

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
Dpto. de Ingeniería Eléctrica
BIBLIOTECA
Inv. No. 201-071

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería Eléctrica

"DESARROLLO DE UN SISTEMA DE COM-
PUTACION PARA EL DISEÑO DE LA MALLA
DE PUESTA A TIERRA DE SUBESTACIONES
BASADOS EN LA SEGURIDAD DEL
PERSONAL"

TESIS DE GRADO

Previa a la obtención del Título de:
INGENIERO EN ELECTRICIDAD
ESPECIALIDAD: POTENCIA

Presentada por:

Jorge Enrique Fernández Ronquillo

Guayaquil - Ecuador

1.985

AGRADECIMIENTO

*Mi sincero agradecimiento
al Ing. ALBERTO HANZE B.
Director de Tesis, por su
ayuda y cooperación, para
la realización de este
trabajo.*

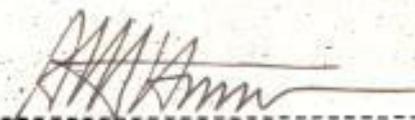
DEDICATORIA

A mis padres

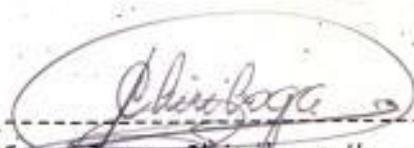
A mi hija



Ing. Gustavo Bermudez F.
SUB-DECANO FACULTAD DE INGENIERIA
ELECTRICA



Ing. Alberto Hanze B.
DIRECTOR DE TESIS



Ing. Jorge Chiriboga V.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL



Ing. Jorge Flores M.
MIEMBRO DEL TRIBUNAL

DECLARACION EXPRESA

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

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


.....
JORGE E. FERNANDEZ RONQUILLO

RESUMEN

Para la elaboración de un sistema de puesta tierra de subestaciones, se elaboró un plan que tiene tres pasos fundamentales:

Diseño Básico: Toma datos preliminares como tiempo de duración de la falla, configuración general de la subestación, características de la resistividad del suelo, resistividad de roca triturada a ras del suelo, voltaje del circuito y la resistencia equivalente vista en el sistema desde la falla.

Ajuste del Diseño: Se ajustan los cálculos anteriores, calculando la corriente de falla, aplicando los factores de decremento para sistemas a tierra, y obteniendo el tamaño del conductor.

Posteriormente, se asumen espacios entre conductores para calcular el número de conductores paralelos, se determinan las constantes K_m y K_i para calcular la nueva longitud del conductor, complementando el diseño con el ajuste producido por las conexiones adicionales de seguridad.

La longitud calculada es la del conductor total incluidas las conexiones adicionales, y debe ser distribuida en toda la malla, conociendo que la separación es el número de metros que el sistema asume al inicio del diseño.

Es razonable que la longitud calculada exceda hasta en un 15% a la longitud del conductor necesaria para ser enterrada. Si algunas de las condiciones no se cumplen, debemos retornar a solicitar la modificación -

del espaciado entre conductores hasta llegar a la situación ideal. Caso contrario tenemos que volver nuevamente al ajuste del diseño; y de ser necesario al diseño básico para reconsiderar los valores que se han asumido, procediéndose al rediseñamiento de la malla de puesta a tierra de la subestación, hasta que los requerimientos de seguridad sean satisfechos.

Cuando ya se tenga el diseño asegurado y los datos consistentes, podemos calcular lo que va a ser el valor definitivo de la resistencia a tierra del sistema.

Finalmente, existe la posibilidad de tomar las variables anteriores y modificar una o varias de ellas, para llegar a una definición precisa de la configuración.

- INDICE GENERAL -

	Pág.
RESUMEN.....	
INDICE GENERAL.....	
INDICE DE FIGURAS.....	
INDICE DE TABLAS.....	
INTRODUCCION.....	
 CAPITULO I: DESCRIPCION DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	
1.1. Generalidades.....	
1.2. Estudio Preliminar.....	
1.2.1. Problemas en seguridad de personal.....	
1.2.2. Límites tolerables del cuerpo humano.....	
1.2.3. Mecanismos de seguridad.....	
1.2.4. La malla como elemento de seguridad.....	
1.3. Determinación de parámetros.....	
1.3.1. Investigación de las características del <u>sue</u> <u>lo</u>	
1.3.2. Máximos valores de corriente de falla.....	
1.3.3. Diámetro, longitud y material del conductor.	
1.3.4. Factores de irregularidad y nonuniformidad...	
1.3.5. Resistencia a tierra del sistema.....	

1.3.6. Determinación de voltajes.....	
1.3.6.1 Voltaje de malla.....	
1.3.6.2 Voltaje de paso en la periferia....	
1.3.6.3 Voltaje interno de paso y de toque.	
1.3.6.4 Voltaje de transferencia.....	
1.4. Diseño preliminar del sistema.....	
1.5. Corrección del diseño.....	
1.6. Elementos del control de seguridad.....	

CAPITULO II: ELABORACION DEL SISTEMA DE COMPUTACION

2.1. Características del sistema.....	
2.2. Diagrama de bloques.....	
2.3. Procesamiento de ejecución.....	
2.3.1. Selección de alternativas.....	
2.3.2. Investigación de características del suelo.	
2.3.3. Determinación de máxima corriente de falla.	
2.3.4. Diseño preliminar del sistema.....	
2.3.5. Cálculo de resistencia de puesta a tierra..	
2.3.6. Cálculo de potenciales máximos y tolerables	
2.3.7. Corrección del diseño preliminar.....	
2.3.8. Chequeo de seguridad.....	
2.3.9. Otras alternativas de variación.....	
2.3.10 Impresión de resultados.....	
2.4. Normas de ejecución y operación del sistema.....	
2.5. Limitaciones del sistema.....	
2.6. Análisis y programación.....	

CAPITULO III: EJEMPLO DE APLICACION

Pág.

3.1. Planteo del problema.....

3.2. Determinación de datos.....

3.3. Codificación de información.....

3.4. Ejecución del programa.....

3.5. Análisis de resultados.....

3.6. Variaciones para nuevas alternativas.....

3.7. Comparación de las variaciones.....

3.8. Manual del usuario.....

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Bibliografía.....

INTRODUCCION

En el diseño de sistemas de puesta a tierra de subestaciones se debe considerar que bajo condiciones de falla, la corriente que circula a tierra va a producir gradientes de potencial en el terreno. Estas corrientes pueden sobrepasar los límites tolerables del cuerpo humano dando como resultado consecuencias graves en las personas que se encuentren en los alrededores del terreno.

Los flujos de corriente podrían tomar valores muy altos, del orden de miles de amperios, debido especialmente al hecho de que los neutros de los equipos se conectan sólidamente a tierra y es por allí justamente que circula la corriente hacia el terreno.

Las circunstancias bajo las cuales ocurren accidentes eléctricos, son consideradas como coincidencias de diversos factores tales como:

1. Corriente de falla excesivamente alta en relación al tamaño del sistema de tierra y a la resistividad del suelo.
2. Resistividad no homogénea del suelo, de manera que sean posible altos gradientes de potencial en algún punto.
3. Presencia de un individuo en ese punto, al momento de ocurrir la falla, y en una posición que haga circular corriente entre dos puntos de un cuerpo con una diferencia de potencial.
4. Ausencia de una suficiente resistencia de contacto o cualquier otra resistencia que limite la corriente que circula a través del cuerpo a un valor bajo los límites de seguridad.

5. Exposición del cuerpo a la falla durante un tiempo suficiente largo para causar daños en ese nivel de intensidad de corriente.

Sin embargo, dado que esto puede ocurrir aunque con muy baja probabilidad, es necesario realizar un diseño que considerando todas las condiciones desfavorables, proporcionen seguridad al personal.

Existen tres factores que influyen en el valor de la resistividad del suelo, causando variaciones importantes en los cálculos que se van a considerar:

- 1.- Composición del terreno
- 2.- Humedad del terreno
- 3.- Efecto de la temperatura

En nuestro caso consideraremos las condiciones más extremas de peligro para limitar el riesgo de exponer al personal a un shock eléctrico.

Los límites tolerables del cuerpo humano están directamente relacionados con la frecuencia, magnitud y duración del flujo de corriente que fluye a través de partes vitales del cuerpo humano.

La frecuencia que consideramos en nuestro estudio es la normal de 60 ciclos por segundo. Generalmente se ha determinado que corrientes a 25 ciclos por segundo pueden ser soportados con valores ligeramente ma yores de corriente, e inclusive en el caso de corriente directa, pue-

den soportarse intensidades de hasta 5 veces mayor.

La magnitud de la corriente es de valor significativo dependiendo del tiempo. La percepción de la corriente ocurre inclusive a niveles de miliamperios, valores entre 9 y 25 miliamperios pueden resultar fatales, causando algunas veces parálisis muscular que impiden al cuerpo humano reaccionar cuando se encuentra en contacto con objetos energizados. Para corriente mayores pueden ocurrir contracciones musculares y dificultades respiratorias que generalmente desaparecen al liberar al cuerpo de la carga eléctrica, pero que causan serios problemas si la corriente toma un tiempo largo fluyendo por el cuerpo humano. Sin embargo a valores de corriente mayores es probable que ocurra inclusive la muerte por paro cardíaco.

La duración del tiempo expuesto al flujo de corriente ha determinado que inclusive altas corrientes puedan ser inofensivas al circular por el cuerpo humano. Los dispositivos de protección de los equipos en una subestación, permite una rápida desconexión del fluido eléctrico para limitar la corriente de falla. Se necesita llegar a una decisión justa para determinar el tiempo de apertura de una falla por medio de los Relés de alta velocidad. La probabilidad que un relay falle es sumamente baja, sin embargo los cálculos consideran el tiempo de apertura del relay de respaldo para evitar que alguna situación de mal funcionamiento cause estragos de graves consecuencias.

Las reconexiones de los sistemas automáticos después de una falla, -

pueden ocasionar una segunda carga eléctrica para el personal, dentro de intervalos de tiempos tan pequeños como medio segundo contados desde que arrancó el primero, con muy pequeña probabilidad de que la víctima se libre de este nuevo impacto. Si la reconexión fuera normal, existe un mayor tiempo para aumentar la posibilidad que no vuelva a ser afectado por el nuevo choque de reconexión. A pesar de que las exposiciones a corrientes eléctricas no son acumulativas para la susceptibilidad del corazón, vale la pena recordar que para que el corazón vuelva a una acción normal necesita al menos 5 minutos después de la aplicación de la corriente.

Otro factor importante es el camino que sigue la corriente a través del cuerpo humano. Cuando la ruta es desde la mano a la pierna, circula a través de órganos vitales incluyendo el corazón. Si la ruta es entre las piernas, es normal que el peligro de una consecuencia fatal sea menor. La relación aproximada de peligrosidad entre las 2 rutas es de 25 a 1, por ello se deben considerar los siguientes factores:

- 1.- Un voltaje entre los dos pies, es doloroso pero no fatal, la falla puede dar lugar a corriente fluyendo a través del pecho, y su peligro depende del tiempo de exposición, el que la falla sea sucesiva y de la reconexión.
- 2.- La persona puede estar trabajando en una posición agachada cuando ocurre la falla.
- 3.- En el caso de animales, la corriente entre la parte anterior y posterior del cuadrúpedo involucra el pecho, y la distancia entre las patas de un animal grande puede ser el doble que la que hay

entre los pies de un hombre, causando una mayor diferencia de potencial.

Todas las consideraciones anteriores a pesar de la relativa poca frecuencia de accidentes, hace necesario que el diseño de una puesta a tierra de la subestación sea por medio de un diseño cuidadoso de la malla a ser utilizada.

CAPITULO 1

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

1.1. GENERALIDADES

El problema generalizado desde el punto de vista económico y de la seguridad de personal en el diseño de mallas de puesta a tierra de subestaciones, causa molestias permanentes cuando se utilizan métodos empíricos para el cálculo y construcción basados en una resistencia de tierra estimada.

Se debe tomar en consideración que reducir el valor de la resistencia de tierra puede ser extremadamente caro, y sin embargo no necesariamente va a producir seguridad suficiente al personal. Por el contrario en cambio, es factible tener un alto valor de resistencia de tierra suficiente para garantizar los límites de seguridad a un precio inferior que el caso anterior.

Sin embargo se debe considerar que los cálculos e investigaciones que a continuación se describen son referencias útiles que ayudan al diseño de la malla de puesta a tierra, sin que esto constituya una garantía absoluta de seguridad, dado que por muy sofisticado que sea el cálculo, es imposible considerar todas las alternativas posibles, ni reunir todos los factores que intervienen dentro de las fórmulas matemáticas que predicen el comportamiento en condiciones de falla.

Esta tensión se suele llamar tensión de contacto. Como se puede ver disminuye a medida que disminuye r_1 , y para r_1 igual a r_A toma el valor de cero.

Si estando en P el hombre toca el conductor V, la diferencia de potencial en su cuerpo será igual a la caída IR entre el electrodo imaginario de radio r_1 , y el de radio infinito, es decir,

$$V_{trans} = IR_{100} = \frac{\rho I}{2\pi} \frac{1}{r_1} \quad (1.3)$$

A esta tensión se suele llamar tensión de transferencia.

Su valor es cero si P se halla a una gran distancia del electrodo A. Alcanza un máximo cuando P coincide con A. En este caso su valor es igual a la tensión suministrada por el generador.

Consideremos ahora al hombre M_2 que camina sobre la superficie y que, al dar un paso, toca el suelo simultáneamente en dos puntos separados una distancia de 1 metro. La diferencia de potencial entre sus pies es igual a la caída óhmica IR entre dos electrodos semiesféricos, uno de radio r_1 y otro de radio $(r_1 + 1)$. Esta tensión se suele llamar tensión de paso y viene dada por:

$$V_{paso} = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1+1} \right) \quad (1.4)$$

En donde:

V_{trans} = tensión de transferencia en voltios

I = corriente que circula por el electrodo en amperios

ρ = resistividad de la tierra en Ohm-metros

r_1 = distancia del hombre al electrodo en metros

R_1 = distancia del electrodo a un punto muy distante

V_{paso} = tensión de paso en voltios

r_A = radio del electrodo en metros

Si r_1 es mucho mayor que la unidad, la tensión de paso es, aproximadamente,

$$V_{paso} = \frac{\rho I}{2 \pi} \frac{1}{r_1^2} \quad (1.5)$$

siendo r_1 mayor que r_A .

Las suposiciones y estimaciones se han hecho sobre valores usualmente válidos, e incluye factores que dan un margen de seguridad bastante altos.

1.2. ESTUDIO PRELIMINAR

1.2.1. Problemas en seguridad del personal.

Siempre que haya corrientes hacia tierra a través de electrodos, se presentan tensiones que pueden ser peligrosas para el personal y para los equipos que se encuentran en las proximidades de los mismos. Estas tensiones se muestran en la Fig. 1.1. Se observa un electrodo metálico semiesférico A de radio r_A , concéntrico con otro electrodo B, también semiesférico y además hueco, supuesto de radio infinito. Un generador G envía la corriente I hacia la tierra por intermedio del electrodo A. El retorno de dicha corriente al generador tiene lugar por el electrodo B. Supongamos que un hombre está parado sobre la superficie del suelo en P, a una distancia r_1 de A, y que toca el conductor X. La tensión a que se halla sometido es igual a la caída IR entre el electrodo A y una superficie semiesférica imaginaria de radio r_1 . De la Ec. 1.1. se obtiene el valor de esta caída.

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1.1)$$

$$IR = \frac{\rho I}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} - \frac{1}{r_1} \right) \quad (1.2)$$

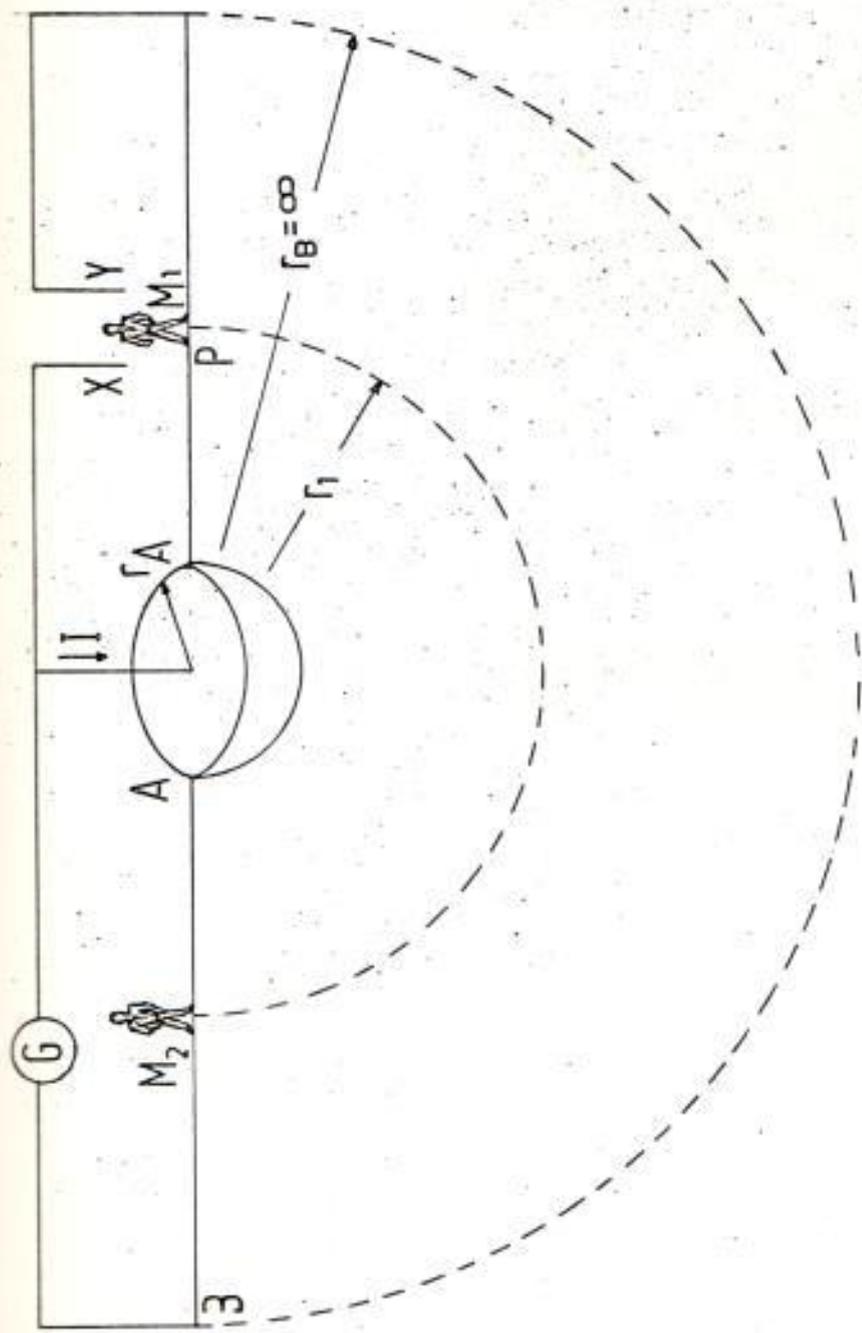


FIGURA 1.1

REPRESENTACION DE LAS TENSIONES DE TOQUE Y TRANSFERENCIAS CON UN ELECTRODO DE TIERRA

Las circunstancias consideradas anteriormente se parecen mucho a lo que ocurre en la práctica.

Una persona queda sometida a la tensión de contacto si, estando parada sobre el suelo, toca un objeto metálico cualquiera conectado a un electrodo de toma de tierra. Esto le puede ocurrir a un operario que esté fuera de la subestación y utilice una herramienta con toma de tierra en el sistema principal.

Queda sometido a la tensión de transferencia un hombre que, estando parado sobre un cuerpo conectado a tierra, haga contacto con un cable telefónico que va hasta una estación lejana.

Queda sometido a la tensión de paso al caminar hacia el electrodo de toma de tierra o al separarse de él.

Las consideraciones anteriores se hicieron tomando como ejemplo un electrodo semiesférico. Sin embargo, las conclusiones son igualmente válidas en el caso de una varilla hincada u otra forma cualquiera de electrodo.

Pueden citarse muchos ejemplos en los que la corriente en los electrodos de tierra ocasionan daños a los aislamientos de los equipos de potencia o de comunicaciones.

Los daños más característicos son posiblemente los debidos a las tensiones originadas entre equipos conectados a tierra - en una estación y las líneas telefónicas conectadas a otra - estación distante.

El estudio de una toma de tierra de dos electrodos es de gran ayuda para comprobar el comportamiento característico de un sistema múltiple en general. Consideremos la Fig. 1.2 en donde A y B son dos electrodos semiesféricos de radios r_A y r_B respectivamente, y que se suponen enterrados a ras de tierra y separados una distancia S. Las corrientes respectivas, I_a e I_b , circulan por ellos hacia tierra. La corriente de retorno proviene de un extenso electrodo en forma de artesa semiesférica no indicada en la figura.

Supongamos que los efectos de las corrientes I_a e I_b se puedan superponer linealmente. Esto significa que cada una de ellas fluye radialmente de cada electrodo, sin que interacción. Esta consideración es cierta siempre que S sea suficientemente grande, respecto de r_A y de r_B . (si S es del orden de r_A o de r_B , se requieren métodos más avanzados de análisis). Conociendo el valor de resistencia de la ecuación (1.6), la tensión en A, respecto de un punto alejado de referencia, debida a I_a viene dada por la Ec. (1.6), es decir,

$$r = \frac{\rho}{2\pi r_A} \quad (1.6)$$

$$V_{Aa} = I_a \frac{\rho}{2\pi r_A} \quad (1.7)$$

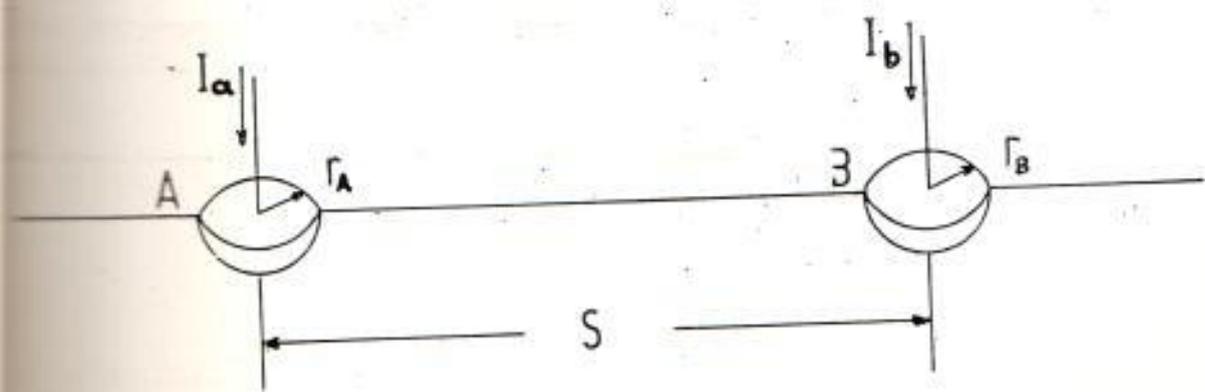
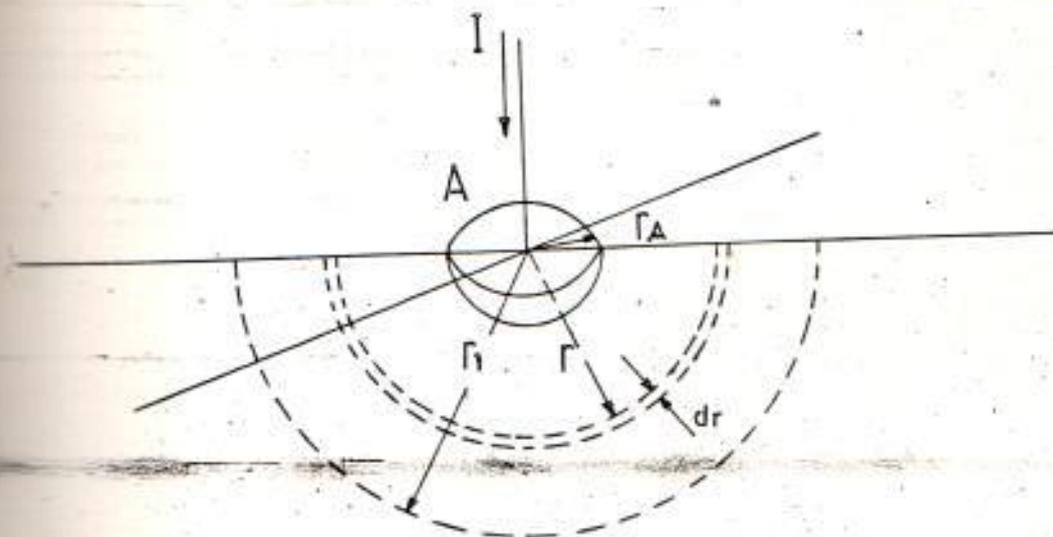


FIGURA 1.2

REPRESENTACION DE LA CORRIENTE CUANDO LLEGO AL SUELO A TRAVES DE UN ELECTRODO Y SU INFLUENCIA SOBRE OTRO A UNA DISTANCIA.

