



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS
TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES II
(SISTEMAS DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)**

SISTEMAS DE TIERRAS I

**ING. ENRIQUE OROZCO LOPEZ
ING. ANDRES D. CHAVEZ SAÑUDO**

MAYO 1994

Palacio de Minería Calle de Tacuba 5 Primer piso Deleg. Cuauhtémoc 06000 México, D.F. APDO. Postal M-2285
Teléfonos: 512-8955 512-5121 521-7335 521-1987 Fax 510-0573 521-4020 AL 26

**DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES II
(SISTEMA DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)
27 y 28 de mayo de 1994.
DIRECTORIO DE PROFESORES**

**ING. ENRIQUE OROZCO LOPEZ
ENCARGADO DEL GRUPO DE CAPACITACION
DEL LABORATORIO
COMPAÑIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S.A.
MELCHOR OCAMPO 171 PISO 5
COL. TLAXPANA
11379 MEXICO, D.F.
TEL. 560 43 87, 535 05 17**

TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS E INDUSTRIALES II.
(SISTEMA DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)

- 1.- ARREOLA PEÑA TOMAS GABRIEL
BANCO INTERNACIONAL
ING. EN NORMATIVIDAD DE INSTALACIONES DE COMPUTO
CALLE COLIMA No. 373 PISO 6
COL. HIPODROMO
C.P. 06700
TEL. 7 21 41 93

- 2.- ANTONIO BAIZAN SANCHEZ
BANCO NACIONAL DE MEXICO S.A.
COORDINADOR INMUEBLES
SEVILLA No. 10 5 PISO
COL. JUAREZ
C.P. 06600
TEL. 2 25 21 48

- 3.- BARCENA SANCHEZ G. FELIPE
KRUFAM, S.A. DE C.V.
GERENTE GENERAL
CARRILLO PUERTO No. 327
POPOTLA
C.P. 11400
TEL. 5 27 25 08

- 4.- BELTRAN GALLEGA DANIEL
INGENIERO ELECTRICISTA
D. BEKTRA ARREOLA
SUPERVISOR
AV. MORELOS No. 827 EDIF. 8-83
MAGDALENA MIXHUCA V.C.
C.P. 08010
TEL. 5 65 61 53

- 5.- BROSА CURCO JAVIER
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
ELECTRO DONOSTI S.A.
DIRECTOR TECNICO
RIO CHURUBUSCO No. 276
COL. GRANJAS MEXICO
C.P. 08400
TEL. 6 57. 10 55

- 6.- CASTELLO CALVILLO LUIS FERNANDO
BANCO NACIONAL DE MEXICO S.A.
GERENTE
SEVILLA No. 10 5° PISO
COL. JUAREZ
C.P. 06600
TEL. 2 25 22 94

- 7.- CASTRO LINARES CARLOS
BANCO NACIONAL DE MEXICO S.A.
SUBGERENTE DE INMUEBLES
SEVILLA No. 10 51 PISO
COL. JUAREZ
C.P. 06600
TEL. 2 25 22 96

- 8.- CASTRONOVO SOLANA MARIO
BANCO INTERNACIONAL
INS. EN NORMATIVIDAD DE INSTALACIONES
COLIMA No. 373 PISO 6
COL. ROMA
C.P. 06700
TEL. 7 21 41 97

- 9.- CLEMENTE GARCIA RAFAEL ALFREDO
BANCO NACIONAL DE MEXICO S.A.
ASESOR
SEVILLA No. 10
COL. JUAREZ
C.P. 06600
TEL. 2 25 22 26

- 10.- CLEMENTE ZALET A MAURY
FAC, DE INGENIERIA UNAM.
PROF. ASIGNATURA
CIUDAD UNIVERSITARIA
TEL. 6 42 10 52

- 11.- DEL ANGEL ALVARADO JOSE SILVESTRE
ING. ELECTROMECHANICA
CIA DANIEL BELTRAN ARREOLA
SUPERVISOR
CALLE ACULCO No. 89
COL. LA LOMA TLALNEMEX
EDO DE MEXICO
TEL. 5 65 61 53

- 12.- ESPINOSA JUAREZ JAVIER
BANCO NACIONAL DE MEXICO S.A.
ASESOR
SEVILLA No. 10 5 PISO
COL. JUAREZ
TEL. 2 25 22 42

13.- GARCIA REYES ROBERTO
FUERZA Y CLIMA S.A. DE C.V.
SUPERVISOR DE FUERZA
PONIENTE 128 No. 549 IND. VALLEJO
TEL. 5 87 33 55 EXT. 119

14.- LEON GUTIERREZ JOSE
PERSONA FISICA ACTIV. EMPRESARIAL.
DUEÑO
AV. SUAREZ EDIF. D-1 204
UNIDAD MILITAR
C. IZCALLI
EDO. DE MEXICO
C.P. 54 749
TEL. 8 73 06 91

15.- LOPEZ SAMPEDRO JUAN
BANCO INTERNACIONAL
EMPLEADO BANCARIO ING. AUXILIAR
COLIMA No. 373
COL. ROMA
C.P. 06700
TEL. 7 21 41 93

16.- MEDINA RODRIGUEZ ANTONIO
BASE CONSTRUCCIONES
ING. DE PROYECTOS
GRAL. LEON No. 56
COL. SAN MIGUEL CHAPULTEPEC.
TEL. 2 71 51 00

17.- MEJIA DOMINGUEZ JOSE ANGEL
CASAS Y TARIMAS DE CARTON S.A. DE C.V.
INGENIERO DE SOPORTE TECNICO A EMPRESAS
CALLE PAPAGAYOS No. 66 LOMAS VERDES
TEL. 3 79 54 33

18.- MORA HERNANDEZ JUAN
CASTAÑOS No. 3932
LAS ANIMAS PUEBLA, PUE.
C.P. 72400
TEL. 49 88 55

19.- MORA ROSETE JUAN MANUEL
9 PONIENTE 109-1
COL. CENTRO

- 20.- MORALES COLLANTES ARTURO
ING. MEC. ELECT.
FACULTAD DE INGENIERIA UNAM.
JEFE DEL DEPTO. ING. ELECTRICA
CIUDAD UNIVERSITARIA
TEL. 6 22 08 82 6 22 31 06
- 21.- OLIVA GEFFROY HERNAN E.
INGENIERO INDUSTRIAL ELECTRICO
INGENIERIA ELECTRICA ESPECIALIZADA S.A.
SUPERVISOR
PRIVADA MINAS No. 12
COL. LAS AGUILAS
C.P. 01710
TEL. 5 93 80 97
- 22.- RAULL MARTIN JOSE
FAC. INGENIERIA UNAM.
PROFESOR
C.U.
- 23.- RAMIREZ ORTIZ RAFAEL
FUERZA Y CLIMA S.A. DE C.V.
COORDINADOR DE DISEÑOS ELECTROMECANICOS
PTE. 128 No. 549
COL. IND. VALLEJO
TEL. 3 68 53 44
- 24.- RAMIREZ VALDES GUSTAVO
BACE Y COSNTRUCCIONES S.A.
INGENIERIA
GRAL. ANTONIO LEON No. 56
COL. SAN MIGUEL CHAPULTEPEC
TEL. 2 71 51 00
- 25.- REYNALDO RAMIREZ GARCIA
UNIDAD VERIFICADORA
SAN JERONIMO 1363-8
- 26.- REYES TABLEROS GILBERTO EMILIO
UNAM.
PROF. ASIG. A.
CALZ. DE LA VIGA No. 54
MERCED BALBUENA
TEL. 6 72 18 69 6 72 34 53

27.- SERRANO BENITEZ MIGUEL

TECNICO ELECTRICISTA

CLUB DEPORTIVO CRUZ AZUL

SUPERVISOR ELECTRICO

TEL. 91 778 502 44

28.- SANCHEZ CRUZ ELEAZAR

JEFATURA TECNICA X.E.W.

AYUNTAMIENTO No. 52

COL. CENTRO

C.P. 06070

TEL. 2 30 12 70

29.- TORRES CERVANTES OSCAR MARCOS

FRAJ SIID S.A.

INGENIERO

ALFONSO HERRERA No. 36 2° PISO

COL. SAN RAFAEL

C.P. 06470

TEL. 5 66 17 79

30.- VALDIVIEZO QUIÑONES TITO OMAR

GUTSA CONSTRUCCIONES

AV. REVOLUCION No. 1387

C.P. 01040

TEL. 6 62 74 31

DIVISION DE EDUCACION CONTINUA
CURSOS ABIERTOS
TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES II
(SISTEMAS DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)
27 y 28 de mayo de 1994.

F E C H A	H O R A R I O	T E M A	P R O F E S O R
Viernes 27	16;00 a 21;00 hrs.	Sistemas de Tierras I	Ing. Enrique Orozco López
Sábado 28	9;00 a 16;00 hrs.	Sistemas de Tierras II	Ing. Enrique Orozco López

EVALUACION DEL PERSONAL DOCENTE

CURSO: Temas selectos de instalaciones
Eléctricas industriales II
(Sistemas de tierras y pruebas
de campo a equipos)

FECHA: 27 y 28 de mayo de 1994.

		DOMINIO DEL TEMA	EFICIENCIA EN EL USO DE AYUDAS AUDIOVISUALES	MANTENIMIENTO DEL INTERES (COMUNICACION CON LOS ASISTENTES, AMENIDAD, FA- CILIDAD DE EXPRESION)	PUNTUALIDAD	
CONFERENCISTA						
1	Ing. Enrique Orozco López					
ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10						

EVALUACION DE LA ENSEÑANZA

SU EVALUACION SINCERA NOS AYUDARA A MEJORAR LOS PROGRAMAS POSTERIORES QUE DISEÑAREMOS PARA USTED.

Temas selectos de instalaciones eléctricas industriales II
(Sistemas de tierras y pruebas de campo a equipos)

27 y 28 de mayo de 1994.

	T E M A	ORGANIZACION Y DESARROLLO DEL TEMA	GRADO DE PROFUNDIDAD LOGRADO EN EL TEMA	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO EN EL TEMA	UTILIDAD PRACTICA DEL TEMA
1	Sistemas de tierras I				
2	Sistemas de tierras II				
ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10					

EVALUACION DEL CURSO

C O N C E P T O		
1.	APLICACION INMEDIATA DE LOS CONCEPTOS EXPUESTOS	
2.	CLARIDAD CON QUE SE EXPUSIERON LOS TEMAS	
3.	GRADO DE ACTUALIZACION LOGRADO EN EL CURSO	
4.	CUMPLIMIENTO DE LOS OBJETIVOS DEL CURSO	
5.	CONTINUIDAD EN LOS TEMAS DEL CURSO	
6.	CALIDAD DE LAS NOTAS DEL CUSO	
7.	GRADO DE MOTIVACION LOGRADO EN EL CURSO	
EVALUACION TOTAL		

ESCALA DE EVALUACION: 1 a 10

1.- ¿Qué le pareció el ambiente en la División de Educación Continua?

MUY AGRADABLE

AGRADABLE

DESAGRADABLE

2.- Medio de comunicación por el que se enteró del curso:

PERIODICO EXCELSIOR
ANUNCIO TITULADO DE
VISION DE EDUCACION
CONTINUA

PERIODICO NOVEDADES
ANUNCIO TITULADO DE
VISION DE EDUCACION
CONTINUA

FOLLETO DEL CURSO

CARTEL MENSUAL

RADIO UNIVERSIDAD

COMUNICACION CARTA,
TELEFONO, VERBAL, ETC.

REVISTAS TECNICAS

FOLLETO ANUAL

CARTELERIA UNAM "LOS
UNIVERSITARIOS HOY"

GACETA
UNAM

3.- Medio de transporte utilizado para venir al Palacio de Minería

AUTOMOVIL
PARTICULAR

OTRO MEDIO

4.- ¿Qué cambios haría en el programa para tratar de perfeccionar el curso?

5.- ¿Recomendaría el curso a otras personas?

SI

NO

6.- ¿Qué periódico lee con mayor frecuencia?

7.- ¿Qué cursos le gustaría que ofreciera la División de Educación Continua?

8.- La coordinación académica fué:

EXCELENTE

BUENA

REGULAR

MALA

9.- Si está interesado en tomar algún curso INTENSIVO ¿Cuál es el horario más conveniente para usted?

LUNES A VIERNES
DE 9 a 13 H. Y
DE 14 a 18 H.
(CON COMIDA)

LUNES A VIERNES
DE 17 a 21 H.

LUNES A MIERCOLES
Y VIERNES DE
18 a 21 H.

MARTES Y JUEVES
DE 18 A 21 H.

VIERNES DE 17 a 21 H.
SABADOS DE 9 a 14 H.

VIERNES DE 17 A 21 H.
SABADOS DE 9 a 13 H.
DE 14 a 18 H.

OTRO

10.- ¿Qué servicios adicionales desearía que tuviere la División de Educación Continua, para los asistentes?

11.- Otras sugerencias:



**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

CURSOS ABIERTOS

**TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES II
(SISTEMAS DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)**

SISTEMAS DE TIERRAS I

**ING. ENRIQUE OROZCO LOPEZ
ING. ANDRES D. CHAVEZ SAÑUDO**

MAYO 1994

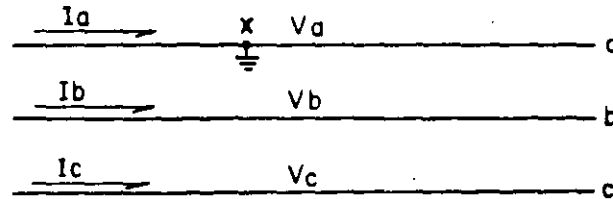
Al proyectar un sistema eléctrico de distribución, se pone especial énfasis en los métodos mejores para conducir el fluido eléctrico, como en la mejor manera de aislarlos del medio ambiente y entre sí. Se aplican los conocimientos tecnológicos de modo de tener el mejor control y la mejor protección para los circuitos eléctricos de control. Se busca la mejor coordinación tanto de aislamientos como de protecciones para lograr que el sistema eléctrico resulte eficiente, confiable, seguro y versátil.

Todo el conjunto de elementos constituyentes del sistema eléctrico, está prácticamente a la vista y es de fácil acceso, pero existe una sección de las redes eléctricas del sistema de distribución (nos referimos al sistema de tierras) a la cual es muy conveniente dirigir nuestra atención. Es necesario aplicar nuestros conocimientos teórico-prácticos para seleccionar el mejor sistema para poder descargar segura y adecuadamente las corrientes resultantes de una falla a tierra, y no permitir sobretensiones peligrosas para el personal y los equipos de las instalaciones eléctricas.

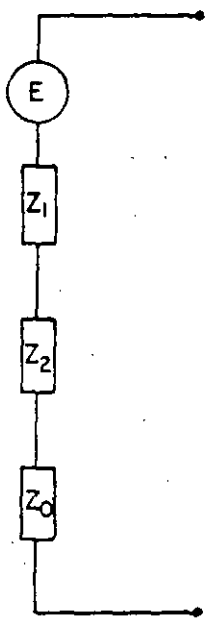
Existen varias formas de referir el neutro de un sistema eléctrico a tierra: aterrizaje directo, por medio de reactancias, por resistencias y también el de neutro aislado de tierra (neutro flotante ó distribución del ta).

7.1 TIPOS DE SISTEMAS ATERRIZADOS Y NO ATERRIZADOS.

Supongamos un sistema trifásico con una falla de línea a tierra como se indica en la figura:



Utilizando la técnica de componentes simétricas podemos resolver el circuito como se indica a continuación:



E .- Tensión de la Fuente

Z_1 .- Impedancia de secuencia positiva, vista desde el punto de falla X.

Z_2 .- Impedancia de secuencia negativa, vista desde el punto de falla X.

Z_0 .- Impedancia de secuencia cero, vista desde el punto de falla X.

$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$E_1 = E \left(1 - \frac{Z_1}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

$$E_2 = -E \frac{Z_1}{Z_0 + 2Z_1}$$

$$E_0 = -E \frac{Z_0}{Z_0 + 2Z_1}$$

$$V_a = 0$$

$$V_b = E_0 + a^2 E_1 + a E_2$$

$$V_c = E_0 + a E_1 + a^2 E_2$$

$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$V_b = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{Z_0}{Z_1} + 2} \quad (\text{P. U.})$$

$$V_c = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} + \frac{\frac{Z_0}{Z_1} - 1}{\frac{Z_0}{Z_1} + 2} \quad (\text{P. U.})$$

$$Z_1 = R_1 + j X_1$$

$$Z_0 = R_0 + j X_0$$

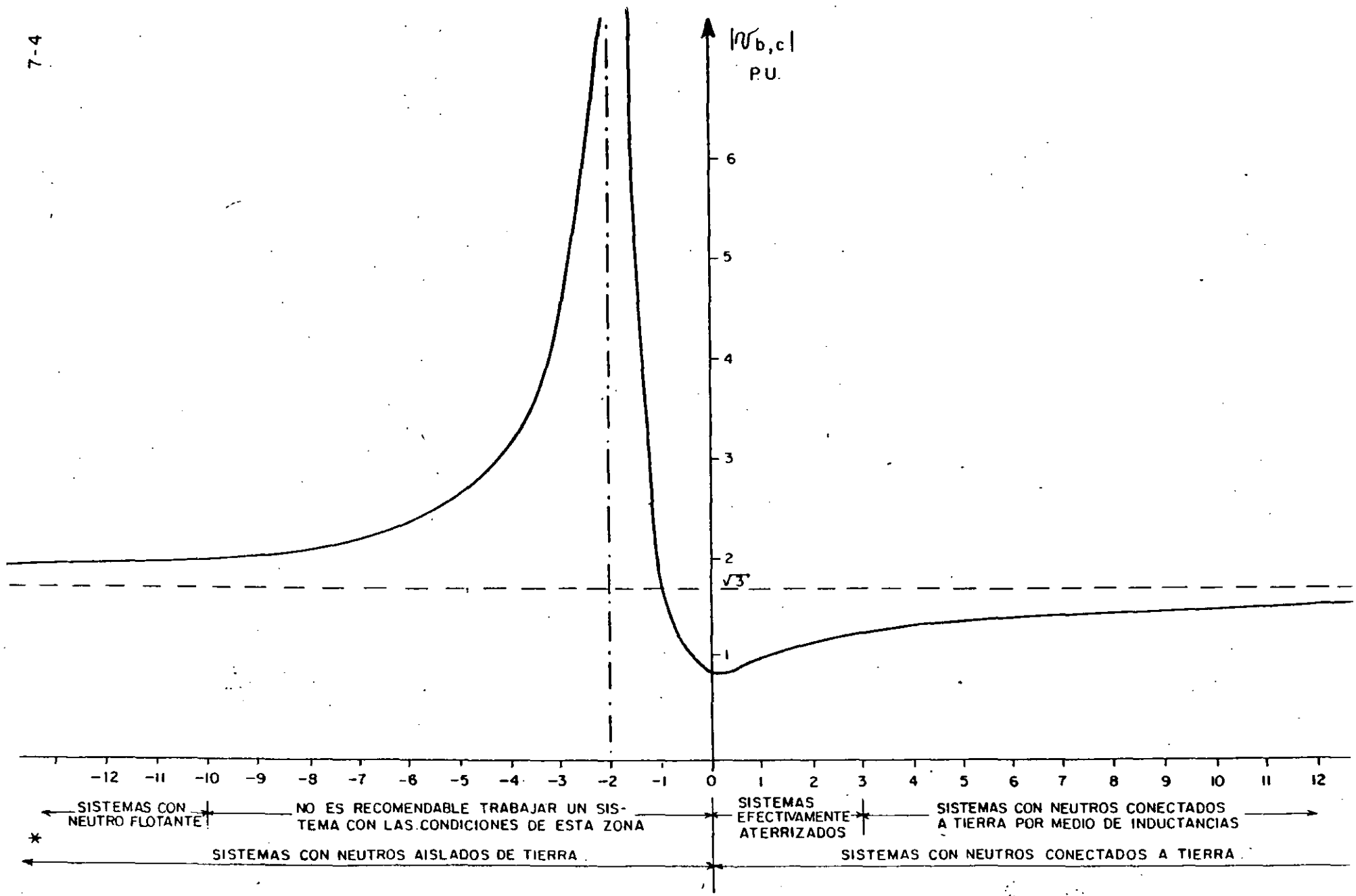
Si para simplificar despreciamos R_1 y R_0 podemos generalizar las ecuaciones anteriores:

$$V_{b,c} = -\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_1} + 2}$$

Dando valores a la relación X_0/X_1 podemos encontrar las tensiones que aparecen en las líneas (b,c) no falladas:

$\frac{X_0}{X_1}$	$ V_{b,c} $ (P.U.)	OBSERVACIONES
0	$\sqrt{3}/2 = 0.866$	La reactancia en secuencia positiva es función de la inductancia del circuito de potencia y siempre el de valor positivo. La reactancia en secuencia cero, corresponde a la que tiene el retorno por tierra, en este caso es de valor positivo y significa que los neutros están conectados a tierra.
1	1	
3	1.25	
10	1.5	
∞	$\sqrt{3}$	
-1	$\sqrt{3}$	
-1.5	4.51	
-2	∞	
-3	4.51	
-4	3.12	
-6	2.41	
-10	2.02	
-40	1.8	
$-\infty$	$\sqrt{3}$	

Graficando la Información anterior obtenemos:



* LOS PUNTOS EN DONDE $\frac{X_0}{X_1} \approx \pm \infty$ CORRESPONDEN A SISTEMAS CON EL NEUTRO CONECTADO A TIERRA POR MEDIO DE UNA BOBINA DE PETERSEN

Analizando la gráfica anterior podemos apreciar que el tipo de aterrizamiento de un sistema eléctrico depende fundamentalmente de las sobretensiones a la frecuencia de generación que aparecen cuando una línea se pone a tierra. Podemos conocer por lo tanto, el grado de aterrizamiento de un sistema por medio de sus parámetros de diseño X_0 , X_1 y R_0 , como veremos a continuación:

- SISTEMA EFECTIVAMENTE ATERRIZADO.

Es el que tiene la mayor parte de sus neutros conectados directamente a una tierra de baja impedancia y que es capaz de conducir la corriente máxima de corto circuito.

Las condiciones para que el sistema se considere efectivamente aterrizado, son que para cualquier condición de operación y cualquier capacidad de generación se cumplan las siguientes relaciones.

$$0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3$$
$$0 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

Con estas condiciones las sobretensiones a la frecuencia del sistema nunca podrán ser mayores de 1.4 p.u., y el factor de aterrizamiento siempre será menor de $1.4 / \sqrt{3} = 0,81$

Prácticamente todos los sistemas de potencia y distribución están efectivamente aterrizados.

La mayoría de las instalaciones industriales nacionales, también caen dentro de esta categoría de aterrizamiento.

- SISTEMA ATERRIZADO POR RECTANCIA

Como su nombre lo indica, implica la inserción de una bobina entre el neutro y la red de tierras. Esta reactancia debe tener un valor tal que se cumplan las siguientes condiciones:

$$3 < \frac{X_0}{X_1} < \infty$$

$$3 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

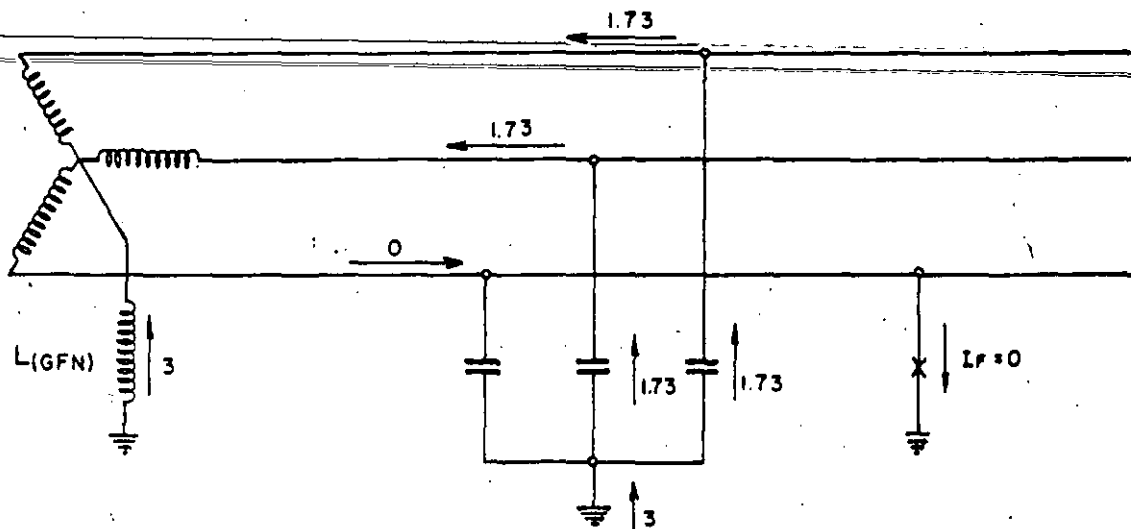
La red de tierras y la reactancia inductiva deben de poder conducir adecuadamente las corrientes de corto circuito del sistema.

Este sistema de aterrizamiento puede originar sobretensiones a la frecuencia del sistema de más de 1.4 p.u. pero menores de 1.73 p.u., lo que nos da un factor de aterrizamiento entre 0.81 y 1.00.

Este sistema de aterrizamiento se emplea cuando por alguna razón se desea limitar la corriente de corto circuito de fase a tierra del sistema, y se pueden aceptar las sobretensiones que aparecen cuando existen disturbios. (Sobretensión transitoria 2.73 p.u. max.)

- SISTEMA ATERRIZADO POR BOBINA DE PETERSEN

Es un sistema con el neutro aterrizado por una bobina (GFN) de magnitud adecuada para formar un circuito resonante en paralelo, a la frecuencia de generación, con la capacitancia a tierra del sistema, de tal manera que la corriente de falla de una línea a tierra sea cero.



$$X_0 = \frac{(jWL) \left(-j \frac{1}{WC}\right)}{(jWL) - \left(j \frac{1}{WC}\right)} = + \infty$$

El método de cálculo detallado se puede encontrar en "JOINT EEI — BELL TELEPHONE SYSTEM REPORT VOL IV REPORTS 26 - 38".

Las sobretensiones a la frecuencia de generación son de 1.73 p.u. y el factor de aterrizamiento es de 1.0.

Esta forma de aterrizamiento se usa en industrias en donde la continuidad de servicio es vital. El sistema puede seguir trabajando aún con una fase a tierra.

No se debe olvidar que el sistema debe estar convenientemente aislado para aguantar las sobretensiones que aparecen en éste sistema en caso de disturbios.

- SISTEMA CON NEUTRO FLOTANTE

Los neutros del sistema se dejan desconectados de tierra. Las sobretensiones a la frecuencia del sistema siempre serán mayores a 1.73 p.u.

y para limitarlas a 2.0 p.u. (Factor de aterrizamiento de 1.1)

Se establece la condición $X_0/X_1 \leq -10$. Para sistemas de gran capacitancia a tierra, en donde no se cumple la condición anterior, no es recomendable trabajarlos con neutro flotante ya que no es posible resolver satisfactoriamente el problema del aislamiento.

Los sistemas con neutro flotante se utilizan en instalaciones industriales en donde la continuidad del servicio es necesaria, ya que pueden seguir trabajando aún con una fase fallada a tierra.

Las sobretensiones transitorias pueden ser muy altas especialmente las debidas a cargas atrapadas en las capacitancias a tierra. Es necesario asegurarse que no existe la posibilidad de que ocurran éstos fenómenos indeseables en un sistema, antes de decidir el uso del neutro flotante.

- SISTEMAS ATERRIZADOS POR RESISTENCIA.

Se utiliza en sistemas eléctricos de potencia y distribución en donde lo más común es aterrizar el neutro con una resistencia pequeña, para limitar la corriente de corto circuito de fase a tierra. En éstos casos las sobretensiones a la frecuencia nominal siempre serán menores a 1.73 p.u., factor de aterrizamiento no mayores a 1.00. Las sobretensiones transitorias quedan muy amortiguadas y se tiene ventaja con respecto a los sistemas aterrizados por reactancia, aunque la resistencia es voluminosa ya que debe disipar gran cantidad de energía durante las fallas de línea a tierra.

Cuando la resistencia es muy grande para limitar la corriente de falla de fase a tierra a valores muy bajos que permitan seguir operando la instalación industrial, aún con éste tipo de falla y sin los problemas de sobretensiones transitorias de los sistemas con neutro flotante, se recomienda

dimensionar la resistencia de tal manera que Z_0 / X_1 no se haga negativo.

$$Z_0 = \frac{R(-j \frac{1}{\omega C})}{R - j \frac{1}{\omega C}}$$

7.2 PROYECTOS DE REDES DE TIERRA.

740

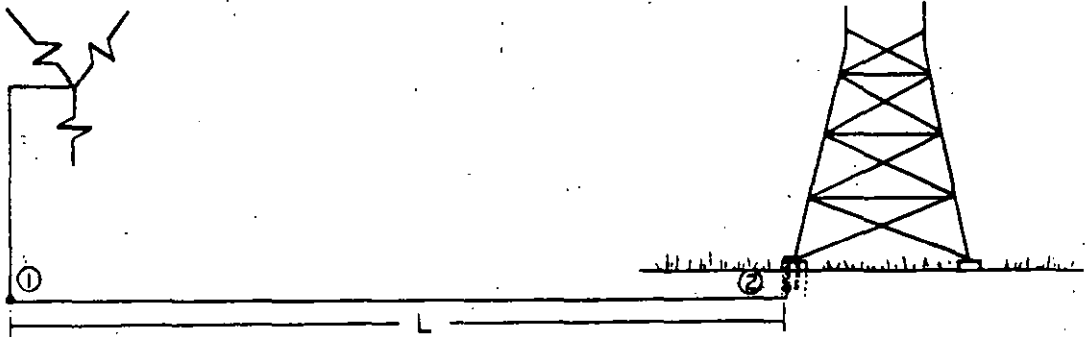
En el pasado, prevalecía el criterio de que cualquier objeto aterrizado ya fuera que formara parte de un sistema de tierras o que por opinión propia era parte de una "buena tierra" podría ser tocado con toda seguridad. Aparentemente éste punto de vista era sólido, ya que si una estructura metálica, estaba conectada mecánicamente a una red hidráulica - en amplio contacto con el terreno, uno podría con plena seguridad apoyarse en ella, ya que cualquier línea de cualquier tensión que cayera sobre ella automáticamente igualaría su nivel de potencial al de tierra, es decir cero y el ser humano estaba a salvo de diferencias de potenciales peligrosos.

La experiencia de varios años, arrojó un resultado fatal, muchas vidas fueron segadas en forma totalmente extraña; caminando en un terreno - abierto con una "buena red de tierras" a sus pies, caían fulminadas, recargadas en una estructura metálica, morían electrocutados; ¿que pasaba con las tierras ?

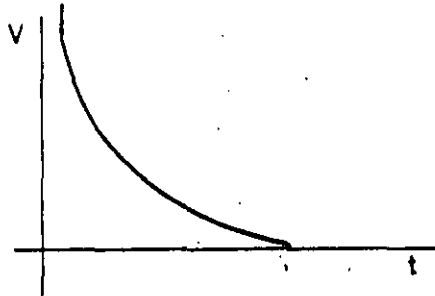
Se había solamente analizado el peligro de tensiones peligrosas - de línea a tierra ya fueran transitorias por descargas atmosféricas ó por - caídas de líneas más no se habían analizado los efectos secundarios de tales circunstancias; no se había contemplado el efecto de la corriente de falla al circular por el terreno.

¿Que pasa cuando ocurre una falla a tierra en un sistema debidamente aterrizado?

Supongamos que tenemos un conductor enterrado conectado al neutro de un transformador y una línea cayendo a tierra a una distancia L .



La corriente de falla se distribuirá en el terreno circundante y tratará de cerrar el circuito a través de los puntos ① y ②, ocasionando una curva de niveles de tensión debidos al paso de la corriente de falla por una resistividad del terreno (ρ) en una longitud (L) lo que por ley de ohm -- $dv = \rho L d_{acc}$, que nos arrojará una superficie equipotencial desarrollada de la siguiente forma simplificada.



Se observa que los decrementos de tensión son sumamente importantes en las proximidades del punto de falla ya que a pequeños incrementos de longitud, ocurren grandes incrementos de potencial, que pueden resultar de varios miles de volts. :

¿ Cual es el circuito eléctrico equivalente del cuerpo humano ?

Según reportes del IEEE, el umbral de percepción de la corriente eléctrica en un ser humano es del orden de 1 ma, ya en niveles de 9-25 ma, resulta un efecto doloroso y se empieza a presentar el fenómeno de contracción muscular que -

ocasiona el efecto de aferrarse a los objetos electrizados, 50-100 ma, se presenta el umbral de la fibrilación ventricular, que es un fenómeno de daño irreversible en el corazón, para terminar en valores superiores con el daño total del mismo y la muerte por ausencia total de actividad palpitatoria combinada con la asfixia,

Se puede considerar que un valor seguro para un corazón sano es de 25 ma, a través de él. Naturalmente es muy importante el tiempo de duración de dicha corriente.

Se ha comprobado que si el tiempo es menor, el cuerpo puede soportar corrientes mucho mayores determinándose una relación empírico-matemático por la fórmula de Charles Dalziel, como sigue:

$$I_k^2 t = 0.0135$$

de donde:

I_k : corriente en amperes a través del cuerpo

t : duración de la falla en segundos

0.0135: factor empírico basado en el concepto de constante de energía.

De la fórmula anterior:

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

Con respecto a la resistencia del cuerpo, es pertinente anotar que según las experiencias en la Universidad de Columbia, se ha obtenido el valor-

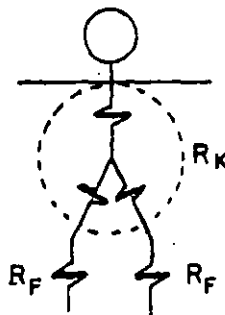
promedio de 2300 ohms entre mano y mano y 1100 ohms entre una mano y un pie

Como seguridad se emplea el valor de 1000 ohms en ambos casos -

(R_k).

Además se ha determinado que siendo la resistividad del terreno ρ_s , la resistencia de un pie (R_F) será $3 \rho_s$ ohms, por lo tanto entre dos pies en serie (un paso) será $6 \rho_s$ ohms y los dos pies en paralelo (tocando con una mano el objeto energizado) será de $1.5 \rho_s$.

El circuito equivalente de un cuerpo humano promedio será

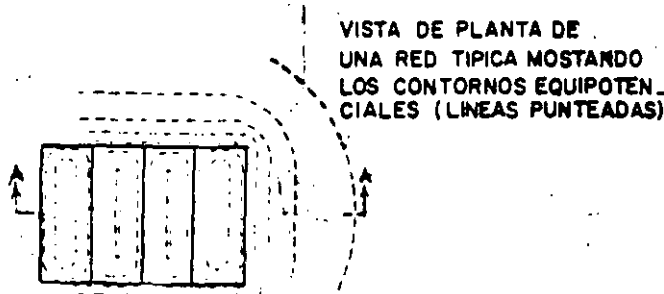


¿ Como se comporta una malla de tierra bajo condiciones de falla?

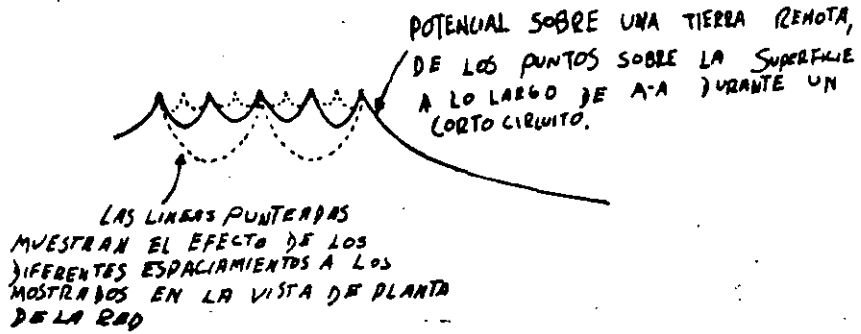
Por lo que respecta a la dispersión de corrientes en el terreno, como se muestra a continuación.



Por lo que respecta a los niveles de tensión, pueden trazarse su superficies equipotenciales como se puede apreciar.

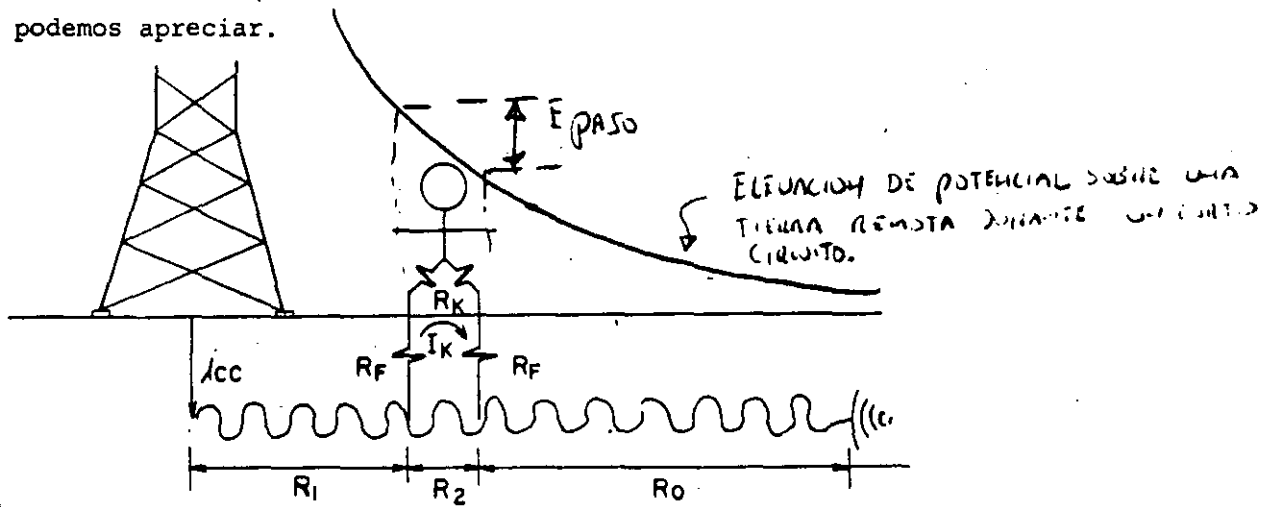


Las tensiones que aparecen en el nivel de piso terminado son:

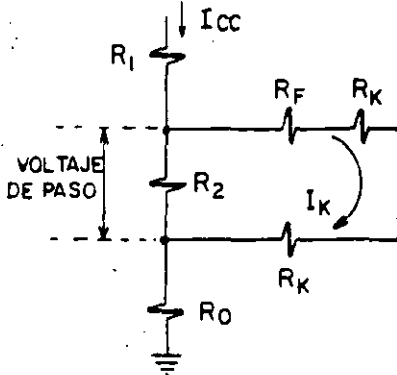


4.- Diferentes posibilidades de accidentes.

La primera posibilidad es que el individuo al dar un paso en -- una superficie bajo tensiones transitorias puede estar sometido a potencia -- les peligrosos debido a una falla de fase a tierra (voltaje de paso) como podemos apreciar.



