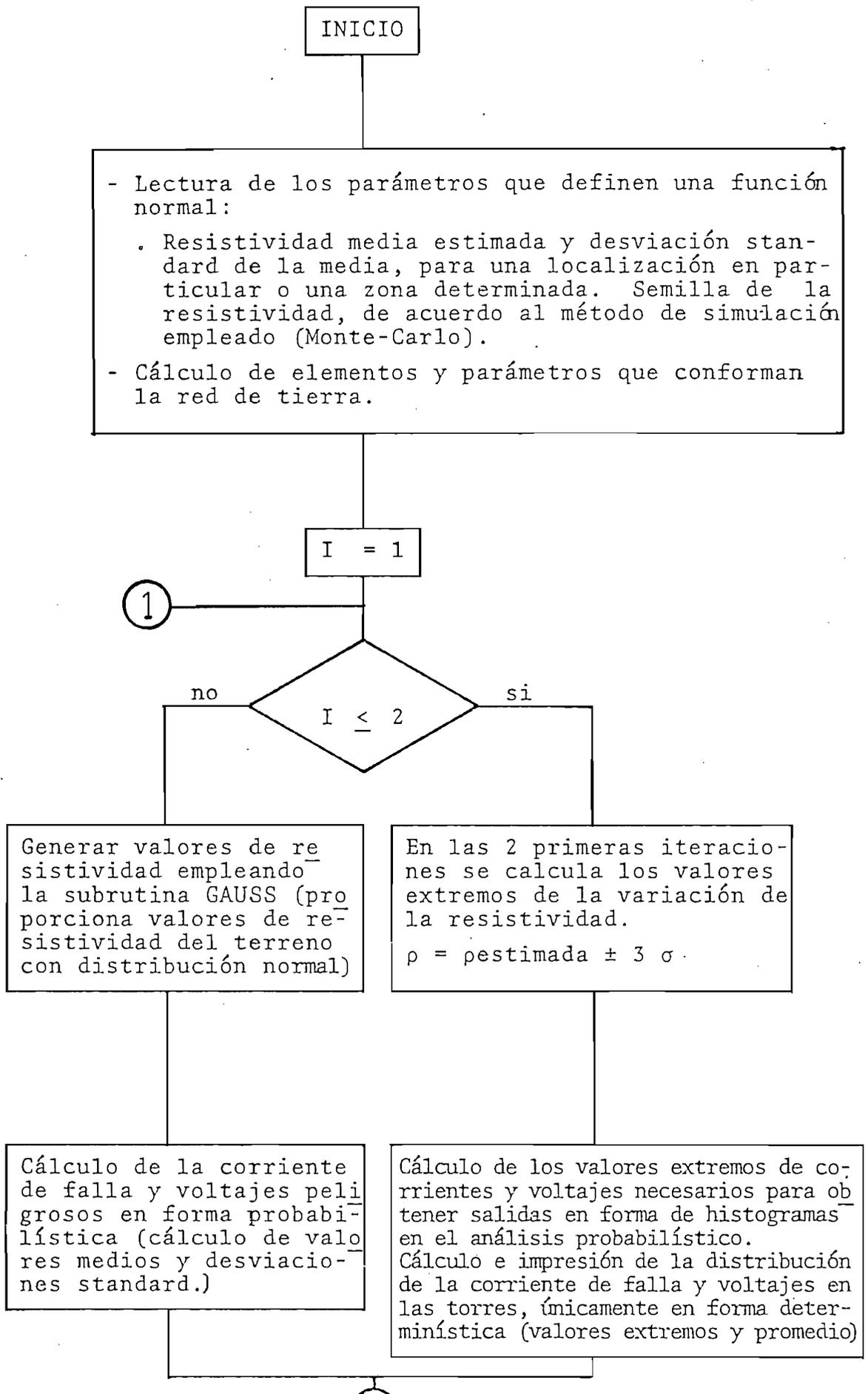
como se deseaba demostrar.

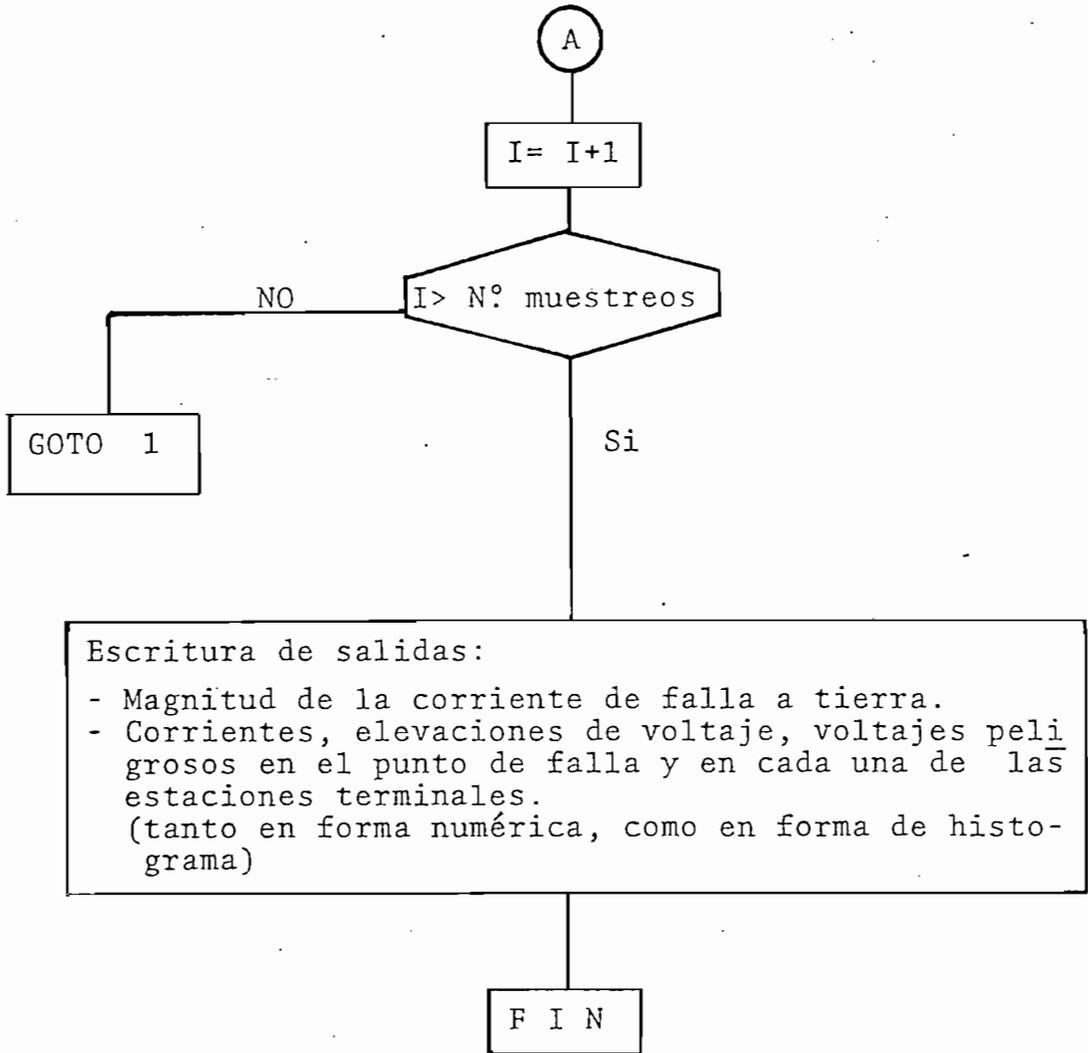
Es necesario anotar que mientras más muestreos se rea

lice, la variación de la resistividad del terreno tiende a tener una distribución aproximadamente normal. Desventajosamente, y refiriéndose al empleo del programa digital de aplicación, el tiempo necesitado para realizar muchos muestreos (más de 1000 por ejemplo), es relativamente grande, por lo cual se recomienda efectuar hasta 200 muestreos en cada corrida del programa.

3.4. DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION DE LA CORRIENTE DE FALLA Y VOLTAJES PELIGROSOS APLICANDO EL METODO DE MONTE-CARLO

La parte central del presente estudio radica en el cálculo de la magnitud y distribución de la corriente de falla a tierra y el cálculo de voltajes peligrosos en la red, tomando en cuenta que son funciones de la resistividad del suelo que a su vez es considerada como una variable aleatoria distribuída normalmente. El método de cálculo se detalló en el Capítulo II y, empleando el programa digital de aplicación, se obtienen resultados en forma probabilística utilizando el método de Monte-Carlo, el cual básicamente desarrolla el siguiente procedimiento en lo relacionado al cálculo de corrientes de falla y voltajes peligrosos.





El número de muestreos es una variable de entrada. Se recomienda que no sea más de 200 debido al excesivo tiempo de ejecución del programa digital de aplicación. En la última repetición o generación de valores de resistividad, se imprime el número generado que servirá a su vez como semilla para un nuevo proceso de muestreo si se desea realizar (otra corrida del programa). En este caso se obtendrán los resultados finales simplemente sumando los resultados parciales de cada corrida del programa y efectuando operaciones elementales.

3.5. EVALUACION DE RESULTADOS

Una vez desarrollada la configuración más general de una red de puesta a tierra de un S.E.P., tanto en forma determinística cuanto en forma probabilística, considerando a la resistividad del suelo como una variable aleatoria distribuída normalmente, se procede al análisis de resultados proporcionados por el programa digital de aplicación, especialmente elaborado para la utilización de los procedimientos de cálculo descritos en el análisis teórico de este trabajo.

Los resultados del análisis de una red de tierra, proporcionados por el programa para computadora, en forma general, se obtienen para valores fijos de la resistividad del suelo y para valores variables, con un rango de variación de $\pm 3 \sigma$, donde σ es la desviación standard de la resistividad con respecto a su valor medio. La evaluación de los resultados se enfocará considerando los dos tipos de análisis que a continuación se describen.

3.5.1. ANALISIS DE RESULTADOS EN FORMA DETERMINISTICA

Tal como se describe en el apéndice B, el programa digital tiene la opción de proporcionar resultados únicamente en forma determinística; es decir, analizando una condición fija de la red de tierra, con valores

promedios de la resistividad del suelo, anotando que esta condición se puede o no dar en la realidad. Para valores de resistividad media del suelo y de sus extremos ($\pm 3 \sigma$) en cada zona a lo largo del recorrido de una línea, se obtiene: la magnitud de la corriente de falla a tierra, la corriente de falla que se dispersa en el suelo a través de la toma a tierra en la localización de la falla, la corriente que retorna a las estaciones generadoras, las elevaciones de voltaje en cualquier lugar de la red, así como los voltajes peligrosos, adicionalmente, se obtiene la distribución de la corriente de falla entre el suelo, los conductores neutros y las puestas a tierra de las torres. La corriente de falla, que circula por los conductores de tierra, va a ser mayor en las secciones adyacentes a la localización de la falla, y en aquellas cercanas a las estaciones generadoras, manteniéndose en un valor aproximadamente constante en las secciones centrales, dependiendo si existe o no zonas de distinta resistividad.

Del análisis determinístico de la red de tierra, se puede construir curvas que relacionen el efecto de la variación de los diferentes parámetros que se desee, en función de la resistividad del suelo, esto se consigue corriendo varias veces el programa para distintos valores de ρ , de lo cual se puede apreciar los elementos más influyentes sobre ciertos parámetros es

pecíficos y así, tratar de mejorar situaciones críticas si las hubiere, desde el punto de vista netamente eléctrico, por ejemplo, conocer la influencia de la localización de la falla en cualquier parte a lo largo de la línea sobre la distribución de corriente por los conductores de tierra, o sobre las elevaciones de voltaje en las puestas a tierra de las torres, en especial sobre aquellas ubicadas en zonas de alta resistividad, de tal manera de tener criterio en mejorar las puestas a tierra.

Otra opción del análisis determinístico, es calcular la corriente de carga, en sistemas de distribución, y de esta manera calcular la regulación del sistema y comparar con valores permisibles, obteniendo curvas de regulación en función de la resistividad del suelo, se puede apreciar claramente la influencia del número de puestas a tierras a lo largo de la línea y, de esta forma, disminuirlas o, en su defecto, aumentarlas, existiendo varias alternativas a fin de lograr no sobrepasar límites dados por las normas. Es importante conocer la distribución de la corriente de carga, en sistemas de distribución, especialmente, aquella que circula por el conductor neutro, de tal manera de poder seleccionar el tipo y tamaño del conductor, sin sobrepasar su capacidad de corriente, esto es, probar con conductores de distinta especificación a la dada por las normas y ver si cumplen los requeri-

mientos eléctricos.

3.5.2. ANALISIS DE RESULTADOS EN FORMA PROBABILISTICA

Tratando a la resistividad del suelo no como un valor fijo sino como una variable aleatoria con distribución normal, se puede analizar el comportamiento de una red de tierra en conjunto, es decir, con una alta probabilidad de ocurrencia de las condiciones reales de la red. El programa da resultados probabilísticos para las variables en lugares en particular, con un valor medio y una desviación standard de la resistividad del terreno, con respecto a su valor medio.

El programa también proporciona los resultados en forma de histogramas: es importante visualizar la variación de cada parámetro deseado, considerando que son funciones de la resistividad del suelo y que a su vez ésta tiene una variación normal, de tal manera de conocer sobre qué variable es más influyente la resistividad y así, inclusive, deducir expresiones aproximadas que relacionen las corrientes o voltajes con la resistividad en forma general. De los histogramas, se puede obtener la frecuencia acumulada para cada variable deseada, esto se logra únicamente sumando cada barra a la anterior, de tal manera de poder prever la probabilidad de sobrepasar límites específicos, como es el caso de los voltajes de toque y paso; es

decir, se puede conocer el grado de seguridad de la instalación de tierra, lo mismo se puede aplicar al caso de las corrientes de falla en lo referente a la coordinación de protecciones.

Vale anotar que el programa no proporciona resultados en forma probabilística, de los voltajes peligrosos; sin embargo, tienen la misma distribución que la elevación de voltaje en un lugar en particular, sólo que en este caso, sus límites cambian debido a que representan un porcentaje de la elevación de voltaje.

De lo anotado, se desprende la importancia del análisis probabilístico, quedando a juicio particular la interpretación y empleo de estos resultados para lograr una instalación segura de un sistema de puesta a tierra en una localización deseada o en conjunto, formando la red. De los resultados probabilísticos se puede tener criterio de que tan conveniente es mejorar una puesta a tierra, relacionándolo con el costo económico que ello implica por ejemplo, y de este tipo de alternativas se puede conseguir un equilibrio entre los dos factores, sacrificando tal vez el aspecto técnico pero sin excederse del rango de variación de los resultados.

C A P I T U L O I V

EJEMPLOS DE APLICACION

En lo que sigue se analizan algunos ejemplos basados en el método teórico desarrollado en los capítulos anteriores y en el programa digital elaborado para este estudio. Se notará que las características del suelo tienen un considerable efecto sobre la corriente de falla a tierra, su distribución entre los conductores de tierra y el suelo, así como sobre los voltajes en distintas partes de la red de tierra. Específicamente, se analiza el ejemplo teórico descrito en la REF. 6, comprobándose la validez del programa digital implementado y con ello verificando los resultados teóricos con mediciones realizadas según lo que se expone en dicha referencia. Además se analiza un ejemplo práctico de la red de tierra de una línea del sistema nacional para concluir con un ejemplo destinado al análisis de la red de puesta a tierra de un sistema de distribución.

4.1. EJEMPLO TEORICO

4.1.1. CONDUCTORES DE TIERRA CONECTADOS A LAS SUBESTACIONES

Se analiza el esquema de la Fig. 4.1.

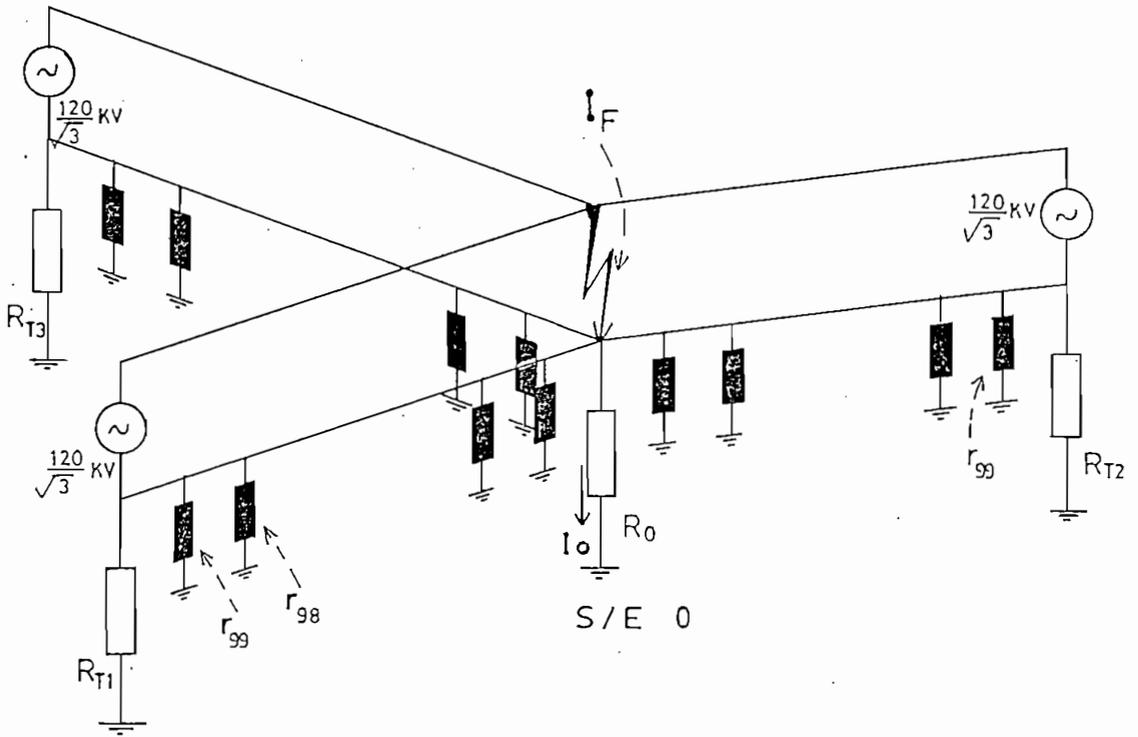


FIG. 4.1. RED CON TRES TERMINALES

En la Fig. 4.1. se aprecia una red con tres estaciones terminales, con una línea de transmisión entre la S/E donde se simula una falla a tierra y cada estación terminal. Las estaciones terminales y las líneas de transmisión son idénticas, cada línea tiene 100 secciones (torres). El análisis se lo realiza exclusivamente en forma determinística, para 3 condiciones de resistencias de puestas a tierra, precisamente los parámetros que definen la configuración, se aprecian en la Tabla 4.1.

TABLA N° 4.1

Caso	R_o [Ω]	γ_t [Ω]	R_T [Ω]	Z_{ai} [Ω] (0.5 Km)	Z_{gi} [Ω] (0.5 Km)	Z_{mi} [Ω] (0.5 Km)
1	0.025	0.1	0.03	0.1+j0.382	3.5+j0.607	0.025+j0.147
2	0.476	1.9	0.57	0.1+j0.437	3.5+j0.662	0.025+j0.202
3	0.25	1.0	0.3	0.1+j0.425	3.5+j0.65	0.025+j0.19

Los casos se refieren a tomar como datos de resistividad del suelo a su valor medio (3) y sus extremos $\rho \pm 3 \sigma$ donde $\sigma = 33.3 \%$ de ρ_{medio} (1 y 2), se observa que los parámetros de los conductores de fases y de tierra no son iguales, como era de esperarse por la aplicación de las fórmulas de Carson que indican que la parte imaginaria de estas impedancias son funciones de la resistividad del suelo a pesar de que su variación no es mayor.

En la Fig. 4.1., se simula una falla en la S/E 0 y se analiza las siguientes alternativas para cada caso.

- a- 1 terminal energizado, 1 línea
- b- 2 terminales energizados, 2 líneas
- c- 2 terminales, 2 líneas, solamente 1 terminal energizado
- d- 3 terminales energizados, 3 líneas
- e- 3 terminales, 3 líneas, solamente 1 terminal energizado

Los resultados se presentan en la Tabla N° 4.2., donde:

I_F - corriente de falla a tierra total

I_o - corriente de falla que circula por la puesta a tierra de la S/E fallada

V_i , $i=0,1,2$ y 3 - elevación de voltaje en la estación i

V_{ti} , $i=0,1,2$ y 3 - voltaje de toque en la estación i

V_{pi} , $i=0,1,2$ y 3 - voltaje de paso en la estación i

TABLA N° 4.2

Casos	Variables	ALTERNATIVAS				
		a	b	c	d	e
1	I_F (A)	1762.4	3524.3	1762.1	5285.8	1761.9
	I_o (A)	1727.4	3431.4	1715.7	5112.5	1704.2
	V_o (V)	43.2	85.7	42.9	127.7	42.6
	V_{to} (V)	17.4	34.5	17.3	51.4	17.1
	V_{po} (V)	2.3	4.6	2.3	6.9	2.3
	V_1 (V)	51.7	51.7	51.7	51.7	51.7
	V_{t1} (V)	10.2	10.2	10.2	10.2	10.2
	V_{p1} (V)	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5
	V_2 (V)		51.7	0.03	51.7	0.03
	V_{t2} (V)		10.2	0.01	10.2	0.01
	V_{p2} (V)		1.5	0.0	1.5	0.0
	V_3 (V)				51.7	0.03
	V_{t3} (V)				10.2	0.01
V_{p3} (V)				1.5	0.0	
2	I_F (A)	1546.8	3088.8	1544.4	4626.2	1542.1
	I_o (A)	1389.3	2551.3	1275.7	3536.6	1178.9
	V_o (V)	660.7	1213.3	606.7	1681.9	560.6
	V_{to} (V)	265.9	488.3	244.2	676.9	225.6
	V_{po} (V)	35.6	65.3	32.7	90.6	30.2
	V_1 (V)	778.2	777.0	778.2	775.8	778.2
	V_{t1} (V)	152.9	152.7	152.9	152.4	152.9
	V_{p1} (V)	22.6	22.6	22.6	22.5	22.6
	V_2 (V)		777.0	6.7	775.8	6.2
	V_{t2} (V)		152.7	1.3	152.4	1.2
	V_{p2} (V)		22.6	0.2	22.5	0.2
	V_3 (V)				775.8	6.2
	V_{t3} (V)				152.4	1.2
V_{p3} (V)				22.5	0.2	

Continuación.....

Casos	Variables	A L T E R N A T I V A S				
		a	b	c	d	e
3	I _F (A)	1590.9	3178.9	1589.5	4764.2	1588.1
	I _o (A)	1482.5	2811.5	1405.7	4009.0	1336.4
	V _o (V)	371.0	703.6	351.8	1003.3	334.4
	V _{t_o} (V)	149.3	283.2	141.6	403.8	134.6
	V _{p_o} (V)	20.0	37.9	18.9	54.0	18.0
	V ₁ (V)	439.9	439.5	439.9	439.1	439.9
	V _{t₁} (V)	86.4	86.4	86.4	86.3	86.4
	V _{p₁} (V)	12.8	12.8	12.8	12.8	12.8
	V ₂ (V)		439.5	2.2	439.1	2.1
	V _{t₂} (V)		86.4	0.4	86.3	0.4
	V _{p₂} (V)		12.8	0.06	12.8	0.06
	V ₃ (V)				439.1	2.1
	V _{t₃} (V)				86.3	0.4
	V _{p₃} (V)				12.8	0.06

De los valores de la tabla N° 4.2., se nota que en forma general, la resistividad del suelo influye en mayor grado sobre los voltajes que sobre las corrientes, naturalmente el voltaje es función directa de la resistividad y de la corriente que, a su vez, es también función de ρ a pesar de ser una relación inversa. La corriente de falla a tierra en a) es mayor que en c) y e), debido a que algo de corriente fluye por los conductores de fase "desenergizados".

En el siguiente cuadro se realiza una comparación de resultados obtenidos al emplear el programa en este estudio, y, aquellos indicados en la REF. 6, para el caso 3, se obtienen los parámetros que describen la red, de tal manera de, aproximadamente, coincidir con los de dicha referencia.

TABLA N° 4.3

ALTERNATIVA	[FALLA, SEGUN ESTA TESIS	[FALLA SEGUN REF. 6.	% de ERROR
a	1590.9	1591.6	0.04
b	3178.9	3158.8	0.64
c	1589.5	1577.5	0.76
d	4764.2	4722.9	0.87
e	1588.1	1569.6	1.18

La existencia de error que se observa en la Tabla N° 4.3., entre otras cosas, se debe a que en la Ref. 6, se toma como valores fijos los parámetros de la red, sin que sean funciones de la resistividad del suelo, en este estudio en cambio, se calculan estos parámetros, de tal manera de que sus valores son aproximados a los que se encuentran definidos en la REF.6.

Para la alternativa a y los 3 casos del cuadro N° 4.1., en la tabla N° 4.4., se presenta la distribución de la corriente de falla entre el suelo y los conductores de tierra, así como la elevación de voltaje en las torres. Para los 3 casos, la corriente que circula por el conductor de tierra es aproximadamente igual en las secciones centrales de la red, varía apreciablemente, en las secciones cercanas al punto de falla y a la estación terminal, también se aprecia el valor

de la corriente de falla que retorna a la fuente generadora a través de tierra, esto es, el valor, para cada caso, de la corriente por tierra en el lazo 100 de la Tabla N° 4.4. Es importante notar como se distribuye la corriente de falla, de la misma tabla, únicamente existe circulación de corriente por las torres cercanas al punto de falla y a la estación terminal, para el caso 3 por ejemplo por las torres 5 hasta 96 no hay circulación de corriente, por las primeras torres la corriente se dispersará en el suelo a través de sus puestas a tierra, mientras que por las últimas torres la corriente retornará del suelo hacia el conductor de tierra, esto se puede visualizar mejor si se observan los valores de las corrientes por el conductor de tierra, de un cierto valor, disminuye hasta permanecer constante y luego comienza a elevarse, lo cual indica la forma de distribuirse la corriente. Para las demás alternativas la distribución de corriente es bastante parecida a lo que se aprecia en la tabla 4.4., para las alternativas b, y d la distribución es totalmente simétrica en las líneas que conectan a cada estación terminal y para las alternativas c y e hay una mínima distribución de corriente en las líneas que conectan a las fuentes desenergizadas.

4.1.2. LOCALIZACION DE LA FALLA

Se analiza la configuración de la Fig. 4.2., los datos

para este esquema son los siguientes:

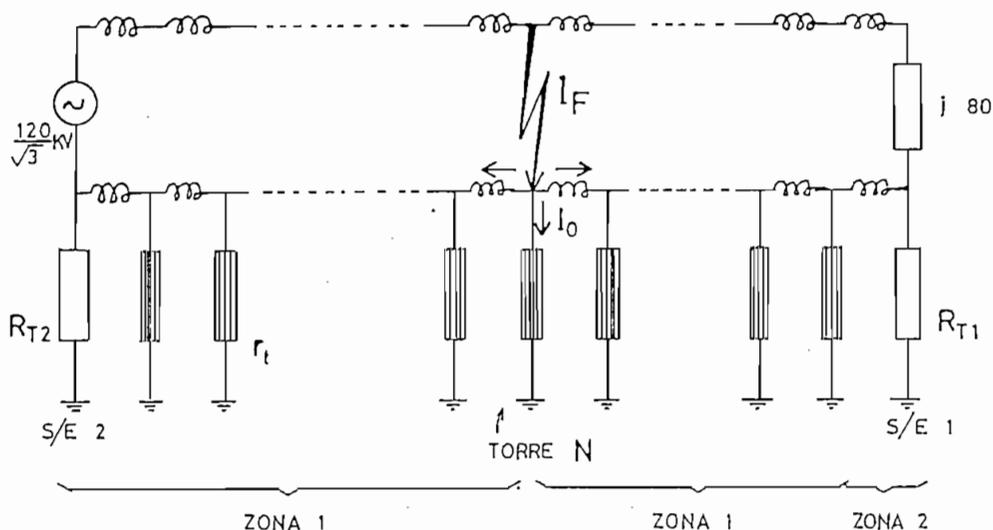


FIG. 4.2. LOCALIZACION DE LA FALLA A TIERRA

$$y_t = 0.0056 \rho$$

$$R_{T1} = R_{T2} = 0.0021 \rho$$

$$Z_{a;} = 0.1 + j (0.1148 + 0.0434 \log (77760\rho)) \Omega (0.5 \text{ Km})$$

$$Z_{g;} = 3.5 + j (0.3398 + 0.0434 \log (77760\rho)) \Omega (0.5 \text{ Km})$$

$$Z_{m;} = 0.025 + j (-0.1202 + 0.0434 \log (77760\rho)) \Omega (0.5 \text{ Km})$$

Número total de torres: 100

La carga $j80$, se añade a la sección conectada a la estación terminal 1.

Se simula fallas en las torres $N^\circ N (N=5, 20, 50, 80 \text{ y } 98)$.

La distribución de la corriente de falla entre la torre N y los conductores de tierra en ambos lados de la torre, está dado en la Figura 4.3.

En la figura 4.3., se aprecia la corriente que circula

la por el conductor de tierra como un porcentaje de la corriente de falla total y para variaciones de la resistividad del suelo entre 1 y 2000 Ω -m. Esta figura indica que la división de la corriente de falla entre la torre y el conductor de tierra no es muy afectada por la localización de la falla, en todo caso, la corriente por el conductor de tierra es menor cuando la falla se produce en las secciones centrales de la línea de transmisión, obviamente la magnitud de la corriente de falla total va a ser distinta en todos los casos, tal como se puede apreciar en la Fig. 4.4.; siendo mayor cuando N tiende a 100.

En la Fig. 4.5. se presenta la elevación de voltaje en cada una de las torres donde se simula una falla a tierra como una función de la resistividad del suelo. A excepción de N=98, el voltaje aumentó al amentar ρ , notándose mayor variación a medida que N es mayor, esto no sucede cuando se simula la falla en N=98, donde para valores de ρ mayores a 600 Ω -m la variación es inversa, esto se justifica por cuanto la corriente de falla que circula por la torre fallada es elevadísima y como su relación con ρ , es inversa, el voltaje para ciertos valores de ρ , va también a tener una relación inversa con ρ a pesar de además ser función directa de la resistividad del suelo. Los voltajes de toque y paso en el lugar de la falla van a tener curvas semejantes a aquellas de la Figura 4.5. sólo

que sus valores van a ser menores que la elevación de voltaje, aproximadamente el 40 y 20% respectivamente, como se desprende de los resultados del computador para este ejemplo.

CASO 1 ALTERN. a

TABLA. N° 4.4

LÍNEA 1 ENTRE LA ESTACION 1 Y LA TORRE O S/E FALLADA

CORRIENTE POR EL (LOS) CABLE(S) DE TIERRA	(A)		(A)		CORRIENTE POR LAS TORRES		ELEVACION DE VOLTAJE EN LAS TORRES (V)	
	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO
1	1727.44	-75.99	179.25	-12.70	1727.44	-76.58	43.16	-76.58
2	1735.80	-75.99	73.75	-4.11	11.52	-85.90	1.15	-85.90
3	1725.12	-75.97	77.00	-14.34	13.81	-85.89	1.38	-85.85

CASO 2 ALTERN. a

1	1389.34	-75.95	169.36	-54.09	1389.34	-76.93	660.71	-76.93
2	1445.84	-77.92	96.36	-25.06	97.01	-82.98	184.31	-82.98
3	1512.35	-77.95	88.11	-9.03	27.06	-89.02	51.42	-89.03
4	1517.55	-77.92	87.91	-4.12	7.55	84.92	14.34	84.92
5	1531.48	-77.90	83.40	-2.75	4.11	79.88	4.00	78.88
6	1527.00	-77.95	88.34	-2.39	0.59	72.84	1.12	72.84
7	1521.30	-77.92	88.19	-2.35	0.69	72.90	1.31	72.90
8	1519.08	-77.91	87.54	-4.43	2.48	79.00	4.71	79.00
9	1517.00	-77.91	88.11	-1.24	8.89	85.05	16.89	85.05
10	1515.37	-77.90	99.51	-28.24	31.87	-88.90	60.56	-88.90
11	1511.70	-75.98	150.52	-57.72	114.25	-82.85	217.08	-82.85

CASO 3 ALTERN. a

1	1442.51	-77.91	127.92	-44.27	1482.51	-77.28	371.03	-77.28
2	1551.24	-77.92	80.95	-14.31	99.20	-84.50	69.26	-84.50
3	1563.78	-77.92	85.30	-11.77	12.93	88.27	12.91	88.27
4	1566.05	-77.92	85.91	-1.13	2.41	81.06	2.41	81.06
5	1565.94	-77.91	85.40	-1.22	0.83	73.90	0.53	73.90
6	1563.23	-77.91	99.25	-14.13	2.26	81.14	2.26	81.14
7	1564.65	-77.92	87.33	-14.13	19.33	84.35	15.33	84.35
8	1569.91	-77.92	159.06	-44.27	99.12	-84.42	82.11	-84.42

35° 30° 25° 20° 15° 10° 5°

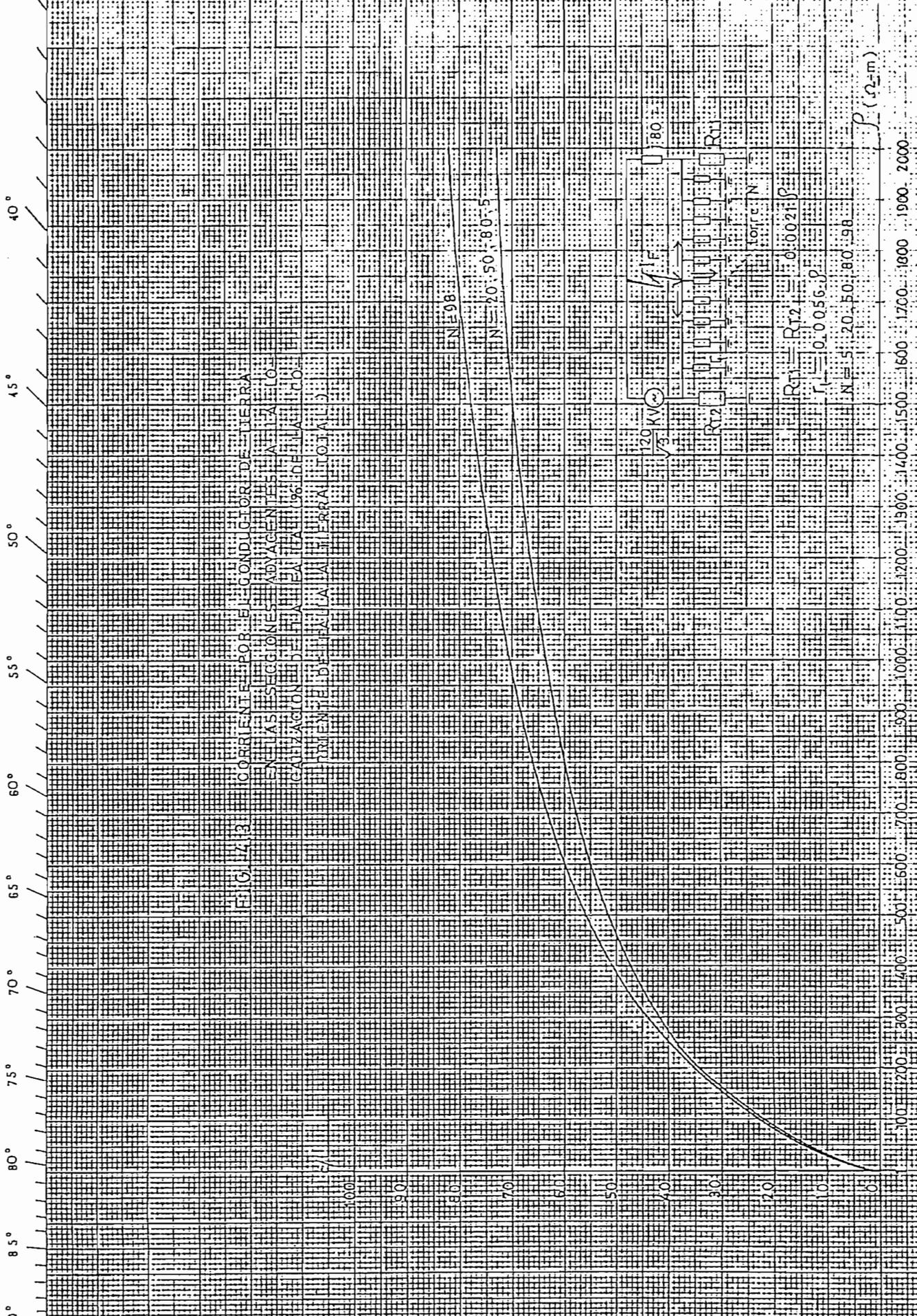
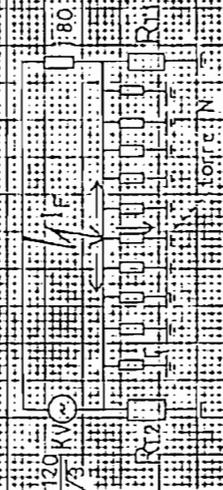


FIG. 143 CORRIENTE POR EL CONDUCTOR DE TIERRA EN LAS SECCIONES AVANZADAS A LA LO CALIZACION DE LA EXALTA (% DEL ALTO) FUENTE DE LA ALI FERRA (TOTAL)

