



Universidad Nacional Autónoma de México

Facultad de Ingeniería

# SISTEMAS DE TIERRA

## TESIS PROFESIONAL

*QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE*

**Ingeniero Mecánico Electricista**

P R E S E N T A N

**Eduardo Cesar Aldana Villegas**

**Herón Lucas Alfaro Alfaro**

**José Tolentino Orduña**



México, D. F.

1984



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# I N D I C E

	Página
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1	
DEFINICIONES	2
CAPITULO 2	
CONSIDERACIONES GENERALES	9
2.1. Objetivos	9
2.2. Peligro de un choque eléctrico	10
CAPITULO 3	
METODOS DE CONEXION A TIERRA DEL NEU- TRO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTEN- CIA.	19
3.1. Sólidamente conectado a tierra	21
3.2. Conexión a tierra a través de una resistencia	25
3.3. Conexión a tierra a través de una reactancia	27
3.4. Conexión a tierra mediante un neutralizador de falla a tierra	29
3.5. Transformadores para conexión a tierra	31
CAPITULO 4	
CRITERIOS Y PARAMETROS DE DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS DE UNA SUBESTACION	37
4.1. Criterios de diseño	37
4.2. Parametros de diseño	43
4.3. Mediciones de resistividad del terreno	48

**CAPITULO 5**

**CALCULO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS**

5.1. Datos para el diseño	64
5.2. Determinación de los elementos de la red	65
5.3. Cálculo de la red de tierras	78

**APENDICE A**

<b>ESTUDIO DEL CORTO CIRCUITO</b>	<b>87</b>
-----------------------------------	-----------

**APENDICE B**

<b>MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO</b>	<b>101</b>
--	------------

<b>CONCLUSIONES</b>	<b>106</b>
---------------------	------------

**BIBLIOGRAFIA**

## I N T R O D U C C I O N

La consideración tradicional para el diseño de las redes de tierra mediante la utilización de expresiones simplificadas presenta grandes limitaciones cuando se analizan o diseñan redes cuya configuración es irregular o el número de mallas es muy grande. Por lo que un buen diseño de la red es tan importante como el dispositivo de protección, que asegure trayectorias de baja resistencia a tierra, ya que en caso contrario dicho dispositivo no funcionaría correctamente. Por esto es necesario plantear un procedimiento práctico que también sea capaz de analizar redes no tradicionales.

En éste trabajo se realiza un análisis de los criterios básicos para el diseño de una red de tierras; se presentan recomendaciones para efectuar las mediciones de resistencia de electrodos de puesta a tierra y de resistividad del suelo; se propone una metodología para la elaboración de diseños preliminares así como la descripción matemática.

## CAPITULO I

### DEFINICIONES.

**SISTEMA DE TIERRA.-** Conjunto de conductores, electrodos, accesorios etc., que interconectados entre si tienen por objeto conectar a tierra las cubiertas y otras partes metálicas de los equipos eléctricos, así como aquellos elementos de los circuitos que lo requieran.

**TIERRA O CONECTADO A TIERRA.-** Conexión intencional o accidental a tierra o algún cuerpo conductor que supla a ésta.

**RED O MALLA DE TIERRA.-** Porción metálica subterránea de un sistema que disipe hacia tierra todo flujo de corriente.

La red se compone en general de varias mallas interconectadas por la unión de conductores longitudinales con conductores transversales.

**CONDUCTOR DE TIERRA DE EQUIPO.-** Se usa para conectar las partes metálicas de las estructuras que no conducen corriente, equipos, charolas, blindaje de cables, carcaza de máquinas, etc.

**CONDUCTOR DE TIERRA DEL NEUTRO.**- Conecta a la malla de tierra el neutro de un transformador, la terminal de tierra del apartarrayos, el neutro de capacitores, etc.

**APARTARRAYOS.**- Aparato o dispositivo que se emplea para proteger al equipo conectado a un circuito eléctrico, contra el efecto de ondas de sobretensión que se producen, tanto por descargas atmosféricas, directas o cercanas a circuitos aéreos, así como por la operación de interruptores o por otras causas de disturbios en el propio circuito.