La tensión en A debida a la corriente I_b , es la tensión de transferencia debida a la corriente I_b , y está dada por la E. (1.3)

$$V_{Ab} = I_b \frac{\rho}{2\pi S} \quad (1.8)$$

La tensión en A debida a las dos corrientes I_a e I_b , es la sumatoria, esto es,

$$V_A = I_a \frac{\rho}{2\pi r_A} + \frac{\rho}{2\pi S} I_b \quad (1.9)$$

Análogamente, la tensión en B debida a I_a y a I_b , es

$$V_B = I_a \frac{\rho}{2\pi S} + I_b \frac{\rho}{2\pi r_B} \quad (1.10)$$

Las Ecs. (1.9) y (1.10) pueden ser consideradas como las ecuaciones básicas aplicables a un sistema de dos electrodos. Como forman un sistema en I_a , I_b , V_a y V_b , conocidas dos de estas variables, se deducen las otras dos.

Consideremos ahora el circuito de la Fig. 1.3 en el cual se conocen los valores R_1 , R_2 y R_3 . De las mallas indicadas, se pueden escribir las Ecs. (1.9) y (1.10). Se deduce, que las tres resistencias dadas son equivalentes en su funcionamiento eléctrico, a los dos electrodos del sistema de toma de tierra de la Fig. 1.2. A base de este circuito equivalente, se determina con rapidez el valor de la resistencia correspondiente a la asociación en serie de los dos electrodos de la Fig. 1.2, como se muestra en la Fig. 1.4b. Dicha resistencia en serie es

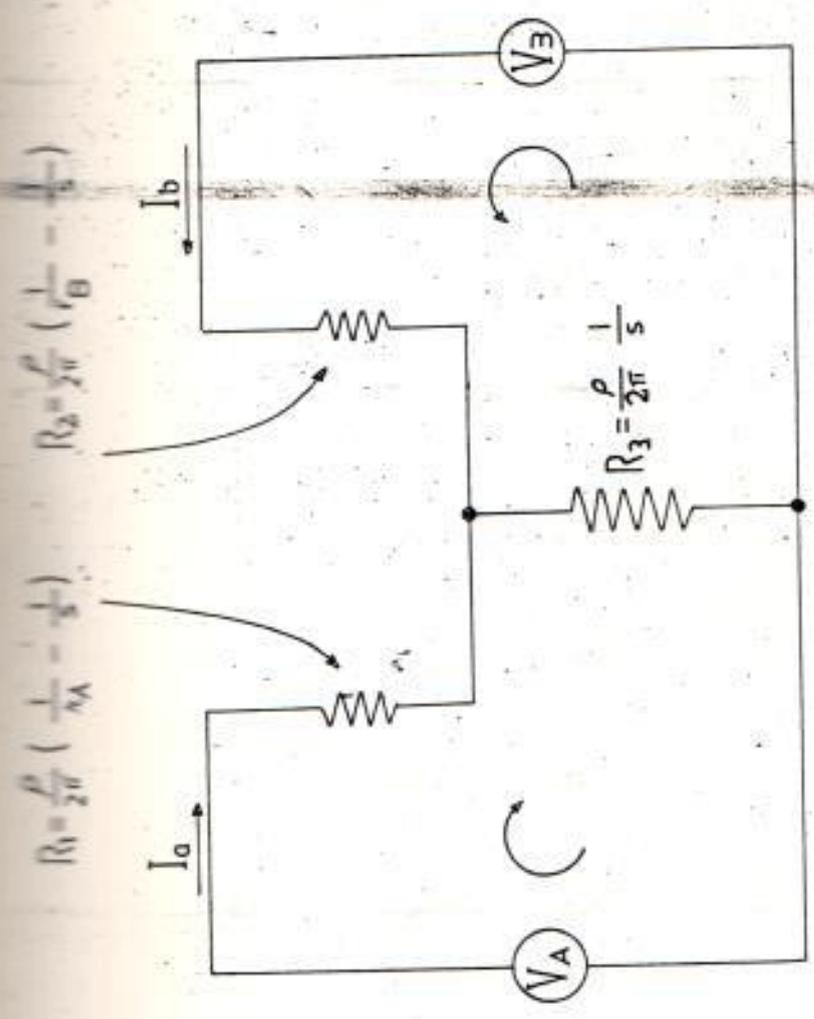


FIGURA 1.3

CIRCUITO EQUIVALENTE A DOS ELECTRODOS SEPARADOS UNA DISTANCIA S CUANDO CIRCULAN POR ELLOS CORRIENTES I_a e I_b RESPECTIVAMENTE.

$$R_{\text{series}} = R_1 + R_2 = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{r_A} + \frac{1}{r_B} - \frac{2}{S} \right)$$

(1.11)

Análogamente se estudia el comportamiento de los mismos electrodos de la Fig. 1.2, pero suponiéndolos asociados en paralelo, como se indica en la Fig. 1.5a. En la Fig. 1.5b se representa el circuito equivalente correspondiente. A base de este circuito, se obtiene la resistencia paralelo, suponiendo $r_A = r_B = r_K$, en la forma

$$R = \frac{\rho}{2\pi} \left(\frac{1}{2r_K} + \frac{1}{2S} \right)$$

(1.12)

En relación con las Ecs. (1.11) y (1.12), se ve que existe una influencia mutua entre los dos electrodos de tierra. En el caso de la asociación en serie, la resistencia medida es menor que la suma de las dos, la del electrodo A y la del B, suponiendo estos dos valores independientes. Solo en el caso de que la separación sea tan grande que el término $2/S$ se pueda despreciar, se verifica la condición de serie simple. Análogamente, para los dos electrodos en paralelo se cumple su condición cuando la distancia entre ellos es muy grande.

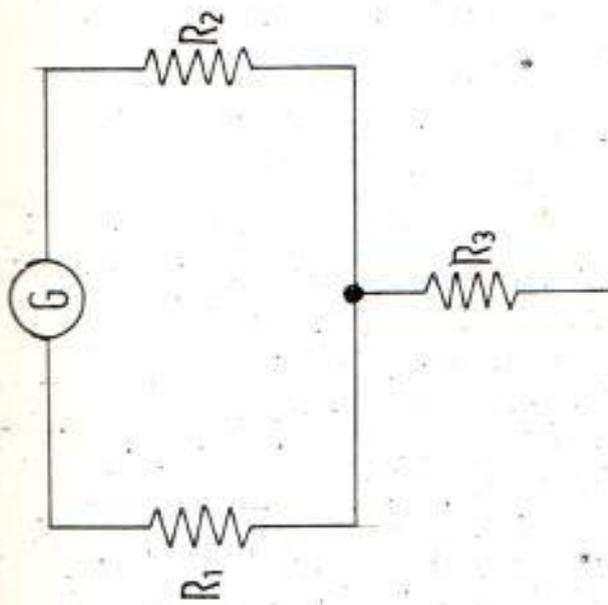
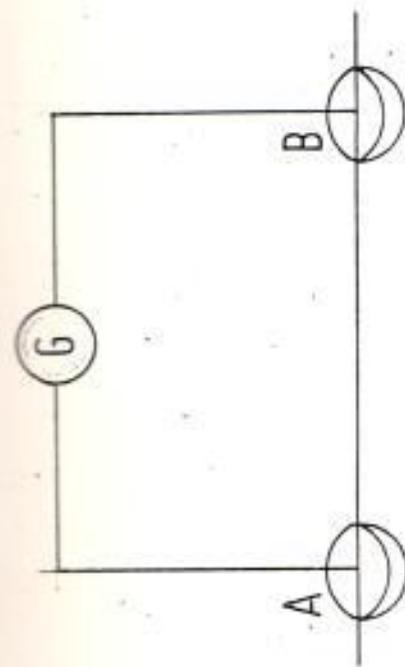


FIGURA 1.4

CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DE CONEXION EN SERIE DE DOS ELECTRODOS SEPARADOS UNA DISTANCIA S

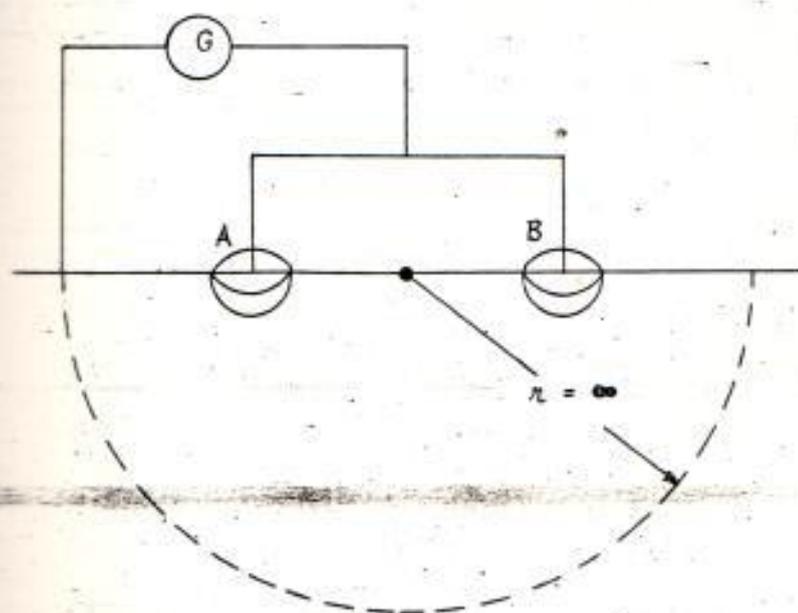


Figura 1.5 a

CIRCUITO EQUIVALENTE SIMPLIFICADO DE CONECCION EN PARALELO DE DOS ELECTRODOS SEPARADOS UNA DISTANCIA S.

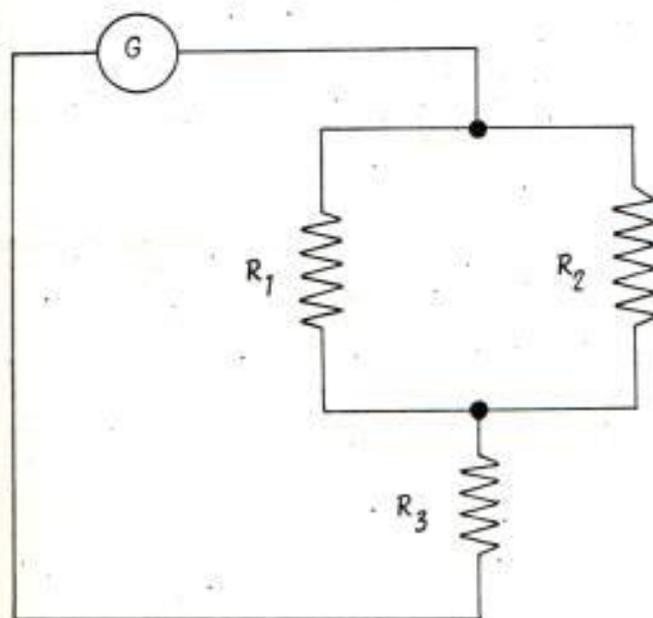


FIGURA 1.5 b

1.2.2. Límites tolerados del Cuerpo Humano.

El paso de una corriente eléctrica a través del cuerpo humano produce daños de diferente gravedad según la duración y la intensidad de la misma.

La tabla I muestra varios rangos de corriente a 60 Hz y los efectos fisiológicos y sensibles que producen en un hombre de unos 70 Kg.

Cualquier corriente por arriba de 10 mA puede ser fatal; entre 75 mA y 4 A la probabilidad de muerte es muy alta debido a la descoordinación del corazón, y por encima de ese valor los efectos predominantes son quemaduras no necesariamente fatales.

Como ya se ha mencionado el tiempo de exposición es un elemento importante en los daños producidos por el paso de la corriente. Los valores de corriente mostrados en la Tabla I pueden ser multiplicados por un factor mayor que 1 si la duración del shock es inferior a 3 seg. con los mismos efectos fisiológicos, por lo menos en cuanto a la fibrilación ventricular se refiere. De experimentos llevados a cabo por Daizeil en la Universidad de Columbia con exposiciones de 0.03 a 3 segundos de duración, se ha derivado la siguiente fórmula empírica, que relaciona la combinación de valo-

res de corriente y tiempo por debajo de los cuales estadísticamente el 99.5% de los hombres adultos normales no sufrirán fibrilación ventricular; de acuerdo al IEEE 80:

$$I_k^2 t = 0.027 \quad (1.13)$$

donde " I_k " es la corriente en Amperios a través del cuerpo y " t " el tiempo, en segundos, de exposición a la misma. De acuerdo a los conceptos antes explicados, la empleamos como base para el diseño.

Las condiciones bajo las cuales es más común una exposición a las gradientes de potencial nos permiten definir tres tensiones peligrosas: tensiones de paso, de toque y de transferencias que se muestran en las Figuras 1.6, 1.7 y 1.8.

Se ha determinado que un valor razonable para " R_f ", la resistencia de contacto de 1 pie (con zapato) sobre el suelo es igual a " $3 \rho_s$ ", siendo " ρ_s " la resistividad de la capa superficial del mismo. Asimismo, un valor razonable para la resistencia del cuerpo humano " R_k " es de 1000 ohms.

De las figuras 1.6, 1.7 y 1.8 se puede decir que:

$$E_{\text{paso}} = I_k (R_k + R_f) \quad (1.14)$$

TABLA N° I

<u>Corriente</u>	Fenómeno <u>Fisiológico</u>	Sensación o incidencia <u>fatal</u>
< 1 mA 1 mA	Ninguno Umbral de la percepción.	Imperceptible
3 mA		Sensación mediana no do- lorosa.
10 mA	Umbral de la parálisis de los brazos	No se puede liberar el objeto cogido. (Puede - aumentar la corriente con consecuencias fatales). Si no se ha cogido un ob- jeto la víctima puede ser repelida.
30 mA	Parálisis respiratoria.	Se paraliza la respiración (probablemente fatal).
75 mA	Umbral de la fibrilación ventricular 0.5% de los casos.	La actividad del corazón se descoordina (frecuente- mente fatal).
150 mA	Umbral de la fibrilación ventricular 99.5% de los casos.	
4 A	Umbral de la parálisis del corazón sin fi- brilación ven- tricuar.	El corazón se paraliza du- rante el paso de la corrien- te, restituyéndose la norma- lidad al cesar la misma (u- sualmente no es fatal debi- do a falla cardíaca).
5 A	Quemadura de la piel.	No es fatal a menos que se quemem órganos vitales.

EFFECTOS CAUSADOS POR LA CORRIENTE QUE CIRCUA A TRAVES DEL CUERPO
HUMANO DENTRO DE RANGOS DE VALORES.

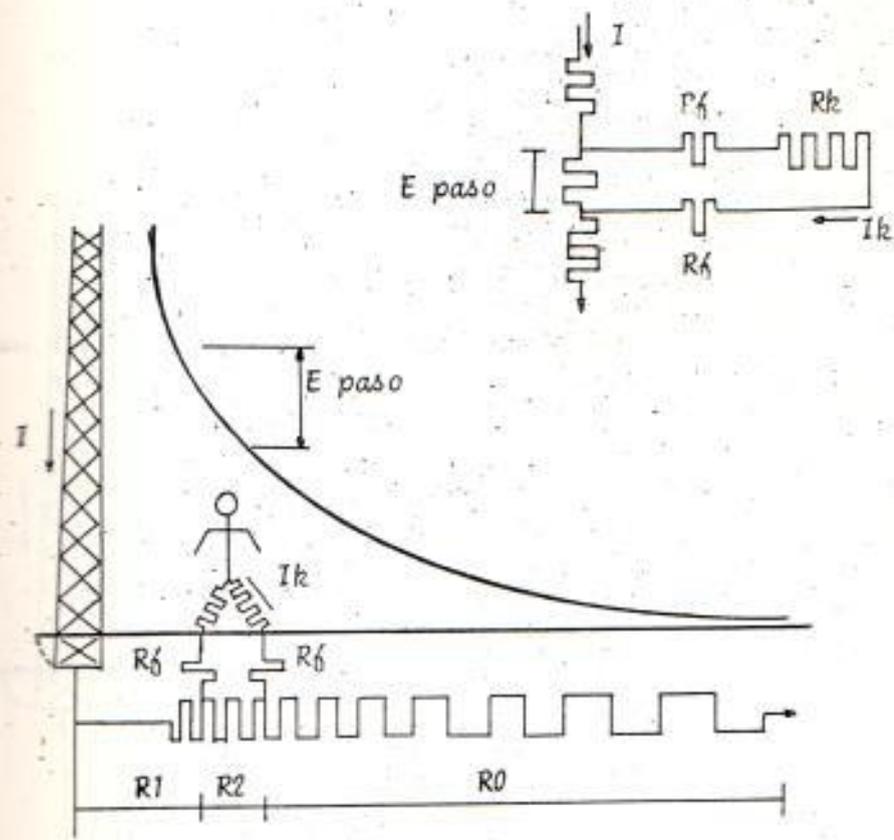


FIGURA 1.6

REPRESENTACION DE LAS RESISTENCIAS INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACION DEL VOLTAJE DE PASO.

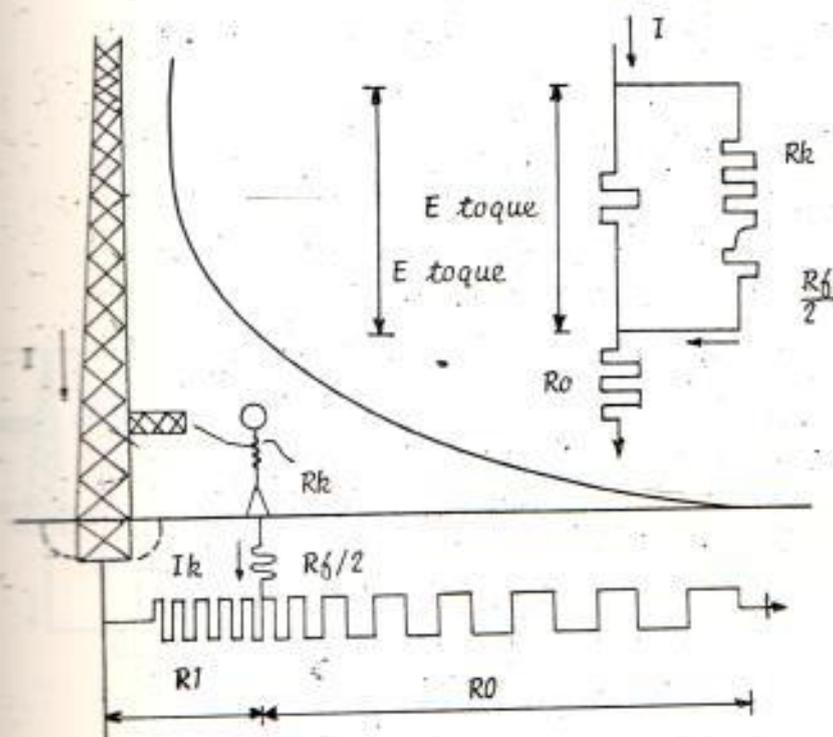


FIGURA 1.7

REPRESENTACION DE LAS RESISTENCIAS INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACION DEL VOLTAJE DE TOQUE.

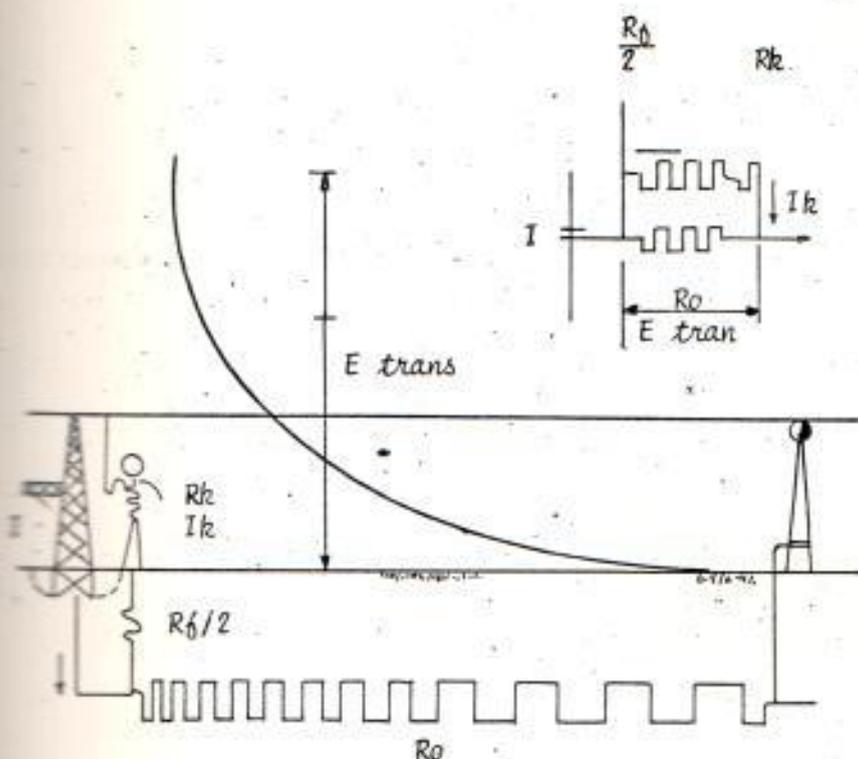


FIGURA 1.8

REPRESENTACION DE LAS RESISTENCIAS INVOLUCRADAS EN LA DETERMINACION DEL VOLTAJE DE TRANSFERENCIAS.

$$E_{\text{toque}} = I_k \left(R_k + \frac{P_f}{2} \right) \quad (1.15)$$

$$E_{\text{transferencia}} = I_k \left(R_k + \frac{R_f}{2} \right) \quad (1.16)$$

Tomando los valores de " R_f " y " R_k " anteriormente mencionados, podemos determinar los valores de tensión tolerables para cada una de las tensiones:

$$E_{\text{paso}} = \frac{165 + P_s}{\sqrt{t}} \quad (1.17)$$

$$E_{\text{toque}} = \frac{165 + 0.25 P_s}{\sqrt{t}} \quad (1.18)$$

$$E_{\text{transferencia}} = \frac{165 + 0.25 P_s}{\sqrt{t}} \quad (1.19)$$

Las variables que afectan al diseño del sistema de tierra son las siguientes:

1. Límites tolerables, que ya fueron definidos anteriormente.
2. Resistividad del terreno.
3. Área cubierta por el sistema de tierra
4. Magnitud de la corriente de falla.
5. Tiempo de eliminación de la falla
6. Eventualidad de tensiones de transferencia.

1.2.3. Mecanismos de Seguridad.

Al diseñar y construir un sistema de tomas de tierra se -

puede considerar la posibilidad de cumplir con ciertas especificaciones en cuanto a la resistencia del sistema ya construido. Parece, a primera vista, que si se colocan bastantes electrodos en el terreno, la resistencia del sistema podría hacerse tan pequeña como se quisiera.

Es evidente que esto no sería realizable si el área disponible para la construcción fuera limitada. Este aspecto se trata de manera más sencilla teniendo en cuenta la conductancia del sistema en lugar de su resistencia. El intento de reducir esta resistencia a un valor especificado implica el mismo esfuerzo que aumentar su conductancia hasta un determinado valor.

Las limitaciones en el diseño de un sistema de electrodos de tomas de tierra en un área restringida son claras al considerar como base un sistema de un cierto número de varilla hincadas en el terreno. Supongamos un número de varillas de 19 mm por 6.10 m dispuestas en un área limitada. La conductancia del sistema aumenta cada vez que se agrega una nueva varilla. Con todo, la conductancia de dos varillas es un poco menor que el doble de una sola. Al seguir agregando varillas, la conductancia aumenta, pero con una velocidad decreciente.

La Figura 1.9 representa la relación entre la conductancia de un grupo de varillas y la de una sola, en función del

RELACION ENTRE LA CONDUCTANCIA DE UN GRUPO DE VARILLAS Y LA DE UNA SOLA, EN FUNCIÓN DEL NÚMERO DE ELLAS, PARA DIFERENTES ÁREAS.

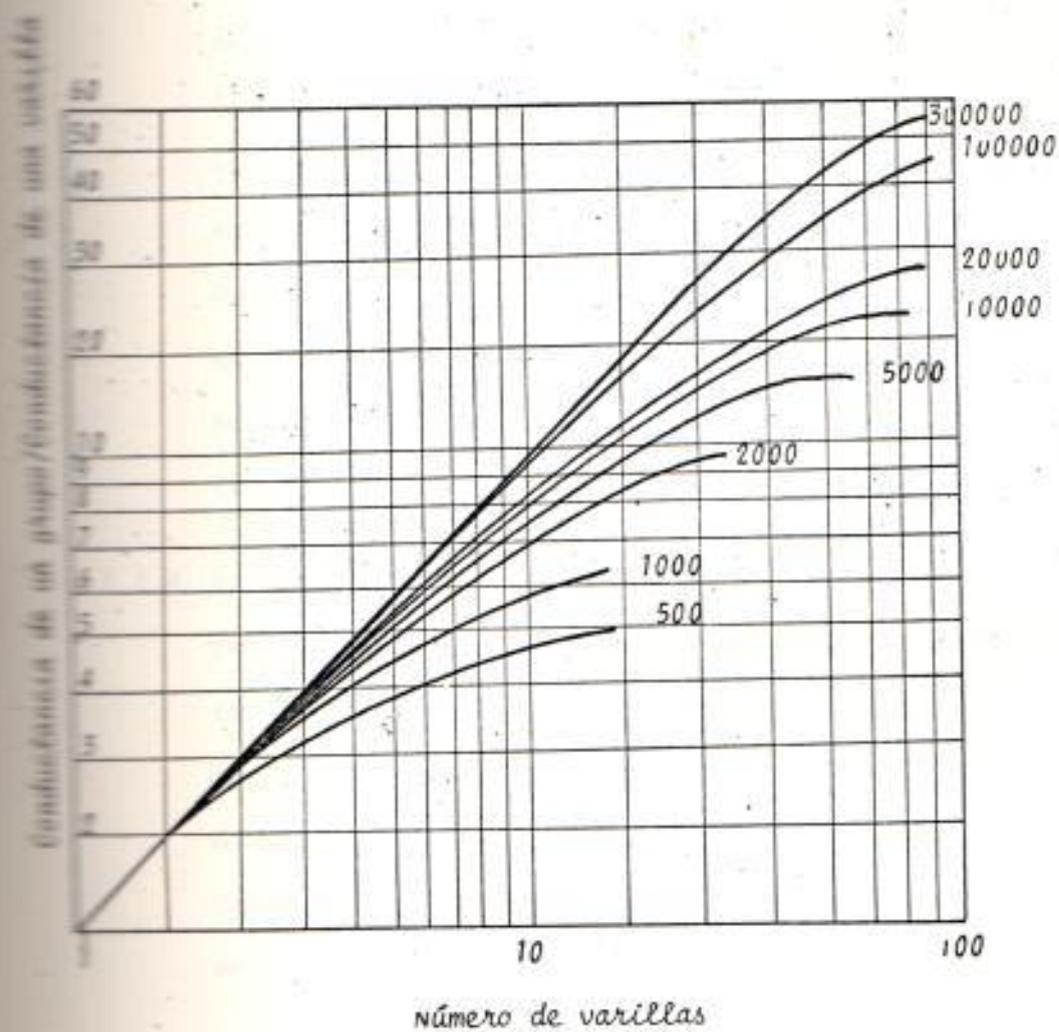


FIGURA 1.9

- * Los números sobre las curvas son las áreas del terreno en metros cuadrados.

número de ellas. Cada curva corresponde a un área diferente de terreno disponible. Se puede observar, por ejemplo, que para una superficie de 500 m^2 , el conjunto de 10 varillas tiene una conductancia de unas 4.7 veces la de una sola. Para la misma superficie, un número infinito de varillas presenta una conductancia 4.9 veces la de una sola. Este razonamiento aparece más lógico al considerar un número infinito de varillas hincadas en un área de 500 m^2 , el cual equivaldría a un electrodo en forma de caja metálica de 10 m de profundidad que ocupara completamente la superficie de 500 m^2 . Esta caja podría compararse con un electrodo semiesférico de la misma superficie.