EN = 98
IN = 20, 50, 80, 5



$R_1 = R_2 = 0.0021 \rho$
 $r = 0.0056 \rho$
 $N = 5, 20, 50, 80, 98$

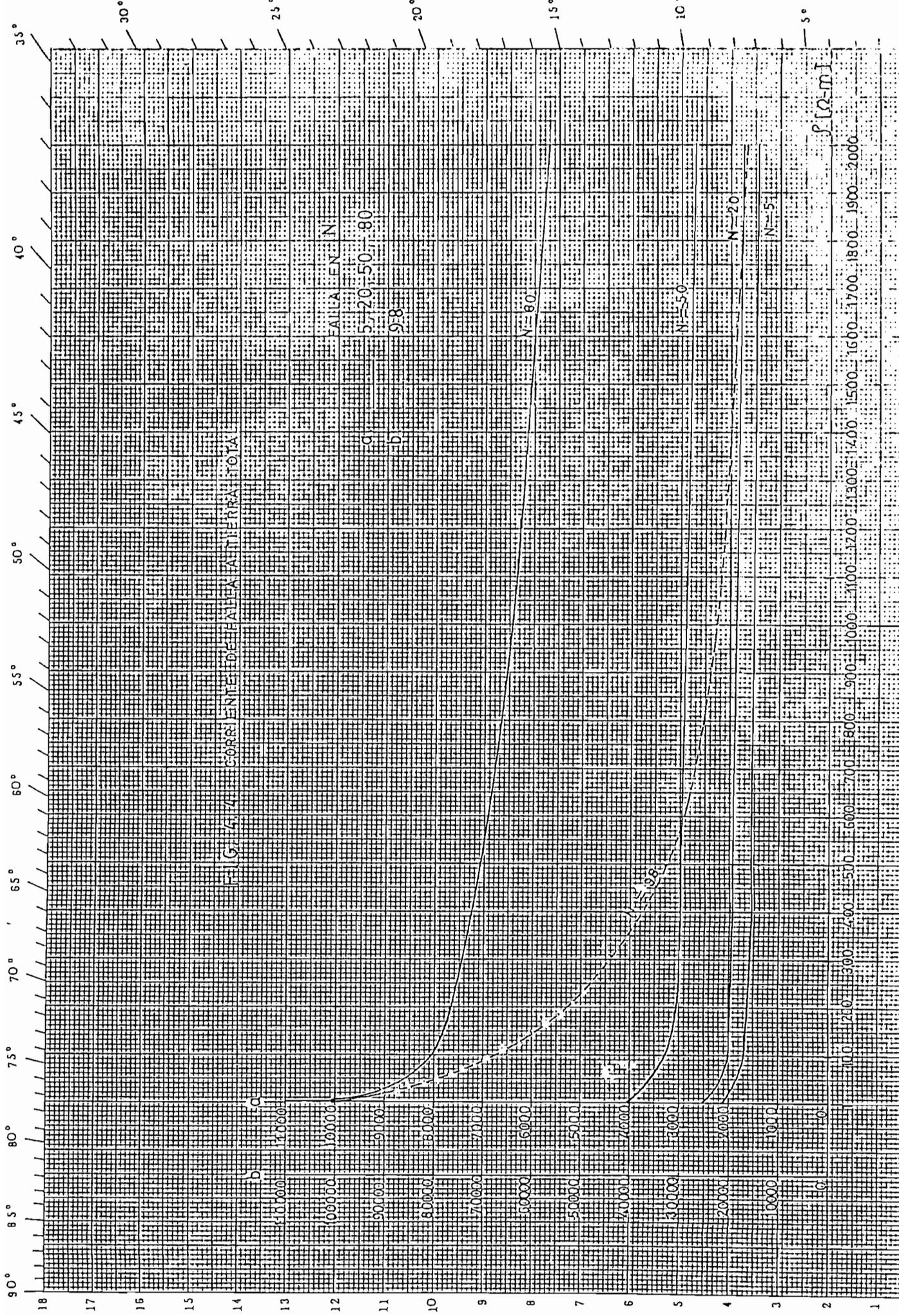
ρ (Ω-m)

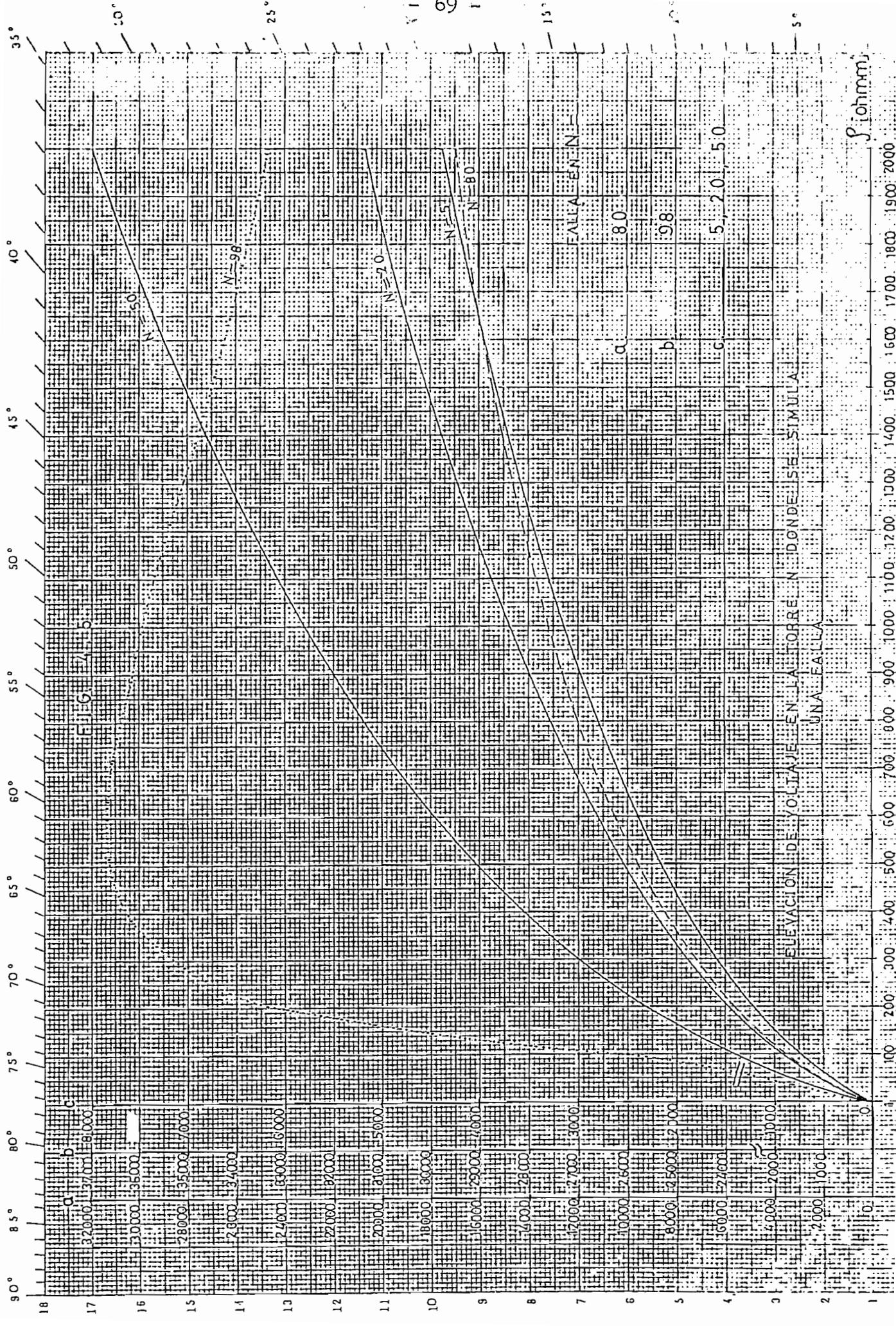
18 17 16 15 14 13 12 11 10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

50° 55° 60° 65° 70° 75° 80° 85°

1000 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0

1700 1600 1500 1400 1300 1200 1100 1000 900 800 700 600 500 400 300 200 100 0



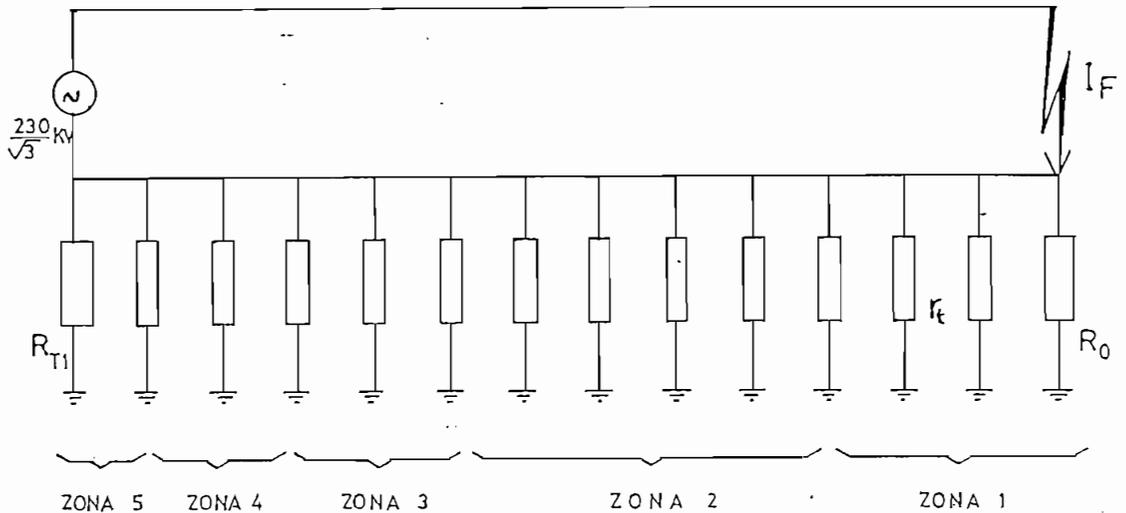


ELEVACION DE YOTAJE EN LA TORRE N. DONDE SE SIMULA UNA FALLA

Johann

4.2. RED DE PUESTA A TIERRA DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA

Su configuración es la siguiente:



Número total de torres 320

FIG. 4.6. CONFIGURACION DE LA RED DE TIERRA DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA

De acuerdo al perfil resistivo de la ruta, que se aprecia en la Fig. 4.7., se dividió a la línea en zonas de distinta resistividad, implicando distintos tipos de puesta a tierra de las torres entre las zonas, anotando que dentro de cada zona se tiene igual toma a tierra. En la tabla N° 4.5, se describe las puestas a tierra así como sus resistencias, indicando que las alternativas de puesta a tierra son las siguientes:

ALTERNATIVA	TIPO DE PUESTA A TIERRA
1	Una varilla en un vértice de la base de la torre
2	Dos varillas en los vértices diagonales de la base
3	Cuatro varillas en los vértices de la base de la torre
4	Contrapesos de distinta longitud
5	Tipo enrejado

TABLA N° 4.5.

DESCRIPCION	Z	O	N	A	S
	1	2	3	4	5
Número de torres	86	120	44	43	27
Alternativa en la toma a tierra	2	3	4	4	3
Resistividad media [Ω-m]	50	110	900	180	110
Desviación standard [Ω-m]	12	25	230	40	35
Factor (K) de la resistencia de puesta a tierra, como función de la resistividad $R=K\rho$ [Ω]	0.1538	0.0958	0.0056	0.0214	0.0988

El criterio seguido para estimar valores de resistividad media y desviación standard de la resistividad con respecto a su valor medio, fue el siguiente:

$$\rho_{media} = \frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{2} + \rho_{min}$$

$$\sigma = \frac{\rho_{max} - \rho_{media}}{3}$$

donde: ρ_{\max} - valor máximo de la resistividad del suelo en cada zona

ρ_{\min} - valor mínimo de la resistividad del suelo en cada zona

ρ_{media} - resistividad media estimada para cada zona de la ruta

σ - desviación standard de la resistividad del suelo

para cada zona del perfil resistivo de la ruta en la Fig. 4.7., se obtiene un valor de desviación standard, de tal manera de poder abarcar todo el rango de variación de la resistividad en aquella zona, en efecto, el análisis que se hace en el programa digital al tomar a la resistividad del suelo como una variable aleatoria distribuída normalmente, indica que para valores de $\rho_{\text{media}} \pm 3 \sigma$ se obtiene el 99.7 % de probabilidad de que la resistividad va a estar dentro de aquel rango, esto fue el criterio empleado para estimar la incertidumbre de la resistividad en cada zona a lo largo del recorrido de la línea.

Los datos, en forma general, de la línea se detallan en el apéndice B, al igual que los resultados obtenidos, acotando que:

$$R_0 = 0.0038 \rho$$

$$R_1 = 0.0021 \rho$$

El análisis se lo realiza tanto en forma determinística, cuanto en forma probabilística. Para valores me

dio y extremos de la resistividad del suelo, se obtuvieron los siguientes resultados (en forma detallada se encuentra en el apéndice B), ver Tabla N° 4.6.

TABLA N° 4.6.

DESCRIPCION	$\rho_m - 3\sigma$	$\rho_m + 3\sigma$	ρ_m
Corriente de falla a tierra (A)	2139.8	1878.8	1946.2
Corriente a tierra por la S/E fallada (%)	96	84.5	88.5
Corriente de retorno por tierra a la estación terminal (%)	95.7	93.5	94.2
Elevación de voltaje en la S/E fallada (V)	39.4	1307.3	726.1
Voltaje de toque en la S/E fallada (%)	40.25	40.25	40.25
Voltaje de paso en la S/E fallada (%)	5.4	5.4	5.4
Elevación de voltaje en la S/E Milagro (V)	60.2	317.0	192.4
Voltaje de toque en la S/E Milagro (%)	19.6	19.7	19.7
Voltaje de paso en la S/E Milagro (%)	2.9	2.9	2.9

(%) en función de la corriente de falla total o de las elevaciones de voltaje.

De la Tabla N° 4.6. se aprecia que la mayor parte de la corriente de falla se dispersa por tierra a través

de la rejilla de la S/E fallada, equivale a decir, que un poco porcentaje sigue la trayectoria del cable de guardia tanto en la sección adyacente a la localización de la falla cuanto en la adyacente a la estación generadora. Se aprecia que los voltajes de toque y paso son porcentajes definidos de la elevación de voltaje en las subestaciones, notando que son menores en la estación terminal, por tener una mejor puesta a tierra.

En la Fig. 4.8., se grafica la distribución de la corriente de falla en la red de tierra para valores promedios de la resistividad del suelo. El sentido descendente en la curva de la corriente por el cable de guardia, indica que la corriente de falla se está dispersando a tierra a través de las torres, en caso contrario la corriente retorna al cable de guardia por las torres.

Los resultados del análisis probabilístico para la configuración de la Fig. 4.6., se encuentran en el Apéndice B., algunos valores importantes se describen en la Tabla N° 4.7.

Como se puede apreciar de la Tabla N° 4.7., las incertidumbres en cuanto a los valores medios de las corrientes son pequeñas; es decir, la influencia de la resistividad del suelo cuando se la hace variar en

TABLA N° 4.7

DESCRIPCION	VALOR MEDIO	DES. STAN-DARD (% Valor medio)
Corriente de falla total (A)	1949.1	0.84
Corriente en la S/E fallada (A)	1725.7	2.62
Corriente en la S/E Milagro (A)	1835.4	1.07
Elevación de voltaje en la S/E fallada (V)	717.3	28.4
Voltaje de toque en la S/E fallada (V)	288.7	28.4
Voltaje de paso en la S/E fallada (V)	38.63	28.4
Elevación de voltaje en la S/E Milagro (V)	192.5	22.4
Voltaje de toque en la S/E Milagro (V)	37.8	22.4
Voltaje de paso en la S/E Mi lagro (V)	5.6	22.4

$\pm 3 \sigma$, donde $\sigma \leq 33\%$ de su valor promedio, es mínima, prácticamente son resultados similares a aquellos obtenidos en forma determinística y que se encasillan en la Tabla N° 4.6., para valores de ρ media. No se puede decir lo mismo de los voltajes, donde su incertidumbre es aproximadamente igual a aquella de la resistividad en las distintas zonas de la red. Es importante anotar que se realizaron 198 muestreos en este problema, mientras mayor sea el número de muestreos, se obtendrán mejores resultados, o, resultados más a proximados a la realidad.

De los resultados probabilísticos en forma de histogramas, se obtienen las curvas de frecuencia acumulada, tal como se aprecia en las figuras 4.9., y 4.10., para ciertas variables. En el caso de los voltajes peligrosos, en el lugar de la falla o en la estación generadora, tienen la misma variación que las elevaciones de voltaje, sólo que sus valores representan el 40.25 y 5.39% en el S/E fallada para los voltajes de toque y paso en su orden, mientras que en la estación generadora, representan el 19.64 y 2.91 %. Es importante obtener estas curvas para saber el porcentaje de probabilidad de sobrepasar límites admisibles por el cuerpo humano en lo referente a los voltajes peligrosos, por ejemplo, en este caso, según la REF. 9, los voltajes de toque y paso, para una persona de 50 Kg., no deben ser superiores a (para un suelo uniforme):

$$V_{\text{toque}} = \frac{116 + 0.174 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

$$V_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

donde: ρ_s : es el valor numérico de la resistividad del material superficial, en ohm-m
 t : es la duración de la corriente de choque, en segundos

Generalmente, la capa superior en los patios de las subestaciones, consisten de ripio que tiene una resistividad en el orden de 1000 Ω -m, para este valor y considerando varios tiempos de despeje de la falla, en la tabla N° 4.8. se aprecian los voltajes admisibles y el grado de seguridad de la puesta a tierra en la S/E donde se simula la falla y en la estación generadora, se hace referencia a las figuras 4.10., y reiterando que los voltajes de toque y paso son porcentajes ya definidos de la elevación de voltaje en cada lugar.

TABLA N° 4.8

Duración de la falla [s]	Voltajes admisibles (V)		GRADO DE SEGURIDAD DE LA PUESTA A TIERRA EN (%)	
	de toque	de paso	S/E fallada	EST.GENERADA
0.008	3242.3	9123.2	100	100
0.1	917.06	2580.42	100	100
0.25	580	1632	100	100
0.5	410.1	1154	96	100
1	290	816	62	100

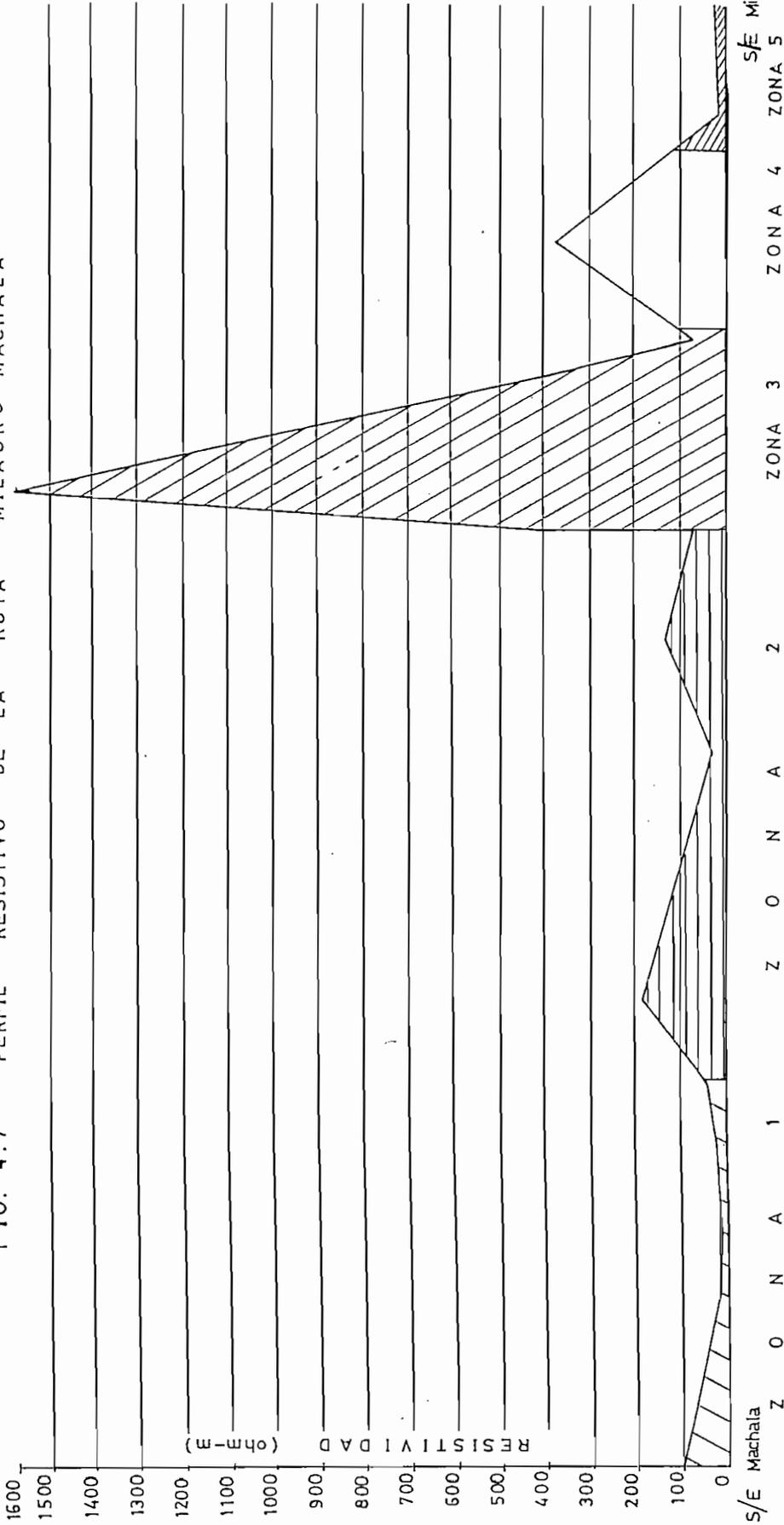
Los valores indicados en la tabla N° 4.8., son referidos a considerar una resistividad superficial en los patios de las subestaciones, de 1000 Ω -m, y tomar como límites admisibles aquellos determinados para una persona de 50 Kg. de peso, naturalmente estos

valores pueden cambiar, lo que se indica aquí es únicamente una situación que se puede dar. Es notorio que los voltajes de paso admisibles son superiores a los de toque; a pesar de ser estos más peligrosos que los de paso, debido a que la corriente que circula por el cuerpo humano, en el caso del voltaje de toque, pasa por el corazón, se presta atención, entonces, únicamente a los voltajes de toque.

En la S/E fallada, el voltaje de toque representa el 40.25% de la elevación del voltaje, esto equivale a multiplicar los valores de voltaje en la Fig. 4.10. por 0.4025 y obtener así los límites para el voltaje de toque, de acuerdo a esto se obtiene el grado de seguridad para la puesta a tierra, por ejemplo, para $t=1$ segundo, el voltaje de toque admisible es 290 V. a este valor corresponde un grado de seguridad del 62% (frecuencia acumulada = 0.62); es decir, existe un 38% de probabilidades de sobrepasar el límite admisible, claro que el tiempo de despeje es relativamente alto.

En la estación generadora el grado de seguridad de su puesta a tierra es óptimo, cuando se produce una falla tal como se describe en la FIG. 4.6., independientemente del tiempo de despeje. Todo lo anotado se basa en simular 198 valores de resistividad del terrero en cada zona dentro de su rango definido.

FIG. 4.7 PERFIL RESISTIVO DE LA RUTA MILAGRO-MACHALA



I	N	E	C	E	L
QUITO - ECUADOR					
SISTEMA NACIONAL DE TRANSMISION					
LINEA DE TRANSMISION MILAGRO-MACHALA 230 KV					
PUSTAS A TIERRA DE ESTRUCTURAS					

ZONAS	TOMA A T. ALTERNATIVA	LONGITUD Km	Nº TORRES
1	2	34.4	86
2	3	4.8	120
3	4	17.6	44
4	4	17.2	43
5	3	10.8	27

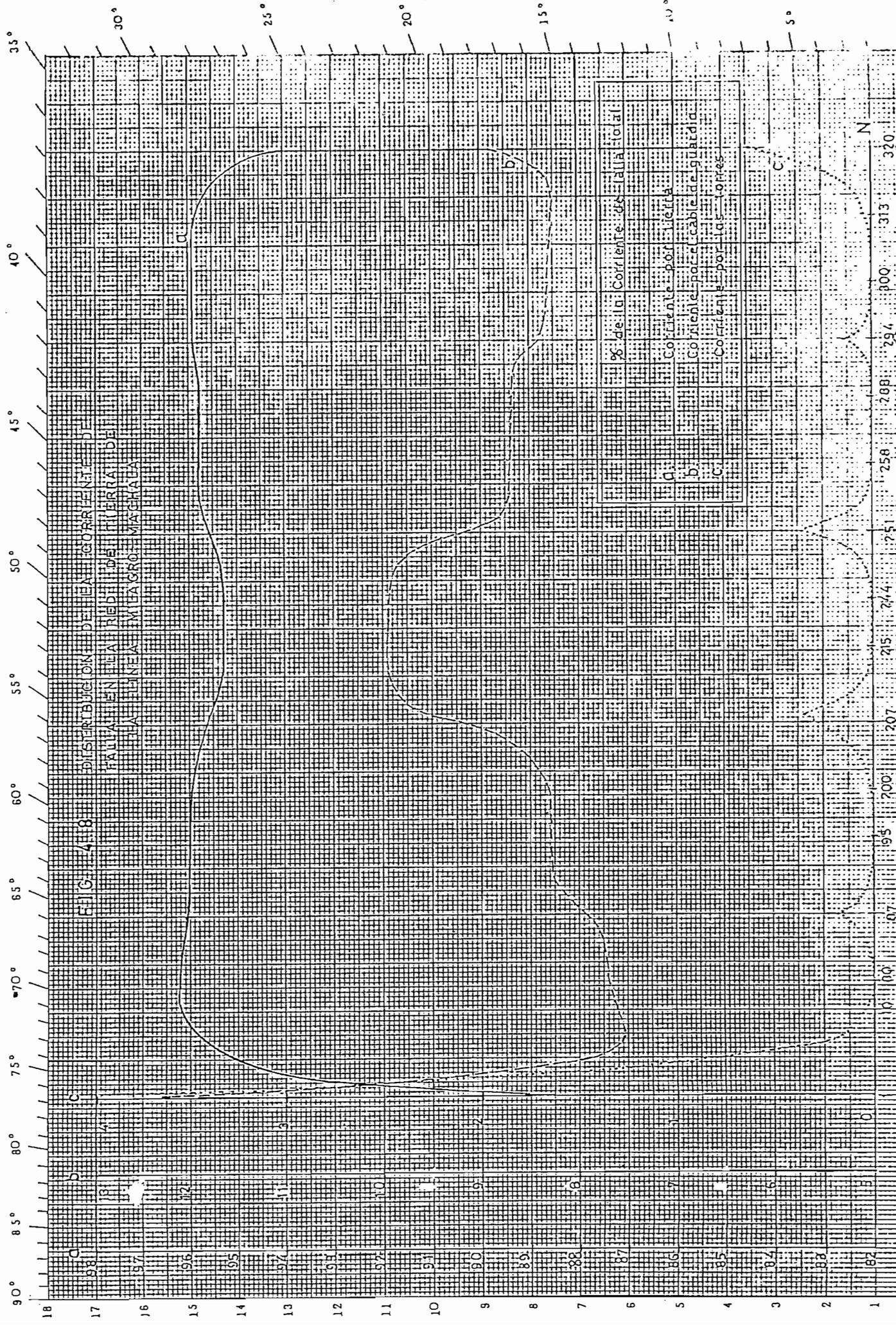


FIG. 4.18 DISTRIBUCION DE LA CORRIENTE DE FALLA EN LA RED TIPO TERRATIBER PLAN TIPO EN LA GROS MACHALA

	% de la Corriente en Falla total
	Corriente por tierra
	Corriente por cable de guarda
	Corriente por las torres

90° 85° 80° 75° 70° 65° 60° 55° 50° 45° 40° 35°

18
17
16
15
14
13
12
11
10
9
8
7
6
5
4
3
2
1

80° 75° 70° 65° 60° 55° 50° 45° 40° 35°

200 207 215 214 215 218 226 230 236 244 251 258 268 280 296 300 313 320

N

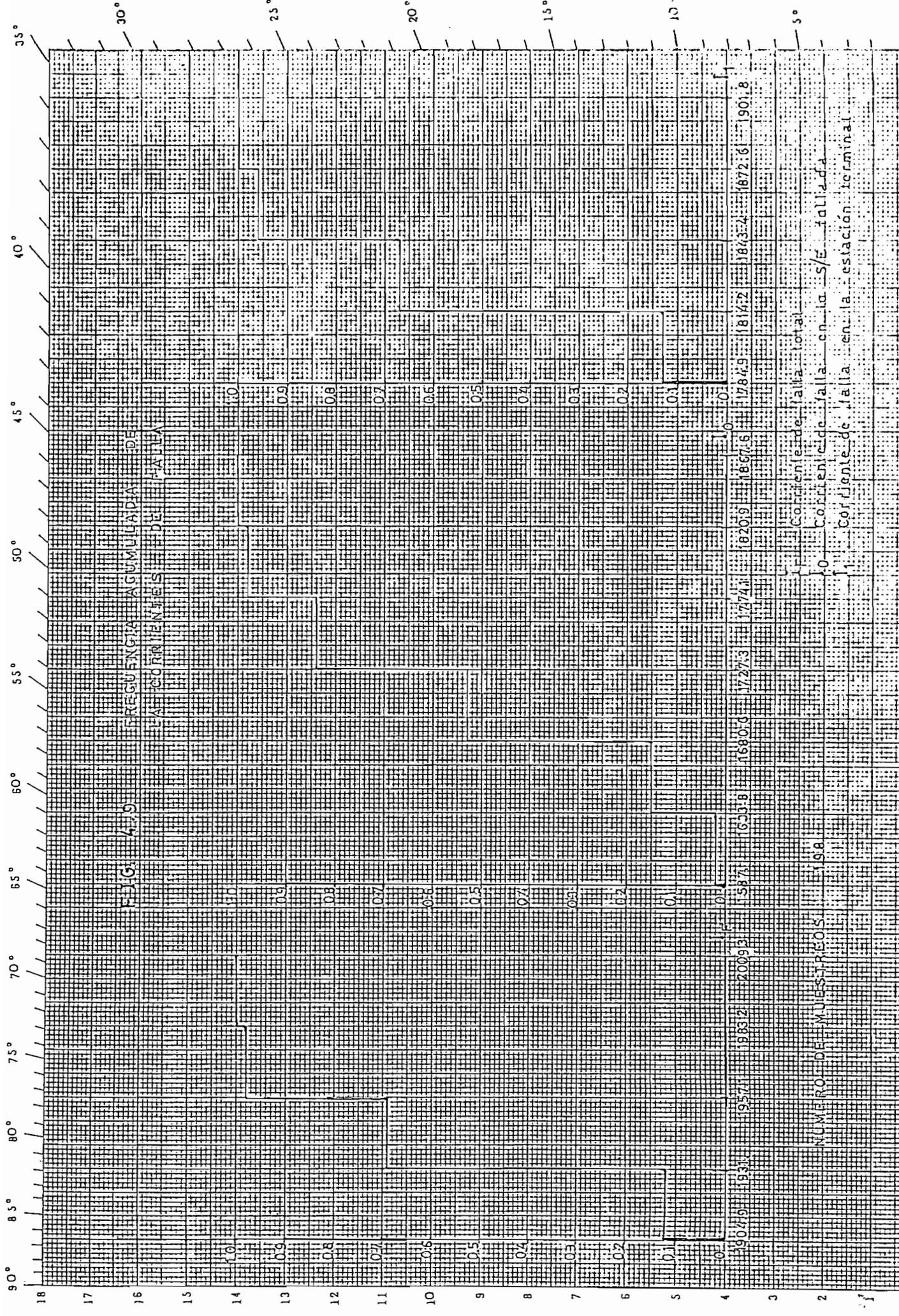
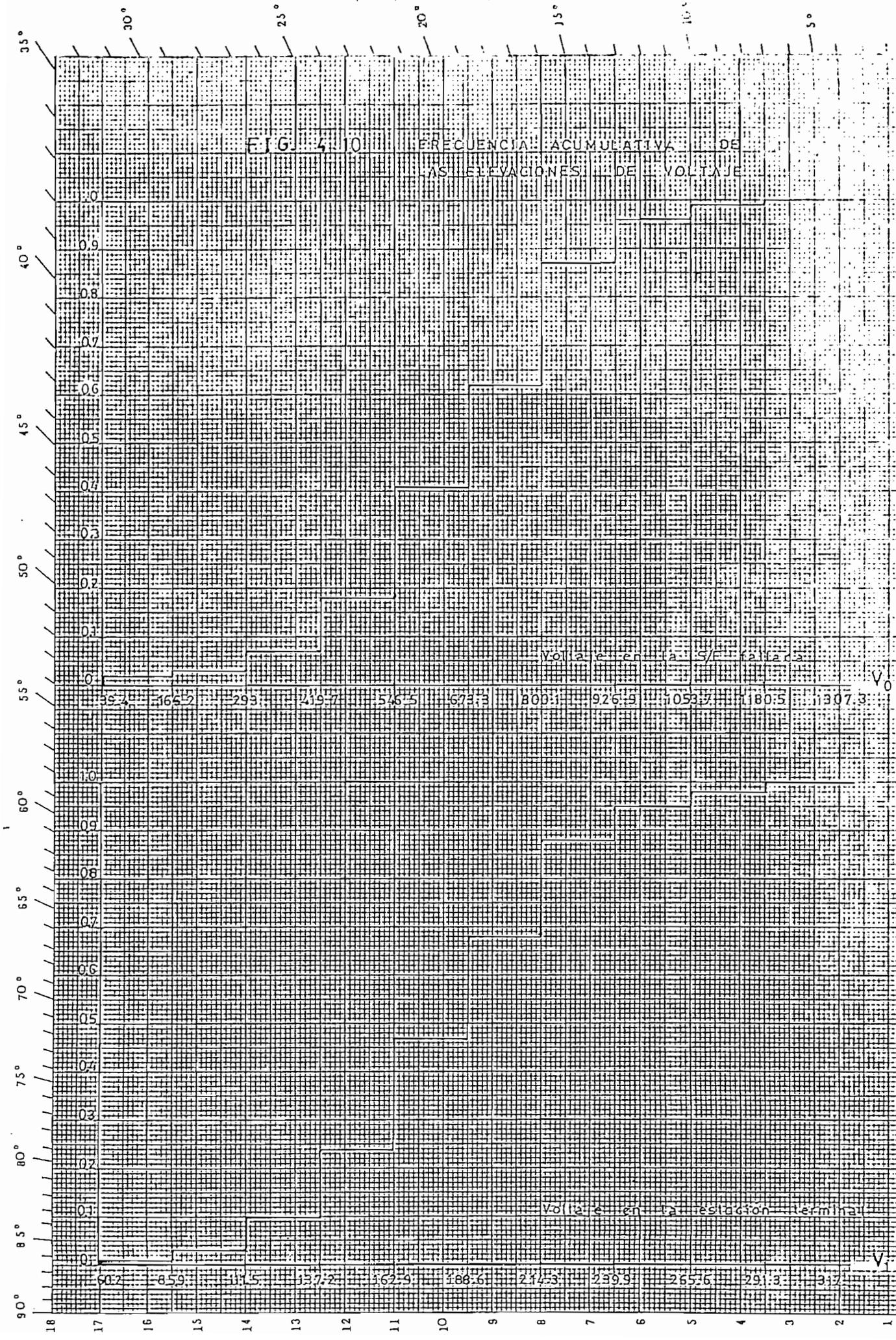


FIG. 4.10 FRECUENCIA ACUMULATIVA DE LAS ELEVACIONES DE VOLTAJE



Voltaje en la estación terminal V₀

Voltaje en la estación terminal V

4.3. EJEMPLO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION

Se analiza el circuito monofásico de la Fig. 4.11., el análisis está encaminado a calcular la corriente de carga y su distribución entre el conductor neutro y la tierra, para diferentes alternativas en el número de puestas a tierra por Km. y haciendo variar a la resistividad del suelo desde 1 a 2000 Ω -m en rangos de 100 Ω -m.

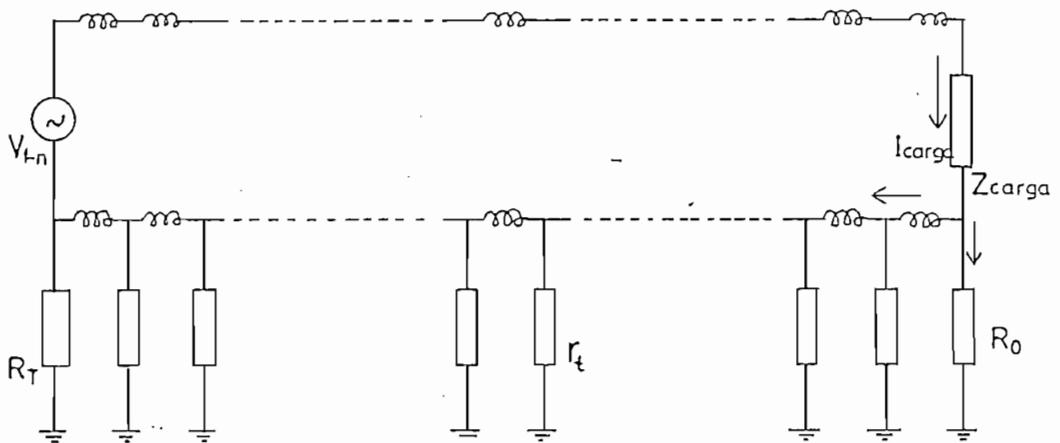


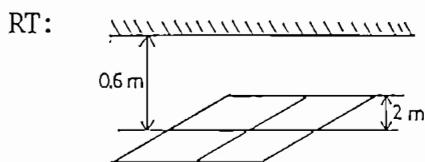
FIG. 4.11. EJEMPLO DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION

Para la utilización del programa digital descrito en los apéndices A y B, que básicamente calcula la corriente de falla a tierra en sistemas de transmisión, se añade la carga a la impedancia adyacente a la estación 0, se obtiene la corriente de carga, naturalmente la terminología va a cambiar, por ejemplo, en sistemas de distribución se utilizan postes y no torres por lo general, la corriente de falla tomando en

cuenta a la carga, se convierte en corriente de carga, con estas acotaciones se procede al análisis respectivo.

Los datos que definen la configuración de la Fig. 4.11 son los siguientes:

- Número de puestas a tierra a lo largo del circuito:
4 alternativas a) 11 , 1 por Km
 b) 22 , 2 por Km
 c) 33 , 3 por Km
 d) 44 , 4 por Km
- Conductor de fase: 2/0 , ACSR ✓
- Conductor neutro: 2 , ACSR ✓
- Voltaje fase-neutro: 13.2 KV
- Resistencia de puesta a tierra



mallá cuadrada de 4m. de lado enterrada a 60 cm. de la superficie del suelo.

De acuerdo al Apéndice C:

$$R_T = 0.138 \rho$$

R_o, γ_t : una varilla de copperweld 5//8", 3,28 m., de acuerdo con el Apéndice D.

$$R_o = \gamma_t = 0.278 \rho$$

El análisis se lo realiza en forma determinística únicamente, debido a que la variación de la corrien

te no es mayor cuando se varía a la resistividad del suelo en $\pm 3 \sigma$ de su valor medio por un lado, y por otro, por estar interesados en calcular la regulación del sistema en función de la resistividad del suelo y así obtener curvas para visualizar su influencia.