**BARRA DE TIERRA.**- Es una barra a la cual se conectan los conductores de los equipos y que a su vez está conectada a la malla de tierras en uno o más puntos.

**RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRAS.**- Es la resistencia medida entre la malla y un electrodo de tierras lejano de resistencia cero.

**ELECTRODO DE TIERRA.**- Son generalmente varillas, tubos o placas, enterradas en el suelo, con el propósito de hacer contacto eléctrico firme con la tierra en el lugar.

CONECTADO A TIERRA.- Conexión a tierra ya sea directa o a través de un dispositivo limitador de corriente.

Un sistema de corriente alterna o una porción de él está efectivamente conectado a tierra cuando la relación de la reactancia de secuencia cero con la secuencia positiva de todos los puntos del sistema a la porción específica, sea no mayor de tres.

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

Y la relación de la resistencia de secuencia cero con la reactancia sea no mayor de uno, en cualquier condición de operación y para cualquier magnitud de capacidad de generación conectada.

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

Donde  $R_0$ ,  $X_0$  y  $X_1$  son respectivamente la resistencia de secuencia cero, la reactancia de secuencia cero (tomada como positiva si es inductiva, y negativa si es capacitiva) y la reactancia subtransitoria de secuencia positiva.

**CONDUCTOR DE CONTROL DE GRADIENTE.**- Es el conductor instalado en el área cercana de una estructura o equipo, en la superficie de la tierra o apenas abajo de ella, que esté conectado tanto a la malla o red de tierras como al metal sobre la superficie. Se usa para reducir al mínimo las diferencias de potencial entre las estructuras, equipo y tierra circundante, también para reducir al mínimo los gradientes de potencial sobre la superficie de la tierra circundante.

**CORRIENTE A TIERRA.**- Es la corriente que se inyecta a la tierra ya sea por el conductor de conexión a tierra o por la malla o red de tierras.

**CORRIENTE RESIDUAL.**- Es la suma vectorial de las corrientes exclusivamente en los conductores de fase. Vale normalmente  $3I$  donde  $I$  es la corriente de secuencia cero.

**CORRIENTE DE SECUENCIA CERO.**- Es aquella porción de las corrientes trifásicas desbalanceadas que pueden representarse matemáticamente por medio de un conjunto de vectores balanceados que están en fase. Las corrientes de secuencia cero pueden circular del neutro a tierra en algu

nas cargas conectadas en estrella o en bancos de transformadores, o bien, fluyen en la delta de los mismos transformadores. Se designa por I.

**CORRIENTE DE FALLA A TIERRA.-** Es el valor máximo de la corriente que fluye en el corto circuito durante una falla de línea a tierra.

**CORRIENTE DE MALLA A TIERRA.-** Causa los gradientes de tensión y eleva el potencial de la red de tierras sobre el potencial de una tierra lejana.

**POTENCIAL DE TIERRA.-** Es el potencial de referencia que la tierra mantiene en ausencia de influencias eléctricas externas.

**ELECTRODO DE TIERRA INCIDENTAL.-** Es cualquier objeto metálico enterrado, por cualquier motivo, de uso distinto al del electrodo de tierra, pero que está conectado al sistema.

Como ejemplos típicos pueden citarse las tuberías metálicas para agua, tubos de pozos, bases de tipo emparrillado.

**TENSION DE PASO (Vp).**- Es la tensión que resulta entre los pies de una persona apoyada en el suelo a la distancia de un metro, cuando ocurre una falla.

**TENSION DE CONTACTO.**- Es la tensión máxima que experimentará una persona que se encuentra de pie dentro del área de la subestación y que durante la ocurrencia de una falla esté tocando con una o ambas manos una estructura o cualquier otro elemento conductor que en condiciones normales no se encuentra con tensión y que está directamente unido a la red de tierras.

**TENSION DE TRANSFERENCIA.**- Son las tensiones que se presentan en sitios alejados del lugar donde ocurre la falla.

**NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA.**- Es un dispositivo para conexión a tierra, el cual proporciona una componente inductiva de corriente durante una falla a tierra que es aproximadamente igual a la componente capacitiva de frecuencia nominal de la corriente de falla y por lo tanto la neutraliza, de este modo se origina un sistema resonante conectado a tierra.