Circuito equivalente:

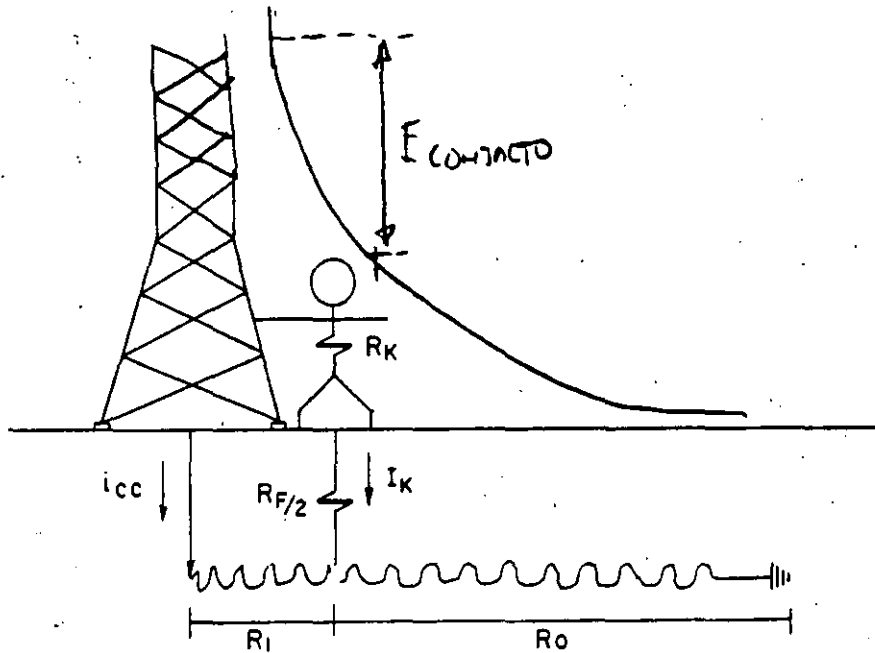


$$V_p = (R_K + 2R_F) \times I_K$$

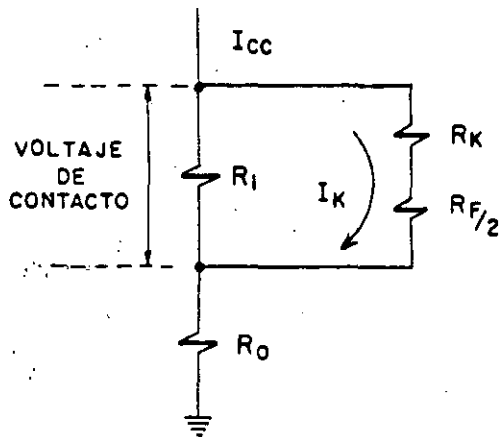
$$= (1000 + 6 \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

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

La segunda posibilidad existe cuando una persona está parada -
 junto a una estructura aterrizada y hace contacto manual con ella y -
 ocurre una falla a tierra (voltaje de contacto) como se muestra:

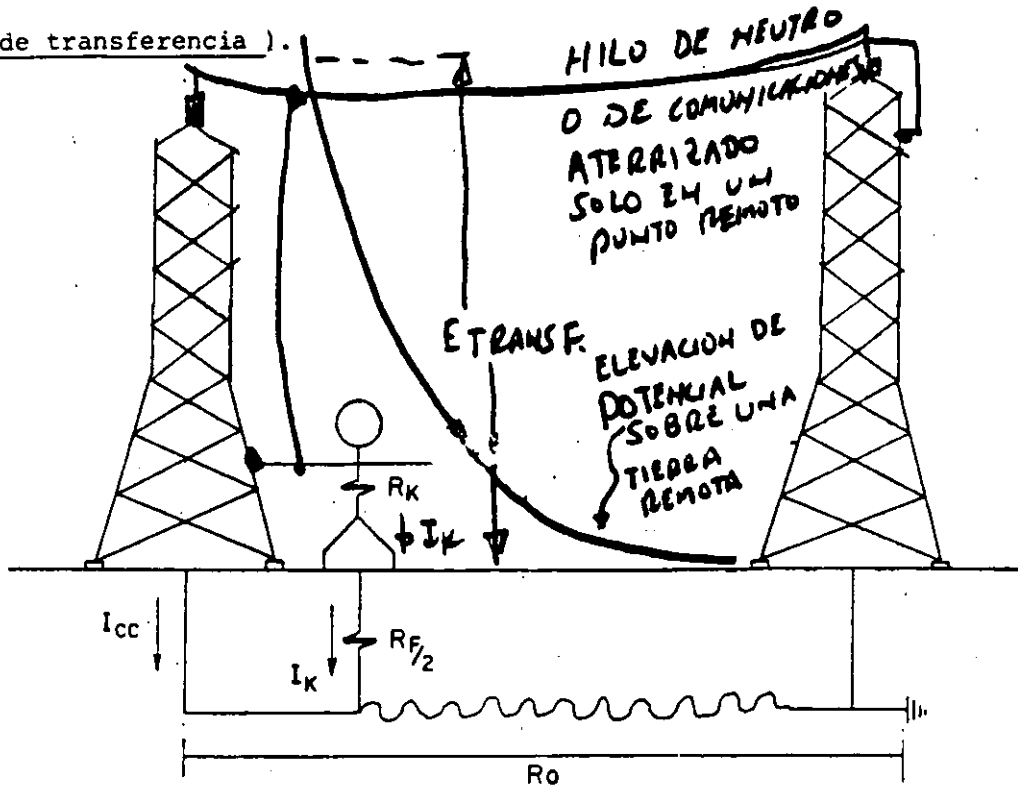


Circuito equivalente :

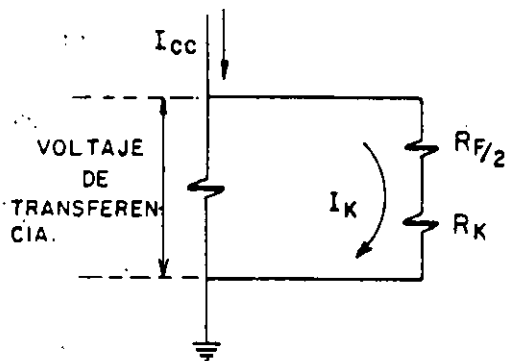


$$\begin{aligned}
 V_C &= (R + R_{F/2}) I_K \\
 &= (1000 + 1.5 \text{ } \Omega) \frac{0.116}{\sqrt{E}} \\
 &= \frac{116 + 0.17 \text{ } \Omega}{\sqrt{E}}
 \end{aligned}$$

La tercera posibilidad es cuando existe un elemento metálico - aterrizado en un punto de falla y su longitud es tal que puede hacerse contacto simultáneamente con él y otra superficie también aterrizada (voltaje de transferencia).



Circuito equivalente



$$V_t = (R_{f/2} + R_k) I_k$$

$$= (1000 + 1.5 \ell s) \frac{0.116}{\sqrt{\ell}}$$

$$= \frac{116 + 0.174 \ell s}{\sqrt{\ell}}$$

Tanto los voltajes de paso como los de contacto y transferencia han sido fijados en un máximo de 150 V , y la duración máxima será de 1.2 - seg.

La secuencia de cálculo para proyectar una red de tierras con capacidad de conducir las corrientes de corto circuito y que presente seguridad al personal y equipos se indica a continuación:

CALCULO DE REDES DE TIERRA

1.- Determinación de la corriente máxima de falla a tierra IG.

2.- Determinación del calibre mínimo para evitar fusión mediante table de ---
ONDERDONK.

DURACION DE LA FALLA SEG.	CM / A		
	CABLE	CONEXIONES SOLDADAS.	CONEXIONES MECANICAS.
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

$$S = (CM / A) \times IG$$

3.- Resistividad del terreno.

Fórmula de D.F. WENNER

$$\rho_s = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}}$$

- ρ_s = Resistividad el terreno en (ohm - m)
 R = Resistencia medida con Megger en (ohms)
 A = Distancia entre electrodos adyacentes en (m)
 B = Profundidad de enterramiento de los electrodos en (m)

VALORES TIPICOS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO	
TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD (ohm - m)
Tierra Orgánica mojada.	10
Suelo húmedo.	10^2
Suelo seco.	10^3
Concreto armado.	10^3
Cama rocosa.	10^4

4.- Diseño preliminar de la red de tierras.

$$L = \frac{K_m K_d \rho_{si} I_{cc} \sqrt{T}}{0.116 + 0.17 \rho_{s2}}$$

L - Longitud mínima del conductor enterrado en metros incluyendo las varillas.

K_m - Coeficiente que toma en cuenta los conductores de la malla en cuanto a número, calibre y disposición

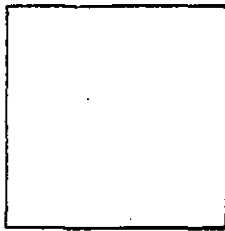
$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots$$

(n-2) términos →

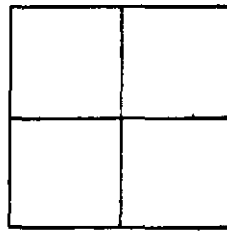
- D - Separación entre conductores de la malla (m)
 d - Diámetro de los conductores que forman la malla en (m)
 h - Profundidad a la que se entierra la red en (m)
 n - Espaciamientos de la malla.

K_j .- Factor de corrección por irregularidades, tomando en cuenta la distribución irregular del flujo de corrientes a tierra.

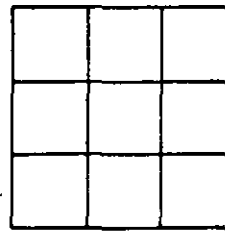
(factores K_j sugeridos por Walter Koch.)



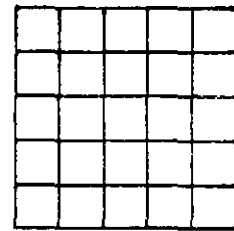
$K_j = 1$



$K_j = 1.16$



$K_j = 1.47$



$K_j = 2.21$

ρ_{s1} - Resistividad del terreno en (ohms - m)

ρ_{s2} - Resistividad del terreno que tocan los pies en (ohms - m)

I_{cc} - Corriente eficaz máxima que fluirá de la red en conjunto hacia la tierra, en (AMP)

$$I_{cc} = I_G \times A \times D$$

A = Factor de Ampliación

D = Factor de Decremento

DURACION DE LA FALLA		FACTOR DE DECREMENTO
CICLOS A 60 Hz	SEG.	D
0.5	0.008	1.65
6	0.10	1.25
15	0.25	1.10
30 ó más	0.5 ó más	1.00

Para cálculos más precisos del Factor de decremento se puede emplear la siguiente fórmula

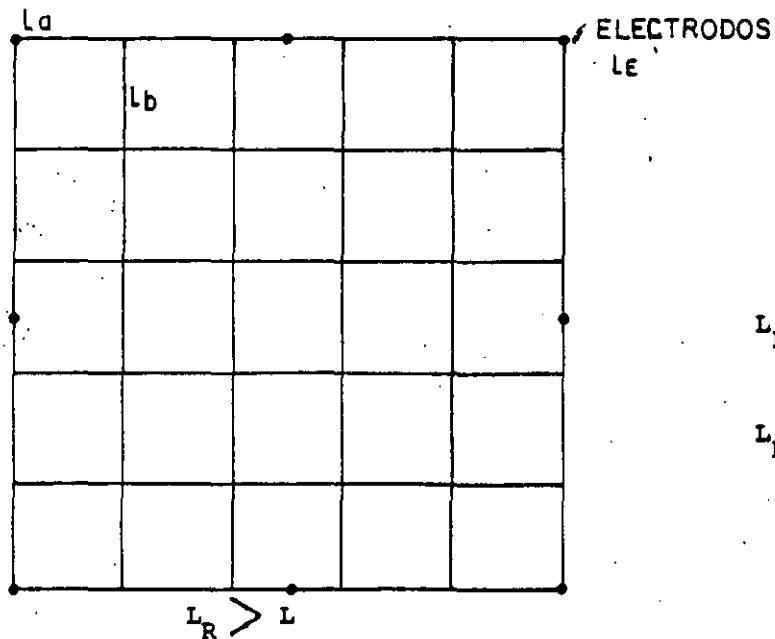
$$D = \sqrt{\frac{1}{T} \left[T + \frac{1}{\omega} \frac{X}{R} \left(1 - e^{-\frac{2\omega T}{X/R}} \right) \right]}$$

T - Duración de la falla en (seg)

$$\omega = 2\pi f$$

X - Reactancia total del sistema en (ohms)

R - Resistencia total del sistema en (ohms)



$$L_R = \sum l_a + \sum l_b + \sum l_e$$

L_R = Longitud real del conductor enterrado, incluyendo varillas en (m).

En caso contrario rediseñar la red hasta cumplir la condición.

5.- Cálculo de la resistencia de la red de tierras.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

r - Radio equivalente de la superficie de la red de tierras en (m)

A - Area de la red de tierras en (m²).

$$R = \frac{\rho_s}{4r} + \frac{\rho_s}{L_R}$$

R - Resistencia entre la red y tierra en (ohms)

6.- Cálculo del máximo aumento de potencial de la red en caso de falla.

$$E = I_0 R$$

7.- Cálculo del potencial de paso en el piso adyacente a la red.

$$E_s = K_s K_a \rho_{Si} \frac{I_0}{L_R}$$

E_s = Potencial entre los pies de una persona al dar un paso cuando está -
circulando la corriente máxima de falla de la red hacia la tierra en -
(Volts)

K_s = Coeficiente que considera la profundidad de enterrado de la red de --
tierra y el número de conductores transversales de la red.

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \dots + \frac{1}{13D} \right]$$

Hasta el número de espacios -
transversales.

K_i - Factor de corrección por irregularidad.

ρ_{s1} - Resistividad del terreno en (ohms - m)

$$E_s < E'_s = \frac{116 + 0.7 \rho_{s2}}{\sqrt{t}}$$

En caso contrario rediseñar la red para que ésta condición se cumpla.

8.- Cálculo de potencial entre piso y elementos conectados a tierra.

Si $L_R \geq L$ se considera que el potencial entre el piso y puntos tocados con la mano están dentro de los límites aceptables.

Como un ejemplo de aplicación presentamos el cálculo de la red de tierra de la unidad 4 de Salamanca.

1.- Determinación de la corriente máxima de falla a tierra.

a) Características del equipo:

Generador.- 344.44 MVA , 20 KV , F.P. = 0.8 , 3 ϕ

60 cps , 3600 R.P.M.

x_d = reactancia sincrónica = 157.0 $\%$

x'_d = reactancia transitoria = 28.0 $\%$

$x_1 = x''_d$ = reactancia subtransitoria = 20.5 $\%$

X_2 = Reactancia de secuencia negativa = 18.0 $\%$

x_0 = Reactancia de secuencia cero = 8.5 $\%$

Transformadores Principales.- Tres de 107 MVA c/u.

20 / 230 Kv . 1 ϕ , 60 cps.

$\% Z = 10.4$

Sistema.- En el bus de 230 Kv. La capacidad interruptiva del mismo se considera de 15,000 MVA.

b) Corriente de falla a tierra en el lado de 230 Kv

BASE: 1 MVA.

Reactancias del Sistema:

$$X_{1S} = X_{2S} = X_{0S} = \frac{1 \times 10^1}{15,000} = 0.000\ 066 \%$$

Reactancias de Transformadores Principales:

$$X_{1T} = X_{2T} = X_{0T} = \frac{0.104}{3 \times 10^7} = 0.000\ 324 \%$$

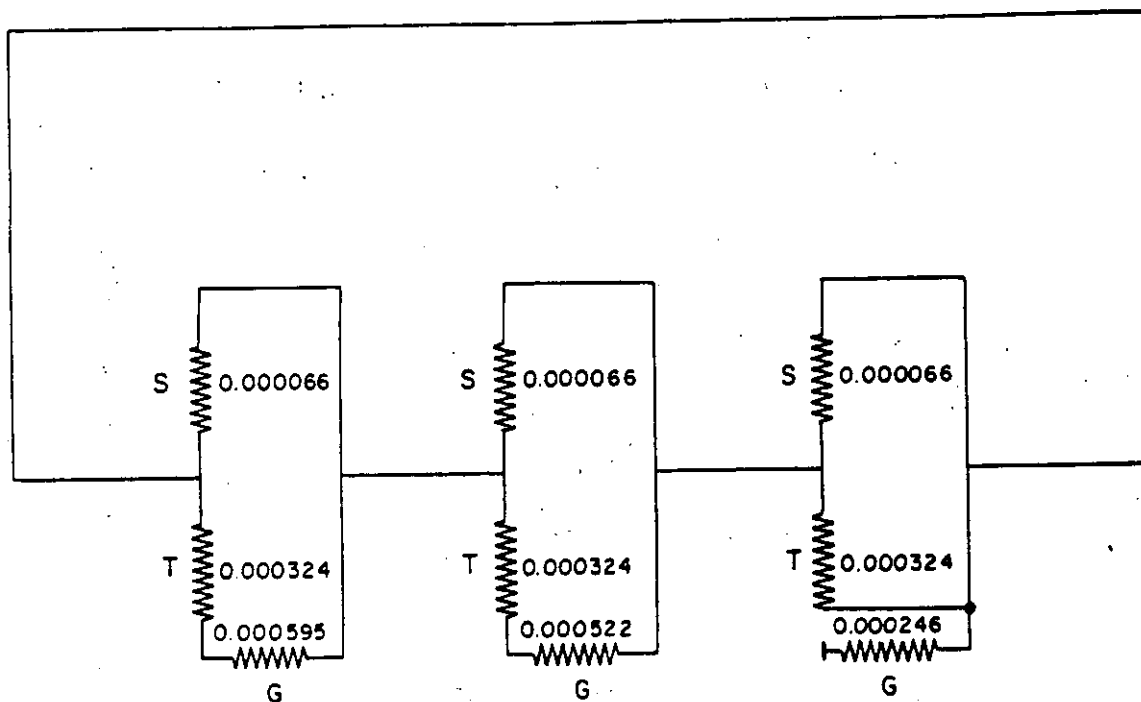
Reactancias del Generador:

$$X_{1G} = X''_d = \frac{0.205 \times 1}{344.44} = 0.000\ 595 \%$$

$$X_{2G} = \frac{0.18 \times 1}{344.44} = 0.000\ 522 \%$$

$$X_{0G} = \frac{0.085 \times 1}{344.44} = 0.000\ 246 \%$$

REFERENCIA



Cálculo de X_{1R} , X_{2R} , X_{OR}

$$0.000\ 324 + 0.000\ 595 = 0.000\ 919$$

$$X_{1R} = \frac{0.000\ 919 \times 0.000\ 066}{0.000\ 919 + 0.000\ 066} = 0.000\ 0615$$

$$0.000\ 324 + 0.000\ 522 = 0.000\ 846$$

$$X_{2R} = \frac{0.000\ 846 \times 0.000\ 066}{0.000\ 846 + 0.000\ 066} = 0.000\ 0612$$

$$X_{OR} = \frac{0.000\ 324 \times 0.000\ 066}{0.000\ 324 + 0.000\ 066} = 0.000\ 0548$$

Fórmula para determinar la corriente de falla a tierra:

$$I_G = \frac{3}{X_{1R} + X_{2R} + X_{OR}}$$

Sustituyendo:

$$I_G = \frac{3}{0.000\ 0615 + 0.000\ 0612 + 0.000\ 0548} = 16901.4 \%$$

$$I_G = \frac{16901.4 \times 1000}{\sqrt{3} \times 230} = 42426.2 \text{ Amp}$$

Determinación de la sección del conductor según la siguiente tabla ONDERDONK:

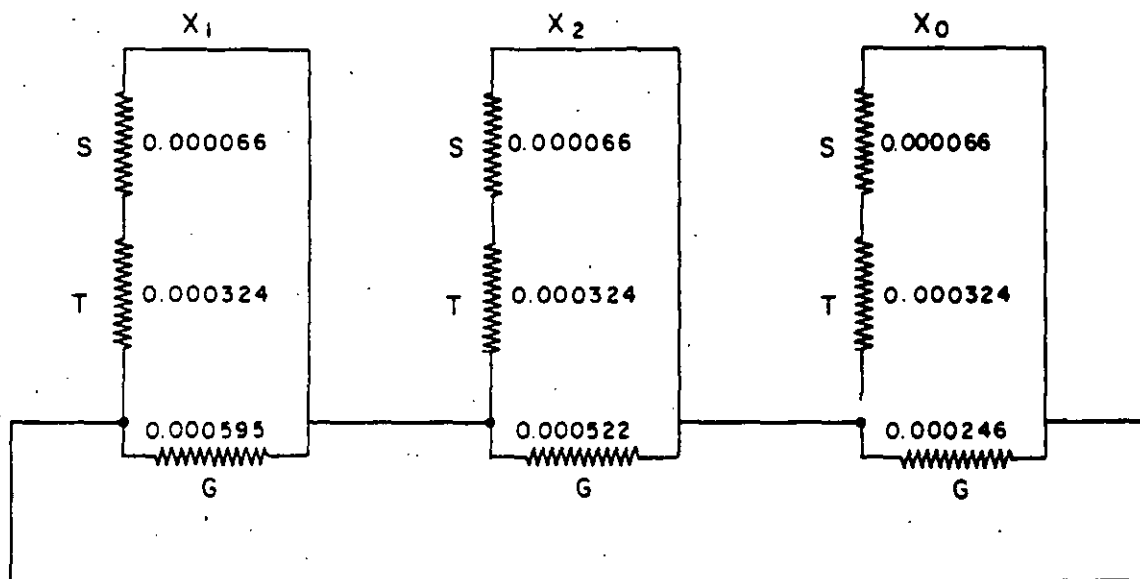
Calibres mínimos para evitar fusión.

DURACION DE LA FALLA EN SEG.	CM / A		
	CABLE	CONEXIONES SOLDADAS.	CONEXIONES MECANICAS.
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

Como se recomendaron juntas soldadas y un tiempo de falla de 0.5-
seg., se determinará la sección del conductor con la constante 6.5 CM / A lo
que nos da:

$$42426.2 \text{ A} \times \frac{6.5 \text{ CM}}{\text{A}} = 275770 \text{ CM}$$

c) Corriente de falla a tierra en el lado de 20 Kv.



Cálculo de X_{1R} , X_{2R}

$$0.000.066 + 0.000 324 = 0,000 39$$

$$X_{1R} = \frac{0.000\ 39 \times 0.000\ 595}{0.000\ 39 + 0.000\ 595} = 0.000\ 2355$$

$$X_{2R} = \frac{0.000\ 39 \times 0.000\ 522}{0.000\ 39 + 0.000\ 522} = 0.000\ 2232$$

$$I_G = \frac{3}{0.000\ 2355 + 0.000\ 2232 + 0.000\ 246} = 4257.13 \%$$

$$I_G = \frac{4257.13 \times 1000}{3 \times 20} = 122\ 892.76 \text{ A}$$

Como ésta corriente es mayor que la calculada en el lado de 230 Kv, será la que tomaremos en cuenta para el cálculo de nuestro sistema de tierra,

Para determinar el valor de la resistividad emplearemos la siguiente fórmula del D F. WENNER,

$$\rho_s = \frac{4 \pi A^2 R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}}$$

en donde

ρ_s = resistividad del terreno en Ω -m

R = resistencia por medición en (se obtiene con el Megger)

A = distancia entre electrodos ayacentes en M.

B = profundidad de enterramiento de los electrodos en M.

Dado que se carece de datos se tomó el valor de la resistividad-
 igual que el de la Unidad 3 que fué de $6 \Omega\text{-m}$

2.- Diseño Preliminar de la Red de Tierras

De acuerdo con la tabla anterior se toma $6.5 \text{ CM} / \text{A}$ para deter-
 minar el calibre

$$S = 6.5 \frac{\text{CM}}{\text{A}} \times 122892 = 798802 \quad \text{C.M. Calibre inmediatamente superior.}$$

1000 MCM $d = 0.029$

Residencia de Salamanca pidió un calibre de 750 M.C.M. con el --
 propósito de utilizar el material existente,

Por lo tanto se tiene un diámetro de $0.0253 \text{ m. (0.997")}$.

El diámetro está en función con la longitud del conductor (L) y -
 del coeficiente que toma en cuenta conductores de la malla en cuanto a núme-
 ro, calibre, y disposición (km) tenemos que diseñar un arreglo tal que cum --
 pla con éstas condiciones.

Tenemos:

$$L = \frac{K_m \times K_i \times \rho_0 \times I_{cc} \times \sqrt{t}}{116 + 0.1785} \quad (\text{M})$$

En donde:

L : longitud total del conductor enterrado en metros, -
 incluyendo varillas.

K_m : coeficiente que toma en cuenta los conductores de la
 malla en cuanto a números, calibre y disposición.

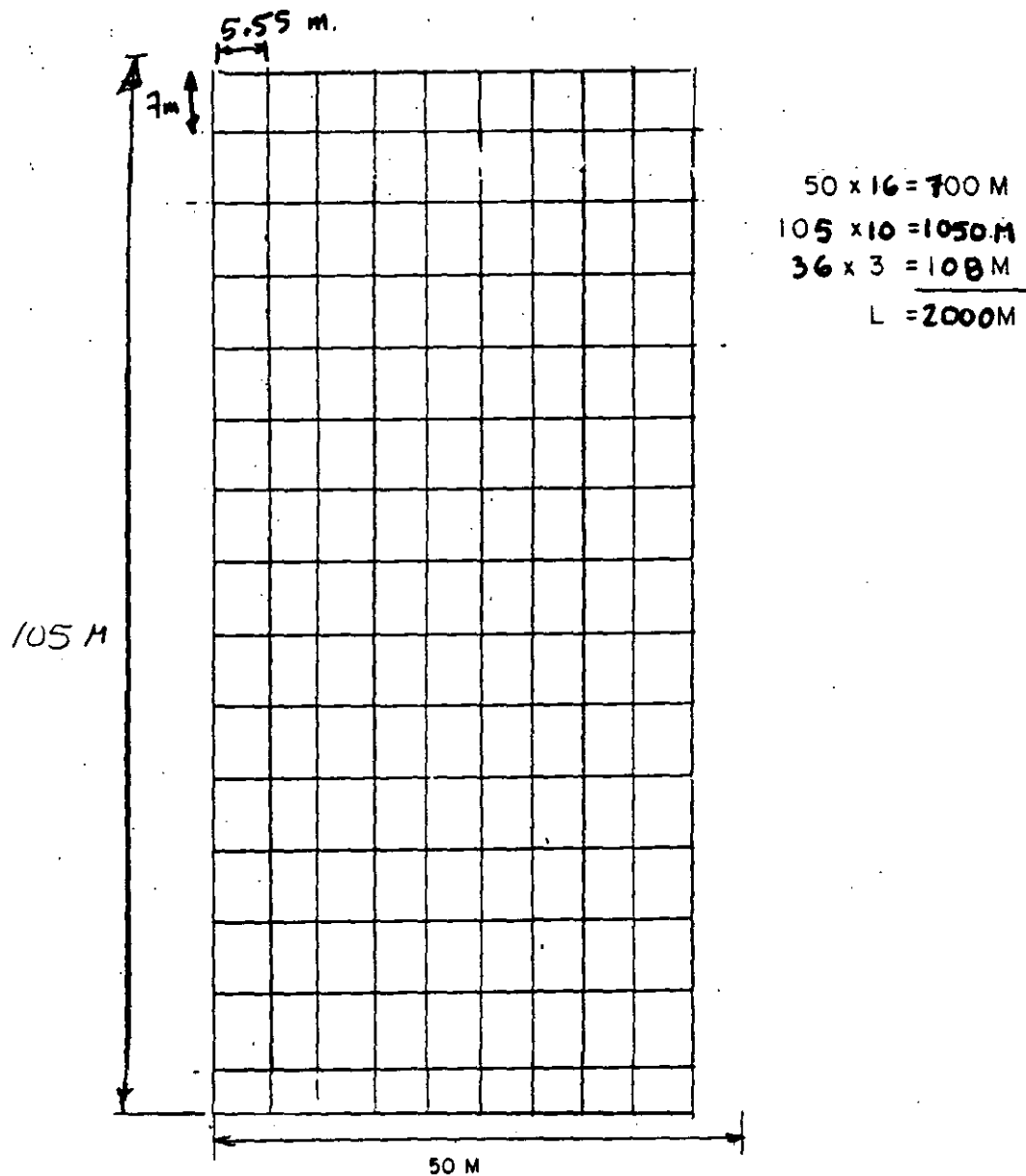
$$K_m = \frac{1}{2\pi} L_n \frac{D^2}{16 h d} + \frac{1}{\pi} L_n \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots$$

En donde:

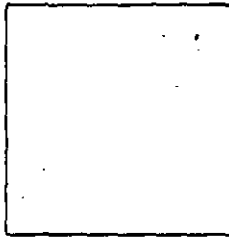
D : separación entre conductores de la malla en metros (8 metros).

d : diámetro de los conductores que forman la malla = 0.0253 metros

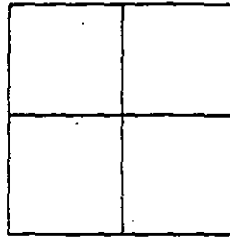
h : profundidad a la que se entierra la red = 0.60 metros.



K_i : Factor de corrección por irregularidades, toma en cuenta la -
distribución irregular del flujo de corrientes a tierra.

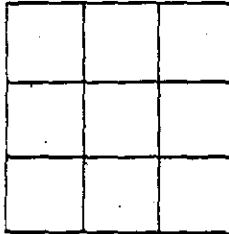


$K_i = 1.00$

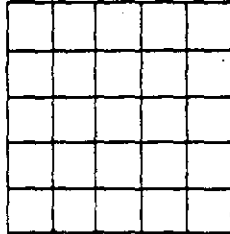


$K_i = 1.16$

$K_i = 1.47$



$K_i = 2.21$



Factor K_i sugerido por
Walter Koch.

ρ : resistividad promedio del terreno = $6 \Omega \cdot M$

I_{cc} : corriente eficaz máxima que fluirá de la red en conjunto, hacia la tierra,
afectada por el factor de decremento D y el factor de ampliación A .

$$I_{cc} = I \times A \times D.$$

Factor de ampliación $A = 1.00$

Factor de decremento D :

Duración de la falla en ciclos	D
$\frac{1}{2}$	1.65
6	1.25
15	1.10
30 ó más	1.00

$$I_{cc} = 122\,892.76 \times 1 \times 1 = 122\,892.76 \text{ A.}$$

ρ_s = Resistividad del terreno que tocan los pies.

$$= 1000 \Omega\text{-M (para concreto armado).}$$

Como la malla tiene un espaciamiento uniforme, se puede hacer la determinación empírica del número de términos de la fórmula de Km.

$$n = 16 - 2 = 14 \text{ términos.}$$

Por lo tanto:

$$K_m = 0.1591549 L_n \frac{3^2}{16 (0.6) (0.0253)} + 0.3183099 L_n \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{4}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \left(\frac{9}{10}\right) \left(\frac{11}{12}\right) \dots \left(\frac{25}{30}\right)$$

(14 términos)

$$K_m = 0.159154 \times 5.5740709 + 0.3183099 L_n \mathbf{0.2889}$$

$$K_m = \mathbf{0.4919}$$

El tiempo $t = 0.5 \text{ seg.}$

$$K_i = 2.21$$

Por lo tanto

$$L = \frac{\mathbf{0.4919} \times 2.21 \times 6 \times 122\,892.76 \times \sqrt{0.5}}{116 + 0.17 \times 1000}$$

$$L = \mathbf{1981 \text{ m.}}$$

La longitud obtenida debe ser menor que la indicada en el arreglo

$$\mathbf{1981 < 2000 \text{ m.}}$$

En los cálculos anteriores, podemos ver que el diámetro que se utilizó (0.0253) el cual corresponde a 750 MCM, cumplen con todas las condiciones para nuestro arreglo en cuanto a longitud y separación entre conductores.

4.- CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS.

Para éste cálculo se determinará primero el radio de un círculo cuya superficie sea igual a la superficie total encerrada por la red.

$$r = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

en donde

r : radio del círculo

A : superficie encerrada por la malla

$$50 \times 105 = 5250 \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{5250}{3.14}} = 40.88 \text{ M}$$

Para el cálculo de la resistencia de la red, se aplica la siguiente fórmula:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

└──────────┘ Longitud

Sustituyendo:

$$R = \frac{6}{4 \times 40.88} + \frac{6}{2000} = 0.0397 \text{ (ohms)}$$

CALCULO DEL MAXIMO AUMENTO DE POTENCIAL DE LA RED EN CASO DE FALLA,

Aplicando la fórmula

$$E = IR$$

y teniendo $I = 122\ 892.76$ Amp.

$$R = 0.0397 \text{ ohms.}$$

resulta $E = 122892.76 \times 0.0397 = 4878$ Volts.

6.- CALCULO DEL POTENCIAL DE PASO EN EL PISO ADYACENTE A LA RED.

Esté cálculo se hará con la siguiente fórmula

$$E_s = K_s \times K_i \times \rho \times \frac{I}{L}$$

en donde

E_s : Potencial entre los pies de una persona al dar un paso cuando está circulando la corriente máxima de la falla de la red hacia la tierra.

K_s : Coeficiente que considera a que profundidad está enterrada la red, en metros y el número de conductores transversales de la red (n).

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} \dots \frac{1}{15D} \right]$$

hasta el número de espacios transversales.

donde h : profundidad de enterramiento (0.60 mts.)

D : espacio longitudinal (7 mts.)

Sustituyendo valores

$$K_s = \frac{1}{3.14} \left[\frac{1}{2 \times 0.60} + \frac{1}{7 + 0.60} + \frac{1}{2 \times 7} + \frac{1}{3 \times 7} \dots \frac{1}{15 \times 7} \right]$$
$$= 0.41256 \quad (0.041256)$$

Por lo tanto

$$E_s = 0.4183176 \times 2.21 \times 6 \times \frac{122892.76}{2000} = 336 \text{ volts.}$$

Voltaje máximo permisible entre pies sobre el piso.

Para concreto armado

$$E'_s = \frac{116 + 0.7 K_s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 1000}{\sqrt{0.5}} = 1153 \text{ volts.}$$

$$E_s < E'_s$$

si $E_s > E'_s$ se rediseña la red aumentando (L)

7.- CALCULO DE POTENCIAL ENTRE PISOS Y ELEMENTO CONECTADO A TIERRA.

Si la longitud del cable usado es igual ó mayor que la calculada, se considera que los voltajes entre el piso y el punto tocado con la mano esta dentro de los límites aceptables.

De acuerdo con la figura del terreno, tenemos que (L) = 2000 Mts.
(2000 m)

Se incluyen 50 varillas de 3.0 mts. cada una:

Esta longitud es mayor que la calculada, por lo tanto cumple con lo anotado al principio de éste inciso.

8.- Verificación de las condiciones de seguridad.

Para que la red diseñada sea considerada como segura, se deberá cumplir la siguiente fórmula

$$\frac{K_m \times K_i \times P \times I_{cc} \times \sqrt{t}}{L} - 0.17 P_s < 116$$

Sustituyendo valores, tenemos:

$$\frac{0.4919 \times 2.21 \times 6 \times 122892.76 \times \sqrt{0.5}}{2000} - 0.17 \times 1000 = 113.4$$

$$113.4 < 116$$

Al cumplirse la fórmula podemos decir que la red diseñada está dentro de los límites de seguridad.

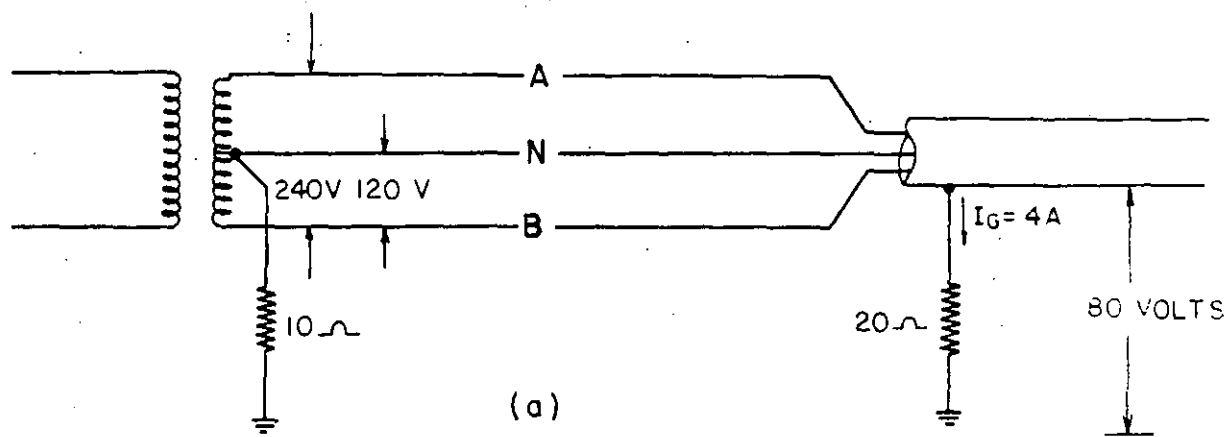
7.3 ATERRIZAMIENTO DE EQUIPO

Los propósitos principales por los que las canalizaciones o -- estructuras metálicas que conducen conductos energizados deben estar inter conectadas a un sistema de tierras son:

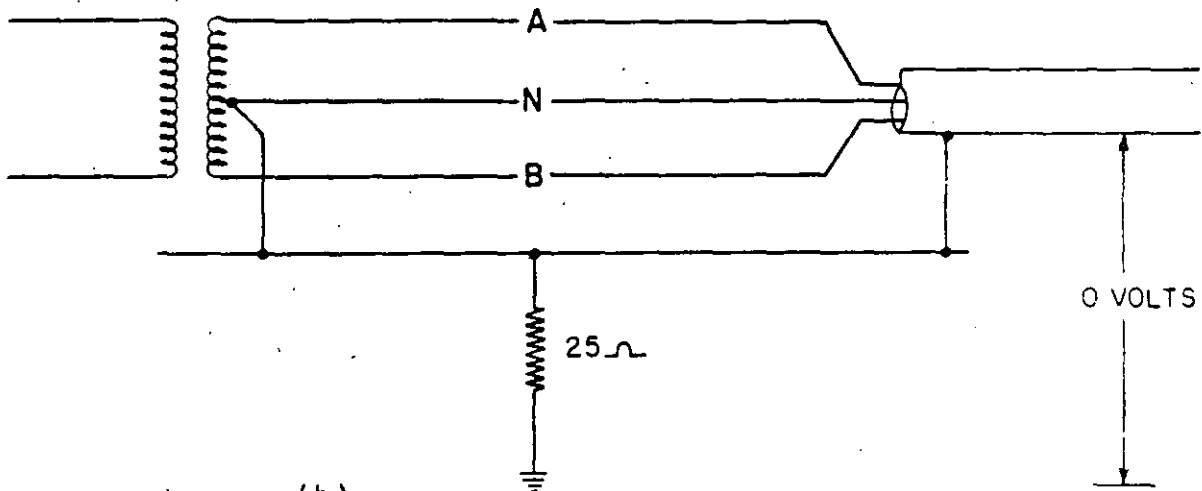
- 1.- Mantener una diferencia de potencial baja entre las partes metálicas cercanas dentro de una determinada área y asegurar que el personal que allí se encuentre no corra peligro de sufrir descargas eléctricas.
- 2.- Proveer de un camino efectivo las corrientes de falla a - tierra las cuales deberán fluir sin evidencia de los esfuer zos térmicos, los cuales son peligrosos y pueden ocasionar incendios de material combustible o por presencia de gases en la atmósfera.

Por lo tanto, Todas las canalizaciones y cubiertas metálicas - de conductores o equipos, armazones de motores, et, Deberán ser puestos a - tierra para satisfacer los requerimientos anteriores.

En caso de una falla de aislamiento a lo largo de un conductor de un circuito eléctrico, entre el conductor energizado y alguna porción metálica (Tubo, Conduit o Charola), si la parte metálica no fué apropiadamente aterrizada, podría existir un potencial de suficiente magnitud tal que genere daños por descargas eléctricas a quienquiera que toque dichas - partes.