Para el cálculo de las impedancias de fase y neutro que son funciones de la resistividad del suelo, se divide el circuito en 2 zonas, en la primera se incluye la impedancia de carga; es decir consta de 1 sección, el resto es normal, con los valores calculados según el apéndice E.

- Impedancia de la carga.

De acuerdo a las normas para distribución rural (REF. 23), en lo referente al conductor económico, el límite de potencia de la carga, para el número y tamaño de los conductores especificados, es 881 KVA, considerando un factor de potencia en la carga de 90 %, que el límite de diseño para el valor de la caída máxima de voltaje no deberá superar el SIETE por ciento, se obtiene la impedancia de la carga, cuyo valor es:

$$Z_c = 155.47 + j 75.3 \quad \Omega$$

De acuerdo a estos datos, y tomando una línea de 11 Km de longitud se obtuvieron curvas de la corriente

de carga como una función de la resistividad del suelo para las diferentes alternativas del número de puestas a tierra/Km, tal como se aprecia en la Fig. 4.12. La influencia de la resistividad no es mayor, sin embargo, esta variación influirá en la regulación del sistema tal como se explicará posteriormente.

Considerando que para el valor de la carga, se partió del 7% de regulación del sistema, ahora, se trata de obtener la regulación en forma inversa; es decir para aquel valor de la impedancia de carga, se calcula la corriente de carga en función de la resistividad del suelo indicada en la Fig. 4.12., de esta manera se puede encontrar el valor del voltaje en la carga V_c y así, obtener la regulación de acuerdo a:

$$R(\%) = \left(\frac{V_f - V_c}{V_c} \right) \times 100$$

donde: V_f es el valor absoluto del voltaje en la fuente (13200 V)

V_c es el valor absoluto del voltaje en la carga

Los resultados de tales cálculos y para los distintos números de puesta a tierra/Km se indican en la Fig. 4.13., en donde se aprecia la regulación del sistema monofásico de la Fig. 4.11., como función de la resistividad del suelo.

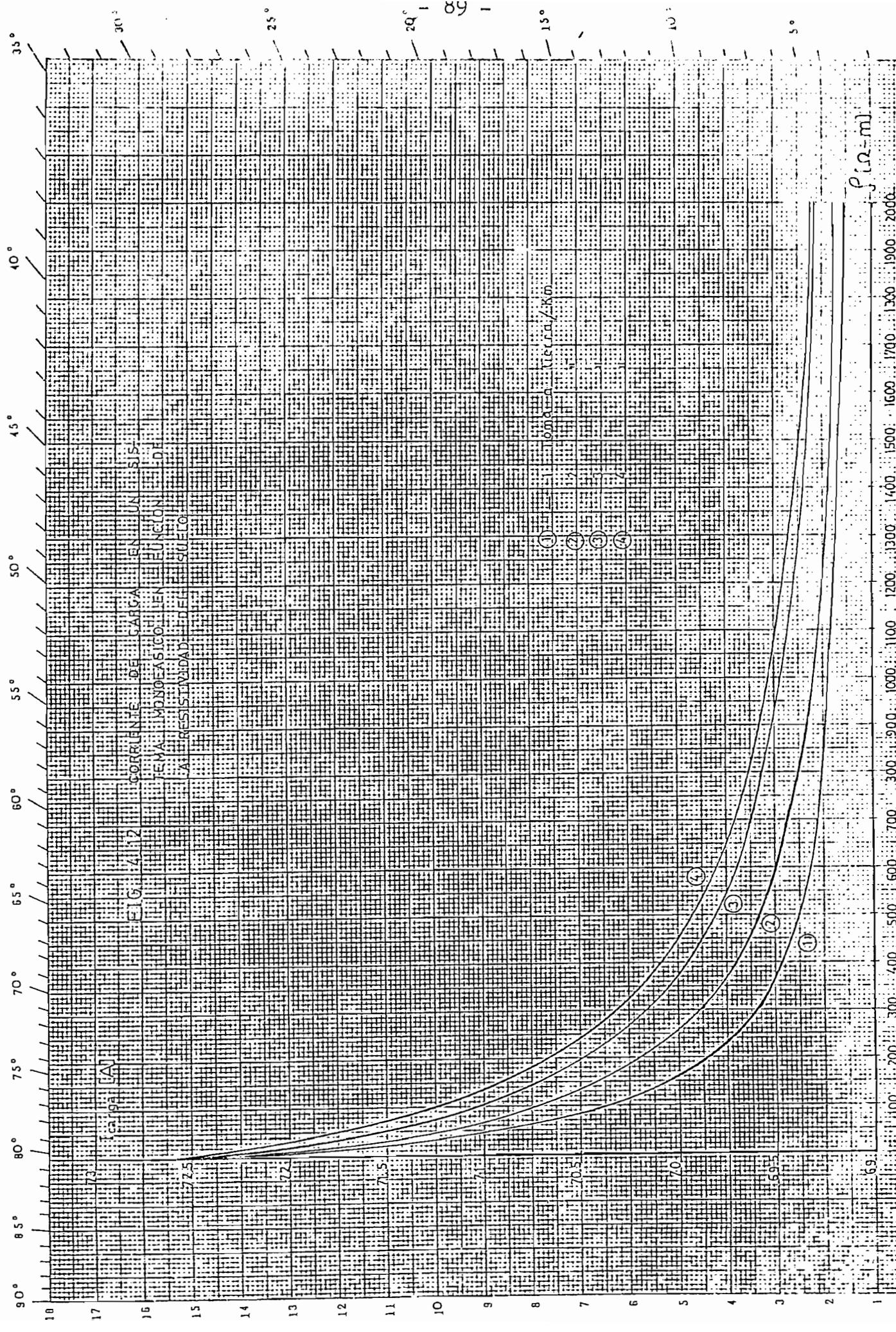
De las curvas de regulación se nota que para valores

mayores a 800 Ω -m, la regulación del sistema no es muy afectada, en cambio para valores menores, la regulación varía rápidamente desde 53% hasta alrededor de 10%, es necesario recalcar que estas curvas son referidas específicamente a este ejemplo de aplicación; sin embargo, en forma general se puede notar la variación de la regulación en función de la resistividad.

El efecto del número de puestas a tierra por Km en el circuito en estudio, es apreciable, como era de esperarse a mayor número de tomas a tierra se tiene una menor regulación, su efecto será más notorio si se mejora las puestas a tierra en el sistema. El hecho más importante de observar es aquel relacionado con el límite de la regulación permitido por las normas para electrificación rural, según la Fig. 4.13., para valores menores a 60 Ω -m se tienen regulaciones de hasta el 7%; es decir, se cumple con los requerimientos ordenados, pero si la resistividad del suelo es superior, se tienen valores entre el 7 y el 10.5% para la regulación, dependiendo del número de puestas a tierra/Km, lo que indica que para este ejemplo específico con los datos mencionados y para esta longitud, el sistema sobrepasa el límite permitido para la caída de voltaje.

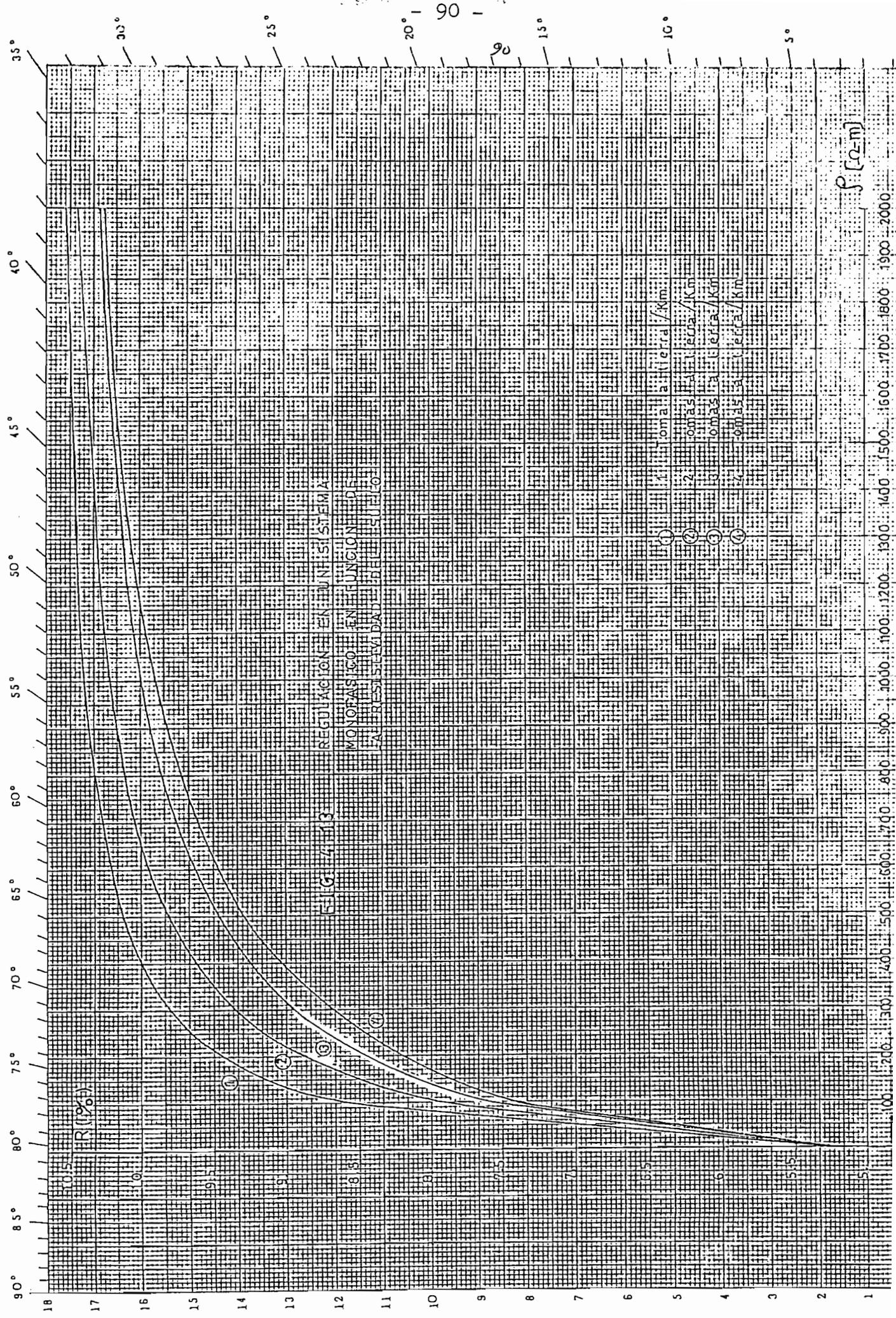
En la Fig. 4.14., se presenta la corriente que se distribuye en el suelo a través de la puesta a tierra, en el lugar de la carga, como un porcentaje de la co

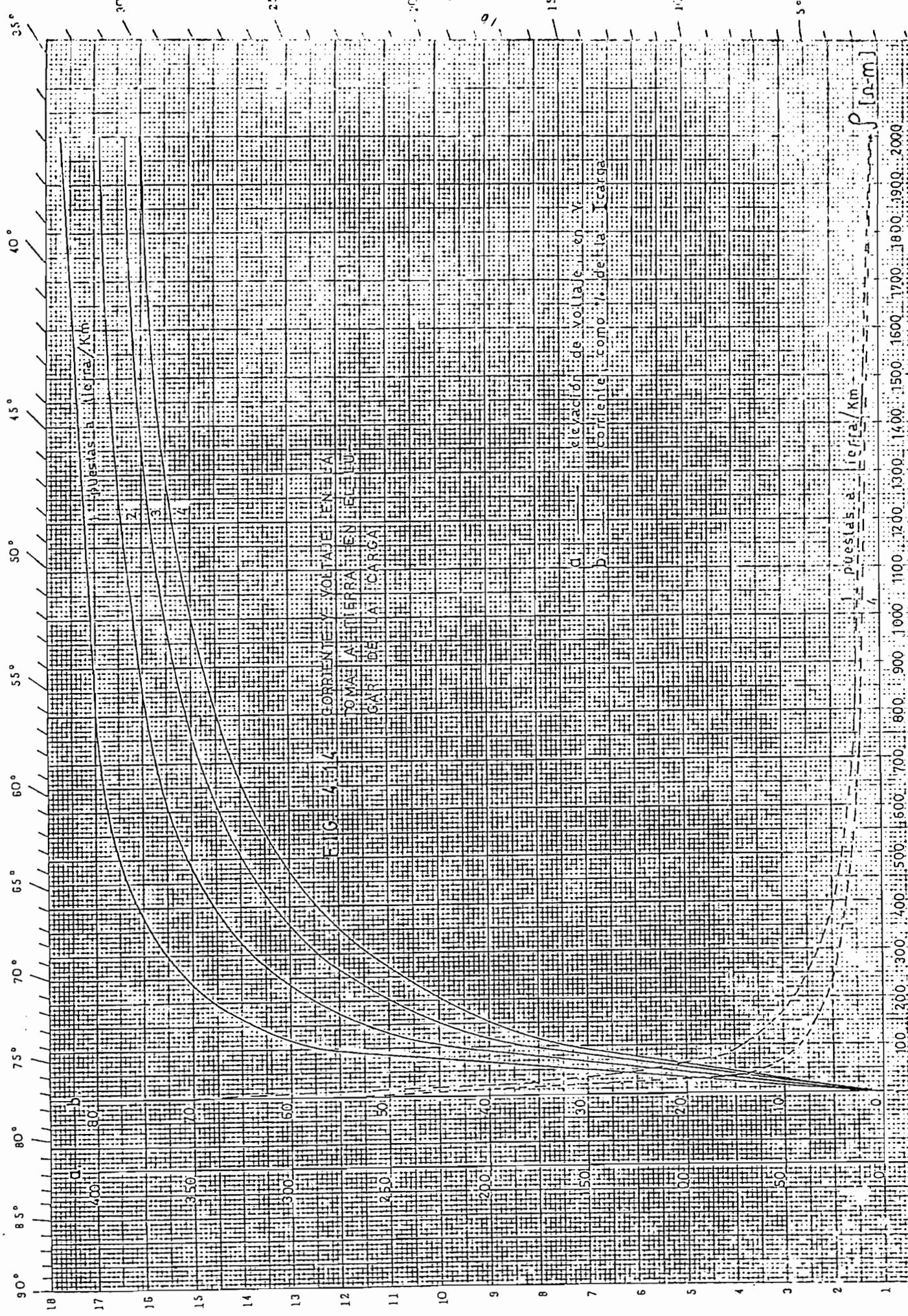
riente de carga y la elevación de voltaje que ésta produce, como funciones de la resistividad del suelo para las distintas alternativas del número de puestas a tierra/Km. La variación del voltaje es semejante a aquella de la regulación, notándose la influencia del número de puestas a tierra, por otro lado, la corriente que fluye por el neutro representa más del 95% de la corriente de carga, para valores mayores a 300 Ω -m, que en todo caso no sobrepase el límite permitido de corriente que puede transportar un conductor N° 2 AWG, y ACSR empleado en este ejemplo, incluso, se podría emplear otro número de conductor y no necesariamente el dictaminado por las normas que dice que cuando se emplea un conductor de fase 2/0 el neutro debe ser N° 2, desde el punto de vista de considerar la red de tierra; es decir, la distribución de la corriente de carga, se puede tener opción de emplear otro material para el conductor neutro, la limitación estará dada por su capacidad de corriente que se puede comparar con el resultado obtenido mediante el programa desarrollado en esta tesis y de esta manera tomar decisiones generales analizando una serie de opciones que se puede variar especialmente en cuanto al número y tipo de puestas a tierra en los postes normales y en aquellos donde se colocan transformadores por ejemplo, etc.



ρ (m)

1000 1500 1600 1700 1800 1900 2000





C A P I T U L O V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En la actualidad, se dispone de cálculos sofisticados para determinar la mayoría de los parámetros del funcionamiento de un sistema de Potencia, tales como: flujos de carga, estabilidad, etc., siguiendo este lineamiento, en el presente estudio se desarrolló un método encaminado a analizar las redes de puesta a tierra, un aspecto importante por cuanto su diseño inadecuado además de constituir un peligro permanente para la vida humana, puede afectar el buen funcionamiento de los equipos con su consiguiente repercusión económica.

El método empleado se implementó a un programa digital que calcula, la corriente de falla a tierra en cualquier lugar de la red, su distribución entre las estructuras de transmisión, conductores de fase y de tierra, voltajes peligrosos en subestaciones y en los lugares donde se produce la falla a tierra, la teoría del método de eliminación de doble lado presenta algunas ventajas comparado con otros métodos convencionales desarrollados anteriormente:

- El método es directo (no son cálculos iterativos)
- Se incluye todos los parámetros significativos, como im-

pedancias de puesta a tierra, número de líneas de transmisión, número de estaciones generadoras, efectos de acoplamiento debido a los conductores neutros (regularmente puestos a tierra), etc.

- Los errores de redondeo son insignificantes en los cálculos, aún cuando los valores de impedancia difieren de una zona a otra por algunas órdenes de magnitud.

- Anteriormente se han descrito métodos para determinar la distribución de la corriente de falla a tierra en estructuras de transmisión; sin embargo, se presentan casos donde es necesario emplear, otros métodos para modelar con más aproximación la situación real, por ejemplo, cuando las torres de transmisión están localizadas en varias "zonas", donde la estructura del suelo es similar dentro de cada zona, las resistencias de puestas a tierra de las torres difieren de una zona a otra pero son idénticas en cada zona, en este caso, la línea de transmisión es heterogénea con secciones (zona) homogéneas de longitud definida, el método empleado en el presente trabajo, contempla esta situación.

- El método de eliminación de doble lado, permite gran flexibilidad puesto que es posible simular condiciones de circuito abierto en cualquier localización de la línea de transmisión, simplemente asignando valores altos de impedancia en aquella localización.

- ~~X~~ - El método incluye los efectos capacitivos que pueden influir en los resultados, específicamente cuando se trata con líneas de extra alto voltaje. En el programa digital implementado, se asignó como una impedancia, los valores de las puestas a tierra en torres y subestaciones, de tal manera de tener opción a incluir estos efectos capacitivos.

- El método de eliminación de doble lado puede ampliarse al análisis de toda clase de fallas a tierras; en efecto, si se desprecia el acoplamiento mutuo entre fases, se puede simular fallas dos o tres fases-tierra, esto se consigue en el programa digital, añadiendo el número apropiado de fases y poniendo voltajes de las fuentes con un defasamiento de 120 grados, o, asignando un número de estaciones terminales (generadoras) ligado con el tipo de falla a simular; es decir, tratando como redes de tierra en forma separada, pero siempre conservando el desfase de las fuentes de voltaje.

Tal como se indicó en el Capítulo III, el método empleado en el análisis de las redes de tierra en sistemas de potencia, se ve reforzado cuando se considera a la resistividad del suelo como una variable aleatoria distribuida normalmente, con esto se logra aproximarse al verdadero comportamiento de la red, dependiendo del número de muestreos que se realice para asignar valores de resistividad, abarcando un amplio rango de variación. La mayor parte de los estudios de inves

tigación se refieren en mayor o menor grado, a variables aleatorias cuyas medias y distribuciones no se puede conocer precisamente. Aunque a menudo se supone un valor particular para las medias, para poder probar el efecto de un cambio en una variable, esto nada contribuye a la comprensión del problema y nunca es un punto fuerte de estudio. El papel de la teoría de muestreo consiste en sistematizar, en cuanto sea posible, las suposiciones que deben hacerse con respecto a las medias y las distribuciones de una variable aleatoria.

Fundamentándose en el teorema del límite central de las probabilidades, se justificó una distribución normal de la resistividad del suelo, a efectos de no disponer de curvas características de resistividad en una localización o a lo largo del recorrido de la línea que serán obtenidos por mediciones en distintas épocas. El método de muestreo empleado fue el de Monte-Carlo; sin embargo, para asegurar una alta confiabilidad a los resultados en el análisis de una red, es necesario recalcar que, generalmente, para que un estudio probabilístico empleando el método de Monte-Carlo sea completo, se requiere que el proceso de cálculo sea repetido muchas veces, empleando en cada ocasión, una nueva serie de números aleatorios. En el programa digital se limita a 198 el número de muestras, por efectos en el tiempo de ejecución; sin embargo, se puede aumentar este número efectuando nuevas corridas del programa y realizando operaciones elementales.

Entre las magnitudes que el diseño de los sistemas de pues-

ta a tierra debe considerar, tienen importancia primordial:

- Los valores de las corrientes de falla que deben ser conducidos a tierra.
- Los valores de los voltajes respecto a puntos alejados, a que las corrientes anteriores, darán lugar, al circular en el sistema de puesta a tierra.
- Las condiciones locales de cada subestación o torre; principalmente, la resistividad del terreno.

Respecto al último punto, se recomienda acumular información a lo largo del tiempo, sobre valores de resistencias de puesta a tierra en subestaciones o torres, de tal manera de obtener, mediante un programa para computación digital especialmente elaborado, lo siguiente:

- 1) Un valor promedio de resistencia, para las mediciones efectuadas en una misma localidad, en diversas épocas.
- 2) A partir del valor anterior, se puede calcular el valor promedio correspondiente, de resistividad efectiva, para cada localidad.
- 3) Clasificar en clases, los valores de resistividad calculados para cada S/E o torre y calcular los promedios estadísticos correspondientes a cada clase.

- 4) Computar la distribución acumulativa de las resistividades y de esta forma conocer una función de probabilidades definida para cada localidad (o zona).

Una vez conocida la función que define la variación de la resistividad del suelo en una localización o en una zona se realiza un procedimiento semejante al desarrollado en el programa digital de esta tesis; esto es, suministrar una serie de número aleatorios, uniformemente distribuidos, comprendidos entre 0 y 1 a cada localización. A cada número aleatorio, a su vez le corresponde, según el histograma de distribución acumulativa indicada en el numeral 4) anterior, determinada clase, con un rango de resistividades, de este rango se asigna para cada zona o lugar, el valor promedio estadístico correspondiente a la clase (no la media aritmética de los extremos del rango), y así encontrar el valor de la resistividad efectiva que se asigna, para la modelación de la red de tierra, a la subestación, o torre, o zona en particular.

Es posible ampliar el análisis del comportamiento de una red de tierra, simulando fallas en cada torre a lo largo del recorrido de una línea, con un número moderado de muestreos en cada simulación, de tal manera de obtener curvas probabilísticas de las fallas que pueden ocurrir en cualquier lugar de la red, únicamente agrupando todos los histogramas obtenidos en particular, esto es posible realizarlo si se conoce que la distribución de probabilidad de falla es uniforme en toda

la línea, en caso contrario, se puede inclusive, simular fallas conociendo la distribución de ocurrencia en zonas en particular y empleando el Método de Monte-Carlo, de igual manera y así obtener los valores máximos y mínimos de la corriente de falla a tierra en cualquier lugar de la red, valores que servirán para una mejor coordinación en las protecciones.

El desarrollo del estudio está enfocado al análisis de redes de tierra en sistemas de transmisión, sin embargo, el análisis es flexible en analizar sistemas de Distribución. En el Capítulo IV se presentó un ejemplo relacionado a analizar un circuito monofásico de 13.2 KV, el programa digital puede calcular también la corriente de carga naturalmente dando la interpretación apropiada a algunos parámetros y expresiones verbales para que resulten aplicables a los sistemas de Distribución. Dentro de este campo, existe una amplia diversidad de alternativas que se pueden analizar, basadas en la aplicación del programa digital de esta tesis, como por ejemplo:

- Efectos de la resistividad del suelo, del número y tipo de puestas a tierra, sobre la regulación del sistema.
- Determinación de posibles sobrecargas en los conductores neutros, en especial en aquellas zonas donde la resistividad del suelo es alta.
- Analizar el efecto de un desbalance de la carga, etc..

En definitiva, se considera haber expuesto un estudio que constituye una herramienta para su utilización en análisis de redes de tierra de Sistemas de Potencia, considerando a la resistividad del suelo como una variable aleatoria; a pesar de mencionarse en muchas publicaciones, no se le ha tratado a este parámetro como se lo ha realizado en este trabajo. Lamentablemente por restricciones del computador disponible en la Escuela Politécnica Nacional resultó limitado el análisis de una mayor cantidad de ejemplos, específicamente, para un estudio probabilístico es decir, una repetición del análisis determinístico para varias condiciones o valores de la resistividad del suelo, se necesita mucho tiempo en la ejecución del programa, para lo cual se requiere disponer de un computador más rápido que el existente en el centro de cómputo de la Escuela, que fue utilizado en su totalidad, en el desarrollo del trabajo.

A N E X O A

PROGRAMA DIGITAL DE APLICACION

A.1. DESCRIPCION GENERAL DEL PROGRAMA DIGITAL

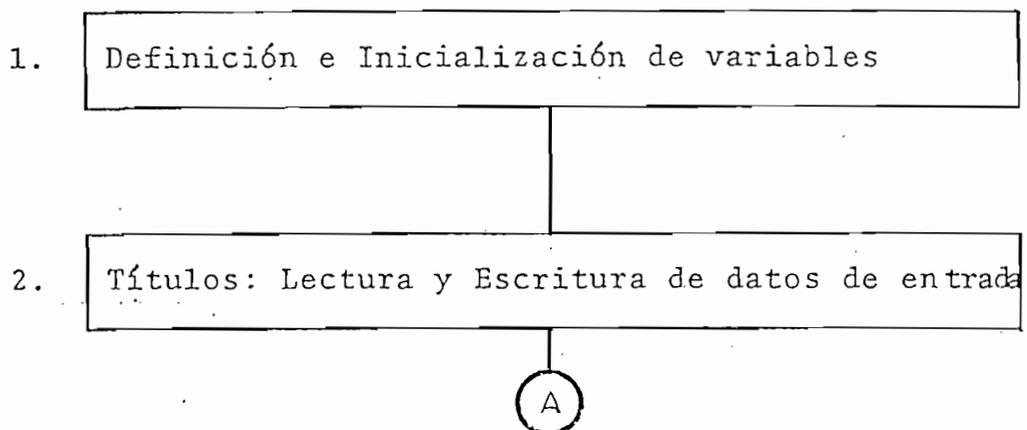
El programa de computador implementado en lenguaje FORTRAN IV, realiza los cálculos teóricos tratados en los Capítulos II y III de esta tesis. Fundamentalmente proporciona la distribución de corrientes de falla fase-tierra. En una red de puesta a tierra de un sistema de potencia, así como la magnitud de la falla, las elevaciones de voltaje en cada una de las puestas a tierra de la red y los voltajes peligrosos, esto se lo realiza tanto en forma determinística (considerando un valor fijo de la resistividad local) como en forma probabilística (con una incertidumbre dada), en esta última forma de cálculo, se proporciona salidas tanto en histogramas como en forma numérica con un valor medio y una desviación standard.

Para el análisis de la red, el programa se encarga de calcular adicionalmente, los elementos y parámetros que la conforman, anotando que son funciones de la resistividad del terreno, variable que se la trata como aleatoria.

El método empleado en el análisis de la red en forma probabilística es el de Monte-Carlo según el cual, es necesario generar valores de resistividad por medio de números al azar. El programa se encarga de generar números aleatorios distribuidos normalmente a partir de una semilla primitiva, empleando la subrutina GAUSS implementado en el paquete de programas disponibles del computador.

El tiempo de ejecución del programa está directamente relacionado con el número de muestreos o generaciones de valores de resistividad que se desee hacer, tomando en cuenta que, cuanto mayor sea este número, la distribución de las resistividades tiende a ser normal con mayor proximidad. Vale anotar que en la parte final de la salida del programa, se imprime el último número generado, en el caso de realizar más muestreos, este número será tomado como la nueva semilla primitiva.

A.2. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL PROGRAMA PRINCIPAL



A

3.

Desarrollo del algoritmo: Proceso repetitivo según el número de muestreos de resistividad que se desea realizar
Inicialización de variables

4.

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de la torre o S/E fallada (2.2.1., 2.2.2., Ap.C, Ap.D)

5.

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de las estaciones terminales (2.2.1., Ap.C)

6.

Cálculo de la resistencia de puesta a tierra de las torres de transmisión a lo largo de una línea (2.2.2., Ap.D)

7.

Cálculo de los parámetros de la red de puesta a tierra: Impedancias propias y mutuas de conductores de fase y de tierra (2.2.3., Ap.E)

8.

Cálculo de los coeficientes empleados en el desarrollo del algoritmo (Ec. 2.14- Ec.2.29)

9.

Formación del sistema de ecuaciones de orden t a resolver; donde:

$$t = \sum_{k=1}^P M(k) + P + 1$$

 P - Número de estaciones terminales
 $M(k)$ - Número de líneas entre una estación terminal y la localización de una falla
(Ec. 2.30, 2.34, 2.40)

B

B

10. Resolución del sistema de ecuaciones: Inversión de la matriz y cálculo de los vectores voltajes y corrientes

11. Ordenamiento y clasificación de los variables que se desea obtener en forma probabilística. Salida en forma de histogamas

12. Cálculo de promedios de las variables empleadas en la salida en forma probabilística con valores numéricos

FIN DEL PROCESO REPETITIVO: En las dos primeras repeticiones se calcula los valores extremos de la resistividad del suelo; esto es, $\rho \pm 3\sigma$, en cuyo rango se encuentra el 99.7% de probabilidades en una distribución normal. Después de la última repetición se analiza la red en forma determinística; esto es, con los valores de la resistividad media (incertidumbre igual a cero).

13. Escritura de salidas: valores de corrientes y voltajes en forma numérica y en barras (histogamas)

14. Cálculo de corrientes y voltajes de acuerdo a la máxima variación de la resistividad del suelo, servirá como límites en la representación por barras en los histogramas de salida

15. Cálculo de las corrientes de lazo y elevación de voltajes en las torres. Escritura de las variables en forma determinística (Ec.2.26, 2.28)

F I N

A.3. DESCRIPCION DE LAS SUBRUTINAS

El programa principal emplea las siguientes subrutinas.

A.3.1. SUBROUTINA DATO1

Esta subrutina calcula el factor de la resistencia de una rejilla en una subestación o en estaciones terminales, tomando en cuenta que su resistencia de puesta a tierra está dada por un factor que multiplica a la resistividad del suelo (ver Apéndice C). Además calcula los factores empleados en el cálculo de los voltajes de toque y de paso en estaciones eléctricas.

La sentencia de llamada es:

CALL DATO1 (R1, A1, B1, D, D1, H, DM, FP, FT)

donde: A1, B1, D, D1, H, DM son variables de entrada que describen la configuración de la rejilla, tal como se detalla en el Anexo B y,

R1 - factor de la resistencia de la rejilla
FP - factor del voltaje de paso
FT - factor del voltaje de toque
son variables de salida.

El método de cálculo está descrito en el Capítulo II, Secciones 2.2.1., 2.4.1., y en el Anexo C, se amplía sobre el tema con un diagrama de bloques.

A.3.2. SUBROUTINA DATO2

Esta subrutina calcula el factor de la resistencia de puesta a tierra de una torre de transmisión, de acuerdo al tipo de toma a tierra elegido entre cinco alternativas. Adicionalmente calcula los factores de voltajes de toque y paso de acuerdo a datos tomados de curvas tal como se detalla en el Apéndice D.

La sentencia de llamada es:

CALL DATO2 (R, VP, VT, IERROR).

donde: R, VP y VT son variables de salida que indican respectivamente, el factor de la resistencia de puesta a tierra, el factor de los voltajes de paso y de toque. IERROR. indica si los datos de entrada son erróneos.

Las variables de entrada son IAL, AL, N, RAD, S, ALT, RCUR, VTCUR, VPCUR que se definen en el Apéndice B.

El método de cálculo se describe en el Capítulo II, Secciones 2.2.2., 2.4.2., y en el anexo D se detalla la teoría empleada.

A.3.3. SUBROUTINA DATO3

Esta subrutina calcula las impedancias propias y μ

tuas de conductores de fase y de tierra pero sin los términos que son funciones de la resistividad del suelo, según la teoría aproximada de Carson (R-5).

En lo que se refiere a los conductores de tierra se puede tener un máximo de 2 cables de guardia y/o 2 contrapesos paralelos a la línea que a su vez puede ser máximo de doble circuito. La metodología empleada y la base teórica se describe en el Capítulo II, Sección 2.2.3., y en el Apéndice E de esta tesis, donde adicionalmente se presenta un diagrama de flujo esquemático que sintetiza el proceso empleado.

La sentencia de llamada es:

CALL DATO3 (ZA, ZG, ZM, IERROR).

donde:

- IERROR - Indica si existe o no errores en los datos de entrada
- ZA - es la impedancia propia del conductor de fase fallado en ohm/Km
- ZG - impedancia propia del (los)conductor(es) de tierra en ohm/Km
- ZM - impedancia mutua entre estos dos conductores o grupos de conductores, en ohm/Km

todas son variables de salida. Las variables de entrada se describen en el Anexo B.

A.3.4. SUBROUTINA SORT

Esta subrutina ordena o clasifica un número en 10 ca

tegorías (R-8), la sentencia de llamada es:

CALL SORT (Z, M, AMIN, AMAX)

Z Número a ser clasificado

M Es un vector de 10 componentes que debe ser inicializado en el programa principal antes de la primera llamada a SORT

AMIN, AMAX: son los valores extremos del rango de la variable independiente.

En cada llamada, el rango de AMIN a AMAX es dividido en 10 partes y el número a ser clasificado añade una unidad al componente apropiado del vector M. Si el número a ser clasificado está fuera del rango de AMIN o AMAX, se imprime este dato y la cuenta es colocada en el componente terminal (inferior o superior).

A.3.5. SUBROUTINA HIST

NO
↙

Esta subrutina dibuja un histograma de 10 barras con alturas determinadas por un vector de 10 componentes (R-8). La sentencia de llamada es:

CALL HIST (M, MAX, AMIN, AMAX).

M es el vector de 10 componentes a ser dibujado. M debe dimensionarse M(10) en el programa principal

MAX es la máxima altura del histograma, esto será ajustado a un múltiplo de 8. Si MAX = 0 entonces la subrutina buscará un valor MAX del vector M

AMIN, AMAX: son los valores extremos del rango de la variable independiente y las coordenadas de control dibujadas en la parte inferior del histograma

A.3.6. SUBROUTINA INVER

Esta subrutina invierte una matriz de orden hasta 13 de forma compleja. La sentencia de llamada es:

CALL INVER (ZDATOS, NFILA, A)

ZDATOS: es la matriz a invertir (variable de entrada)

NFILA : es el orden de la matriz (variable de entrada)

A : es la matriz invertida (variable de salida)

El método de solución está indicado en la R-24.

A.3.7. SUBROUTINA MULT

Esta subrutina sirve para multiplicar dos matrices, el orden máximo de cada matriz es de 13. La sentencia de llamada es:

CALL MULT (P,Q,R,NF1, NC, NC2)

P Matriz de entrada

Q Matriz de entrada

R Es la matriz producto $P \times Q$

NF1 Número de filas de la matriz P

NC Número de columnas de la matriz P (igual al número de filas de la matriz Q)

MC2 Número de columnas de la matriz Q

A.3.8. SUBROUTINA GAUSS

Esta subrutina está implementada en el computador. Genera números aleatorios con distribución normal, dada la media y la desviación standard. La sentencia

de llamada es:

CALL GAUSS (IX, S, AM, V)

- IX Número entero impar menor o igual a 9 dígitos. Posteriormente en IX se almacenará el número aleatorio generado y será usado para la siguiente entrada a la subrutina. Primero se asigna un valor a IX y luego se hace $IX=V$
- S La desviación standard deseada de la distribución normal
- AM La media deseada de la distribución normal
- V Número aleatorio generado con distribución normal

El método que emplea es el siguiente: Toma 12 números aleatorios con distribución uniforme, para generar números aleatorios distribuidos normalmente mediante el teorema del límite central (R-20).

A.3.9. SUBROUTINA CONTR1

Esta subrutina se encarga de verificar la validez de los datos de entrada emitiendo un mensaje de error cuando los datos no son válidos. Indica exactamente en que parte de los datos se encuentra el error; esto es, en que bloque hay que revisar los datos de entrada.

NOTA: Se adjunta el listado del programa, siendo innecesario detallar el diagrama de flujo.