1.2.4. La malla como elemento de seguridad.

En algunos casos, los sistemas de electrodos consisten en emparrillados formados por alambres enterrados horizontalmente. En esta disposición, al aumentar el emparrillado, aumenta la conductividad del conjunto. Dicha conductividad, sin embargo, no puede ser mayor que la de una placa metálica de las mismas dimensiones perimetrales.

En algunos casos se emplea un emparrillado de alambres enterrados horizontalmente en combinación con varillas hincadas en el terreno. En la Tabla II se dan las conductancias relativas de varios sistemas de electrodos, restringidos cada uno de ellos a un área de 30 m^2 . Debe prestarse a -

tención a las limitaciones inherentes a la conductancia de los sistemas de electrodos para tomas de tierra a fin de evitar un gasto innecesario de tiempo y materiales al intentar obtener una conductancia inalcanzable.

Existen métodos digitales de cálculo para determinar la resistencia de un sistema de electrodos de tomas de tierra - de cualquier configuración. La programación y análisis correspondiente se encuentran fuera del alcance de la presente tesis. Prácticamente, todos estos métodos se basan en la hipótesis de que la resistividad del terreno es uniforme, condición que casi nunca se cumple. Por este motivo, la gran precisión de los métodos de cálculo no es de gran ayuda en nuestro caso.

El diseño de sistemas de electrodos para tomas de tierra - también se puede hacer por medio de modelos a escala. Uno de estos puede construirse sobre una lámina de madera prensada de 10 mm de espesor para colocarlo en la superficie - de un lago o de una piscina.

Cuando se utilice un modelo, es necesario determinar las relaciones de escala. Considérese un electrodo semiesférico. Al duplicar su radio, el volumen se multiplica por 8 y la superficie por 4; su resistencia se divide por 2 o su conductancia se multiplica por 2. Análogamente, si todas

TABLA N° II

Conductancias de algunos sistemas de electrodos de tomas de tierra comparadas con las de una sola varilla. Area de terreno de 30 x 30 metros.

ESTRUCTURA*	Conductancia relativa
1 varilla	1.0
4 varilla	3.6
9 varillas	8.75
Emparrillado de 1 malla	7.0
Emparrillado de 4 mallas	7.6
Emparrillado de 25 mallas	8.7
Placa de 30 x 30 m.	10.0
Emparrillado de 25 mallas más 9 varillas	10.0
Placa de 30 x 30 m. y 6 m. de profundidad	12.1
Esfera de 30 m. de diámetro	16.1

* Las variables son de 2.5 cm. de diámetro y 6m. de profundidad. Los cables de los emparrillados son de 2.5 cm. de diámetro enterrados 6 cm.

las dimensiones de una varilla se multiplican por 2, su conductancia también se duplica.

Se demuestra que esta forma de las relaciones se conserva para todos los sistemas posibles de electrodos de tomas de tierra. Si todas las dimensiones lineales de los elementos de un sistema se multiplican por un factor su conductancia queda multiplicada por el mismo factor. Esta circunstancia indica la sencillez del estudio de los sistemas de electrodos por medio de los modelos a escala.

2.3. DETERMINACION DE PARAMETROS

2.3.1. Investigación de las características del suelo.

La ubicación de una estación, normalmente incluirá al menos una determinación de la composición general del suelo, a menudo a una razonable profundidad, utilizando para ello un taladrador del suelo.

Los métodos que sean empleados usualmente nos van a proporcionar una idea adicional acerca de la homogeneidad del suelo con el cual estamos trabajando.

Dentro de la literatura investigada, encontramos algunas tablas que nos muestran rangos de resistividad para varios tipos de suelos y rocas. La Tabla III llamada Rudemberg tiene la ventaja de ser expuesta en forma simplificada.

Las estimaciones basadas en las características del suelo nos permitirán solamente una aproximación de la resistividad. Las pruebas eléctricas de resistividad son mucho más deseables de acuerdo a lo que se expuso en la sección anterior. Debemos considerar que estas pruebas deberán ser realizadas no en un solo sitio, sino tomando varios puntos con diferentes distancias entre los electrodos, para conseguir valores que nos proporcionen datos de las variaciones de la resistividad en toda el área que estamos investigando. Es deseable también realizar las pruebas de medición a diferentes profun

TABLA N° IIIPROMEDIO DE RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

TIPO DE TIERRA	RESISTIVIDAD EN OHMIOS-METROS
tierra orgánica húmeda	10
tierra húmeda	10^2
tierra seca	10^3
tierra rocosa	10^4

didades.

En aquellos sitios donde encontramos mayores variaciones, se deben realizar más mediciones que en esos donde observamos uniformidad, en forma muy especial, donde los valores de resistividad son tan altos que pueden ocasionar problemas de seguridad del personal.

Donde la resistividad varía apreciablemente con la profundidad de enterramiento de los electrodos, es preferible realizar una serie de pruebas a diferentes niveles, que tomar valores muy espaciados y encontrar los puntos medios con interpolación, porque esto nos va a garantizar una mejor precisión en los cálculos.

El método de medición que vamos a utilizar, se basa en la ecuación 1.20 descrita por el Dr. F. Wenner.

$$\rho = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}} \quad (1.20)$$

en donde:

ρ = resistividad del suelo en OHM-METROS

R = resistencia en OHMIOS que resulta de la división del voltaje aplicado en los electrodos de prueba, por la corriente que fluye entre los electrodos.

B = profundidad de enterramiento de los electrodos en METROS.

Si B es muy pequeño comparado con A , como es el caso de los electrodos enterrados a una pequeña profundidad, la ecuación 1.20 queda simplificada de la siguiente manera:

$$\rho = 2 \pi AR \quad (1.21)$$

La determinación de las ecuaciones anteriores se hará en el hecho de asumir una resistividad homogénea del suelo. Sin embargo es frecuente que la resistividad medida varía con el espaciamiento de los electrodos, por lo que el asumir $B \ll A$ está dentro de los límites aceptables de precisión.

Usualmente se indica que la resistividad del suelo varía con la profundidad a la cual se realicen las pruebas, por ello, los flujos de corriente cercanos a la superficie se hacen a distancias pequeñas de electrodos, y las pruebas de flujo de corriente profundas, se realizan a grandes separaciones entre los electrodos.

Es costumbre asumir en tales casos de variación, que la resistividad aparente medida para un cierto espaciado de electrodos a una distancia A , represente la resistividad promedio del suelo a una profundidad A . Esta costumbre no es rigurosamente exacta, pero es aceptable para la mayoría de

los propósitos prácticos en el cálculo de la puesta a tierra de subestaciones.

Las condiciones para reducir la estratificación de la tierra se las puede proveer por medio de dos o más capas de tierra que van a variar los valores de las pruebas realizadas, reduciendo las variaciones de resistividad.

Los instrumentos que se utilizan para medir la resistencia de tierra que sirven para el método de los cuatro electrodos pueden ser los mismos que utilizamos para determinación de la resistividad del suelo.

La medición de esta resistividad deberá incluir los datos de temperatura, la información sobre la humedad del suelo y las demás condiciones al momento en que se midió la resistividad. Todos los datos disponibles de los electrodos que han sido enterrados así como aquellos que sospechamos pueden producir variaciones en el área estudiada, deberían ser anotados para el análisis.

Se debe tener especial cuidado en tomar las mediciones cuando el suelo ya ha sido tratado o si ya existe una malla de puesta a tierra, debido a que esto puede invalidar los datos tomados, excepto si la profundidad que medimos es tan alta que no cause errores considerables.

Adicionalmente a los métodos de medición de campo de la resistividad, es posible también medirla en laboratorio por medio del método de los cuatro electrodos, o midiendo la resistencia entre las causas opuestas de un recipiente de longitud y área conocidas. La dificultad de este método consiste en poder tomar muestras representativas de toda el área, y de mantener las mismas condiciones de mezcla y compactación en todas las pruebas.

La representación esquemática de un electrodo de tierra se lo indica en la figura 1.10. La tierra actúa como un conductor que tiene una cierta resistividad con un dieléctrico.

Si la tierra es homogénea, la geometría, incluyendo la ruta de la corriente y por supuesto la localización de la superficie equipotencial son idénticas. Sin embargo para bajas frecuencias en combinación con altas resistividades, el efecto de la capacitancia es despreciable y la tierra puede ser considerada como resistencia pura.

La resistividad de la tierra se eleva violentamente cuando la temperatura llega a 0°C , sin embargo es raro el caso de corrientes fuertes durante bastante tiempo porque el punto de ebullición del agua puede ser alcanzado en los alrededores de los electrodos. Tales condiciones raramente son encontradas en las instalaciones actuales.

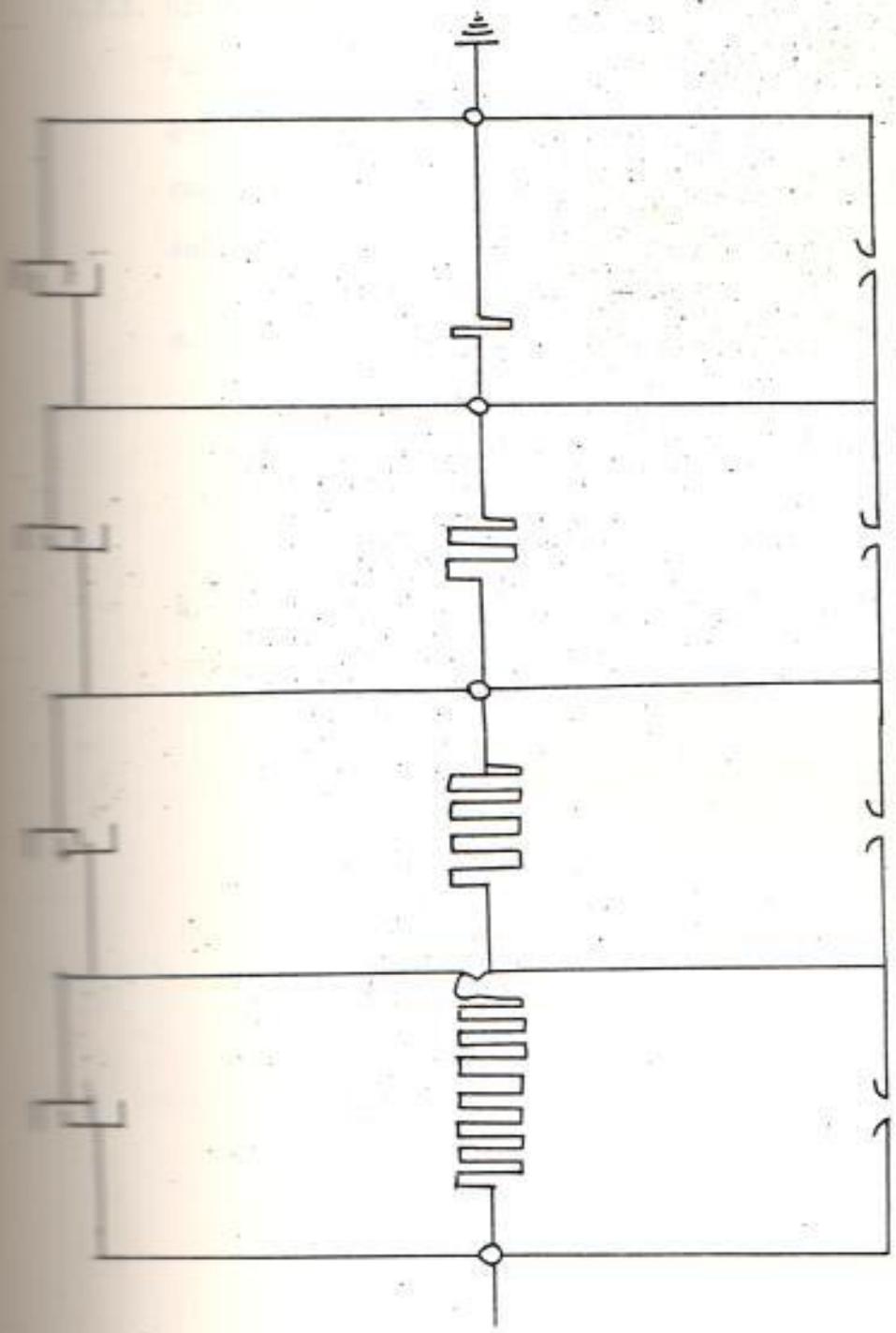


FIGURA 1.10

REPRESENTACION ESQUEMATICA DE UN ELECTRODO DE TIERRA CONSIDERANDO LA TIERRA COMO RESISTENCIA Y DIELECTRICO

1.3.2. Máximos valores de corrientes de falla.

Vamos a enumerar a continuación los pasos que se deben seguir para calcular el valor correcto de corriente de falla que debe utilizarse en un sistema de puesta a tierra de subestaciones.

- a.- Determinar cuales son las fallas a tierra posibles que resultarán de un flujo grande de corriente entre la malla y la tierra en los alrededores. Algunas de las fallas principales se indican en la figura 1.11.
- b.- Determinar por análisis de fallas el máximo valor de corriente rms simétrica de la falla a tierra que fluye entre la malla y la tierra al momento del inicio de la falla por medio de la ecuación 1.22.

$$I = \frac{\sqrt{3} E}{3R + 3R_f + (R_1 + R_2 + R_0) + j(X_1 + X_2 + X_0)} \quad (1.22)$$

En la mayoría de los casos, el efecto de la resistencia en la ecuación anterior es despreciable para propósitos prácticos y se utiliza la ecuación 1.23 en forma simplificada, la misma que proporciona la suficiente precisión, además de ser más conveniente.

$$I = \frac{\sqrt{3} E}{X_1 + X_2 + X_0} \quad (1.23)$$

Otras líneas de transmisión

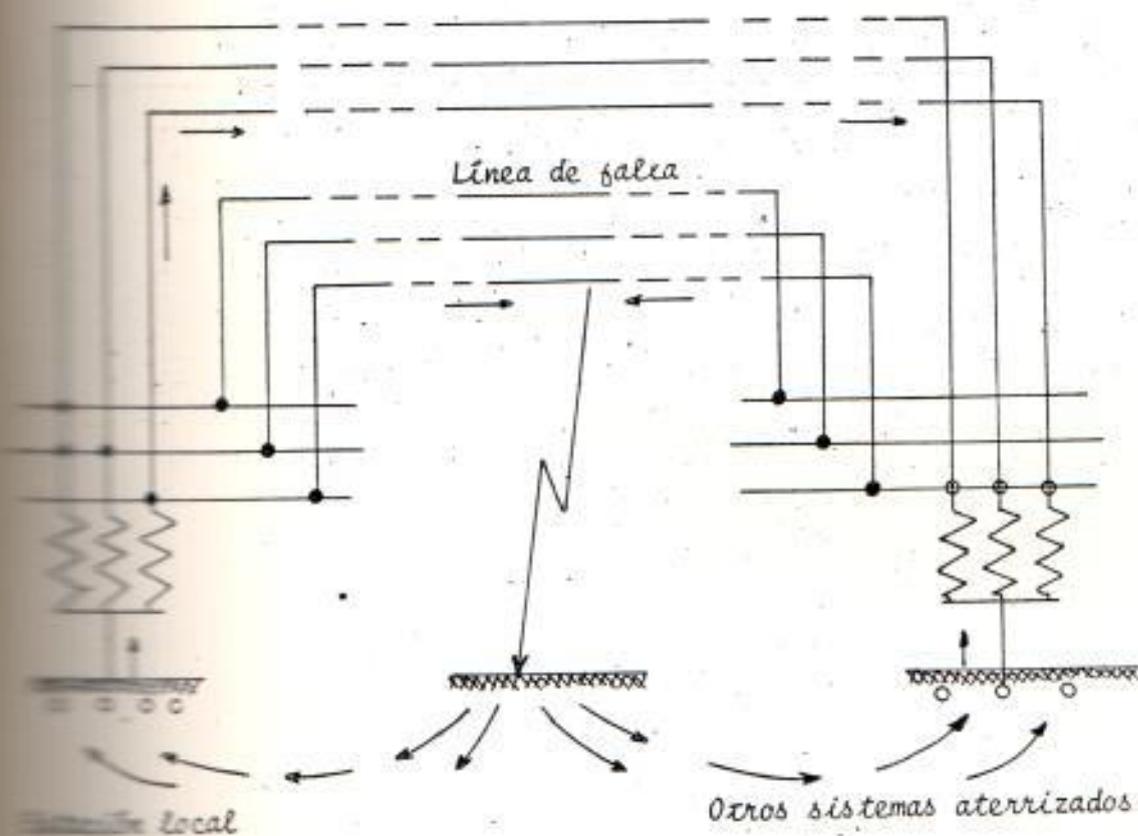


FIGURA 1.11

REPRESENTACION DE LAS FALLAS A TIERRA POSIBLES, RESULTANTES DE UN GRAN FLUJO DE CORRIENTE ENTRE LA MALLA Y LA TIERRA EN LOS ALREDEDORES.

en donde:

I = Valor rms simétrico de la corriente de falla a tierra en el instante del inicio de la falla, en amperios.

E = Potencial de líneas, en voltios.

R = Resistencia estimada a tierra de sistemas aterrizados, en ohmios.

R_f = Resistencia estimada mínima de la falla misma, en ohmios.

R_1 = Resistencia de secuencia positiva, en ohmios.

R_2 = Resistencia de secuencia negativa, en ohmios.

R_0 = Resistencia de secuencia cero, en ohmios.

X_1 = Reactancia de secuencia positiva, en ohmios por fase.

X_2 = Reactancia de secuencia negativa en ohmios por fase.

X_0 = Reactancia de secuencia cero, en ohmios por fase.

Los cálculos se realizan excluyendo cualquier corriente que no fluye entre la estación local y la tierra.

- c.- Aplicar el factor de corrección apropiado, para considerar el efecto del corrimiento de la componente de la corriente directa. Cuando ocurre un cortocircuito, el momento exacto de ocurrencia es

totalmente al azar con respecto a la onda de voltaje; para permitir que asumamos las condiciones más severas, es necesario tomar un desplazamiento del 100% de la onda.

Los datos tomados de las mediciones, se harán en ondas senoidales de amplitud constante, es necesario determinar un valor rms de una onda seno simple de corriente por medio de la fórmula 1.24.

$$I'' = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_F^2 dt} = D I \quad (1.24)$$

donde se obtiene la ecuación 1.25

$$D = \frac{1}{I} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_F^2 dt} \quad (1.25)$$

en las ecuaciones anteriores:

I'' = Valor rms ajustado de la corriente de falla a tierra, en amperios.

T = Tiempo de duración de la falla, en segundos.

t = Tiempo después de iniciada la falla, en segundos.

i_f = Valor instantáneo de la corriente de falla en el tiempo.

D = Factor de multiplicación, llamado factor de decremento para corregir el efecto del desplazamiento de la corriente directa.

El valor de la integral de arriba depende de la tasa de atenuación de los componentes de las corrientes alternas y directas.

Las estandarizaciones americanas toman el factor de multiplicación al final del primer medio ciclo como 1.6, y así sucesivamente 1.4, 1.2, 1.1 y 1.0 en períodos de tiempo de 1, 2, 3 y 4 ciclos respectivamente.

Una simplificación similar aproximada resulta cuando aplicamos a la ecuación 1.25 el resultado de los factores de decremento como se indica en la tabla IV, donde para valores intermedios de tiempo - de duración de la falla se debe realizar una interpolación lineal.

Los factores de decremento de la tabla IV no deben ser confundidos con los valores proporcionados por las estandarizaciones americanas, debido a que la tabla es utilizada para determinar la corriente efectiva durante un intervalo de tiempo dado despues de iniciada la falla, mientras que las estandarizaciones americanas son utilizadas para determinar la corriente rms al final del intervalo.

Debido a la caída de los componentes de las corrien

TABLA N° IV

<u>Relación de falla y Shock</u>		<u>Factor de decremento</u>
T		D
<u>Segundo</u>	<u>Ciclos (60 ciclos de corriente alterna)</u>	
0.25	1 / 2	1.65
0.5	6	1.25
0.75	15	1.10
1.0 o más	30 o más	1.00

RELACION ENTRE LA DURACION DE LA FALLA Y EL FACTOR DE DECREMENTO

tes alterna y directa por el tiempo, los factores de decremento de la tabla 71 son ligeramente mayores que los de las estandarizaciones americanas para fallas de corta duración.

Para fallas con duración relativamente altas, el efecto de la componente de corriente directa puede asumirse que está desplazado por el decremento de la corriente alterna, por lo tanto un factor de decremento de 1 es correcto cuando el tiempo de duración de la falla es de 30 o más ciclos.

- d.- Aplicar un factor de corrección apropiado para considerar futuros incrementos en las corrientes de falla debido a la expansión del sistema por nuevas interconexiones que se realicen; porque si no se provee algún margen en el diseño original del sistema, posteriormente podríamos tener inseguridad por lo ajustado del mismo.

Es usualmente muy prudente asumir un factor de corrección para los sistemas de tierra disminuyendo el valor de la impedancia del sistema usado en los cálculos, o simplemente multiplicando el valor de la corriente de falla calculada por un factor apropiado que va a depender de las expectativas de

crecimiento de la subestación.

1.3.3. Diámetro, longitud y material del conductor.

El calibre del conductor deberá ser tal que pueda soportar la corriente de falla para el máximo tiempo posible de la misma sin fundirse ni malograr los empalmes. Para 4 segundos, el calibre del conductor debe ser de, por lo menos 0.508 mm. de diámetro por Amp, cuando se usan uniones soldadas.

Para los efectos de poder determinar la mínima longitud de conductor a ser enterrado, definimos una nueva tensión, aparte de las definidas anteriormente que llamaremos tensión de malla, la cual es la máxima tensión que se puede presentar entre el centro de un rectángulo formado por los conductores de la malla de tierra y la malla misma. La definición de esta tensión nos permitirá cubrir la eventualidad de que un operador esté parado en cualquier parte de la subesta-

ción por ejemplo, y pueda tocar con algún elemento metálico algunas de las estructuras en el momento en que se produce una falla. Laurent' establece para los rangos usuales de tamaño de conductor, profundidad de enterramiento y espaciamiento la tensión de malla. Está dada por la siguiente ecuación:

$$E_{\text{malla}} = \rho \frac{I}{L} \quad (1.26)$$

donde " ρ " es la resistividad del terreno en ohms-m. " I " es la corriente en amperes que fluye hacia el terreno y " L " la longitud de conductor enterrado. Para tomar en consideración la conformación real de la malla de tierra proyectada, usamos además el factor " K_m " o factor de forma de la malla, que está definido por la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ell_n \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ell_n \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots \text{etc.} \quad (1.27)$$

donde " D " es el espaciamiento en metros entre conductores, " d " el diámetro del conductor y " h " la profundidad de enterramiento.

El número de factores entre paréntesis es igual al número de conductores paralelos en la malla, menos dos.

Para tomar en consideración el flujo irregular de corriente

hacia el terreno, aplicamos el factor " K_i ", que está definido por la siguiente ecuación:

$$K_i = 0.65 + 0.172 n \quad (1.28)$$

donde " n " es el número de conductores paralelos en una dirección, excluyendo los amarres transversales. La aplicación de estos factores a la ecuación número 1.26 la convierte en:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \rho \frac{I}{L} \quad (1.29)$$

De la igualación de la tensión de malla así definida con la máxima tensión de toque tolerable dada en la ecuación (1.18) obtenemos la expresión que nos permite determinar la mínima cantidad de conductor a ser enterrado considerando la seguridad del personal.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{165 + 0.25 \rho_s} \quad (1.30)$$

La resistividad superficial del terreno se estima en 3.000 ohms-m, que es el valor que tiene la piedra triturada o grava para condiciones de máxima humedad.