(a)



(b)

La importancia de un circuito metálico continuo de baja resistencia para canalizar las corrientes de falla, se explica en la figura anterior (A). En ella se muestra el neutro del transformador conectado a tierra -- por medio de un electrodo que tiene una resistencia de $10\ \Omega$ a tierra, el tubo conduit está conectado a otro electrodo separado, el cual tiene $20\ \Omega$ a tierra. Una falla ocurre entre el conductor B y el Conduit

$$\text{Corriente de falla} = \frac{120}{20 + 10} = 4 \text{ A}$$

Caída de potencial de Conduit a tierra será:

$$4 \times 20 = V = 80 \text{ Volts.}$$

En cambio en la figura (B), tanto el neutro del transformador como el tubo conduit, están conectados a una red de tierra común, la que es conectada a tierra a través de un electrodo que tiene $25\ \Omega$ de resistencia.

Lo anterior no infiere que un potencial de 80 volts necesariamente sea fatal, sino que como ejemplo se ilustra el hecho de una inadecuada puesta a tierra puede ocasionar diferencias de potencial que provocarían daños funestos, sobre todo a las personas.

De acuerdo a estadísticas, los accidentes en la Industria Eléctrica, indican que un gran número de personas se han lesionado como resultado de recibir "SHOCK" eléctrico al entrar en contacto con partes metálicas que normalmente no están energizadas o se suponía que estaban desenergizadas.

Así mismo, uno de cada siete incendios en diferentes establecimientos fueron originados en el sistema eléctrico, por ello, un desarrollo y adopción de prácticas más efectivas en el aterrizamiento de equipo harían disminuir los riesgos por incendio.

" Factor de suma importancia para la seguridad del personal en plantas industriales, es el aterrizamiento adecuado del propio equipo".

" Conecte a una misma red de tierras, todas las partes metálicas por donde pasan conductores energizados, tubo conduit, charolas, cables con armadura metálica, cajas de conexiones, gabinetes, carcasa de motores, del transformador, etc. Todo aquello que encierre equipo eléctrico o sirva para operar eléctricamente un equipo".

DEFINICIONES:

Electrúdo de Tierra.- es un conductor embebido en tierra, usado para mantener al potencial de tierra, los conductores conectados al electrúdo, y para disipar en la tierra todas las corrientes a ella conducidas.

Red de Tierras.- es una red de conductores desnudos enterrados, usada para establecer un potencial uniforme dentro y alrededor de un establecimiento cualquiera. Debe quedar ligado sólidamente a los electrúdos de tierra.

Conductor de tierra.- es usado para conectar a la red de tierra las carcazas de los equipos, canalizaciones o partes metálicas por donde pasan circuitos energizados.

Cálculo de los conductores de tierra por corriente.- queda determinado por la magnitud de la corriente y el equipo de falla, empleándose las siguientes fórmulas.

Cuando el BUS tenga conexiones ensambladas o empalmadas, considerando una temperatura inicial de 26°C

$$A = 10.6 \cdot I \sqrt{S}$$

Si las conexiones son soldadas a temp. inicial de 26 °C

$$A = 8.7 \cdot I \sqrt{S}$$

A = sección del conductor en CM

I = corriente de falla en A

S = tiempo de flujo en seg.

En sistemas con neutro aterrizado, la corriente y el tiempo de flujo queda determinado por la impedancia. Normalmente el tiempo está entre 10 y 60 seg.

En sistemas no aterrizados la corriente de falla es aproximadamente igual a la corriente de línea a línea.

En sistemas sólidamente aterrizados, la corriente de falla es aproximadamente igual a la corriente de falla trifásica.

Además de las consideraciones teóricas existen limitaciones -- prácticas que finalmente pueden determinar el tamaño máximo o mínimo de la red de tierra, ya que por esfuerzos mecánicos no debe ser menor a un conductor de No. 2 / 0 AWG y usualmente no es necesario que sea mayor de 500 MCM, para grandes estaciones, y del No. 4 / 0 AWG, para pequeñas estaciones o plantas industriales.

RESISTENCIA DE LA RED A LA TIERRA FISICA.

En grandes estaciones no debe exceder de 1Ω .

En pequeñas estaciones o plantas industriales no debe ser mayor de 5Ω .

Para clientes residenciales debe aterrizar el neutro a tubería de agua, la cual proporciona una conexión a tierra de baja resistencia (aproximadamente 3) y donde ello no sea posible, utilizar un electrodo, pero la resistencia a tierra no exceda 25.

Aterrizamiento de equipo en tableros eléctricos.

Deberá ser instalado en los tableros, un BUS de tierra como complemento de los mismos.

Los tableros o estructuras que contengan equipos primarios tales como:

Transformadores de corriente, transformadores de potencial, --- interruptores de potencia, desconectadores, relevadores, instrumentos de medición, et., tal que todos ellos requieren aterrizarse, y que son considerados adecuadamente aterrizados a través de su montaje sobre la estructura, - siempre y cuando cada una de éstas estructuras, paneles o soportes metálicos estén conectados al BUS de tierras en forma individual. El BUS de tierra, - por lo menos será capaz de conducir un 25 % de la más alta corriente nominal en el tablero, generalmente es usada una barra de cobre de 2" x 1/4 " , -- éste BUS por supuesto estará interconectado adecuadamente al BUS general de tierras.

Consideraciones Generales.

- 10.- Los conductores de tierra deben protegerse cuando estén expuestos a daño mecánico, deben tener continuidad, desde el equipo por aterrizar hasta el BUS de tierra.
- 20.- El calibre del BUS de tierra en corriente alterna, no será menor que a los que a continuación se indican en la siguiente tabla.

TABLA : Calibre de la red principal de tierras (para acometidas)

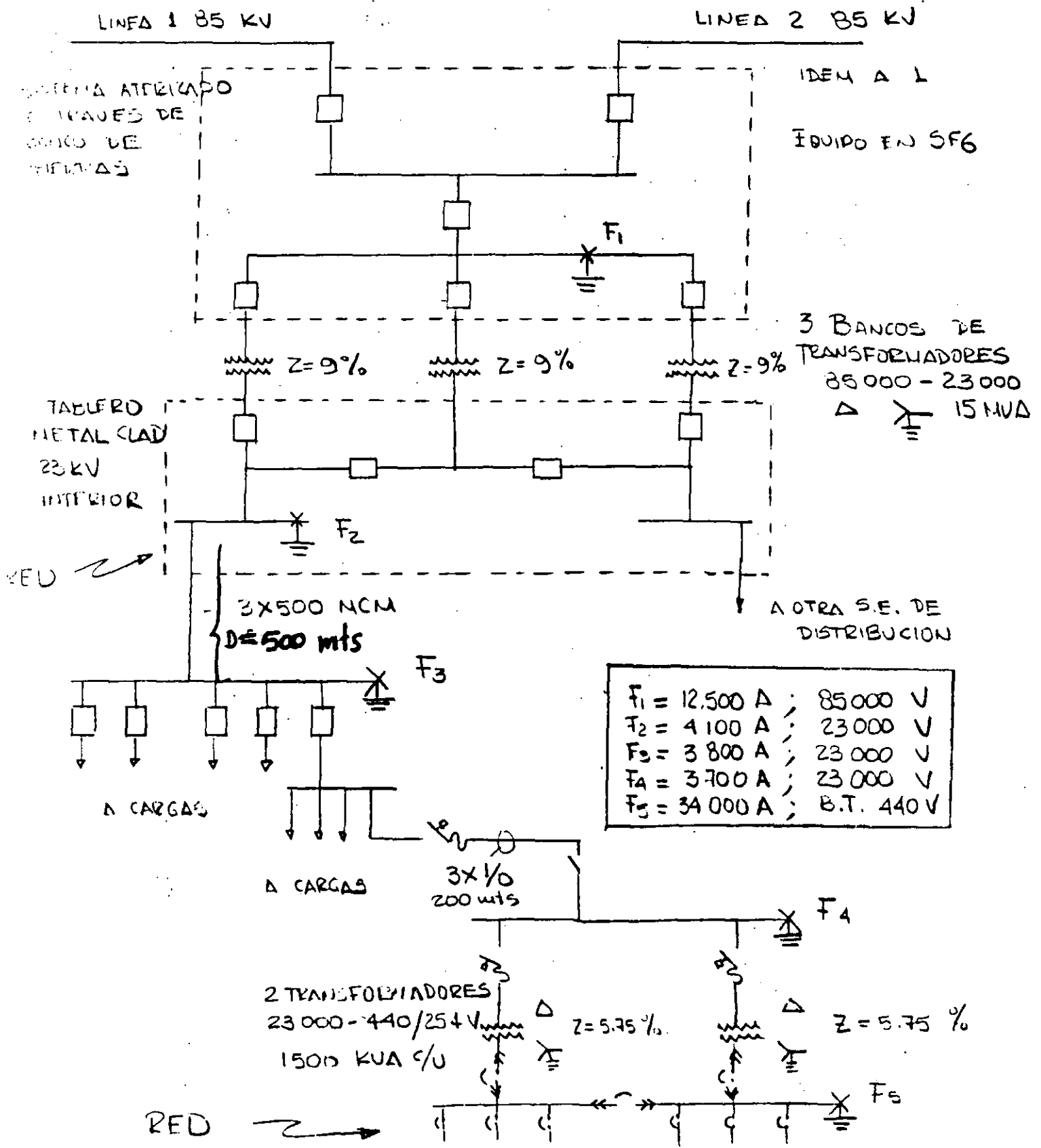
ACOMETIDA * (AWG O MCM) MATERIAL COBRE.	BUS DE TIERRA (AWG O MCM) MATERIAL COBRE.
2 o menor	8
1 / 0	6
2 / 0 a 3/0	4
4/0 a 350	2
400 a 600	1 / 0
600 a 1100	2 / 0
1100 a más	3 / 0

* 0 Alimentador Principal.

Calibre de los conductores para puesta a tierra de
equipos y canalizaciones interiores.

Capacidad nominal o ajuste del dispositivo de protección con- tra sobrecorriente ubicado an- tes del equipo, conductor, etc.	Calibre del conductor a tierra. (AWG o MCM)	
	Cobre	Aluminio
No mayor de - (amperes)		
15	14	12
20	14	12
30	12	10
40	10	8
60	10	8
100	8	6
200	6	4
400	4	2
600	2	2/0
800	1/0	3/0
1000	2/0	4/0
1200	3/0	250 MCM
1600	4/0	350 "
2000	250 MCM	400 "
2500	350 "	500 "
3000	400 "	600 "
4000	500 "	800 "
5000	700 "	1000 "
6000	800 "	1200 "

DIAGRAMA UNIFILAR DEL EJEMPLO DE CALCULO DE LA RED DE TIERRAS

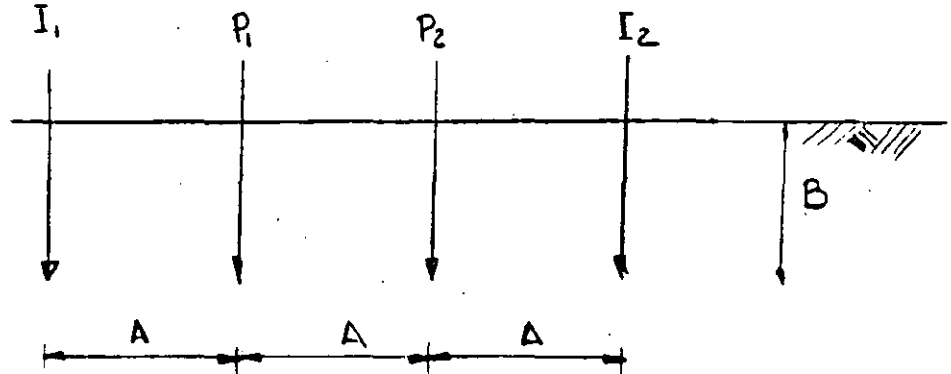


DATOS GENERALES PARA EL EJEMPLO DE CALCULO DE

LA RED DE TIERRAS

- RESISTIVIDAD DEL TERRENO : VER TABLA ANEXO; LOS RESULTADOS DE ELLA PUEDEN GENERALIZARSE PARA TODA LA PLANTA
- RESISTIVIDAD DEL CONCRETO: $1000 \Omega \cdot \text{mto.}$
- PROFUNDIDAD DE ENTERRAMIENTO DE LA RED : 0.5 mto.
- CONFIGURACION DE LA RED EN S.E. 85/23 KV (VER PLANO ANEXO) AREA PROPUESTA DE 350 m^2
- DISTRIBUCION DE PLANTA EN S.E. 23000/440 V. VER CROWIS ANEXO.
- TIEMPO EN QUE SE LIBRA LA FALLA : 0.5 seg PARA 85,23 y B.T. (POR SIMPLICIDAD)
- FACTOR DE AMPLIACION DEL SISTEMA : 1.0
- SE PROPONE :
 - 1° EVALUAR LA RED PRINCIPAL EN LA S.E. DE 85/23 KV
 - 2° PROPONER Y EVALUAR UNA RED EN LA S.E. DE 23000/440 V

LECTURAS DE RESISTIVIDAD



FORMULA CON LA QUE SE CALCULO LA RESISTIVIDAD

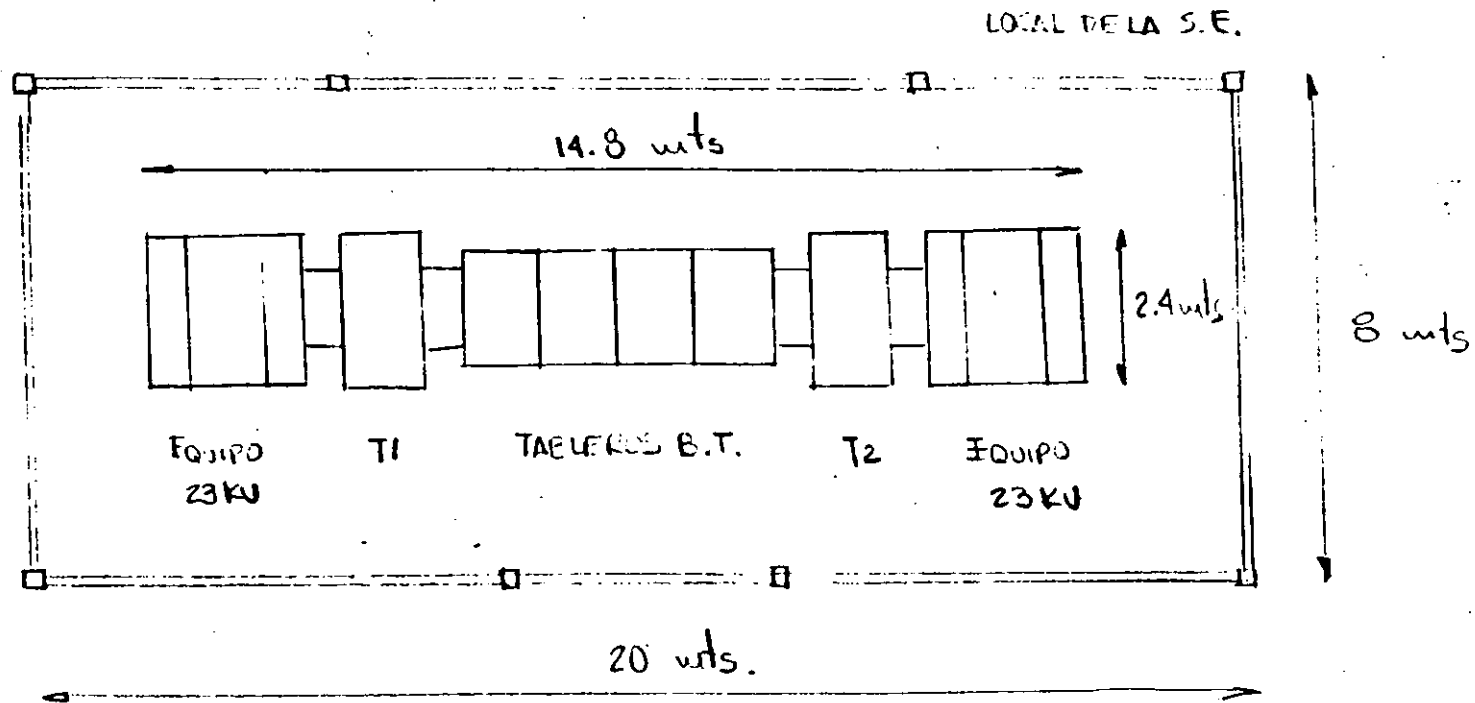
$$\rho = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}}$$

7-49

LEVANTAMIENTO DE RESISTIVIDAD EN LA PLANTA
DEL EJEMPLO (VER PLANO ADJUNTO PARA UBICACION DE LA LECTURA)

SEPARACION A (m)	PROFUNDIDAD B (m)	LECTURAS Nº 1		LECTURAS Nº 2		LECTURAS Nº 3		LECTURAS Nº 4	
		R Ω	ρ Ω/m	R Ω	ρ Ω/m	R Ω	ρ Ω/m	R Ω	ρ Ω/m
1.0	0.25	1.6	11.05	2.4	16.58	2.2	15.73	2.2	15.73
1.5	0.25	0.8	7.89	1.3	12.82	0.89	8.94	1.0	10.0
2.0	0.25	0.6	7.74	0.77	9.93	0.6	7.82	0.65	8.47
2.5	0.25	0.5	7.989	0.48	7.66	0.4	6.438	0.45	7.24
3.0	0.25	0.4	7.63	0.38	7.24	0.27	5.32	0.33	6.32

CROQUIS DE LA S.E. DE 23 000 - 440/251 V



ESCALA 1:100

EJEMPLO SISTEMA DE TIERRAS

A.- SUBESTACION PRINCIPAL 85/23 KV

1° $I_{cc} = 12\ 500\ A$ (LADO 85 KV)

2° CONEXION SOLDADA
DURACION FALLA 0.5 SEG. $\left. \vphantom{\begin{array}{l} \text{CONEXION SOLDADA} \\ \text{DURACION FALLA 0.5 SEG.} \end{array}} \right\} CM/A = 6.5$

$$S = 6.5 \times 12\ 500 = 81\ 250\ CM$$

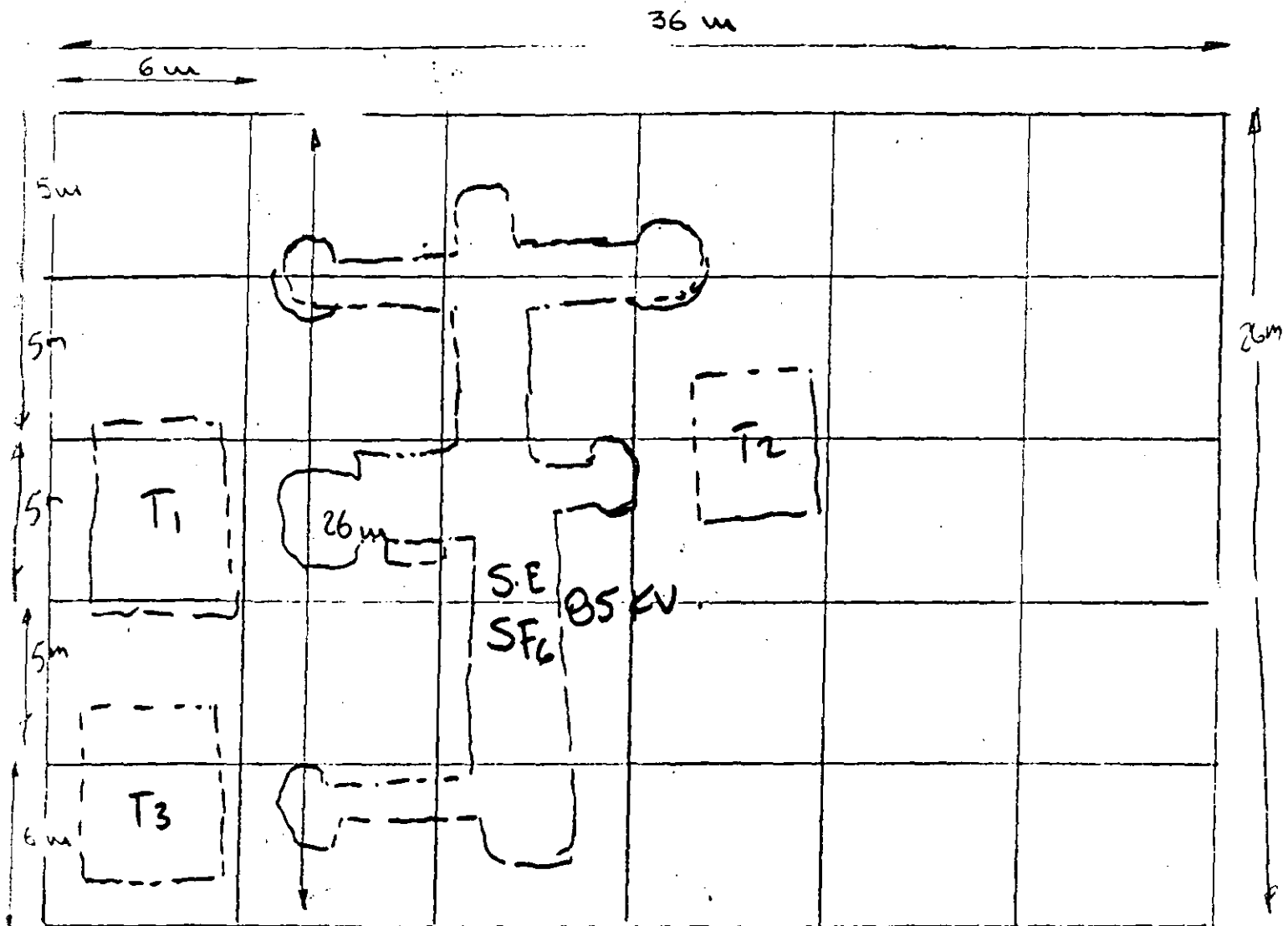
$$81\ 250 \times 0.00051 = 41.44\ mm^2\ \text{CALIBRE } 1$$

POR NORMAS SE USARA CALIBRE 4/0

3° $P_{s1} = 16.58\ \Omega - m$

$$P_{s2} = 1000\ \Omega - m$$

4° SE PROPONE EVALUAR LA SIGUIENTE RED:



$$\text{AREA} = 36 \times 26 = 936 \text{ m}^2$$

$$\text{LR} = 6 \times 36 + 7 \times 36 + 42 \times 3 = 524 \text{ m}$$

$$L = \frac{K_m K_i P_{s1} I_{cc} \sqrt{t}}{116 + 0.17 P_{s2}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \dots$$

$$D = 6 \text{ m}$$

$$N^{\circ} \text{ DE FACTORES} = 7 - 2 = 5$$

$$h = 0.5 \text{ m}$$

$$d = 1.33 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (\text{CABLE } 4/0)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{6^2}{16 \times 0.5 \times 1.33 \times 10^{-2}} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \left(\frac{9}{10} \right) \left(\frac{11}{12} \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln 338 + \frac{1}{\pi} \ln 0.4511$$

$$K_m = 0.926 - 0.2533 = 0.673$$

SE ASUME UN VALOR DE $K_i = 2.21$

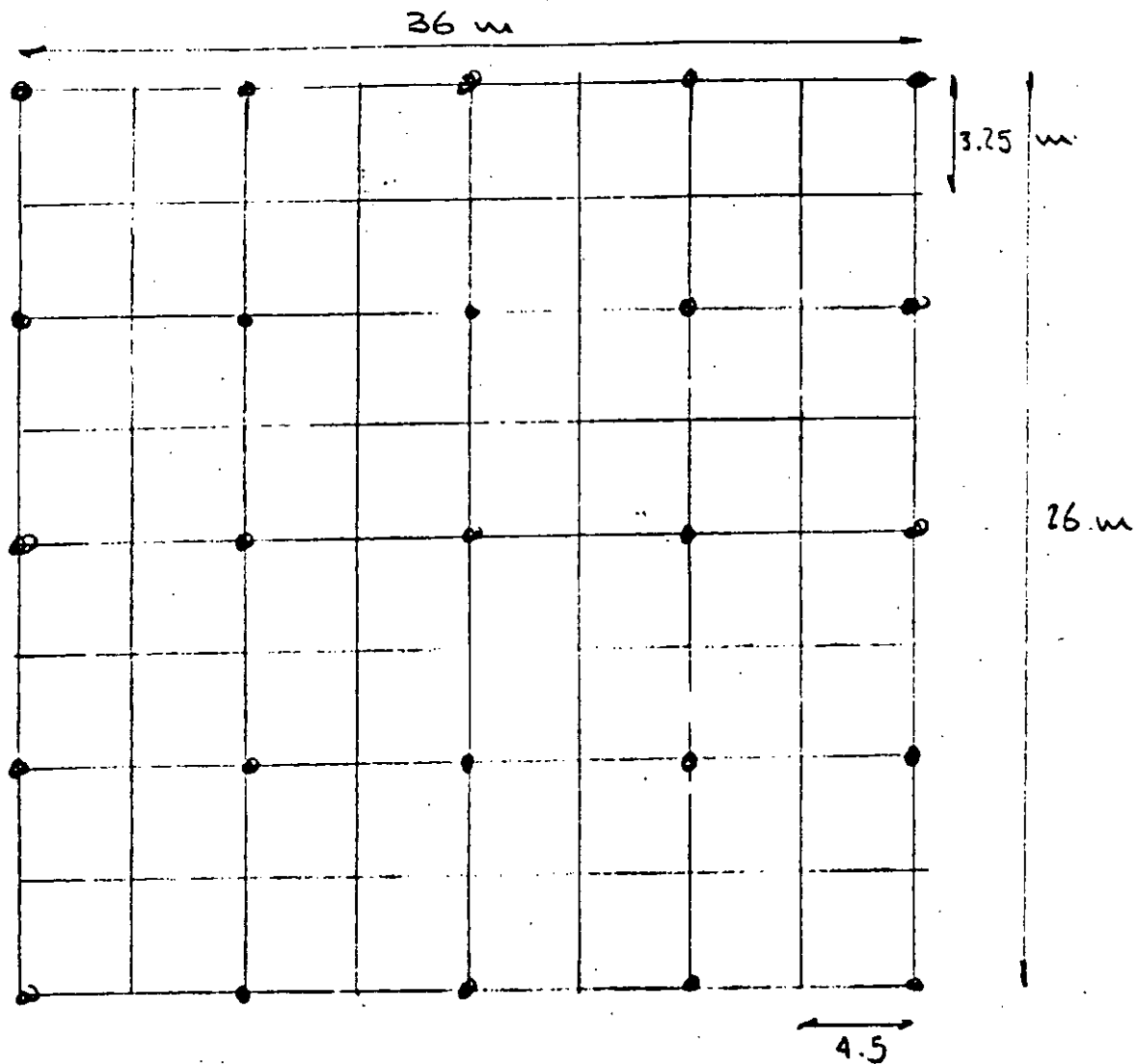
$$L = \frac{(0.673)(2.21) \times (16.58)(12,500)(\sqrt{0.5})}{116 + 0.17 \times 1000}$$

$$L = 762 \text{ m}$$

$L_R < L \Rightarrow$ LA RED DEBE REDISEÑARSE

SE PROPONE LA SIGUIENTE RED

7-54



$$LR = 36 \times 9 + 26 \times 9 + 25 \times 3 = 633 \text{ m}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(45)^2}{16 \times 0.5 \times 1.33 \times 10^{-2}} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \left(\frac{9}{10} \right) \left(\frac{11}{12} \right) \left(\frac{13}{14} \right) \left(\frac{15}{16} \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln 190.3 + \frac{1}{\pi} \ln 0.3928$$

$$K_m = 0.5379$$

$$K_i = 2.21$$

$$L = \frac{(0.5379)(2.21)(16.58)(12.500)(\sqrt{0.5})}{116 + 0.17 \times 1000} = 609 \text{ m}$$

$$L_R > L \quad (633 > 609 \text{ m})$$

LA RED ES ADECUADA

$$5^\circ \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{936}{\pi}} = 17.26 \text{ m}$$

$$R = \frac{P_{s1}}{4r} + \frac{P_{s1}}{L_R} = \frac{16.58}{4 \times 17.26} + \frac{16.58}{633}$$

$$R = 0.266 \text{ } \Omega$$

$$6^\circ \quad E = I_{cc} \times R = 12500 \times 0.266$$

$$E = 3325 \text{ VOLTS}$$

$$7^\circ \quad F_s = K_s K_i P_{s1} \frac{I_{cc}}{L_R}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2n} + \frac{1}{D+n} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \frac{1}{5D} + \frac{1}{6D} + \frac{1}{7D} + \frac{1}{8D} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{4.5 + 0.5} + \frac{1}{2 \times 4.5} + \dots + \frac{1}{8 \times 4.5} \right]$$

$$K_s = 0.5035$$

$$K_i = 2.21$$

$$E_s = 0.5035 \times 2.21 \times 16.58 \times \frac{12500}{633}$$

$$E_s = 364.3 \text{ Volts}$$

$$E'_s = \frac{116 + 0.7 \rho_{s2}}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.7 \times 1000}{\sqrt{0.5}} = 1153 \text{ Volts}$$

$$E_s < E'_s \quad (\text{LA RED ES SEGURA EN LA PERIFERIA})$$

B - SUBESTACION DE DISTRIBUCION 23000/440 V

1° $I_G = 3700 \text{ A}$ (LADO 23 KV)

$I_G = 34000 \text{ A}$ (LADO 440 V)

2° CONEXION SOLDADA
DURACION FALLA 0.5 seg. } $\text{CM/A} = 6.5$

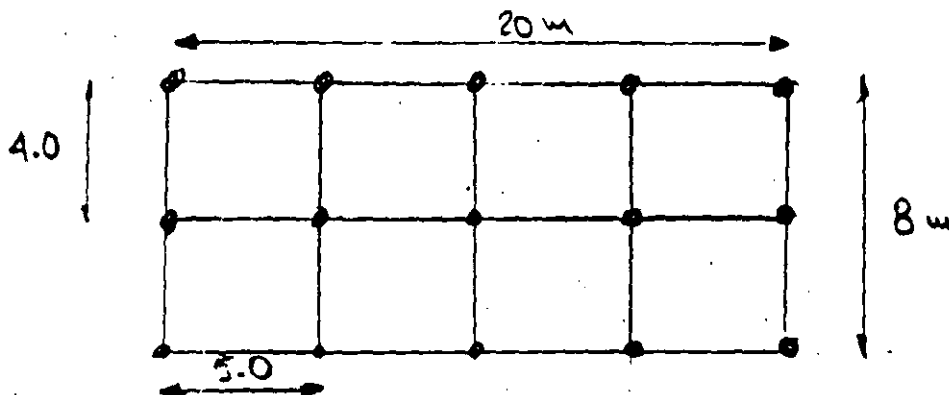
$S = 6.5 \times 34000 = 221000 \text{ CM}$ (112.71 mm^2)

SE PUEDE USAR CONDUCTOR 4/0 (211,600 CM 5% MENOS DE LO CALCULADO)

3° $P_{S1} = 16.58 \text{ } \Omega\text{-m}$

$P_{S2} = 1000 \text{ } \Omega\text{-m.}$

4° RED SUGERIDA . SE EVALUA A CONTINUACION



$$A_{\text{KRA}} = 8 \times 20 = 160 \text{ m}^2$$

$$L_R = 20 \times 3 + 5 \times 8 + 15 \times 3 = 145 \text{ m}$$

$$L = \frac{K_m K_i P_{s1} I_{cc} \sqrt{T}}{116 + 0.17 P_{s2}}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right) \dots n \text{ terminos}$$

$$D = 5 \text{ m}$$

$$d = 1.33 \times 10^{-2} \text{ m} \quad (\text{CABLE } 4/0)$$

$$h = 0.5 \text{ m} \quad (\text{PROFUNDIDAD})$$

$$n = 5 - 2 = 3 \text{ FACTORES}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{(5)^2}{16 \times 0.5 \times 1.33 \times 10^{-2}} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4}\right) \left(\frac{5}{6}\right) \left(\frac{7}{8}\right)$$

$$K_m = 0.869 + (-0.192)$$

$$K_m = 0.677$$

$$K_i = 1.47$$

$$L = \frac{0.677 \times 1.47 \times 16.58 \times 3700 \sqrt{0.5}}{116 + 0.17 \times 1000}$$

$$L = 151 \text{ m}$$

SE SUGIERE AGREGAR 3 VARILLAS MAS A LA RED PROPUESTA (SE PODRIAN AGREGAR EN EL PUNTO DE ATERIZAJAMIENTO DE LOS EQUIPOS), ASI LR SERIA

$$L_R = 145 + 3 \times 3 = 154 \text{ m}$$

Y SE CUMPLIRA QUE :

$$L < L_R \quad (151 < 154 \text{ m})$$

$$5^\circ \quad r = \sqrt{\frac{A}{\pi}} = \sqrt{\frac{160}{\pi}} = 7.14 \text{ m}$$

$$R = \frac{P_{51}}{4r} + \frac{P_{51}}{L_R} = \frac{16.58}{4 \times (7.14)} + \frac{16.58}{154}$$

$$R = 0.688 \ \Omega$$

$$6^\circ \quad E = I_{cc} R = 3700 \times 0.688 = 2546 \text{ VOLTS}$$

$$7^\circ \quad E_s = K_s K_i P_{s1} \frac{I_{cc}}{L_R}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2n} + \frac{1}{D+n} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2 \times 0.5} + \frac{1}{5 + 0.5} + \frac{1}{2 \times 5} + \frac{1}{3 \times 5} + \frac{1}{4 \times 5} \right]$$

$$K_s = 0.445 \quad K_i = 2.21 \quad (\text{SUGERIDO PARA VOLTAJE DE PASO})$$

$$E_s = 0.445 \times 2.21 \times 16.58 \times \frac{3.700}{154}$$

$$E_s = 392 \text{ VOLTS}$$

$$E_s' = \frac{116 + 0.7 P_{s2}}{\sqrt{L}} = \frac{116 + 0.7 \times 1000}{\sqrt{0.5}} =$$

$$E_s' = 1154 \text{ VOLTS}$$

$$E_s < E_s' \quad (392 < 1154 \text{ VOLTS}) \Rightarrow \text{LA RED } E_s$$

SEGURA EN LA PERIFERIA



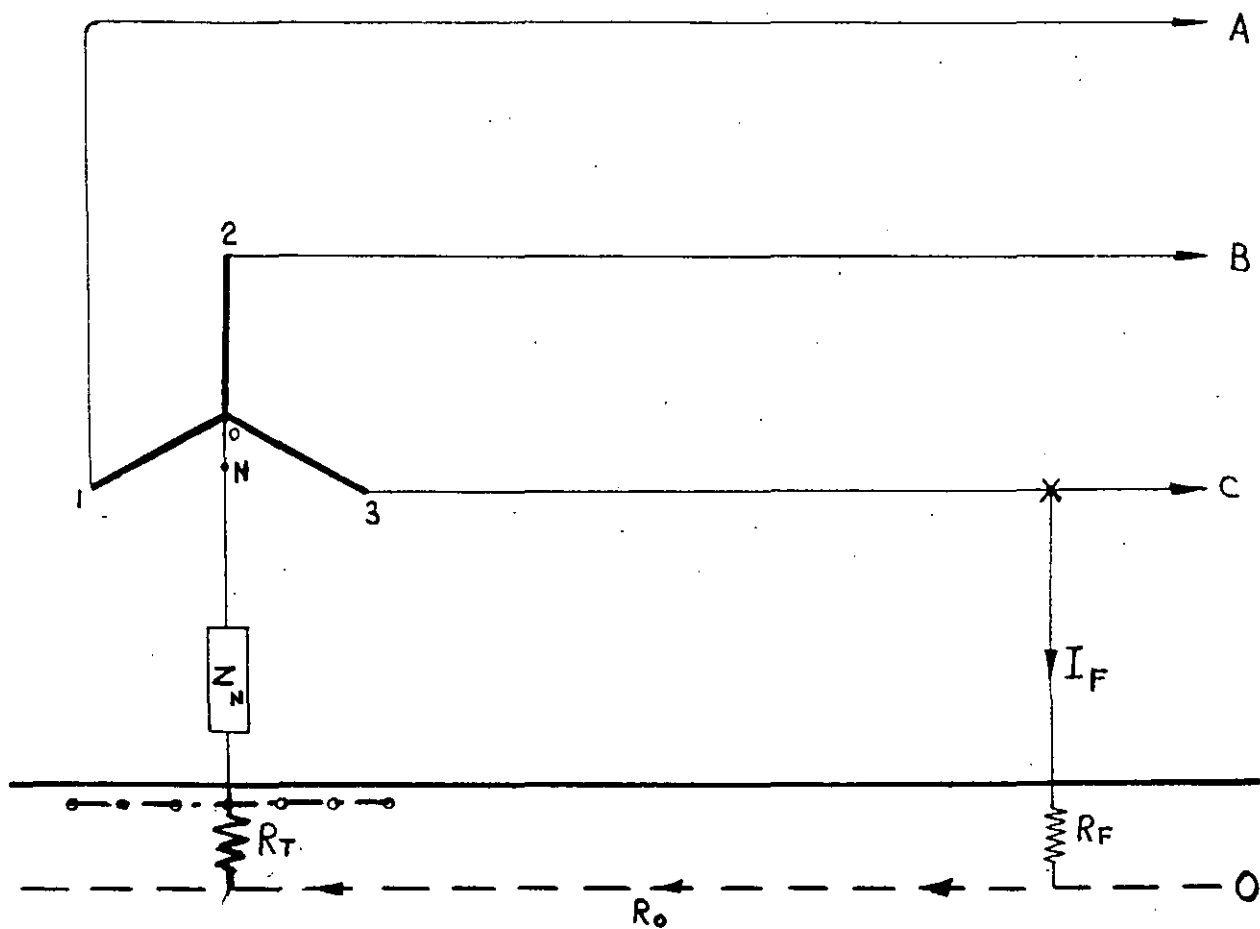
**FACULTAD DE INGENIERIA U.N.A.M.
DIVISION DE EDUCACION CONTINUA**

**CURSOS ABIERTOS
TEMAS SELECTOS DE INSTALACIONES ELECTRICAS INDUSTRIALES II
(SISTEMA DE TIERRAS Y PRUEBAS DE CAMPO A EQUIPOS)**

SISTEMAS DE TIERRAS II

ING. ENRIQUE OROZCO LOPEZ

SISTEMA ACTIVO

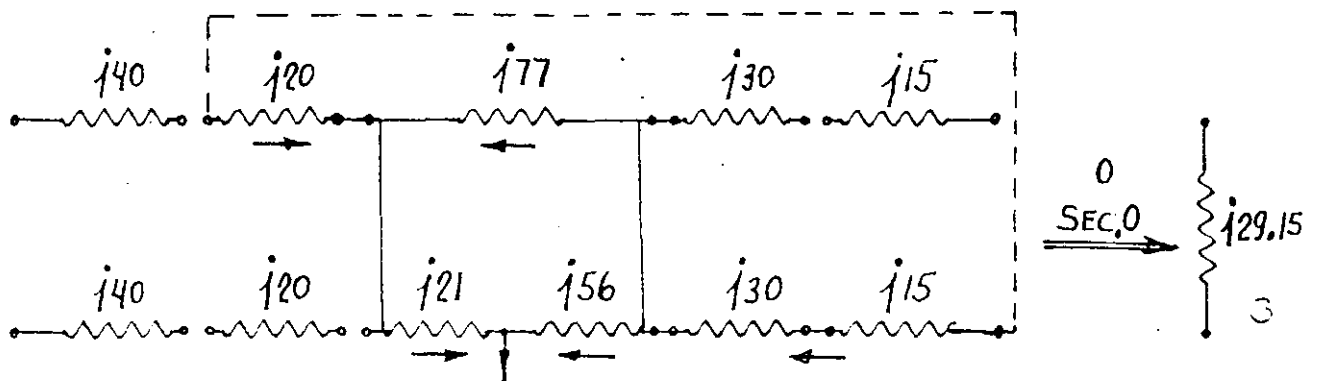
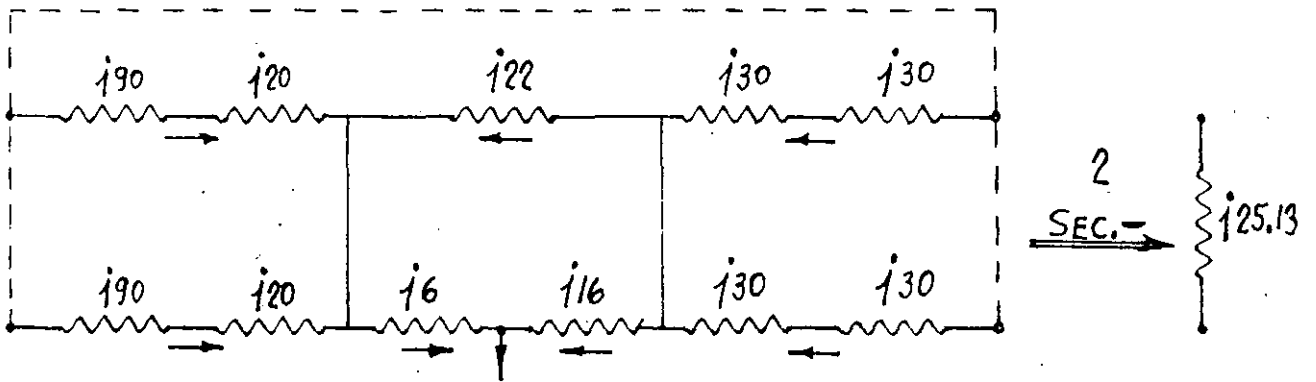
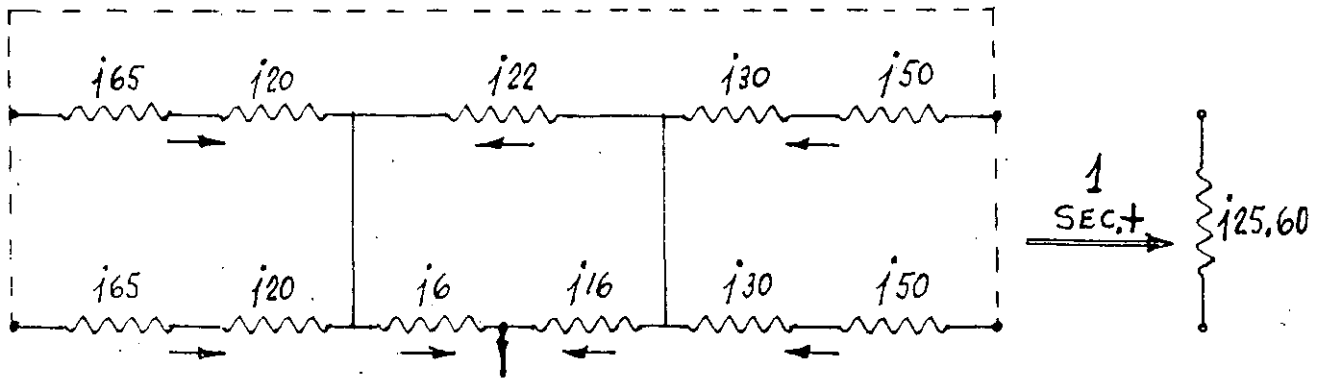
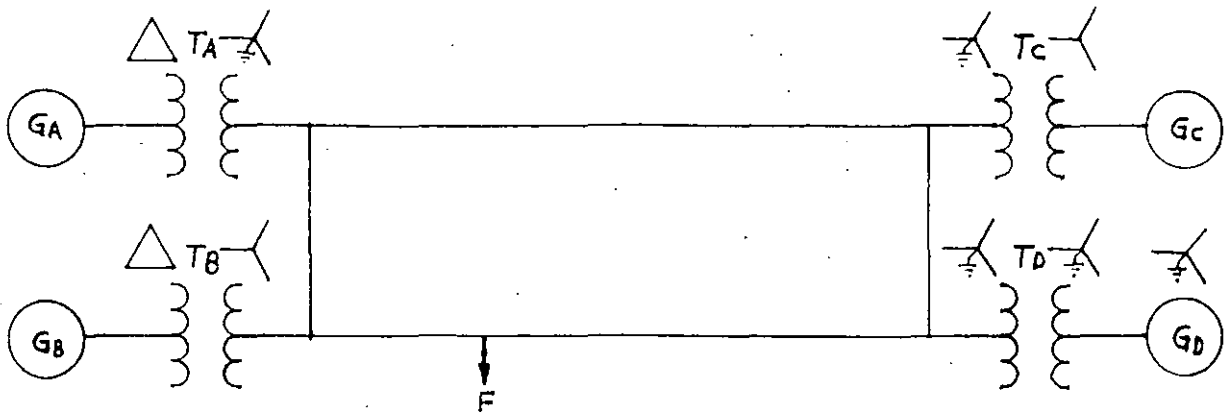


SISTEMA
DE
TIERRAS

¿ PORQUE SE DEBE ATERRIZAR UN SISTEMA ?