// JOB MARCAL TNO26 TL TNO26 TNO26 TNO26 TNO26 DATE 14/04/84.CLOC
// EXEC SNOHREP TNO26 TNO26 TNO26 TNO26 TNO26 TNO26

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL INSTITUTO DE INFORMÁTICA Y COMPUTACION

CALDERON JARAMILLO LUIS CALDERON JARAMILLO LUIS CALDERON JARAMILLO LUIS

// EXEC PROC=SFLE
// OPTION LINK
// ACTION CANCEL,NOMAP
// EXEC PFDORTRAN

C-----> ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL
C-----> FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
C-----> DEPARTAMENTO DE POTENCIA
C-----> TESIS DE GRADO
C-----> TEMA: MÉTODO DE MONTE-CARLO APLICADO AL ANALISIS DE REDES DE
C-----> PUESTA A TIERRA DE UN S.E.P..
C-----> REALIZADO POR: LUIS MARCELO CALDERON JARAMILLO
C-----> DIRIGIDO POR : ING. CARLOS RIFORIO R.
C-----> ABRIL DE 1984
C-----> OBJETIVO: CALCULO DE LA MAGNITUD Y DISTRIBUCION DE CORRIENTES DE
C-----> FALLA FASE-TIERRA Y CALCULO DE VOLTAJES PELIGROSOS EN
C-----> UNA RED DE TIERRA DE UN S.E.P.,POR METODOS DETERMINIS-
C-----> TICO Y PROBABILISTICO (EL DE MONTE-CARLO)
C-----> METODOLOGIA: SE EMPLEA EL METODO DE ELIMINACION DE DOBLE LADO

***** DESCRIPCION DE VARIABLES *****

VARIABLES DE ENTRADA

C--> INDI : INDICA DONDE OCURRE LA FALLA (0-SUBESTACION,1-TORRE)
C--> IND3 : INDICADOR(=1 RESULTADOS DETERMINISTICOS CON VALORES MEDIOS)
C--> IND4 : INDICADOR (=1 RESULTADOS DETERMINISTICOS Y VALORES EXTREMOS)
C--> ICDR : NUMERO DE MUESTRAS(CORRIDAS) QUE SE DESEE REALIZAR
C--> IP : NUMERO DE ESTACIONES TERMINALES DEL SISTEMA
C--> CJTA : VALOR MEDIO (DISTANCIA ENTRE TORRES ADYACENTES) EN KM.
C--> AI : LONGITUD DEL LADO MAS CORTO DE UNA REJILLA, EN M.
C--> BI : LONGITUD DEL LADO MAS LARGO DE UNA REJILLA, EN M.
C--> D : SEPARACION ENTRE CONDUCTORES PRINCIPALES EN M.
C--> DI : SEPARACION ENTRE CONDUCTORES SECUNDARIOS, EN M.
C--> H : PROFUNDIDAD DE ENTERRIO DE UNA REJILLA, EN M.
C--> DN : DIAMETRO DEL CONDUCTOR UTILIZADO EN UNA REJILLA, EN MM.
C--> IRH00 : REJILLA DE LA RESISTIVIDAD EN LA LOCALIZACION DE LA FALLA
C--> RH00N : RESISTIVIDAD MEDIA EN EL PUNTO DE FALLA, EN OHM-M.
C--> SRH00 : DESV. STANDARD DE LA RESISTIVIDAD EN EL PUNTO DE FALLA
C--> N : NUMERO DE LINEAS A CADA ESTACION TERMINAL
C--> IRHJK : REJILLA DE LA RESISTIVIDAD EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> RH0KN : RESISTIVIDAD MEDIA EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> SRHJK : DESV. STANDARD DE LA RESISTIVIDAD EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> N : NUMERO DE TORRES DE CADA LINEA A CADA TERMINAL
C--> NZ : NUMERO DE ZONAS DE CADA LINEA A CADA TERMINAL
C--> VF : VOLTAJE FASE-NEUTRO DE CADA LINEA A CADA TERMINAL
C--> NT : NUM. DE TORRES EN CADA ZONA DE CADA LINEA DE CADA TERMINAL
C--> IRHJZ : REJILLA DE LA RESISTIVIDAD EN CADA ZONA
C--> RH0JZ : RESISTIVIDAD MEDIA DE CADA ZONA EN OHM-M.
C--> SRHJZ : DESV. STANDARD DE LA RESISTIVIDAD EN CADA ZONA
C--> IAL : ALTERNATIVA EN EL TIPO DE PUESTA A TIERRA DE LAS TORRES
C--> AL : LONGITUD DE UNA VARILLA DE PUESTA A TIERRA, EN M.
C--> S : SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS, EN M.
C--> RCUR : RESISTENCIA SEGUN CURVAS PARA TORRES TIPO ENREJADO, EN OHM
C--> RAD : RADIO DE UNA VARILLA DE PUESTA A TIERRA, EN M.
C--> ALT : LONGITUD/2 DE LA BASE DE UNA TORRE, EN M.
C--> VTCUR : VOLTAJE DE TOQUE EN TORRES, SEGUN CURVAS, EN M.
C--> VPCUR : VOLTAJE DE PISO, SEGUN CURVAS, EN V.
C--> NCIR : NUMERO DE CIRCUITOS DEL SISTEMA (1 O 2)
C--> RESA : RESISTENCIA DEL CONDUCTOR DE FASE EN OHM/KM.
C--> XSA : REACTANCIA INDUCTIVA DEL COND. DE FASE, EN OHM/KM.
C--> RC : PARTE RESISTIVA DE UNA CARGA EN EL PUNTO DE FALLA, EN OHM
C--> XC : PARTE INDUCTIVA DE UNA CARGA EN EL PTO. DE FALLA, EN OHM.
C--> XDAAP : (TODAS LAS VARIABLES QUE EMPIEZEN CON XD)- FACTOR DE SEPA-
C--> RACION DE LA REACTANCIA INDUCTIVA. A,B,C,AP,CP,G,GP, SON
C--> LAS DENOMINACIONES DE LOS CONDUCTORES DE FASE Y DE TIERRA,
C--> EN ESTE CASO, ENTRE EN COND. A Y EL AP, EN OHM/KM.
C--> NG : NUMERO DE CABLES DE GUARDIA Y/O CONTRAPESOS
C--> RESG : RESISTENCIA DE LOS CABLES DE GUARDIA Y/O CONTRAPESOS
C--> XAG : REACTANCIA INDUCTIVA DEL CON. DE TIERRA, EN OHM/KM
C--> N4AYUR : NUMERO MAYOR DE TORRES, COMPARANDO TODAS LAS LINEAS

VARIABLES DE SALIDA

C--> RO : RESISTENCIA DE PTA. A TIERRA EN EL PUNTO DE FALLA, EN OHM

C--> RT : RESISTENCIA DE PTA. A TIERRA EN CADA ESTACION TERMINAL.
C--> RZ : RESISTENCIA DE PTA. A TIERRA EN CADA ZONA DE CADA LINEA
C--> ZAZ : IMPEDANCIA DEL COND. DE FASE FALLADO ENTRE TORRES ADYACENTES
C--> ZGZ : IMPEDANCIA DEL CABLE DE GUARDIA ENTRE TORRES ADYACENTES
C--> ZNZ : IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CONDUCTORES DE FASE Y DE TIERRA
C--> SVV : VALOR MEDIO DEL VOLTAJE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> DESVV : DESV. STANDARD DEL VOLTAJE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> SAI : VALOR MEDIO DE LA CORRIENTE DE RETORNO A CADA EST. TERMINAL
C--> DESAI : DESV. STANDARD DE LA CORRIENTE DE RETORNO A C/EST. TERMINAL
C--> SVT : VALOR MEDIO DEL VOLT. DE TOQUE EN C/EST. TERMINAL
C--> DESVT : DESV. STANDARD DEL VOLT. DE TOQUE EN C/EST. TERMINAL

```

C--> SVP : VALOR MEDIO DEL VOLT. DE PASO EN C/EST. TERMINAL
C--> DESVP : DESV. STANDARD DEL VOLT. DE PASO EN C/EST. TERMINAL
C--> SAIF : VALOR MEDIO DE LA CORRIENTE DE FALLA TOTAL
C--> DESAIF : DESV. STANDARD DE LA CORRIENTE DE FALLA TOTAL
C--> SVO : VALOR MEDIO DEL VOLTAJE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> DESVO : DESV. STANDARD DEL VOLTAJE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> SIO : VALOR MEDIO DE LA CORR. DE FALLA EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> DESIO : DESV. STANDARD DE LA CORR. DE FALLA EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> SVT : VALOR MEDIO DEL VOLT. DE TOQUE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> DESVT : DESV. STANDARD DEL VOLT. DE TOQUE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> SVPJ : VALOR MEDIO DEL VOLT. DE PASO EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> DESVPJ : DESV. STANDARD DEL VOLT. DE PASO EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> AIFALL : CORRIENTE DE FALLA TOTAL ( AMPERIOS)
C--> RFALL : VALOR ABSOLUTO DE LA CORRIENTE DE FALLA TOTAL.
C--> AIF : CORRIENTE DE FALLA EN CADA LINEA DE CADA TERMINAL
C--> EAIF : VAL. ABS. DE LA CORR. DE FALLA EN CADA LINEA DE C/TERMINAL
C--> EXO : ANGULO DE LA COR. DE FALLA EN LA TORRE / S/E FALLADA
C--> EXOG : ANGULO DE LA COR. DE FALLA EN LA TORRE / S/E FALLADA
C--> EVO : ANGULO DEL VOLTAJE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EVOC : ANGULO DEL VOLTAJE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EVTO : ANGULO DEL VOLTAJE DE TOQUE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EVTJ : ANGULO DEL VOLTAJE DE TOQUE EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EVPJ : ANGULO DEL VOLTAJE DE PASO EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EVPJG : ANGULO DEL VOLTAJE DE PASO EN LA TORRE O S/E FALLADA
C--> EATK : ANGULO DE LA CORR. QUE RETORNA A CADA ESTACION TERMINAL
C--> EATKG : ANGULO DE LA CORR. QUE RETORNA A CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVVK : ANGULO DEL VOLTAJE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVVKG : ANGULO DEL VOLTAJE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVTC : ANGULO DEL VOLTAJE DE TOQUE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVTCG : ANGULO DEL VOLTAJE DE TOQUE EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVPK : ANGULO DEL VOLTAJE DE PASO EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EVPKG : ANGULO DEL VOLTAJE DE PASO EN CADA ESTACION TERMINAL
C--> EAAI : ANGULO DE LA CORRIENTE POR TIERRA EN CADA LAZO
C--> EAAIG : ANGULO DE LA CORRIENTE POR TIERRA EN CADA LAZO.
C--> EAIL : ANGULO DE LA CORRIENTE POR EL CABLE DE GUARDIA EN C/LAZO
C--> EAILG : ANGULO DE LA CORRIENTE POR EL CABLE DE GUARDIA EN C/LAZO
C--> EAIT : ANGULO DE LAS CORRIENTES POR LAS TORRES DE CADA LINEA
C--> EAITG : ANGULO DE LAS CORRIENTES POR LAS TORRES DE CADA LINEA
C--> EVV : ANGULO DEL VOLTAJE EN LAS TORRES DE CADA LINEA
C--> EVVG : ANGULO DEL VOLTAJE EN LAS TORRES DE CADA LINEA

```

```

C
C *****
C--> DEFINICION E INICIALIZACION DE VARIABLES
C

```

```

0001 COMPLEX ZAZ(4,2,5),ZGZ(4,2,5),ZMZ(4,2,5),ZA(500),ZG(500),ZM(500)
      1.(7500),S(500),A(500),B(500),C(500),DEL(500),GAN(500),AL(500)
      2),EP(500),TE(500),NU(500)
0002 COMPLEX U(4,2,500),V(4,2,500)
0003 COMPLEX UM,VN,SUN,HF,DEH1,DEH2,DEH3,DEH4,SUM1,SUN3,VO,AIFALL
0004 COMPLEX HZ(4,2,5),R(500),R(4),NO,ROO,RRT(4),RRZ(4,2,5)
0005 COMPLEX AA(13,1),AINV(13,13),AA(500),A(4,2),VF(4,2),VV(4),
      LY(13,1),AIF(4,2),X(13,1),ZBZ(4,2),ZHZ(4,2),ZNZI(4,2),CAR(4,2,5)
0006 DIMENSION RHJKN(4),SRHOK(4),RHOZN(4,2,5),SRHOZI(4,2,5),
      IRHJK(4),IRHJZ(4,2,5),FP(4),FPK(4),FT(4),FTK(4)
0007 DIMENSION WK(4),NZ(4,2),NT(4,2,5)
0008 DIMENSION M(10),MA1(10),MV0(10),MAIF(10),MVV(10)
0009 DIMENSION MAI2(10),MVV2(10),MAI3(10),MAI4(10),MVV4(10)
0010 COMPLEX ZAZ2,ZGZ2,ZMZ2,AMK(2,4),AMVK(2,4),VW(500)
0011 COMPLEX VT(4),VF(4),VTO,VPO
0012 DIMENSION SVP(4),SVPK(4),SVV(4),SVC(4),SAI(4),SAIC(4),SVT(4),SVTC
      1(4),DESVP(4),DESAI(4),DESVT(4),DESVP(4)
0013 DATA HIO,MA11,MV0,MAIF,MVVI /50*0/
0014 DATA MAI2,MVV2 /20*0/,MAI3,MAI4,MVV3,MVV4 /40*0/
0015 DATA X /13*(0..0)/, Y /13*(0..0)/
0016 DATA SAIF,SAIFC,SVO,SVOC,SIO,SIOG,SVV,SVVC,SAI,SAIC /22*0./
0017 DATA SVTJ,SVTJC,SVPJ,SVPJC,SVP,SVPC,SVT,SVTC /20*0./
0018 DATA CAR /8*(0..0)/
0019 COMMON NMAYOR

```

```

C--> LECTURA Y ESCRITURA DE DATOS DE ENTRADA
C

```

```

0020 IND2 = 0
0021 WRITE (3,2)
0022 WRITE (3,3)
0023 READ(1,0) IND1,ICDR,IP,COTA,NMAYOR,IND3,IND4
0024 CALL CUNTR1(1,ICDR,IP,NMAYOR,COTA,0..0..0..0..,IERROR)
0025 IF(IERROR.EQ.1) GOTD286
0026 WRITE(1,22) ICOR,IP,COTA,NMAYOR
0027 IF(IND1.NE.0) GOTJ 8
0028 READ(1,1) A1,B1,D,D1,H,DM
0029 CALL CUNTR1(2,0,0,0,A1,B1,D,D1,H,DM,IERROR)
0030 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0031 WRITE (3,5)
0032 CALL DATU1 (RO,A1,B1,D,D1,H,DM,FP0,FT0)
0033 GOTJ 9
0034
0035 8 WRITE(1,23)
0036 CALL DATU2 (NO,FP0,FT0,IERROR)
0037 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0038 9 READ (1,10) IRH00,RH00N,SRH00
0039 CALL CUNTR1(3,0,0,0,IRH00,SRH00,0..0..0..0..,IERROR)
0040 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0041 WRITE (3,15) RH00N,SRH00
0042 READ(1,12) (MK(K),IRHOK(K),RHOKN(K),SRHOK(K),K=1,IP)
0043 DO 7 K = 1,IP
0044 R11 = RHOKN(K)
0045 S11 = SRHOK(K)
0046 M3 = MK(K)
0047 CALL CUNTR1 (4,M3,0,0,R11,S11,0..0..0..0..,IERROR)
0048 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0049 CONTINUE
0050 DO 11 K = 1,IP
0051 WRITE (3,30) K,MK(K),RHOKN(K),SRHOK(K)
0052 READ (1,11) A1,B1,D,D1,H,DM
0053 CALL CUNTR1 (2,0,0,0,A1,B1,D,D1,H,DM,IERROR)
0054 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0055 11 CALL DATU1 (RT(K),A1,B1,D,D1,H,DM,FP(K),FT(K))
0056 DO 13 K=1,IP
0057 M3 = MK(K)
0058 READ(1,14) (N(K,J),NZ(K,J),VF(K,J),J=1,M3)
0059 DO 27 K = 1,IP
0060 M3 = MK(K)
0061 DO 27 J = 1,M3
0062 N11 = N(K,J)
0063 N12 = NZ(K,J)
0064 CALL CUNTR1 (5,N11,N12,0,0..0..0..0..,IERROR)
0065 IF(IERROR.EQ.1) STOP
0066 CONTINUE
0067 27 DO 10 K = 1,IP
0068 M3 = MK(K)
0069 DO 10 J = 1,M3
0070 J1 = 1
0071 WRITE(3,20) J,K,VF(K,J),N(K,J),NZ(K,J)
0072 N4 = NZ(K,J)

```

```

0073      DO 16 I = 1,N4
0074      READ(1,17) NT(K,J,1),IRHOZ(K,J,1),RHOZN(K,J,1),SRHOZ(K,J,1),RC,XC
0075      CAR(K,J,1) = CMPLX(RC,XC)
0076      J2 = J2 + NT(K,J,1)
0077      WRITE(3,28) I,NT(K,J,1),J1,J2,RHOZN(K,J,1),SRHOZ(K,J,1)
0078      J1 = J1 + NT(K,J,1)
0079      N11 = NT(K,J,1)
0080      R11 = RHOZN(K,J,1)
0081      S11 = SRHOZ(K,J,1)
0082      CALL CUNFR1 (6,N11,0.0,R11,S11,0.0,0.0,0.0,0.0,ERROR)
0083      IF (ERROR.EQ.1) STOP
0084      CONTINUE
16      DO 70 K = 1,IP
0085      M3 = MK(K)
0086      DO 70 J = 1,M3
0087      N4 = NZ(K,J)
0088      DO 70 I = 1,N4
0089      WRITE (3,43) K,J,I
0090      CALL DATU2 (RZZ,0.0,0.0,ERROR)
0091      IF (ERROR.EQ.1) STOP
0092      RZZ(K,J,1) = RZZ
0093      DO 70 K = 1,IP
0094      RT(K) = RT(K)
0095      M3 = MK(K)
0096

```

```

0097      DO 85 J = 1,M3
0098      WRITE(3,44) K,J
0099      CALL DATU3 (ZAZZ,ZGZZ,ZMZZ,ERROR)
0100      IF (ERROR.EQ.1) STOP
0101      ZBZ(K,J) = ZAZZ * COTA
0102      ZMZ(K,J) = ZGZZ * COTA
0103      ZNZ(K,J) = ZMZZ * COTA
0104      CONTINUE
85      RRO = RO
0105      NMAYUR = NMAYUR + 1
0106      J1 = 1
0107      IF (IND3.NE.0) GOTO 173
0108

```

C-----> DESARROLLO DEL PROGRAMA
C-----> INICIALIZACION DE VARIABLES

```

0109      82 DO 555 IV = J1,ICOR
0110      IK = 0
0111      I2 = 0
0112      IC1 = 0
0113      IC2 = 0
0114      I5 = 0
0115      I6 = 0
0116      I1 = 1
0117      AIFALL = CMPLX(0.0,0)
0118      DO 84 J = 1,NMAYOR
0119      ZG(J) = (0.0,0)
0120      ZM(J) = (0.0,0)
0121      T(J) = (0.0,0)
0122      S(J) = (0.0,0)
0123      A(J) = (0.0,0)
0124      B(J) = (0.0,0)
0125      C(J) = (0.0,0)
0126      DEL(J) = (0.0,0)
0127      GAM(J) = (0.0,0)
0128      AL(J) = (0.0,0)
0129      EPI(J) = (0.0,0)
0130      TE(J) = (0.0,0)
0131      NU(J) = (0.0,0)
0132      ZA(J) = (0.0,0)
0133      86 DO 87 I = 1,I3
0134      DO 87 J = 1,I3
0135      A(INV(I,J)) = (0.0,0)
0136      87 AA(I,J) = (0.0,0)
0137      C-----> PRUEBA PARA ENCONTRAR LOS VALORES EXTREMOS DE CORRIENTES Y VOLTAJES
0138      IF(IV.EQ.1) GOTO 84
      IF(IV.EQ.2) GOTO 88

```

C-----> CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LA TORRE O S/E FALLADA

```

0139      CALL GAUSS (IRH00,SRH00,RHO0N,RH00)
0140      GOTO 89
0141      84 WRITE (3,98)
0142      RH00 = RH00N - 3.0*SRH00
0143      GOTO 89
0144      88 RH00 = RH00N + 3.0*SRH00
0145      89 IF(RH00.LE.0) RH00 = 1.
0146      RO =RRO * RH00
0147      IF (IND1.NE.0) GOTO 891
0148      FPAU = FPO * RH00
0149      FTOU = FT0 * RH00
0150      891 IF(IV.GT.2.AND.IND2.EQ.0) GOTO 895
0151      WRITE (3,99) COTA,COTA,COTA
0152      WRITE (3,92) IRH00,RH00,RO
0153      895 DO 90 K = 1,IP
0154      90 IK = IK + MK(K)
0155      IOO = IK + IP + 1

```

C-----> CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS ESTACIONES TERMINAL

```

0156      DO 146 K = 1,IP
0157      IK = IK + 1
0158      IRK = IRHOK(K)
0159      SRK = SRHOK(K)
0160      RKN = RHOK(K)
0161      IF(IV.EQ.1) GOTO 920
0162      IF(IV.EQ.2) GOTO 925
0163      CALL GAUSS (IRK,SRK,RKN,RHOK)

```

```

0164      IRHOK(K) = IRK
0165      GOTO 926
0166      920 RHOK = RKN - 3.0 * SRK
0167      GOTO 926
0168      925 RHOK = RKN + 3.0*SRK
0169      926 IF(RHOK.LE.0) RHOK = 1.
0170      RT(K) = RT(K) + RHOK
0171      FP(K) = FP(K) + RHOK
0172      FT(K) = FT(K) + RHOK
0173      IF(IV.GT.2.AND.IND2.EQ.0) GOTO 927
0174      WRITE(3,93) K,IRK,RHOK,RT(K)
0175      927 M3 = MK(K)

```

```

C-----> CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE LAS DIFERENTES TORRES
C
0176 DO 145 J = 1, N3
0177 SUM = (0.,0.)
0178 Z1 = REAL(ZBZ(K,J))
0179 Z2 = AIMAG(ZBZ(K,J))
0180 Z3 = REAL(ZHZ(K,J))
0181 Z4 = AIMAG(ZHZ(K,J))
0182 Z5 = REAL(ZNZ(K,J))
0183 Z6 = AIMAG(ZNZ(K,J))
0184 N4 = NZ(K,J)
0185 DO 105 I = 1, N4
0186 IRZ = IRHZ(K,J,I)
0187 SRZ = SRHZ(K,J,I)
0188 RZN = RHZN(K,J,I)
0189 IF(IV.EQ.1) GOTO 930
0190 IF(IV.EQ.2) GOTO 935
0191 CALL GAUSS((I,Z,SHZ,RZN,RHOZ))
0192 IRHZ(K,J,I) = IRZ
0193 GOTO 936
0194 930 RHOZ = RZN - 3.0*SRZ
0195 GOTO 936
0196 935 RHOZ = RZN + 3.0*SRZ
0197 936 IF(RHOZ.LE.0.) RHJZ = 1.
0198 RZ(K,J,I) = RHJZ * RHOZ
C-----> CALCULO FINAL DE LOS PARAMETROS DE LA RED DE PUESTA A TIERRA
C
0199 DE = 77700. * RHJZ
0200 Z7 = Z2 + 0.08676 * ALOG10(DE) * COTA
0201 Z8 = Z4 + 0.08676 * ALOG10(DE) * COTA
0202 Z9 = Z6 + 0.08676 * ALOG10(DE) * COTA
0203 ZAZ(K,J,I) = CMPLX(Z1,Z7) + CAR(K,J,I)
0204 ZGZ(K,J,I) = CMPLX(Z3,Z8)
0205 ZMZ(K,J,I) = CMPLX(Z5,Z9)
0206 IF(IV.GT.2.AND.(ND2.EQ.0)) GOTO 946
0207 WRITE(3,94) J,I,IRZ,RHOZ,RZ(K,J,I),ZAZ(K,J,I),ZGZ(K,J,I),ZMZ(K,J,I)
C-----> CALCULO DE LAS VARIABLES EMPLEADAS EN EL DESARROLLO DEL ALGORITMO
C
0208 946 I2 = I2 + NT(K,J,I)
0209 DO 100 L = 1, I2
0210 ZG(L) = ZGZ(K,J,I)
0211 ZA(L) = ZAZ(K,J,I)
0212 ZM(L) = ZMZ(K,J,I)
0213 S(L) = ZG(L) - ZM(L)
0214 IF(L.EQ.N(K,J)) GOTO 96
0215 R(L) = RZ(K,J,I)
0216 GOTO 97
0217 96 R(L) = NT(K,J,I)
0218 97 I3 = L - 1
0219 IF(I3.EQ.0) GOTO 95
0220 T(L) = R(I3) + ZG(L) + R(L)
0221 GOTO 100
0222 95 T(L) = R0 + ZG(L) + R(L)
0223 100 CONTINUE
0224 SUM = SUM + (ZAZ(K,J,I) + ZGZ(K,J,I) - 2.0*ZMZ(K,J,I)) * NT(K,J,I)
0225 I1 = I2 + 1
0226 HF = SUM
C-----> CALCULO DE LOS COEFICIENTES EMPLEADOS EN EL PROGRAMA
C
0227 A(I) = -R0/(T(I)-R0)
0228 B(I) = R(I)/(T(I)-R0)
0229 C(I) = S(I)/(T(I)-R0)
0230 N(I) = N(K,J) - 1
C----->
0231 DO 110 I = 2, N1
0232 I3 = I - 1
0233 A(I) = R(I3) / T(I)
0234 B(I) = R(I) / T(I)
0235 C(I) = S(I) / T(I)
0236 N2 = N(K,J)
0237 A(N2) = R(I3)/(T(N2)-R(N2))
0238 B(N2) = -R(N2)/(T(N2)-R(N2))
0239 C(N2) = S(N2)/(T(N2)-R(N2))
0240 N3 = N(K,J) + 1
0241 DEL(N3) = (0.,0.)
0242 AL(N3) = (0.,0.)
0243 GAM(N3) = (1.,0.)
0244 I = N3
0245 I1 = I - 1
0246 I2 = I + 1
0247 IF(I.LT.2) GOTO 120
0248 DEN1 = 1. - B(I1) * DEL(I2)
0249 DEL(I) = A(I) / DEN1
0250 AL(I) = (B(I1) * AL(I2) + C(I1))/DEN1
0251 IF(CABS(GAM(I2)).LE.1.0E-10) GO TO 116
0252 GAM(I) = (B(I1) + GAM(I2)) / DEN1
0253 GOTO 115
0254 116 GAM(I) = (0.,0.)
0255 GOTO 115
0256 120 DO 130 I = 1, N1
0257 I3 = I - 1
0258 IF(I3.EQ.0) GOTO 125
0259 DEN2 = 1. - A(I1) * EP(I3)
0260 EP(I) = B(I1)/DEN2
0261 NU(I) = (C(I1) + A(I1) * NU(I3)) / DEN2
0262 IF(CABS(TE(I3)).LE.1.0E-10) GOTO 122
0263 TE(I) = (A(I1) * TE(I3)) / DEN2
0264 GOTO 130
0265 122 TE(I) = (0.,0.)
0266 GOTO 130
0267 125 EP(I) = U(I)
0268 TE(I) = A(I)
0269 NU(I) = C(I)
0270 130 CONTINUE
0271 DO 135 I = 2, N2
0272 I3 = I - 1
0273 DEN3 = 1. - DEL(I1) * EP(I3)
0274 U(K,J,I) = (AL(I1)*DEL(I1)+NU(I3))/DEN3
0275 V(K,J,I) = GAM(I1)/DEN3
0276 W(K,J,I) = (DEL(I1)*TE(I3))/DEN3
0277 DEN4 = 1. - EP(I1) * DEL(I2)
0278 U4 = (EP(I1)*AL(I2)+NU(I1))/DEN4
0279 V4 = (EP(I1)+GAM(I2))/DEN4
0280 W4 = TE(I1)/DEN4
C-----> FORMACION DEL SISTEMA DE ECUACIONES A RESOLVER
C
0281 IC1 = IC1 + 1
0282 SUM1 = (0.,0.)
0283 SUM2 = (0.,0.)
0284 SUM3 = (0.,0.)

```

```

0285 DO 140 I = 2,N2
0286 SUM1 = SUM1 + S(I) * U(K,J,1)
0287 SUM2 = SUM2 + S(I) * V(K,J,1)
0288 SUM3 = SUM3 + S(I) * W(K,J,1)
140 AA(1C1,1C1) = HF - S(I) * UM - SUM1
AA(1C1,1K1) = - S(I) * VM - SUM2
AA(1C1,1J1) = - S(I) * WM - SUM3
IC2 = IC2 + 1
AA(1K,1C2) = U(K,J,N2)
AA(1K,1K) = AA(1K,1K) + V(K,J,N2)
AA(1K,1J) = AA(1K,1J) + W(K,J,N2) + 1.1
AA(1J,1C2) = UM
AA(1J,1K) = AA(1J,1K) + VM
145 AA(1J,1J) = AA(1J,1J) + WM
AA(1K,1K1) = AA(1K,1K1) - 1.
146 AA(1K,1J1) = AA(1K,1J1) - 1.
AA(1J,1J1) = AA(1J,1J1) - 1.
C-----> SUBROUTINA PARA INVERTIR LA MATRIZ
CALL INVER (AA,1J,AINV)
C
C-----> FORMACION DEL VECTOR VOLTAJE
C
0303 DO 150 K = 1,IP

```

```

0304 M3 = MK(K)
0305 DO 150 J = 1,M3
0306 IS = IS + 1
0307 Y(IS,1) = VF(K,J)
C-----> CALCULO DE LOS VECTORES CORRIENTES Y VOLTAJES
C
0308 CALL MULT (AINV,Y, X,100,100,1)
0309 DO 160 K=1,IP
0310 M3 = MK(K)
0311 DO 155 J = 1,M3
0312 IS = IS + 1
0313 AIF(K,J) = X(IS,1)
155 AIFALL = AIFALL + AIF(K,J)
IC1 = IC1 + 1
A1(K) = X(IC1,1)
VP(K) = FPK(K) * A1(K)
VT(K) = FTK(K) * A1(K)
160 VV(K) = -A1(K) * RT(K)
VO = NO * X(100,1)
IF (IND1.NE.0) GOTU 1606
VFO = FTOO * X(100,1)
VPO = FPAO * X(100,1)
GOTU 1607
1606 VFO = 0.42 * VO
VPO = 0.245 * VU
1607 IF(IND2.LE.2) GOTU 1880
IF(IND2.LE.1) GOTU 1884
C-----> ORDENAMIENTO DE LAS VARIABLES QUE INTERESA CONOCER EN FORMA PROBABIL
C
0329 V00 = CAUS(V0)
0330 X00 = CABS(X(100,1))
0331 AF = CABS(AIFALL)
0332 CALL SORT(AF,MAIF,AMINF,AMAXF)
0333 CALL SURT(X00,M10,AMINX0,AMAXX0)
0334 CALL SJRT(V00,MV0,AMINV0,AMAXV0)
0335 DO 162 N = 1,IP
0336 CI = CABS(A1(K))
0337 CIMIN = CABS(AMIK(2,K))
0338 CIMAX = CABS(AMIK(1,K))
0339 VI = CABS(VV(K))
0340 VIMIN = CABS(AMVK(2,K))
0341 VIMAX = CABS(AMVK(1,K))
0342 IF(VIMIN.LE.VIMAX) GOTU 161
0343 TEMP = VIMIN
0344 VIMIN = VIMAX
0345 VIMAX = TEMP
161 GOTU (1611,1612,1613,1614) * K
1611 CALL SORT(CI,MAI1,CIMIN,CIMAX)
1612 CALL SURT(VI,MV1,VIMIN,VIMAX)
1613 CALL SURT (CI,MAI2,CIMIN,CIMAX)
1614 CALL SURT (VI,MV2,VIMIN,VIMAX)
1615 GOTU 162
1613 CALL SURT (CI,MAI3,CIMIN,CIMAX)
1614 CALL SURT (VI,MV3,VIMIN,VIMAX)
1615 GOTU 162
1614 CALL SURT (CI,MAI4,CIMIN,CIMAX)
1615 CALL SURT (VI,MV4,VIMIN,VIMAX)
162 CONTINUE
C-----> CALCULO DE PROMEDIOS, EMPLEADOS EN FORMA NUMERICA
C
0359 SAIF = SAIF + CABS(AIFALL)
0360 SAIFC = SAIFC + CABS(AIFALL) ** 2
0361 SVO = SVU + CABS(V0)
0362 SVOL = SVOL + CABS(V0) ** 2
0363 SIO = SIO + CABS(X(100,1))
0364 SI0C = SI0C + CABS(X(100,1)) ** 2
0365 SVT0 = SVT0 + CABS(VT0)
0366 SVT0C = SVT0C + CABS(VT0) ** 2
0367 SVP0 = SVP0 + CABS(VP0)
0368 SVP0C = SVP0C + CABS(VP0) ** 2
0369 DO 1605 K = 1,IP
0370 SVV(K) = SVV(K) + CABS(VV(K))
0371 SVVC(K) = SVVC(K) + CABS(VV(K)) ** 2
0372 SAI(K) = SAI(K) + CABS(A1(K))
0373 SVT(K) = SVT(K) + CABS(VT(K))
0374 SVTC(K) = SVTC(K) + CABS(VT(K)) ** 2

```

```

0375 SVP(K) = SVP(K) + CABS(VP(K))
0376 SVPC(K) = SVPC(K) + CABS(VP(K)) ** 2
0377 SAIC(K) = SAIC(K) + CABS(A1(K)) ** 2
0378 555 CONTINUE
C-----> ESCRITURA DE LAS SALIDAS
C
0379 WRITE(3,165)
0380 CALL HIST(MAIF,0,AMINF,AMAXF)
0381 WRITE (3,170)
0382 CALL HIST(M10,0,AMINX0,AMAXX0)
0383 WRITE (3,175)
0384 CALL HIST(MV0,0,AMINV0,AMAXV0)
0385 DO 184 K = 1,IP
0386 WRITE (3,180) K
0387 CIMIN = CABS(AMIK(2,K))
0388 CIMAX = CABS(AMIK(1,K))
0389 IF (CIMIN.LE.CIMAX) GOTU 1183

```

```

0390      TEMP = CIMIN
0391      CIMIN = CIMAX
0392      CIMAX = TEMP
0393      1183  GOTU(1183,1841,1842,1843),K
0394      1184  CALL HIST (M11,0,CIMIN,CIMAX)
0395      GOTU 184
0396      1841  CALL HIST (M12,0,CIMIN,CIMAX)
0397      GOTU 184
0398      1842  CALL HIST (M13,0,CIMIN,CIMAX)
0399      GOTU 184
0400      1843  CALL HIST (M14,0,CIMIN,CIMAX)
0401      184  CONTINUE
0402      DO 187 K = 1,IP
0403      *WRITE (J,185) K
0404      VMIN = CABS(AHVK(2,K))
0405      VMAX = CABS(AHVK(1,K))
0406      IF (VMIN.LE.VMAX) GOTU 1850
0407      TEMP = VMIN
0408      VMIN = VMAX
0409      VMAX = TEMP
0410      1850  GOTU (1187,1872,1873,1874),K
0411      1187  CALL HIST (MV1,0,VMIN,VMAX)
0412      GOTU 187
0413      1872  CALL HIST (MV2,0,VMIN,VMAX)
0414      GOTU 187
0415      1873  CALL HIST (MV3,0,VMIN,VMAX)
0416      GOTU 187
0417      1874  CALL HIST (MV4,0,VMIN,VMAX)
0418      187  CONTINUE

```

C-----> VARIABLES DE SALIDA EN FORMA NUMERICA
C

```

0419      L1 = ICDR - 2
0420      SVO = SVO / L1
0421      SVOC = SVOC / L1
0422      DESVO = SQR(ABS(SVOC - SVO**2))
0423      SAIF = SAIF / L1
0424      SAIFC = SAIFC / L1
0425      DESAIF = SQR(ABS(SAIFC - SAIF**2))
0426      SIO = SIO / L1
0427      SIOC = SIOC / L1
0428      DESIO = SQR(ABS(SIOC - SIO**2))
0429      SVTO = SVTO / L1
0430      SVTOC = SVTOC / L1
0431      DESVTO = SQR(ABS(SVTOC - SVTO**2))
0432      SVPJ = SVPJ / L1
0433      SVPJC = SVPJC / L1
0434      DESVPO = SQR(ABS(SVPJC - SVPJ**2))
0435      *WRITE(J,1635) SAIF,DESAIF
0436      *WRITE(J,1636) SIO,DESAIO,SVO,DESVO,SVTO,DESVTO,SVPJ,DESVPO
0437      DO 1645 K = 1,IP
0438      SVVK(K) = SVVK(K) / L1
0439      SVVC(K) = SVVC(K) / L1
0440      DESVV(K) = SQR(ABS(SVVC(K) - SVVK(K)**2))
0441      SVTK(K) = SVTK(K) / L1
0442      SVTC(K) = SVTC(K) / L1
0443      DESVT(K) = SQR(ABS(SVTC(K) - SVTK(K)**2))
0444      SAIK(K) = SAIK(K) / L1
0445      SAIC(K) = SAIC(K) / L1
0446      DESAI(K) = SQR(ABS(SAIC(K) - SAIK(K)**2))
0447      SVPK(K) = SVPK(K) / L1
0448      SVPCK(K) = SVPCK(K) / L1

```

```

0449      DESVP(K) = SQR(ABS(SVPC(K) - SVP(K)**2))
0450      1645 *WRITE(J,1646) K,SAIK(K),DESAIK(K),SVVK(K),DESVVK(K),SVTK(K),DESVTK(K),SV
0451      P(K),DESVPK(K)
0452      *WRITE(J,1753)
0453      173  IND2 = 1
0454      J1 = ICDR
0455      SRHJD = (0.,0.)
0456      DO 1755 K = 1,IP
0457      SRHJK(K) = (0.,0.)
0458      M3 = MK(K)
0459      DO 1755 J = 1,M3
0460      N4 = NZ(K,J)
0461      DO 1755 I = 1,N4
0462      1755 SRHJZ(K,J,I) = (0.,0.)
0463      GOTU 82

```

C-----> VOLTAJES Y CORRIENTES DEACUERDO A LA VARIACION EXTREM DE LA RESISTIVIDAD
C

```

0463      1880  IF(IV.EQ.1) GOTO 1882
0464      IF(IV.EQ.2) GOTO 1883
0465      1882  AMAXF = CABS(AIFALL)
0466      AMAXVO = CABS(V0)
0467      AMAXXO = CABS(X(100,1))
0468      GOTU 1884
0469      1883  AMINF = CABS(AIFALL)
0470      AMINVO = CABS(V0)
0471      AMINXO = CABS(X(100,1))
0472      IF(AMINVO.LE.AMAXVO) GOTO 1884
0473      TEMP = AMINVO
0474      AMINVO = AMAXVO
0475      AMAXVO = TEMP
0476      1884  EFALL = CABS(AIFALL)
0477      *WRITE(J,1885)AIFALL,EFALL
0478      DO 205 K = 1, IP
0479      M3 = MK(K)
0480      DO 205 J = 1, M3
0481      EAIK = CABS(AIF(K,J))
0482      *WRITE(J,210) J,K,AIF(K,J),EAIK
0483      EXO = CABS(X(100,1))
0484      EXOG = ATAN(AIMAG(X(100,1))/REAL(X(100,1))) * 57.29578
0485      EVO = CABS(V0)
0486      EVOG = ATAN(AIMAG(V0)/REAL(V0)) * 57.29578
0487      EVTO = CABS(VTO)
0488      EVTOG = ATAN(AIMAG(VTO)/REAL(VTO)) * 57.29578
0489      EVP0 = CABS(VP0)
0490      EVPJG = ATAN(AIMAG(VP0)/REAL(VP0)) * 57.29578
0491      *WRITE(J,1887) EXO,EXOG,EVO,EVOG,EVT0,EVT0G,EVP0,EVP0G
0492      DO 206 K = 1,IP
0493      EAIK = CABS(AI(K))
0494      EAIKG = ATAN(AIMAG(AI(K))/REAL(AI(K))) * 57.29578
0495      EVVK = CABS(VV(K))
0496      EVVKG = ATAN(AIMAG(VV(K))/REAL(VV(K))) * 57.29578
0497      EVTK = CABS(VT(K))
0498      EVTKG = ATAN(AIMAG(VT(K))/REAL(VT(K))) * 57.29578
0499      EVPK = CABS(VP(K))
0500      EVPKG = ATAN(AIMAG(VP(K))/REAL(VP(K))) * 57.29578
0501      206  *WRITE(J,1888) K,EAIK,EAIKG,EVVK,EVVKG,EVTK,EVTKG,EVPK,EVPKG