La tensión de toque se controla enterrando conductores alrededor de las estructuras, de tal manera que cualquier individuo sujeto a esta tensión esté parado sobre terreno a un potencial semejante al de la estructura adyacente.

3.4. Factores de irregularidad y nonuniformidad.

Mucha de la literatura en la investigación precedente, fueron con condiciones más o menos idealizadas, tales como la resistividad uniforme de la tierra o las mallas simétricas cuadradas o rectangulares de tamaño uniforme.

Aún bajo estas condiciones idealizadas, la longitud del conductor a través del cual fluye la corriente puede variar, siendo mayor en los lados que en el centro de la malla, y mayor aún en las esquinas. Los gradientes de potencial van a variar también de acuerdo a ello.

Para hacer el problema más dificultoso, las instalaciones prácticas raramente están conformes con la idealización de tener uniformidad en la geometría y la resistividad. Esto sin embargo no significa que el problema es insalvable, sino que es necesaria una buena concepción de los factores

que causan la irregularidad y un conocimiento profundo de - como ellos operan. Es posible aplicar un factor de correc- ción que aunque no es preciso, sea adecuado para propósitos prácticos.

Para la determinación de los factores, nos ayudaremos de - los reportes de Koch y Armstrong, realizados en modelos a escala en tanques de agua. Koch tiene dibujados para dife- rentes configuraciones de mallas de tierra, los voltajes al centro de la malla desde lugares remotos, como un porcenta- je del voltaje de pico total IR de la malla. Nuestro inte- rés ahora es conocer las diferencias de potencial locales, tomando los valores límites del 100% de los reportes de -- Koch, tal como se indican en la figura 1.12, donde observa- mos las diferencias de potencial entre la grilla y varios - centros de los cuadrados formados por las varillas de la ma- lla, nuevamente como un porcentaje del voltaje de pico de - la malla IR.

Sin embargo, es necesario cuantificar la relación entre el potencial de malla con P , I y L , en otras palabras, algo - que nos ayude a evaluar el factor de irregularidad K_i de - las ecuaciones utilizadas en esta tesis.

Desafortunadamente, Koch no reportó la resistencia de gri- lla, corriente, o resistividad del agua para las distintas

		45	45		30	23	23	30
					23	20	20	23
		45	45		23	20	20	23
					30	23	23	30

Grilla A

Grilla B

Grilla C

20	17	15	16		20	16	15	16
15	13	13	14	35	15	13	12	13
15	13	12	13		15	12	12	12
16	14	13	14		16	13	12	13
				41	43			
						41	43	

Grilla D

Grilla E

Grilla F

Grilla	A	B	C	D	E	F
Total Conductor Grilla Longitud "L" en metros	55.2	82.8	138.0	248.4	117.3	120.7
Resistencia "R" en Ohms por metro de resistividad	0.0518	0.0467	0.0419	0.0382	0.0434	0.0430

FIGURA 1.12

DIFERENCIAS DE POTENCIALES LOCALES ENTRE LA MALLA Y VARIOS CENTROS DE LOS
CORRIMIENTOS FORMADOS POR LAS VARILLAS DE MALLA COMO UN PORCENTAJE DE PICO DE
TENSION DEL

pruebas. Fue necesario calcular la resistencia de grilla u utilizada, de manera que el voltaje de pico total IR quede expresado como una función de ρ , I y L . Estas resistencias fueron obtenidas utilizando el método de Schwarz's y fue chequeado usando el de Laurent'.

La multiplicación de cada uno de estos valores calculados por un correspondiente porcentaje de la figura 1.12, obtenemos los coeficientes que se indican en la figura 1.13, los cuales son el resultado de las constantes K_m y K_i , que multiplicadas por $\rho I/L$, nos da el valor del potencial de malla, en voltios.

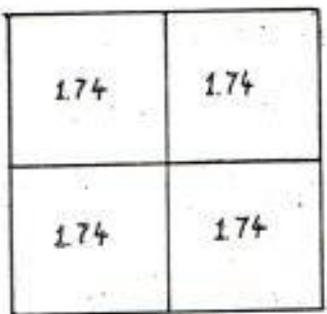
Es interesante anotar que los resultados de las pruebas realizadas por Armstrong en una red de 9 mallas son completamente consistentes con los resultados obtenidos de las pruebas de Koch.

Los coeficientes para las mallas C y D, funcionan aproximadamente bien para el voltaje de malla con K_m y K_i igual a la unidad. Esto confirma la necesidad mencionada anteriormente de usar un factor K_i que tome en cuenta los mayores gradientes en las esquinas o en las proyecciones de las periferias.

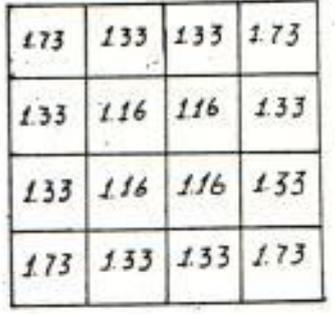
En lo que concierne a gradientes internos, estos pueden ser mantenidos dentro de los límites tolerables, manteniendo el



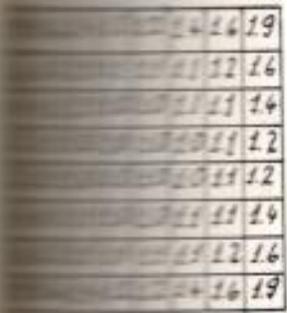
Grilla A



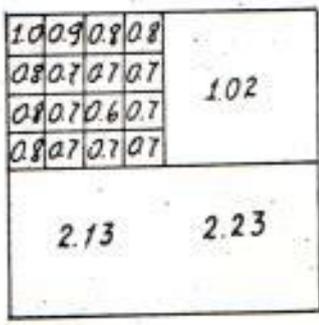
Grilla B



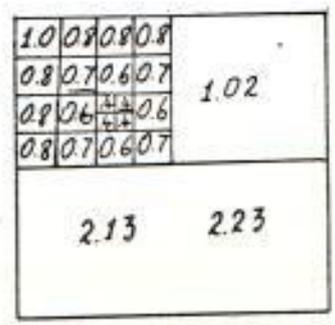
Grilla C



Grilla D



Grilla E



Grilla F

GRILLA	A	B	C	D	E	F
valor como el regis- tro arriba $K_M \times K_I$	1.83	1.74	1.73	1.90	2.23	2.23
Coefficiente K_M Computado con método de Schwarz's	1.82	1.50	1.18	0.86	1.50	1.50
$K_I = \frac{K_M \times K_I}{KM}$	1.00	1.16	1.47	2.21	1.49	1.49

FIGURA 1.13

RESULTANTES DE LAS CONSTANTES K_M Y K_I PARA DIFERENTES CONFIGURACIONES DE MALLAS.

espaciado a través de la estación razonablemente uniforme y suficientemente cerrado de manera que el potencial de malla aún en las esquinas esté dentro de los límites aceptables.

Un estudio de la figura 1.13, sin embargo sugiere una posibilidad alterna de utilizar un ancho de la malla, en la mayoría del área y cerca de las esquinas de un tamaño adecuado que corrija la no uniformidad.

En la figura 1.13 se indica los valores calculados en base a la distribución uniforme de los conductores de la grilla, y requiere revisión en casos donde el espaciado del conductor es muy irregular. Se puede ver que la grilla E con un 42% más de conductores que la del espaciado uniforme de la malla B, tiene un potencial máximo de 25% mayor en términos $P/I/L$.

Otro factor que debe ser tratado en forma cuidadosa es la no uniformidad de la resistividad del suelo, la misma que varía de muchas maneras.

Si la superficie de la tierra tiene menor conductividad que la profundidad de la misma, la mayor parte de la corriente será orientada a las capas superiores, en forma diferente a lo que predice si la resistividad fuera uniforme.

Lo opuesto también es cierto si las capas profundas son más conductoras, especialmente si los sistemas de tierra tienen un contacto efectivo con ellas. La resistividad en cualquier nivel dado, puede variar horizontalmente sobre el área en consideración.

Si la resistividad usada en los cálculos es de alguna manera igual al promedio de la de la subestación, estará en parte autocompensada. Mientras que la corriente tiende a fluir hacia las áreas de menor resistividad, en cambio esta baja resistividad resultará en una menor caída de voltaje entre los pies para una densidad de corriente dada. Por otro lado, cambios violentos de resistividad a lo largo de la ruta del flujo de corriente, puede resultar en gradientes de potencial inesperados.

En general, ajustes adicionales al factor K_i son apropiados cuando ocurren grandes variaciones en las resistividades, si estas son conocidas o sospechadas.

La mayor parte de los estudios de los problemas de aterrizajes asume un potencial uniforme a lo largo de la subestación, esto implica que la caída de voltaje longitudinal en los conductores de la grilla es despreciable con respecto al de la tierra y circuitos externos.

2.3.5. Resistencia a tierra del Sistema

Este cálculo de la resistencia a tierra del sistema necesitará ser ajustado en pasos posteriores; porque inicialmente es solo una aproximación que no considera la malla ya instalada.

Generalmente no es necesaria una alta precisión, especialmente donde los datos del suelo no sea uniforme. Existen varias formas de calcular la resistencia, tales como los propuestos por GROSS y sus asociados, por SCHWARZ, y Rudenberg.

Nosotros utilizaremos el método simple empleado por Laurent y Niemann, el cual usa una modificación de la fórmula del electrodo en forma de placa circular. La ecuación para calcular la resistencia de tierra consta de 2 términos como se indica:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad (1.31)$$

en donde:

r = radio de una placa circular que tiene la misma área que es ocupada por la malla, en metros.

L = Longitud total del conductor enterrado, en metros.

ρ = resistividad del terreno en ohm - metros

En la ecuación, el segundo término reconoce la diferencia del efecto que tiene la resistividad de la grilla al ser conductores en lugar de una placa circular, y que esta dife-

rencia disminuye a medida que la longitud del conductor aumenta, llegando a ser cero, únicamente en las condiciones de una placa circular, es decir cuando L tiende a infinito.

1.3.6. Determinación de Voltajes.

1.3.6.1. Voltaje de Malla.

Una vez obtenido el valor de la resistencia, podemos estimar el valor máximo del potencial de malla con respecto a un punto lejano como $E=IR$, donde I es la máxima corriente de cortocircuito en la malla, y R es la resistencia a tierra de la malla.

Para valores muy bajos de resistencia y corrientes de cortocircuito, este voltaje puede ser menor que el valor determinado por los límites de seguridad tolerables, y aún ser menor que los obtenidos por los cálculos de voltajes tolerables por el cuerpo humano en las condiciones más severas.

Si esto ocurre, y debe ocurrir como planteamiento del problema, solamente queda verificar que el valor de la resistencia de malla sea similar al calculado después de la construcción. Frecuentemente el máximo potencial IR excederá el valor de seguridad y debemos investigar los potenciales locales en su orden.

1.3.6.2 Voltaje de paso en la periferia.

Dentro de la malla los voltajes de paso y de toque pueden ser disminuidos a cualquier valor deseado disminuyendo la separación entre conductores de la malla. Teóricamente esto puede ser cero en el caso límite de una placa circular.

La situación es diferente en la zona que se encuentra fuera de la periferia de la malla, donde el problema existiría aún para una placa circular teórica. Este problema puede ser serio en estaciones pequeñas donde la malla puede cubrir solamente una cierta área. Afortunadamente una estación normalmente se diseña para eliminar la posibilidad de establecer contacto fuera de la periferia del sistema de tierra. Las limitaciones en los voltajes de paso son menos exactos.

Laurent ha sugerido que voltajes de paso normalmente tiene un valor de 0.10 a 0.15 veces la corriente para conductores de tamaño, espaciado y profundidad de enterramiento normal. Nieman usa 0.10 a 0.20 veces la corriente. El A.I.E.E. sugiere un coeficiente de 0.20. Sin embargo, estudios posteriores han determinado por medio de datos de prue -

ba que existen muchos casos donde el coeficiente es considerablemente mayor.

De todas maneras aquí, como en el caso de los potenciales de malla vemos que es preferible tomar valores conservativos del factor K_i .

La ecuación más precisa para el voltaje de paso es la siguiente:

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \quad (1.32)$$

donde:

K_s es un coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores, el espaciamiento y la profundidad de enterramiento de los conductores de la malla. Su valor en términos de estos factores es el siguiente:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \text{etc.} \right) \quad (1.33)$$

El número total de términos dentro de los paréntesis es igual al número de conductores paralelos en la malla básica excluyendo conexiones cruzadas. K_i , ρ , I , y L son los mismos que los que se han definido en secciones anteriores.

Un valor entre 1.2 a 1.3 para K_i fue propuesto por Nieman. Esto probablemente sea insuficiente para cubrir las esquinas de la mayor parte de las mallas. Valores más conservativos se pueden asumir especialmente si hay grandes proyecciones en los periféricos de la malla. La densidad de la corriente de falla y los gradientes en la superficie, tienden a aumentar en las esquinas y disminuir en el medio. De acuerdo a Laurent el gradiente externo cerca de las esquinas de la malla puede ser el doble que el que se tiene en la mitad, esta relación disminuye si el número de mallas se disminuye.

Un ajuste adicional de K_i se debe hacer cuando hay que cubrir anomalías en la resistividad de la tierra. Debido a que los potenciales son menos peligrosos que los de otro tipo, no es muy importante tener precisión extrema. Si los potenciales internos son mantenidos dentro de los límites tolerables y si la resistividad de la superficie es comparable dentro y fuera de la subestación, los voltajes de paso en la periferia casi nunca causan problemas.

Sin embargo si existieran problemas deberían resolverse con una capa de roca de alta resistividad extendida a lo largo de la subestación.

1.3.6.3 Voltaje interno de paso y de toque.

Si la longitud total del conductor enterrado es igual al valor calculado con la ecuación 1.30, los voltajes de paso y de toque dentro del perímetro de la malla deberían en general estar dentro de los límites tolerables. Note sin embargo que si usamos capas de roca triturada en la superficie de la subestación no se puede garantizar los voltajes de toque fuera de la malla.

Así mismo el tamaño del conductor, espaciado, y la profundidad de enterramiento deben encontrarse dentro del rango normal de valores, de manera que considere irregularidades en la geometría de la malla y anomalías imprevistas en la medida de la resistividad de la tierra.

En el diseño del sistema de tierra se ha establecido como medida de seguridad un tiempo de aclaramiento de la falla apropiado de acuerdo a la máxima corriente de falla. Pueden ocurrir corrientes por debajo de la sensibilidad de los relays que duran un tiempo muy largo, permitiendo circulaciones de corrientes que se encuentran en rangos peligrosos para el cuerpo humano.

1.3.6.4. Voltaje de transferencias.

Pueden resultar problemas serios durante una falla debido al potencial que se transfiere entre las áreas donde está la malla y puntos remotos conectados por conductores. El peligro es normalmente del tipo de voltajes de toque. La importancia del problema radica en las grandes diferencias de potencial que son posibles por la distancia.

Los voltajes de transferencia puede ser producidos por:

- 1.- Circuitos de comunicación
- 2.- Rieles de ferrocarril
- 3.- Cables de neutro de bajo voltaje
- 4.- Equipos y herramientas portátiles conectados a la subestación.
- 5.- Estructuras de los reservorios de agua.
- 6.- Construcciones auxiliares.

DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA.

Para el diseño preliminar del sistema de puesta a tierra de subestaciones, tomamos como datos:

- Tiempo de duración de la falla en segundos t
- Configuración de la subestación

V_1 - Longitud vertical en metros

H1 - Longitud horizontal en metros

V2 - Longitud vertical en metros

H2 - Longitud horizontal en metros

V3 - Longitud vertical en metros

H3 - Longitud horizontal en metros

V4 - Longitud vertical en metros

H4 - Longitud horizontal en metros

Siempre tomados en secuencia, de acuerdo a la figura 1.14

Naturalmente, hay que indicar la dirección con la notación indicada en la figura 1.15.

De esta manera sabemos que se cierra el cuadro cuando se cumplen las condiciones de las ecuaciones 1.34 y 1.35.

$$V1 + V2 + V3 + V4 = 0 \quad (1.34)$$

$$H1 + H2 + H3 + H4 = 0 \quad (1.35)$$

Con estos datos de configuración podemos calcular el área total y el valor del radio circular equivalente de una placa de la misma área que la malla.

El perímetro y el área lo calculamos con las ecuaciones 1.36 y 1.37.

$$\text{Perímetro} = \sum |V_n| + \sum |H_n| \quad (1.36)$$

$$\text{Área} = (V4 \times H1) + (V4 + V1) \times H2 + (V4 + V1 + V2) \times H3 \quad (1.37)$$

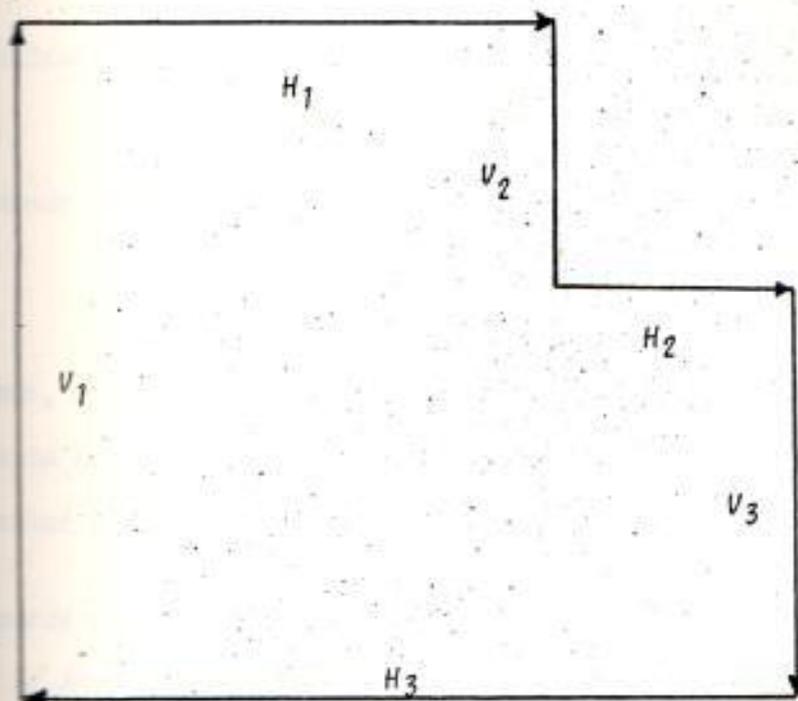


FIGURA 1.14

SECUENCIA PARA INGRESO DE DATOS AL PROGRAMA DE COMPUTACION

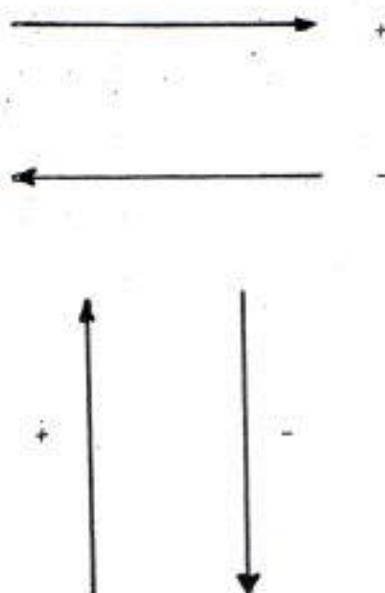


FIGURA 1.15

NOTACION DE LA DIRECCION
PARA EL INGRESO DE DATOS
AL PROGRAMA DE CONFIGURACION
DE LA MALLA.

El cálculo del radio se lo hace con la ecuación 1.38.

$$A = \pi r^2 \quad (1.38)$$

de donde deducimos la ecuación 1.39

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1.39)$$

Además, con los datos de la configuración se puede calcular también la longitud mínima del conductor para proveer un cinturón perimetral y asumir un valor para conexiones a equipos y estructuras:

Se puede asumir que la malla a diseñarse debe ser al menos mayor que el área de la subestación en 0.61 metros pero asumiremos 0.91 que es un valor recomendado. Nuestro perímetro será entonces calculado como se indica en la figura 1.16.

Y, para cualquier configuración se cumple que el perímetro real considerado la extensión adicional:

$$\text{Perímetro} = |V1| + |H1| + |V2| + |H2| + |V3| + |H3| + |V4| + |H4| + 8(0.91) \quad (1.40)$$

Los valores de las conexiones a equipos y estructuras pueden ser proporcionados como datos también.

La resistividad natural de la tierra ρ en Ω -metros es el valor promedio de las pruebas realizadas en el terreno.

Con los datos anteriores y los cálculos realizados geoméricamente, estamos en capacidad de obtener la primera estimación de la resis-

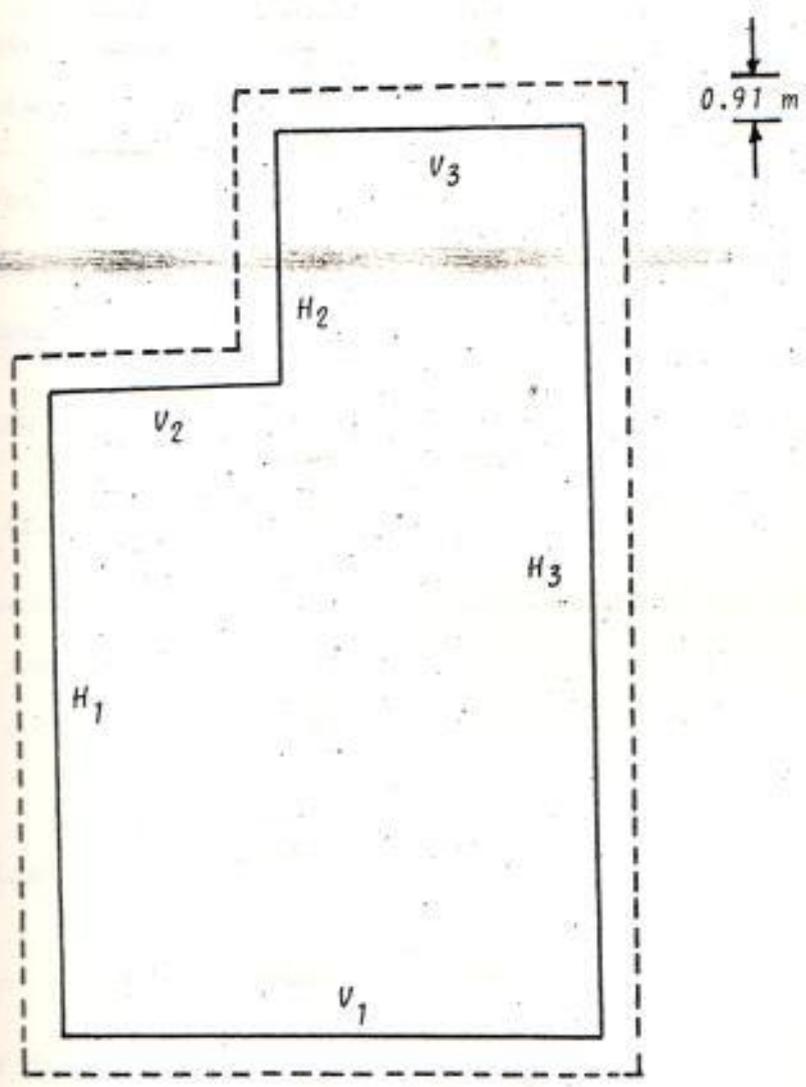


FIGURA 1.16

DETERMINACION DEL PERIMETRO DE LA MALLA PARA LA SUBESTACION

encia del sistema a tierra utilizando la ecuación 1.31.

Estos primeros cálculos son elementales y únicamente nos sirven para realizar ajustes a la configuración de la subestación.

La resistencia obtenida es tan solo una aproximación inicial que será ser descartada cuando se realice el ajuste del diseño.

En este primer paso se debe estimar convenientemente la longitud del conductor a las conexiones de equipos y estructuras ya que esto influye en el valor de la resistencia.

CORRECCION DEL DISEÑO

En esta sección debemos tomar como dato lo siguiente:

Resistividad estimada de la capa de roca triturada que vaya a cubrir la zona de la subestación.

$$\rho_s \text{ en } \Omega\text{-metros}$$

Profundidad de enterramiento del conductor

$$h \text{ en metros}$$

Si no lo dan, se asume 0.45 metros

Voltaje del circuito E

Impedancia equivalente tomada dentro del sistema desde la falla.

$$R1 + R2 + R0$$

$$X''1 + X2 + X0$$

Utilizaremos también los datos ya solicitados en el paso anterior: Z y P , y los cálculos como: r , L y R .

Como paso inicial calculamos la corriente simétrica de falla MIS con la ecuación: 1.22

Este valor es la corriente al inicio de la falla y debe ser corregido por el factor D de decremento que depende del tiempo de duración de la falla.

El factor se lo podría calcular con la ecuación 1.24, deduciendo como indica la ecuación 1.25.

Pero es más conveniente utilizar la aproximación de la tabla I/ que nos proporciona directamente los valores más comunes del factor de decremento.

Para valores intermedios, el factor D se obtiene por interpolación lineal, lo que nos asegura una alta precisión.

A este nuevo valor de corriente se lo ajusta también con un factor para prevenir futuros aumentos en las instalaciones, arbitrariamente se lo asume como 1.5 aunque puede ser modificado.

Así entonces el valor ajustado de la corriente de falla para uso en el cálculo del diseño queda como:

$$I = 1.5 D I'' \quad (1.41)$$

Con esta corriente así obtenida se puede calcular el tamaño del conductor requerido para evitar la fusión del mismo bajo esa corriente de falla.

En este punto tenemos que asumir un tiempo de duración de la corriente a través del conductor sin que llegue a sufrir ningún daño.