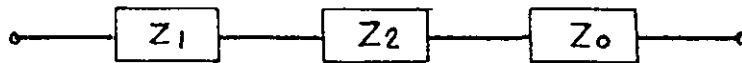
- 1_ TENER BAJO CONTROL LAS SOBRETENSIONES RESULTANTES A LA FRECUENCIA DEL SISTEMA.
- 2_ PERMITIR QUE LAS CORRIENTES DE FALLA TENGAN UN CAMINO CONTROLADO DE RETORNO.
- 3_ LIMITAR LAS TENSIONES DE TIERRA A VALORES SEGUROS PARA EL PERSONAL.
- 4_ CANALIZAR A TIERRA LAS CORRIENTES ORIGINA-
DAS POR LAS DESCARGAS ATMOSFERICAS.

ILUSTRACION DE LA DETERMINACION DE LOS DIAGRAMAS DE SECUENCIA

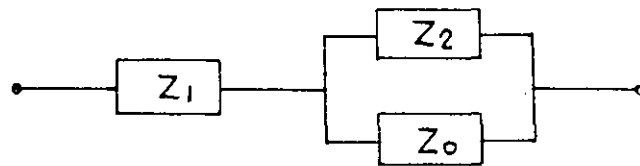


SOLUCIONES A FALLAS TÍPICAS

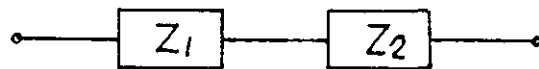
1. FALLA DE LINEA A TIERRA.



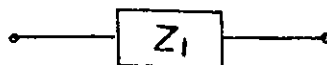
2. FALLA DE DOS LINEAS A TIERRA.



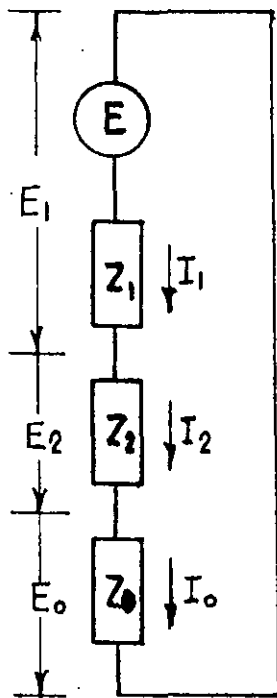
3. FALLA DE LINEA A LINEA.



4. FALLA DE TRES LINEAS.



SOLUCION A LA FALLA DE LINEA A TIERRA



$$I_0 = I_1 = I_2 = \frac{E}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$E_1 = E - I_1 Z_1 = E \left(1 - \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \right)$$

$$E_2 = -I_2 Z_2 = -E \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

$$E_0 = -I_0 Z_0 = -E \frac{Z_0}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

EN UN CIRCUITO COMPLEJO DE POTENCIA $Z_1 \approx Z_2$

$$V_a = E_0 + E_1 + E_2 = 0 \quad \text{FALLA FASE } \overline{a} \downarrow$$

$$V_b = E_0 + a^2 E_1 + a E_2 = E \left(a^2 - \frac{a^2 Z_1 + a Z_1 + Z_0}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

$$V_c = E_0 + a E_1 + a^2 E_2 = E \left(a - \frac{a Z_1 + a^2 Z_1 + Z_0}{Z_0 + 2Z_1} \right)$$

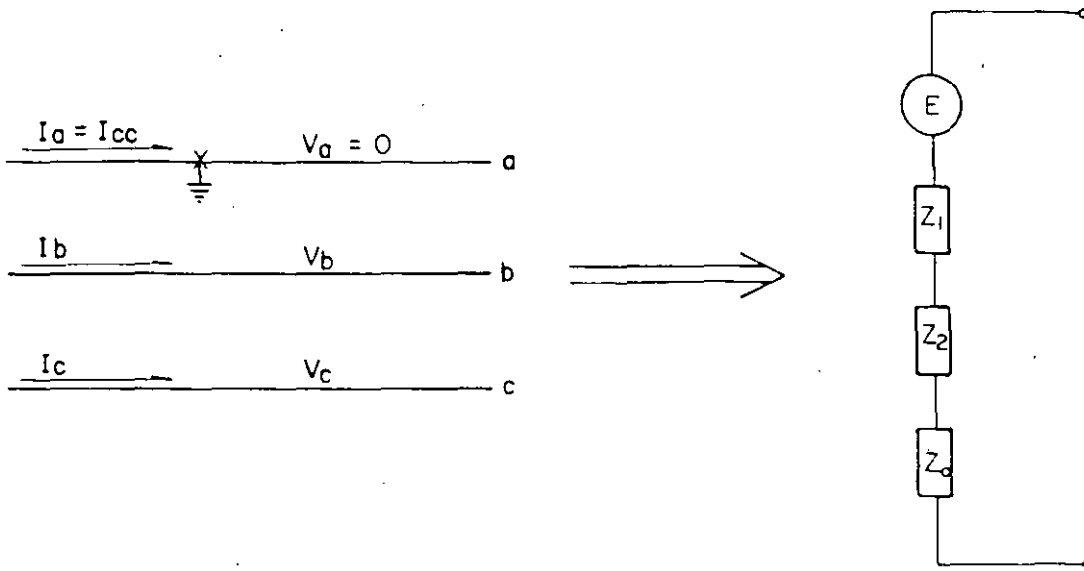
$$a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$a^2 = -\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \approx jX_1$$

$$Z_0 = R_0 + jX_0 \approx jX_0$$

FALLA DE LÍNEA A TIERRA



RESOLVIENDO EN FUNCION DE LAS TENSIONES QUE APARECEN EN LAS FASES NO FALLADAS.

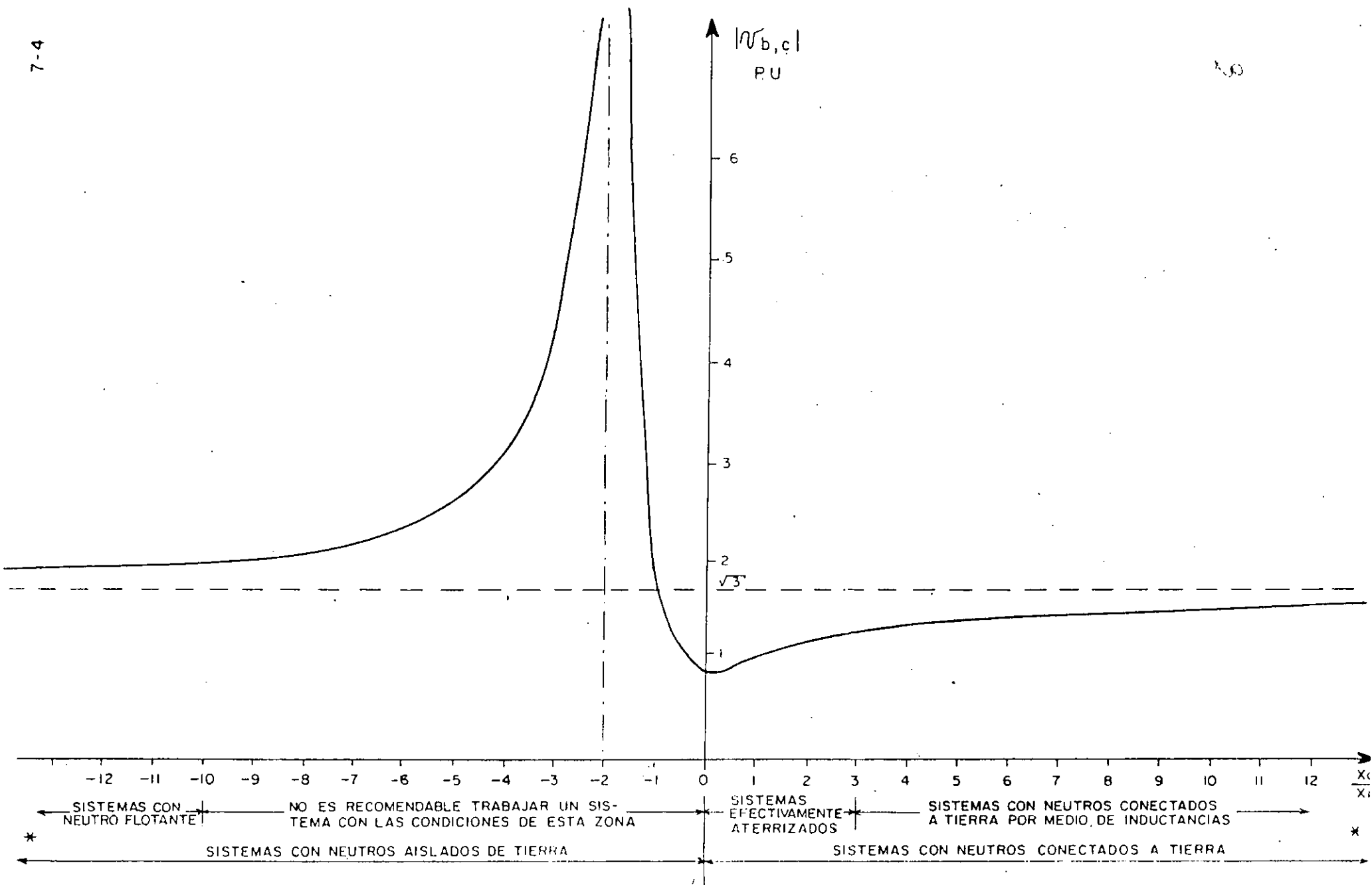
$$V_{b,c} = -\frac{1}{2} \mp j \frac{\sqrt{3}}{2} - \frac{\frac{X_0}{X_1} - 1}{\frac{X_0}{X_2} + 2}$$

X_0	X_1	$\sqrt{3} b, c$	P.U.
0	0	$\sqrt{3}/2$	
1.0	1.0	1.0	
3.3	3.3	1.25	
10	10	1.5	
∞	∞	$\sqrt{3}$	

-1	$\sqrt{3}$	
-1.5	4.51	
-2.0	∞	
-3.0	4.51	
-4.0	3.12	
-6.0	2.41	
-10	2.02	
-40	1.8	
$-\infty$	$\sqrt{3}$	

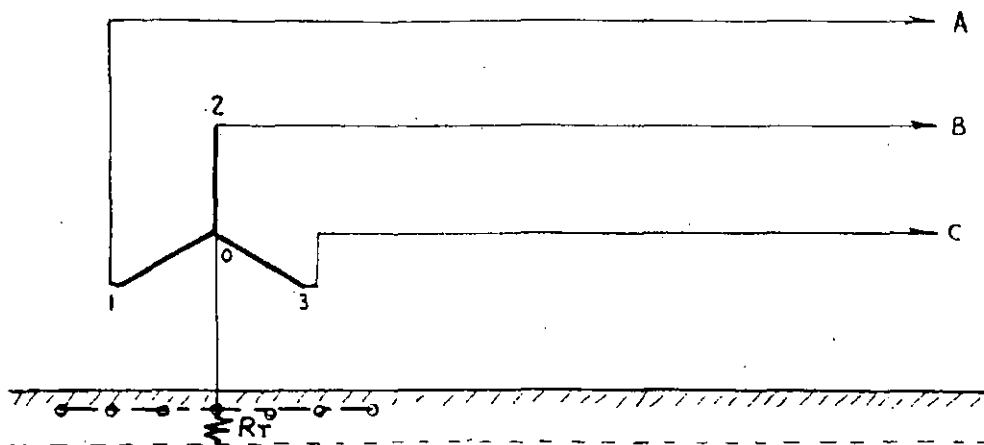
SISTEMA CON NEUTRO FLOTANTE

SISTEMAS ATERRIZADOS



* LOS PUNTOS EN DONDE $\frac{X_0}{X_1} \approx \pm \infty$ CORRESPONDEN A SISTEMAS CON EL NEUTRO CONECTADO A TIERRA POR MEDIO DE UNA BOBINA DE PETERSEN

SISTEMA EFECTIVAMENTE ATERRIZADO



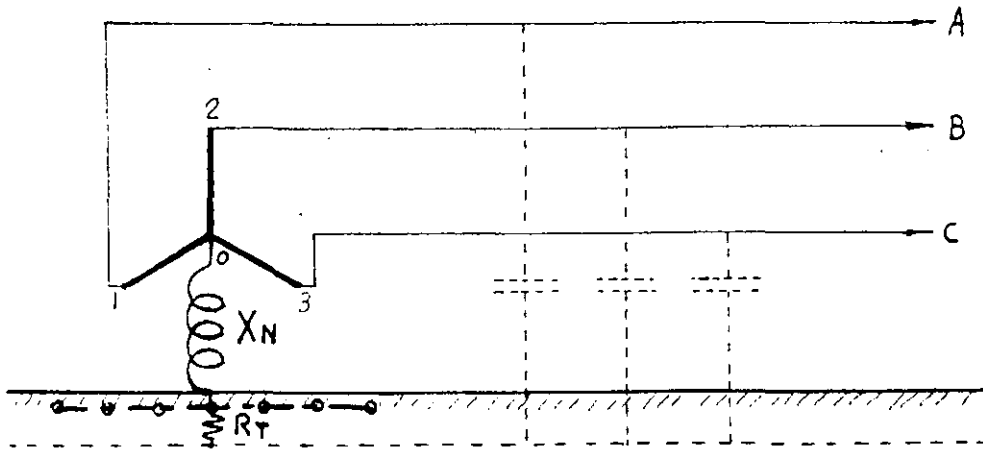
$$0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad 0 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

SOBRETENSION MAXIMA A 60Hz 1.4 P.U

FACTOR DE ATERRIZAMIENTO 0.8

- TODOS LOS SISTEMAS DEL SECTOR ELECTRICO TIENEN ESTAS CONDICIONES DE ATERRIZAMIENTO.
- LA MAYORIA DE LAS INSTALACIONES INDUSTRIALES SON DE ESTA CATEGORIA DE ATERRIZAMIENTO.

SISTEMA ATERRIZADO POR REACTANCIA



$$3 < \frac{X_0}{X_1} < 10 \quad 0 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

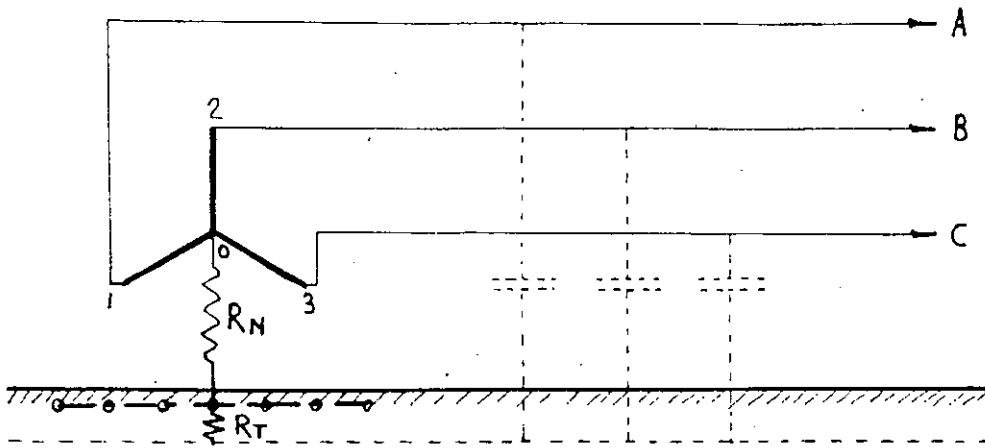
SOBRETENSION MAXIMA A 60Hz 1.67 P.U.

FACTOR DE ATERRIZAMIENTO 0.95

- SE UTILIZA PARA LIMITAR LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO DE FASE A TIERRA A NIVEL DE BANCO O SUBESTACION.

NOTA: LAS OSCILACIONES DE LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS PUEDEN SER PELIGROSAS 2.7 P.U.

SISTEMA ATERRIZADO POR RESISTENCIA



$$0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3$$

$$1 < \frac{R_0}{X_1} < \frac{0.3}{\omega C_0} X_1 \text{ A } 2X_1$$

SIEMPRE DEBE SER + $\rightarrow Z_N = \frac{R(-j\frac{1}{\omega C_0})}{R - j\frac{1}{\omega C_0}}$

$$R = R_N + R_T$$

$C_0 =$ CAPACITANCIA EN SECUENCIA CERO

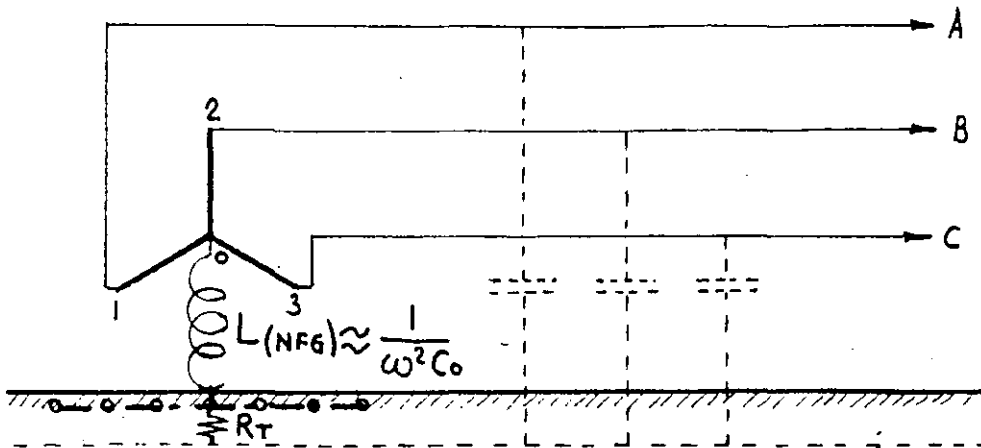
SOBRETENSION MAXIMA A 60 Hz < 1.73

FACTOR DE ATERRIZAMIENTO < 1

SE UTILIZA PARA LIMITAR LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO DE FASE A TIERRA A NIVEL BANCO.

NOTA: LA RESISTENCIA ATENUA LAS SOBRETENSIONES TRANSITORIAS.

SISTEMA ATERRIZADO POR BOBINA DE PETERSEN



$$X_{(NFG)} = \frac{j\omega L \left(-\frac{1}{\omega C_0}\right)}{j\omega L - \frac{1}{\omega C_0}} \approx \infty$$

C_0 = CAPACITANCIA EQUIVALENTE EN SECUENCIA CERO

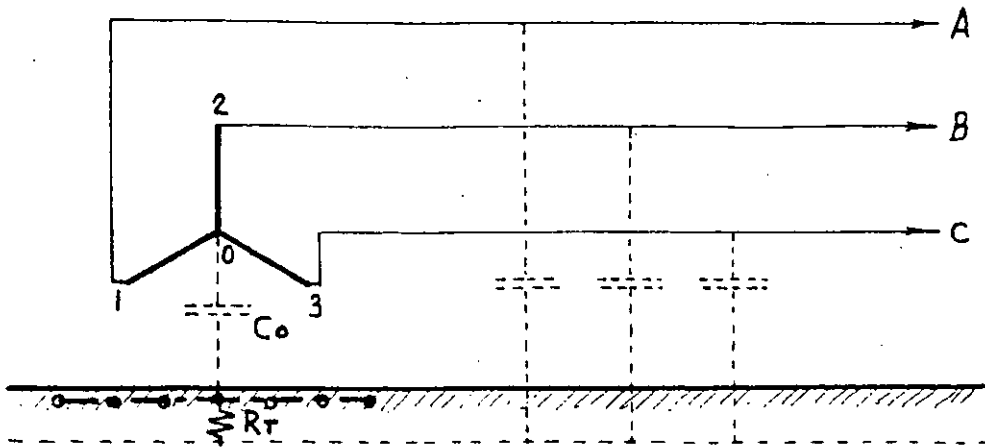
SOBRETENSION MAXIMA A 60 Hz 1.73 P.U.

FACTOR DE ATERRIZAMIENTO 1

- SOLAMENTE SE USA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES QUE REQUIERAN PROCESOS CONTINUOS. PREVIA JUSTIFICACION ECONOMICA.

$$I_{CC} \text{ FASE A TIERRA} = 0$$

SISTEMA CON NEUTRO FLOTANTE



EL NEUTRO QUEDA ACOPLADO AL SISTEMA DE TIERRAS CON LA CAPACITANCIA EQUIVALENTE NATURAL EN SECUENCIA CERO DEL SISTEMA.

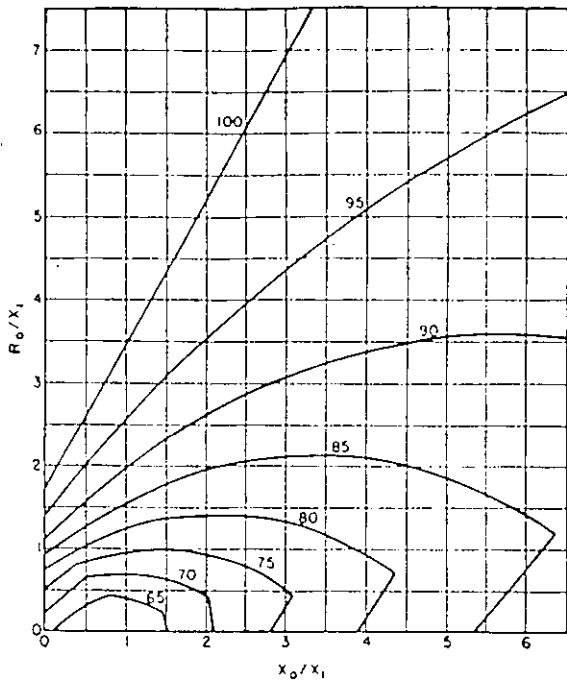
$$\frac{X_0}{X_1} \leq -10 \quad X_0 \text{ ES NEGATIVO.}$$

SOBRETENSION A 60 Hz 2 P.U.

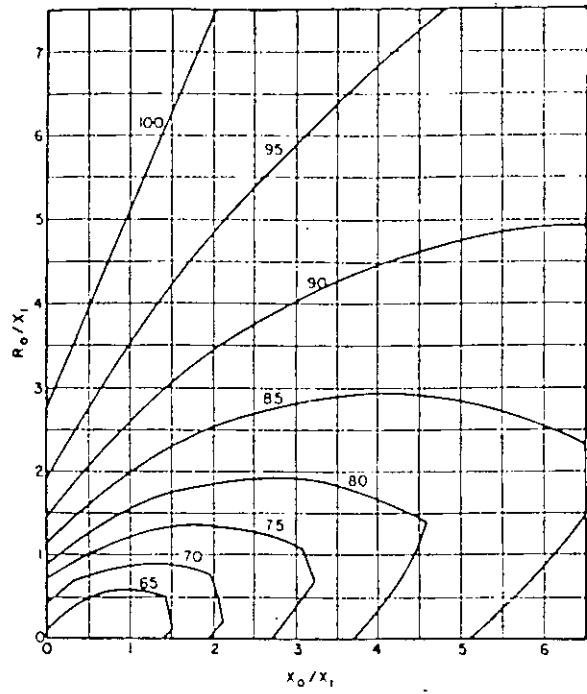
FACTOR DE ATERRIZAMIENTO 1.1

- SOLAMENTE SE USA EN INSTALACIONES INDUSTRIALES QUE REQUIERAN PROCESOS CONTINUOS. PREVIA JUSTIFICACION ECONOMICA.

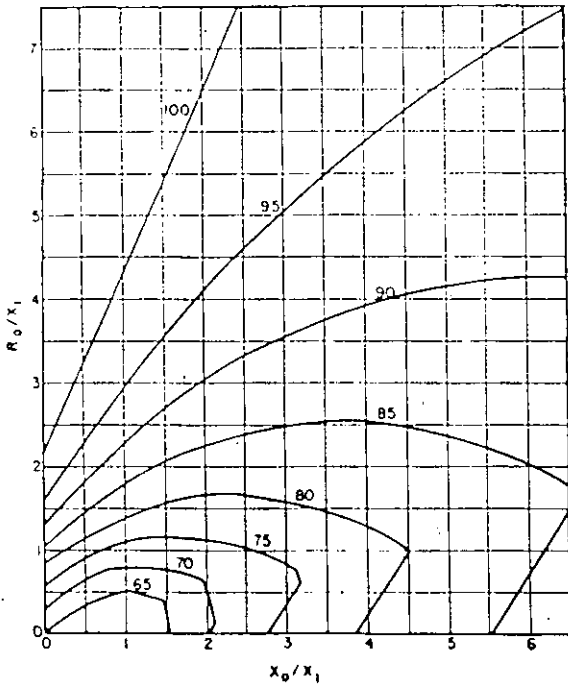
$$I_{CC} \text{ FASE A TIERRA} = 0$$



(a) Voltage conditions neglecting positive- and negative-sequence resistance-- $R_1 = R_2 = 0$.



(c) Voltage conditions for $R_1 = R_2 = 0.2 X_1$.

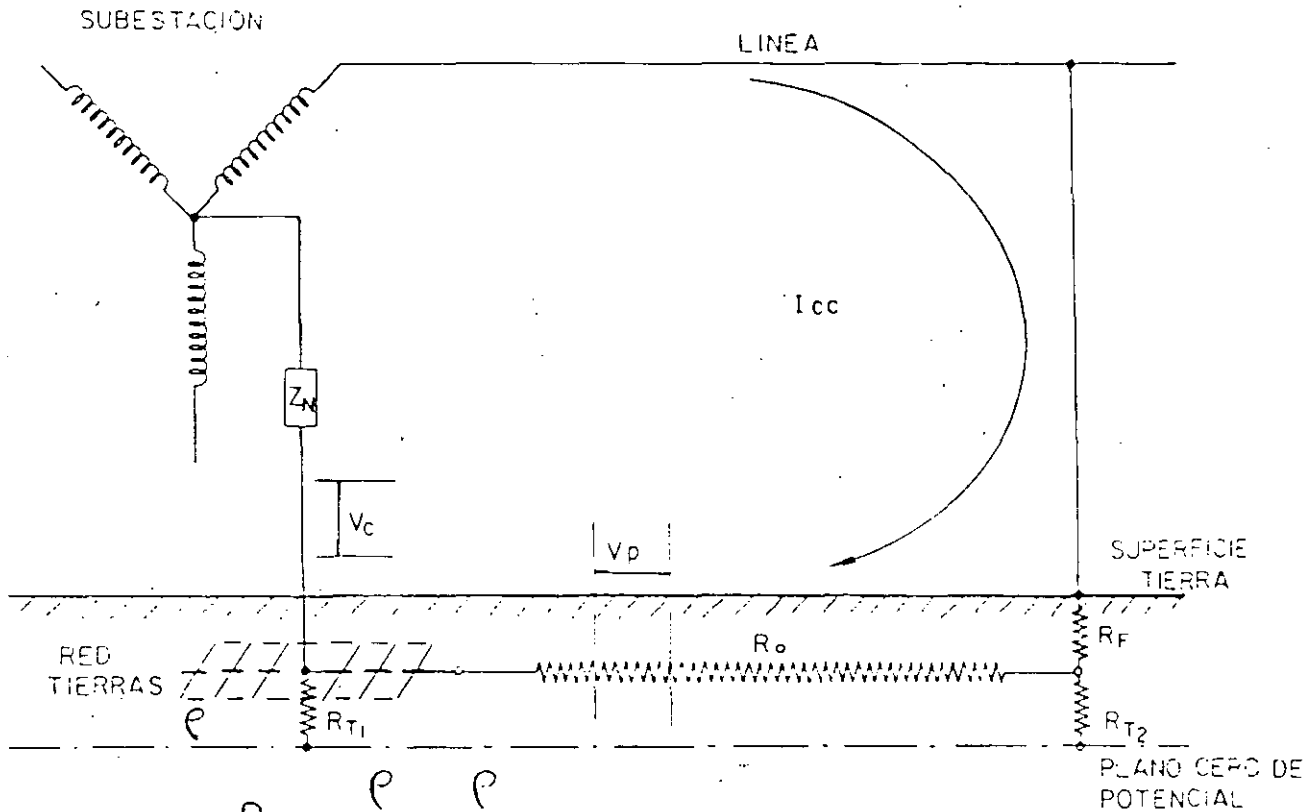


(b) Voltage conditions for $R_1 = R_2 = 0.1 X_1$.

Figure 5-3
Maximum Line-to-ground Voltage at
Fault Location for Grounded Neu-
tral System Under Fault Condition.

-127

CAIDA DE TENSION EN LA TIERRA



$$R_{T1} = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

EFECTO DE LA CORRIENTE EN EL SER HUMANO

m A

EFECTO

1	UMBRAL DE PERCEPCION
9 - 25	DOLOR Y CONTRACCION MUSCULAR
25 - 50	SEVERA CONTRACCION MUSCULAR
50 - 100	FIBRILACION VENTRICULAR

RELACION DE CHARLES DALZIEL.

$$I_k = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

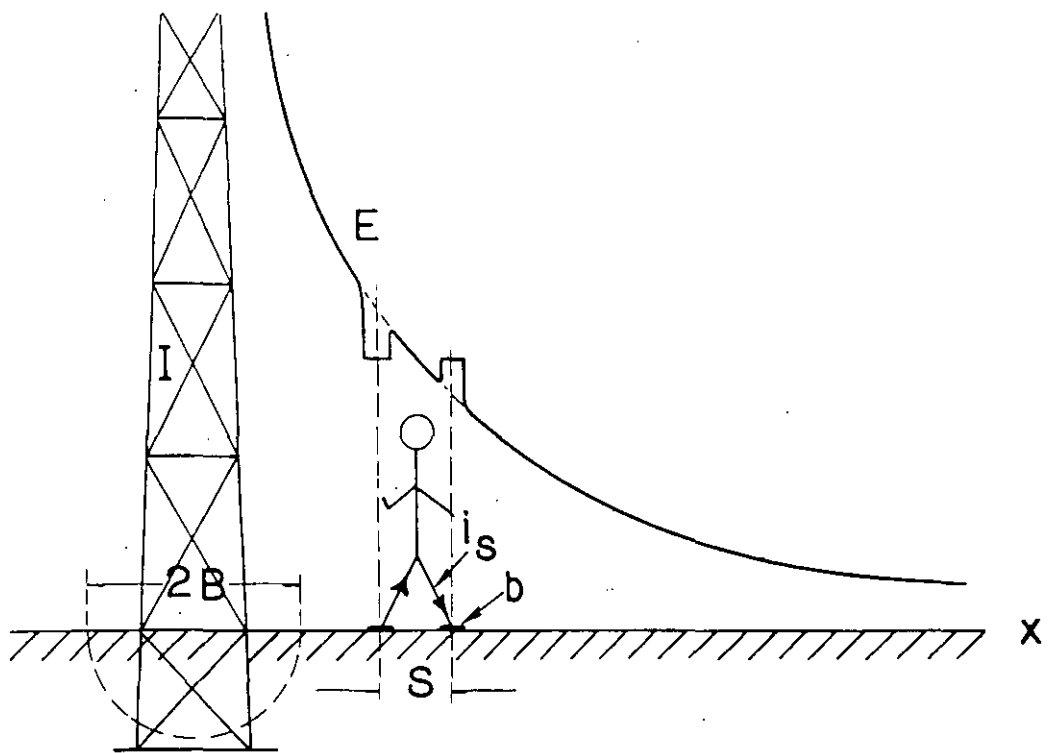


FIG 2.- DISTRIBUCION DEL POTENCIAL EN LA SUPERFICIE DE LA TIERRA CERCA DE UN ELECTRODO QUE CONDUCE CORRIENTE.

FIG. 2

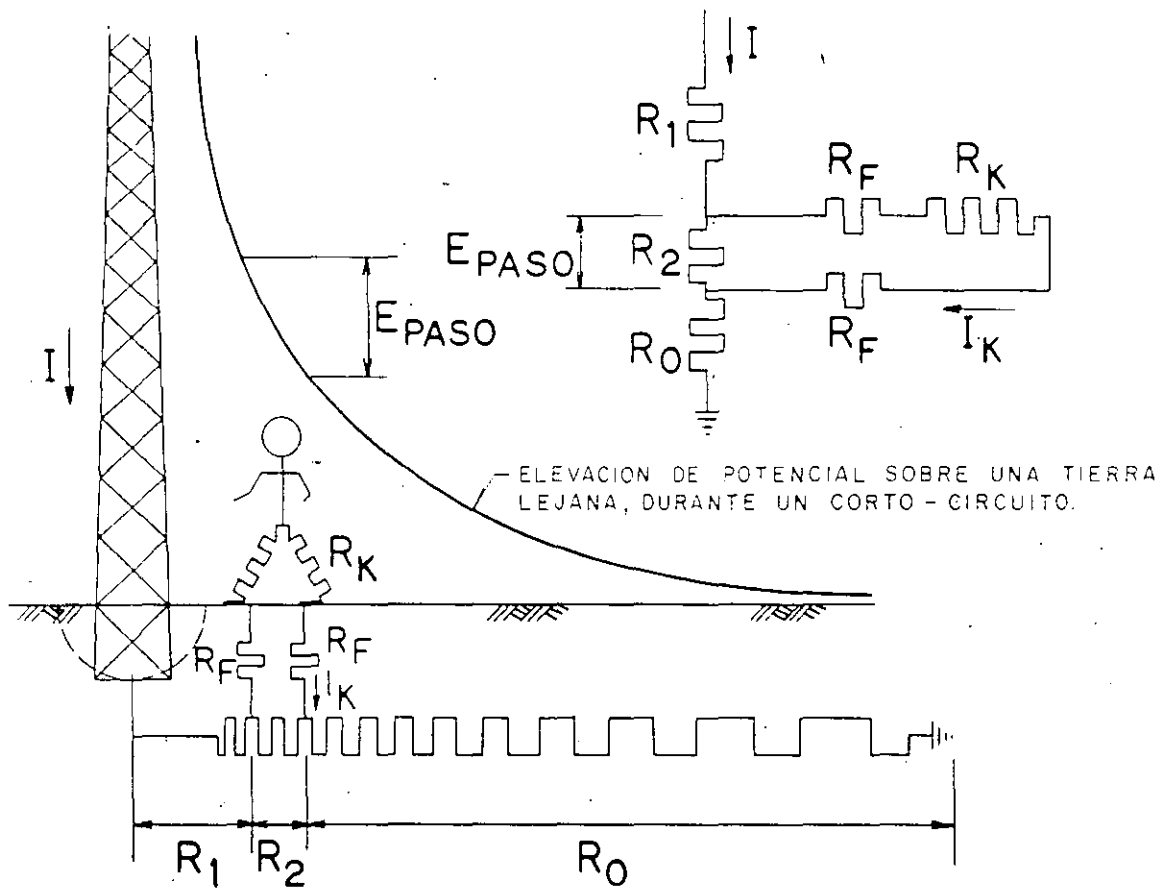
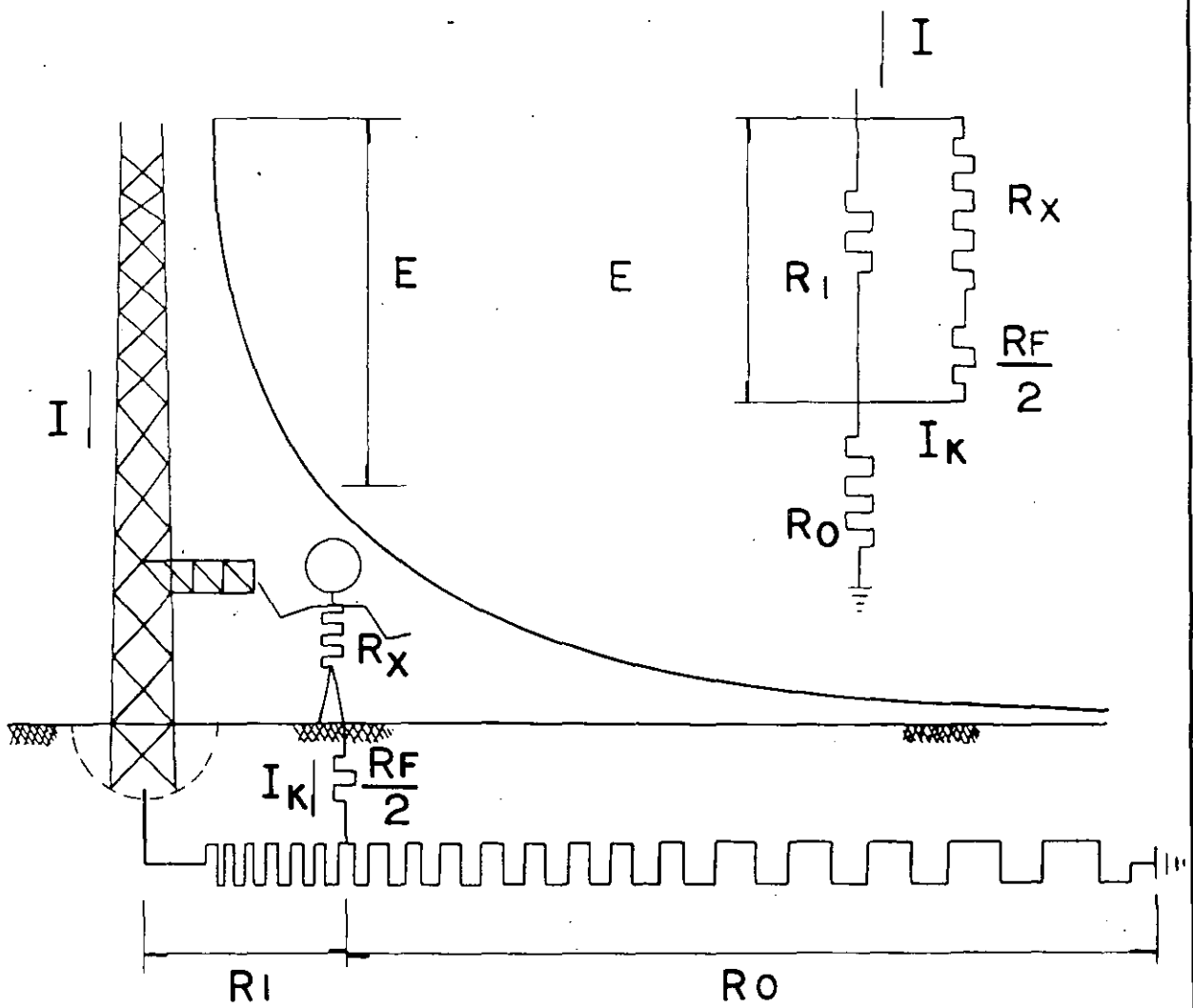


FIG. 3. - TENSIONES DE PASO, CERCA DE UNA ESTRUCTURA CONECTADA A TIERRA.