```

C-----> CALCULO DE LAS CORRIENTES DEAZO Y ELEVACION DE VOLTAJES EN LAS TORRES
C

```

0502      DO 240 K = 1,IP
0503      M3 = MK(K)
0504      DO 240 J = 1,M3
0505      N2 = N(K,J)
0506      *WRITE(J,270) J,K

```

```

0507 DO 240 1 = 1, N2
0508 I3 = I - 1
0509 IF(I.EQ.1) GOTO 230
0510 AA1(I) = JK(J,I)*AIF(K,J)+V(K,J,I)*AI(K)+W(K,J,I)*X(100,I)
0511 VV(I,J) = AA1(I)-AA1(I3)+R(I3)
0512 IF(CABS(VV(I,J)).LT.5.0E-1) GOTO 240
0513 GOTO 235
230 AA1(I) = VV(I,J)+AIF(K,J)+VH*AI(K)+H*X(100,I)
0514 VV(I) = VV
0515 IF(CABS(VV(I)).LT.5.0E-1) GOTO 240
0516 EAA1 = CABS(AA1(I))
0517 EAAIG = ATAN(AIMAG(AA1(I))/REAL(AA1(I))) * 57.29578
0518 EAIG = CABS(AIF(K,J) - AA1(I))
0519 EAIGG = ATAN(AIMAG(AIF(K,J)-AA1(I))/REAL(AIF(K,J)-AA1(I))) * 57.3
0520 WRITE(J,275) I, EAA1, EAAIG, EAIG, EAIGG, EAIT, EAITG, EVW, EVWG
0521
0522 GOTO 240
0523 235 EAA1 = CABS(AA1(I))
0524 EAAIG = ATAN(AIMAG(AA1(I))/REAL(AA1(I))) * 57.29578
0525 EAIG = CABS(AIF(K,J) - AA1(I))
0526 EAIGG = ATAN(AIMAG(AIF(K,J)-AA1(I))/REAL(AIF(K,J)-AA1(I))) * 57.3
0527 EAIT = CABS(AA1(I) - AA1(I3))
0528 R1 = REAL(AA1(I)-AA1(I3))
0529 IF(ABS(R1).LE.1.0E-30) R1 = R1 * 1.0E20
0530 EAITG = ATAN(AIMAG(AA1(I) - AA1(I3)) / R1) * 57.29578
0531 EVW = CABS(VV(I3))
0532 R2 = REAL(VV(I3))
0533 IF(ABS(R2).LE.1.0E-30) R2 = R2 * 1.0E20
0534 EVWG = ATAN( AIMAG(VV(I3)) / R2 ) * 57.29578
0535 WRITE(J,275) I, EAA1, EAAIG, EAIG, EAIGG, EAIT, EAITG, EVW, EVWG
0536 CONTINUE
240 IF(IND2.EQ.1) GOTO 286
0537 DO 282 K = 1, 1P
0538 A4(K(J1,K)) = AI(K)
0539 A4VK(J1,K) = VV(K)
0540 J1 = J1 + 1
0541 IF(J1.LT.3) GOTO 82
0542 IF(IND4.EC.0) GOTO 283
0543 ICOM = 3
0544 GOTO 173
0545 283 WRITE(J,285)
0546 GOTO 82

```

C-----> F O R M A T O S D E S A L I D A

```

0548 1 FORMAT(6F12.4)
0549 2 FORMAT('1',I20('---'))
0550 3 FORMAT('1',5I(1),J2X,'E S C U E L A P U L I T E C N I C A N A C
* I U N A L',J2X,5S('---'),//,44X,'FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
* ',//,44X,J2('---'),//,46X,'DEPARTAMENTO DE POTENCIA',//,46X,2('---')
* //,53X,'TESIS DE GRADO',//,50X,20('---'),//,41X,'METODO DE MONTE CA
* RLO APLICADO AL ANALISIS DE REDES DE PUESTA A TIERRA DE UN
* S.E.P.',//,40X,'REALIZADO POR: MARCELO CALDERON JARAMILLO',//40
* X,'DIRIGIDO POR: ING. CARLOS RIFORIO',//40X,'A B R I
* L 9 4',//,10X,100('---'))
0551 5 FORMAT(//5X,'PARAMETROS DE LA REJILLA DE LA S/E FALLADA',/8X,43(' *
1')//)
0552 6 FORMAT(2X,11,15,12,F6.3,15,11,11)
0553 10 FORMAT(19,2F12.4)
0554 12 FORMAT(2I2A,11,19,2F12.4,4X)
0555 14 FORMAT(2I2X,2I4,2F12.4)
0556 15 FORMAT(/,' RESISTIVIDAD MEDIA (OHM-M)',20X,F14.2/' DESVIACION STAN
10ARD DE LA RESISTIVIDAD (OHM-M)',F14.2//)
0557 17 FORMAT(15,19,4F12.4)
0558 22 FORMAT('1',15X,'D A T O S D E E N T R A D A',15X,33(' *')//
1/5X,'NUMERO DE MUESTREOS A REALIZARSE',26X,15//5X,'NUMERO DE ESTAC
1IONES TERMINALES',30X,12//5X,'SEPARACION (CONSTANTE) ENTRE TORRES
3ADYACENTES EN KM',5X,F6.3//5X,'NUMERO MAYOR DE TORRES EN UNA LINEA
4',24X,14//)
0559 23 FORMAT(//15X,'PARAMETROS DE LA TORRE FALLADA',/15X,31(' *')//)
0560 26 FORMAT(//1X,'LINEA',13,' ENTRE LA ESTACION TERMINAL',13,' Y LA T
1ORRE O S/E FALLADA',/1X,65('---')//,' VOLTAJE FASE NEUTRO (EN VOLTIOS
2)',10X,2F12.2//,' NUMERO DE TORRES A LO LARGO DE LA LINEA',22X,15,
3//,' NUMERO DE ZONAS DE DISTINTA RESISTIVIDAD',23X,13//,3X,'ZONAS
4',3X,'T O R R E S',4X,'RESISTIVIDAD',2X,'DESV. STAND.',//,34X,
5,'MEDIA',2X,'DE LA RESIS-',//,46X,'TIV. MEDIA',7X,'NUMERO',4X,'DE',3
6X,'HASTA',4X,'(OHM-M)',7X,'(OHM-M)',//)
0561 28 FORMAT(4X,12,4X,14,3X,14,3X,14,4X,F8.2,6X,F8.2)
0562 30 FORMAT(//19X,'ESTACION TERMINAL',4X,12/19X,17,' *',1,4X,' *',//,' NUM
1ERO DE LINEAS A LA TORRE O S/E FALLADA',17X,12/' RESISTIVIDAD MEDI
2A(OHM-M)',21X,F14.2/' DESVIACION STANDARD DE LA RESISTIVIDAD (OHM-
3M)',F14.2//)
0563 43 FORMAT(//,' ESTACION TERMINAL',14,' LINEA',14,' ZONA',14,/)
0564 44 FORMAT(//,' ESTACION TERMINAL',14,' LINEA',14,/)
0565 92 FORMAT(15X,'TORRE O S/E FALLADA',3X,111,2X,F9.3,2X,2F8.3)
0566 93 FORMAT(5X,'ESTACION TERMINAL',13,2X,111,2X,F9.3,2X,2F8.3)
0567 94 FORMAT(5X,'LINEA',13,2X,'ZONA',13,5X,111,2X,F9.3,2X,2F8.3,3(2X,2F7
1,3))
0568 98 FORMAT(//12X,'RESULTADOS DETERMINISTICOS CONSIDERANDO EL RANGO
1MAS PROBABLE DE VARIACION DE LAS RESISTIVIDADES',12X,96(' *')//)
0569 99 FORMAT(5X,110('---')//83X,'PARAMETROS DE LA RED',//10X,'DESCRIPCION',
1,6X,'N GENERADO',3X,'RESISTIVIDAD',2X,'R. PTA. A TIERRA',4X,'IMP.D. FA
2SE',4X,'1400. GUARDIA',5X,'IMP.D. MUTUA',43X,'OHM-M',10X,'OHM',11X
3,'OHM',F3.1,'KM',6X,'OHM',F3.1,'KM',6X,'OHM',F3.1,'KM',//)
0570 1635 FORMAT(//5X,110('---')//39X,'RESULTADOS EN FORMA PROBABILISTICA',//
137X,34('---')//,70X,'VALOR MEDIO',6X,'DESV.STAND.',//,30X,'CORRIEN
2TE DE FALLA TOTAL (AMPERIOS)',5X,F10.2,6X,F10.2,//,10X,'DESCRIPCIO
3ON',6X,'CORRIENTE DE FALLA EN:',5X,'VOLTAJE EN:',7X,'VOLTAJE DE I
400UE EN:',3X,'VOLTAJE DE PASO EN:',//,25X,41X,'VAL. MEDIO DESV.ST
5AND',//,20X,4(3X,'A'),9X,'(A)',2X,/)
0571 1636 FORMAT(5X,'TORRE O S/E FALLADA',4,F10.2,F10.2,2X))
0572 1646 FORMAT(15X,'ESTACION TERMINAL',13,4,F10.2,F10.2,2X))
0573 165 FORMAT(//2X,'HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE DE FALLA',//)
0574 170 FORMAT(//3X,'HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE EN LA S/E O TORRE FALLADA
1')//)
0575 175 FORMAT(//25X,'HISTOGRAMA DE LA ELEVACION DE VOLTAJE EN LA TORRE O
1S/E FALLADA',//)
0576 1750 FORMAT(//43X,'RESULTADOS EN FORMA DETERMINISTICA',43X,34(' *')/)
0577 180 FORMAT(//,37X,'HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE EN LA ESTACION',12//)
0578 185 FORMAT(//40X,'HISTOGRAMA DEL VOLTAJE EN LA ESTACION',12//)
0579 1885 FORMAT(//5X,110('---')//61X,'FORMA COMPLEJA',11X,'VALOR ABSOLUTO',61
1X,14('---')//11X,14('---')//5X,'CORRIENTE DE FALLA FASE A TIERRA (AMPER
210S)',5X,2F14.3,4X,F14.3//)
0580 1887 FORMAT(//10X,'DESCRIPCION',6X,'CORRIENTE DE FALLA EN:',5X,'VOLTA
1JE EN:',7X,'VOLTAJE DE TOQUE EN:',3X,'VOLTAJE DE PASO EN:',28X,4(
24X,'MODULO',2X,'ANGULO',4X)32X,'(A)',5X,'(GR)',3(11X,'(V)',3X,'
3(GR)')//,5X,'TORRE O S/E FALLADA',4,2X,2F10.2))
0581 1888 FORMAT(//5X,'ESTACION TERMINAL',13,4,2X,2F10.2))
0582 210 FORMAT(//5X,'CORRIENTE DE FALLA DE LA LINEA',13,' DE',13,9X,2F14.3,
14X,F14.3)

```

```

0583 270 FORMAT(//7,30X,'LINEA',4X,12,3X,'ENTRE LA ESTACION',4X,12,3X,'Y
1 LA TORRE J S/E FALLADA',30X,65I='')//5X,'LAZ0',4X,'CORRIENTE POR
2 TIERRA',5X,'CORRIENTE POR EL (L0S1)',3X,'CORRIENTE POR LAS TORRES',
3,3X,' ELEVACION DE VOLTAJE',41X,'CABLE(S) DE TIERRA',95X,'EN LAS
* TORRES',7,17X,'(A)'
4,23X,'(A)',24X,'(A)',24X,'(V)',//9X,416X,'MODULO',5X,'ANGULO',3X)/
5,9X,'(U,X,B1',-'),5X,6('),3X)//)
0584 275 FORMAT(5X,14,4X,F9.2,1X,F9.2,316X,F9.2,1X,F9.2))
0585 285 FORMAT(//30X,'RESULTADOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES EN FORMA PROB
1 ABILISTIC',30X,59I='')//)
0586 287 FORMAT(//5X,110('),//))
0587 WRITE (3,287)
0588 STOP
0589 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA CALCULAR EL FACTOR DE LA RESISTENCIA DE UNA REJILLA
C-----> EN UNA S/E U ESTACION TERMINAL
SUBROUTINE DATO1 (R1,A1,B1,D,D1,H,DM,FP,FT)
COMPLEX R1
SS = 0.
L = 0.
ST = 1.
DM = DM / 1000.
N1 = A1 / D + 1
M1 = B1 / D1 + 1
LT = N1 * B1 + M1 * A1
A2 = A1 ** 2 + B1 ** 2
AJ = (A1 + SORT(A2)) / B1
A4 = (M1 + SORT(A2)) / A1
A5 = ALOG(AJ) / A1 + ALUG(A4) / B1 + A1 / (3.*B1**2) + B1 / (3.*A1**2) - (A2 / (3.*A1
1 * 2 * B1 ** 2)) * SORT(A2)
K1 = (SORT(A1+B1) + 1.84*A5) / 2.
A6 = A1 ** 2 + (M1 ** 2) / 4.
A7 = (A1 + SORT(A6)) / (B1/2.)
A8 = (B1/2.) + SORT(A6) / (SORT(A6) - (B1/2.))
K2 = ALOG((A1+B1)*4.) / B1 + 2.*K1*(A1+B1) / SORT(A1*B1) - ALOG(A7) - ALOG(A8)
1/2.
R1 = (ALOG(2.*LT/SORT(DM*H)) + K1*LT/SORT(A1*B1) - K2) / (3.14*LT)
WRITE (3,2) A1,B1,D,D1,H,DM
AL = D1/2.
DO 4 J = 3,N1
4 SS = -SS + 1./J - 1.
AKS = 1./3.1416*(1./((2.*H) + 1./D + H) + SS/D)
DO 5 J = 3,N1
5 ST = ST * ((J-1.)*D + AL) / ((J-1.)*D
AKT = 1./6.2832*ALUG((H**2 + AL**2) * D + AL)**2 / (H*DM*D**2)) + ALOG(ST) / 3.
1/410
0028 3 X = N1**3 * 1./A1**1.25 * H**10./A1)
0029 IF (X-10.) D.O.7
0030 DEL = 0.155 * X
0031 GOTO 8
0032 7 DEL = 0.58 * X - 8.55
0033 8 AKT1 = 0.58 + 0.155 * N1 + DEL
0034 IF (L.EQ.1) GOTO 9
0035 AKS1 = (0.069*N1 + 0.556) * (1. + 0.49 * (1./A1 * H**2) - 0.005) * 0.33)
0036 IF (A1 < 0.01) GOTO 10
0037 TEMP = A1
0038 A1 = B1
0039 B1 = TEMP
0040 L = L + 1
0041 IF (L.EQ.1) GOTO 3
0042 9 AKT1 = AKT1 * (0.86 + 0.066 * (N1-2.) * 0.33)
0043 AKS1 = AKS1 * (1. + 0.149 * N1 / SORT(B1))
0044 10 FP = AKS * AKT1 / LT
0045 FF = AKT * AKT1 / LT
0046 2 FORMAT(' LONGITUD DEL LADO MAS CORTO DE LA REJILLA',9X,F10.3/' LON
IGITUD DEL LADO MAS LARGO DE LA REJILLA',9X,F10.3/' ESPACIAMIENTO
2 ENTRE CONDUCTORES PRINCIPALES',5X,F10.3/' ESPACIAMIENTO ENTRE CON
3DUCTORES SECUNDARIOS',7X,F10.3/' PROFUNDIDAD DE ENTIERRO DE LA RE-
4JILLA',12X,F10.3/' DIAMETRO DEL CONDUCTOR',28X,F10.3/'7X,'NOTA:
5 ESTOS VALORES ESTAN DADOS EN METROS'//)
0047 RETURN
0048 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA CALCULAR EL FACTOR DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA
C-----> DE LAS TORRES
SUBROUTINE DATO2 (R,VP,VT,ERROR)
READ(1,10) IAL,AL,S,H,RCUR,RAD,ALT,VTCUR,VPCUR
WRITE (3,12) IAL,AL,RAD,H,S,ALT,RCUR,VTCUR,VPCUR
CALL CUNTRI(2,IAL,0,0,AL,S,H,RCUR,RAD,ALT,ERROR)
GOTO (1,2,3,4,5) , IAL
1 R = (ALOG(2.*AL/RAD) - 1.) / (2.*3.1416 * AL)
GOTO 6
2 R = (ALOG(2.*AL/SORT(RAD*S))) / (2.*3.1416*AL)
GOTO 6
3 U = 1.0905 * (RAD*S**2)**0.25
R = (ALOG(2.*AL/U)) / (2.*3.1416*AL)
GOTO 6
4 U = SORT(4.*RAD*H)
R = (ALOG(2.*AL/U)) / (2.*3.1416*AL)
R = R / 4.
GOTO 6
5 R = 0.122 * RCUR / AL
6 VP = 0.000122 * VPCUR / ALT
VT = 0.000122 * VTCUR / ALT
10 FORMAT (2X,11,4(F9.3),4(F12.6))
12 FORMAT (//7,30X,'ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA',26X,11,/' LONGITUD
1 DE UNA VARILLA O UN CONDUCTOR (M)',6X,F10.2/' RADIO DE UNA VARI
2LLA O CONDUCTOR (M)',14X,F10.6/' PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M)',22X
3,F10.2/' SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M)',16X,F10.2/' LONGITU
4D/2 DE LA BASE DE LA TORRE (M)',11X,F10.2/' FACTOR DE LA RESIST
5ENCIA SEGUN CURVAS',12X,F10.2/' FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGU
6N CURVAS (V)',5X,F10.2/' FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS
7 (V)',6X,F10.2//)
0022 RETURN
0023 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA ENCONTRAR LOS PARAMETROS DE LA RED
0001 SUBROUTINE DATOJ (ZA,ZG,ZM,ERROR)
0002 COMPLEX Z1,Z2,Z3,Z4,ZGG,ZMAG,ZA,ZG,ZM,ZMGC
0003 I2 = 0
0004 READ(1,1) NCIR,RESA,XAA
0005 CALL CUNTK1 (7,NCIR,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,ERROR)
0006 WRITE(3,10) NCIR,RESA,XAA
0007 IF(NCIR.NE.0) GOTU 23
0008 A = RESA + 0.05928
0009 B = XAA
0010 COTU 4
0011 23 IF(NCIR.EQ.1) GOTU 24
0012 READ(1,3) XDAAP,XDABP,XDACP,XDBAP,XDBBP,XDBCP,XDCAP,XDCBP,XDCCP
0013 WRITE(3,35) XDAAP,XDABP,XDACP,XDBAP,XDBBP,XDBCP,XDCAP,XDCBP,XDCCP
0014 A = (RESA/2. + J.17784) / 3.
0015 XD = (XDAAP+XDABP+XDACP+XDBAP+XDBBP+XDBCP+XDCAP+XDCBP+XDCCP) / 9.
0016 B = (XAA/2. - 2.5 * XD) / 3.
0017 COTU 4
0018 24 READ(1,2) XDAB,XDAC,XDBC
0019 WRITE(3,35) XDAB,XDAC,XDBC
0020 A = (RESA + 0.17784) / 3.
0021 B = (XAA-2.*XDAB+XDACP+XDBC)/3.1/3.
0022 ZA = CMPLX(A,B)
C-----> IMPEDANCIA PROPRIA DEL(LOS) CONDUCTORES DE TIERRA
0023 READ(1,3) NG,RESG,XAG,XDGGP
0024 CALL CUNTK1 (7,NG,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,0.0,ERROR)
0025 WRITE(3,40) NG,RESG,XAG,XDGGP
0026 IF(NG.EQ.0) GOTU 13
0027 14 I2 = I2 + 1
0028 IF(NG.EQ.1) GOTU 6
0029 A = (1.5*RESG + 0.17784) / 3.
0030 B = (1.5 * XAG - 1.5 * XDGGP) / 3.
0031 GOTU 7
0032 6 A = (J. * RESG + 0.17784) / 3.
0033 B = (J. * XAG) / 3.
0034 7 ZGG = CMPLX(A,B)
C-----> IMPEDANCIA MUTUA ENTRE CONDUCTORES DE FASE Y DE TIERRA
0035 READ(1,8) XDAG,XDBG,XDCG,XDAGP,XDBGP,XDCGP,XDAPG,XDBPG,XDCPG,XDAPG
0036 IP,XDPPGP,XDCPPGP
0037 WRITE(3,50) XDAG,XDBG,XDCG,XDAGP,XDBGP,XDCGP,XDAPG,XDBPG,XDCPG,XDAPG
0038 XDPGP,XDPPGP,XDCPPGP
0039 IF(NCIR.NE.0) GOTU 26
0040 B = -XDAG
0041 GOTU 12
0042 26 IF(NCIR.EQ.1.AND.NG.EQ.1) GOTU 9
0043 IF(NCIR.EQ.1.AND.NG.EQ.2) GOTU 10
0044 IF(NCIR.EQ.2.AND.NG.EQ.1) GOTU 11
0045 B = (-0.25*(XDAG+XDBG+XDCG+XDAGP+XDBGP+XDCGP+XDAPG+XDBPG+XDCPG+XDA
0046 PGP+XDPGP+XDCPPGP))/3.
0047 GOTU 12
0048 9 B = (-XDAG-XDBG-XDCG)/3.
0049 GOTU 12
0050 10 B = (-0.5*(XDAG+XDBG+XDCG+XDAGP+XDBGP+XDCGP))/3.
0051 GOTU 12
0052 11 B = (-0.5*(XDAG+XDBG+XDCG+XDAPG+XDBPG+XDCPG))/3.
0053 12 ZMAG = CMPLX(0.05 , B)
C-----> PRESENCIA DE CONTRAPESOS(S)
0054 IF(I2.EQ.2) GOTU 15
0055 Z1 = ZGG
0056 Z2 = ZMAG
0057 N1 = NG
0058 13 READ(1,5) NG,RESG,XAG,XDGGP
0059 WRITE(3,45) NG,RESG,XAG,XDGGP
0060 IF(NG.NE.0) GOTU 14
0061 ZG = Z1
0062 Z4 = Z2
0063 RETURN
0064 15 Z3 = ZGG
0065 Z4 = ZMAG
0066 IF(NI.EQ.0) GOTU 19
0067 READ(1,10) XDGC,XDGPC
0068 WRITE(3,60) XDGC,XDGPC
0069 IF(NI.EQ.1) GOTU 17
0070 B = (-1.5*(XDGC+XDGPC))/3.
0071 GOTU 14
0072 17 B = (-J. + XDGC)/3.
0073 18 ZMGC = CMPLX(0.05928,B)
0074 ZG = (Z1+Z3-ZMGC+2) / (Z1+Z3-2.0*ZMGC)
0075 ZM = (Z2+(Z3-ZMGC)+Z4*(Z1-ZMGC)) / (Z1+Z3-2.0*ZMGC)

```

```

0073 RETURN
0074 19 ZG = Z3
0075 Z4 = Z4
0076 1 FORMAT (11,2F10.5)
0077 2 FORMAT (3F12.5)
0078 3 FORMAT (9F6.5)
0079 5 FORMAT (11,3F12.6)
0080 8 FORMAT (12F6.3)
0081 16 FORMAT(2F12.5)
0082 30 FORMAT (//, ' NUMERO DE CIRCUITOS',40X,11,/, ' RESISTENCIA DEL CONDUCTOR DE FASE (OHM/KM)',8X,F10.4/, ' REACTANCIA INDUCTIVA XAA (OHM/KM 2)',17X,F10.4,/)
0083 35 FORMAT(//, ' FACTORES DE SEPARACION ENTRE CONDUCTORES DE UN CIRCUITO 1(OHM/KM)',//, ' XDAU = ',F12.4,3X, ' XDAC = ',F12.4,3X, ' XDBC = ',F12.4,3X,/)
0084 40 FORMAT (//, ' NUMERO DE CABLES DE GUARDIA',42X,12,/, ' RESISTENCIA DE 1(LOS) CABLE(S) DE GUARDIA (OHM/KM)',12X,F10.4,/, ' REACTANCIA INDUCTIVA XAG (OHM/KM)',28X,F10.4,/, ' FACTOR DE SEPARACION ENTRE 2 CABLES DE GUARDIA (OHM/KM)',6X,F10.4,/)
0085 45 FORMAT (//, ' NUMERO DE CONDUCTORES CONTRAPESOS',36X,12,/, ' RESISTENCIA DE 1(LOS) CONTRAPESOS (OHM-KM)',19X,F10.4,/, ' REACTANCIA INDUCTIVA XAG (OHM-KM)',29X,F10.4,/, ' FACTOR DE SEPARACION ENTRE DOS CONTRAPESOS (OHM-KM)',11X,F10.4,/)
0086 50 FORMAT (//, ' FACTORES DE SEPARACION ENTRE CONDUCTOR DE FASE Y DE TIERRA 1A (OHM/KM)',//, ' XDAG = ',F12.4,3X, ' XDBG = ',F12.4,3X, ' XDCG = ',F12.4,3X,/, ' XDAGP = ',F12.4,3X, ' XDBGP = ',F12.4,3X, ' XDCGP = ',F12.4,3X,/, ' XDAPG = ',F12.4,3X, ' XDBPG = ',F12.4,3X, ' XDCPG = ',F12.4,3X,/, ' XDPGP = ',F12.4,3X, ' XDCPPGP = ',F12.4,3X,/)
0087 55 FORMAT(//, ' FACTORES DE SEPARACION ENTRE CONDUCTORES DE 1 CIRCUITOS 1(OHM/KM)',//, ' XDAAP = ',F12.4,3X, ' XDABP = ',F12.4,3X, ' XDACP = ',F12.4,3X,/, ' XDBAP = ',F12.4,3X, ' XDBBP = ',F12.4,3X, ' XDBCP = ',F12.4,3X,/, ' XDCAP = ',F12.4,3X, ' XDCBP = ',F12.4,3X, ' XDCCP = ',F12.4,3X,/)
0088 60 FORMAT (//, ' FACTORES DE SEPARACION ENTRE CABLES DE GUARDIA Y CONTRAPESOS (OHM/KM)',//, ' XDGC = ',F12.4,3X, ' XDGPC = ',F12.4,3X,/)
0089 RETURN
0090 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA CLASIFICAR UN NUMERO EN CATEGORIAS
0001 SUBROUTINE SORT(Z,M,AMIN,AMAX)
0002 DIMENSION M(10)
0003 IF(Z-AMIN)1,1,2
0004 *WRITE(3,100) Z
0005 M(I) = M(I) + 1
0006 RETURN
0007 2 IF(Z-AMAX) 3,4,3
0008 3 *WRITE (3,100) Z
0009 M(I) = M(I) + 1
0010 RETURN
0011 4 M(I) = M(I) + 1
0012 RETURN
0013 5 K = 10.*(Z-AMIN)/(AMAX-AMIN) + 1.
0014 M(K) = M(K) + 1
0015 RETURN
0016 100 FORMAT(' DATU',E15.4,'FUERA DE LIMITES ESPECIFICADOS')
0017 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA DIBUJAR LOS HISTOGRAMAS
0001 SUBROUTINE HIST(M,MAX,AMIN,AMAX)
0002 DIMENSION M(10),COL(10),X(11)
0003 DATA BL/' /,ST/'***/
0004 MXX = MAX
0005 IF(MAX.GT.0) GOTO 2
0006 DO 1 I = 1,10
0007 1 IF(M(I).LT.MXX) MXX=M(I)
0008 2 N = (MXX-1)/B+1
0009 MXX = N*B
0010 *WRITE(3,104) (M(I),I=1,10)
0011 *WRITE (3,100)
0012 DO 15 I = 1,10
0013 K = MXX - (I - 1) * N/S
0014 DO 9 J = 1,10
0015 IF(K-M(J)) 7,7,8
0016 7 COL(J) = ST
0017 GOTO 9
0018 8 COL(J) = BL
0019 9 CONTINUE
0020 IF(((1+4)/5)*5-1-4) 10,11,11
0021 *WRITE (3,101) (COL(L),L=1,10)
0022 GOTO 15
0023 11 *WRITE (3,102) K,(COL(L),L=1,10)
0024 15 CONTINUE
0025 *WRITE (3,100)
0026 DELT = (AMAX - AMIN )/10.
0027 DO 20 J = 1, 11
0028 X(J) = AMIN + (J-1) * DELT
0029 *WRITE(3,103) (X(I),I=1,11)
0030 RETURN
0031 100 FORMAT(19X,81(' '))
0032 101 FORMAT (19X,'|',10(2X,A3,2X,'|'))
0033 102 FORMAT(14X,13,2X,'|',10(2X,A3,2X,'|'))
0034 103 FORMAT(14X,11(1X,F7.1)/)
0035 104 FORMAT (21X,10(14,4X))
0036 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA INVERTIR UNA MATRIZ
0001 SUBROUTINE INVER (ZDATOS,NFILAS)
0002 COMPLEX A,ZDATOS
0003 DIMENSION A(13,13) , ZDATOS(13,13)
0004 DO 10 I = 1,NFILAS
0005 DO 10 J = 1,NFILAS
0006 10 A(I,J) = ZDATOS(I,J)
0007 DO 30 I = 1,NFILAS
0008 DO 30 J = 1,NFILAS
0009 IF(J.EQ.1) GOTO 30
0010 A(I,J) = A(I,J)/A(I,1)
0011 30 CONTINUE
0012 A(1,1) = 1./A(1,1)
0013 DO 20 K = 1,NFILAS
0014 IF(K.EQ.1) GOTO 20
0015 DO 25 L = 1,NFILAS
0016 IF(L.EQ.1) GOTO 25
0017 A(K,L) = A(K,L) - A(1,L) * A(K,1)
0018 25 CONTINUE
0019 20 CONTINUE
0020 DO 40 K = 1,NFILAS
0021 IF(K.EQ.1) GOTO 40
0022 A(K,1) = - A(K,1) * A(1,1)
0023 40 CONTINUE
0024 RETURN
0025 END

```

```

C-----> SUBROUTINA PARA MULTIPLICAR DOS MATRICES
0001 SUBROUTINE MULT (P,C,R,NF1,NC,NZ)
0002 COMPLEX P(13,13),C(13,1),R(13,1)
0003 DO 10 I = 1,NF1
0004 DO 10 J = 1,NC2
0005 R(I,J) = 0.
0006 DO 10 K = 1,NC
0007 10 R(I,J) = R(I,J) + P(I,K) * C(K,J)
0008 RETURN
0009 END

```

```
0001 SUBROUTINE CONTRI (N,11,12,13,14,15,16,17,18,19,20,21,22,23,24,25,26,27,28,29,30,31,32,33,34,35,36,37,38,39,40,41,42,43,44,45,46,47,48,49,50,51,52,53,54,55,56,57,58,59,60,61,62,63,64,65,66,67,68,69,70,71,72,73,74,75,76,77,78,79,80,81,82,83,84,85,86,87,88,89,90,91,92,93,94,95,96,97,98,99,100)
0002 COMMON /KAYUK/
0003 IERRUK = 0
0004 GOTO (1,2,3,4,5,6,7) , N
0005 1 IF(11.GT.200.OR.12.GT.4) GOTO 10
0006 IF(13.GT.500.OR.14.LE.0.) GOTO 10
0007 RETURN
0008 10 IERRUK = IERRUK + 1
0009 WRITE(1,20)
0010 20 FORMAT('1',///,5X,'EXISTE ERROR EN DATOS GENERALES DE ENTRADA(1)00
10011 RETURN
0012 2 IF(11.LE.10.OR.12.LT.0.) GOTO 30
0013 IF(13.LT.0.OR.14.LE.0.) GOTO 30
0014 IF(15.LT.0.OR.16.LT.0.) GOTO 30
0015 RETURN
0016 30 IERRUK = IERRUK + 1
0017 WRITE(1,30)
0018 40 FORMAT('1',///,5X,'EXISTE ERROR EN DATOS DE ENTRADA DE LAS REJILLA
15 DE PUJILLA A TIERRA',5X,'DE SUBESTACIONES O ESTACIONES TERMINALE
25 (BLOQUE 2-A J 4-B)',5X,' O EN LAS PUESTA A TIERRA DE LAS TORRE
35 (BLOQUE 2-B J 7)',5X,///)
0019 3 IF(11.LT.0.OR.12.LT.0.) GOTO 50
0020 IF(13.GT.41) GOTO 50
0021 GOTO 200
0022 50 IERRUK = IERRUK + 1
0023 WRITE(1,50)
0024 60 FORMAT('1',///,5X,'EXISTE ERROR EN DATOS DE ENTRADA DE RESISTIVIDA
10 PUJILLA J DESV. STAND.',5X,'DE LA TORRE O S/E FALLADA (BLOQUE 3)
2 3',5X,'DEL CADA ZONA DE LA LINEA (BLOQUE 6)',5X,///)
0025 RETURN
0026 4 IF(11.GT.2) GOTO 50
0027 GOTO 3
0028 5 IF(11.LT.NKAYUK,12.GT.5) GOTO 70
0029 RETURN
0030 70 IERRUK = IERRUK + 1
0031 WRITE(1,70)
0032 80 FORMAT('1',///,5X,'EXISTE ERROR EN DATOS DE ENTRADA DE CADA LINEA'
17,5X,'O NUMERO DE TORRES O DE ZONAS SE EXECE DEL LIMITE ESPECIFICAD
20 (BLOQUE 5)',5X,///)
0033 6 IF(11.GT.NKAYUK) GOTO 50
0034 GOTO 3
0035 7 IF(11.GT.2) GOTO 50
0036 RETURN
0037 90 IERRUK = IERRUK + 1
0038 WRITE(1,90)
0039 100 FORMAT('1',///,5X,'EXISTE ERROR EN: NUMERO DE CIRCUITOS PARALELOS'
17,5X,'O NUMERO DE CONDUCTORES DE TIERRA QUE EXECE EL LIMITE ESPEC
21 (BLOQUE 3)',5X,///)
0040 200 RETURN
0041 END
```

A N E X O B

MANUAL DE USO DEL PROGRAMA DIGITAL

B.1. OBJETIVO

Calcula la magnitud y distribución de la corriente de falla a tierra en una red de puesta a tierra de un sistema de potencia, adicionalmente, calcula los voltajes peligrosos en la red considerando todos los elementos y parámetros que la conforman que se incluye en el cálculo del programa. El análisis de la red se lo realiza tanto en forma determinística como en forma probabilística, en esta última forma de cálculo, se emplea el método de Monte-Carlo encaminado a tratar a la resistividad del suelo como una variable aleatoria distribuída normalmente.

B.2. METODO DE SOLUCION

El método empleado en el análisis de redes de puesta a tierra se denomina de Eliminación de doble lado que se basa en la aplicación de las leyes de Kirchoof, partiendo del planteamiento de las ecuaciones de lazo que conforman la red, siguiendo un proceso inductivo de tal manera de dejar todas las corrientes de lazo en función de la corriente de falla total, de la

corriente que entra en la torre o subestación fallada, de las corrientes en cada una de las estaciones terminales y de las corrientes de falla en cada línea de la red, de esta manera se llega a plantear un sistema de ecuaciones relativamente pequeño, capaz de poderlo resolver fácilmente por medio del computador y, finalmente, por simple reemplazo se calculan todas las corrientes de lazo de la red.

En lo referente al cálculo de las resistencias de puesta a tierra de subestaciones o estaciones terminales (generadoras), así como, al cálculo de los voltajes peligrosos de la red, se sigue la metodología descrita en las Referencias R-9.

B.3. DESCRIPCION DEL PROGRAMA

El programa consta de su parte principal y nueve subrutinas. El detalle del programa se lo menciona en el Anexo A.

B.4. NOMENCLATURA

B.4.1. VARIABLES DE ENTRADA

SIMBOLO	DESCRIPCION
AL	Longitud de varillas o contrapesos en las puestas a tierra de las torres de transmisión, en m.

- ~~X~~ ALT lado de la base ($\div 2$) de una torre de transmisión, en m.
- A1 longitud del lado más corto de una rejilla de puesta a tierra de estaciones o subestaciones, en m.
- B1 longitud del lado más largo de una rejilla en subestaciones o estaciones terminales, en m.
- COTA separación entre dos torres ^{Postes}adyacentes, en m.
- D separación entre conductores principales en una rejilla de puesta a tierra, en m.
- DM diámetro del conductor utilizado en las rejillas de puesta a tierra, en mm.
- D1 separación entre conductores secundarios en una rejilla de puesta a tierra, en m.
- H profundidad de entierro de las puestas a tierra en subestaciones o en torres de transmisión, en m.
- IAL alternativa (entre 5) ⁶del tipo de puesta a tierra de las torres de transmisión
- ²¹⁰ ~~X~~ ICOR Número de muestreos de la resistividad, que se desee realizar (menos de 200)
- IND4 Indicador. $\neq 0$ Resultados en forma determinística (valores extremos y promedio)
- IND1 Indicador. 0 la falla ocurre en una subestación caso contrario la falla ocurre en una torre
- ² ~~X~~ IND3 indicador. 0 análisis probabilístico, $\neq 0$ análisis determinístico únicamente
- IP = 1 número de estaciones terminales que conectan al punto de falla
- ² ~~X~~ IRH00 semilla de la resistividad del terreno en el punto de falla
- ~~X~~ IRHOK(4) Semilla de la resistividad en cada estación terminal
- ~~X~~ IRHOZ(4, 2,500) semilla de la resistividad en cada zona a lo largo de una línea
NOTA: las semillas son cualquier número entero impar menor o igual a 9 dígitos
- MK(4) / número de líneas de transmisión (o fases) que unen una estación terminal con la falla (1 o 2)

N(4,2)	Número de torres en una línea
NCIR = 1	número de circuitos paralelos (1 o 2) entre una estación terminal y la <u>loca</u> <u>lización</u> de la falla
NG = 0 : 1	número de cables de guardia y/o <u>contra</u> <u>pesos</u> (1 o 2)
* NMAJOR	número mayor de torres, comparando todas las líneas
* NT(4,2,5)	número de torres en cada zona de una línea
* NZ (4,2)	número de zonas de distinta <u>resistivi</u> <u>dad</u> en una línea de transmisión
RAD	radio de una varilla en puestas a <u>tie</u> <u>rra</u> de torres, en m.
RC	parte resistiva de una carga en el <u>pun</u> <u>to</u> de falla, en ohms
X RCUR	resistencia de puesta a tierra de to- rres tipo enrejado, (cuando IAL=5) <u>se</u> <u>gún</u> curvas universales, en ohm
RESA	resistencia del conductor de fase fa- llado, en ohm/Km
RESG	resistencia de los conductores de <u>tie</u> <u>rra</u> , en ohm/Km
RHOON	resistividad media del terreno en el punto de falla en ohm-m
RHOKN(4)	resistividad media del terreno en la ubicación de las estaciones terminales, en ohm-m
* RHOZN(4,2,500)	resistividad media del terreno en cada zona de una línea, en ohm-m
S	separación entre dos varillas contiguas, en puestas a tierra de torres, en m.
SRHOO	desviación standard de la resistividad media en el punto de falla, en ohm-m
SRHOK(4)	desviación standard de la resistividad media en cada estación terminal, en ohm-m
SRHOZ(4,2,500)	desviación standard de la resistividad media en cada zona de una línea, en ohm-m
VF(4,2)	voltaje fase-neutro de cada línea <u>conec</u> <u>tada</u> al punto de falla, en V.
VPCUR	voltaje de paso en torres, según <u>cur</u> <u>vas</u> , en V.
VTCUR	voltaje de toque en torres, según <u>cur</u> <u>vas</u> , en V

SERIA
DATO ←

R

R

R

XAA	Término de la reactancia inductiva de los conductores de fase, según tablas, en ohm/Km
XAG	término de la reactancia inductiva de los conductores de tierra, según tablas, en ohm/Km
XC	parte inductiva de una carga en el punto de falla, en ohms
XD	factores de separación de la reactancia inductiva entre conductores de fase de un circuito trifásico, entre dos circuitos trifásicos , entre circuito (S) y conductor (es) de tierra, en ohm/Km (A,B, C,AP,BP,CP,G,GP son las denominaciones de los conductores de fase y de tierra).