Para calcular el área del conductor que se va a utilizar, la hacemos con la fórmula 1.42:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log \left(\frac{T_m - T_a}{234 - T_a} + 1 \right)}{33 t}}} \quad (1.42)$$

en donde:

A = área del conductor en mm^2

I = corriente de falla en Amperios

T_a = temperatura ambiente, se asume 40°C

t = tiempo de exposición o la falla, se asume 4 segundos

T_m = temperatura máxima soportada, depende del tipo de unión que utilizemos en la malla, asumimos los siguientes valores:

1.083°c	Solo cable, temperatura de fusión del cobre
450°c	Apernado
250°c	Soldado

Sin embargo, se puede abreviar los cálculos, utilizando para el cálculo del tamaño mínimo del conductor de cobre, la tabla V, donde el valor que se obtiene dependerá de la elección del tipo de uniones que se seleccione.

Si se utiliza la fórmula, el diámetro del conductor se la obtiene con la ecuación 1.43.

$$d = 0.0254 \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (1.43)$$

En cambio si utilizamos la tabla 1, se tiene que hacer la transformación de circular mil/amperio con la ecuación 1.44.

$$\text{Circular mil} = (\text{Circular mil/amperio}) I \quad (1.44)$$

Con este valor de circular mil se puede calcular el diámetro exacto del conductor d en metros.

Una vez obtenidos los datos anteriores, se tiene que asumir un espaciado entre conductores D en metros, o solicitarlos de acuerdo al diseño que se desee.

Con este valor de D , se calcula el número de conductores parale-

TABLA N° V

Corrientes mínimas de los conductores de cobre para evitar fusiones

<u>Tiempo duración de la falla</u>	<u>Circular mil por amperio</u>		
	<u>Cables solamente</u>	<u>Conjunturas apernadas</u>	<u>Con juntas soldadas</u>
30 segundos	40	50	65
15 segundos	14	20	24
10 segundos	7	10	12
5 segundos	5	6.5	8.5

Entonces, tomando las medidas verticales de la configuración:

$$n1 = \frac{V1}{D} + 1 \quad (1.45)$$

$$n2 = \frac{V2}{D} + 1 \quad (1.46)$$

$$n3 = \frac{V3}{D} + 1 \quad (1.47)$$

Luego calculamos el coeficiente K_m para la sección más angosta de la configuración de la subestación con el propósito de tener el valor más conservativo con la ecuación 1.27.

Determinamos luego el coeficiente K_i con la ecuación 1.28.

Tomando igualmente el valor de n más conservativo que en este caso será la sección más ancha de la subestación.

Con los datos anteriormente obtenidos, podemos calcular ahora el nuevo valor de L , ya no aproximado por la configuración geométrica de la subestación sino con la ecuación 1.30.

La longitud calculada es la del conductor total incluyendo las conexiones al través, y debe ser distribuida en toda la malla, considerando que la separación son el número de metros que se asumió al inicio del diseño.

Es razonable que la longitud calculada exceda hasta en un 15% la longitud del conductor necesaria para ser enterrada, si algunas

Si las condiciones no se cumplen, debemos retornar a solicitar la modificación del espaciado entre conductores hasta llegar a la situación ideal.

ELEMENTOS DEL CONTROL DE SEGURIDAD

Si bien los valores calculados en las secciones anteriores se basan en fórmulas deducidas desde los factores mínimos de seguridad, sin embargo, es necesario chequear que se cumplan las normas de seguridad para el personal que trabaja en la subestación.

Calculamos primeramente la constante K_s con la ecuación 1.51.

$$K_s = \frac{f}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right) \quad (1.51)$$

en el punto de máximo gradiente de superficie en el perímetro de la malla.

Luego asumimos un K_i o tomamos el ya calculado en la sección anterior.

Con esas constantes se puede obtener el máximo voltaje de paso con la ecuación 1.52.

$$E_{\text{paso}} = \frac{K_s K_i \rho I}{L} \quad (1.52)$$

Este valor obtenido debe ser comparado con el máximo potencial de paso tolerable que es dado por la ecuación 1.53.

$$E_{\text{paso}} = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (1.53)$$

El máximo voltaje de paso debe estar dentro del valor tolerable - para la tierra con su resistividad natural, sin embargo como la superficie está cubierta con una capa de roca triturada con una resistividad muy grande, entonces el voltaje tolerable es mayor y siempre estará dentro de los límites de seguridad.

Adicionalmente se debe calcular el voltaje de toque aunque va a ser menor porque:

$$E_{\text{paso}} = I_r (R_r + R_d) \quad (1.54)$$

$$E_{\text{toque}} = I_k \left(R_r + \frac{R_s}{2} \right) \quad (1.55)$$

el valor del voltaje de toque tolerable puede calcularse como:

$$E_{\text{toque}} = \frac{165 + 0.25 P}{\sqrt{t}} \quad (1.56)$$

Que podría ser significativamente menor que el voltaje de paso tolerable y nos obliga a realizar una comparación para encontrar la confiabilidad del sistema.

si no se cumplen las condiciones de seguridad tenemos que volver nuevamente al ajuste del diseño y de ser necesario al diseño preliminar para reconsiderar los valores que se han asumido y proceder al rediseño de la malla de puesta a tierra de la subestación hasta que los requerimientos de seguridad sean satisfechos.

Finalmente cuando ya se tenga el diseño asegurado y los datos constantes, podemos calcular lo que va a ser el valor definitivo de la resistencia a tierra del sistema utilizando la misma ecuación 1.31, pero con el nuevo valor de longitud del conductor.

El máximo potencial de malta se lo puede obtener también con la fórmula:

$$E_{\text{malla}} = IR \quad (1.57)$$

Este potencial es alto e indica la necesidad de proteger al personal de guardia y al equipo de comunicaciones para que enfrenten estos potenciales transferidos.

Existe la posibilidad de tomar las variables anteriores y modificar una o varias para llegar a una definición precisa de la configuración.

CAPÍTULO 2

ELABORACION DEL SISTEMA DE COMPUTACION

CARACTERISTICAS DEL SISTEMA.

El sistema para determinación de la malla de puesta a tierra de subestaciones, basado en la seguridad del personal se debe ejecutar en S/4341 o cualquier otro similar que soporte las siguientes condiciones:

- 512 K de memoria principal
- Lenguaje FORTRAN
- Software que soporte terminales
- 8 K de espacio en disco duro
- Impresora

Cada una de las alternativas que se seleccione produce un cálculo automático de los valores que se encuentran involucrados con esa alternativa. Este cálculo como se encuentra condicionado a las restricciones de seguridad, causan un chequeo instantáneo que puede dar lugar a mensajes de error que son desplegados en la parte inferior de la pantalla, indicando la causa del mismo y la forma de corregirlos para continuar con el proceso.

La programación es conversacional, de manera que el proceso de trabajo es de forma interactiva, seleccionando las opciones por medio de pantallas de menú.

Inv. No. POT-071

El sistema fue realizado con el programa DMSNS, propio para resolución de problemas de ingeniería y consta de los siguientes elementos:

1. Pantallas de despliegue de información:

SPT\$DTR1	DTRPANEL	Selección de alternativas
SPT\$DTR2	DTRPANEL	Selección de opciones
SPT\$DTR3	DTRPANEL	Investigación de características del suelo.
SPT\$DTR4	DTRPANEL	Determinación de máxima corriente de falla
SPT\$DTR5	DTRPANEL	Configuración Perimetral del conductor.
SPT\$DTR6	DTRPANEL	Ajuste de longitud del conductor.
SPT\$DTR7	DTRPANEL	Cálculo de Potenciales máximos y tolerables.
SPT\$DTR8	DTRPANEL	Alternativas de variaciones.
SPT\$DTR9	DTRPANEL	Modificaciones a la longitud del conductor.
SPT\$DTR10	DTRPANEL	Chequeo de seguridad
SPT\$DTR11	DTRPANEL	Impresión de resultados

2. Programa EXEC

SPT\$E01	EXEC	Programa en lenguaje propio del sistema operativo del 4341, que permite integrar en él toda la lógica del sistema, minimizando de
----------	------	---

forma profunda, la programación - en cualquier otro lenguaje.

Consta de 807 instrucciones ejecu- tables en EXEC II, incluido mane- jo de programas, pantallas y ar- chivos.

3. Programas FORTRAN

Debido a la extensión de la programación en EXEC II, los - programas en FORTRAN se han reducido en tamaño y lógica, de manera que solamente son utilizados en acciones puntuales - que por razones matemáticas son estrictamente necesarias.

SPTF 01	FORTRAN	Calcula la resistividad de la tie- rra en base a los parámetros medi- dos por el método de los electro- dos.
SPTF 02	FORTRAN	Calcula la corriente máxima y el factor de decremento DC.
SPTF 03	FORTRAN	Validación de los datos de confi- guración de la malla.
SPTF 04	FORTRAN	Cálculo del diseño preliminar de la malla, donde se obtienen todos los datos de la red como el área, el radio equivalente de un plato sólido, la longitud del conductor

y las conexiones, la resistencia total de puesta a tierra, los voltajes de paso calculados y tolerables, el voltaje de toque tolerable, las constantes K_m , K_i y K_s , la distancia adicional debida a los equipos y estructuras, diámetro del conductor, número de conductores verticales.

SPTF 06	FORTAN	Impresión de las características del suelo.
SPTF 07	FORTAN	Impresión de la máxima corriente de la falla.
SPTF 08	FORTAN	Diseño preliminar del sistema.
SPTF 09	FORTAN	Impresión de resistencia de puesta a tierra.
SPTF 10	FORTAN	Impresión de potenciales máximos tolerables.
SPTF 11	FORTAN	Impresión de alternativas de investigación.

4. Subrutina.

SPTF 05	FORTAN	Subrutina llamada por todos los programas de impresión para escribir las cabeceras y los datos ge-
---------	--------	--

nerales que tienen todos ellos.

5. Archivos

SPTV01	SPI\$UATA	Archivo maestro de datos, contiene todos los valores originales que el sistema puede sugerir para una malla de puesta a tierra.
SPTD02	SPT\$DATA	Archivo de trabajo
SPTV03	SPT\$DATA	Archivo de trabajo

6. Errores.

001	Necesita dar un nombre a la alternativa
002	No existe el modelo solicitado
003	Opción debe estar entre 1 y 9
004	Faltan datos para calcular resistividad
005	Faltan datos para calcular la corriente de falla
006	Error en los datos para la configuración
007	Error en la modificación de datos realizados
008	Faltan datos para seleccionar esta opción.
009	Los datos ingresados no permiten soluciones reales.
010	Los voltajes calculados no cumplen límites de seguridad.
011	Sobreprotección disminuya capa de roca o profundidad, aumente espacio.
012	Opción de listado debe estar entre 1 y 6

- 013 Solicite su listado al operador del computador
014 & no es una respuesta válida
015 Reenter & if you wish to end this activity.
016 Imbedded blanks encountered, correct and reenter
017 Error attempting to display menu &.
018 Valor equivocado en &
019 No additional information is available
020 error displaying explain panel &.
021 This message is available for use.
022 & is an invalid page number.
023 Error attempting copy of & panel.

7. Teclas funcionales.

PF 1	CANCEL
PF 3	RETRY
ENTER	CONTINUE

Ciertos mensajes en el computador son inevitablemente en Inglés, por ese motivo presento a continuación la traducción:

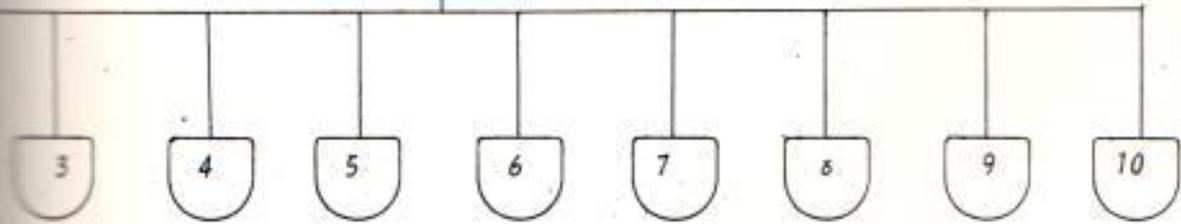
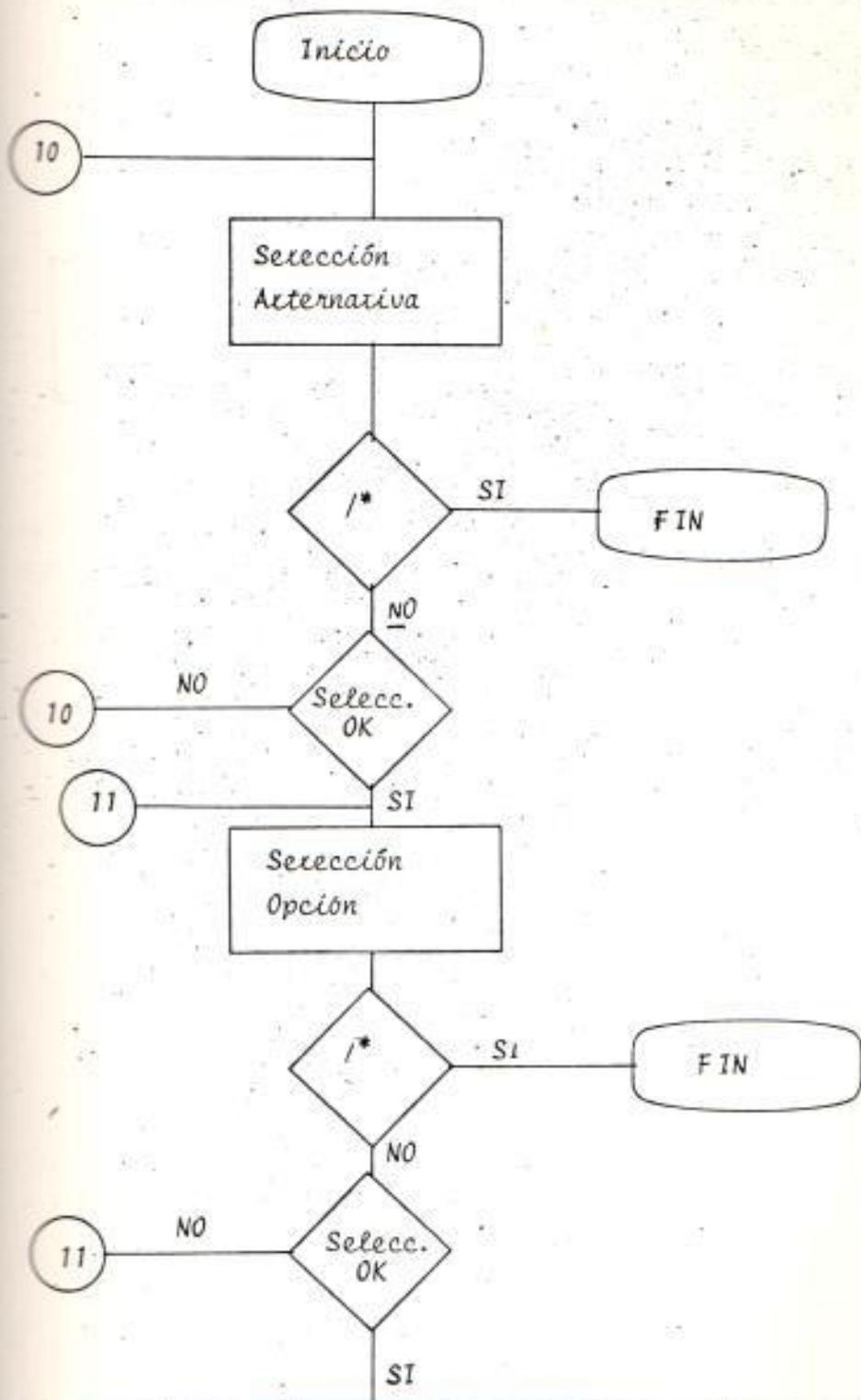
ERRORES.

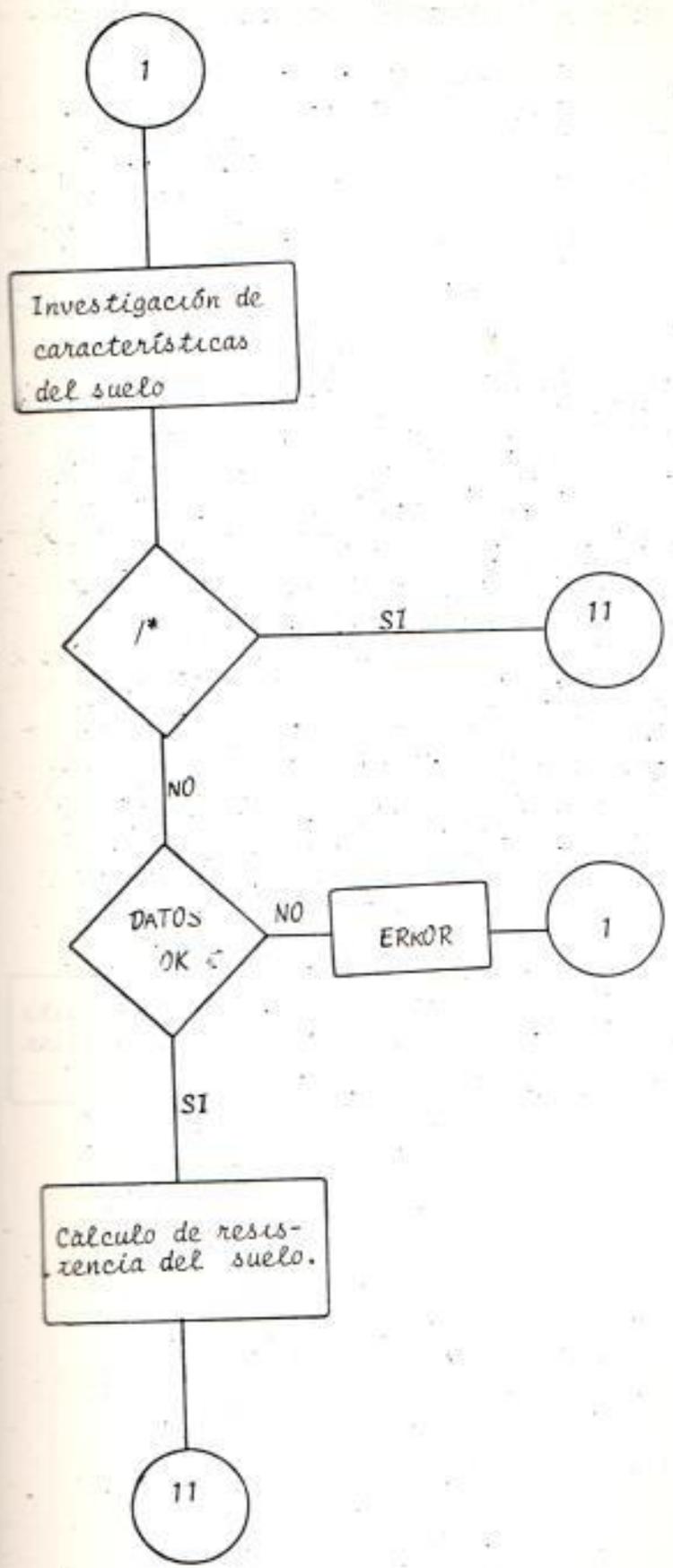
- 015 Reintegre & si desea terminar esta actividad.
- 016 Llene los espacios encontrados, corrija y reingrese
- 017 Error tratando de desplegar menú &
- 019 No hay disponible información adicional
- 020 Error desplegando el panel explicatorio &
- 021 Este mensaje está disponible para su uso
- 022 & es un número de página inválido
- 023 Error tratando de copiar panel &

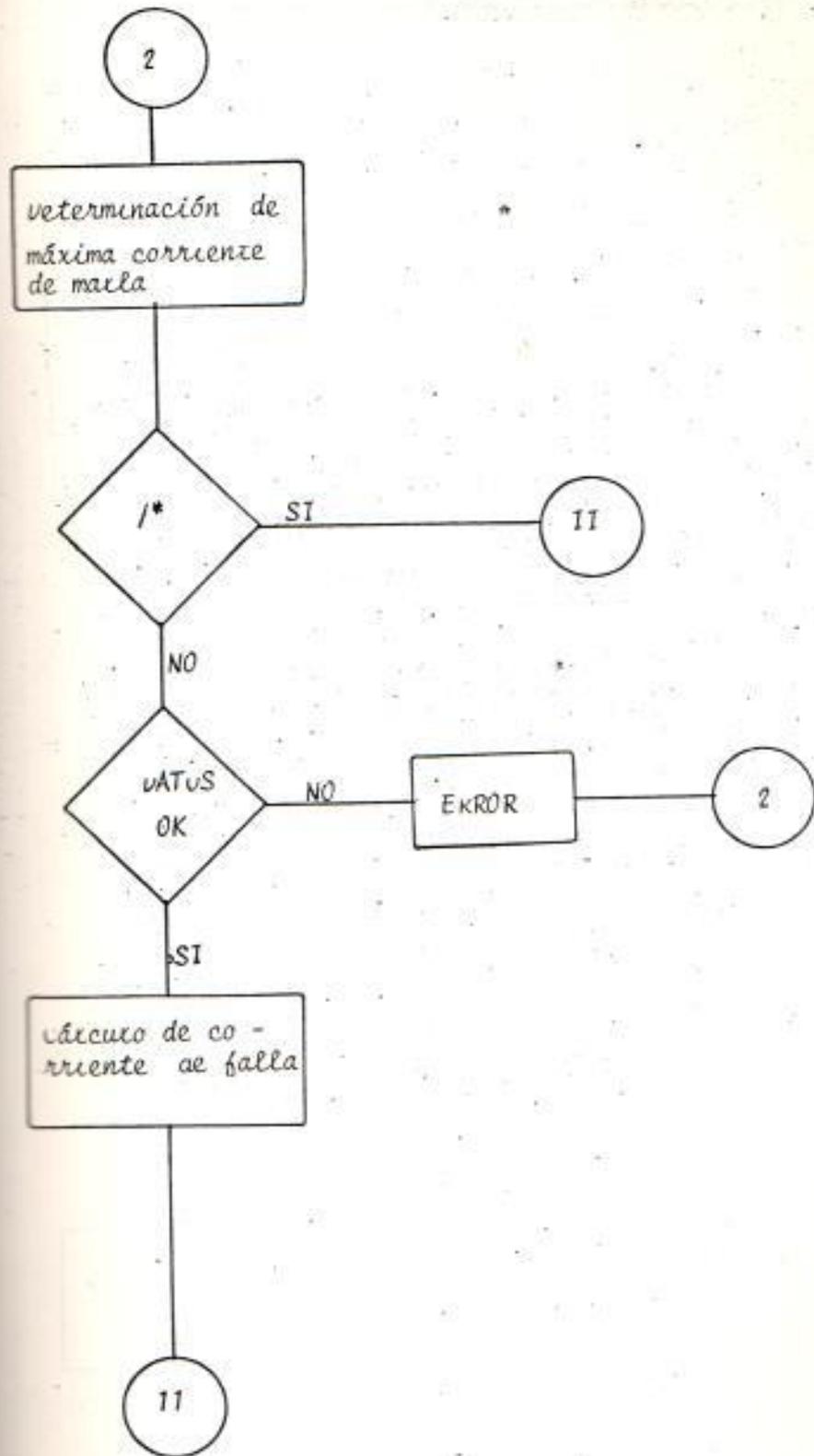
Teclas funcionales.