FIG. 3.



TENSION DE CONTACTO

FIG. 4

13

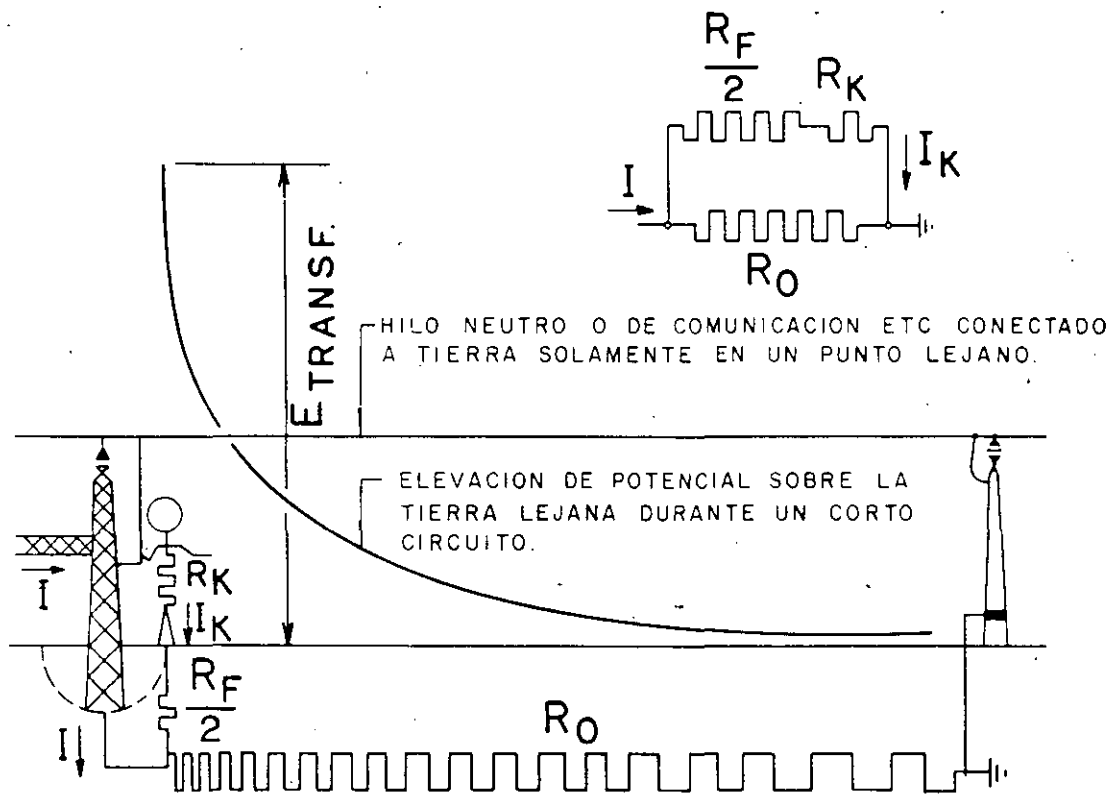
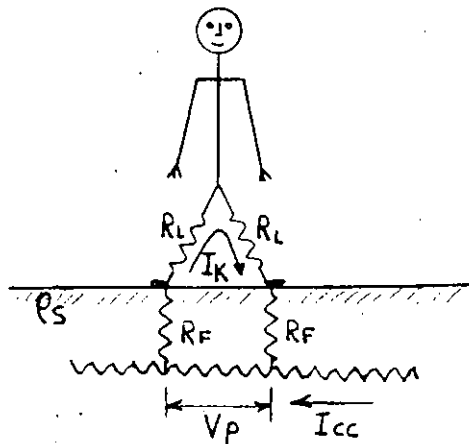


FIG. 5. EJEMPLO DEL PELIGRO LIBRADO A POTENCIALES TRANSFERIDOS.

FIG. 5

TENSION DE PASO



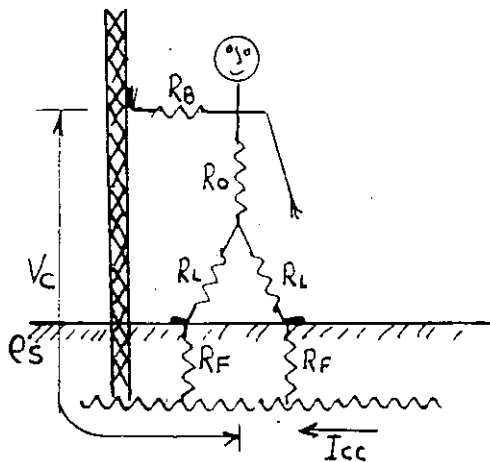
$$V_P = (2R_L + 2R_F) \times I_K$$

$$I_K = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

$$2R_L \approx R_K = 1000 \Omega$$

$$2R_F = 6 P_S$$

TENSION DE CONTACTO



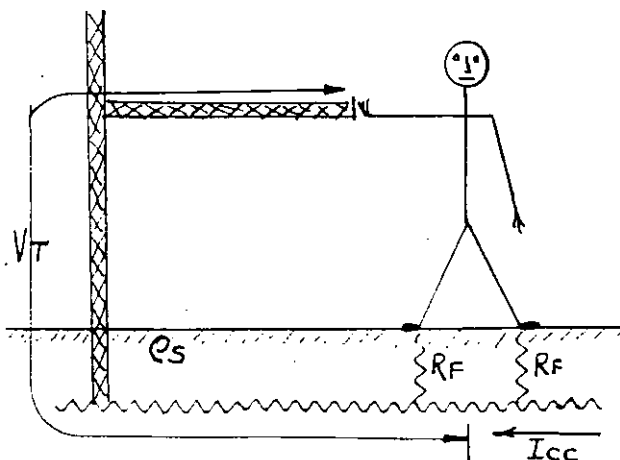
$$V_C = (R_B + R_o + \frac{1}{2} R_L + \frac{1}{2} R_F) I_K$$

$$I_K = \frac{0.116}{\sqrt{t}}$$

$$(R_B + R_o + \frac{1}{2} R_L) \approx R_K = 1000 \Omega$$

$$\frac{1}{2} R_F = 1.5 P_S$$

TENSION DE TRANSFERENCIA



• SE DEBEN EVITAR ESTAS CONDICIONES

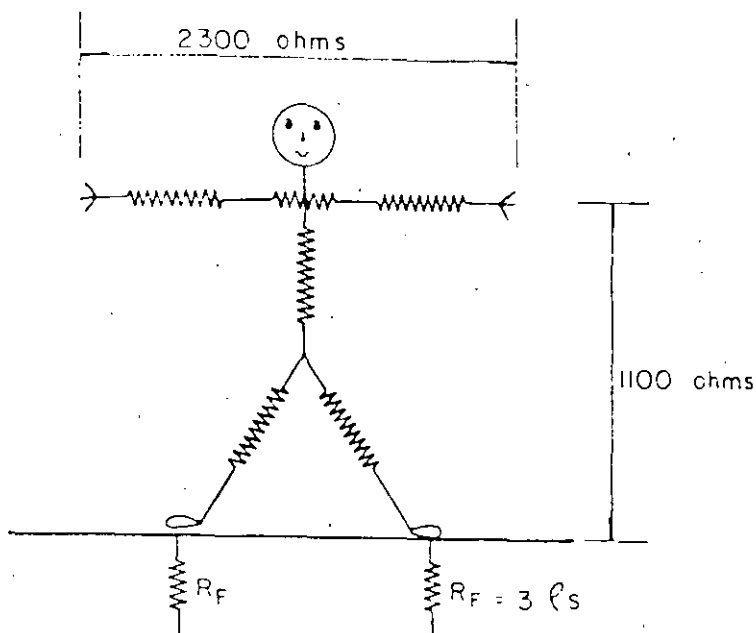
• TRATAMIENTO ESPECIAL

- AISLAR PARTES PELIGROSAS

- NORMAS DE SEGURIDAD

- INDICACIONES.

RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

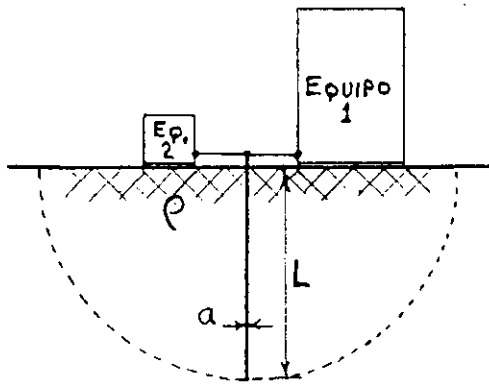


$R_K = 1000 \text{ ohms}$
$R_{\text{UN PASO}} = 6 \ell s$
$R_{\text{PARADO}} = 1.5 \ell s$

$$V_P = \frac{116 + 0.7 \ell s}{\sqrt{t}} ; \quad V_C = \frac{116 + 0.17 \ell s}{\sqrt{t}}$$

DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRAS

I. RADIAL



- ECONOMICO
- GRADIENTES DE POTENCIAL ELEVADOS
- APLICABLE SOLAMENTE PARA BAJAS CORRIENTES DE TIERRA.

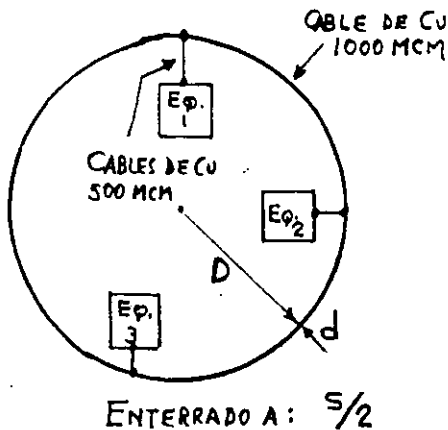
$$R_T = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$$

DOS ELECTRODOS

$$\left\{ \begin{array}{l} S > L \\ S < L \end{array} \right. \quad R_T = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^3} + \frac{2L^4}{5S^4} + \dots \right)$$

$$R_T = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} + \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$$

II. ANILLO

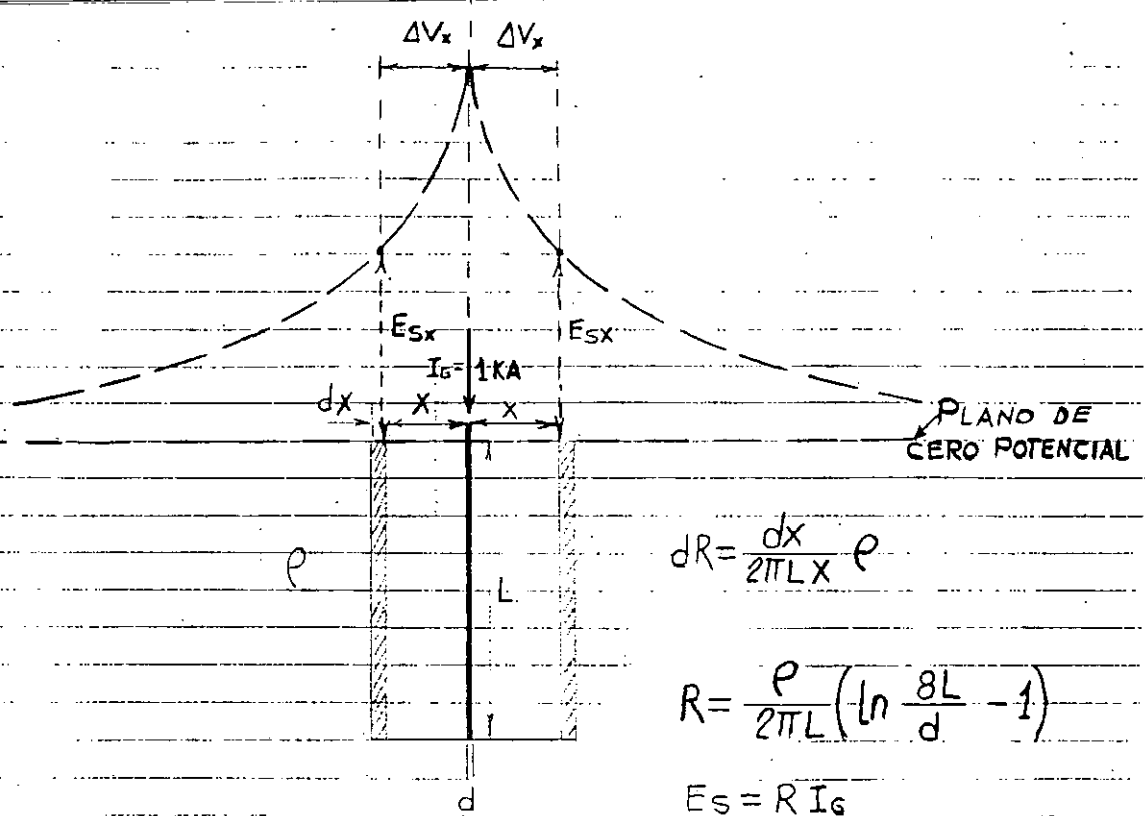


- ECONOMICO
- GRADIENTES DE POTENCIAL MODERADOS
- APLICABLE PARA CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO BAJAS.

$$R_T = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{S} \right)$$

III. MALLA

- RECOMENDADO PARA TODOS LOS CASOS.



$$dR = \frac{dx}{2\pi L x} \rho$$

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right)$$

$$E_s = R I_g$$

PARA TERRENO HUMEDO: $\rho = 6500 \Omega \cdot \text{cm}$

$L = 8 \text{ pies (244 cm)}$

$d = 3/4'' \text{ (1.9 cm)}$

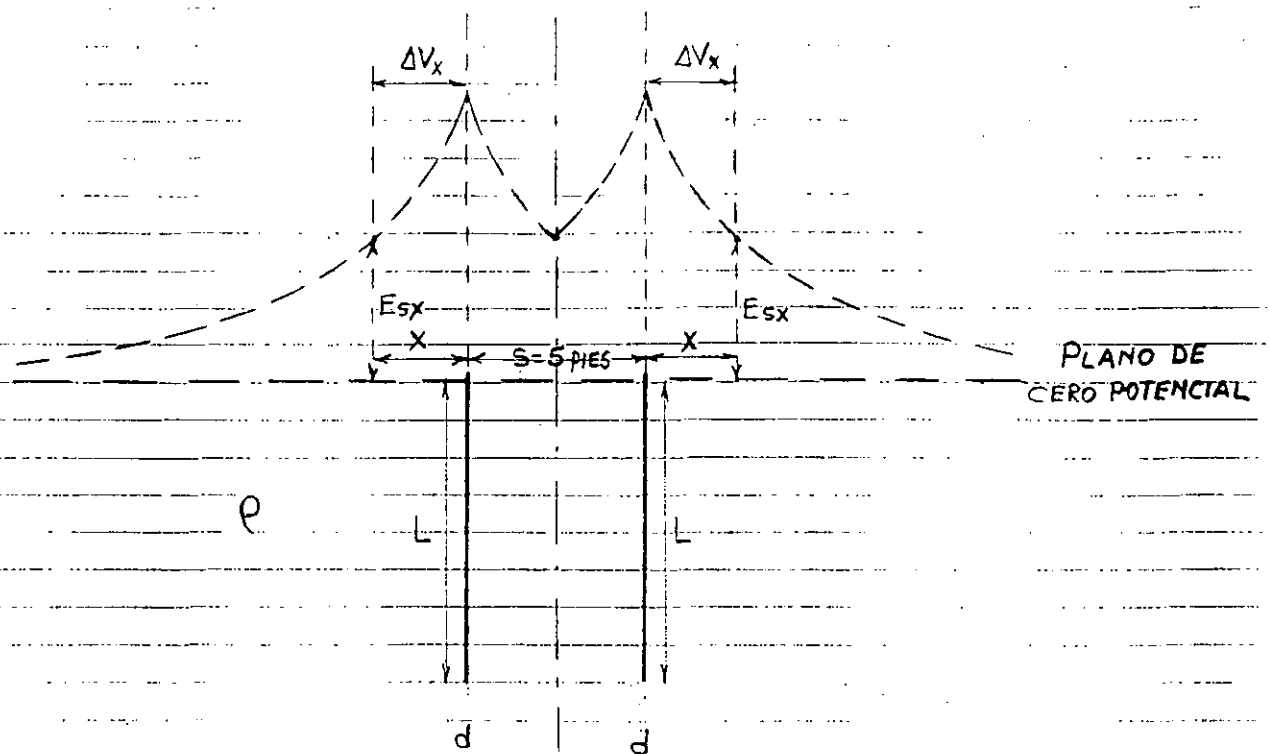
$$R = \frac{6500}{2\pi \times 244} \left(\ln \frac{8 \times 244}{1.9} - 1 \right) = 25 \Omega$$

PARA $x=0$ $E_{s0} = 25 \times 1 = 25 \text{ KV}$

PARA $2x = 5 \text{ pies (152 cm)}$ $R \approx \frac{1}{2} 25 = 12.5 \Omega$

$E_{s5} = 12.5 \times 1 = 12.5 \text{ KV}$

$$\Delta V_5 = 25 - 12.5 = 12.5 \text{ KV}$$



PARA $S < L$

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$$

$$S = 152 \text{ cm}, L = 244 \text{ cm}, d = 1.9 \text{ cm}, \rho = 6500 \text{ } \Omega\text{-cm.}$$

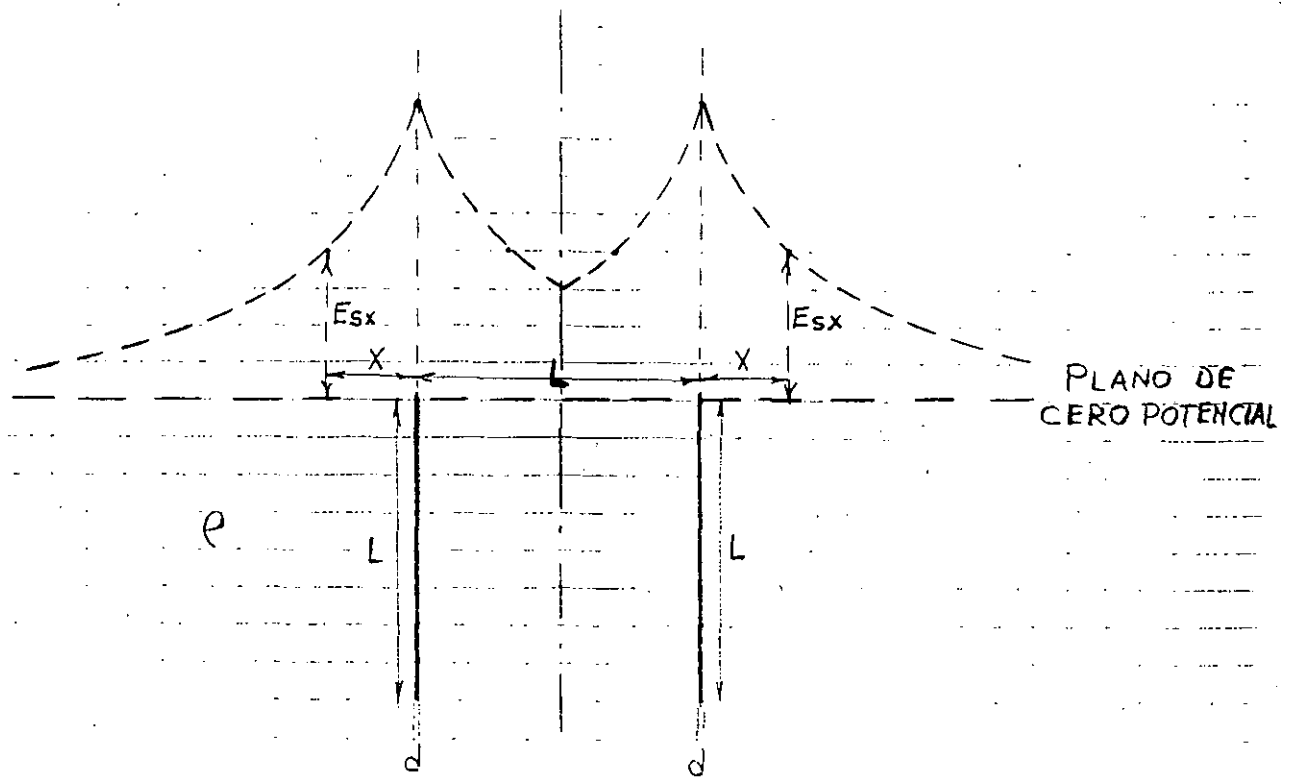
$$R = 15.10 \text{ } \Omega$$

$$E_{s0} = 15.10 \times 1 = 15.10 \text{ KV}$$

$$E_{s5} = 7.55 \times 1 = 7.55 \text{ KV}$$

$$\Delta V_5 = 15.10 - 7.55 = 7.55 \text{ KV}$$

24



RESOLVIENDO CON ECUACION PARA $S < L$

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} + \ln \frac{4L}{S} - 2 + \frac{S}{2L} - \frac{S^2}{16L^2} + \frac{S^4}{512L^4} \dots \right)$$

$$S = 244 \text{ cm}, L = 244 \text{ cm}, d = 1.9 \text{ cm}, \rho = 6500 \text{ } \Omega\text{-cm}$$

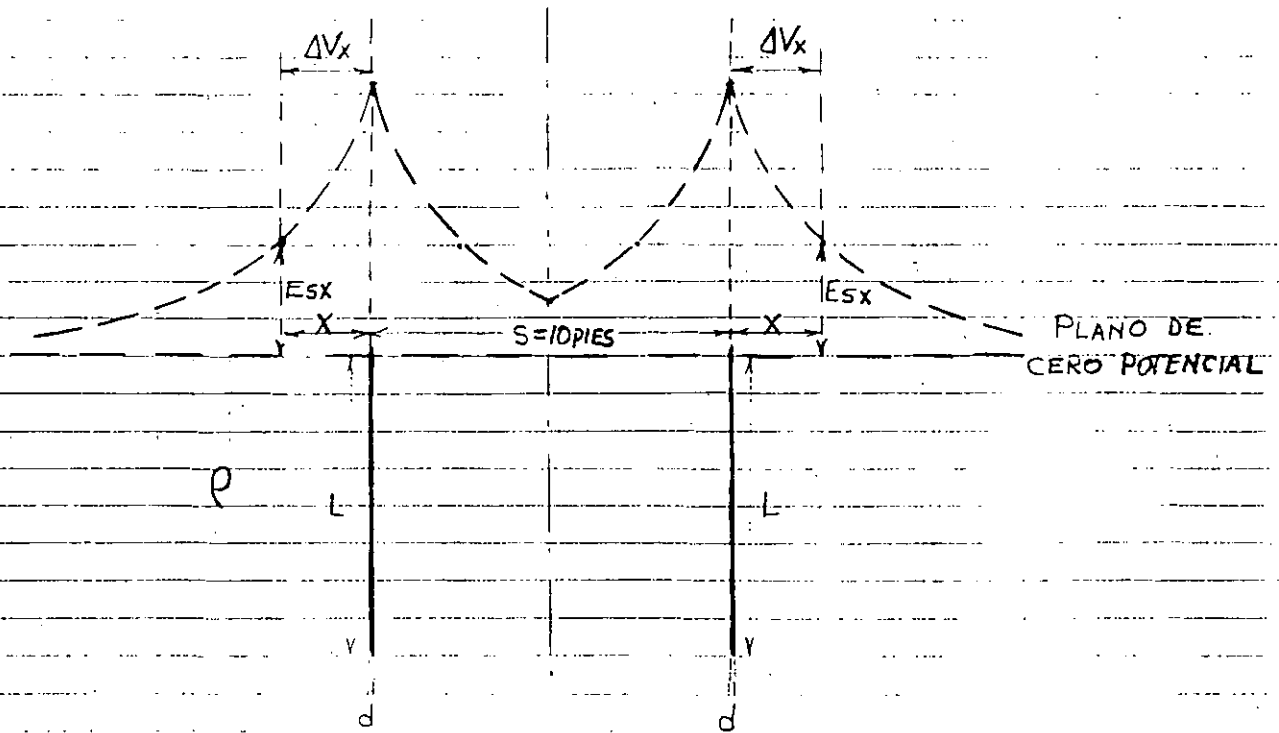
$$\underline{R = 14.59 \text{ } \Omega}$$

RESOLVIENDO CON ECUACION PARA $S > L$

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^2} + \frac{2L^4}{5S^4} \dots \right)$$

$$S = 244 \text{ cm}, L = 244 \text{ cm}, d = 1.9 \text{ cm}, \rho = 6500 \text{ } \Omega\text{-cm}$$

$$\underline{R = 15.47 \text{ } \Omega}$$



PARA $S > L$

$$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{8L}{d} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi S} \left(1 - \frac{L^2}{3S^3} + \frac{2L^4}{5S^4} \dots \right)$$

$$S = 304.8 \text{ cm}, L = 244 \text{ cm}, d = 1.9 \text{ cm}, \rho = 6500 \text{ } \Omega\text{-cm.}$$




$$R = 14.46 \text{ } \Omega$$

$$E_{s0} = 14.46 \times 1 = 14.46 \text{ KV}$$

$$E_{s5} = 7.23 \times 1 = 7.23 \text{ KV}$$

$$\Delta V_s = 14.46 - 7.23 = 7.23 \text{ KV}$$

Table 10
Formulas for Calculation of Resistances to Ground*†

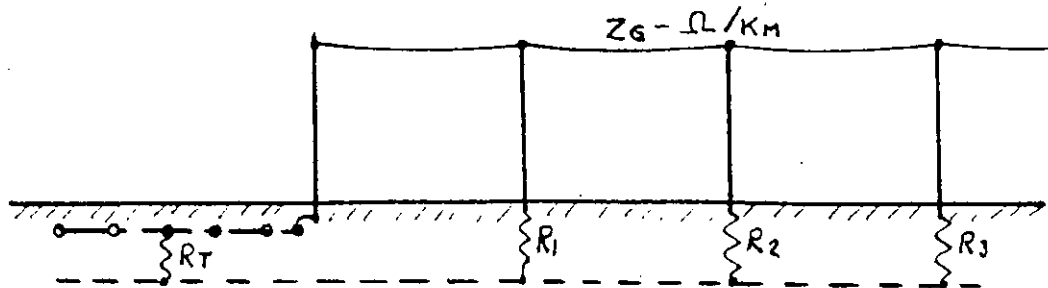
	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi a}$
•	One ground rod length L , radius a	$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
••	Two ground rods $s > L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} + \frac{2L^4}{5s^4} \right)$
••	Two ground rods $s < L$; spacing s	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
—	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
L	Right-angle turn of wire length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 + 0.2146 \frac{s}{L} + 0.1035 \frac{s^4}{L^2} - 0.0424 \frac{s^4}{L^3} \right)$
	Three-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{6\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 1.071 - 0.209 \frac{s}{L} + 0.238 \frac{s^3}{L^3} - 0.054 \frac{s^4}{L^4} \right)$
+	Four-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 2.912 - 1.071 \frac{s}{L} + 0.645 \frac{s^2}{L^2} - 0.145 \frac{s^4}{L^4} \right)$
✳	Six-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 8.851 - 3.128 \frac{s}{L} + 1.758 \frac{s^2}{L^2} - 0.490 \frac{s^4}{L^4} \right)$
✳	Eight-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16\pi L} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} + 10.98 - 5.51 \frac{s}{L} + 3.26 \frac{s^3}{L^3} - 1.17 \frac{s^4}{L^4} \right)$
○	Ring of wire diameter of ring D , diameter of wire d , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2\pi^2 D} \left(\ln \frac{8D}{d} + \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Buried horizontal strip length $2L$, section a by b , depth $s/2$, $b < a/8$	$R = \frac{\rho}{4\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{a^2 - \pi ab}{2(a+b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 + \frac{s}{2L} - \frac{s^2}{16L^2} + \frac{s^4}{512L^4} \right)$
	Buried horizontal round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{a^2}{s^2} + \frac{33}{40} \frac{a^4}{s^4} \right)$
	Buried vertical round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8a} + \frac{\rho}{4\pi s} \left(1 + \frac{7}{24} \frac{a^2}{s^2} + \frac{99}{320} \frac{a^4}{s^4} \right)$

*See Ref. 1.

†Approximate formulas including effects of images. Dimensions must be in centimeters to give resistance in ohms.
 ρ = resistivity of earth in ohms per cm^3 ($\text{M}\Omega/\text{m}^3$).

FACTORES A CONSIDERAR EN EL DISEÑO

I. EFECTO DEL HILO DE GUARDA.



$$R_T = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$$

$$Z_S = \sqrt{Z_G \cdot R_G}$$

$$R'_T = \frac{R_T Z_S}{R_T + Z_S}$$

$$\frac{1}{R_G} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_i}$$

$$n = \text{TORRES}/km.$$

II. CARACTERISTICAS DEL TERRENO

VALORES TÍPICOS DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO	
TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD OHM-M
AGUA DE MAR	1
TIERRA ORGANICA HUMEDA	10
SUELO HUMEDO	10^2
SUELO SECO	10^3
CONCRETO	10^3
CAMA ROCOSA	10^4
GRANITO	10^7
ROCA ARENISCA	10^8

III. CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO (AT-BT)

- FACTOR DE ASIMETRIA
- FACTOR DE CRECIMIENTO
- EFECTO DE LA RESISTENCIA DE TIERRA EN EL SISTEMA.

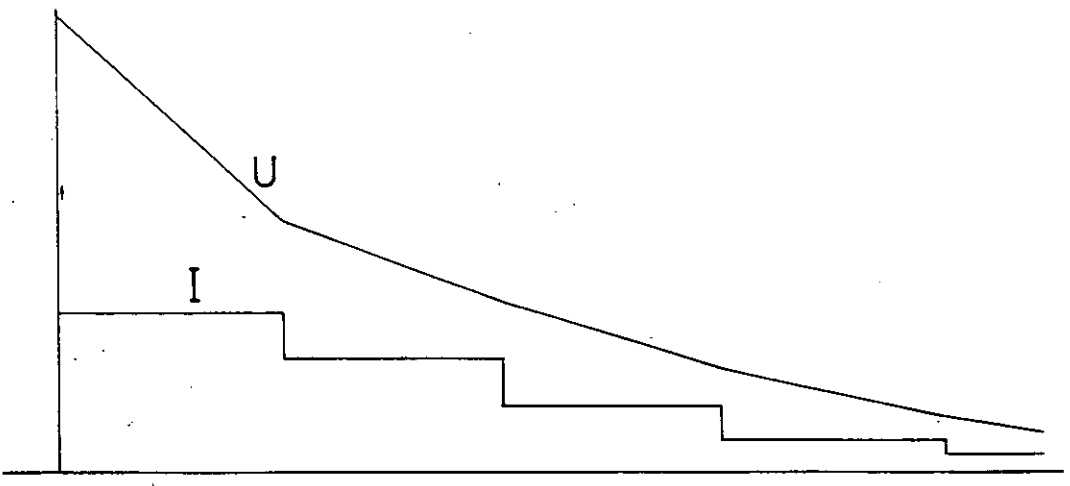
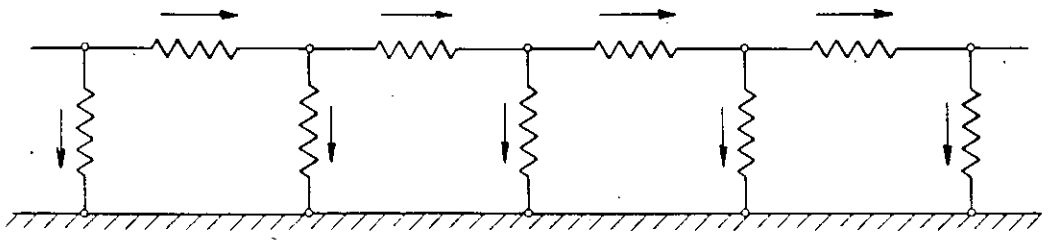
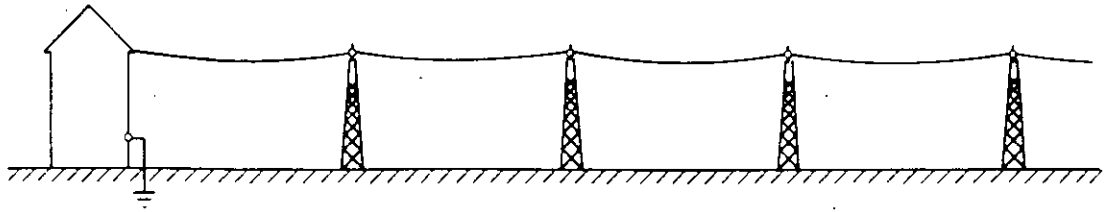
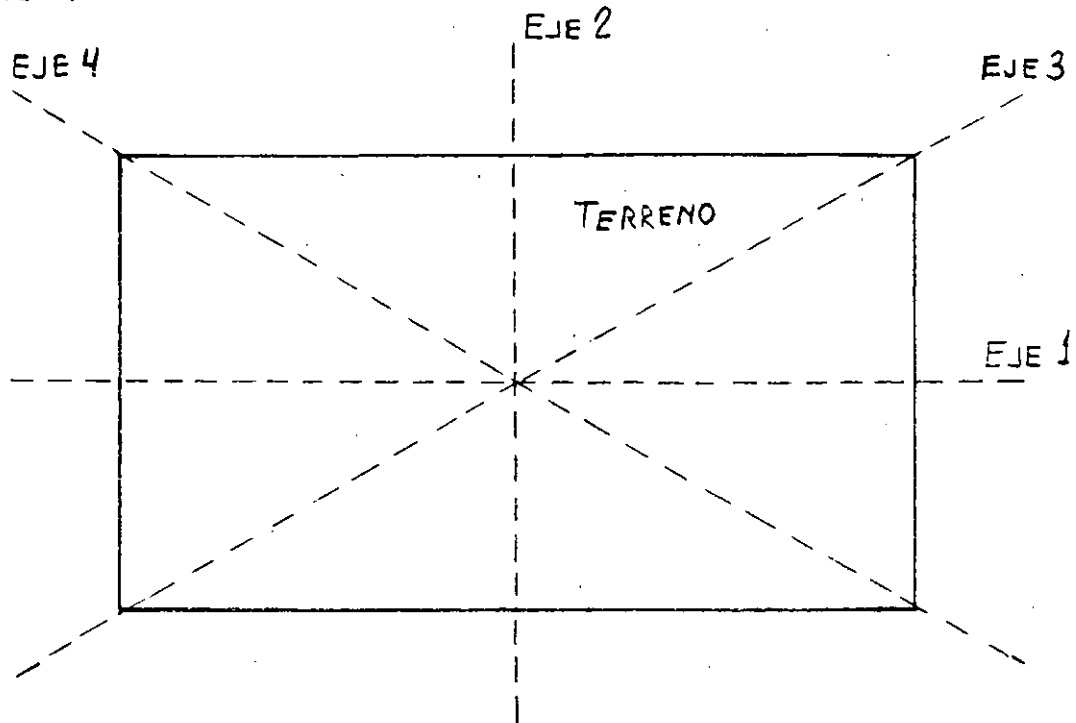


FIG. 8. FLUJO DE CORRIENTE DE TIERRA POR UN HILO DE GUARDA.

FIG. 8

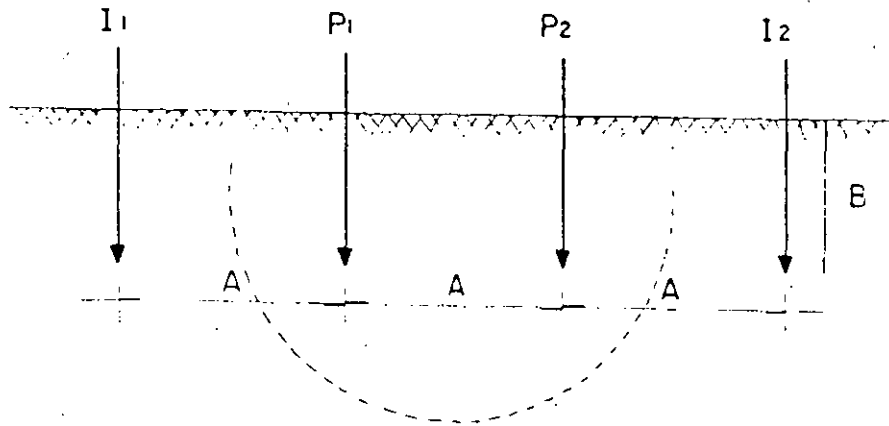
MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

- DE PREFERENCIA REALIZAR LAS MEDICIONES EN LA TEMPORADA DE ESTIAJE.
- EL TERRENO A MEDIR DEBERA DIVIDIRSE EN CUATRO EJES.