SCA
MTO

B.4.2. VARIABLES DE SALIDA

SIMBOLO	DESCRIPCION
AIF(4,2)	corriente de falla a tierra que circula por cada línea, en A.
AIFALL	corriente de falla a tierra total, en A.
DESAI(4)	desviación standard de la corriente de falla que retorna a cada estación terminal, en A.
DESAIF	desviación standard de la corriente de falla total, en A.
DESIO	desviación standard de la corriente de falla que ingresa en la torre o S/E fallada, en A.
DESVO	desviación standard de la elevación de voltaje en la torre o S/E fallada, en V.
DESVP(4)	desviación standard del voltaje de paso en cada estación terminal, en V
DESVPO	desviación standard del voltaje de paso en la torre o subestación fallada, en V
DESVT(4)	desviación standard del voltaje de toque en cada estación terminal, en V
DESVTO	desviación standard del voltaje de toque en la torre o subestación fallada, en V

DESVV(4)	desviación standard de la elevación del voltaje en cada estación terminal, en V
EAAI	módulo de la corriente de falla que circula por tierra en cada lazo de <u>ca</u> da línea, en A
EAAIG	Angulo de la corriente de falla que circula por tierra en cada lazo de <u>ca</u> da línea, en A
EAIIF	módulo de la corriente de falla que circula por cada línea, en A
EAIG	módulo de la corriente de falla por el(los)conductor(es) de tierra en ca da lazo de cada línea, en A
EAIGG	Angulo de la corriente de falla por el(los) conductor(es) de tierra en <u>ca</u> da lazo de cada línea, en A
EAIK	módulo de la corriente de falla que <u>re</u> torna a cada estación terminal, en A
EAIKG	ángulo de la corriente de falla que <u>re</u> torna a cada estación terminal, en A
EAIT	módulo de las corrientes de falla por las torres de cada línea, en A
EAITG	ángulo de las corrientes de falla por las torres de cada línea, en A
EFALL	módulo de la corriente de falla a <u>tie</u> rra total, en A
EVPO	módulo del voltaje de toque en la to rre o S/E fallada, en V
EVPOG	ángulo del voltaje de paso en la torre o S/E fallada, en V
EVPK	módulo del voltaje de paso en cada <u>es</u> tación terminal, en V
EVPKG	ángulo del voltaje de paso en cada <u>es</u> tación terminal, en V
EVTO	módulo del voltaje de toque en la to rre ^o S/E fallada, en V
EVTOG	ángulo del voltaje de toque en la to rre o S/E fallada, en V
EVTK	módulo del voltaje de toque en cada <u>es</u> tación terminal, en V
EVTKG	ángulo del voltaje de toque en cada <u>es</u> tación terminal, en V
EVW	módulo de la elevación de voltaje en las torres de cada línea, en V
EVWG	ángulo de la elevación de voltaje en las torres de cada línea, en V

EVVK	módulo de la elevación de voltaje en cada estación terminal, en V
EVVKG	ángulo de la elevación de voltaje en cada estación terminal, en V
MAIF(10)	vector del módulo de la corriente de falla a tierra total a ser dibujado
MAI1(10)	vectores a ser dibujados, de las corrientes de falla que retornan a cada estación terminal (4 en total)
MAI2(10)	
MAI3(10)	
MAI4(10)	
MIO(10)	vector de la corriente de falla que entra en la torre o S/E fallado, a ser dibujado
MVO(10)	vector de la elevación de voltaje en la torre o subestación fallada, a ser dibujado
MVV1(10)	vectores a ser dibujados, de las elevaciones de voltaje en cada estación terminal
MVV2(10)	
MVV3(10)	
MVV4(10)	
SAI(4)	valor medio de la corriente de falla que retorna a cada estación terminal, en A
SAIF	valor medio de la corriente de falla a tierra total, en A
SIO	valor medio de la corriente de falla a tierra que entra en la torre o S/E fallada, en A
SVO	valor medio de la elevación de voltaje en la torre o S/E fallada, en V
SVP(4)	valor medio del voltaje de paso en cada estación terminal, en V
SVPO	valor medio del voltaje de paso en la torre o S/E fallada, en V
SVT(4)	valor medio del voltaje de toque en cada estación terminal, en V
SVTO	valor medio del voltaje de toque en la torre o S/E fallada, en V
SVV(4)	valor medio de la elevación de voltaje en cada estación terminal, en V
RO	resistencia de puesta a tierra de la torre o S/E fallada, en ohms
RT(4)	resistencia de puesta a tierra en cada estación terminal, en ohms
RZ(4,2,5)	resistencia de puesta a tierra de las torres en cada zona de distinta resistividad de cada línea, en ohms

ZAZ(4,2,5) impedancia del conductor de fase fallado, entre dos torres adyacentes, en ohms
ZGZ(4,2,5) impedancia del(los) conductor(res) de tierra entre dos torres adyacentes, en ohms
ZMZ(4,2,5) impedancia mutua entre conductores de fase y de tierra en cada sección (separación entre torres adyacentes) en ohms

B.5. FORMA DE PROPORCIONAR DATOS AL PROGRAMA

BLOQUE 1: Datos Generales (1 tarjeta)

variables: IND1, ICOR, IP, COTA, NMAYOR,
IND3, IND4

Formato: 2X, I1, I5, I2, F6.3, I5, I1,
I1

BLOQUE 2: a) Si IND1=0 => Datos de la rejilla de la S/E fallada (1 tarjeta)

variables: A1(m), B1(m), D(m), D1(m), H(m),
DM(mm)

formato : 6 F 12.4

b) Si IND1 ≠ 0 => Datos de la puesta a tierra de la torre fallada (1 tarjeta)

variable: IAL, AL(m), S(m), H(m), RCUR
(ohm), RAD(m), ALT(m), VTCUR(V),
VPCUR(V)

formato : 2X, I1, 4F6.3, 4F12.6

BLOQUE 3: Datos de la resistividad del suelo de la torre o S/E fallada (1 tarjeta)

variables: IRHOO, RHOON, SRHOO

formato : I9, 2F12.4

BLOQUE 4: Datos de las estaciones terminales

a) Resistividad del terreno (2 estaciones por tarjeta)

variables: MK(1), IRHOK(1), RHOKN(1), SRHOK(1),
MK(2), IRHOK(2), RHOKN(2), SRHOK(2),
MK(3), IRHOK(3), RHOKN(3), SRHOK(3),
MK(4), IRHOK(4), RHOKN(4), SRHOK(4)

formato: 4(2X, I1, I9, 2F12.4, 4X)

b) Rejillas de puesta a tierra (1 estación por tarjeta)

variables: A1(m), B1(m), D(m1), D1(m), H(m),
DM(m)

formato : 6F12.4

BLOQUE 5: Datos de las líneas que unen cada estación terminal con la torre o S/E fallada (una tarjeta por cada estación terminal)

variables: N(1,1), NZ(1,1), VF(1,1).(V),
N(1,2), NZ(1,2), VF(1,2).(V)

formato: 2(2X, 2I4, 2F12.4)

BLOQUE 6: Datos de las zonas de distinta resistividad, de las líneas a cada estación terminal (1 tarjeta por cada zona), (se comienza contando las zonas desde el lugar de la falla hacia cada estación terminal).

variables: NT(1,1,1), IRHOZ(1,1,1), RHOZN
(1,1,1,), SRHOZ(1,1,1), RC, XC

formato: I5, I9, 4F12.4

BLOQUE 7: Datos de la puesta a tierra de las torres en cada zona de cada línea de cada estación terminal (1 zona por tarjeta)

variables: IAL, AL(m), S(m), H(m), RCUR(ohm),
RAD(m), ALT(m), VTCUR(V), VPCUR(V)

formato: 2X, I1, 4F6.3, 4F12.6

BLOQUE 8: Datos de la(s) línea(s) de transmisión y conductor(es) de tierra (de cada línea de cada terminal)

a) Conductores de fase (dos tarjetas)

variables: NCIR, RESA(ohm/Km), XAA(ohm/Km),
Si NCIR=0, se trata de un circuito monofásico, ir a b)

formato: I1, 1F10.2

a.1.) Si NCIR = 1

variables: XDAB, XDAC, XDBC, (ohm/km)

formato: 3F12.5

a.2.) Si NCIR = 2

variables: XDAAP, XDABP, XDACP, XDBAP,
XDBBP, XDBCP, XDCAP, XDCBP,
(ohm/Km)

formato: 9F8.5

b) Conductor(es) de tierra (cables de
guardia o contrapesos) (una tarjeta)

variables: NG, RESG, XAG, XDGGP (ohm/Km)

formato : I1, 3F12.6

c) Impedancia mutua (una tarjeta)

variables: XDAG, XDBG, XDCG, XDAGP, XDBGP,
XDCGP, XDAPG, XDBPG, XDCPG,
XDAPGP, XDBPGP, XDCPGP. (ohm/Km)

formato : 12F 6.3

d) Contrapeso(s) (una tarjeta)

variables: NG, RESG, XAG, XDGGP (ohm/Km)

formato : I1, 3F12.6

e) Si $NG \neq 0$ una tarjeta adicional (caso
contrario NO)

variables: XDGC, XDGPC (ohm/Km)

formato: 2F12.6

NOTA: se adjunta, en hoja de codificación en forma sintetizada, la forma de proporcionar datos al programa.

B.6. FORMA DE UTILIZAR EL PROGRAMA GRABADO EN DISCO Y EN CINTA

B.6.1. TARJETAS DE CONTROL PARA UTILIZAR EL PROGRAMA CON EL DISCO

Ver hoja de codificación

B.6.2. TARJETAS DE CONTROL PARA UTILIZAR EL PROGRAMA CON LA CINTA

Ver hoja de codificación

B.7. RESTRICCIONES

- a) Se analiza una red de tierra de un S.E.P. de máximo 4 estaciones generadoras (terminales) que conectan al punto de falla, con un máximo de 2 líneas de transmisión a cada estación terminal y un máximo de dos grupos de conductores de tierra, cada grupo con máximo 2 conductores.
- b) Las líneas de transmisión pueden tener un máximo de 499 torres puestas a tierra y se asume una separación constante entre dos torres adyacentes (vano medio).

- c) El número de muestreos de resistividad del terre no puede ser máximo 200, debido al excesivo tiem po de ejecución que emplea el programa en la ge- neración de resistividades.

- d) Se calcula únicamente en forma determinística las corrientes de lazo y los voltajes en las torres, obteniendo salidas para los valores extremos de la resistividad del terreno y para el valor medio. Mientras que en la torre o S/E fallada y en las estaciones terminales el cálculo de corrientes y voltajes peligrosos se lo realiza tanto en for- ma probabilística como en forma determinística.

B.8. EJEMPLO DE APLICACION

Análisis de la red de puesta a tierra de la línea de transmisión Milagro-Machala.

Características:

Voltaje	^{23 KV} 230 KV, simple circuito, 1 ca- ble de guardia
Longitud	^{14.7} 12.8 Km.
→ Conductor	Parakeet de 556.5 Kcmil Peso por metro 1.067 Kg/m Area 318.67 m m ²
→ Cable de guardia	3/8" de acero de alta resistencia Peso por metro 0.406 Kg/m
Vano medio	400 m ≈ 0 m
Configuración	Ver Fig. B.1.

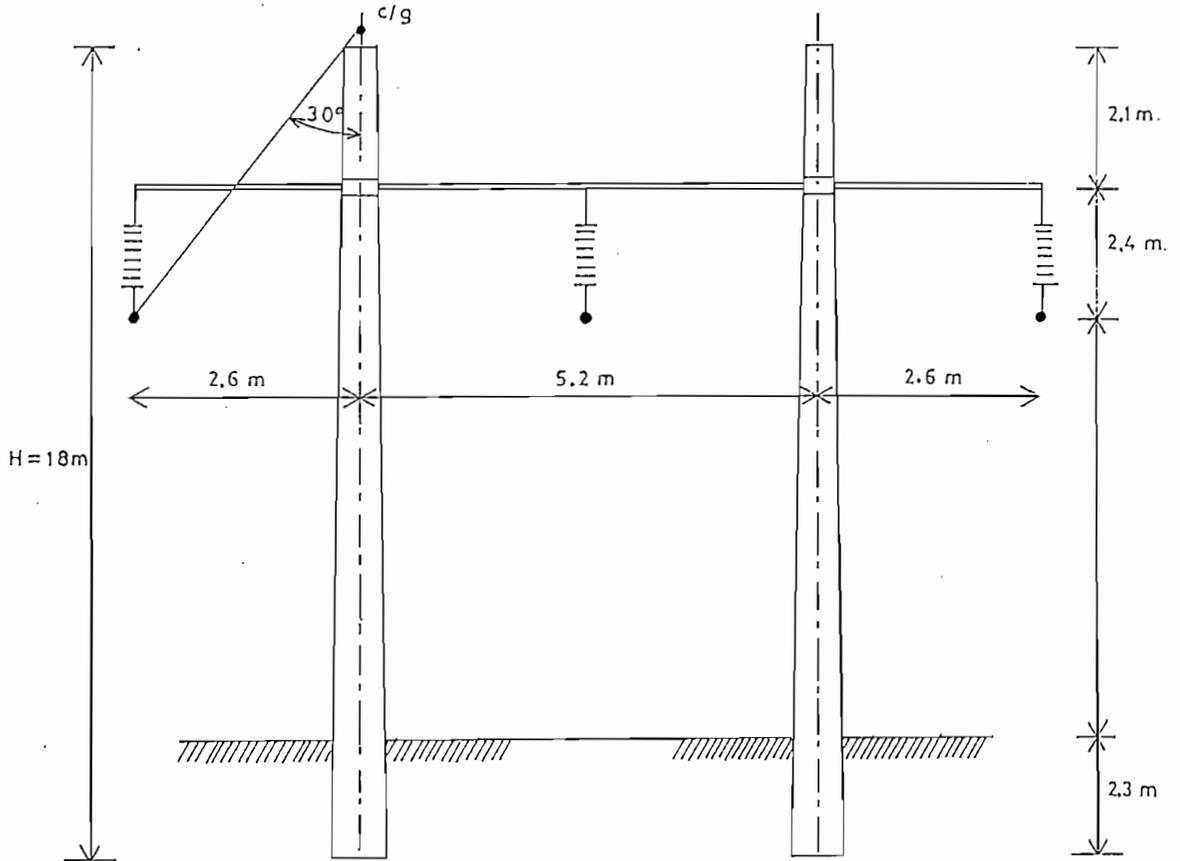


FIG. B 1. CONFIGURACION GEOMETRICA DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA

		FORMA DE PROPORCIONAR LOS DATOS AL PROGRAMA			
1.	DATOS GENERALES (1 Tarjeta)				
IND1	ICOR IP COTA(Km) NMAXOR IND3 IND4				
[1]	15	12	F 6.3	15	[1][1]
2. a).	SI IND1=0 DATOS DE LA REJILLA DE LA S/E FALLADA (1 TARJETA)				
A1 (m)	B1 (m)	D (m)	D1 (m)	H (m)	DM (mm)
F12.4	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4
b.	SI IND1≠0 DATOS DE LA PUESTA A TIERRA DE LA TORRE FALLADA (1 Tarjeta)				
AL (m)	S (m)	H (m)	RCUR.	RAD (m)	ALT (m)
[1]	F 6.3	F 6.3	F 6.3	F12.6	F12.6
3.	DATOS DE RESISTIVIDAD DE LA TORRE 0, S/E FALLADA (1 TARJETA)				
IRH00	RH00N(OHM-M)	SRH00(OHM-M)			
19	F12.4	F12.4			
4.	DATOS DE LAS ESTACIONES TERMINALES				
q)	RESISTIVIDAD (2 Estaciones por tarjeta)				
MK(1)	IRHOK (1)	RHOKN (1)	SRHOK (1)	RHOK (2)	SRHOK (2)
		(ohm-m)	(ohm-m)	(ohm-m)	(ohm-m)
[1]	19	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4

b) REJILLAS DE PUESTA A TIERRA (una Estación por tarjeta)

A1 (m) B1 (m) D (m) D1 (m) H (m) DM (mm)

F12.4	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4
-------	-------	-------	-------	-------	-------

5. DATOS DE LAS LINEAS ENTRE CADA EST. TERMINAL Y EL PUNTO DE FALLA

(una tarjeta por cada estación terminal)

N(1,1) NZ(1,1) VF(1,1) (V) N(1,2) NZ(1,2) VF(1,2) (V)

14	14	F12.4	14	14	F12.4	F12.4
----	----	-------	----	----	-------	-------

6. DATOS DE LAS ZONAS DE C/U DE LAS LINEAS ENTRE CADA ESTACION TERMINAL Y LA TORRE O S/E. FALLADA (1 tarjeta por zona de cada línea)

NT(K,J,I) IRHOZ(K,J,I) RHOZN(K,J,I) SRHOZ(K,J,I) RC(K,J,I) XC(K,J,I) (ohm-m) (ohm-m) (ohm) (ohm)

K=1,IP
J=1,MK(K)
I=1,NZ(K,J)

15	19	F12.4	F12.4	F12.4	F12.4
----	----	-------	-------	-------	-------

7. DATOS DE LAS PUESTAS A TIERRA DE LAS TORRES EN CADA ZONA DE CADA LINEA DE CADA ESTACION TERMINAL (1 tarjeta por zona)

IAL AL(m) S(m) H(m) RCUR(Ω) RAD(m) ALT(m) VTCUR(V) VPCUR(V)

11	F6.3	F6.3	F6.3	F12.6	F12.6	F12.6
----	------	------	------	-------	-------	-------

8. DATOS DE LOS CONDUCTORES DE FASE Y DE TIERRA

(PARA CADA LINEA ENTRE CADA EST. TERMINAL Y EL LUGAR DE LA FALLA)

1	10	20	30	40	50	60	70
---	----	----	----	----	----	----	----

d). CONDUCTORES CONTRAPESOS (una tarjeta)

NG RESG XAG XDGGP
(ohm/Km) (ohm/Km) (ohm/Km)

F12.6	F12.6	F12.6
-------	-------	-------

e). SI NG ≠ 0 (PRESENCIA DE CABLES DE GUARDIA Y CONTRAPESOS) (una tarjeta adicional)

XDGC XDGCP
(ohm/Km) (ohm/Km)

F12.6	F12.4
-------	-------

1	10	20	30	37
---	----	----	----	----

TARJETAS DE CONTROL PARA UTILIZAR EL PROGRAMA CON EL DISCO

```
// JOB
// DLBL IJYSCL,'PROGRAMAS DE ELECTRICA'
// ASSGN SYSCLB,X'160'
// EXEC
```

[Datos

```
/*
/ &
x $ $ EOJ
ASSGN SYSCLB,UA
```

TARJETAS DE CONTROL PARA UTILIZAR EL PROGRAMA CON LA CINTA

```
// JOB
// PAUSE OPERADOR CARGAR LA CINTA DE ELECTRICA N
// MTC FSF,X'280'
// ASSGN SYSIPT,X'280'
// OPTION LINK,NOLIST
// ACTION CANCEL,NOMAP
// EXEC,FFORTRAN
// EXEC,LNKEDT
// ASSGN SYSIPT,X'00C'
// EXEC
```

[Datos

```
/*
/ &
MTC REW,X'280'
* $ $ EOJ
```

EJEMPLO DE APLICACION * RED DE TIERRA DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA *

1. DATOS GENERALES

200	1	.4	320
-----	---	----	-----

2. DATOS DE LA REJILLA DE LA S/E FALLADA (MACHALA)

109.	124.	10.	.6	10.5156
------	------	-----	----	---------

3. DATOS DE RESISTIVIDAD DE LA S/E FALLADA

6999	110.	35.
------	------	-----

4: DATOS DE LA ESTACION TERMINAL (MILAGRO)

1	6321	50.	12.
---	------	-----	-----

190.	275.	60.	17.	.6	10.5156
------	------	-----	-----	----	---------

5. DATOS DE LA LINEA MILAGRO-MACHALA

320	5	132790.5619
-----	---	-------------

6. DATOS DE C/U DE LAS ZONAS DE LA LINEA

86	6321	50.	12.	.		
120	1457	110.	25.	1		
44	9355	900.	230.			
43	4743	180.	40.			
10	20	30	40	50	60	70

27	6949	110.	35.
----	------	------	-----

7. DATOS DE LAS PUESTAS A TIERRA DE LAS TORRES EN CADA ZONA

2	3.28	9.9	.6	.0077851	3.5
3	3.28	7.	.6	.0077851	3.5
4	50.		.6	.0035179	3.5
4	10.		.6	.0035179	3.5
3	3.28	7.	.6	.0077851	3.5

8. DATOS DE LA LINEA DE TRANSMISION Y CABLE DE GUARDIA

1	.11125	.25792
	.21367	.26594
1	4.101927	1.223555
	.2137	.2552

1	10	20	30	40	50	60	70
---	----	----	----	----	----	----	----

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

DEPARTAMENTO DE POTENCIA

TESIS DE GRADO

MÉTODO DE MONTE CARLO APLICADO AL ANÁLISIS DE REDES DE PUESTA A TIERRA DE UN S.E.P.

REALIZADO POR: MARCELO CALDERON JARAMILLO

DIRIGIDO POR: ING. CARLOS RÍOFRÍO

A B R I L 1 9 8 4

DATOS DE ENTRADA

NUMERO DE MUESTREOS A REALIZARSE 200
 NUMERO DE ESTACIONES TERMINALES 1
 SEPARACION (CONSTANTE) ENTRE TORRES ADYACENTES EN KM 0.400
 NUMERO MAYOR DE TORRES EN UNA LINEA 320

PARAMETROS DE LA REJILLA DE LA S/E FALLADA

LONGITUD DEL LADO MAS CORTO DE LA REJILLA 109.000
 LONGITUD DEL LADO MAS LARGO DE LA REJILLA 124.000
 ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES PRINCIPALES 12.000
 ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES SECUNDARIOS 10.000
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO DE LA REJILLA 0.600
 DIAMETRO DEL CONDUCTOR 0.011
 NOTA: ESTOS VALORES ESTAN DADOS EN METROS

RESISTIVIDAD MEDIA (OHM-M) 110.00
 DESVIACION STANDARD DE LA RESISTIVIDAD (OHM-M) 35.00

ESTACION TERMINAL 1

NUMERO DE LINEAS A LA TORRE O S/E FALLADA 1
 RESISTIVIDAD MEDIA (OHM-M) 50.00
 DESVIACION STANDARD DE LA RESISTIVIDAD (OHM-M) 12.00

LONGITUD DEL LADO MAS CORTO DE LA REJILLA 140.000
 LONGITUD DEL LADO MAS LARGO DE LA REJILLA 275.000
 ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES PRINCIPALES 60.000
 ESPACIAMIENTO ENTRE CONDUCTORES SECUNDARIOS 17.000
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO DE LA REJILLA 0.600
 DIAMETRO DEL CONDUCTOR 0.011
 NOTA: ESTOS VALORES ESTAN DADOS EN METROS

LINEA 1 ENTRE LA ESTACION TERMINAL 1 Y LA TORRE O S/E FALLADA

VOLTAJE FASE NEUTRO (EN VOLTIOS) 132790.50 0.0
 NUMERO DE TORRES A LO LARGO DE LA LINEA 320
 NUMERO DE ZONAS DE DISTINTA RESISTIVIDAD 5

ZONAS	T	O	R	R	E	S	RESISTIVIDAD MEDIA	DESV. STAND. DE LA RESISTIV. MEDIA
NUMERO	DE	HASTA	(OHM-M)	(OHM-M)				
1	86	1	86	50.00		12.00		
2	120	87	200	110.00		25.00		
3	44	207	250	900.00		230.00		
4	43	251	293	100.00		40.00		
5	27	294	320	110.00		35.00		

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1 ZONA 1

ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA
 LONGITUD DE UNA VARILLA O CONDUCTOR (M) 3.28
 RADIO DE UNA VARILLA O CONDUCTOR (M) 0.007785
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M) 0.60
 SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M) 9.90
 LONGITUD/2 DE LA BASE DE LA TORRE (M) 3.50
 FACTOR DE LA RESISTENCIA SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS (V) 0.0

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1 ZONA 2

ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA
 LONGITUD DE UNA VARILLA O UN CONDUCTOR (M) 3.28
 RADIO DE UNA VARILLA O CONDUCTOR(M) 0.007785
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M) 0.60
 SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M) 7.90
 LONGITUD/2 DE LA BASE DE LA TORRE (M) 3.50
 FACTOR DE LA RESISTENCIA SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGUN CURVAS (V) 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS (V) 0.0

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1 ZONA 3

ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA
 LONGITUD DE UNA VARILLA O UN CONDUCTOR (M) 50.00
 RADIO DE UNA VARILLA O CONDUCTOR(M) 0.003518
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M) 0.60
 SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M) 0.0
 LONGITUD/2 DE LA BASE DE LA TORRE (M) 3.50
 FACTOR DE LA RESISTENCIA SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGUN CURVAS (V) 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS (V) 0.0

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1 ZONA 4

ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA
 LONGITUD DE UNA VARILLA O UN CONDUCTOR (M) 10.00
 RADIO DE UNA VARILLA O CONDUCTOR(M) 0.003518
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M) 0.60
 SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M) 0.0
 LONGITUD/3 DE LA BASE DE LA TORRE (M) 3.50
 FACTOR DE LA RESISTENCIA SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGUN CURVAS (V) 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS (V) 0.0

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1 ZONA 5

ALTERNATIVA EN LA TOMA DE TIERRA
 LONGITUD DE UNA VARILLA O UN CONDUCTOR (M) 3.28
 RADIO DE UNA VARILLA O CONDUCTOR(M) 0.007785
 PROFUNDIDAD DE ENTIERRO (M) 0.60
 SEPARACION ENTRE DOS VARILLAS (M) 7.00
 LONGITUD/2 DE LA BASE DE LA TORRE (M) 39.50
 FACTOR DE LA RESISTENCIA SEGUN CURVAS 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE TOQUE SEGUN CURVAS (V) 0.0
 FACTOR DEL VOLTAJE DE PASO SEGUN CURVAS (V) 0.0

ESTACION TERMINAL 1 LINEA 1

NUMERO DE CIRCUITOS
 RESISTENCIA DEL CONDUCTOR DE FASE (OHM/KM) 0.1112
 REACTANCIA INDUCTIVA XAA (OHM/KM) 0.2579

FACTORES DE SEPARACION ENTRE CONDUCTORES DE UN CIRCUITO (OHM/KM)

XDAB = 0.2137 XDAC = 0.2059 XDCA = 0.2137

NUMERO DE CABLES DE GUARDIA
 RESISTENCIA DEL(LOS) CABLE(S) DE GUARDIA (OHM/KM) 4.1019
 REACTANCIA INDUCTIVA XAG (OHM/KM) 1.2236
 FACTOR DE SEPARACION ENTRE 2 CABLES DE GUARDIA (OHM/KM) 0.0

FACTORES DE SEPARACION ENTRE CONDUCT. DE FASE Y DE TIERRA (OHM/KM)

XDAG = 0.2137 XDAG = 0.2137 XDGG = 0.2552
 XDAPG = 0.0 XDAPG = 0.0 XDGP = 0.0
 XDAPG = 0.0 XDAPG = 0.0 XDGP = 0.0
 XDAPG = 0.0 XDAPG = 0.0 XDGP = 0.0

NUMERO DE CONDUCTORES CONTRAPESOS
 RESISTENCIA DEL(LOS) CONTRAPESOS(S) (OHM-M) 0.0
 REACTANCIA INDUCTIVA XAG (OHM-M) 0.0
 FACTOR DE SEPARACION ENTRE DOS CONTRAPESOS (OHM-M) 0.0

RESULTADOS DETERMINISTICOS CONSIDERANDO EL RANGO MAS PROBABLE DE VARIACION DE LAS RESISTIVIDADES

DESCRIPCION	N GENERADO	RESISTIVIDAD OHM-M	R. PTA. A TIERRA		IMP. FASE		IMP. GUARDIA		IMP. MUTUA	
			OHM	OHM	OHM(0.4KM)	OHM(0.4KM)	OHM(0.4KM)	OHM(0.4KM)		
TORRE O S/E FALLADA	0599	5.000	0.015	0.0						
ESTACION TERMINAL 1	0321	14.000	0.029	0.0						
LINEA 1 ZONA 1	0321	14.000	2.148	0.0	0.039	0.182	1.664	0.696	0.020	0.111
LINEA 1 ZONA 2	1457	35.000	3.354	0.0	0.039	0.196	1.664	0.713	0.020	0.132
LINEA 1 ZONA 3	9355	210.000	1.169	0.0	0.039	0.223	1.664	0.740	0.020	0.153
LINEA 1 ZONA 4	4743	60.000	1.285	0.0	0.039	0.204	1.664	0.721	0.020	0.146
LINEA 1 ZONA 5	0599	5.000	3.494	0.0	0.039	0.167	1.664	0.683	0.020	0.102

PARAMETROS DE LA RED

	FORMA COMPLEJA		VALOR ABSOLUTO	
CORRIENTE DE FALLA FASE A TIERRA (AMPERIOS)	539.984	-2078.146	2139.805	
CORRIENTE DE FALLA DE LA LINEA 1 DE 1	509.984	-2078.146	2139.805	

DESCRIPCION	CORRIENTE DE FALLA EN:		VOLTAJE EN:		VOLTAJE DE TOQUE EN:		VOLTAJE DE PASO EN:	
	MODULO (A)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)
TORRE O S/E FALLADA	2054.673	-79.449	39.361	-79.449	18.442	-79.449	2.120	-79.449
ESTACION TERMINAL 1	2047.87	-78.85	60.19	-78.85	11.82	-78.85	1.75	-78.85

LINEA 1 ENTRE LA ESTACION 1 Y LA TORRE O S/E FALLADA

LAZO	CORRIENTE POR TIERRA		CORRIENTE POR EL (LOS) CABLE(S) DE TIERRA		CORRIENTE POR LAS TORRES		ELEVACION DE VOLTAJE EN LAS TORRES	
	(A)		(A)		(A)		(V)	
	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO
1	2054.67	-79.45	145.88	-23.52	2054.67	-79.45	39.36	-79.45
2	2062.22	-79.48	142.87	-20.73	7.65	-88.91	16.43	-88.91
3	2065.24	-79.51	142.22	-19.47	3.19	81.62	6.86	81.62
4	2066.41	-79.53	142.19	-18.94	1.33	72.15	2.86	72.15
5	2066.85	-79.54	142.27	-18.71	0.56	62.75	1.20	62.75
84	2066.44	-79.56	143.23	-18.69	0.50	-32.16	1.07	-32.16
85	2065.79	-79.59	144.42	-18.72	1.20	-22.65	2.57	-22.65
86	2064.64	-79.66	147.27	-18.61	2.87	-13.17	6.16	-13.17
87	2062.99	-79.85	153.92	-17.95	6.87	-3.71	14.76	-3.71
88	2062.18	-79.91	150.08	-17.87	2.17	-11.67	7.28	-11.67
89	2061.65	-79.93	157.15	-17.88	1.07	-19.70	3.59	-19.70
90	2061.33	-79.94	157.67	-17.91	0.53	-27.54	1.77	-27.54
91	2061.14	-79.95	157.92	-17.94	0.22	-35.36	0.87	-35.36
202	2060.46	-79.96	158.58	-18.09	0.28	-42.05	0.93	-42.05
203	2060.07	-79.97	159.13	-18.15	0.56	-33.94	1.89	-33.94
204	2059.40	-80.03	160.26	-18.20	1.14	-25.95	3.83	-25.95
205	2058.31	-80.05	162.58	-18.20	2.32	-17.94	7.77	-17.94
206	2056.72	-80.10	167.22	-17.97	4.69	-10.00	15.75	-10.00
207	2054.78	-80.44	176.40	-17.12	9.52	-2.04	31.92	-2.04
208	2051.28	-80.65	184.93	-17.01	8.55	-14.71	9.99	-14.71
209	2049.68	-80.71	187.56	-17.16	2.67	-27.38	3.12	-27.38
210	2049.05	-80.73	188.33	-17.26	0.84	-40.11	0.58	-40.11
249	2049.86	-80.70	187.10	-17.17	1.12	-31.12	1.31	-31.12
250	2051.52	-80.61	183.53	-17.14	3.58	-18.35	4.18	-18.35
251	2054.53	-80.30	172.33	-17.90	11.44	-5.69	13.37	-5.69
252	2056.10	-80.22	168.91	-17.91	3.42	-17.63	4.40	-17.63
253	2056.81	-80.20	167.80	-17.83	1.13	-29.63	1.45	-29.63
291	2058.16	-80.17	166.35	-17.56	0.75	-38.81	0.96	-38.81
292	2059.52	-80.12	164.11	-17.44	2.27	-26.90	2.91	-26.90
293	2062.43	-79.95	157.23	-17.54	6.89	-14.98	8.86	-14.98
294	2067.27	-79.38	137.04	-19.74	20.95	-3.03	26.93	-3.03
295	2072.21	-79.14	126.92	-19.54	10.12	-18.46	5.00	-18.46
296	2073.53	-79.10	125.16	-19.63	1.88	-33.92	0.93	-33.92
319	2069.69	-79.01	124.53	-21.87	4.20	70.29	2.07	70.29
320	2047.86	-78.85	133.12	-31.20	22.63	85.72	11.18	85.72

PARAMETROS DE LA REC

DESCRIPCION	N GENERADO	RESTVIDAD OHM-M	R. PTA. A TIERRA OHM	IMPD. FASE CHM(0.4KM)	IMPD. GUARDIA OHM(0.4KM)	IMPD. MUTUA CHM(0.4KM)
TORRE O S/E FALLADA	6999	215.000	0.824	0.0		
ESTACION TERMINAL 1	6321	86.000	3.181	0.0		
LINEA 1 ZONA 1	6321	86.000	13.197	0.0	0.039	0.210
LINEA 1 ZONA 2	9355	1590.000	17.727	0.0	1.664	0.738
LINEA 1 ZONA 3	4743	300.000	8.847	0.0	1.664	0.770
LINEA 1 ZONA 4	6949	215.000	6.425	0.0	1.664	0.743
LINEA 1 ZONA 5	6949	215.000	21.233	0.0	1.664	0.740

	FORMA COMPLEJA		VALOR ABSOLUTO	
CORRIENTE DE FALLA FASE A TIERRA (AMPERIOS)	446.082	-1825.057	1878.781	
CORRIENTE DE FALLA DE LA LINEA 1 DE 1	446.082	-1825.057	1878.781	

DESCRIPCION	CORRIENTE DE FALLA EN:		VOLTAJE EN:		VOLTAJE DE TOQUE EN:		VOLTAJE DE PASO EN:	
	MODULO (A)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)
TORRE O S/E FALLADA	1587.031	-78.694	1307.315	-78.694	526.180	-78.694	70.411	-78.694
ESTACION TERMINAL 1	1755.73	-80.46	316.97	-80.46	62.27	-80.46	9.20	-80.46