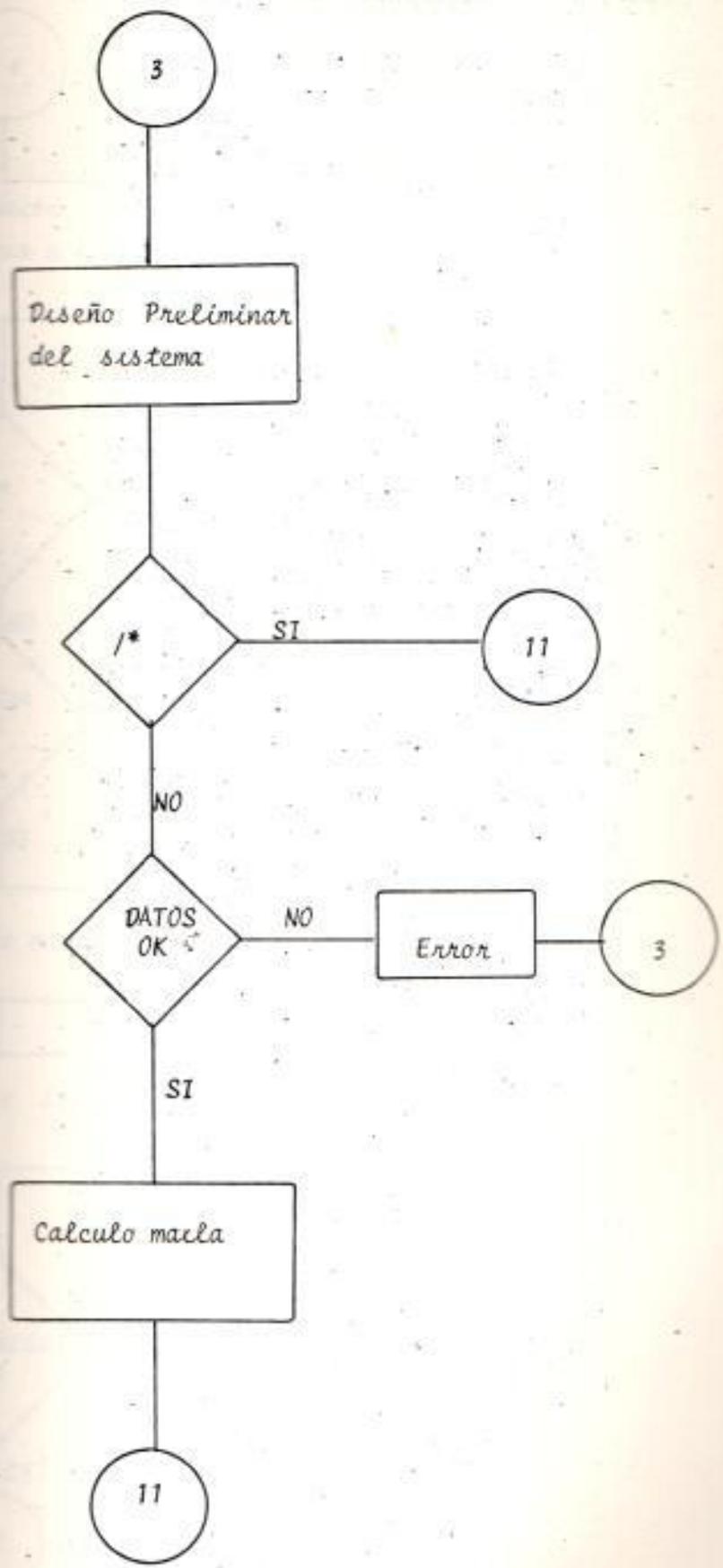
- PF1 Cancela
- PF3 Reintenta
- ENTER Continúa

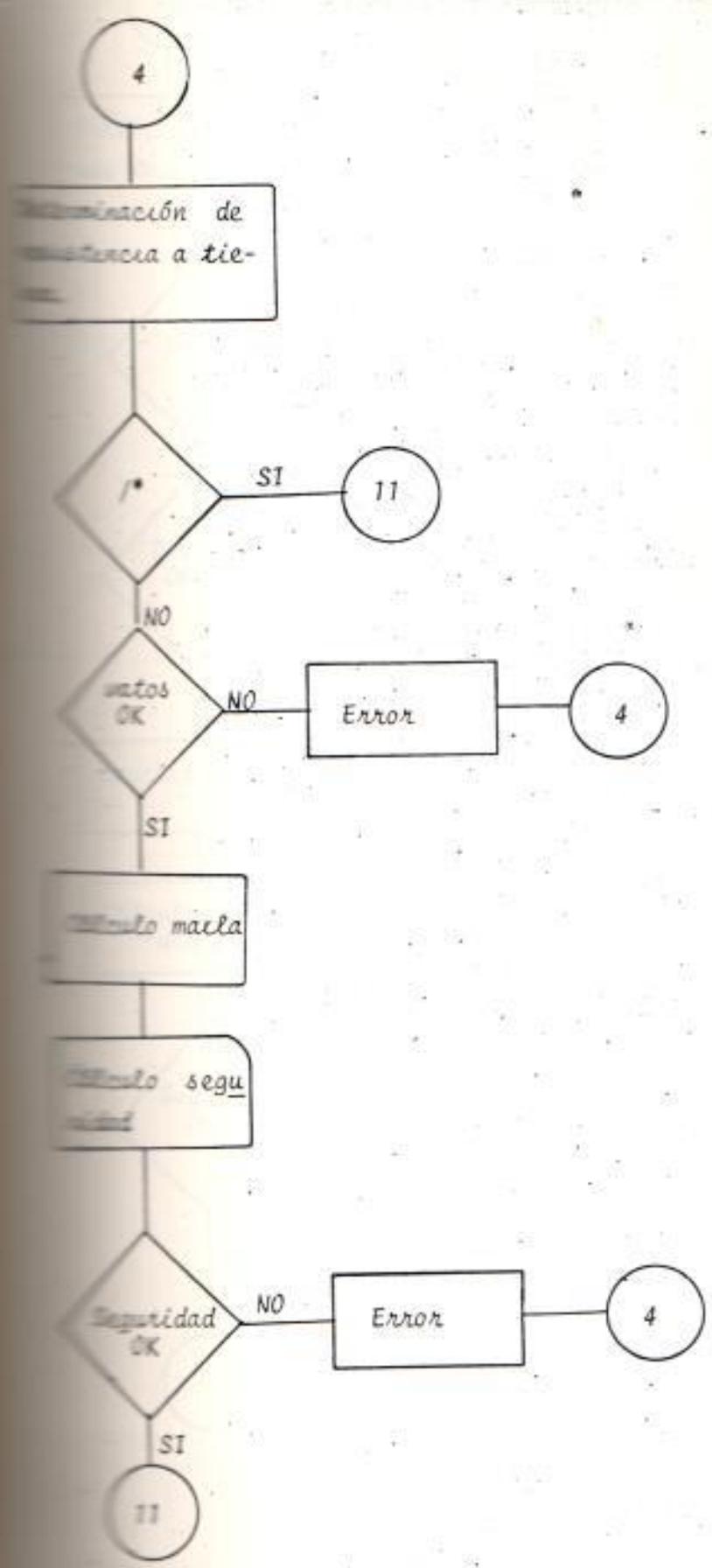
DIAGRAMA DE BLOQUES

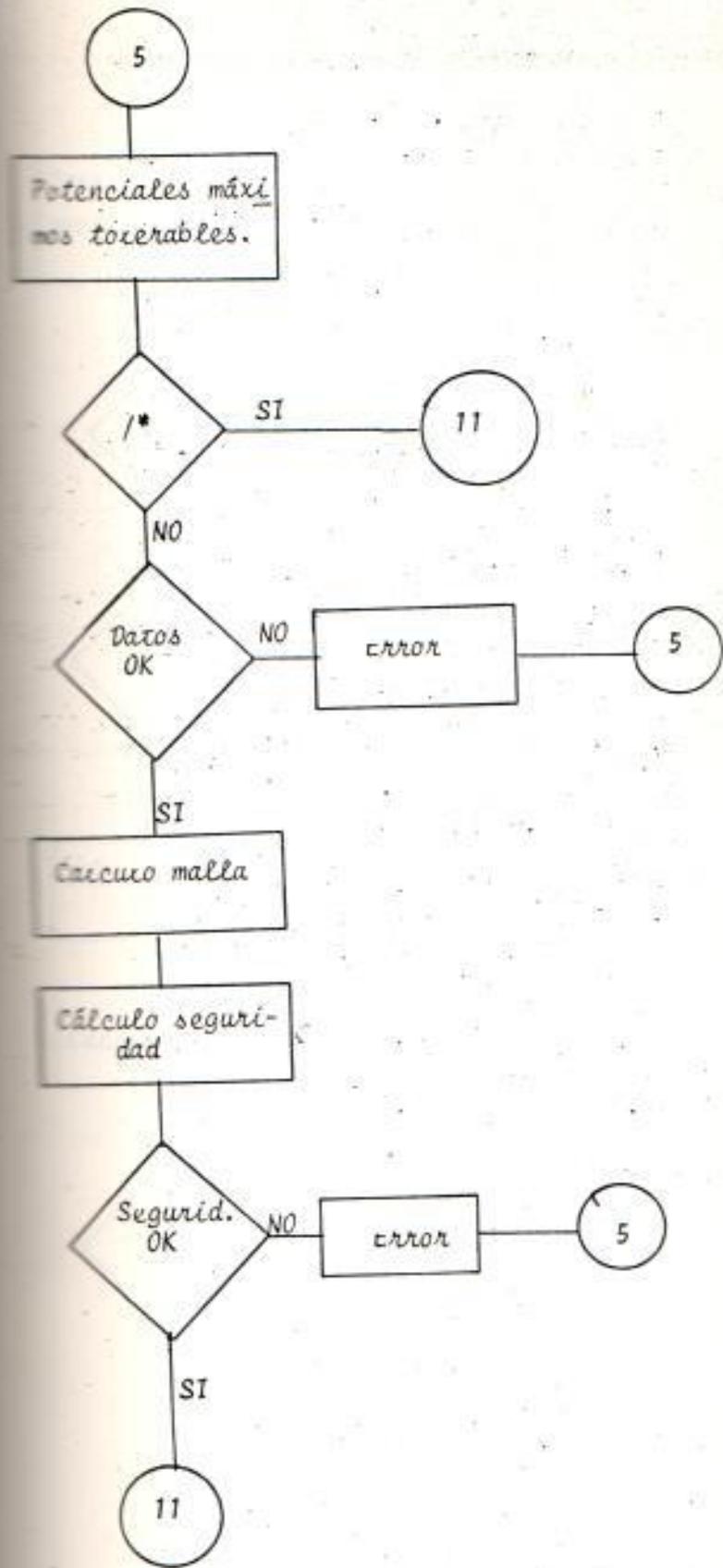


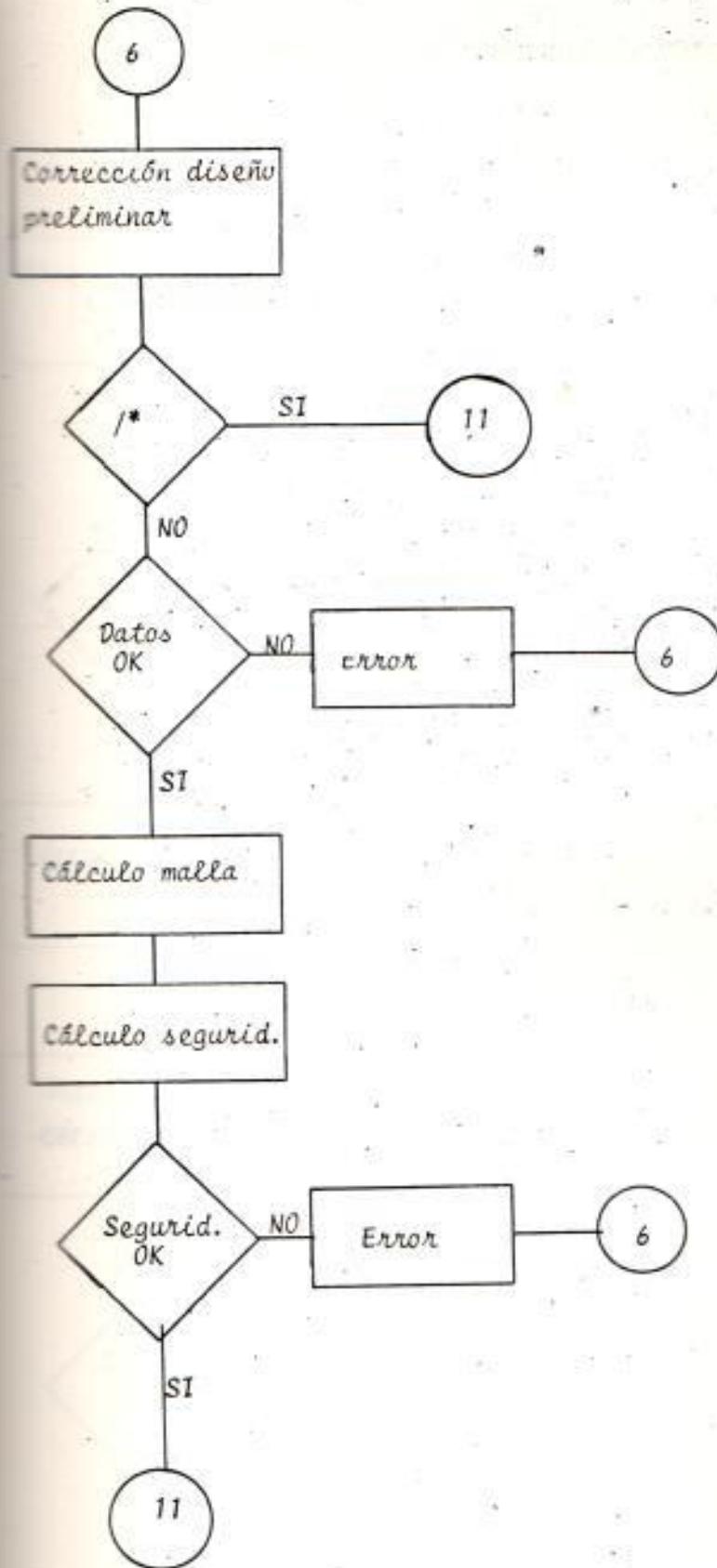


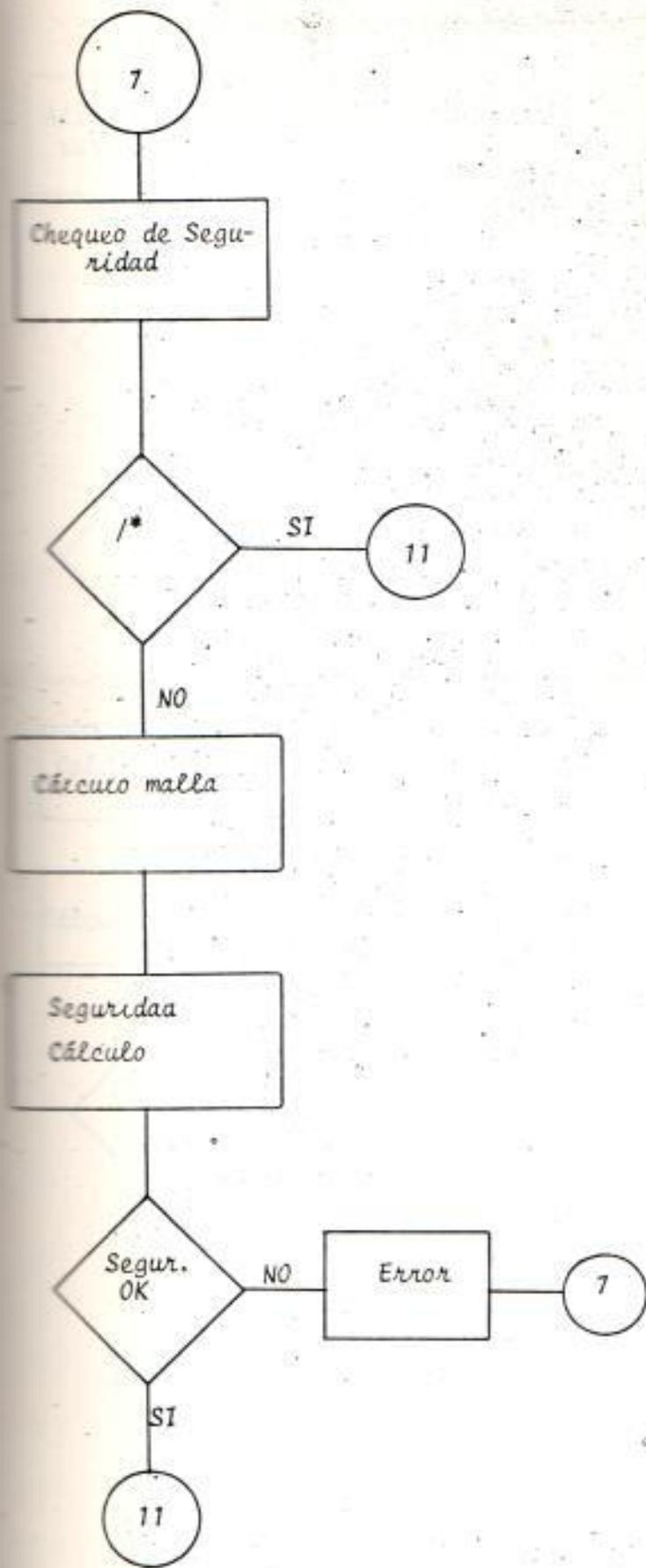


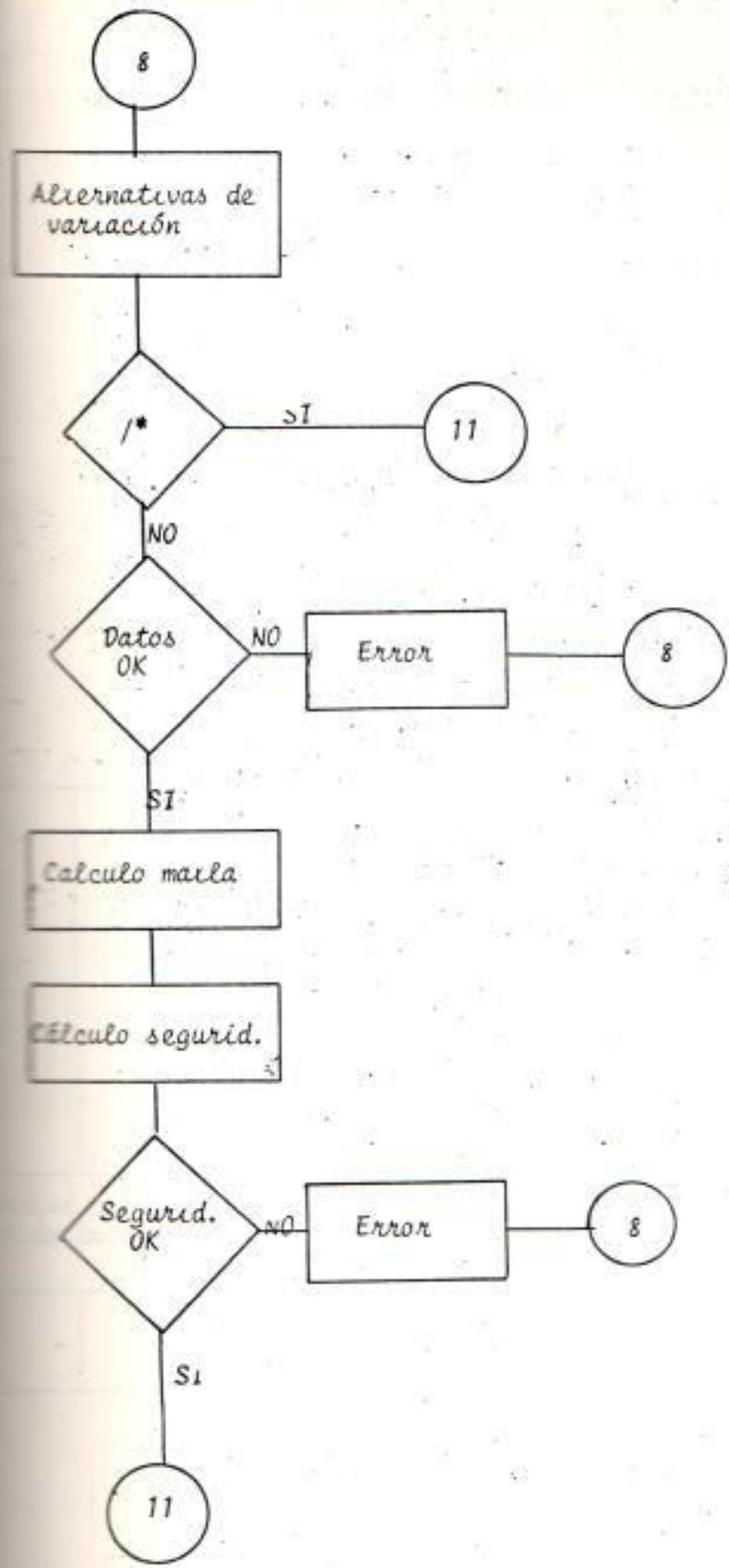


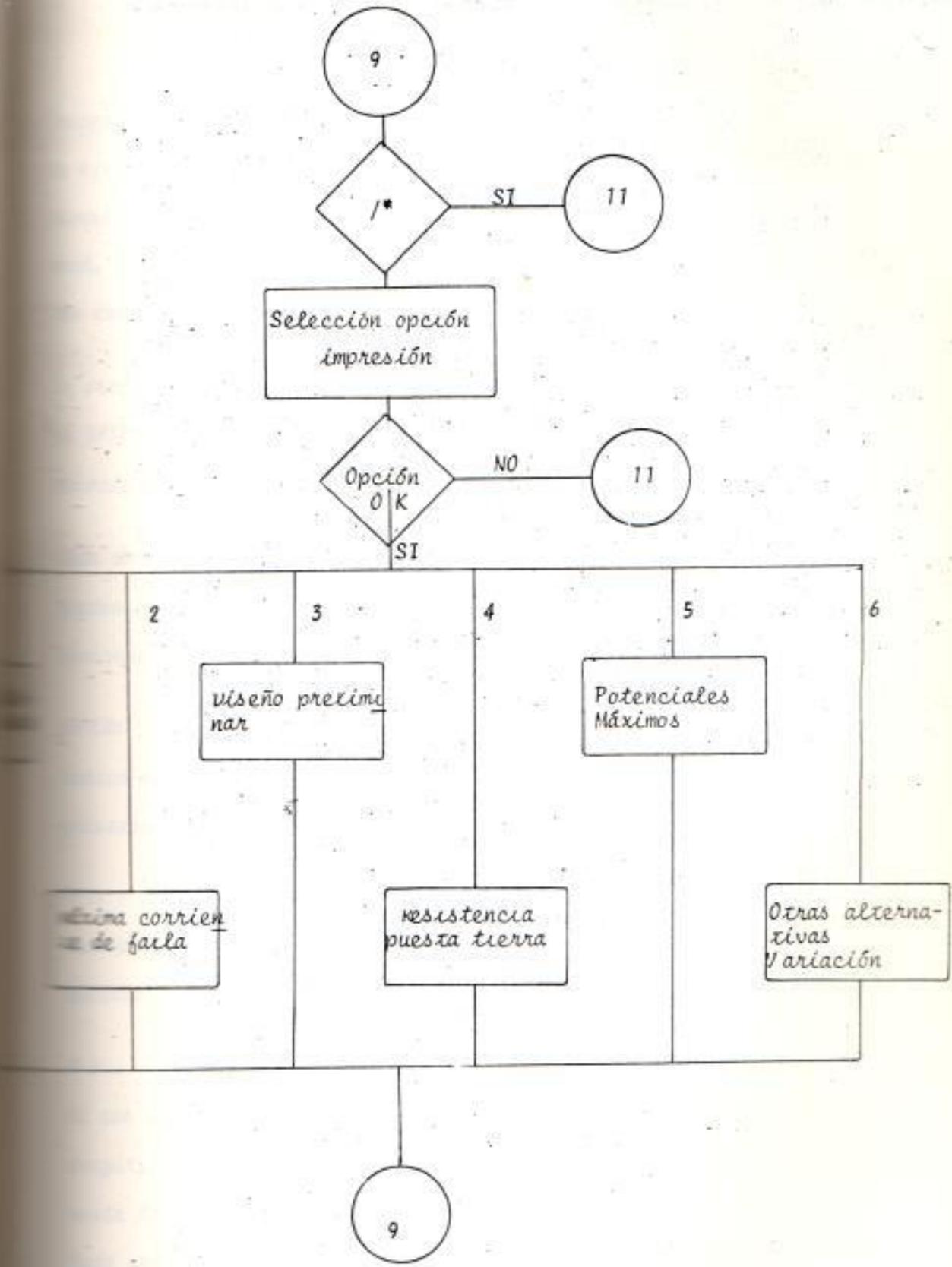












Procedimiento de ejecución.

La ejecución del programa de sistema de puesta a tierra de subestaciones se la hace en forma conversacional a través de pantalla de menú, diseñadas en orden lógico de acuerdo a los pasos que se debe tomar como guía.

La primera instrucción que se digita para llegar al menú inicial es SPT01, lo que indica al sistema que se desea ejecutar el EXTC principal.

Cada una de las pantallas permite el ingreso de información que pueden ser datos y/o opciones. Una vez desplegados existen tres opciones para continuar el trabajo:

ENTER:

Indica al sistema que debe continuar el proceso con los datos ingresados.

F1:

Cuando presionamos esta tecla el sistema siempre regresa al paso anterior.

F3:

Si los datos que hemos ingresado están incorrectos y queremos comenzar, se presiona este comando y el sistema nos devuelve nuevamente la información original de la pantalla.

Cada una de las opciones funciona de igual manera y maneja adecuadamente los errores indicados anteriormente.

3.3.1. Selección de alternativas.

La primera pantalla que aparece para la selección es la SPT\$DIR1.

Cada usuario puede tener varias alternativas con las cuales va a realizar estimaciones variando parámetros.

Cuando se va a trabajar con una nueva alternativa, se la puede crear directamente o tomar como modelo alguna antigua a la cual no se desee modificar pero sí tomarla como referencia.

El nombre con el que se bautiza la alternativa es único y puede tener una extensión máxima de 8 caracteres alfanuméricos, sin espacios entre ellos. Este nombre debe ser usado cuando se desee realizar modificaciones al proyecto o cuando se lo toma como modelo.

Los errores que pueden ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

"NECESITA DAR UN NOMBRE A LA ALTERNATIVA"

"NO EXISTE EL MODELO SOLICITADO"

"S NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

La segunda pantalla luego de la selección de alternativas es la SPT\$DTR2, la misma que permite tomar una opción que va entre 1 y 9 tal como se indica en la hoja de diseño.

La selección debe ser ordenada y secuencial, existen ciertos pasos que son factibles pasarlos por alto, pero otros son imprescindibles. Cuando se intenta obviar un paso insalvable, el sistema responde con una advertencia, así mismo, si la opción seleccionada es incorrecta, no es posible continuar.

Los errores que pueden ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

"OPCION DEBE ESTAR ENTRE 1 y 9"

"FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION"

"S NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

2.3.2. Investigación de características del suelo

La pantalla SPT\$OTR3, permite dos opciones:

La primera es, ingresar los datos Resistencia entre electrodos y profundidad de enterramiento, de manera que el sistema calcule el valor de la resistividad del suelo con las fórmulas que utiliza el método de los electrodos.

La segunda es ingresar directamente el valor de la resistividad del suelo, si es que se la conoce, sin necesidad de que se realice ningún cálculo.

En el supuesto caso de que no se ingrese ningún dato, el sistema asume una resistividad de 150 ohm - metro, con una profundidad de 0.45 metros.