- EN CADA UNO DE ESTOS EJES, SE TOMARAN MEDICIONES, INICIANDO CON UNA SEPARACION DE ELECTRODOS $a=1m$. HASTA CUBRIR TODO EL TERRENO.
- SE CALCULA LA RESISTIVIDAD DE CADA CONDICION MEDIDA CON LA ECUACION DE WENNER.
- SI SE JUSTIFICA, CALCULAR LA RESISTIVIDAD DE LOS ESTRATOS.
- LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO ES EL VALOR PROMEDIO DE LA RESISTIVIDAD ENCONTRADA EN LOS CUATRO EJES.

LECTURAS DE RESISTIVIDAD



FORMULA CON LA QUE SE CALCULO LA RESISTIVIDAD .-

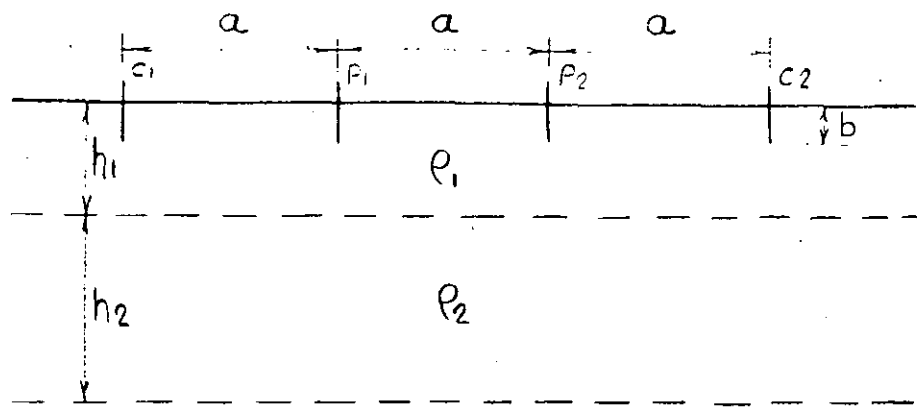
$$\rho = \frac{4 \pi A R}{1 + \frac{2A}{\sqrt{A^2 + 4B^2}} - \frac{2A}{\sqrt{4A^2 + 4B^2}}}$$

LEVANTAMIENTO DE RESISTIVIDAD EN LA PLANTA DEL EJEMPLO

(VER PLANO ADJUNTO PARA UBICACION DE LA LECTURA)

SEPARACION A (m)	PROFUNDIDAD "B" (cm)	LECTURAS Nº 1		LECTURAS Nº 2		LECTURAS Nº 3		LECTURAS Nº 4	
		R (Ω)	ρ (Ω -m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)	R (Ω)	ρ (Ω -m)
1.0	0.25	1.6	11.05	2.4	16.58	2.2	15.73	2.2	15.73
1.5	0.25	0.8	7.89	1.3	12.82	0.89	8.94	1.0	10.0
2.0	0.25	0.6	7.74	0.77	9.93	0.6	7.82	0.65	8.47
2.5	0.25	0.5	7.989	0.48	7.66	0.4	6.438	0.45	7.24
3.0	0.25	0.4	7.63	0.38	7.24	0.27	5.32	0.33	6.32

RESISTIVIDAD DE TERRENO CON DOS CAPAS.



$$\rho_a = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}}}$$

ρ_a - RESISTIVIDAD CALCULADA CON EL METODO DE WENNER A LA DISTANCIA a

a - SEPARACION DE ELECTRODOS

b - PROFUNDIDAD DE ENTERRADO DE LOS ELECTRODOS

R - RESISTENCIA MEDIDA ENTRE LOS ELECTRODOS.

h_1 - PROFUNDIDAD DEL PRIMER ESTRATO

h_2 - PROFUNDIDAD DEL SEGUNDO ESTRATO

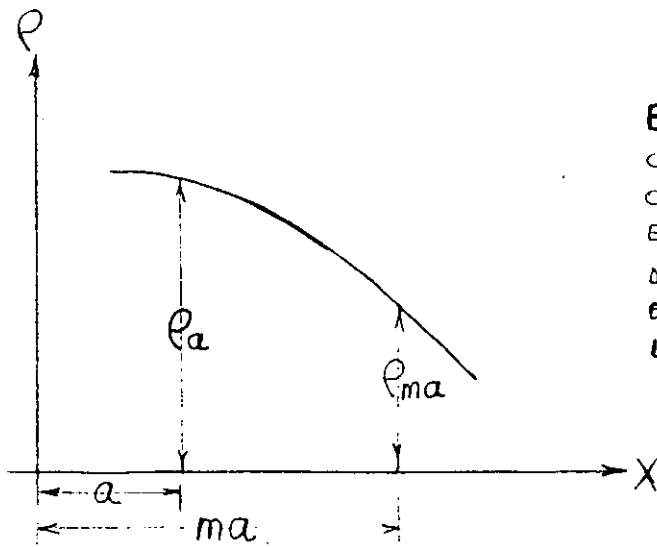
$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

METODO DE SUNDE.

$$\frac{\rho_a}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \frac{2nh}{a}}} \right\} = F_a$$

HACIENDO MEDICIONES A LA DISTANCIA $m\alpha$ SE OBTIENE:

$\rho_{m\alpha}$ - RESISTIVIDAD CALCULADA CON EL METODO DE WENNER A LA DISTANCIA $m\alpha$



EN TERRENOS CON DOS CAPAS LA RESISTIVIDAD VARIA CON LA SEPARACION DE LOS ELECTRODOS DEBIDO AL CAMBIO DE LAS PROPORCIONES DE LOS ESTRATOS INVOLUCRADOS EN LA MEDICION.

PARA LA DISTANCIA m_a TAMBIEN SE CUMPLE:

$$\frac{\rho_{m_a}}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{m_a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{m_a}\right)^2}} \right\} = F_{m_a}$$

$$\frac{F_{m_a}}{F_a} = \frac{\rho_{m_a}}{\rho_a}$$

OBSERVAMOS QUE:

$$\text{Si } \frac{\rho_{m_a}}{\rho_a} < 1 \quad \rho_2 < \rho_1 \quad \text{Y } K \text{ ES NEGATIVO}$$

$$\frac{\rho_{m_a}}{\rho_a} > 1 \quad \rho_2 > \rho_1 \quad \text{Y } K \text{ ES POSITIVO}$$

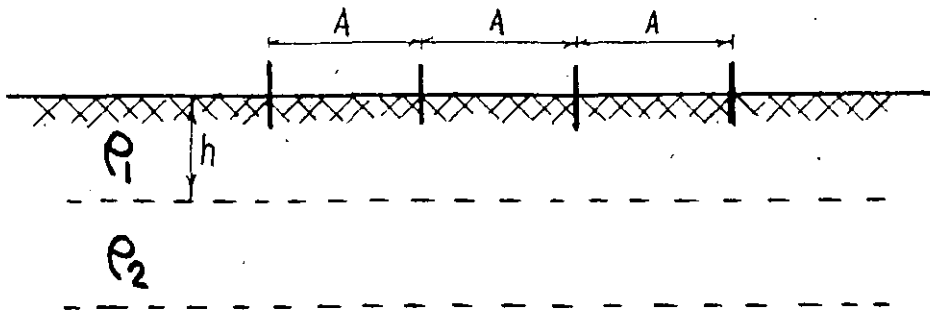
EL PROBLEMA SE RESUELVE HACIENDO MEDICIONES REPRESENTATIVAS CONSIDERANDO TRES CONDICIONES. (ρ_a, a) , (ρ_{m_a}, m_a) Y (ρ_{m_2a}, m_2a) .

SE PLANTEAN ENTONCES DOS ECUACIONES

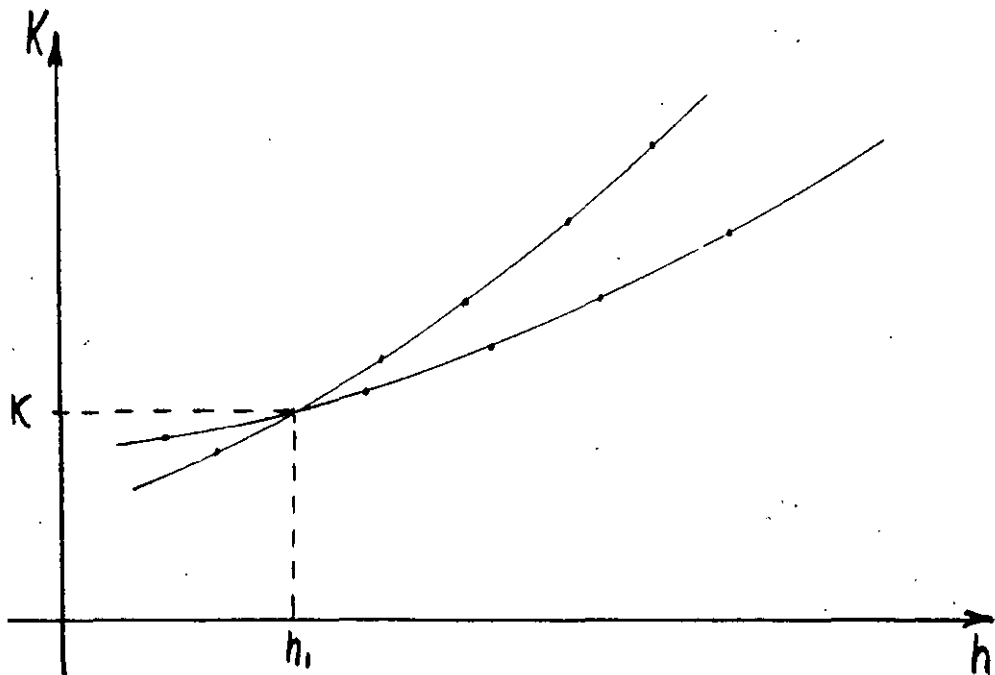
$$\left. \begin{aligned} \frac{\rho_{m_a}}{\rho_a} &= \frac{F_{m_a}}{F_a} \\ \frac{\rho_{m_2a}}{\rho_a} &= \frac{F_{m_2a}}{F_a} \end{aligned} \right\}$$

DE CUYA SOLUCION SE ENCUENTRAN LOS VALORES DE K Y h_1 . SUBSTITUYENDOS EN LA ECUACION F_a SE OBTIENE ρ_1 Y CON K CONOCIDO SE OBTIENE ρ_2

CALCULO DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO CON DOS CAPAS



$$\frac{\rho_{mA}}{\rho_A} = \frac{1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{mA}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{mA}\right)^2}} \right\}}{1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} K^n \left\{ \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{A}\right)^2}} - \frac{1}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{A}\right)^2}} \right\}}$$

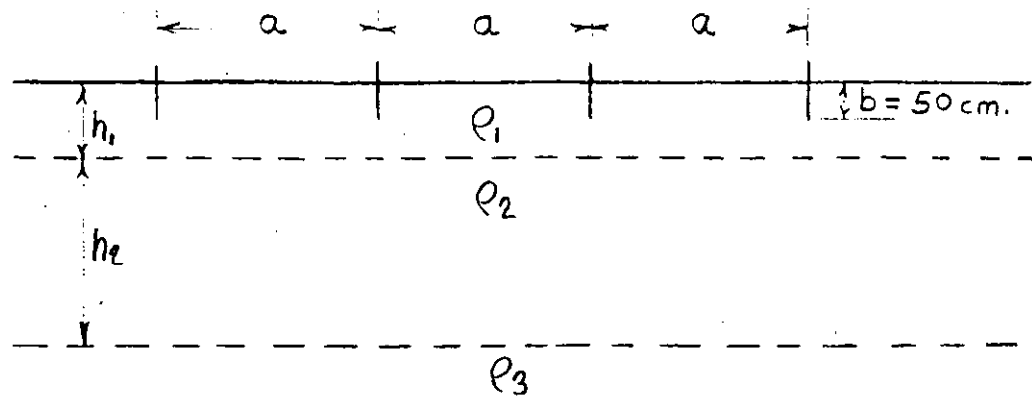


$$K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$$

EJEMPLO.

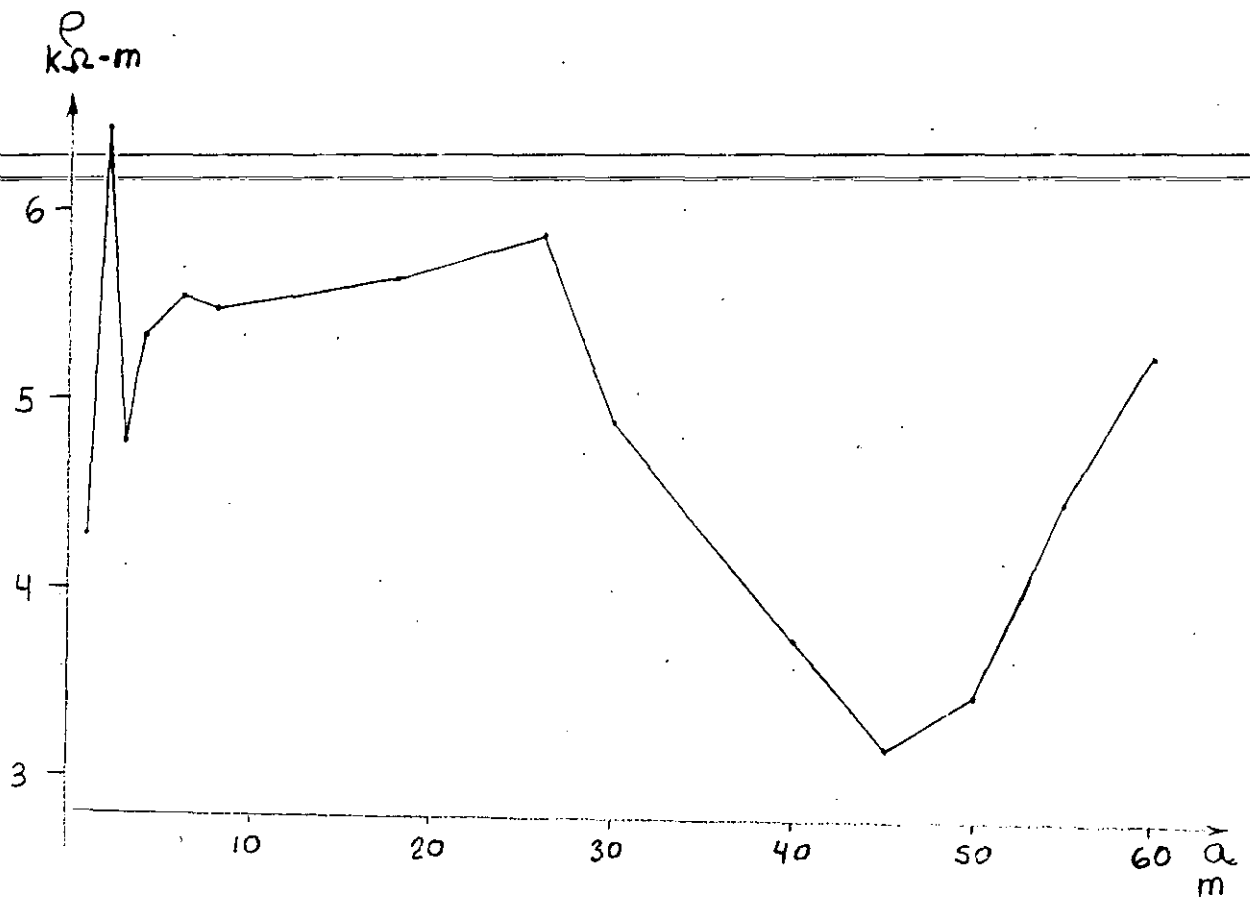
MEDICIONES DE RESISTIVIDAD EN TERRENO DE DOS CAPAS.

TERRENO CON LAVA VOLCANICA EN C.U. AL N.E. DE EDIFICIO CONACT.



A. DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

a m	R ohms	ρ_a ohm-m.
1	0.1×10^4	4283
2	0.058×10^4	6433
3	0.27×10^3	4797
4	0.22×10^3	5344
6	0.15×10^3	5568
8	0.11×10^3	5481
18	0.50×10^2	5645
26	0.36×10^2	5876
30	0.26×10^2	4898
40	0.15×10^2	3768
45	0.12×10^2	3392
50	0.11×10^2	3455
55	0.13×10^2	4492
60	0.14×10^2	5277



LAS TENDENCIAS DE LA GRAFICA NOS INDICAN LA PRESENCIA DE TRES ESTRATOS.

B. SOLUCION PARA LOS ESTRATOS SUPERFICIALES:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1, & \rho_a &= 4283 \\ m &= 4, & & \\ m\alpha &= 4, & \rho_{ma} &= 5344 \end{aligned} \quad \therefore \frac{\rho_{ma}}{\rho_a} = 1.25 = \frac{F_{ma}}{F_a} \quad (18)$$

$\rho_2 > \rho_1$ y K ES POSITIVO.

RESOLVIENDO LA ECUACION (18) PARA $n=1$ HASTA 6 PARA DIFERENTES VALORES DE h Y K SE OBTIENE:

$\frac{\rho_{ma}}{\rho_a}$	h	K
1.25	0.50	0.254
1.25	0.75	0.197
1.25	1.00	0.183
1.25	1.25	0.186
1.25	1.50	0.198

DATOS PARA LA CURVA (18)

$$\begin{aligned} a=1 & , \quad \rho_a = 4283 \\ m=6 & \\ ma=6 & , \quad \rho_{ma} = 5568 \end{aligned}$$

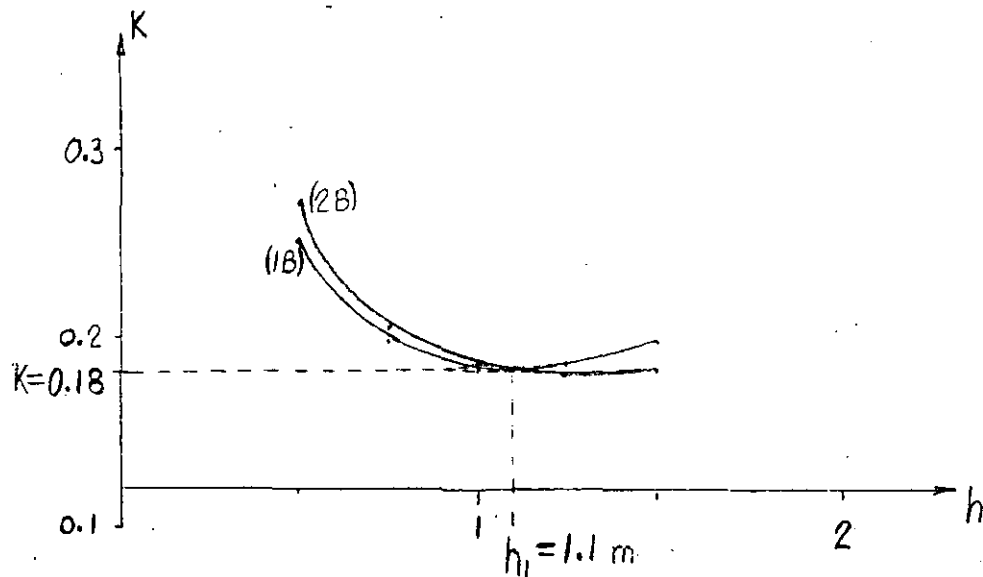
$$\therefore \frac{\rho_{ma}}{\rho_a} = 1.30 = \frac{F_{ma}}{F_a} \quad (2B)$$

$\rho_2 > \rho_1$ y K ES POSITIVO

RESOLVIENDO LA ECUACION (2B) PARA $n=1$ HASTA 6 PARA DIFERENTES VALORES DE h Y K SE OBTIENE:

$\frac{\rho_{ma}}{\rho_a}$	h	K
1.30	0.50	0.273
1.30	0.75	0.205
1.30	1.00	0.185
1.30	1.25	0.180
1.30	1.50	0.183

} DATOS PARA LA CURVA (2B)

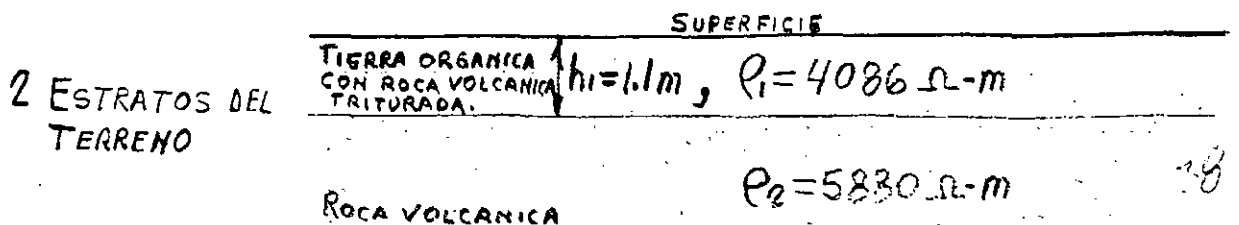


SUBSTITUYENDO EN LA ECUACION F_a :

$K=0.18$, $h=1.1$ y $\rho_a=4283$ CON $n=1$ HASTA 6

SE OBTIENE $\rho_1 = 4086 \text{ ohm-m}$.

$$K = 0.18 = \frac{\rho_2 - 4086}{\rho_2 + 4086} \quad \therefore \rho_2 = 5880 \text{ ohm-m}$$



C. SOLUCION PARA EL TERCER ESTRATO PROFUNDO.

$$a = 8, \quad p_a = 5481, \quad \frac{p_{ma}}{p_a} = 0.69 = \frac{F_{ma}}{F_a} \quad (1C)$$

$$m = 5, \quad p_{ma} = 3768$$

$$mq = 40$$

$p_3 < p_{12}$ y K ES NEGATIVO

RESOLVIENDO LA ECUACION (1C) PARA $n=1$ HASTA 6 PARA DIFERENTES VALORES DE h Y K SE OBTIENE:

$\frac{p_{ma}}{p_a}$	h	K
0.69	10	-0.25
0.69	20	-0.35
0.69	30	-0.58
0.69	35	-0.75
0.69	40	-0.98

} DATOS PARA LA CURVA (1C)

$$a = 8, \quad p_a = 5481, \quad \therefore \frac{p_{ma}}{p_a} = 0.63 = \frac{F_{ma}}{F_a} \quad (2C)$$

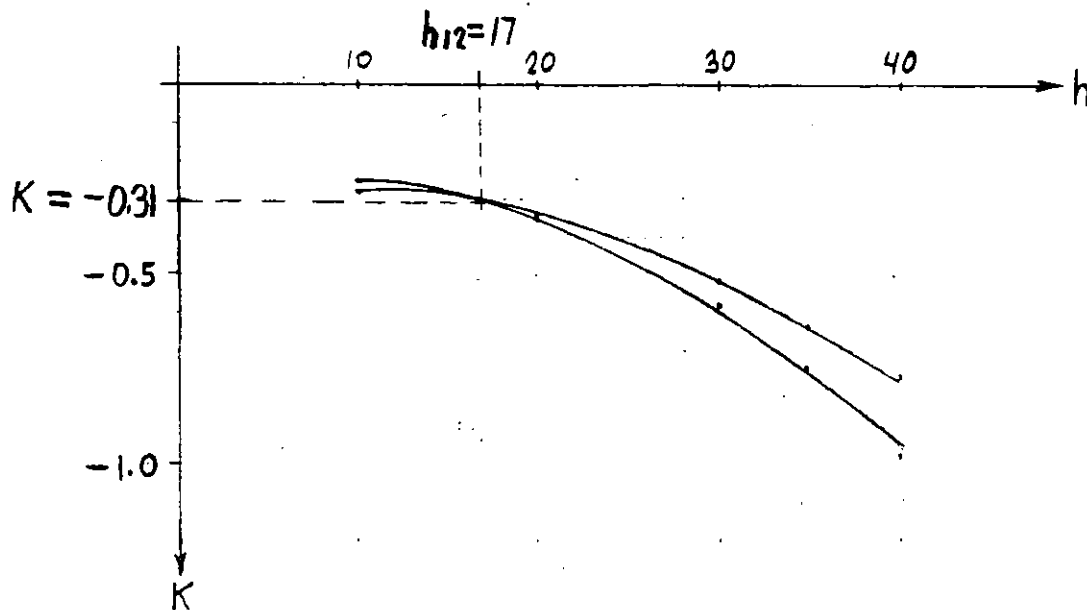
$$m = 6.25, \quad p_{ma} = 3455$$

$$mq = 50$$

RESOLVIENDO LA ECUACION (2C) PARA $n=1$ HASTA 6 PARA DIFERENTES VALORES DE h Y K SE OBTIENE:

$\frac{p_{ma}}{p_a}$	h	K
0.63	10	-0.28
0.63	20	-0.34
0.63	30	-0.51
0.63	35	-0.64
0.63	40	-0.78

} DATOS PARA LA CURVA (2C)



SUBSTITUYENDO EN LA ECUACION Fa:

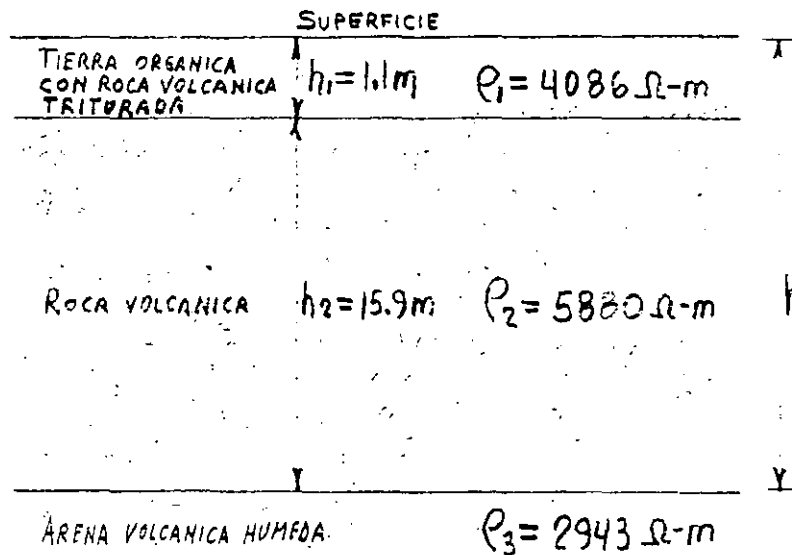
$K = -0.31$, $h = 17$ y $\rho_a = 5481$ CON $n = 1$ HASTA 6

SE OBTIENE $\rho_{12} = 5588 \text{ ohm-m}$.

$$K = -0.31 = \frac{\rho_3 - \rho_{12}}{\rho_3 + \rho_{12}} = \frac{\rho_3 - 5588}{\rho_3 + 5588}$$

$$\therefore \rho_3 = 2943 \text{ ohm-m}$$

3 ESTRATOS DEL
TERRENO



$$\rho_{12} = 5588 \Omega\text{-m}$$

$$h_{12} = 17 \text{ m}$$

TRATAMIENTO DEL TERRENO

I - SALES MINERALES

CLORURO DE SODIO

SULFATO DE MAGNESIO

SULFATO DE COBRE

II - MINERALES

CARBON

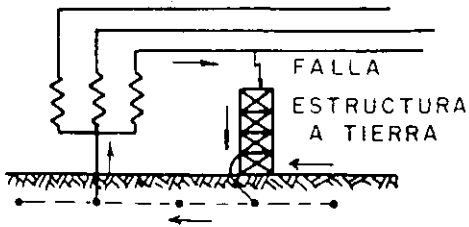
GRAFITO EN POLVO

III - PRODUCTOS COMERCIALES

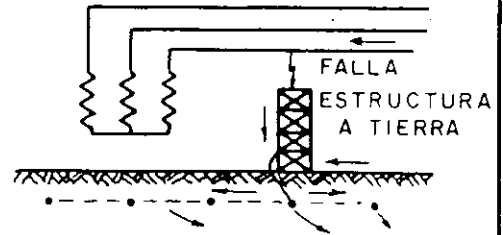
BENTONITA

SOLUCIONES PRECIPITABLES

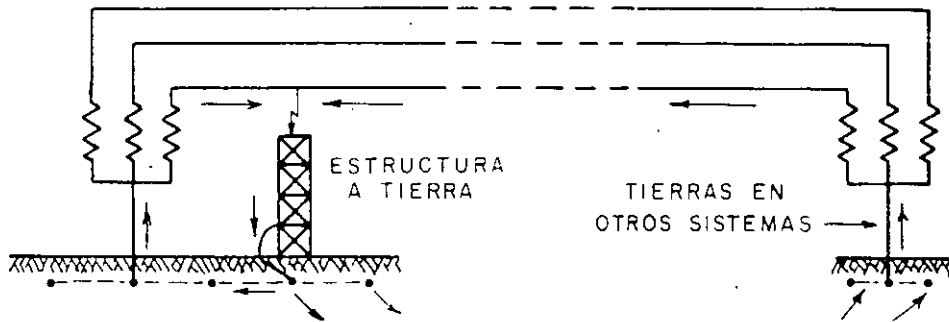
MASAS GELATINOSAS



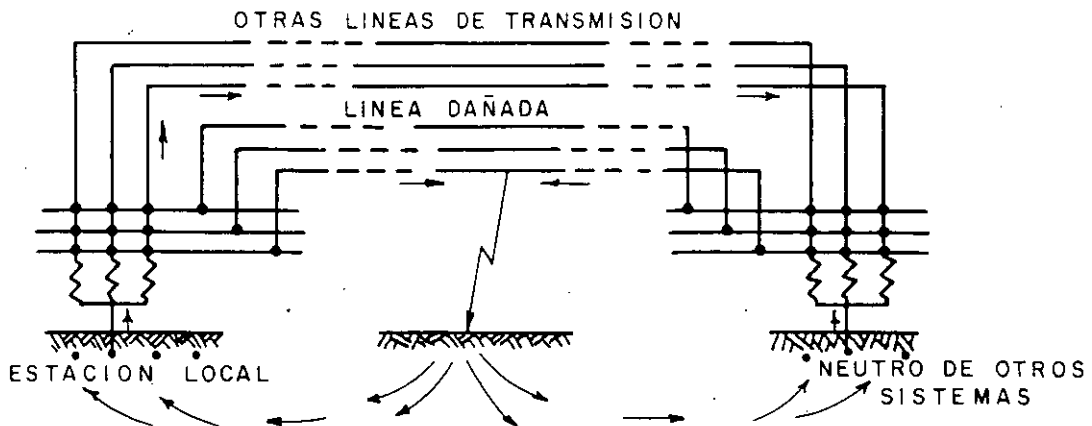
CASO 1. _ FALLA DENTRO DEL LOCAL DE LA ESTACION. SISTEMA DE TIERRAS LOCAL SOLAMENTE. LA CORRIENTE DE FALLA SIGUE EL CAMINO METALICO SUMINISTRADO POR LA RED DE TIERRAS. NINGUNA CORRIENTE APRECIABLE FLUYE EN LA TIERRA.



CASO 2. _ FALLA EN EL LOCAL DE LA ESTACION. NEUTRO CONECTADO A TIERRA SOLO EN PUNTO REMOTO. LA CORRIENTE TOTAL DE FALLA FLUYE DE LA RED DE TIERRAS HACIA LA TIERRA.



CASO 3. _ FALLA EN LA ESTACION. SISTEMA CONECTADO A TIERRA TANTO EN LA ESTACION COMO EN OTROS PUNTOS. LA CORRIENTE DE FALLA REGRESA AL NEUTRO LOCAL A TRAVES DE LA RED DE TIERRAS Y A LOS NEUTROS REMOTOS A TRAVES DE LA TIERRA. ESTA ES LA COMPONENTE QUE IMPERA EN EL ESTUDIO DE TENSIONES, PELIGROSAS.



CASO 4. _ FALLA EN LA LINEA FUERA DE LA ESTACION. SISTEMA A TIERRA LOCALMENTE Y EN OTROS PUNTOS. PARTE DE LA CORRIENTE REGRESA DE LA TIERRA AL SISTEMA DE TIERRAS LOCAL Y DETERMINA EL AUMENTO DE POTENCIAL Y GRADIENTES ALLI. _ FIG 6. _ CASOS 1, 2 Y 3 MUESTRAN FALLAS DENTRO DEL LOCAL DE LA ESTACION. EL CASO 4 MUESTRA UNA FALLA EXTERNA, EN LA LINEA.

FIG. 7

ANALISIS DE LAS CORRIENTES DE CORTO CIRCUITO

SISTEMA

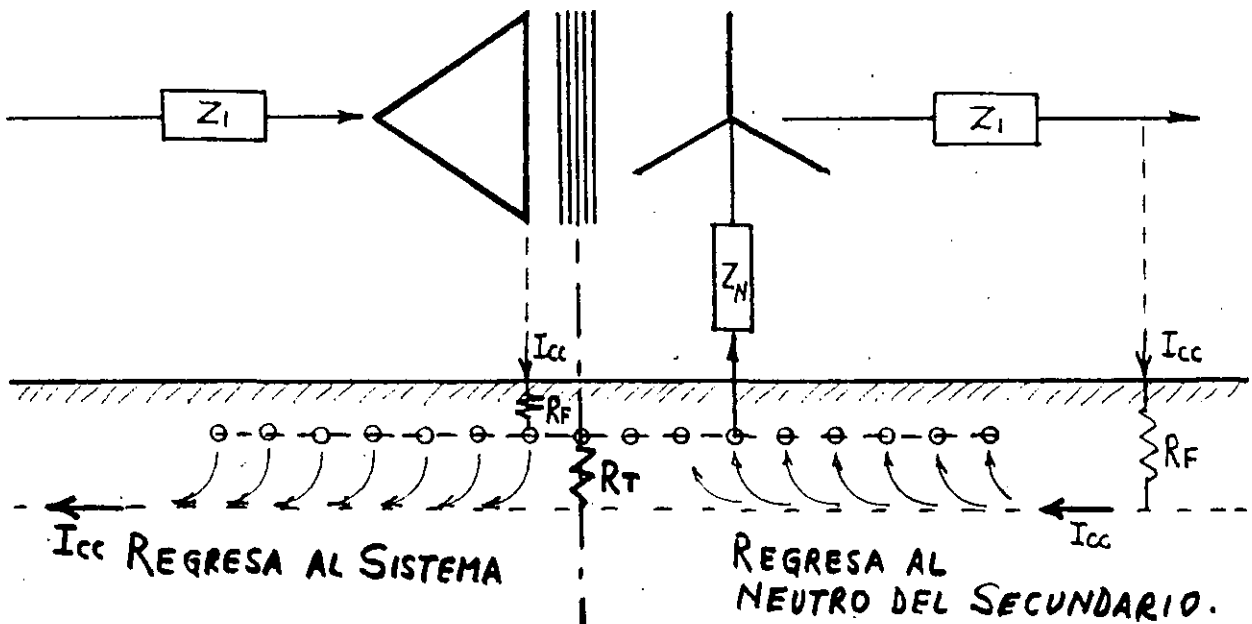
$$0 \leq \frac{X_0}{X_1} \leq 3; \quad 0 \leq \frac{R_0}{X_1} \leq 1$$

$$Z_1 = \frac{KV_{LL}^2}{MVA_{cc}} \approx Z_2$$

CARGA

$$I_{cc} = 1000 \frac{KV_{LL}}{\sqrt{3} Z_1}$$

$$I_{cc} = \frac{3E}{X_1 + X_2 + X_0 + 3(R_F + R_T + Z_N)}$$



ELEMENTOS DE LA MALLA DE TIERRA

CONDUCTORES

- SE UTILIZA EL CU POR SU BUENA CONDUCTIVIDAD Y RESISTENCIA A LA CORRUSION.
- POR RAZONES MECANICAS EL CALIBRE MINIMO EMPLEADO ES DE 4/0.
- ES RECOMENDABLE SOLDAR TODOS LOS MODOS CON EL SISTEMA "CADWELD".

ELECTRODOS

- EN TERRENOS CON BAJA ACTIVIDAD QUIMICA SE PUEDEN USAR TRAMOS DE 3 M DE TUBO GALVANIZADO DE $\frac{1}{2}$ O $\frac{3}{4}$ " DE DIAMETRO.
- EN TERRENOS CORROSIVOS SE DEBEN USAR VARILLAS DE "COPPERWELD".

CONECTORES Y ACCESORIOS.

- ATORNILLADOS
- PRENSADOS
- SOLDADOS

CALCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR

- PREVER QUE LOS CONDUCTORES NO SE FUNDAN Y LAS UNIONES ELECTRICAS NO SE DETERIOREN CON LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO
- TENER RESISTENCIA MECANICA (MINIMO 4/0 AWG)
- TENER ALTA CONDUCTIVIDAD (COBRE)

ECUACION DE ONDERDONK

$$I_G = S \sqrt{\frac{\text{LOG}_{10} \left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33 T_G}}$$

I_G - CORRIENTE QUE CIRCULA POR LA RED DE TIERRAS. (AMP)

T_G - TIEMPO DE DURACION DE LA FALLA (SEG.)

S - SECCION MINIMA DEL CONDUCTOR (CIRCULAR-MILLS)

T_a - TEMPERATURA AMBIENTE (40°C)

T_m - TEMPERATURA PERMISIBLE EN LA RED, SIN DETERIORO:

(CABLE - 1083°C , JUNTAS SOLDADAS - 450°C)

JUNTAS ATORNILLADAS - 250°C)

$$S = (\text{CM/A}) I_G$$

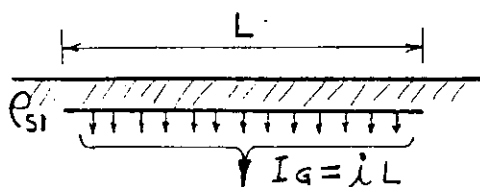
T_G (SEG)	CM/A		
	CABLE (CU)	TIPO DE CONEXION	
		SOLDADA	ATORNILLADA
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

DISEÑO PRELIMINAR DE LA RED DE TIERRAS

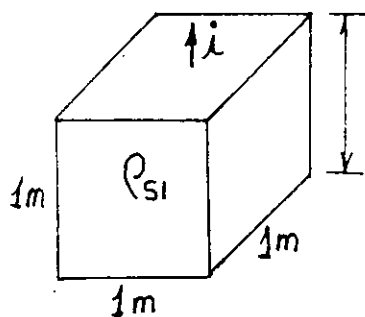
+ LAYOUT.

+ DEFINIR AREA Y RODEARLA CON UN CONDUCTOR.

+ TRAZAR LA MALLA DE TAL MANERA QUE TODOS LOS NEUTROS, EQUIPOS, APARATOS, GABINETES, ESTRUCTURAS ETC. TENGAN UNA CONEXION CORTA.



i - amp/m DE MALLA.



$$V_{MALLA} = \rho_{si} i_m = K_m K_i \rho_{si} \frac{I_G}{L}$$

K_m - COEFICIENTE QUE TOMA EN CUENTA LOS PARAMETROS DE DISEÑO DE LA RED Y SU PORCION ACTIVA ($n-2$)

K_i - FACTOR DE CORRECCION QUE TOMA EN CUENTA LA DISTRIBUCION IRREGULAR DE LA CORRIENTE ($K_i \approx 0.65 + 0.172n$)

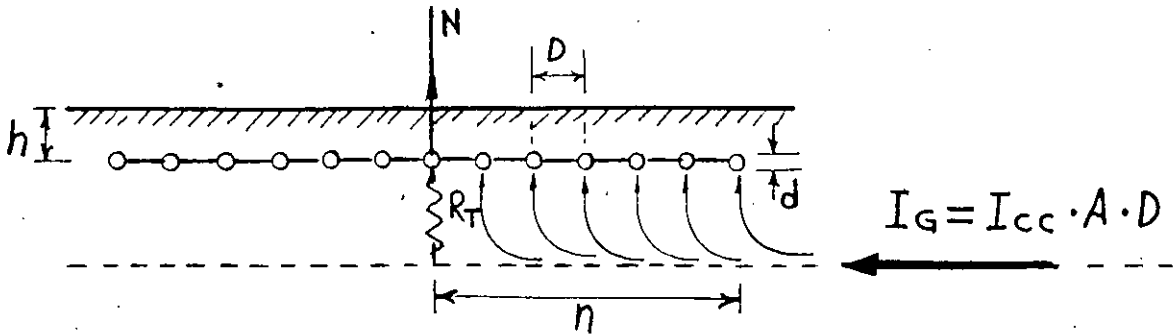
IGUALANDO $V_{MALLA} = V_{CONTACTO}$

$$K_m K_i \rho_{si} \frac{I_G}{L} = \frac{116 + 0.17 \rho_{s2}}{\sqrt{T}}$$

$$L = \frac{K_m K_i \rho_{si} I_G \sqrt{T}}{116 + 0.17 \rho_{s2}}$$

$L \geq$ LONGITUD REAL DE LOS CONDUCTORES ENTERRADOS, TRANSVERSALES LONGITUDINALES Y VARILLAS DE TIERRA. (m).