LINEA 1 ENTRE LA ESTACION I Y LA TORRE O S/E FALLADA

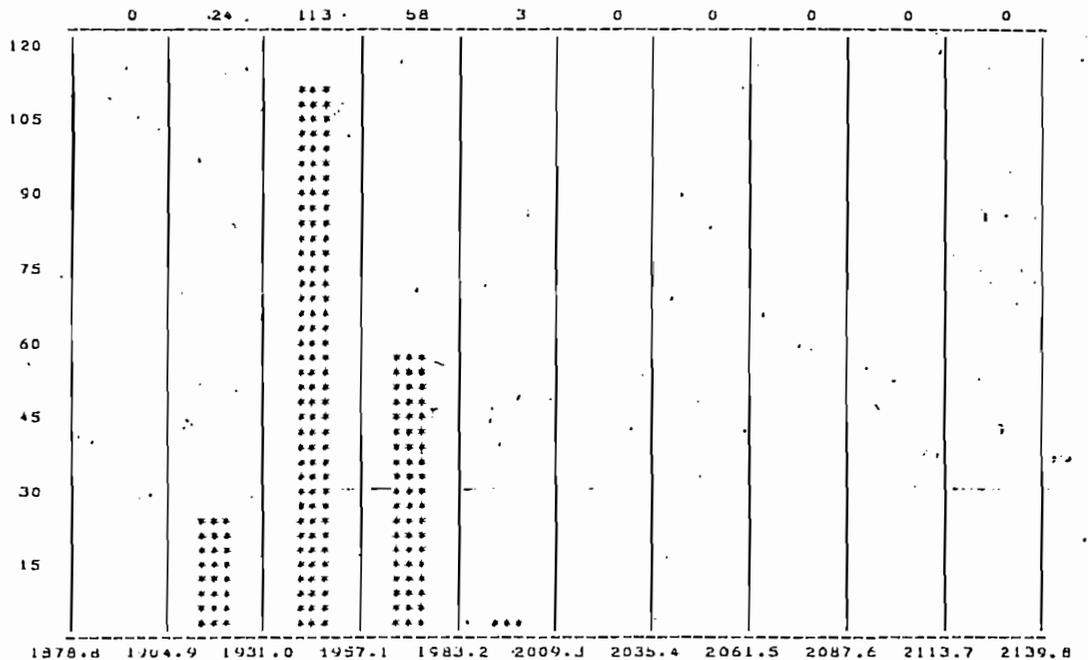
LAZO	CORRIENTE POR TIERRA		CORRIENTE POR EL (LOS) CABLE(S) DE TIERRA		CORRIENTE POR LAS TORRES		ELEVACION DE VOLTAJE EN LAS TORRES (V)	
	(A)		(A)		(A)		MODULO	ANGULO
	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO
1	1587.03	-78.69	300.80	-63.33	1587.03	-78.69	1307.32	-78.69
2	1625.86	-78.87	236.93	-57.73	69.02	-82.97	910.80	-82.97
3	1703.45	-79.11	198.52	-50.81	48.02	-87.24	634.56	-87.24
4	1736.18	-79.35	172.51	-43.53	33.53	-88.49	442.06	-88.49
5	1758.57	-79.56	159.30	-36.88	23.34	-84.21	308.00	-84.21
6	1773.81	-79.74	152.85	-31.42	16.26	-79.94	214.57	-79.94
7	1784.12	-79.90	149.72	-27.28	11.33	-75.07	149.50	-75.07
8	1791.04	-80.02	148.73	-24.27	7.86	-71.40	104.14	-71.40
9	1795.66	-80.11	148.70	-22.15	5.50	-67.12	72.56	-67.12
10	1798.72	-80.19	149.08	-20.08	3.83	-62.86	50.56	-62.86
11	1800.73	-80.24	149.60	-19.68	2.67	-58.58	35.21	-58.58
12	1802.04	-80.28	150.13	-19.00	1.86	-54.33	24.55	-54.33
13	1802.88	-80.31	150.59	-18.54	1.30	-50.03	17.09	-50.03
14	1803.41	-80.34	150.79	-18.23	0.90	-45.75	11.91	-45.75
15	1803.74	-80.36	151.31	-18.02	0.63	-41.51	8.30	-41.51
16	1803.94	-80.37	151.55	-17.89	0.44	-37.31	5.79	-37.31
17	1804.06	-80.38	151.75	-17.80	0.31	-32.89	4.03	-32.89
18	1804.13	-80.38	151.90	-17.74	0.21	-28.80	2.81	-28.80
19	1804.17	-80.39	152.01	-17.70	0.15	-23.90	1.95	-23.90
20	1804.19	-80.39	152.09	-17.68	0.10	-19.76	1.36	-19.76
21	1804.20	-80.39	152.15	-17.66	0.07	-16.83	0.95	-16.83
22	1804.20	-80.39	152.19	-17.65	0.05	-11.26	0.66	-11.26
7b	1804.06	-80.40	152.40	-17.67	0.04	-4.07	0.53	-4.07
77	1804.01	-80.40	152.45	-17.69	0.06	-4.17	0.78	-4.17
78	1803.94	-80.40	152.53	-17.70	0.08	-4.03	0.78	-4.03
79	1803.85	-80.40	152.64	-17.71	0.12	-3.58	1.61	-3.58
80	1803.73	-80.41	152.81	-17.73	0.18	-3.31	2.32	-3.31
81	1803.53	-80.42	153.06	-17.75	0.25	-2.85	3.30	-2.85
82	1803.37	-80.42	153.42	-17.77	0.36	-2.47	4.76	-2.47
83	1803.17	-80.44	153.93	-17.77	0.52	-2.05	6.82	-2.05
84	1802.80	-80.46	154.67	-17.77	0.74	-1.67	9.80	-1.67
85	1802.41	-80.49	155.73	-17.72	1.06	-1.15	14.05	-1.15
86	1801.97	-80.54	157.24	-17.62	1.53	-0.73	20.17	-0.73
87	1801.49	-80.61	159.36	-17.42	2.19	-0.09	28.46	-0.09
88	1801.16	-80.64	160.54	-17.35	1.20	-6.96	21.20	-6.96
89	1800.86	-80.67	161.41	-17.31	0.87	-10.60	15.50	-10.60
90	1800.60	-80.69	162.05	-17.30	0.64	-14.42	11.35	-14.42
91	1800.39	-80.70	162.51	-17.30	0.47	-18.13	8.30	-18.13
92	1800.21	-80.71	162.86	-17.31	0.34	-22.10	6.04	-22.10
93	1800.07	-80.72	163.10	-17.32	0.25	-25.36	4.43	-25.36
94	1799.95	-80.72	163.28	-17.34	0.18	-29.53	3.26	-29.53
95	1799.86	-80.72	163.41	-17.35	0.13	-32.94	2.37	-32.94
96	1799.79	-80.73	163.50	-17.36	0.10	-36.70	1.74	-36.70
97	1799.73	-80.73	163.57	-17.37	0.07	-41.60	1.29	-41.60
98	1799.69	-80.73	163.62	-17.38	0.05	-46.68	0.91	-46.68
99	1799.66	-80.73	163.65	-17.39	0.04	-49.09	0.69	-49.09
100	1799.63	-80.73	163.67	-17.39	0.03	-52.75	0.52	-52.75
191	1799.46	-80.74	163.67	-17.40	0.03	-62.81	0.53	-62.81
192	1799.42	-80.74	163.78	-17.44	0.04	-59.27	0.72	-59.27
193	1799.36	-80.73	163.86	-17.47	0.06	-56.17	1.01	-56.17
194	1799.30	-80.73	163.92	-17.48	0.08	-52.14	1.35	-52.14
195	1799.21	-80.74	164.01	-17.50	0.10	-47.48	1.84	-47.48
196	1799.10	-80.74	164.14	-17.52	0.14	-44.23	2.52	-44.23
197	1798.95	-80.74	164.32	-17.55	0.20	-40.43	3.46	-40.43
198	1798.76	-80.75	164.57	-17.58	0.27	-36.96	4.73	-36.96
199	1798.51	-80.76	164.92	-17.61	0.36	-32.89	6.45	-32.89
200	1798.20	-80.77	165.41	-17.61	0.50	-29.28	8.83	-29.28
201	1797.81	-80.79	166.08	-17.68	0.68	-25.62	12.08	-25.62
202	1797.33	-80.81	167.01	-17.70	0.93	-21.73	16.48	-21.73
203	1796.75	-80.85	168.28	-17.70	1.27	-18.07	22.55	-18.07
204	1796.06	-80.90	170.02	-17.67	1.74	-14.18	30.79	-14.18
205	1795.27	-80.97	172.37	-17.57	2.38	-10.51	42.11	-10.51
206	1794.39	-81.07	175.56	-17.37	3.25	-6.72	57.34	-6.72
207	1793.48	-81.21	179.87	-17.02	4.44	-3.03	78.66	-3.03
208	1791.74	-81.33	185.52	-16.76	5.72	-8.46	90.58	-8.46
209	1790.38	-81.49	189.19	-16.74	3.68	-13.90	32.52	-13.90
210	1789.28	-81.56	189.19	-16.74	2.36	-19.40	20.91	-19.40
211	1788.45	-81.60	191.35	-16.80	1.52	-24.86	13.44	-24.86
212	1787.83	-81.62	193.08	-16.87	0.98	-30.34	8.65	-30.34
213	1787.40	-81.64	194.60	-16.93	0.63	-35.83	5.56	-35.83
214	1787.09	-81.65	194.97	-16.98	0.40	-41.15	3.57	-41.15
215	1786.87	-81.65	195.20	-17.01	0.26	-47.01	2.31	-47.01
216	1786.73	-81.65	195.33	-17.04	0.17	-52.21	1.47	-52.21
217	1786.63	-81.66	195.41	-17.06	0.11	-57.51	0.94	-57.51
218	1786.57	-81.66	195.46	-17.08	0.07	-63.35	0.62	-63.35
241	1786.62	-81.66	195.41	-17.07	0.07	-69.70	0.58	-69.70
242	1786.70	-81.65	195.33	-17.05	0.10	-76.77	0.66	-76.77
243	1786.83	-81.65	195.20	-17.03	0.15	-84.22	1.34	-84.22
244	1787.01	-81.65	194.99	-17.00	0.24	-92.93	2.08	-92.93
245	1787.27	-81.65	194.64	-16.96	0.37	-102.86	3.26	-102.86
246	1787.63	-81.62	194.09	-16.92	0.57	-114.18	5.06	-114.18
247	1788.13	-81.60	193.21	-16.88	0.89	-127.04	7.88	-127.04
248	1788.79	-81.56	191.82	-16.86	1.38	-141.52	12.25	-141.52
249	1789.64	-81.50	189.07	-16.88	2.15	-157.71	19.04	-157.71
250	1790.66	-81.40	180.36	-17.02	3.35	-176.21	27.81	-176.21
251	1791.79	-81.23	181.49	-17.58	5.70	-197.55	45.05	-197.55
252	1793.16	-81.10	177.05	-17.50	8.28	-221.92	77.49	-221.92
253	1794.24	-81.03	174.50	-17.60	2.55	-16.11	16.41	-16.11
254	1795.03	-80.99	172.98	-17.56	1.52	-22.23	9.79	-22.23
255	1795.58	-80.97	172.05	-17.50	0.91	-28.44	5.85	-28.44
256	1795.96	-80.93	171.57	-17.45	0.54	-34.58	3.49	-34.58
257	1796.21	-80.90	171.27	-17.40	0.33	-40.92	2.09	-40.92
258	1796.37	-80.94	171.10	-17.37	0.19	-46.85	1.24	-46.85
259	1796.47	-80.94	171.01	-17.35	0.12	-53.01	0.74	-53.01
289	1796.86	-80.93	170.66	-17.26	0.11	-60.36	0.74	-60.36
290	1796.97	-80.93	170.47	-17.25	0.19	-69.72	1.22	-69.72

291	1797.15	-80.92	170.16	-17.24	0.32	-23.47	2.06	-23.47
292	1797.39	-80.91	169.62	-17.24	0.54	-17.54	3.45	-17.54
293	1797.70	-80.88	168.73	-17.27	0.90	-11.18	5.77	-11.18
294	1798.07	-80.83	167.26	-17.38	1.50	-5.04	9.67	-5.04
295	1798.17	-80.82	166.92	-17.40	0.35	-8.46	7.33	-8.46
296	1798.26	-80.81	166.65	-17.41	0.26	-10.83	5.60	-10.83
297	1798.34	-80.81	166.45	-17.41	0.20	-13.00	4.33	-13.00
298	1798.40	-80.80	166.29	-17.42	0.16	-14.93	3.40	-14.93
299	1798.45	-80.80	166.16	-17.42	0.13	-14.14	2.74	-14.14
300	1798.49	-80.80	166.06	-17.42	0.11	-9.46	2.27	-9.46
301	1798.51	-80.79	165.90	-17.43	0.10	-3.37	2.03	-3.37
302	1798.51	-80.79	165.88	-17.45	0.09	6.29	1.99	6.29
303	1798.49	-80.79	165.80	-17.47	0.10	18.39	2.17	18.39
304	1798.46	-80.78	165.71	-17.50	0.12	27.96	2.58	27.96
305	1798.38	-80.78	165.62	-17.54	0.16	37.14	3.32	37.14
306	1798.27	-80.77	165.52	-17.60	0.21	43.55	4.36	43.55
307	1798.09	-80.77	165.42	-17.69	0.27	49.02	5.75	49.02
308	1797.84	-80.76	165.30	-17.81	0.36	53.43	7.67	53.43
309	1797.48	-80.75	165.18	-17.97	0.48	57.44	10.25	57.44
310	1796.98	-80.74	165.06	-18.19	0.64	61.21	13.62	61.21
311	1796.27	-80.72	164.96	-18.48	0.85	64.82	18.15	64.82
312	1795.29	-80.70	164.90	-18.88	1.14	68.45	24.26	68.45
313	1793.95	-80.68	164.92	-19.40	1.51	71.86	32.17	71.86
314	1792.10	-80.65	165.10	-20.10	2.02	75.37	42.90	75.37
315	1789.58	-80.62	165.54	-21.02	2.69	78.83	57.08	78.83
316	1786.16	-80.59	166.40	-22.22	3.58	82.28	76.00	82.28
317	1781.54	-80.55	167.93	-23.77	4.76	85.73	101.02	85.73
318	1775.30	-80.52	170.50	-25.73	6.34	89.18	134.59	89.18
319	1766.93	-80.48	174.07	-28.16	8.43	87.36	179.06	87.36
320	1755.73	-80.46	181.22	-31.10	11.22	-83.92	238.26	-83.92

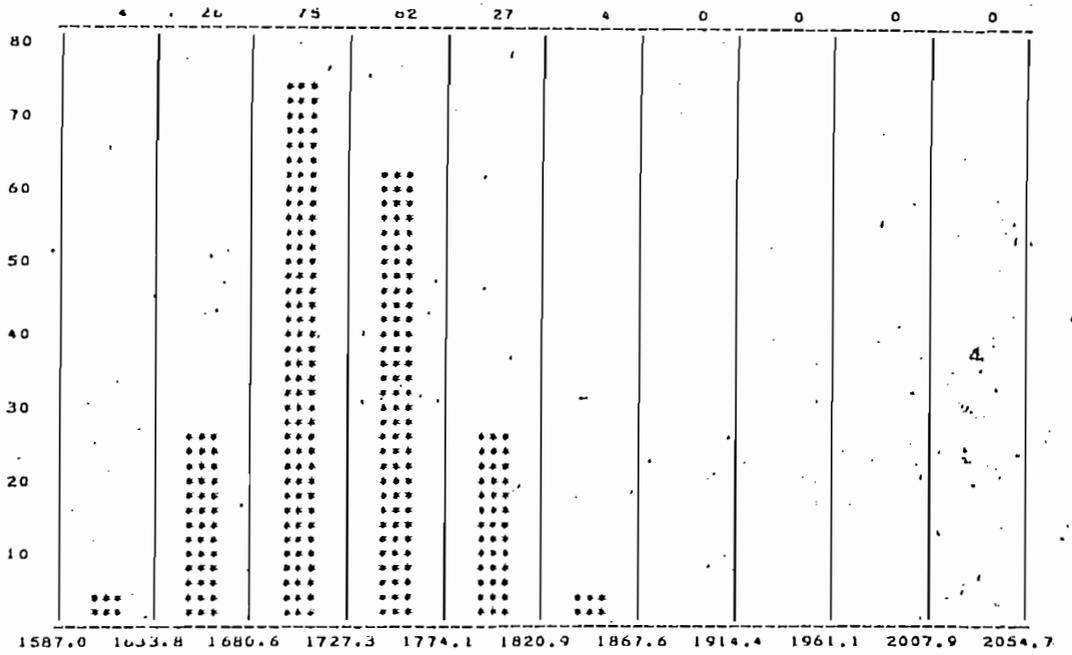
RESULTADOS DE VOLTAJES Y CORRIENTES EN FORMA PROBABILISTICA

DATO 0.1579E 04FUERA DE LIMITES ESPECIFICADOS
 DATO 0.1958E 02FUERA DE LIMITES ESPECIFICADOS

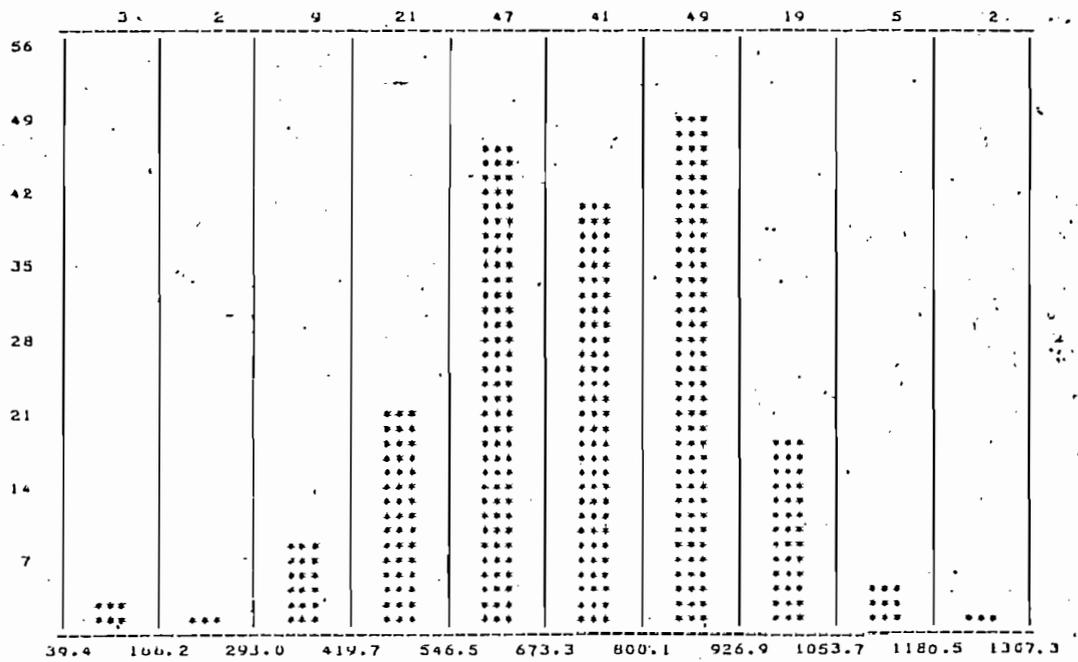
HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE DE FALLA



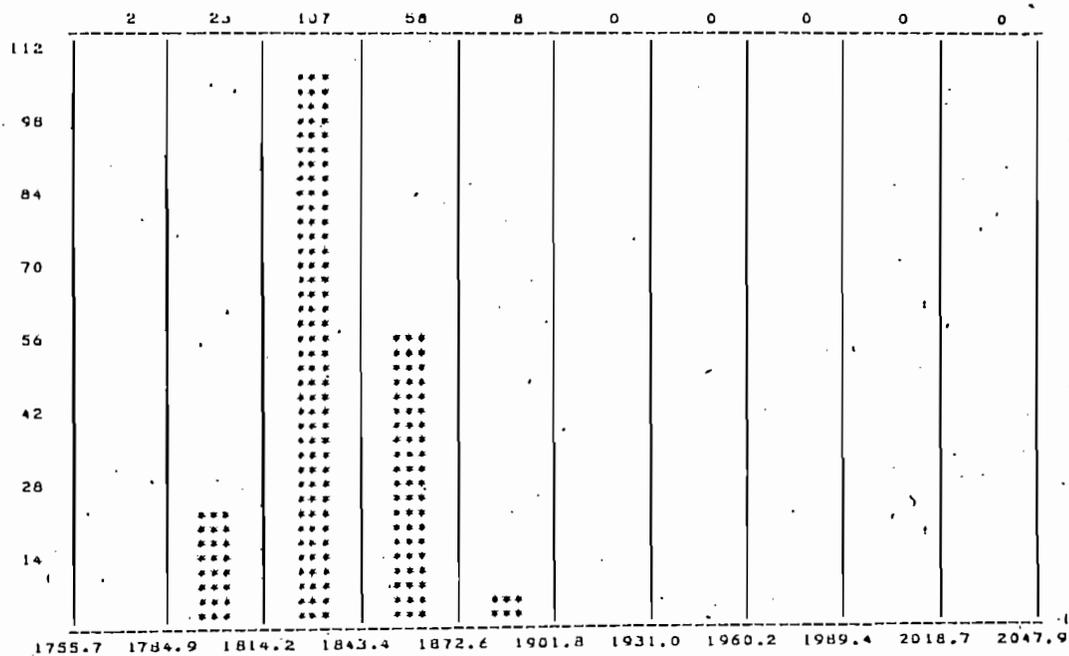
HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE EN LA S/E O TORRE FALLADA



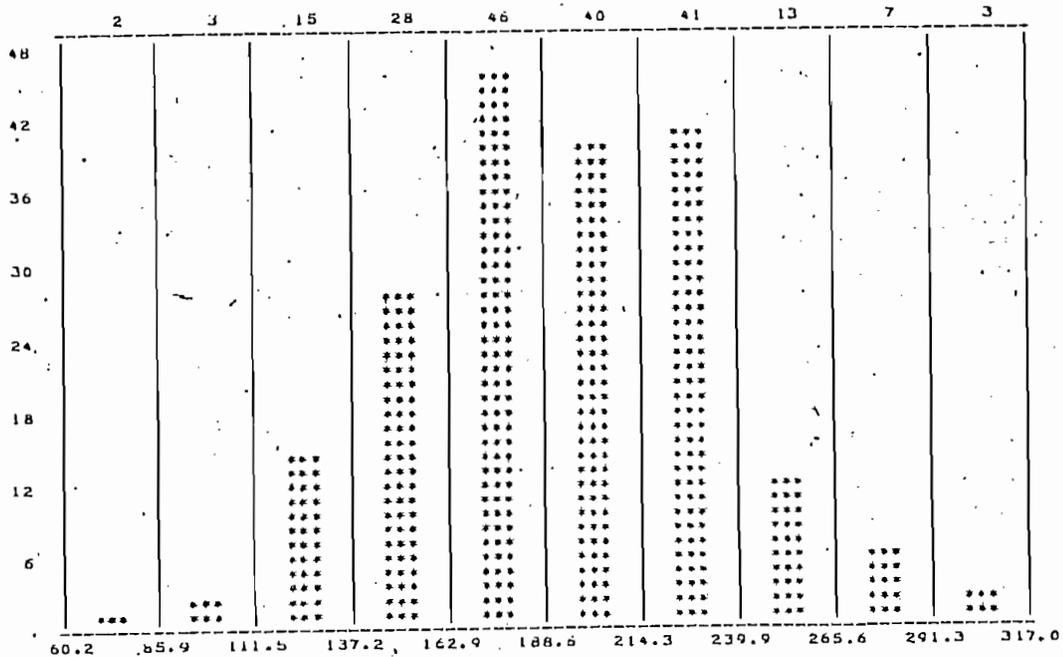
HISTOGRAMA DE LA ELEVACION DE VOLTAJE EN LA TORRE O S/E FALLADA



HISTOGRAMA DE LA CORRIENTE EN LA ESTACION 1



HISTOGRAMA DEL VOLTAJE EN LA ESTACION 1



RESULTADOS EN FORMA PROBABILISTICA

DESCRIPCION	CORRIENTE DE FALLA TOTAL (AMPERIOS)		VALOR MEDIO		DESV. STAND.	
	1949.08		16.28			
	VAL. MEDIO (A)	DESV. STAND (A)	VAL. MEDIO (A)	DESV. STAND (A)	VAL. MEDIO (A)	DESV. STAND (A)
TORRE O S/E FALLADA	1725.72	45.17	717.28	203.72	288.70	81.98
ESTACION TERMINAL 1	1833.37	19.65	192.50	43.15	37.82	8.48

RESULTADOS EN FORMA DETERMINISTICA

DESCRIPCION	N GENERADO	RESISTIVIDAD OHM-M	R. PTA. A TIERRA OHM		IMPED. FASE OHM(0.4KM)		IMPED. GUARDIA OHM(0.4KM)		IMPED. MUTUA OHM(0.4KM)	
TORRE O S/E FALLADA	321790023	110.000	0.421	0.0						
ESTACION TERMINAL 1	1723807809	50.000	0.105	0.0						
LINEA 1 ZONA 1	1723807809	50.000	7.673	0.0	0.039	0.201	1.664	0.718	0.020	0.13
LINEA 1 ZONA 2	721450385	110.000	13.541	0.0	0.039	0.213	1.664	0.730	0.020	0.15
LINEA 1 ZONA 3	2082375355	900.000	5.008	0.0	0.039	0.245	1.664	0.762	0.020	0.18
LINEA 1 ZONA 4	520905335	180.000	3.855	0.0	0.039	0.221	1.664	0.737	0.020	0.15
LINEA 1 ZONA 5	1489423349	110.000	10.863	0.0	0.039	0.213	1.664	0.730	0.020	0.15

DESCRIPCION	FORMA COMPLEJA		VALOR ABSOLUTO	
CORRIENTE DE FALLA FASE A TIERRA (AMPERIOS)	457.761	-1891.557	1946.157	
CORRIENTE DE FALLA DE LA LINEA 1 DE 1	457.761	-1891.557	1946.157	

DESCRIPCION	CORRIENTE DE FALLA EN:		VOLTAJE EN:		VOLTAJE DE TOQUE EN:		VOLTAJE DE PASO EN:	
	MODULO (A)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)	MODULO (V)	ANGULO (GR)
TORRE O S/E FALLADA	1722.917	-79.121	726.129	-79.121	292.259	-75.121	35.109	-79.121
ESTACION TERMINAL 1	1832.52	-80.37	192.39	-80.37	37.80	-80.37	5.56	-80.37

LINEA 1 ENTRE LA ESTACION 1 Y LA TORRE O S/E FALLADA

LAZO	CORRIENTE POR TIERRA		CORRIENTE POR EL (LOS) CABLE(S) DE TIERRA		CORRIENTE POR LAS TORRES		ELEVACION DE VOLTAJE EN LAS TORRES	
	(A)		(A)		(A)		(V)	
	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO	MODULO	ANGULO
1	1722.92	-79.12	239.63	-55.41	1722.92	-79.12	726.13	-79.12
2	1751.68	-79.33	189.67	-47.95	59.02	-84.60	452.86	-24.60
3	1817.85	-79.52	164.24	-39.31	36.81	89.92	282.44	89.92
4	1919.93	-79.72	152.63	-32.12	22.96	84.44	176.14	84.44
5	1953.27	-79.88	148.14	-26.95	14.32	78.95	109.85	78.95
6	1861.25	-80.03	146.79	-23.52	8.93	73.48	68.51	73.48
7	1865.98	-80.03	146.75	-21.35	5.57	67.98	42.72	67.98
8	1868.74	-80.10	147.10	-20.00	3.47	62.50	26.63	62.50
9	1870.33	-80.20	147.06	-19.18	2.17	57.06	16.63	57.06
10	1871.23	-80.23	148.11	-18.69	1.35	51.54	10.36	51.54
11	1871.73	-80.25	148.47	-18.39	0.84	46.04	6.46	46.04
12	1872.00	-80.27	148.74	-18.22	0.53	40.65	4.03	40.65
13	1872.14	-80.28	148.94	-18.12	0.33	35.11	2.51	35.11
14	1872.20	-80.29	149.08	-18.06	0.20	29.69	1.57	29.69
15	1872.24	-80.29	149.17	-18.03	0.13	23.75	0.97	23.75
16	1872.25	-80.29	149.24	-18.01	0.08	18.38	0.61	18.38
17	1872.07	-80.29	149.50	-18.03	0.07	-46.31	0.52	-46.31

80	1871.98	-80.10	149.60	-18.05	0.11	-41.72	0.86	-41.72
81	1871.86	-80.10	149.77	-18.07	0.18	-36.35	1.37	-36.35
82	1871.67	-80.11	150.05	-18.10	0.29	-30.70	2.20	-30.70
83	1871.41	-80.12	150.50	-18.12	0.46	-25.11	3.52	-25.11
84	1871.05	-80.14	151.24	-18.13	0.74	-19.80	5.65	-19.80
85	1870.57	-80.17	152.42	-18.10	1.18	-14.19	9.66	-14.19
86	1869.97	-80.21	154.29	-17.98	1.89	-8.69	14.52	-8.69
87	1869.30	-80.22	157.22	-17.70	3.04	-3.30	23.29	-3.30
88	1868.86	-80.26	158.08	-17.61	1.48	-8.09	15.55	-8.09
89	1868.48	-80.29	159.06	-17.58	0.98	-12.75	10.38	-12.75
90	1868.19	-80.31	160.12	-17.58	0.66	-17.57	6.53	-17.57
91	1867.96	-80.32	160.75	-17.60	0.44	-22.39	4.63	-22.39
92	1867.78	-80.32	161.04	-17.61	0.29	-26.95	3.08	-26.95
93	1867.65	-80.33	161.23	-17.63	0.20	-31.07	2.07	-31.07
94	1867.56	-80.33	161.36	-17.64	0.13	-36.96	1.38	-36.96
95	1867.49	-80.33	161.44	-17.66	0.09	-41.94	0.92	-41.94
96	1867.44	-80.34	161.49	-17.67	0.06	-46.35	0.62	-46.35
106	1867.14	-80.34	161.71	-17.75	0.07	-55.29	0.72	-55.29
107	1867.05	-80.34	161.79	-17.77	0.10	-50.77	1.09	-50.77
108	1866.93	-80.34	161.93	-17.79	0.15	-45.20	1.60	-45.20
109	1866.75	-80.35	162.14	-17.82	0.23	-40.81	2.42	-40.81
200	1866.50	-80.35	162.47	-17.86	0.35	-36.44	3.64	-36.44
201	1866.16	-80.37	162.97	-17.91	0.52	-31.64	5.46	-31.64
202	1865.71	-80.38	163.74	-17.95	0.77	-26.74	8.16	-26.74
203	1865.11	-80.42	164.89	-17.98	1.16	-21.92	12.22	-21.92
204	1864.34	-80.46	166.63	-17.97	1.74	-17.09	18.20	-17.09
205	1863.38	-80.48	169.22	-17.88	2.60	-12.32	27.11	-12.32
206	1862.28	-80.53	173.65	-17.65	3.90	-7.58	41.06	-7.58
207	1861.08	-81.11	178.69	-17.17	5.83	-2.79	61.50	-2.79
208	1858.80	-81.33	185.40	-16.90	6.85	-9.84	34.31	-9.84
209	1857.24	-81.44	193.31	-16.90	3.82	-16.93	19.14	-16.93
210	1856.10	-81.49	191.43	-16.98	2.13	-23.98	10.68	-23.98
211	1855.34	-81.52	192.59	-17.07	1.19	-31.13	5.96	-31.13
212	1854.85	-81.53	193.20	-17.14	0.66	-38.07	3.32	-38.07
213	1854.56	-81.54	193.53	-17.19	0.37	-45.27	1.88	-45.27
214	1854.30	-81.54	193.70	-17.22	0.21	-52.40	1.04	-52.40
215	1854.27	-81.54	193.79	-17.25	0.11	-59.22	0.57	-59.22
244	1854.37	-81.54	193.68	-17.23	0.12	-53.49	0.59	-53.49
245	1854.54	-81.53	193.30	-17.20	0.21	-46.47	1.05	-46.47
246	1854.82	-81.53	193.15	-17.16	0.37	-39.28	1.87	-39.28
247	1855.24	-81.51	192.50	-17.10	0.67	-32.29	3.36	-32.29
248	1855.93	-81.48	191.31	-17.05	1.20	-25.24	6.03	-25.24
249	1856.89	-81.42	189.15	-17.04	2.16	-18.16	10.80	-18.16
250	1858.20	-81.31	185.31	-17.16	3.57	-11.05	19.36	-11.05
251	1859.73	-81.13	178.57	-17.67	6.93	-4.00	34.69	-4.00
252	1861.37	-80.97	173.95	-17.83	4.64	-11.72	17.90	-11.72
253	1862.52	-80.90	171.56	-17.81	2.40	-17.47	9.24	-17.47
254	1863.25	-80.87	170.34	-17.74	1.24	-27.18	4.77	-27.18
255	1863.63	-80.86	169.73	-17.67	0.64	-34.92	2.46	-34.92
256	1863.95	-80.85	169.20	-17.63	0.33	-42.59	1.27	-42.59
257	1864.10	-80.85	169.20	-17.60	0.17	-50.68	0.66	-50.68
290	1864.59	-80.84	168.81	-17.49	0.20	-58.78	0.76	-58.78
291	1864.82	-80.83	168.44	-17.47	0.38	-52.31	1.48	-52.31
292	1865.19	-80.81	167.70	-17.45	0.74	-40.45	2.86	-40.45
293	1865.72	-80.77	166.26	-17.50	1.44	-28.64	5.54	-28.64
294	1866.40	-80.69	163.55	-17.71	2.79	-14.90	10.74	-14.90
295	1866.62	-80.67	162.89	-17.74	0.66	-29.63	7.21	-29.63
296	1866.80	-80.66	162.44	-17.75	0.45	-34.04	4.84	-34.04
297	1866.94	-80.65	162.14	-17.75	0.20	-41.55	3.26	-41.55
298	1867.05	-80.64	161.94	-17.74	0.14	-49.28	2.20	-49.28
299	1867.13	-80.64	161.81	-17.74	0.09	-57.15	1.50	-57.15
300	1867.19	-80.64	161.72	-17.73	0.09	-65.04	1.02	-65.04
301	1867.24	-80.64	161.65	-17.72	0.07	-72.94	0.72	-72.94
302	1867.27	-80.64	161.61	-17.71	0.05	-80.84	0.51	-80.84
305	1867.30	-80.63	161.47	-17.73	0.05	-88.74	0.52	-88.74
307	1867.28	-80.63	161.42	-17.74	0.07	-96.64	0.71	-96.64
308	1867.23	-80.63	161.37	-17.77	0.10	-104.54	1.09	-104.54
309	1867.15	-80.62	161.29	-17.82	0.15	-112.44	1.61	-112.44
310	1867.02	-80.62	161.20	-17.89	0.22	-120.34	2.38	-120.34
311	1866.79	-80.61	161.09	-18.00	0.33	-128.24	3.60	-128.24
312	1866.43	-80.60	160.96	-18.17	0.49	-136.14	5.35	-136.14
313	1865.84	-80.59	160.84	-18.43	0.73	-144.04	7.56	-144.04
314	1864.93	-80.57	160.75	-18.81	1.09	-151.94	11.06	-151.94
315	1863.50	-80.54	160.76	-19.39	1.62	-160.84	17.65	-160.84
316	1861.27	-80.52	161.01	-20.25	2.42	-170.74	26.30	-170.74
317	1857.86	-80.48	161.73	-21.53	3.60	-181.64	39.14	-181.64
318	1852.05	-80.44	163.38	-23.30	5.37	-193.54	58.30	-193.54
319	1844.77	-80.40	166.73	-25.82	7.99	-207.44	86.78	-207.44
320	1832.92	-80.37	173.11	-29.21	11.89	-223.34	129.20	-223.34

'EOP 18FLE
EOJ MARCAL

DATE 13/04/84,CLOCK 16/12/32,DURATION 01/3

TIEMPO DE EJECUCION DE LA FASE SU PRGR->2.584,28 SEG
 * * * * *
 * USUARIO: CALDERON JARAMILLO LUIS E *
 * TIEMPO DE UCP 2.831,38 SG COSTO: \$8.494,14 *
 * TIEMPO ASIGNADJ: 20.000,00 SG *
 * TIEMPO USADO ACUM 16.489,39 SG AL MES: 6.458,39 SG *
 * PROGRAMAS CURRIDOS : 174 TL 21 PR *
 * FECHA DE EXPIRACION: 07/84 *
 * * * * *

A P E N D I C E C

RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE REJILLAS EN SUBESTACIONES Y ESTACIONES TERMINALES

La resistencia total, de acuerdo a REF. 9, es:

$$R = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad (C.1)$$

donde: R_1 es la resistencia de los conductores de la re
jilla
 R_2 es la resistencia de todas las varillas de tie
rra
 R_{12} representa la resistencia mutua

Sin embargo, no se comete mayor error, si no se toma en cuen
ta a la Resistencia de las varillas y, por lo tanto a la re
sistencia mutua.

Schwartz desarrolló fórmulas que definen R_1 , R_2 y R_{12} , en los términos de los parámetros básicos de diseño asumiendo condiciones de suelo uniforme. En nuestro estudio se consi
derará la resistencia de puesta a tierra total igual a la resistencia de los conductores de la rejilla ($R = R_1$).

$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L} \left[\ln \frac{2L}{\sqrt{zd}} + K_1 \frac{L}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \Omega \quad (C.2)$$

ρ Resistividad del suelo en el cual están enterrados los conductores de la rejilla, en ohm-m.

- L Longitud de los conductores de la rejilla, en m.
 Z Profundidad de entierro de la rejilla, en m.
 d Diámetro del conductor de la rejilla, en m.
 A Area cubierta por la rejilla, de dimensiones $a \times b$, en m^2 .
 a Longitud del lado más corto de la rejilla, en m.
 b Longitud del lado más largo de la rejilla, en m.
 K_1, K_2 Constantes relacionadas con la geometría del sistema, las cuales fueron derivadas por Kerckel (REF.9) que se indican a continuación.

$$K_1 = \frac{\sqrt{ab}}{2} \cdot 1.84 \left[\frac{1}{a} \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + b^2}}{b} \right) + \frac{1}{b} \ln \left(\frac{b + \sqrt{a^2 + b^2}}{a} \right) + \frac{a}{3b^2} + \frac{b}{3a^2} - \frac{a^2 + b^2}{3a^2 b^2} \sqrt{a^2 + b^2} \right] \quad (C.3)$$

$$K_2 = \ln \frac{4(a+b)}{b} + 2 K_1 \frac{(a+b)}{\sqrt{ab}} - \ln \left(\frac{a + \sqrt{a^2 + (b/2)^2}}{(b/2)} \right) - \frac{1}{2} \ln \left(\frac{(b/2) + \sqrt{a^2 + (b/2)^2}}{-(b/2) + \sqrt{a^2 + (b/2)^2}} \right) \quad (C.4)$$

De acuerdo con la Ecuación C.1., la resistencia de puesta a tierra de rejillas en subestaciones o estaciones terminales, varía linealmente con la resistividad del suelo.

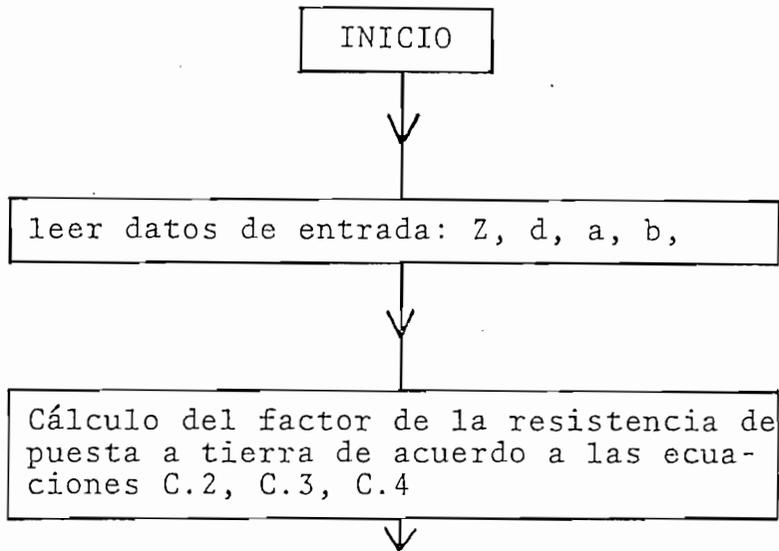
$$R = K \rho \quad (C.5)$$

En donde K es un factor de proporcionalidad.