Los errores que puedan ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

"FALTAN DATOS PARA CALCULAR RESISTIVIDAD"

"6 NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

3.3. Determinación de máxima corriente de falla

La pantalla SPT\$DTR4, permite dos opciones:

La primera es ingresar los datos de tensión fase neutro, resistencia a tierra, resistencia de falla, resistencia y reactancia de la malla en sí, tiempo de duración de la falla, factor de futuros incrementos y factor de corrección de DC; de manera que el sistema calcule el valor de la máxima corriente de falla.

La segunda es, ingresar directamente el valor de la resistividad del suelo, si es que se la conoce, sin necesidad de que se realice ningún cálculo.

Este paso es imprescindible, porque sin el conocimiento de la máxima corriente de falla, no se puede seguir el proceso del sistema de puesta a tierra.

En el supuesto caso de que no se ingrese ningún dato, el sistema asume una corriente de falla de 3000 amperios, en un tiempo de duración de 0.5 segundos, un factor de futuro crecimiento de 1.5 y un factor de corrección de DC de 1.

Los errores que pueden ocurrir en esta pantalla son:

" FALTAN DATOS PARA CALCULAR LA CORRIENTE DE FALLA "

" S NO ES UNA RESPUESTA VALIDA "

Diseño preliminar del sistema

La pantalla SPTSOTR5 se ejecuta después de que se tiene los datos de resistividad del suelo y máxima corriente de falla.

Acepta como datos la configuración perimetral del conductor, donde se indican las posiciones verticales y horizontales de la malla con una cierta secuencia, la misma que es indicada con signos positivos y negativos.

Asume como valores una resistividad de la capa de roca de 10.000 ohm-metros y los demás calculados anteriormente.

La suma algebraica de los valores verticales y horizontales deben ser igual a cero, para que se cumpla el cierre de la malla, caso contrario el sistema envía un mensaje de error como advertencia.

Después de ingresar los datos, el programa calcula directamente todos los valores involucrados con los mismos, los que pueden ser consultados y modificados en pantallas posteriores.

Los mensajes que pueden ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

- " ERROR EN LOS DATOS PARA LA CONFIGURACION "
- " ERROR EN LA MODIFICACION DE DATOS REALIZADA "
- " FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION "
- " NO ES UNA RESPUESTA VALIDA "

Cálculo de resistencia de puesta a tierra

La pantalla SPT\$DTR6 debe ser ejecutada después de la pantalla anterior, porque necesita los datos completos de la configuración para desplegar los valores de longitud del conductor y conexiones y la resistencia de puesta a tierra.

En este momento se pueden seleccionar ciertas características especiales de la malla, o aceptar las que el sistema sugiere como: profundidad de entrenamiento a 0.45 metros, tiempo de exposición o la falla de 4 segundos y los anteriormente calculados en los pasos previos.

El Sistema sugiere en este momento, valores como espacio entre conductores, diámetro del conductor y calcula el área comprendida dentro de la configuración del sistema o tierra, así como el radio circular equivalente.

Los errores que pueden ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

- " FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION "
- " LOS DATOS INGRESADOS NO PERMITEN SOLUCIONES REALES "
- " SOBREPOTECCIÓN, DISMINUYA CAPA DE ROCA O PROFUNDIDAD, AUMENTE ESPACIO "
- " NO ES UNA RESPUESTA VALIDA "

4. Cálculo de potenciales máximos y tolerables

La pantalla SPT\$DTR7 debe ser seleccionada cuando ya se hayan ejecutado todos los pasos anteriores, debido a que es necesario que se tenga determinada la configuración completa de la malla para que el sistema calcule convenientemente los voltajes que se pueden producir en esas condiciones.

Esta es solamente una pantalla informativa, en la que se determinan los voltajes de paso y de toque tolerables del cuerpo humano y se comparan con los voltajes que bajo condiciones de fallo se pueden producir en la periferia de la subestación.

Cuando no se satisfacen ciertas condiciones mínimas, el sistema indica las novedades por medio de mensajes de advertencia. Los mensajes de error que se pueden producir en esta pantalla son los siguientes:

- " FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION "
- " LOS VOLTAJES CALCULADOS NO CUMPLEN LIMITES DE SEGURIDAD "
- " SOBREPOTECCION, DISMINUYA CAPA DE ROCA O PROFUNDIDAD, AUMENTE ESPACIO "
- " ¿ NO ES UNA RESPUESTA VALIDA "

7. Corrección del Diseño preliminar

La pantalla SPT\$DTR9 permite corregir cualquier tipo de errores, como también, ajustar la malla que se ha diseñado para disminuir los costos en caso de sobredimensionamiento.

En este paso, se puede modificar parámetro por parámetro; ajustando los valores del diámetro del conductor y espacio entre los conductores, también se puede ir chequeando si cumple o no con los requerimientos mínimos de seguridad. Naturalmente, que el sistema va guiando el trabajo, al no permitir que se cambien los valores de manera peligrosa, que puedan sobrepasar los límites tolerables de protección del organismo, por medio de mensajes de precaución que emite cuando las condiciones escapan de los valores normales de trabajo.

Los mensajes de error que esta pantalla puede enviar son:

"ERROR EN LA MODIFICACION DE DATOS REALIZADA"

"FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION"

"LOS DATOS INGRESADOS NO PERMITEN SOLUCIONES REALES"

"LOS VOLIAJES CALCULADOS NO CUMPLEN LIMITES DE SEGURIDAD"

"SOBREPROTECCION: DISMINUYA CAPA DE ROCA O PROFUNDIDAD, AUMENTE ESPACIO".

"S NO ES UNA RESPUESTA VALIDA".

"VALOR EQUIVOCADO EN S".

Chequeo de seguridad

La pantalla SPT\$VT10 permite chequear si realmente luego de los ajustes de valores realizados, aun se cumplen las condiciones de seguridad.

También se pueden realizar en esta pantalla, ajustes que varían la configuración, tales como: Espacio entre conductores, resistividad de la capa de roca, profundidad de enterramiento y tiempo de exposición a la falla; aunque ahora se modifica exclusivamente desde el punto de vista de la seguridad del personal.

Igualmente, el sistema va proporcionando una guía para impedir que se sobrepasen los límites de seguridad o se sobredimensione el sistema.

Los errores que pueden ocurrir en esta pantalla son los siguientes:

"ERRORES EN LA MODIFICACION DE DATOS REALIZADA"

"FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION"

"LOS DATOS INGRESADOS NO PERMITEN SOLUCIONES REALES"

"LOS VOLTAJES CALCULADOS NO CUMPLEN LIMITES DE SEGURIDAD"

"SOPROTECCION; DISMINUYA CAPA DE ROCA O PROFUNDIDAD, AUMENTE ESPACIO"

"NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

2.2. Otras alternativas de variación

La pantalla SPT\$OTR8 permite recalcular las constantes K_i , K_m y K_s , para corregir cualquier anomalía por el uso de fórmulas empíricas. Adicionalmente se permite, aumentar la longitud del conductor debido a las conexiones a equipos y estructuras.

De igual manera los cálculos que se producen por las modificaciones realizadas, son analizados por el computador para evitar errores de sobredimensionamiento o que sobrepase los límites de seguridad.

Los errores que puede producir esta pantalla son los siguientes:

"ERROK EN LA MODIFICACION DE DATOS REALIZADA"

"FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION"

"LOS DATOS INGRESADOS NO PERMITEN SOLUCIONES REALES"

"LOS VOLTAJES CALCULADOS NO CUMPLEN LIMITES DE SEGURIDAD"

"SOPROTECCION, DISMINUYA CAPA DE ROCA O PROFUNDIDAD, AUMENTE ESPACIO"

"NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

III. Impresión de resultados

La pantalla SPT\$DT11 proporciona un menú para seleccionar el tipo de listado que se desea obtener.

Se permiten seis (6) opciones para imprimir por partes los resultados obtenidos de los cálculos anteriores.

Para seleccionar esta opción, es necesario haber recorrido todos los caminos del menú principal; ya que éste es el resultado final de nuestras investigaciones.

Los errores que pueden ocurrir seleccionando esta opción son los siguientes:

- "FALTAN DATOS PARA SELECCIONAR ESTA OPCION"
- "OPCION DE LISTADO DEBE ESTAR ENTRE 1 y 6"
- "SOLICITE SI LISTADO AL OPERADOR DEL COMPUTADOR"
- "S NO ES UNA RESPUESTA VALIDA"

CONDICIONES DE EJECUCIÓN Y OPERACIÓN DEL SISTEMA

Para ejecutar el programa de cálculo del sistema de puesta a tierra en subestaciones, es necesario ciertos datos de la configuración co-

- Resistividad del suelo
- Máxima corriente de falla
- Configuración de la subestación
- Resistividad de la capa de roca triturada
- Tiempo de falla
- Tiempo de exposición del conductor a la falla

Por lo tanto, deberá solicitarse un ISTR-1D que permita ingresar al sistema y tenga las características necesarias para ejecutar el programa.

El Manual del Usuario del anexo, provee información necesaria para servir de guía en la utilización del programa.

CONDICIONES DEL SISTEMA

El computador S/4341 no posee en la actualidad una estructura suficiente para graficar la distribución de los conductores. Sin embargo, la programación está diseñada, para permitir de una forma sencilla la incorporación de este dispositivo por medio de un computador personal que disponga de un PLOTTER.

Dentro de este campo de puesta a tierra se ha considerado de manera

superficial la conexión de los equipos y estructuras a la ma
ca calculada, podría mejorarse esta circunstancia adicionando a
 estos programas la ubicación de las estructuras, transformadores y
 en general, de los equipos que requieran una sólida conexión a
 tierra. Si bien los cálculos consideran uniformidad en la ubica-
 ción de los equipos en la subestación, sin embargo, se podría adi-
 cionar un ajuste extra a los cálculos para minimizar los costos
 aunque, la uniformidad indicada sobredimensiona el tamaño de las
 pilas.

ANÁLISIS Y PROGRAMACIÓN

El análisis contempla todas las características enunciadas en el
 capítulo I, exceptuando aquellos tópicos indicados en las limita-
 ciones del sistema de la sección 2.5.

La programación realizada en lenguaje FORTRAN es controlada a tra-
 vés de los DTRPANEL manejados por el EXEC propio del S/4341.

Al diseñar el sistema se lo ideó de tal manera que proporcione
 flexibilidad para realizar modificaciones y actualizaciones, por
 ello fue programado modularmente y es susceptible de introducir
 innovaciones que se crean convenientes.

Cada uno de los párrafos del EXEC de control es autodocumentado y
 los diferentes menús proveen información que guían al programador
 y al operador del sistema.

CAPÍTULO III

EJEMPLO DE APLICACIÓN

I. PLANTEO DEL PROBLEMA

Se desea diseñar el sistema de puesta a tierra de la subestación de SAMBORONDON que tiene las siguientes características:

Resistividad del suelo = 150 ohm-metro

Máxima corriente de falta = 3000 amperios

Configuración de la subestación, de acuerdo a la figura 3.1

Resistividad de la capa de roca triturada = 10.000 ohm-metro

Tiempo de duración de la falta = 0.50 segundos

Tiempo de exposición máximo del conductor = 25 segundos

II. DETERMINACION DE DATOS

El sistema asume los siguientes datos:

Profundidad de enterramiento = 0.45 metros

Factor de corrección de D.C. = 1.00

Factor de futuro crecimiento = 1.50

Espacio entre conductores = 4.00 metros

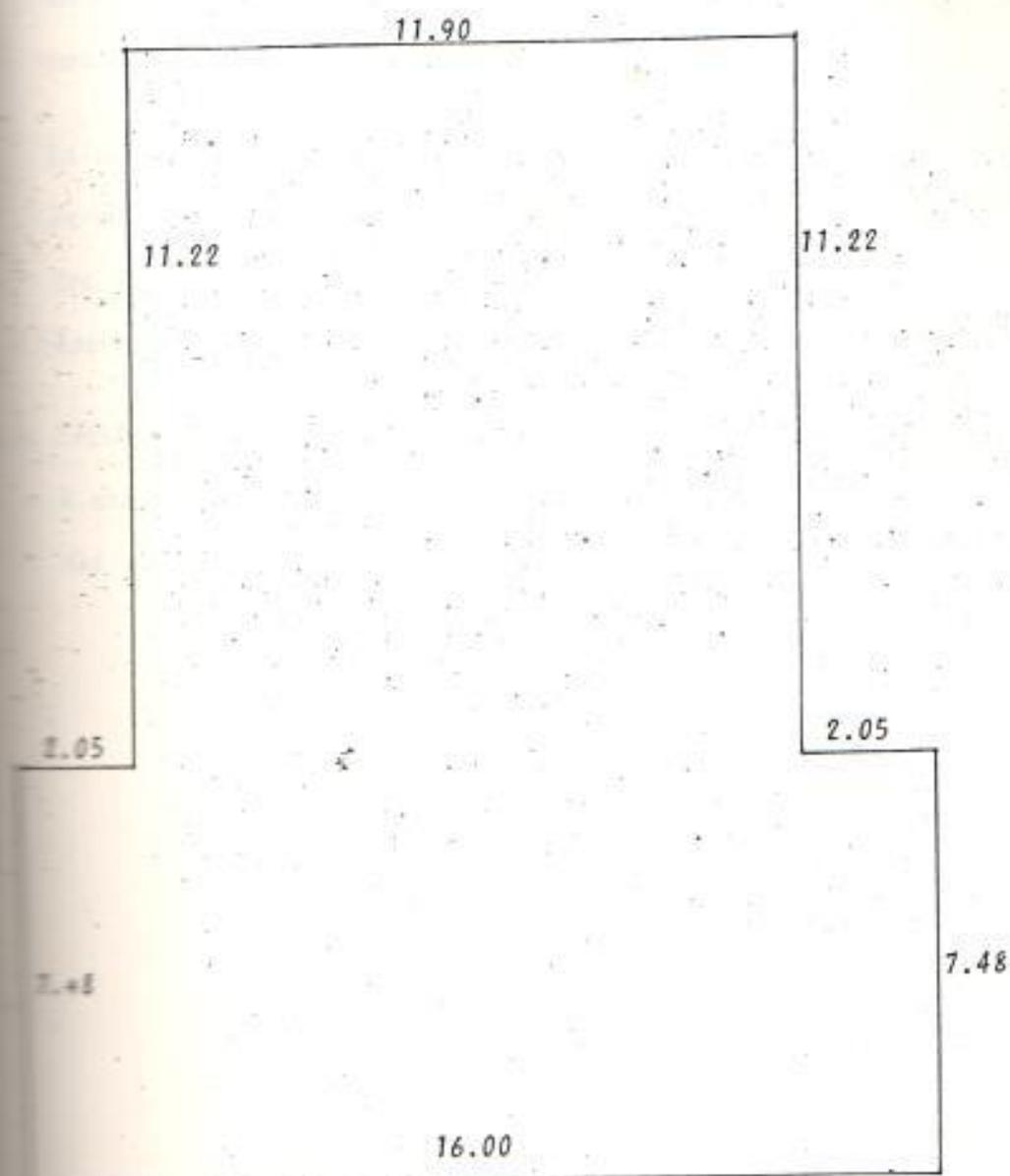


FIGURA 3.1.a

MALLA DEL PLANEO DEL EJEMPLO PARA UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

3.3. CODIFICACION DE INFORMACION

El ingreso de información se hace a través del menú en forma interactiva, donde el sistema paulatinamente va solicitando en forma ordenada los datos que necesita para su ejecución.

La única condición para el ingreso de información es que, cuando se digita información en decimales, estos sean separados por puntos (.) y no por comas (,). No siendo necesario la separación de los miles ni por puntos ni por comas.

3.4. EJECUCION DEL PROGRAMA

A continuación se indica la ejecución del programa con los resultados obtenidos de la impresión.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 31

INVESTIGACION DE CARACTERISTICAS DEL SUELO

RESISTENCIA ENTRE ELECTRODOS	0.00	OHM
DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	0.00	M.
PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO	0.45	M.
RESISTIVIDAD DEL SUELO	150.00	OHM-M.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES
ALTERNATIVA SAMBORON
PEDIDA POR USUARIO MAINT
FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 38

DETERMINACION DE MAXIMA CORRIENTE DE FALLA

TENSION FASE NEUTRO	0.00	VOLT
RESISTENCIA A TIERRA	0.00	OHM
RESISTENCIA DE FALLA	0.00	OHM
R1 + R2 + R0	0.00	OHM
X1 + X2 + X0	0.00	OHM
TIEMPO DURACION DE LA FALLA	0.5000	SEG.
FACTOR DE CORRECCION DE DC	1.00	
FACTOR DE FUTURO CRECIMIENTO	1.50	
MAXIMA CORRIENTE DE FALLA	3000.00	AMP.

UNIVERSIDAD SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
 DEPARTAMENTO DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES
 ALTERNATIVA SAMBORON
 PEDIDA POR USUARIO MAINT
 FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 43

DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TIERRA

	+/-		VERTICAL		+/-
	+		V1	11.22 M	+
	+		V2	11.22 M	-
	+		V3	7.48 M	-
	-		V4	7.48 M	+

RESISTIVIDAD PROMEDIO DE LA TIERRA	150.00	OHM-M
RESISTIVIDAD DE LA CAPA DE ROCA	10000.00	OHM-M
TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA	0.5000	SEG.
VALOR CORRIENTE DE FALLA	3000.00	AMP.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES.

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 52

CALCULO DE POTENCIALES MAXIMOS TOLERABLES

MAXIMO POTENCIAL DE MALLA	3768.00	VOLT
VOLTAJE DE PASO EN EXTERIOR	2147.00	VOLT
VOLTAJE DE PASO TOLERABLE	14375.00	VOLT
VOLTAJE DE TOQUE TOLERABLE	3768.00	VOLT

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 48

CALCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

ESPACIO ENTRE CONDUCTORES	4.00	M
DIAMETRO DEL CONDUCTOR	0.010597	M
PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO	0.500	M
TIEMPO DE EXPOSICION A LA FALLA	25.000	SEG
TIPO DE UNION	(APERNAADO)	
AREA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	253.20	M2
VALOR DE RADIO CIRCULAR EQUIVALENTE	8.977	M
LONGITUD DEL CONDUCTOR Y CONECCIONES	136.43	M
VALOR DE RESISTENCIA PUESTA A TIERRA	5.28	OHM

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/27/85 A LAS 22 59 59

OTRAS ALTERNATIVAS DE LA INVESTIGACION

CONSTANTES OBTENIDAS EN LOS CALCULOS

KM 0.83403

KS 0.47525

KI 1.37000

PRECIA ADICIONAL PARA CONECCIONES A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS -34.98

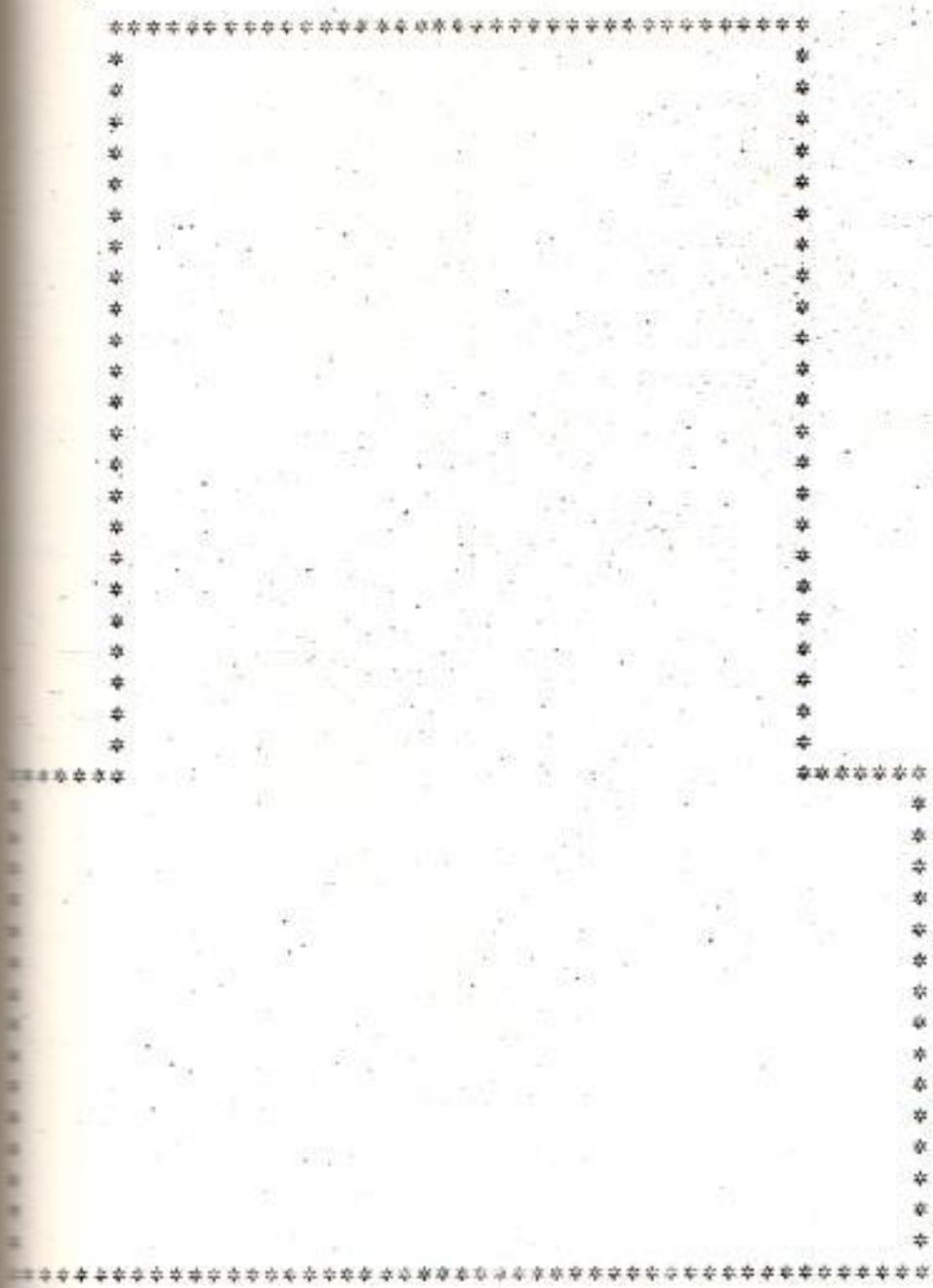


FIGURA 3.1.b.

MALLA DEL PLANEO DEL EJEMPLO INTERPRETADA POR EL COMPUTADOR

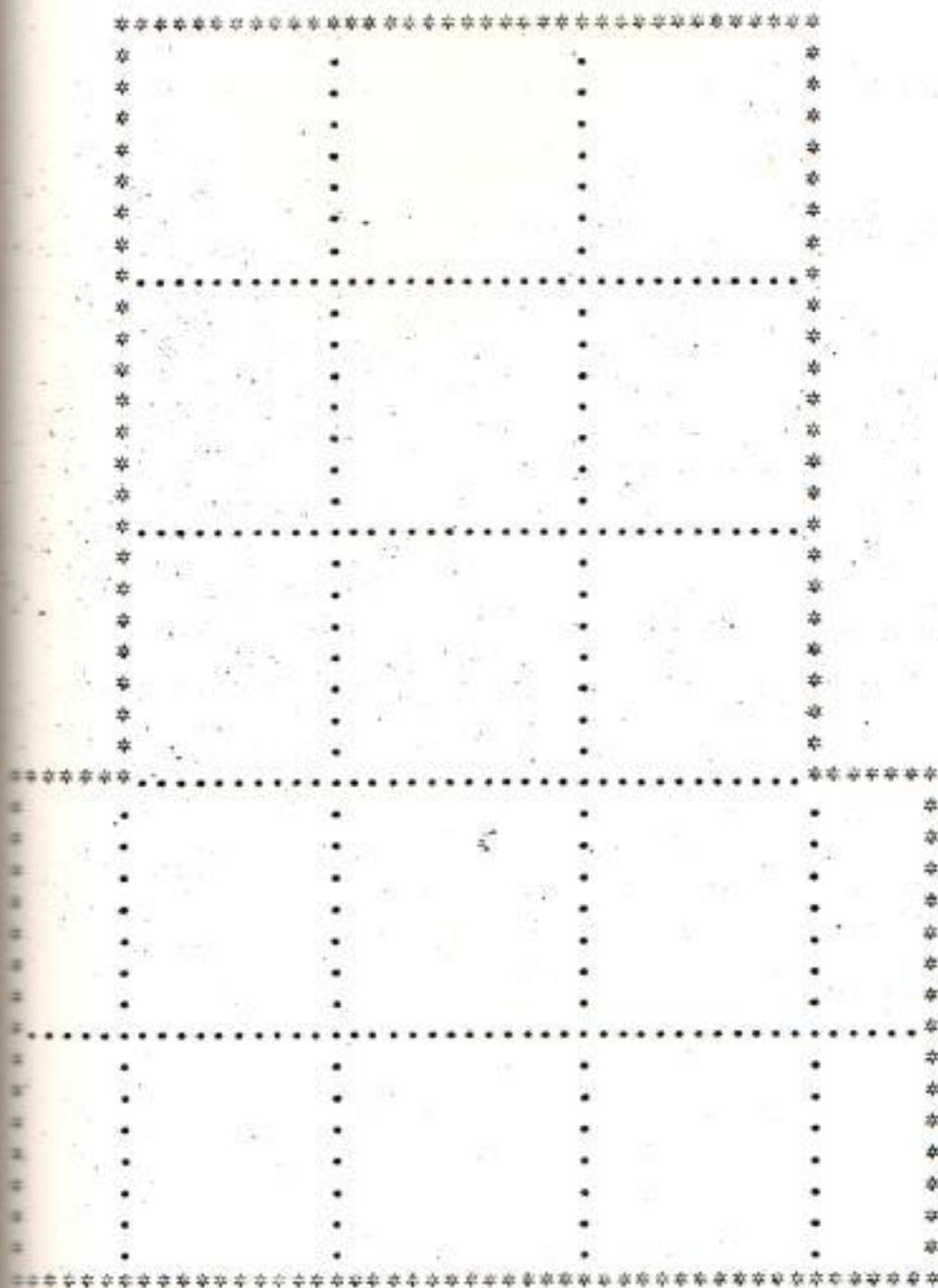


FIGURA 3.1.c.