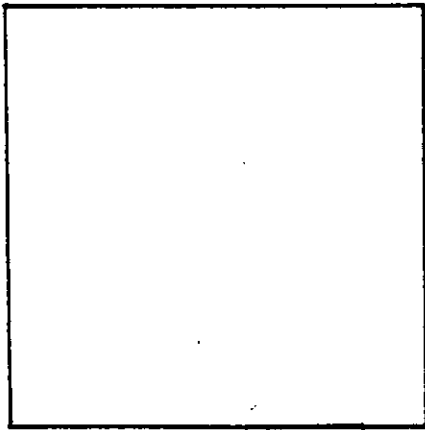
COEFICIENTE K_m



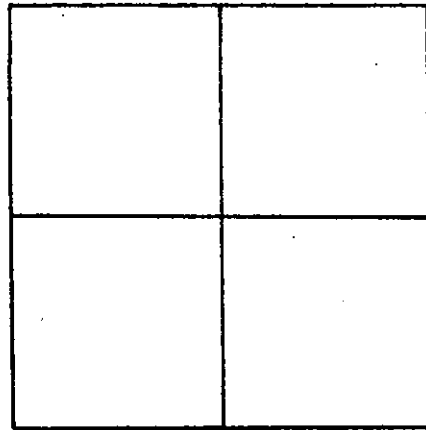
(n-2) TERMINOS

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left(\frac{3}{4} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdot \frac{9}{10} \cdot \frac{11}{12} \cdot \frac{13}{14} \dots \right)$$

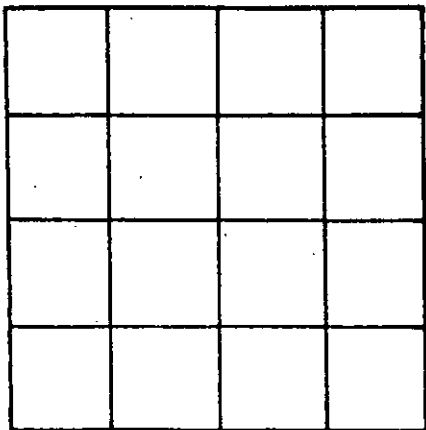
COEFICIENTE $K_i \approx 0.65 + 0.172n$



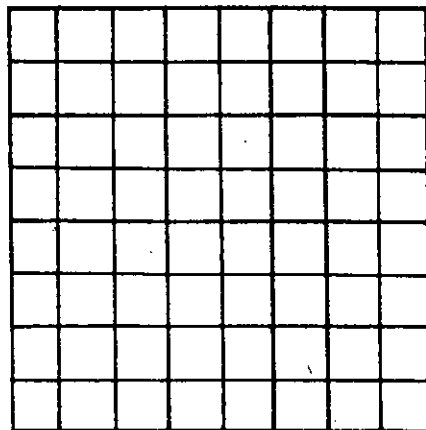
$n=2$
 $\leftarrow I_G$
 $K_i=1$



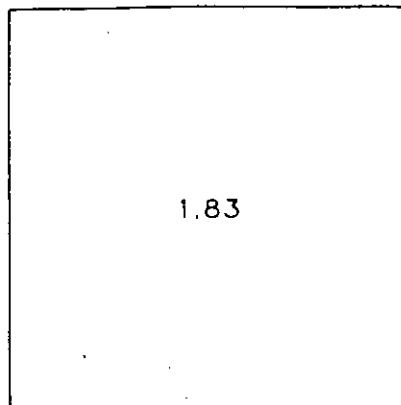
$n=3$
 $\leftarrow I_G$
 $K_i=1.16$



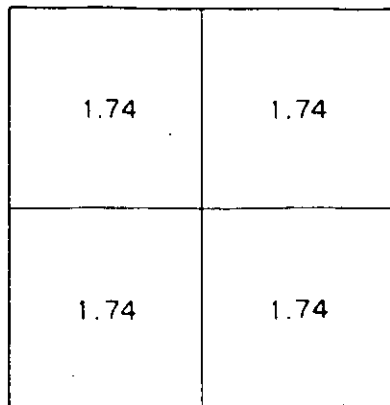
$n=5$
 $\leftarrow I_G$
 $K_i=1.47$



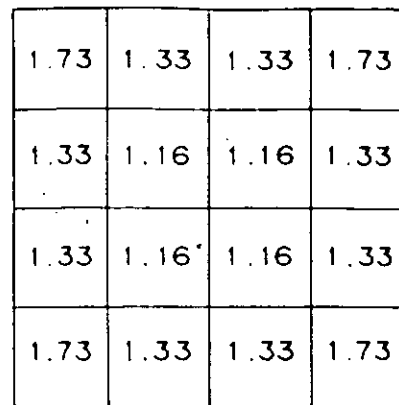
$n=9$
 $\leftarrow I_G$
 $K_i=2.21$



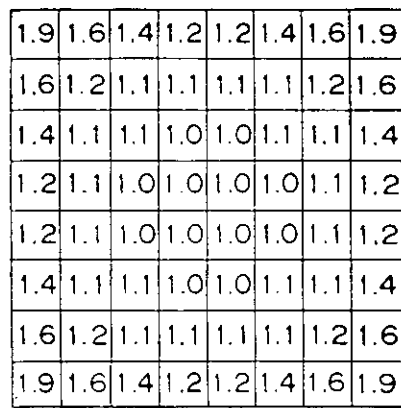
MALLA A



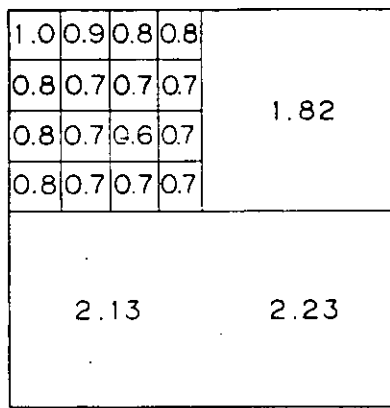
MALLA B



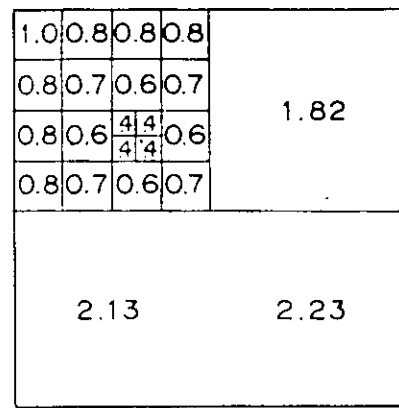
MALLA C



MALLA D



MALLA E



MALLA F

LAS CIFRAS EN LOS DIAGRAMAS SON LOS PRODUCTOS DE LOS COEFICIENTES $K_m \times K_i$ DETERMINADOS DE DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR KOCH.

MALLA	A	B	C	D	E	F
VALOR MAXIMO DE $K_m \times K_i$	1.83	1.74	1.73	1.90	2.23	2.23
COEFICIENTE K_M CALCULADO POR EL METODO DESCRITO.	1.82	1.50	1.18	0.85	1.50	1.50
COEF. $K_i = \frac{K_M \times K_i}{K_M}$	1.00	1.16	1.47	2.21	1.49	1.49

NOTESE QUE LOS VALORES DE K_i PARA LAS MALLAS A, B, C y D PUEDEN CALCULARSE MUY APROXIMADAMENTE POR $K_i = 0.650 + 0.172n$ EN DONDE n ES EL NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS EN UNA DIRECCION.

FIG. 9. - DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES K_m y K_i DE LA ECUACION:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \rho \frac{I}{L}$$

FIG. 9

CALCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED DE TIERRAS.

$$R_T = \frac{\rho_{s1}}{4\sqrt{\frac{A}{\pi}}} + \frac{\rho_{s1}}{L_R}$$

ELEVACION MAXIMA DE POTENCIAL DE LA RED CON RESPECTO A UNA TIERRA REMOTA.

$$E_{MAX} = R_T \cdot I_G \quad \left[\text{REPRESENTA TAMBIEN LA TENSION MAXIMA DE TRANSFERENCIA} \right]$$

TENSION DE PASO EN EL PISO ADYACENTE A LA RED

$$E_s = K_s \cdot K_i \rho_{s1} \frac{I_G}{L_R}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \frac{1}{4D} + \dots \right) \quad n\text{-TERMINOS}$$

$$E_s < V_s = \frac{116 + 0.7 \rho_{s2}}{\sqrt{T}}$$

SI NO SE CUMPLE LA CONDICION SE RECOMIENDA:

- RODEAR LA PERIFERIA CON UN CONDUCTOR EXTRA.
- AGREGAR UNA \dagger EN LAS ESQUINAS SALIENTES DE LA RED.
- CUBRIR LA SUPERFICIE DE LA PERIFERIA CON GRAVA.
- RECALCULAR.

INVESTIGACION DE LOS POTENCIALES DE TRANSFERENCIA.

CIRCUITOS DE COMUNICACION

VARISTORES.

TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO.

RIELES

ATERRIZAMIENTO EN VARIOS PUNTOS.

JUNTAS AISLADAS.

TRAMOS REMOVIBLES.

PLACAS DE TIERRA.

CIRCUITOS AUXILIARES.

NEUTRO AISLADO (TRATADO COMO VIVO).

TRANSFORMADORES DE AISLAMIENTO.

TRANSFORMADOR PARA SERVICIOS DE ESTACION.

TUBERIAS

ATERRIZAMIENTO EN VARIOS PUNTOS.

INSERTAR SECCIONES AISLADAS.

EDIFICIOS AUXILIARES

CERCANOS, SE USA LA MISMA RED.

ALEJADOS, SE USA UNA RED INDEPENDIENTE.

ZONAS PELIGROSAS.

PALANCAS y MANIJAS DE OPERACION.

AGREGAR + EN EL SITIO DEL OPERADOR
PLACAS DE TIERRA
GRAVA EN LA SUPERFICIE.

CERCAS

SI $E_s < V_s$ LA CERCA SE PUEDE CONECTAR
A LA RED DE TIERRAS EN VARIOS PUNTOS

EN CASO CONTRARIO LA CERCA DEBE QUEDAR
FUERA DEL PERIMETRO DE LA RED Y SIN CONEXION.

CONDUITS

AISLADOS y ATERRIZADOS EN UN PUNTO (TRAMOS CORTOS)
JUNTAS AISLADAS (TRAMOS LARGOS).

APARTARRAYOS

BAJADAS DE CABLE 4/0 AWG AISLADAS

SECUENCIA DE CALCULO DE REDES DE TIERRA

SECUENCIA

EJEMPLO

CALCULAR
CORRIENTE MAXIMA
DE FALLA A TIERRA

$I_G = 42426 \text{ A EN AT}$

$I = 122893 \text{ A EN BT}$

DETERMINAR
CALIBRE MINIMO DE CON-
DUCTORES PARA EVITAR FU-
SION (TABLA DE ONDERDONK)

$S = 798802 \text{ CM}$

$\therefore S = 1000 \text{ MCM}$

NO ANTECEDENTES SI

ρ_s

MEDIR R CON
ELECTRODOS

UTILIZAR ρ_s
CONOCIDO

$\rho_{s1} = 60 \text{ ohms-m}$

$\rho_{s2} = 1000 \text{ ohms-m}$

CALCULAR ρ_s
CON FORMULA
DE WENNER

USANDO EXPERIENCIAS ANTERIORES
TRAZAR EL ESQUEMA PRELIMINAR
DE LA RED DE TIERRAS.
Y DETERMINAR SU LONGITUD L_R

$L_R = 2000 \text{ m}$

CALCULAR LA LONGITUD
MINIMA DE LA RED.

$K_m = 0.4919$

$K_j = 2.21$

$$L = \frac{K_m K_j \rho_{s1} I_{cc}^2 t}{116 + 0.17 \rho_{s2}}$$

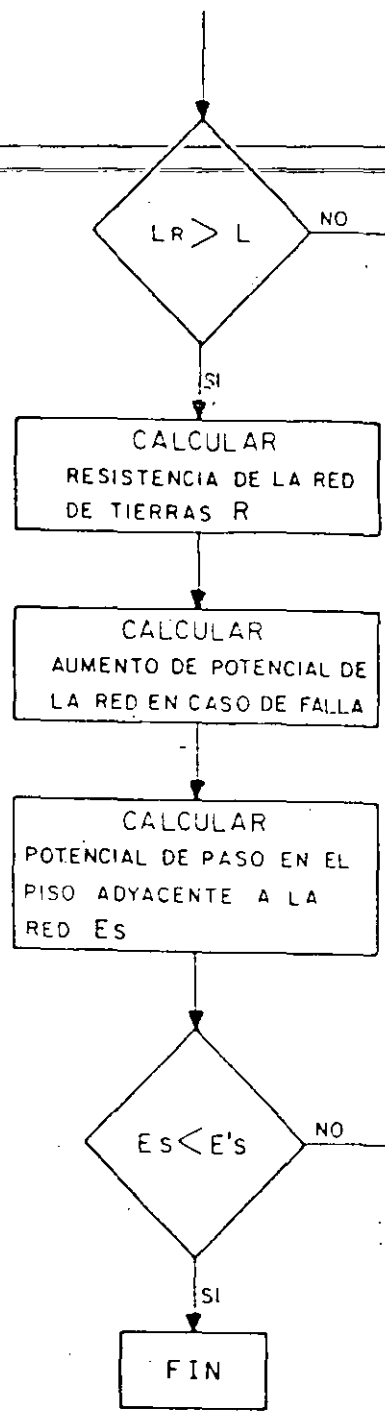
$I_{cc} = I_G \times A \times D$

$A = 1$

$D = 1$

$t = 0.5 \text{ seg.}$

$L = 1981 \text{ m.}$



R = 0.0397 ohms

E = 4878 volts

Ks = 0.412
Es = 336 volts
E's = 1153 volts

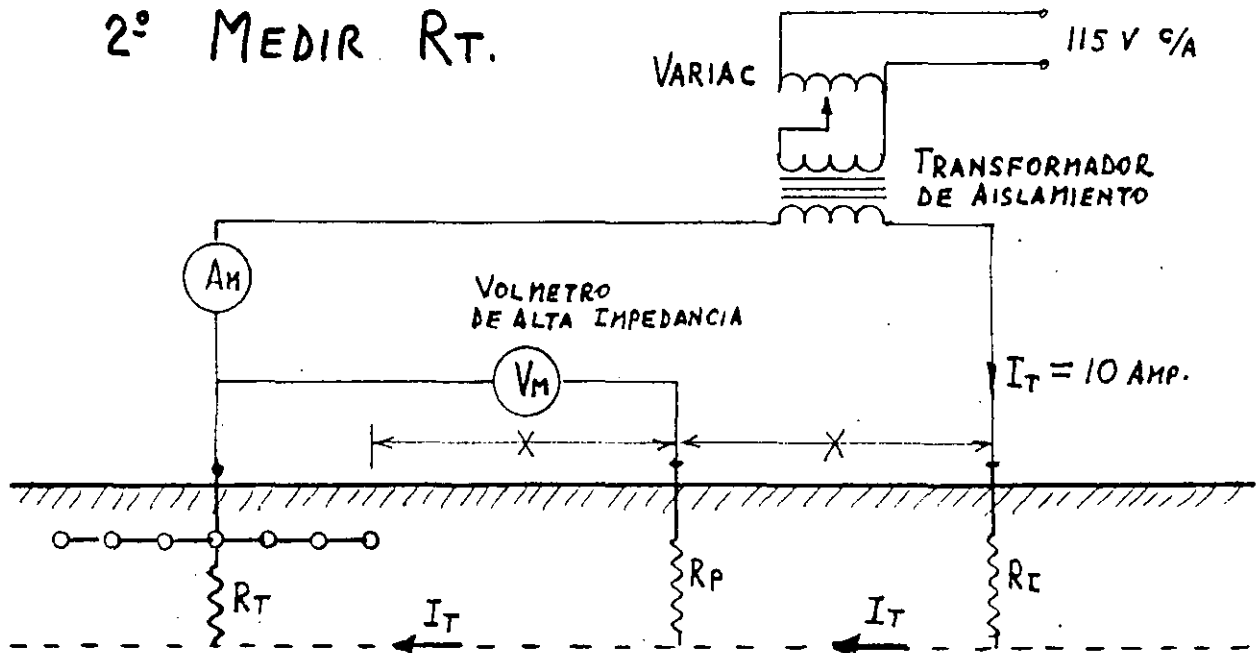
LA RED DE TIERRAS ESTIMADA ES ADECUADA.

MEDICION DE LAS REDES DE TIERRAS

METODO DE LA CAIDA DE TENSION

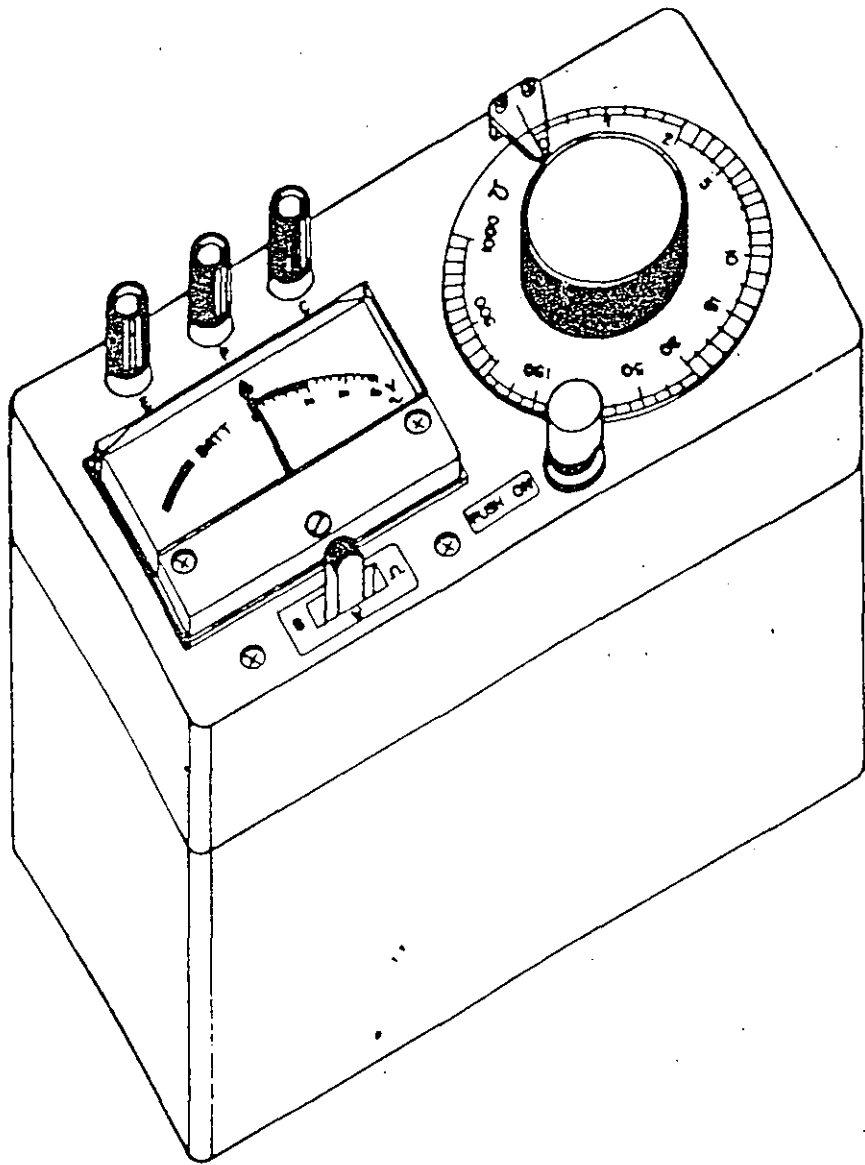
1º MEDIR CONTINUIDAD DE LA MALLA. DE REGISTRO A REGISTRO.

2º MEDIR R_T .



$$R_T = \frac{V_M}{I_T}$$

X-DE 10 A 20 m.



PROBADOR DE RESISTENCIA DE TIERRA MARCA MEU
TIPO 3235

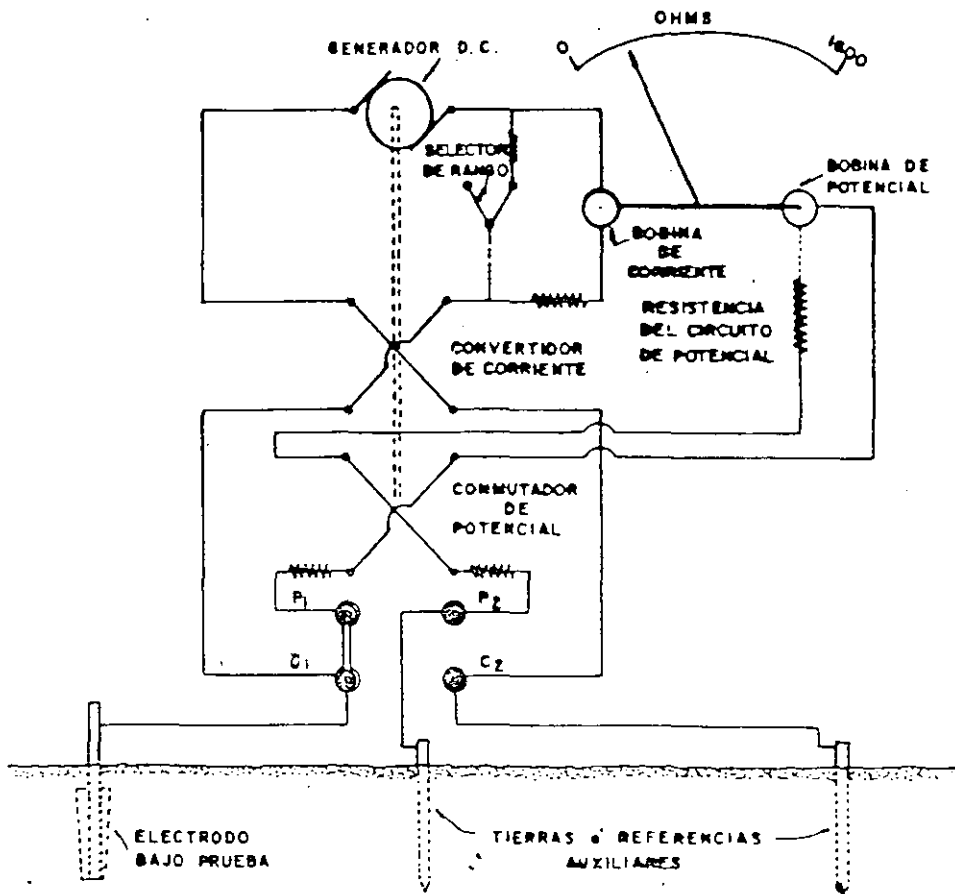


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL MEDIDOR DE RESISTENCIA DE TIERRA MARCA MEGGER

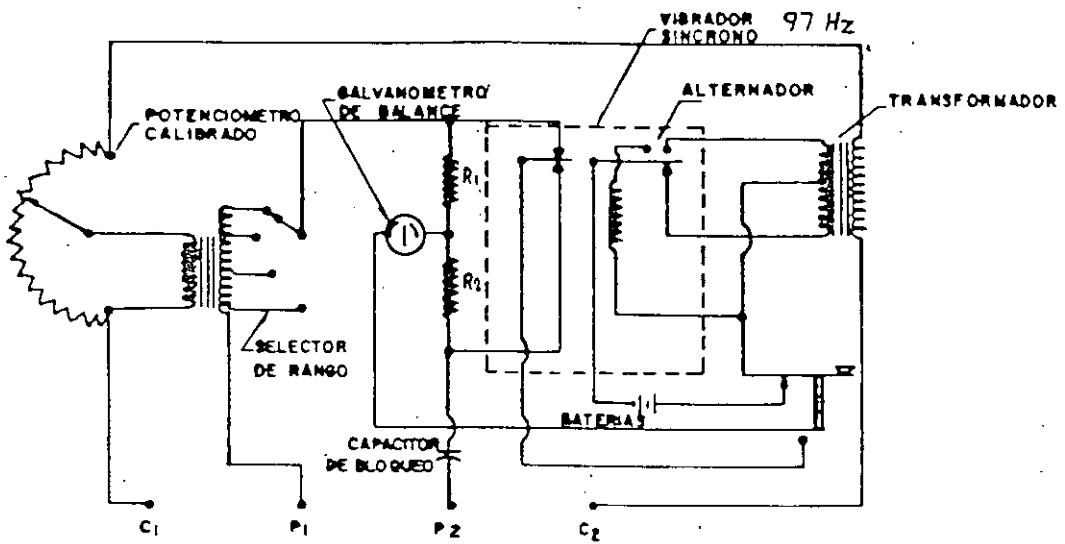
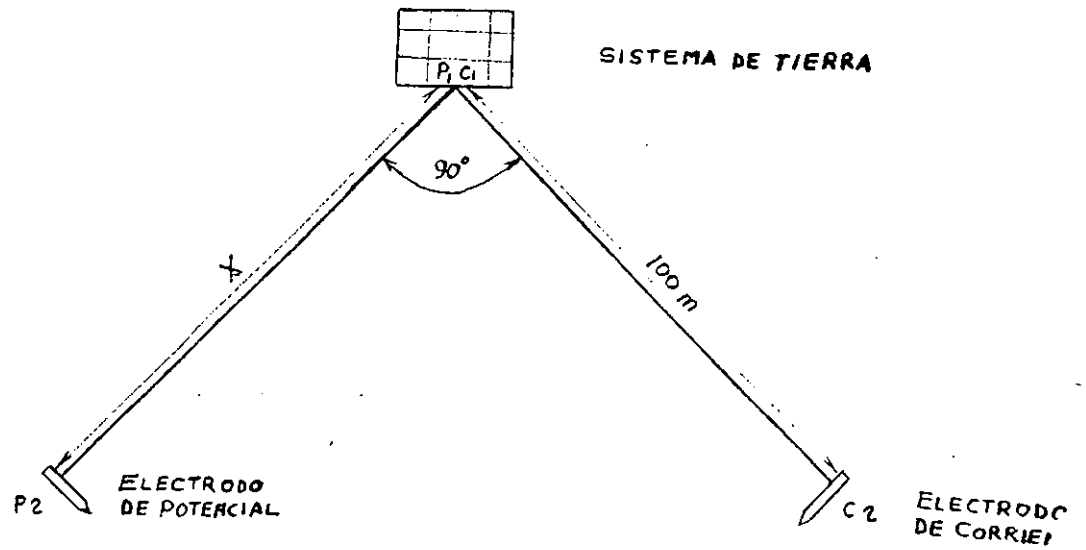


DIAGRAMA ESQUEMATICO DEL VIBROGROUND

MEDICION DE SISTEMAS DE TIERRA.



$X = 10, 20, 30, \dots, 100 \text{ m}$

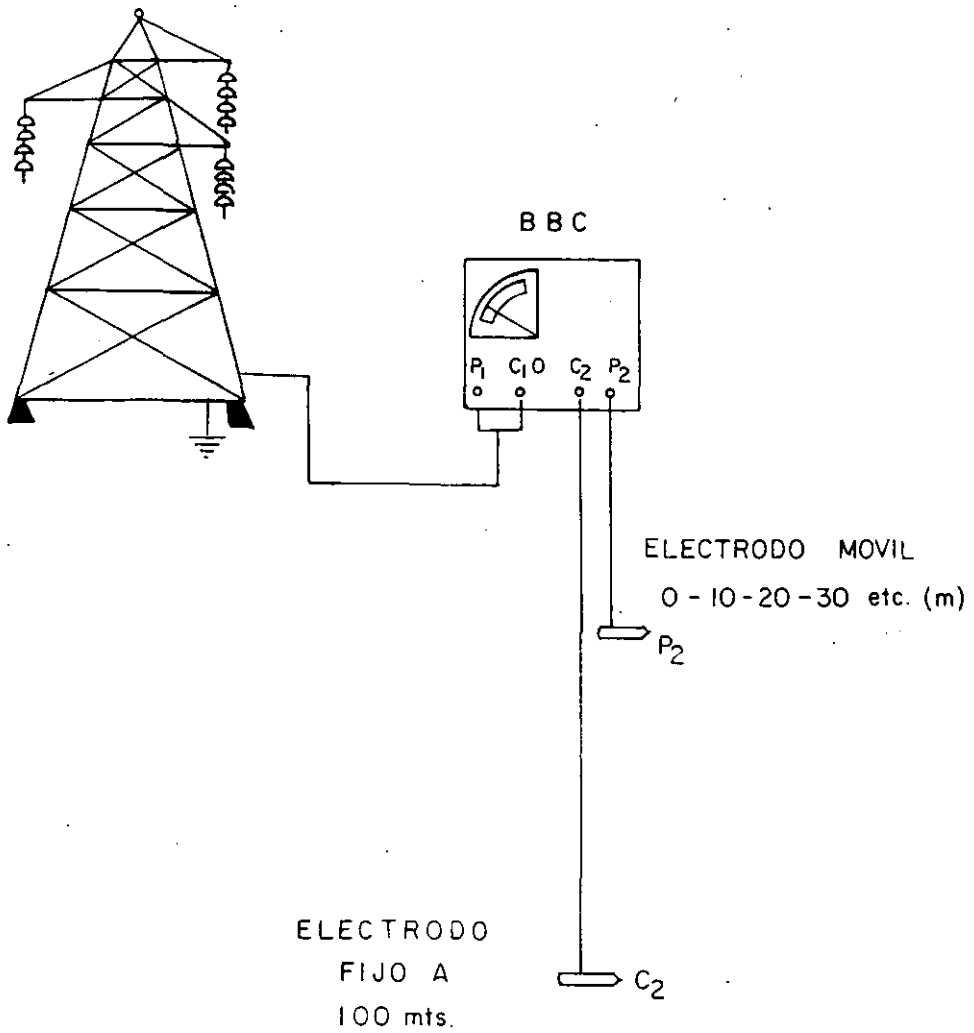


FIG. No. 5

59



0 - 0

m	R
10	5.5
20	6.5
30	7.2
40	7.2
45	8.0
50	7.0
55	5.0
60	7.2
70	7.5
80	11.0
90	12.5
100	20.0

R = 7.2 Ω

GRAFICA DE RESISTENCIA A TIERRA DE LA BASE DE UNA TORRE DE TRANSMISION DE 69 KV, SIN HILO DE GUARDA.

MEDICION DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA

DE TIERRA DE LA S. E. TESISTAN

S. E. ENERGIZADA - MAYO 1980 -

= VER GRAFICA No. 3 =

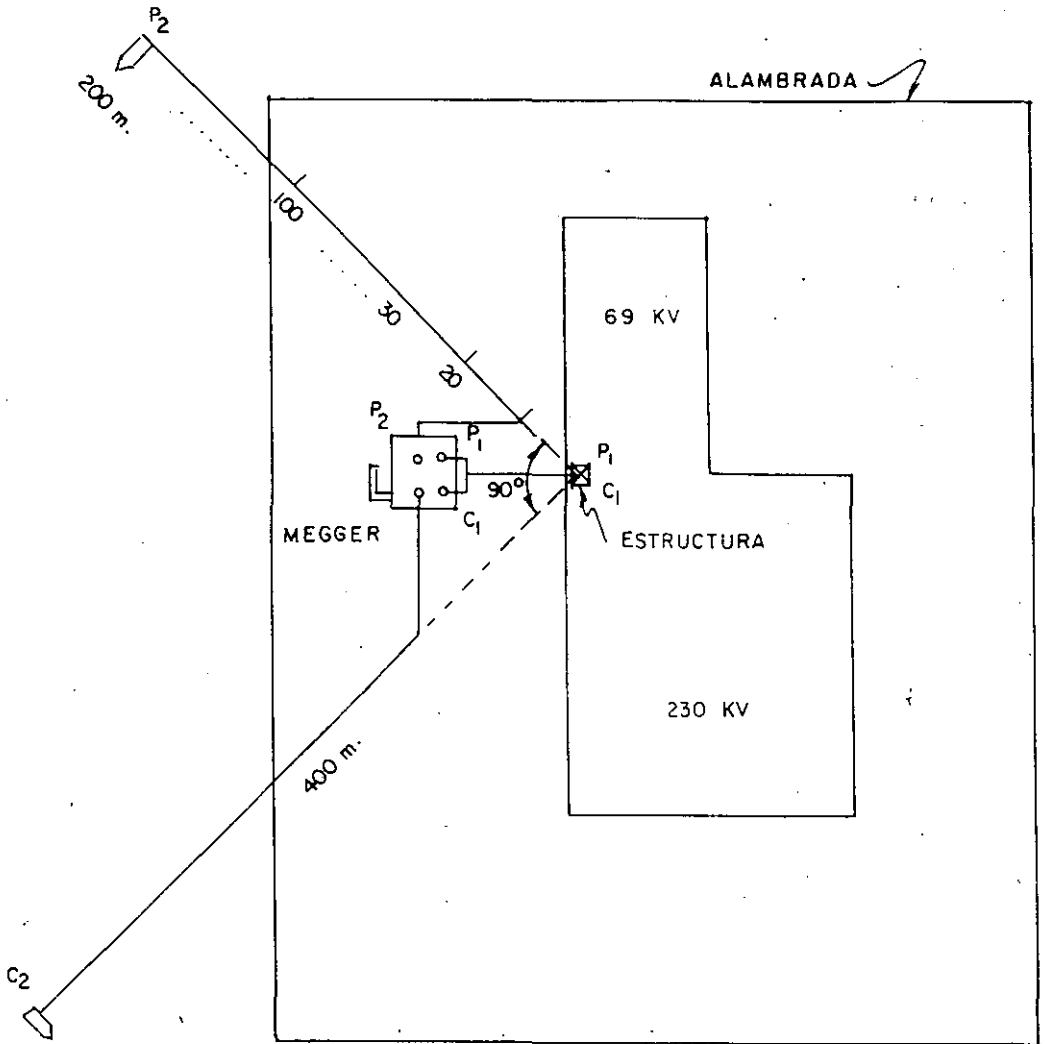
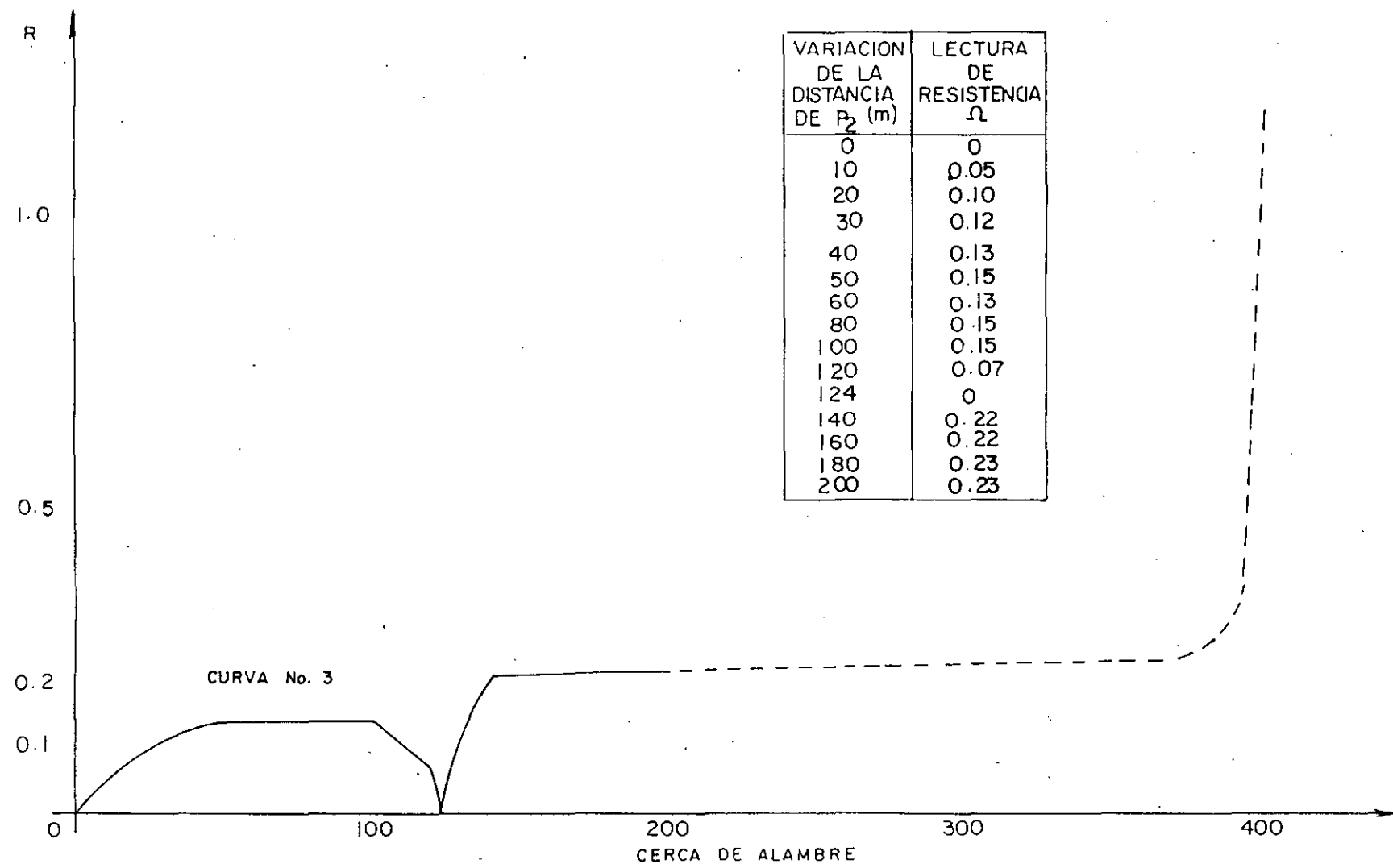


FIG. No. 2



VARIACION DE LA DISTANCIA DE P ₂ (m)	LECTURA DE RESISTENCIA Ω
0	0
10	0.05
20	0.10
30	0.12
40	0.13
50	0.15
60	0.13
80	0.15
100	0.15
120	0.07
124	0
140	0.22
160	0.22
180	0.23
200	0.23