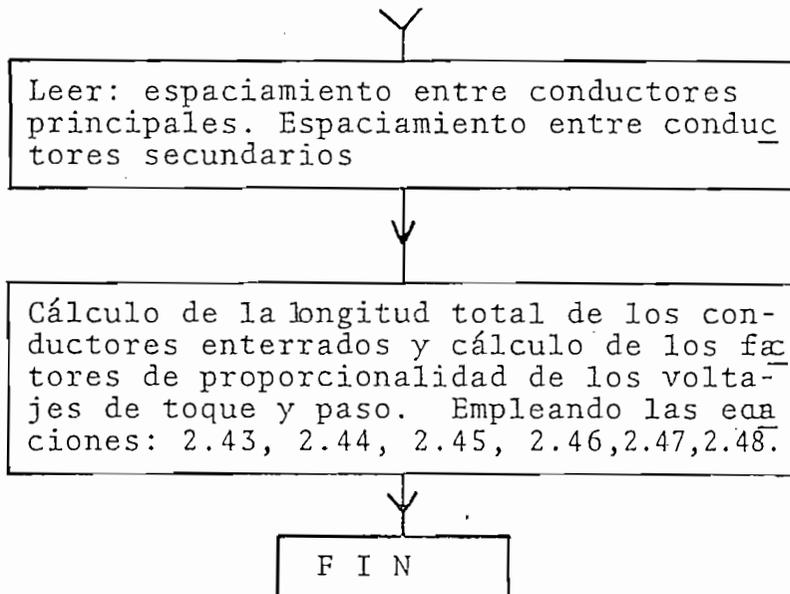
Precisamente, para efectos de este estudio, en el programa digital de aplicación se emplea la subrutina DAT01 para encontrar este factor de proporcionalidad, para luego, en el

programa principal generar valores aleatorios de resistividad y así encontrar valores probabilísticos de la resistencia de puesta a tierra.

Diagrama de flujo de la subrutina DATO1



Adicionalmente, en esta subrutina se calcula los voltajes peligrosos, en una rejilla de una subestación o estación terminal en función de la resistividad del suelo.

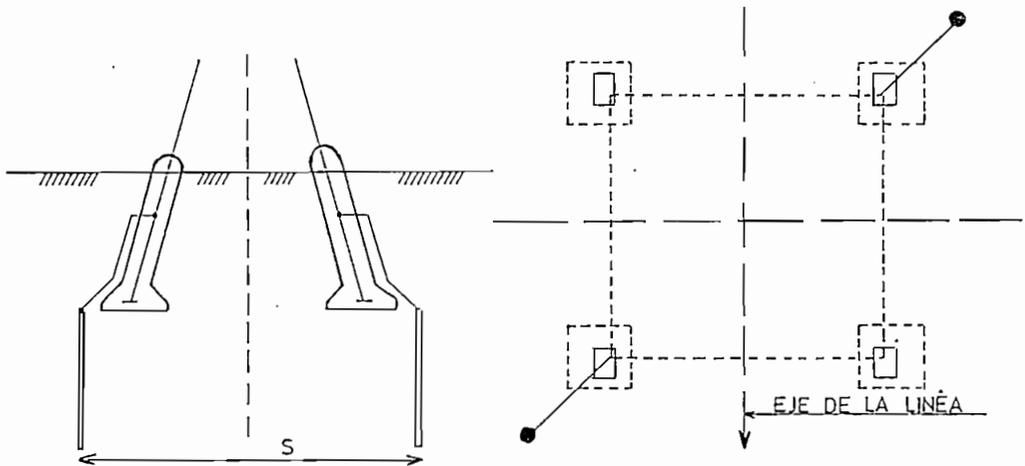


A P E N D I C E D

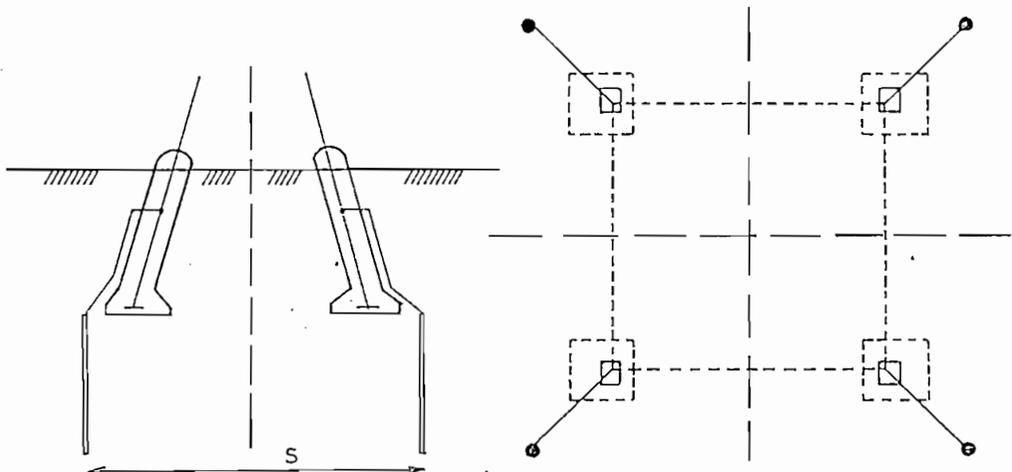
RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE TRANSMISION

D.1. TIPOS DE PUESTA A TIERRA: ALTERNATIVAS:

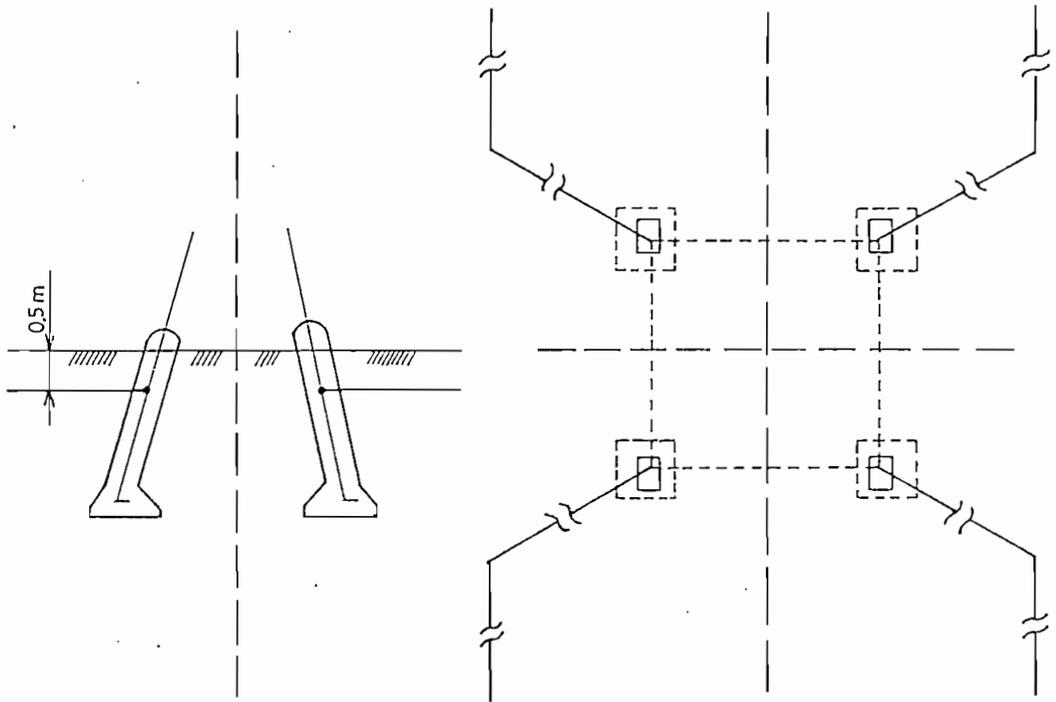
I. 2 electrodos en la diagonal FIG. D.1



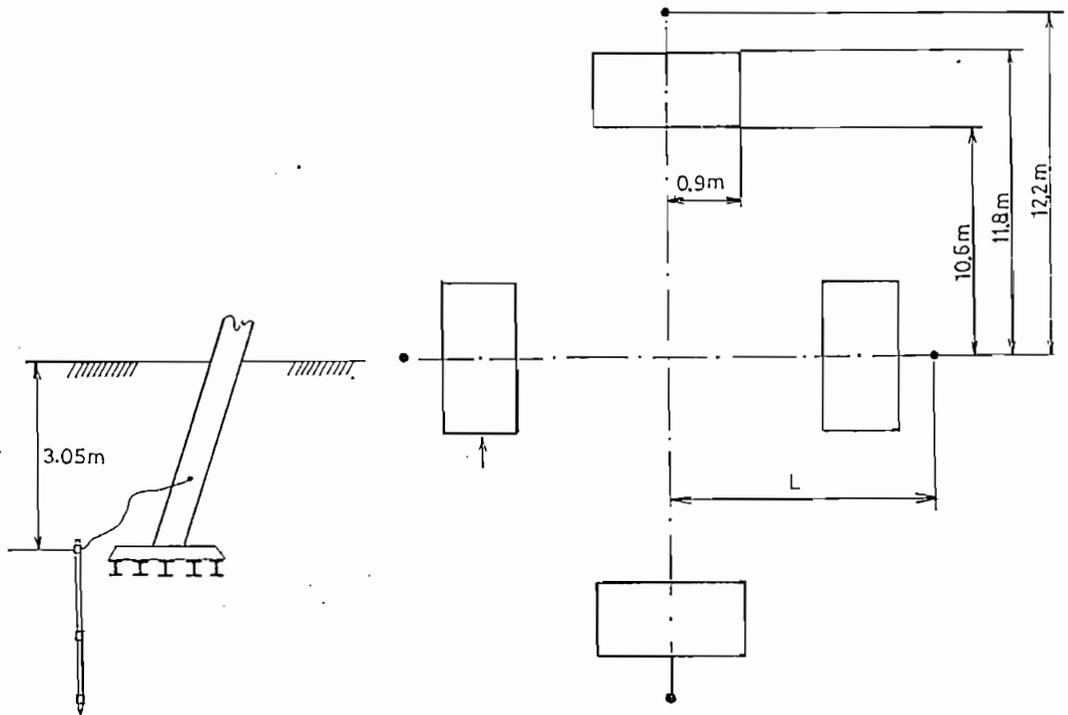
II. 4 electrodos, uno en cada esquina. FIG. D.2



III. Contrapesos FIG. D.3



IV. Tipo enrejado: (REF. 16) FIG. D.4



D.2. CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

TIPO I: (REF. 21)

La resistencia de una varilla de tierra es: (en Ω)

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \left[\ln \frac{2\ell}{a} - 1 \right] \quad (D.1)$$

ρ Resistividad del terreno, en Ω -m

ℓ longitud de la varilla, en m.

a radio de la varilla, en m.

La resistencia puede disminuirse conectando varillas en paralelo. Si el espaciamiento entre varillas es grande com-parado con la longitud de las varillas individuales, la resistencia se reducirá en proporción al número de varillas. Si las varillas están cercanas, la resistencia total será:

$$R = \frac{\rho}{2\pi\ell} \ln \left(\frac{2\ell}{A} \right) \quad \Omega \quad (D.2)$$

donde A representa el radio de una varilla equivalente.

Para el tipo I:

$$A = \sqrt{aS} \quad (D.3)$$

donde S es la separación entre las varillas, en m.

TIPO II: (REF. 21)

$$A = \sqrt[4]{\sqrt{2}} a S^2 = 1.0905 \sqrt[4]{a} S^2 \quad (D.4)$$

TIPO III: (REF. 21)

La resistencia de un simple alambre enterrado horizontalmente (contrapeso) es:

$$R = \frac{\rho}{\pi \ell} \left[\ell n \frac{2\ell}{\sqrt{4ad}} - 1 \right] \Omega \quad (D.5)$$

donde: ℓ longitud del alambre, m.
 a radio del alambre, m.
 d profundidad de entierro, m.
 ρ resistividad del terreno, ohm-m.

La ecuación D.5 es válida para valores no tan grandes de ℓ , para la configuración dada; es decir 4 contrapesos, la ecuación D.5 se dividirá por 4 por cuánto existe simetría. Generalmente ℓ varía entre 10 y 100 m. Por ejemplo en el trayecto de la línea Milagro-Machala se emplea este tipo de toma a tierra para las torres y, dependiendo de la resistividad del suelo, se utilizan 4 contrapesos de 10, 40 y 50 m. cada uno.

TIPO IV: (REF. 16)

Para este tipo de puesta a tierra se ha desarrollado

un análisis completo encaminado a obtener curvas uni
versales de uso general para encontrar directamente
los valores de la resistencia de puesta a tierra.

Las Figuras FIG. D.5 y FIG. D.6, dan valores de re-
sistencia en ohmios considerando varillas de tierra
adicionales uno por lado y sin considerar la existen-
cia de estas varillas, en función del factor K rela-
cionado con la estructura del suelo de dos capas y de
la altura de la capa superior. En nuestro estudio se
considera suelo uniforme es decir $K=0$. Estas curvas
se las obtuvo considerando un valor de resistividad
base de $100 \Omega\text{m}$. y una longitud L de 12.2 m (FIG. D.4).

Si las torres no tienen las mismas dimensiones de a-
quella indicada en la FIG. D.4. pero son geométrica-
mente similares (incluyendo el radio de los conducto-
res de tierra) y, además, si la resistividad del sue-
lo es distinta de la resistividad base (100 ohms-m),
entonces se emplea la siguiente relación para obtener
el verdadero valor de la resistencia de puesta a tie-
rra de una torre particular de configuración geométri-
ca semejante a la descrita.

$$R = R_{\text{curvas}} \times \frac{\rho_{\text{real}}}{\rho_{\text{base}}} \times \frac{L_{\text{base}}}{L_{\text{real}}} \quad (\text{D.6})$$

R_{curvas} : valor obtenido de las FIG.D.5 o D.6 para $K=0$,
ohms.

ρ_{real} : resistividad del suelo, ohms-m.

ρ_{base} : 100 ohms-m.

L_{base} : de acuerdo a la FIG. D.4, $L_{base} = 12.2$ m.

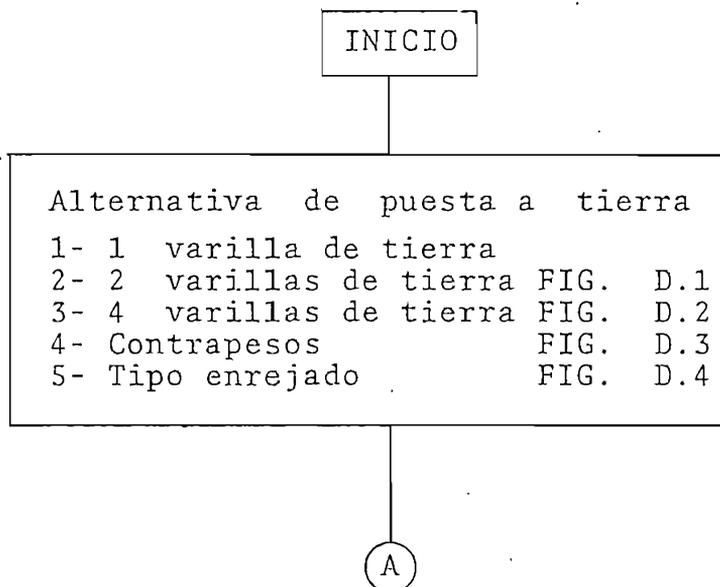
L_{real} : dimensión de la torre particular.

Entonces:

$$R = 0.122 \frac{R_{curvas} \times \rho_{real}}{L_{real}} \quad (D.7)$$

Para todos los tipos de toma a tierra analizados, la Resistencia es función directa de la resistividad del suelo. En el programa digital se emplea la subrutina DATO2 para encontrar el factor de proporcionalidad de la resistencia de puesta a tierra de torres de transmisión, para en el programa principal generar valores de resistividad y así obtener resultados probabilísticos de la resistencia.

D.3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA DE TORRES DE TRANSMISION



A

Dependiendo de la alternativa escogida se procede así:

- 1: leer ℓ y a y emplear Ec. D.1
- 2: leer ℓ , a y S y emplear Ecs. D.2 y D.3
- 3: leer ℓ , a y S y emplear Ecs. D.2 y D.4
- 4: leer ℓ , a y d y emplear Ecs. D.5
- 5: leer R_{curvas} , L_{real} y emplear Ec. D.7

F I N

NOTA: En las ecuaciones D.2, D.3, D.4, D.5 y D.7, no se toma en cuenta a la resistividad del suelo, en esta subrutina.

D.4. VOLTAJES DE TOQUE Y PASO DE TORRES DE TRANSMISION

En esta subrutina se adjuntan los factores de proporcionalidad de los voltajes de toque y paso como una función de la resistividad del suelo y la corriente en la torre.

Leer datos de entrada:

Vtoque según curvas de las FIGS. 2.5 o 2.6

Vpaso según curvas de las FIGS. 2.7 o 2.8

Lreal de la estructura de la torre según FIG. D.4

Calcular voltajes peligrosos:

de acuerdo con la Ecuación (2.49).

A P E N D I C E E

IMPEDANCIAS PROPIAS Y MUTUAS DE CONDUCTORES DE FASE Y NEUTROS

E.1. CALCULO DE LA IMPEDANCIA INDUCTIVA DE SECUENCIA CERO MEDIANTE TABLAS DE CARACTERISTICAS DE LINEAS AEREAS

Las impedancias propias de un conductor equivalente de un circuito trifásico, expresada en ohms/milla es:
(REF.4)

$$Z_{op} = \gamma_a + 0.00477f + j0.01397f \log ($$

$$\frac{2160 \sqrt{\frac{\rho}{f}}}{\sqrt[3]{RMG (DMGabc)^2}}) \Omega/\text{milla} \quad (E.1) \checkmark$$

$$Z_{op} = \gamma_a + \gamma_e + j 0.004657f \left[\frac{1}{2} \log 2160^2 \frac{\rho}{f} + \frac{1}{3} \log \frac{1}{RMG} - \frac{2}{3} \log (DMG abc) \right] \quad (E.2)$$

γ_a resistencia de un conductor en ohms/milla que puede leerse en las tablas de características de los conductores

$$\gamma_e = 0.2862 \text{ ohms/milla, para } f=60 \text{ c/s}$$

$$X_e = 0.01397 f \frac{1}{2} \log. (2160^2 \frac{\rho}{f}) \Omega/\text{milla}$$

$$X_e = 0.4188 \log. (77760\rho) \Omega/\text{milla} \quad (E.3)$$

Este factor, en nuestro estudio, variará de acuerdo a

las variaciones de la resistividad del terreno.

$$X_a = 0.01397 f^{\frac{1}{3}} \log \frac{1}{RMG} \text{ ohms/milla}$$

$$X_a = 0.2794 \log \frac{1}{RMG} \Omega/\text{milla} \quad (E.4)$$

Para $f = 60$ c/s. Es función del radio medio geométrico del conductor y de la frecuencia, puede leerse en las tablas de características de los conductores.

$$X_d = 0.01397 f^{\frac{1}{3}} \log (DMGabc) \text{ ohms/milla}$$

$$X_d = \frac{1}{3} ((X_d(ab) + X_d(bc) + X_d(ac))) \Omega/\text{milla} \quad (E.5)$$

a) IMPEDANCIA INDUCTIVA PROPIA DE SECUENCIA CERO DE UN CIRCUITO TRIFASICO

$$Z_{op} = (\gamma_a + 0.2862) + j(X_e + X_a - 2X_d) \text{ ohms/milla} \quad (E.6)$$

donde: X_d está dado por la Ec. (E.5).

b) IMPEDANCIA INDUCTIVA PROPIA DE SECUENCIA CERO DE DOS CIRCUITOS TRIFASICOS

$$Z_{opp}' = \frac{Z_{op} + Z_{om}}{2} \text{ ohms/milla} \quad (E.7)$$

Z_{op} - Está dado por la Ec. (E.6)

$$Z_{om} = 0.2862 + j(X_e - 3X_d) \text{ ohms/milla} \quad (E.8)$$

donde: $X_d = \frac{1}{9} (X_d(aa') + X_d(ab') + X_d(ba') + X_d(ac') + X_d(bb') + X_d(bc') + X_d(ca') + X_d(cb') + X_d(cc'))$ (E.9)

c) IMPEDANCIA INDUCTIVA DE SECUENCIA CERO PROPIA, DE UN CABLE DE GUARDIA

$$Z_{og} = (3\gamma_a + 0.2862) + j(X_e + 3X_a) \text{ ohms/milla} \quad (E.10)$$

d) IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO PROPIA, DE DOS CABLES DE GUARDIA

$$Z_{ogg'} = \left(\frac{3}{2}\gamma_a + 0.2862 \right) + j \left(X_e + \frac{3}{2} X_a - \frac{3}{2} X_{d(gg')} \right) \text{ ohms/milla} \quad (E.11)$$

e) IMPEDANCIA MUTUA DE SECUENCIA CERO ENTRE UN CABLE DE GUARDIA Y UN CIRCUITO TRIFASICO

$$Z_{omgp} = 0.2862 + j(X_e - 3X_d) \text{ ohms/milla} \quad (E.12)$$

$$\text{donde: } X_d = \frac{1}{3}((X_d(ag) + X_d(bg) + X_d(cg))) \quad (E.13)$$

f) IMPEDANCIA MUTUA DE SECUENCIA CERO ENTRE DOS CABLES DE GUARDIA Y UN CIRCUITO TRIFASICO

Igual a Ec. (E.12)

$$\text{donde } X_d = \frac{1}{6} (X_d(ag) + X_d(bg) + X_d(ag') + X_d(bg') + X_d(cg') + X_d(cg)) \quad (E.14)$$

g) IMPEDANCIA MUTUA DE SECUENCIA CERO ENTRE UN CABLE DE GUARDIA Y DOS CIRCUITOS TRIFASICOS

igual a Ec. (E.12)

$$\text{donde: } X_d = \frac{1}{6} (X_d(ag) + X_e(bg) + X_d(cg) + X_d(b'g) + X_d(a'g) + X_d(c'g)) \quad (\text{E.15})$$

h) IMPEDANCIA MUTUA DE SECUENCIA CERO ENTRE DOS CABLES DE GUARDIA Y DOS CIRCUITOS TRIFASICOS

Igual a Ec. (E-12).

$$\begin{aligned} \text{donde: } X_d = \frac{1}{12} & (X_d(ag) + X_d(bg) + X_d(cg) + X_d(a'g) + \\ & + X_d(b'g) + X_d(c'g) + X_d(ag') + X_d(bg') + \\ & + X_d(cg') + X_d(a'g') + X_d(b'g') + X_d(c'g')) \end{aligned} \quad (\text{E-16})$$

La impedancia propia del conductor equivalente se relaciona con la impedancia de secuencia cero de la siguiente manera:

$$Z_{op} = 3 Z_p$$

Entonces, en la subrutina encargada de calcular los parámetros de la red, las ecuaciones correspondientes se dividen por 3 y además se pone en unidades de ohms/Km lo que ^{es} equivalente a proporcionar los datos en ohms/Km.

E.2. IMPEDANCIAS PROPIAS Y MUTUAS DE MULTIPLES CONDUCTORES DE TIERRA

Los cables de guardia y los contrapesos no pueden combinarse debido a la diferencia de tamaño y material de los conductores en los dos grupos, resultando una distribución no uniforme de corriente entre ellos. En este caso será necesario determinar las impedancias totales propias y mutuas por ecuaciones cuya validez sea más general (REF. 1).

Considérese n conductores de tierra como en la FIG. E.1.

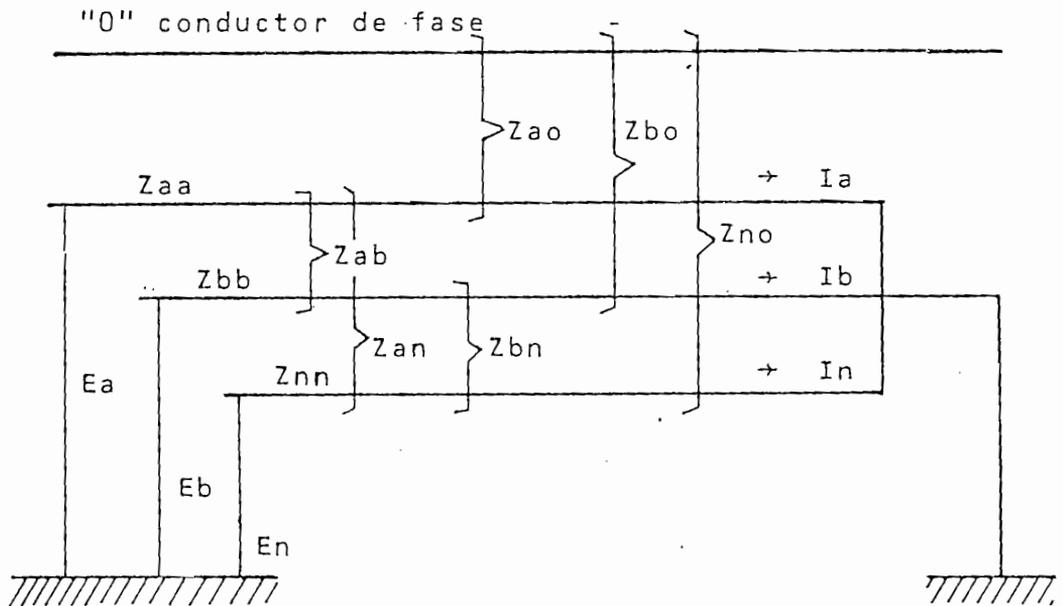


FIG. E.1. Arreglo general de múltiples conductores de tierra

donde los conductores de tierra son cables de guardia y contrapesos.

$$E_a = Z_{aa} I_a + Z_{ab} I_b + \dots + Z_{an} I_n$$

$$E_b = Z_{ab} I_a + Z_{bb} I_b + \dots + Z_{bn} I_n$$

$$\dots\dots\dots$$

$$E_n = Z_{an} I_a + Z_{bn} I_b + \dots\dots\dots + Z_{nn} I_n \quad (E.17)$$

Para un grupo de conductores interconectados en ambos terminales se cumple que:

$$E_a = E_b = \dots\dots\dots = E_n = E$$

y, en tal caso la impedancia propia del grupo puede definirse como:

$$Z_p = \frac{E}{I_a + I_b + \dots\dots\dots + I_n} \quad (E.18)$$

la impedancia mutua entre el grupo y un conductor externo "0" es:

$$Z_m = \frac{I_a Z_{ao} + I_b Z_{bo} + \dots\dots\dots + I_n Z_{no}}{I_a + I_b + \dots\dots\dots + I_n} \quad (E.19)$$

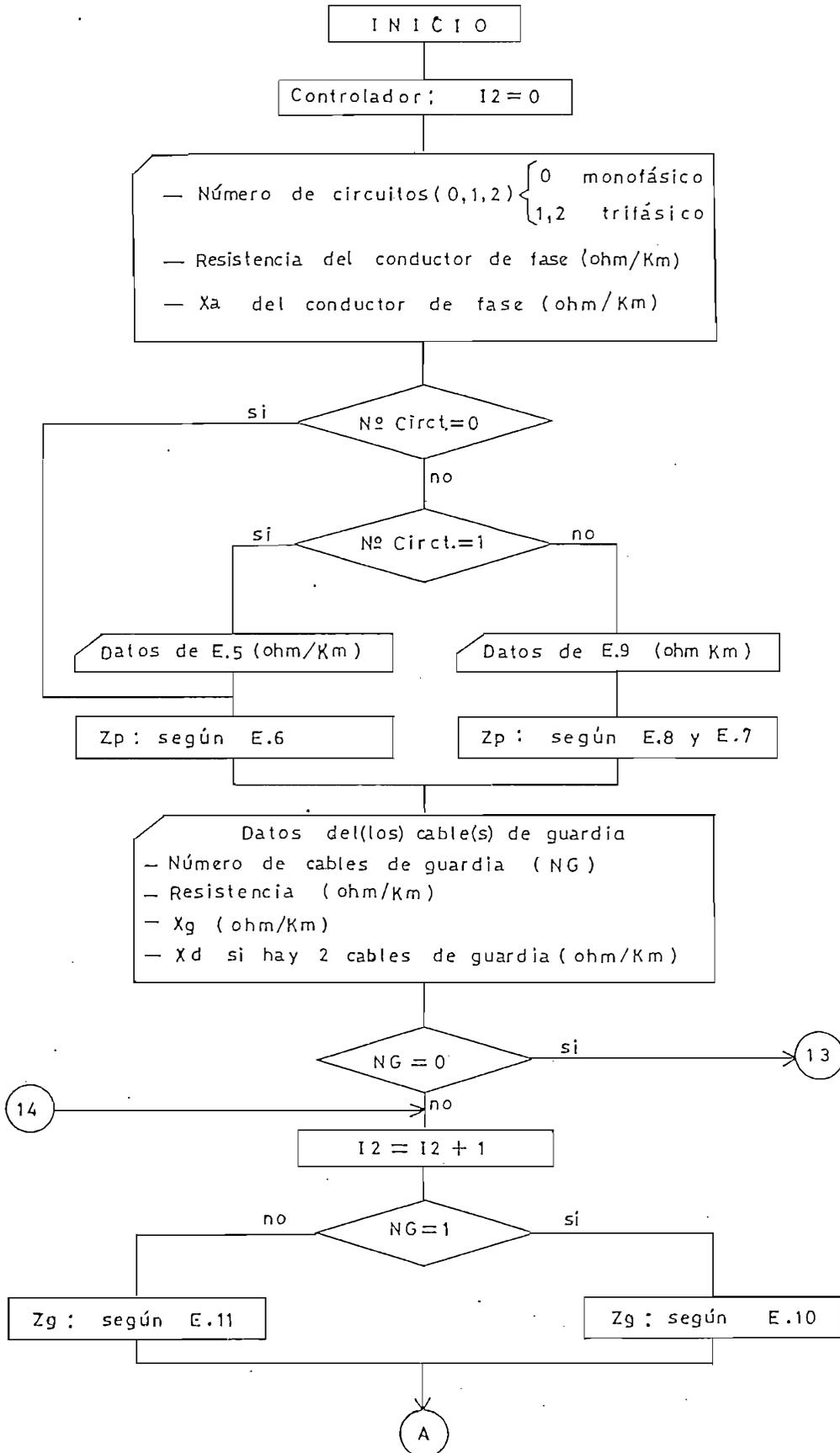
Invirtiendo el sistema de ecuaciones de (E.17), se puede encontrar I_a, I_b, \dots, I_n , lo cual se reemplaza en (E.18) y (E.19), y se obtienen las impedancias buscadas.

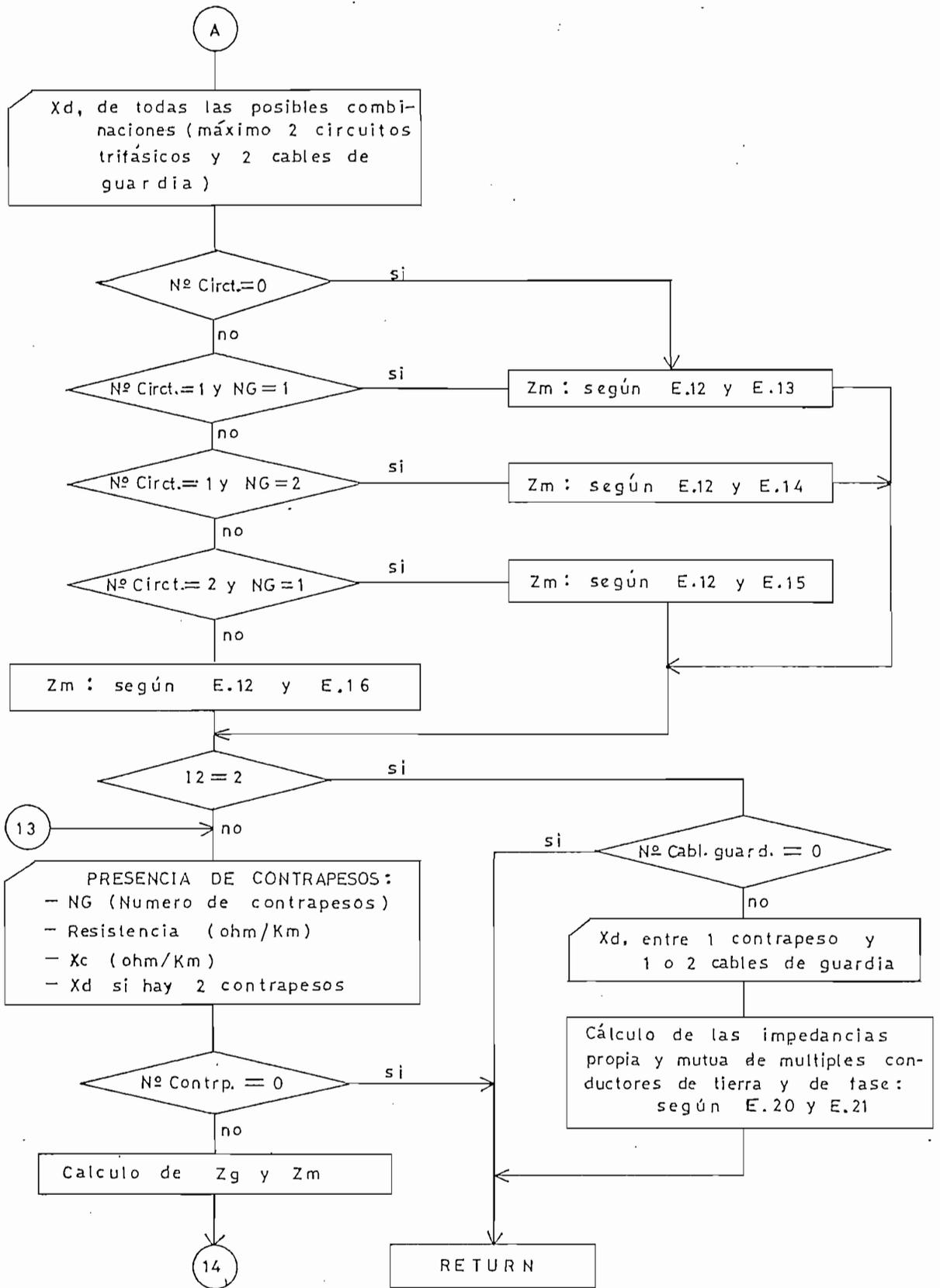
Por ejemplo para $n=2$ (1 cable de guardia y 1 contra peso, caso que se puede dar en este estudio), se obtienen las siguientes expresiones:

$$Z_p = \frac{Z_{aa} Z_{bb} - Z_{ab}^2}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (E.20)$$

$$Z_m = \frac{Z_{ao}(Z_{bb} - Z_{ab}) + Z_{bo}(Z_{aa} - Z_{ab})}{Z_{aa} + Z_{bb} - 2Z_{ab}} \quad (E.21)$$

E.3. DIAGRAMA DE FLUJO DEL CALCULO DE LOS PARAMETROS DE LA RED





NOTA: en esta subrutina no se toma en cuenta el factor X_e , incluido en las ecuaciones a las que se hace referencia, debido a que es función de la resistividad del suelo y, en el programa principal es tratada como una variable, por tanto también X_e , variará.

B I B L I O G R A F I A

1. ENDRENYI, J., "Analysis of Transmissions Tower Potentials During Ground Faults"., IEEE Trans. Vol. PAS-86, N° 10, pp 1274-1282, October 1967
2. ANDERSON, Paul M., "Analysis of Faulted Power Systems", book, The Iowa State University Press / Ames, 1973, pp 71-145
3. DAWALIBI F., BENSTED D., MUKHEDKAR D., "Soil Effects on Graund fault currents ", IEEE Trans. Vol. PAS-100, N° 7, pp 3442-3450, July 1983
4. VIQUEIRA J., "Redes Eléctricas", libro, Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A., Vol 2, pp 25-75, México 1970.
5. *Electrical Transmission and Distribution*, Reference book, East Pittsburgh, Westinghouse Electric Co., 1950, ch.3
- /6. DAWALIBI F., "Graund fault Current Distribution betwen Sail an Neutral Conductors", IEEE Trans., VOL. 99, N° 22, pp 452-461, March/April 1980
7. FORD G.L. SRIVASTAVA K.D., "The Probabilistic Approach to Substation Bus short- Circuit Design", Electric Power

Systems Research, N° 4, pp 191-200, 1981

8. DISTLER R.J., "Monte Carlo Analysis of Systems Tolerance", IEEE Trans. on Education, Vol. E-20, N° 2, pp 98-101, May. 1977
9. CARGUAYTONGO B., "Nuevo Estudio de voltajes peligrosos en Sistemas de puesta a tierra", Tesis de Grado, E.P.N. 1983
10. SUNDE E.D., "Earth Conductions Effects in Transmission Systems", book, New York: Mcmillan, 1968
11. SEBO S.A., "Zero-Sequence Current Distribution Along Transmission lines", IEEE Trans. - Vol-PAS 88, N° 6, June 1969
12. MELIPOULSOS A.P., "Analysis of Graunding Systems", IEEE Trans. Vol PAS-100, N° 3, March 1981, pp 1039-1048
13. VERMA R., "Graund fault Current Distribution in sub-station, Towers and Graund Wire", IEEE Trans. Vol PAS-98, N° 3, pp 724-730, May/June 1979
14. STAGG G.W., "Computer Methods in power systems analysis", New York McGraw-Hill, 1968
15. DAWALIBI F., MUKHEDKAR., "Parametric Analysis of grounding

- grids", IEEE Trans. Vol-PAS-98, N° 5, Sep/Oct 1979, pp 1659-1668
16. DAWALIBI, FINNEY., "Transmission line Tower Grounding Performance in non uniform soils", IEEE Trans., Vol-PAS 99, N° 2, March/April 1980, pp 471-479
 17. ANDERSON J.G., "Monte Carlo Computer Calculation of Transmission line lighting performance". AIEE Trans. Vol 80, 1961
 18. SASIENI, VASTIAN, FRIEDMAN, "Investigación de Operaciones", Editorial Limusa, México, 1974, pp 55-82
 19. FREIRE J., "Experimentación en suelos para el diseño de mallas de tierra", Tesis de Grado 1978, E.P.N.
 20. MEYER, "Probabilidad y Aplicaciones Estadísticas". F.E.I., 1970 pp 259-260
 21. EHV Transmission line reference book, Edison Electric Institute, New York, 1968, pp 291-292
 22. MORA M., "Medidas de seguridad en sistemas eléctricos industriales". Tesis de Grado, 1983, E.P.N.
 23. Programa Nacional de Electrificación Rural, Unidad Ejecutora. (UNEPER), Boletín DC/02, "Líneas Primarias: Car

gas de diseño y dimensionamiento", INECEL, Julio/80,
Quito-Ecuador

24. CARNAHAN B., LUTHER H., WILKES J., "Cálculos Numéricos, Métodos, Aplicaciones", Editorial Rueda, Madrid, 1979, pp 308-309