RESULTADO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA INTERPRETADA POR EL COMPUTADOR

3.5. ANALISIS DE RESULTADOS

La autodocumentación del sistema, permite analizar los datos obtenidos, la figura 3.2 es el diseño de la malla considerando los conductores necesarios para brindar la protección más conveniente para el personal.

El espacio entre conductores de 4.00 metros es más que suficiente para nuestro problema, existe un exceso de 34.98 metros, marcado por el signo negativo, lo que nos indica que estamos sobredimensionados y hay demasiado conductor.

Por este motivo vemos que el voltaje de toque tolerable mínimo es de 3768 voltios y el valor máximo de voltaje de paso calculado en el exterior es de 2147 voltios, lo que naturalmente permite una gran protección en caso de usar esta configuración.

El diámetro del conductor sugerido es de 0.010597 metros, lo que nos indica que debemos usar un conductor de cobre de 131.000 CM.

El área total del sistema de puesta a tierra tiene 253.20 metros cuadrados incluidos la distancia adicional aconsejada.

La resistencia de puesta a tierra total es de 5.28 ohmios, que se encuentra dentro de valores aceptables para estas condiciones.

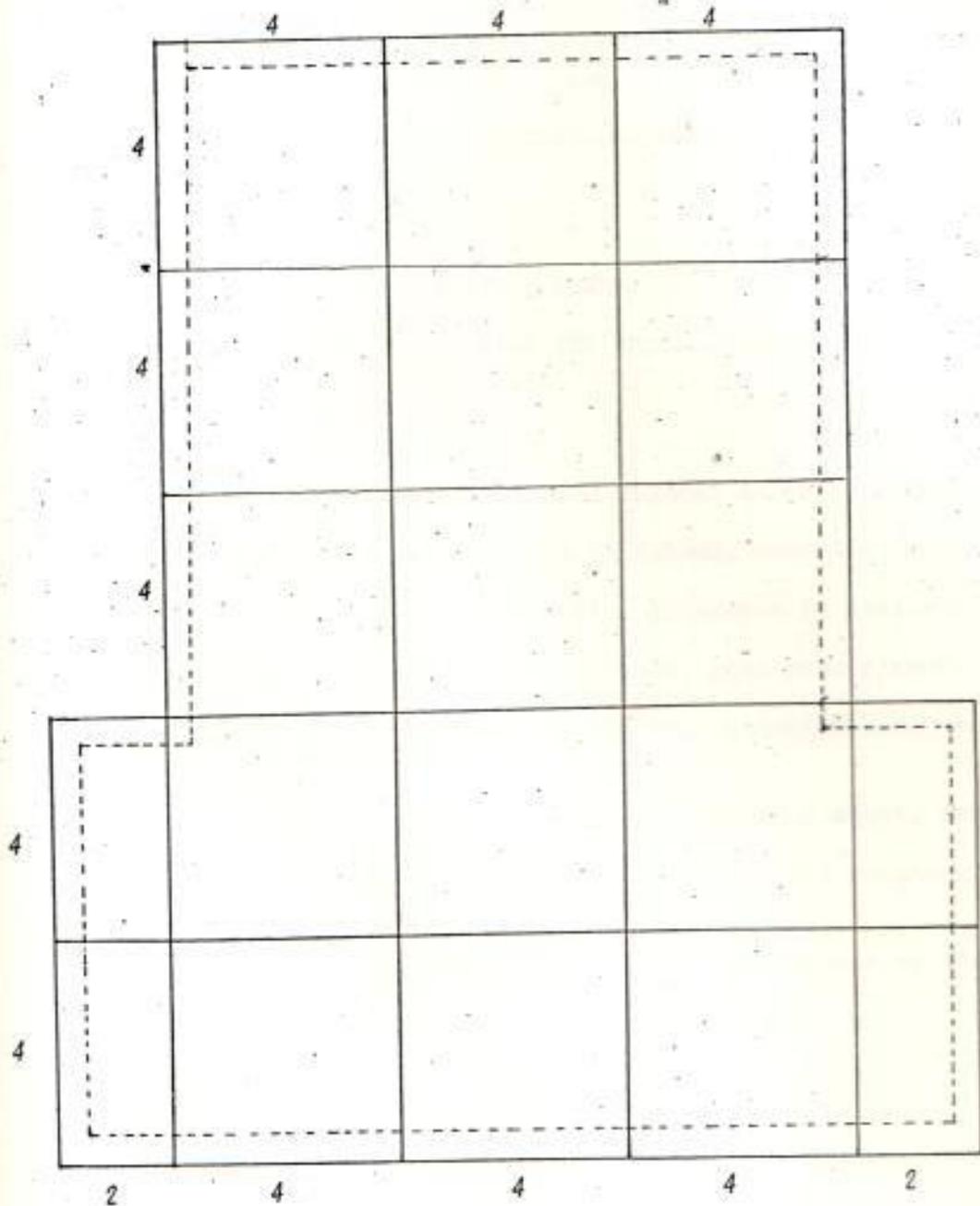


FIGURA 3.1.d.

ANÁLISIS DE LA SOLUCIÓN SUGERIDA POR EL COMPUTADOR, COMPARADA CON EL PLANTEO ORIGINAL

3.6. VARIACIONES PARA NUEVAS ALTERNATIVAS

En nuestro ejemplo observamos que con la distancia de 4.00 metros el sistema se encuentra sobredimensionado y tenemos un sobrante de conductor.

Esto naturalmente, aumenta nuestros costos ya que no es necesario tanta protección para cubrir las necesidades de seguridad del personal de la subestación.

Tenemos varias alternativas para reducir la sobreprotección, tales como: reducir la capa de roca triturada, aumentar la distancia entre los conductores de la malla, disminuir la profundidad de enterramiento de la malla y algunos más, pero para ejemplo de ilustración solamente tomaremos una de las variables como opción.

Para nuestra variación, asumimos una distancia mayor, que la fijamos en 6.00 metros y repetimos la ejecución del programa.

En este caso, se obtuvieron las nuevas impresiones de resultados de la ejecución tal como se indica a continuación:

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORDON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/28/85 A LAS 00 36 01

INVESTIGACION DE CARACTERISTICAS DEL SUELO

RESISTENCIA ENTRE ELECTRODOS	0.00	OHM
DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS	0.00	M.
PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO	0.45	M.
RESISTIVIDAD DEL SUELO	150.00	OHM-M.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON
PEDIDA POR USUARIO MAINT
FECHA 06/28/85 A LAS 00 31 08

DETERMINACION DE MAXIMA CORRIENTE DE FALLA

TENSION FASE NEUTRO	0.00	VOLT
RESISTENCIA A TIERRA	0.00	OHM
RESISTENCIA DE FALLA	0.00	OHM
R1 + R2 + R0	0.00	OHM
X1 + X2 + X0	0.00	OHM
TIEMPO DURACION DE LA FALLA	0.5000	SEG.
FACTOR DE CORRECCION DE DC	1.00	
FACTOR DE FUTURO CRECIMIENTO	1.50	
MAXIMA CORRIENTE DE FALLA	3000.00	AMP.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/28/85 A LAS 00 31 14

DISEÑO PRELIMINAR DEL SISTEMA DE TIERRA

HORIZONTAL	+/-	VERTICAL	+/-
H1	2.05 M +	V1	11.22 M +
H2	11.90 M +	V2	11.22 M -
H3	2.05 M +	V3	7.48 M -
H4	16.00 M -	V4	7.48 M +

RESISTIVIDAD PROMEDIO DE LA TIERRA 150.00 OHM-M

RESISTIVIDAD DE LA CAPA DE ROCA 10000.00 OHM-M

TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA 0.5000 SEG.

MAXIMA CORRIENTE DE FALLA 3000.00 AMP.

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/28/85 A LAS 00 31 19

CALCULO DE RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

ESPACIO ENTRE CONDUCTORES 6.00 M

DIAMETRO DEL CONDUCTOR 0.010597 M

PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO 0.500 M

TIEMPO DE EXPOSICION A LA FALLA 25.000 SEG

TIPO DE UNION (APERNAO)

AREA DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA 253.20 M2

VALOR DE RADIO CIRCULAR EQUIVALENTE 8.977 M

LONGITUD DEL CONDUCTOR Y CONECCIONES 157.54 M

VALOR DE RESISTENCIA PUESTA A TIERRA 5.13 OHM

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/28/85 A LAS 00 31 23

CALCULO DE POTENCIALES MAXIMOS TOLERABLES

MAXIMO POTENCIAL DE MALLA	3768.00	VOLT
VOLTAJE DE PASO EN EXTERIOR	1610.00	VOLT
VOLTAJE DE PASO TOLERABLE	14375.00	VOLT
VOLTAJE DE TOQUE TOLERABLE	3768.00	VOLT

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL
SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE SUB-ESTACIONES

ALTERNATIVA SAMBORON

PEDIDA POR USUARIO MAINT

FECHA 06/28/85 A LAS 00.31.28

OTRAS ALTERNATIVAS DE LA INVESTIGACION

CONSTANTES OBTENIDAS EN LOS CALCULOS

KM 0.96309

KS 0.41149

KI 1.37000

CANTIDAD ADICIONAL PARA CONECCIONES A EQUIPOS Y ESTRUCTURAS 45.64

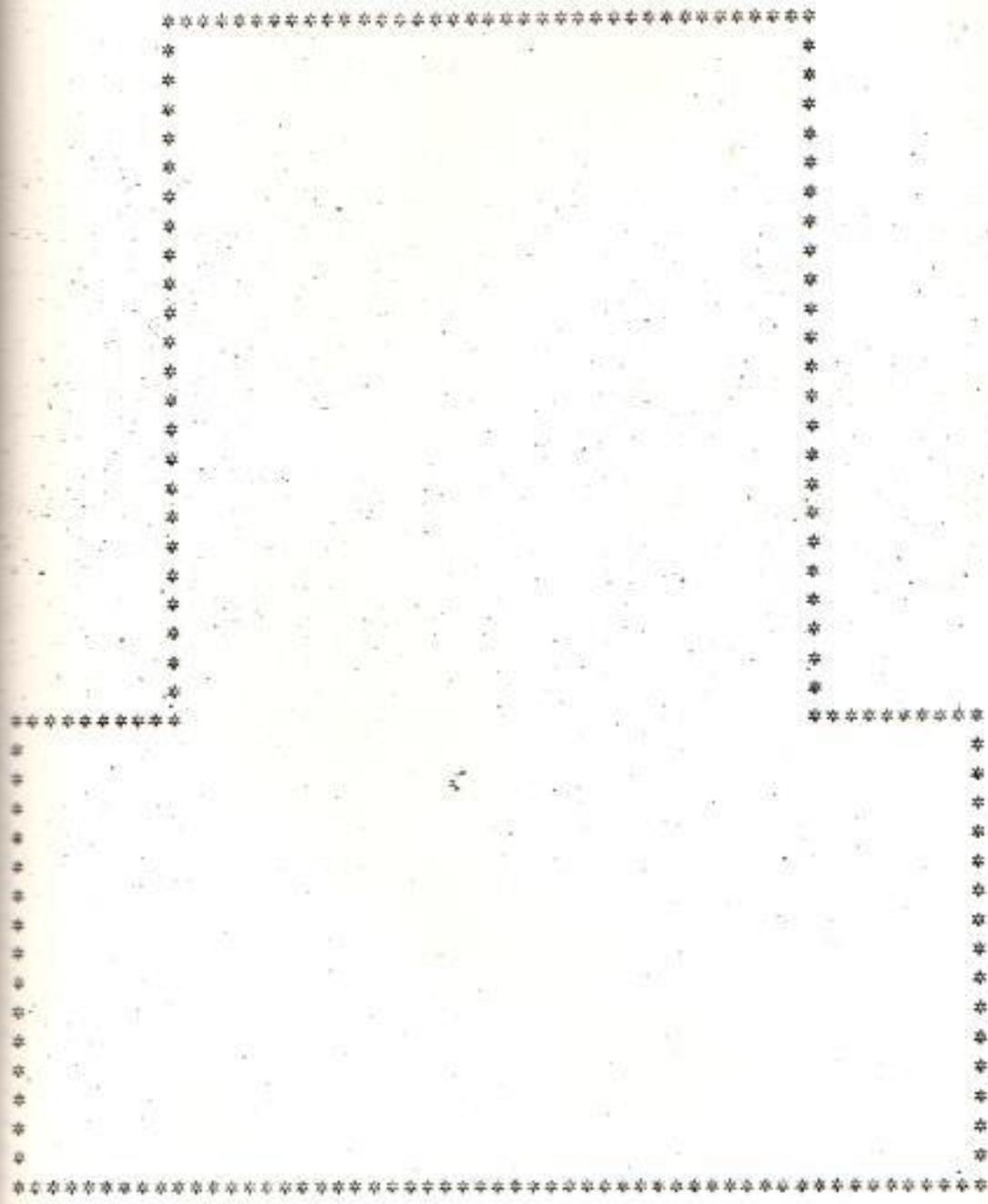


FIGURA 3.2.1.

PLANTEO DEL PROBLEMA CON UNA ALTERNATIVA DE AUMENTO DE ESPACIADO A LA MALLA PROPUESTA, VISTA POR EL COMPUTADOR

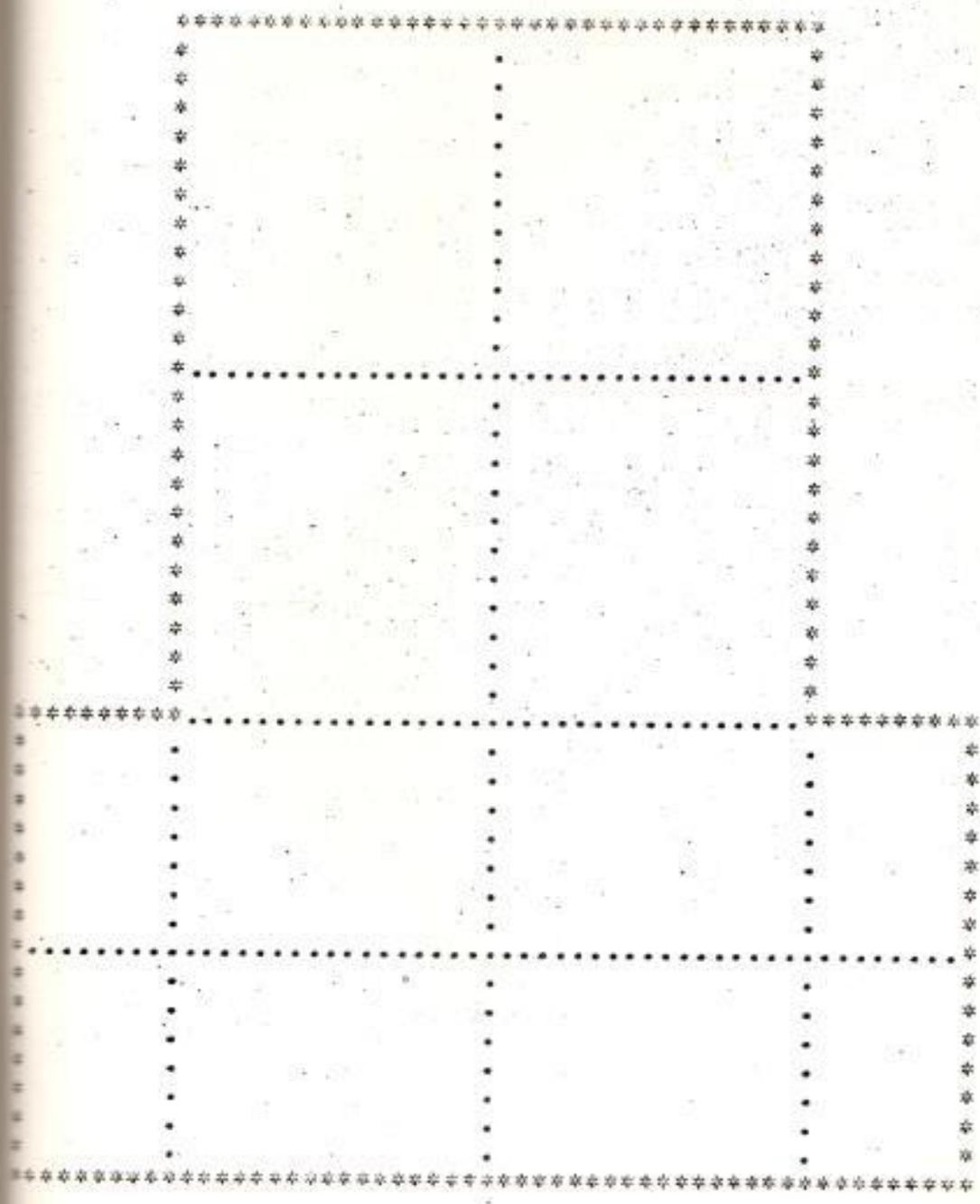


FIGURA 3.2.b.

SOLUCION SUGERIDA POR EL COMPUTADOR PARA LA ALTERNATIVA PROPUESTA

3.7. COMPARACION DE LAS VARIACIONES

De acuerdo a los datos obtenidos se puede observar, que tendríamos suficiente protección para asegurar la seguridad del personal si adicionamos 45.64 metros mas además de la malla.

Al aumentar la distancia entre los conductores disminuye la protección, por lo tanto aumenta la longitud adicional de conductor necesaria para tener el límite de seguridad.

El valor de la resistencia de puesta a tierra ha variado a 5.13 ohm, lo que naturalmente nos indica que aunque tenemos un menor costo, estamos dentro de los valores aceptables de resistencia.

Se pueden realizar otros tipos de variaciones, pero ya no son necesarias porque nuestra nueva malla graficada en la figura 3.3 satisface nuestros objetivos de seguridad.

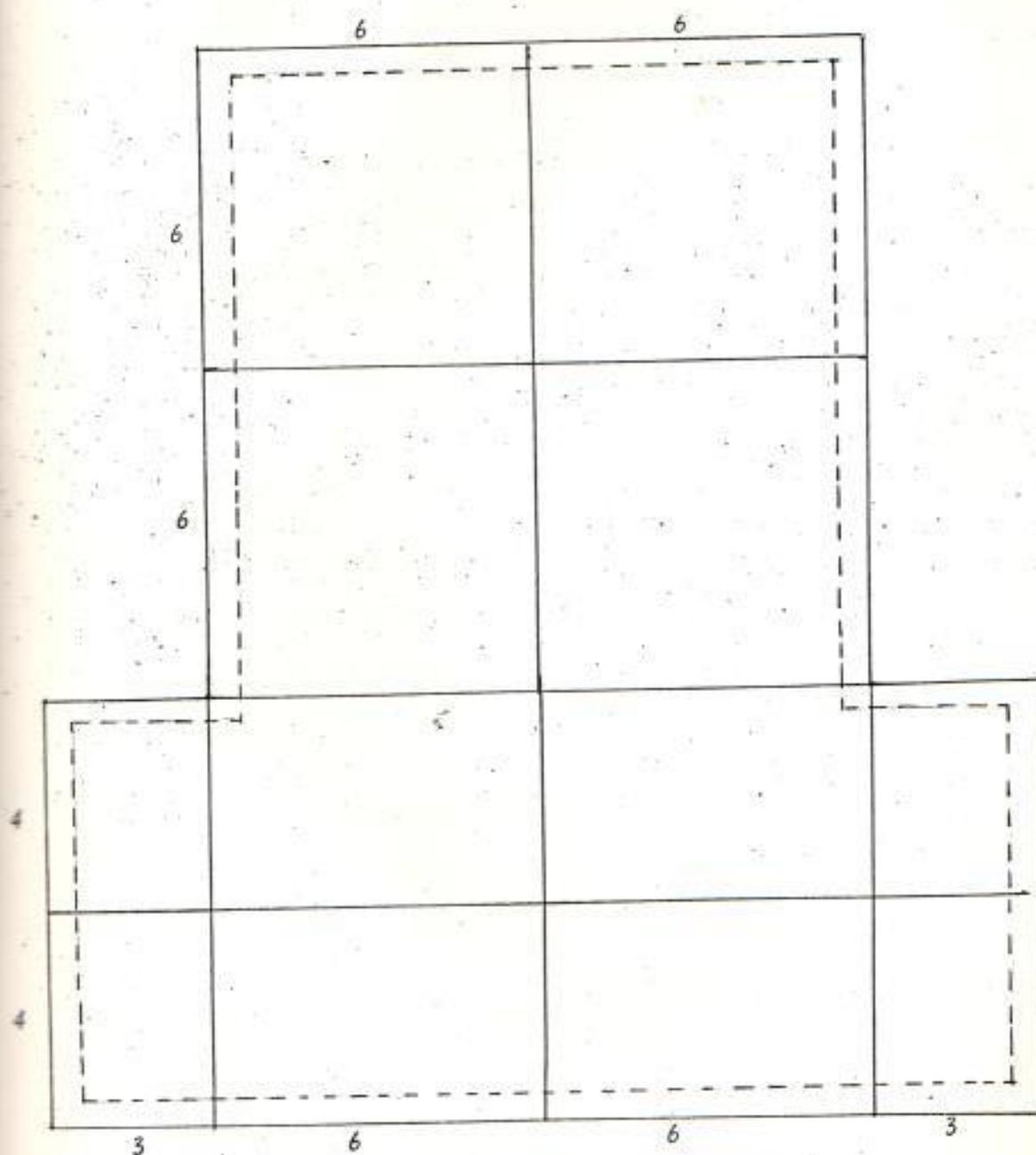


FIGURA 3.3

ANALISIS DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS POR EL COMPUTADOR PARA LA NUEVA ALTERNATIVA, COMPARASA CON LA ORIGINAL

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Luego del análisis realizado del sistema de puesta a tierra, por medio de un computador, podemos obtener las siguientes conclusiones:

- 1º Para una eficiente utilización del sistema, se debe previamente tener los datos suficientes sobre las características y la ubicación de la red donde se desea calcular la malla.
- 2º Uno de los objetivos fundamentales de la computarización del sistema, es la optimización de los recursos utilizados para la reducción de los costos de instalación.
- 3º Es necesario tener presente los factores externos que alteran la configuración, tales como la corrección por la corriente directa, la previsión de futuros crecimientos y la no uniformidad del terreno.
- 4º Tenemos necesidad de estimar los tiempos de duración de la malla, y el tiempo de exposición del conductor para el cálculo correcto del diámetro del conductor.
- 5º El cálculo es fácil de conducir por la interactividad del sistema, teniendo que poner énfasis en los pasos que se deben seguir para la resolución del problema.

A pesar de ser un programa que cubre un rango muy amplio de alternativas, se debe tener cuidado en ciertas condiciones que fueron descuidadas.

das y que pueden dar lugar a un análisis posterior, por lo que se recomienda lo siguiente:

- 1º Cuando se realicen los cálculos correspondiente, se debe tener presente las condiciones ambientales que no se han incluido en el estudio por ser éstas, motivo de un estudio adicional.
- 2º Los equipos y estructuras tienen otros tipos de protecciones tales como pararrayos y conexiones a tierra de las partes metálicas que no entran en este estudio pero pueden ser considerados lateralmente.
- 3º Un estudio adicional acerca de otras formas de protección como relay de alta velocidad podrían ayudar a realizar un diseño más conveniente de la malla, reduciendo el costo que ésta ocasiona.

MANUAL DEL USUARIO

3.8.

1. Generalidades

Cuando una persona desea utilizar el S/4341 debe llenar una solicitud en CESERCOMP, con la debida autorización de su Profesor.

A cada Usuario del s/4341 se le asignará dos palabras claves identificadas como: "USER-ID" y "PASSWORD".

2. Conexión lógica con el Sistema

A. Encender el Terminal. Hale el switch de la parte inferior derecha.

B. Presione Enter cuando aparezca el logotipo.

C. Cuando la parte inferior derecha tenga "CP READ", digite: logon "USER-ID".

D. Presione Enter.

E. El terminal responderá: "ENTER PASSWORD"

F. Digite el password asignado que no se representará en la pantalla.

G. Luego, saldrá una serie de mensajes hasta que en la parte inferior derecha aparezca la palabra "RUNNING".

3. Digite SPTE01 y presione enter.

4. En la pantalla aparecerá el menú autodocumentado que guia automaticamente al usuario.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- *Guide to Safety in alternating-current substation grounding*
AIEE
Nº 80-1961
- 2.- *Calculation of Resistance to Ground*
H. B. DWIGHT
1960
- 3.- *VS/FORTRAN Application Language Reference*
IBM S/4341
Septiembre /1982
- 4.- *Guide for Safety in Substation grounding*
IEEE Std. 80-1976
- 5.- *Tesis de Grado sobre Estudio y Diseño del Sistema de Tierra de Subestaciones Aplicado a la Central de Pisayambo.*
Ing. Víctor León Navas
ESPOL 1976
- 6.- *Diseño de sistemas de tierra en Centrales y Subestaciones desde el punto de vista de la seguridad personal*
Augusto San Cristóbal - Perú
1971