MEDICION DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA S. E. TESISTAN

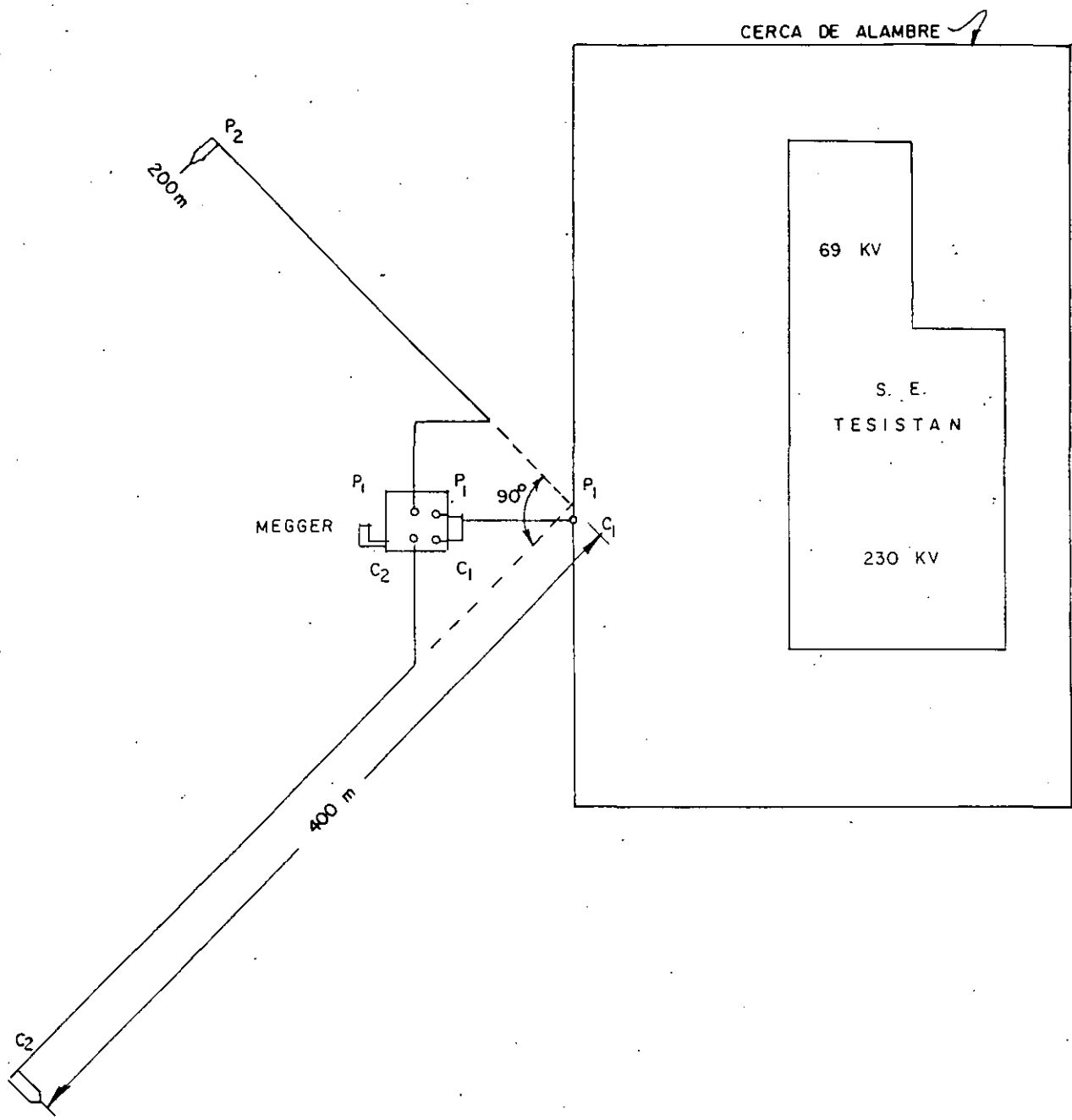
GRAFICA No. 3

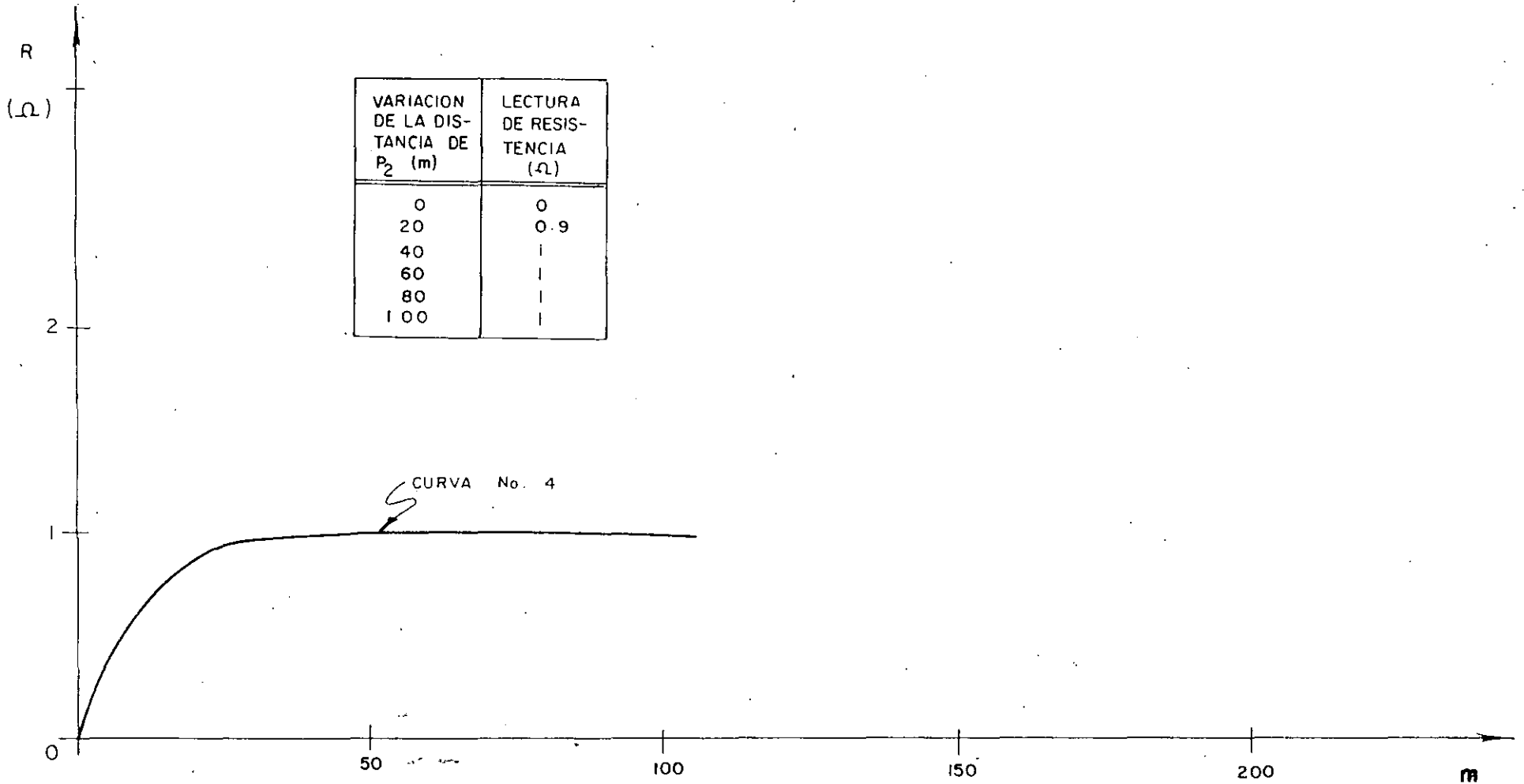
MEDICION DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA

DE TIERRAS DE LA S.E. TESISTAN

S.E. ENERGIZADA - MAYO 1980

= VER GRAFICA No. 4 =





MEDICION DE RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA S. E. TESISTAN
(PARTIENDO DE LA MALLA DE ALAMBRE)

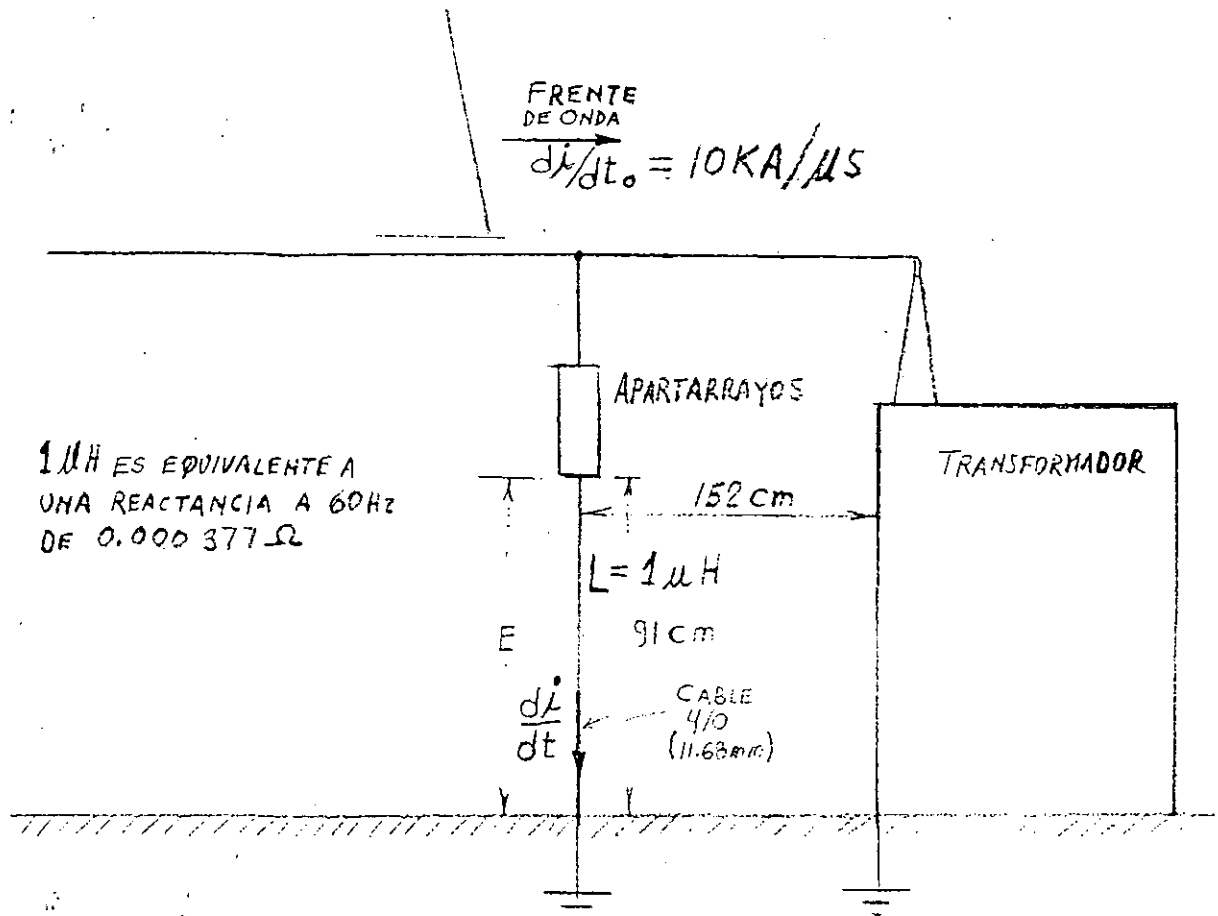
GRAFICA No. 4

BIBLIOGRAFIA

1. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN SUBSTATION GROUNDING.. IEEE STD. 80 - 1976.
2. IEEE RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING OF INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS. IEEE STD. 142-1972 "THE IEEE GREEN BOOK".
3. ELECTRICAL TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK. WESTINGHOUSE
4. INDUSTRIAL POWER SYSTEMS HANDBOOK. D.L. BEEMAN
5. SYMMETRICAL COMPONENTS. WAGNER AND EVANS.
6. DISEÑO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS. JOSE RAULL
7. NORMAS TECNICAS DEL REGLAMENTO DE OBRAS.

CONEXION A TIERRA

EQUIPOS DE PROTECCION CONTRA FRENTES DE ONDA

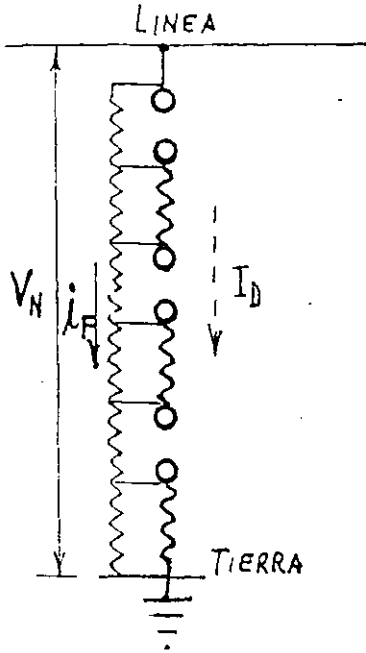


$$E = L \frac{di}{dt} = (1 \times 10^{-6}) \times (10,000 \times 10^6) = 10,000 \text{ V}$$

LA CAIDA DE TENSION EN LA BAJADA DEL APARTARRAYOS ES DE 10 KV Y SE AGREGA A LA TENSION DE DESCARGA DEL APARTARRAYOS.

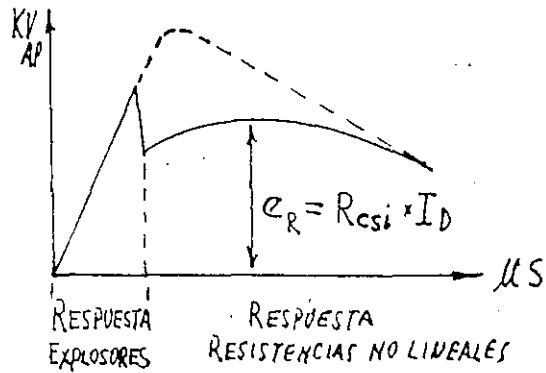
APARTARRAYOS

AUTOVALVULAR

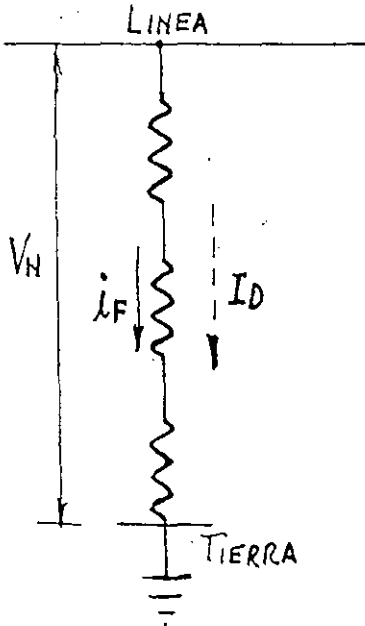


RESISTENCIAS NO LINEALES DE CARBURO DE SILICIO.

$$R_{csi} = \frac{K_{csi}}{V_N^X}$$

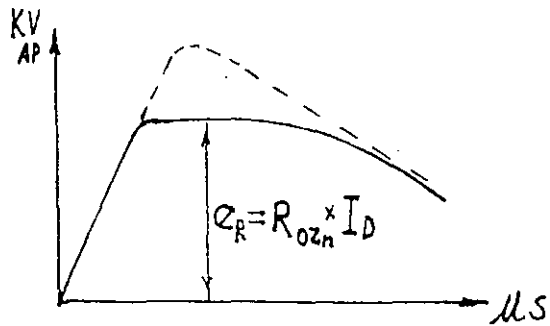


RESISTIVO (OZn)



RESISTENCIAS EXTREMADAMENTE NO LINEALES DE OZn.

$$R_{ozn} = \frac{K_{ozn}}{V_N^Y}$$



$$R_{AP} = \frac{KV_D}{KAD}$$

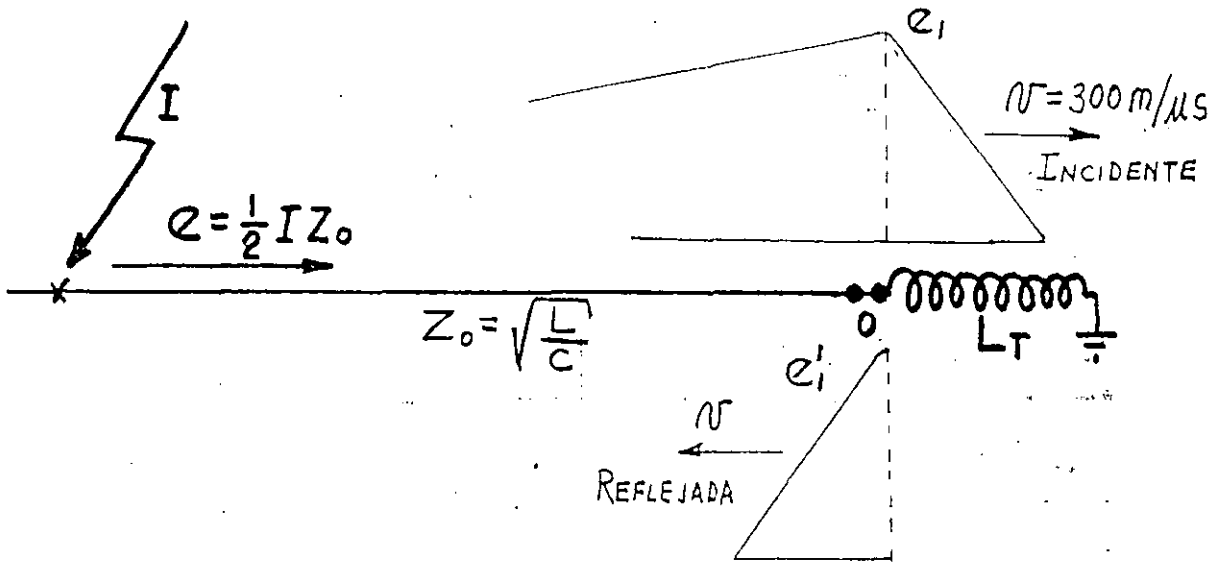
EN LOS TABLOS SIGUIENTES SE ADECUAN LOS CARACTERÍSTI-
CAS DE LOS EQUIPOS ELEMENTALES DE APARTARRAYOS PARA
CARGAS EMPROBADAS.

LÍNEA A TIE- RRA TENSION NOMINAL	MINIMO DESCAR- GA A 60 Hz	MAXIMO DESCAR- GA ONDA 250/2500	MAXIMA DESCAR- GA ONDA 1/2/50	MAXIMA DESCAR- GA FRENTE DE ONDA	TENSION MAXIMA DE DESCARGA PARA UNA CORRIEN- TE DE DESCARGA ONDA 8/20					
					1500 A	3000A	5000A	10000 A	20000 A	40000 A
KV RMS.	KV RMS	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA	KV CRESTA
36	66	104	96	125	83	90	96	105	113	126
39	72	113	104	130	90	98	104	114	123	137
48	90	141	130	155	112	122	130	142	153	168
* 60	108	169	160	190	137	150	160	174	189	210
72	132	206	195	230	167	184	195	212	230	252
90	160	242	228	271	206	226	240	262	283	315
96	175	257	257	294	222	242	258	280	304	336
108	195	294	266	332	244	264	282	316	333	378
120	220	323	304	370	275	301	320	350	378	420
132	240	356	323	408	300	328	350	380	410	462
144	260	389	357	437	324	350	375	408	440	504
168	305	451	428	513	386	423	450	490	530	588
180	330	484	447	556	405	440	470	510	552	630
192	350	523	475	580	430	470	500	545	588	672
240	435	646	608	711	550	602	640	695	755	840

* APARTARRAYOS SELECCIONADO EN EL EJEMPLO

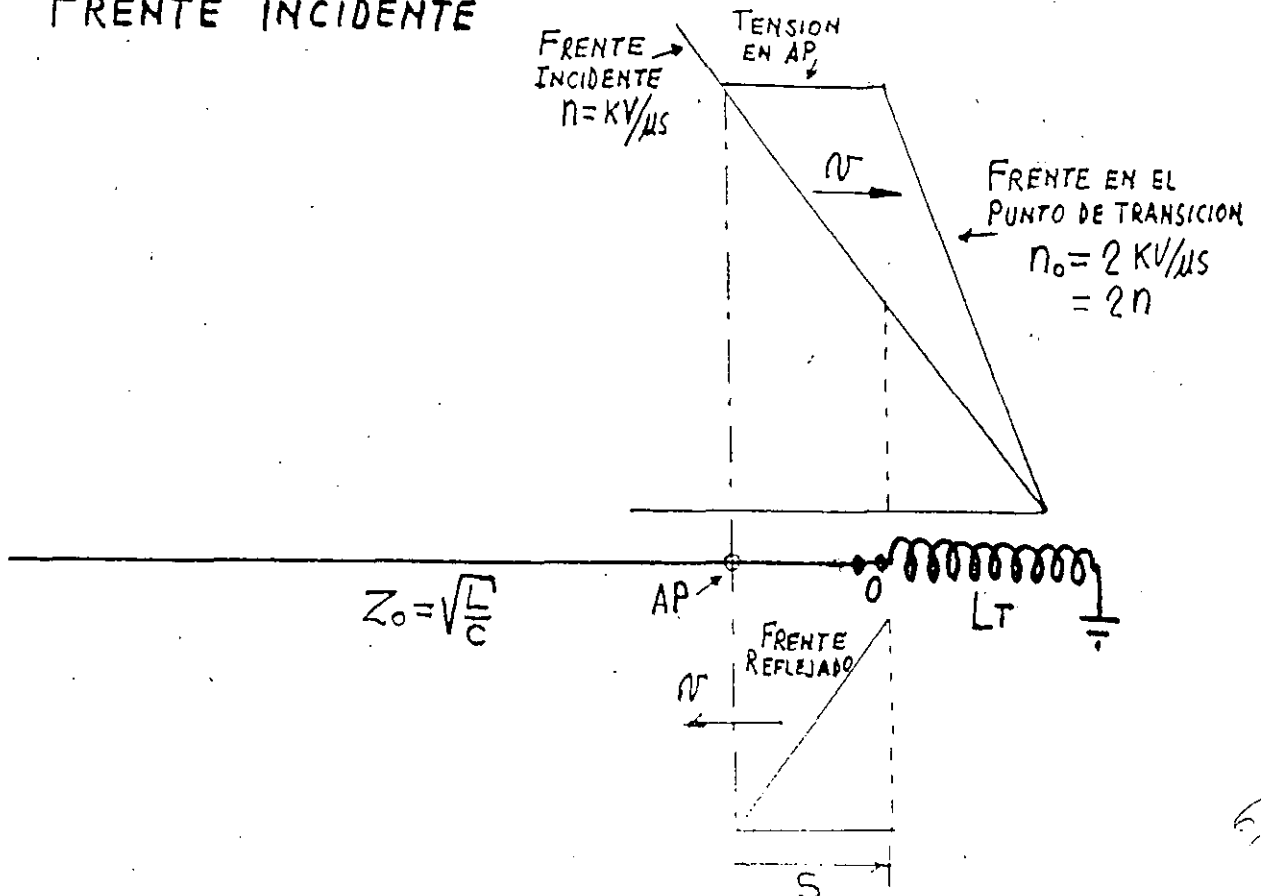
COMPORTAMIENTO DE LAS ONDAS VIAJERAS

ONDA INCIDIENDO EN EL DEVANADO DE UN TRANSFORMADOR



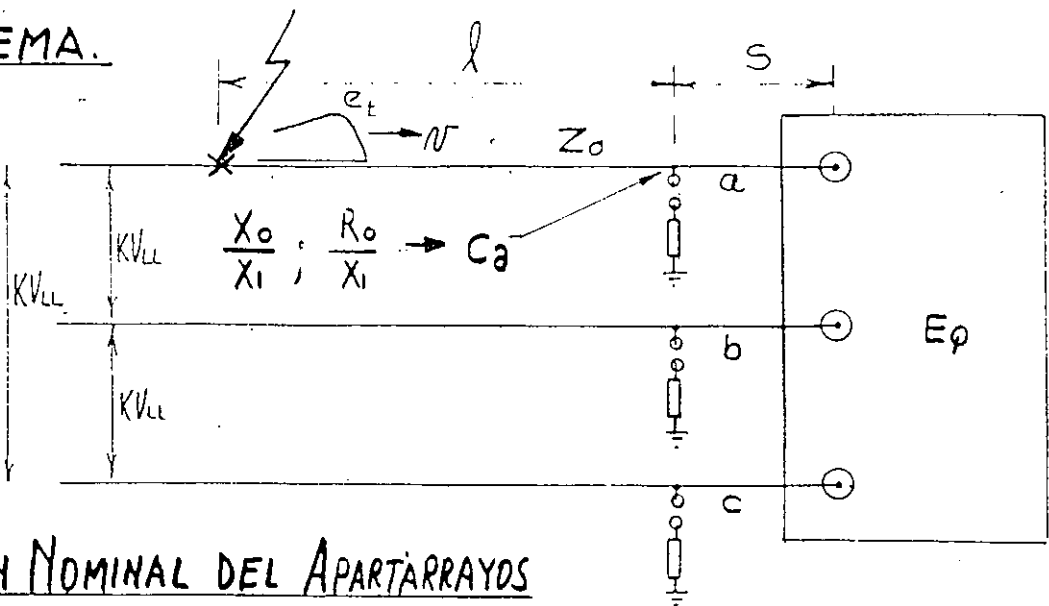
$$e_o = e_i + e'_i = 2e$$

FRENTE INCIDENTE



SELECCION DE LA PROTECCION CONTRA SOBRETENSIONES.

1. ESQUEMA.



2. TENSION NOMINAL DEL APARTARRAYOS

$$KV_{RMS} = C_a \cdot KV_{LL}$$

(RATING)

3. CORRIENTE DE DESCARGA.

$$I_D = K_A \frac{2BIL}{Z_0}$$

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

l (m)	K_A
0	4
700	3
1600	2
3200	1

4. MARGEN DE PROTECCION DEL APARTARRAYOS

$$M_a = \frac{KV_{ED}}{KV_{AP} (1 + 0.66 T_{AP})}$$

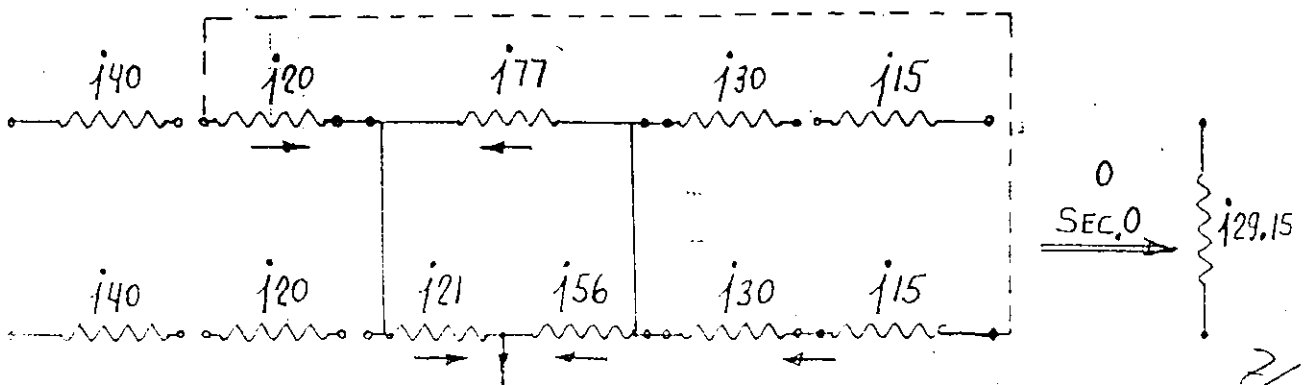
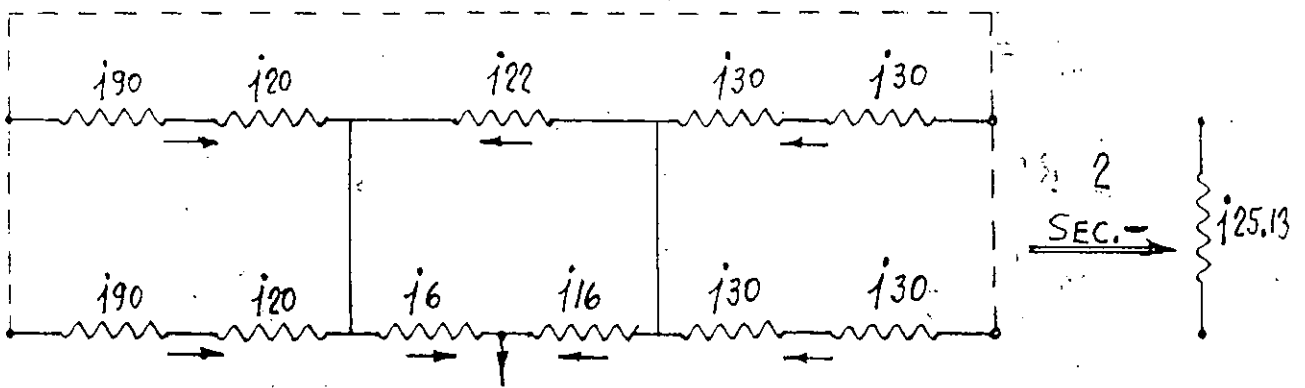
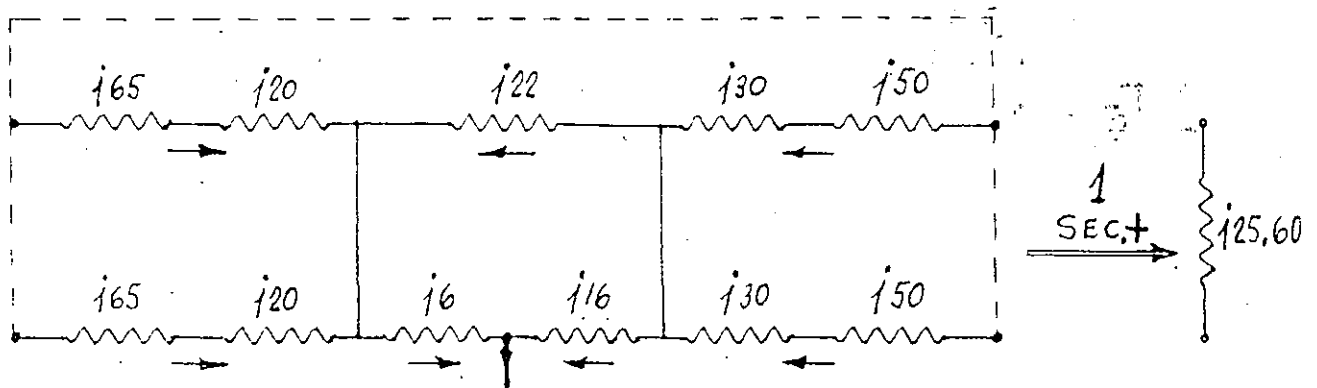
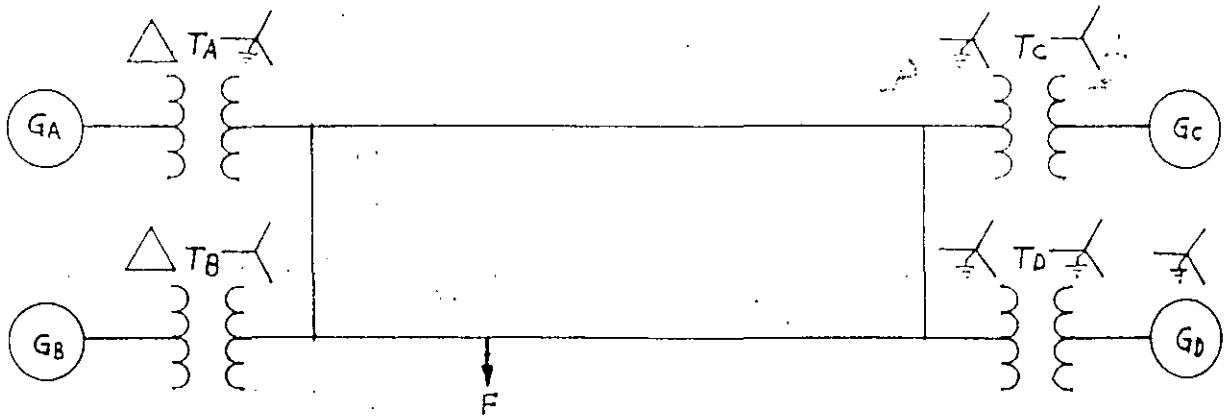
	KV_{ED} (AGUANTE)	KV_{AP} (RESPUESTA)
a	FRENTE	FRENTE
1	BIL	1.2/50
2	BSL	250/2500

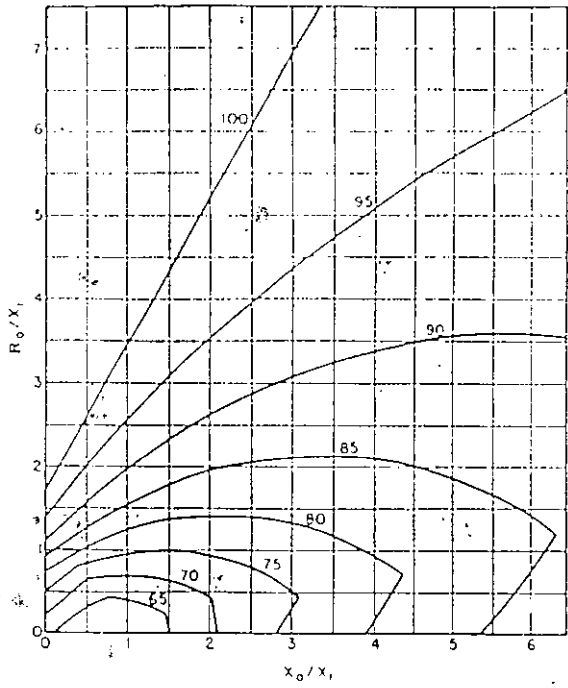
5. INSTALACION

$$S = 150 \frac{KV_{ED} - KV_{AP} \text{ (FRENTE)}}{n}$$

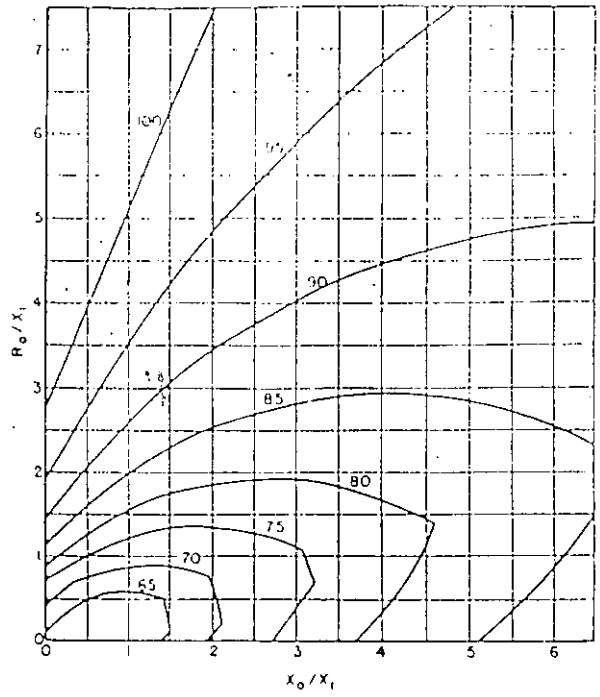
VALORES CORRESPONDIENTES AL FRENTE DE ONDA.

ILUSTRACION DE LA DETERMINACION DE LOS DIAGRAMAS DE SECUENCIA

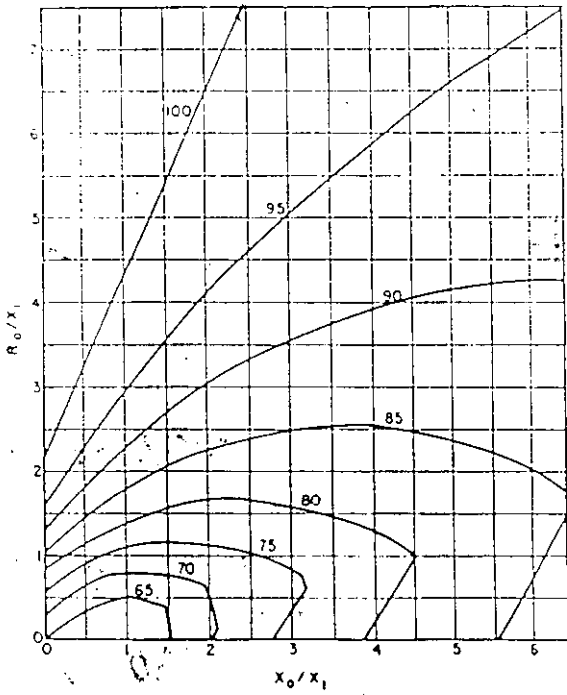




(a) Voltage conditions neglecting positive- and negative-sequence resistance— $R_1 = R_2 = 0$.



(c) Voltage conditions for $R_1 = R_2 = 0.2 X_1$.



(b) Voltage conditions for $R_1 = R_2 = 0.1 X_1$.

Figure 5-3
Maximum Line-to-ground Voltage at
Fault Location for Grounded Neu-
tral System Under Fault Condition.

77

SELECCION DE APARTARRAYOS

EJEMPLO 1

DEFINIR LOS APARTARRAYOS PARA UN BANCO CONECTADO EN LA DERIVACION "F" DEL SISTEMA ILUSTRADO

$$\frac{X_0}{X_1} = \frac{29.15}{25.60} = 1.14 \quad ; \quad \frac{R_0}{X_1} = 1.0 \quad ; \quad C_a = 0.75$$

$$KV_{LL} = 66 \pm 5\% \rightarrow 69.3 KV_{MAX} \quad \left\{ \begin{array}{l} BIL - 350 KV \\ FRENTE - 580 KV, 0.58 \mu s \\ BSL - 291 KV \end{array} \right.$$

$Z_0 = 400 \Omega$

$$KV_{RMS} = C_a \cdot KV_{LL} = 0.75 \times 69.3 = 52 KV$$

RATING.

SE SELECCIONA EL INMEDIATO SUPERIOR, 60KV

$$I_D = K_A \frac{2BIL}{Z_0} = 4 \frac{2 \times 350}{400} = 7 KA \rightarrow 10KA$$

RESPUESTA DEL APARTARRAYOS DE 60KV SELECCIONADO.

MAXIMA DESCARGA FRENTE DE ONDA.

$$KV_{AP} = 190 KV$$

(FRETE)

MAXIMA DESCARGA ONDA 1.2/50

$$KV_{AP} = 160 KV$$

(1.2/50)

MAXIMA DESCARGA ONDA 250/2500

$$KV_{AP} = 169 KV$$

(250/2500)

TENSION DE DESCARGA A 10KA.

$$KV_D = 174 KV$$

$$R_{AP} = \frac{174}{10} = 17.4 \text{ ohms.} \quad \approx 25$$

EJEMPLO 1. (CONTINUA)

$$M_1 = \frac{KV_{EP} \text{ (FRENTE)}}{KV_{AP} \text{ (FRENTE)} (1 + 0.66 T_{AP})} = \frac{580}{190 (1 + 0.66 \times 0.1)} = 2.86$$

$$M_2 = \frac{KV_{EP} \text{ (BSL)}}{KV_{AP} \text{ (1.2/50)} (1 + 0.66 T_{AP})} = \frac{350}{160 (1 + 0.66 \times 0.1)} = 2.05$$

$$M_3 = \frac{KV_{EP} \text{ (BSL)}}{KV_{AP} \text{ (250/2500)} (1 + 0.66 T_{AP})} = \frac{291}{169 (1 + 0.66 \times 0.1)} = 1.61$$

$$S_1 = 150 \frac{\frac{KV_{EP} \text{ (FRENTE)}}{M_1} - KV_{AP} \text{ (FRENTE)}}{n} = 150 \frac{\frac{580}{2.86} - 190}{1000} = 1.92 \text{ m.}$$

RESPETANDO EL MARGEN QUE OFRECE EL APARTARRAYOS SELECCIONADO.

$$S_{\text{MAX.}} = 150 \frac{\frac{580}{M_s} - 190}{1000} = 44 \text{ m} \quad M_s = 1.2$$

ACEPTANDO UN MARGEN DE PROTECCION DE 20% EN EL EQUIPO.

24