**TRANSFORMADOR PARA CONEXION A TIERRA (ZIG-ZAG)**

Es un transformador que tiene el fin principal de proporcionar un punto neutro para propósitos de conexión a tierra.

## CAPITULO 2

## CONSIDERACIONES GENERALES

## 2.1 OBJETIVOS

- 1) Establecer los límites de seguridad en las diferencias de tensión que pueden existir en una subestación entre distintos puntos con los que puede hacer contacto el cuerpo humano o algún ser vivo cuando se produce una falla en el sistema eléctrico, por corto circuito a tierra o por disturbios atmósféricos; límites que sirvan de base para un diseño adecuado.
- 2) Suministrar una guía metódica para el diseño práctico de un sistema de tierras basedo en esos límites.
- 3) Recomendar los métodos de prueba que ayu- den a obtener los datos técnicos para el diseño y sirvan para comprobar si la construcción de ese sistema resultó adecuado.
- 4) Desarrollar los métodos matemáticos que - sean herramientas para entender y solucionar los problemas típicos de gradientes - de potencial.

## 2.2 PELIGRO DE UN CHOQUE ELECTRICO

La importancia de los objetivos indicados es - más clara, si se toman en cuenta los efectos que produce el paso de corrientes eléctricas a través del cuerpo humano. Cuando el cuerpo pasa a formar parte de un circuito eléctrico, los efectos de la corriente eléctrica son consecuencia de la magnitud de la corriente y de la duración del choque.

La magnitud de corriente se da, por la Ley de Ohm  $I = \frac{E}{Z}$ , donde E es la tensión aplicada entre dos puntos del circuito del que forma parte el cuerpo humano y Z es la impedancia total entre esos dos puntos y no sólo la que existe entre el cuerpo humano y uno de ellos. A frecuencias bajas la impedancia del cuerpo es esencialmente resistiva mientras que a altas frecuencias se vuelve no lineal y presenta las características de un circuito resistivo-capacitivo.

Si se aplican directamente tensiones de 240 -- volts o más a la piel, la perforan en forma instantanea y dejan con frecuencia una quemadura profunda y bien localizada. En estos casos la impedancia interna es el principal factor que limita la intensidad de corriente que circula.

Hasta 100 Hz la resistencia del cuerpo humano se comporta linealmente, sin embargo se ha demostrado que la impedancia se reduce a menos de 50% con un aumento de la frecuencia de 50 a 50000 Hz. La resistencia de la piel humana, a las frecuencias normales usadas en los sistemas de potencia de 60 Hz, la forma principalmente la capa callosa de la epidermis que varía en las diversas partes del cuerpo, así como entre diferentes individuos, la piel seca puede tener una resistencia de 100000 a 300000 ohms/cm<sup>2</sup>, pero la húmeda puede abatirse a 1% de esos valores. Los contactos húmedos o líquidos producen resistencias bajas, por consiguiente la piel sudorosa abate fuertemente la resistencia de la capa superior. Así cuando una persona realiza el trabajo a altas temperaturas ambientales, asociadas primordialmente con alta humedad, queda más expuesta a daños por corrientes de magnitudes inferiores. Además, debe tomarse en cuenta que las condiciones fisiológicas y psicológicas tienen también influencia sobre la resistividad de la piel, estos factores adquieren importancia cuando una corriente intensa -- circula durante más de 1 ó 2 segundos. Cuando la corriente persiste por más de unos cuantos segundos, se forman ampollas que reducen aún más la resistencia. Los contactos sobre una piel lastimada por una cortadura o en una abrasión pueden resultar muy dolorosas con corrientes de sólo unos cuantos miliamperes.

### 2.2.1 CORRIENTES PERCEPTIBLES

La percepción de pequeñas corrientes continuas se manifiesta con una sensación de calor en la palma de la mano que toma al electrodo y la estimulación nerviosa por corrientes alternas la indica el cosquilleo. Múltiples pruebas efectuadas sobre personas, muestran que las corrientes de percepción en diferentes individuos siguen una distribución de frecuencia normal y pueden analizarse estadísticamente. La media para hombres es aproximadamente de 1.1 mA y para mujeres de 0.7 mA, valor efectivo de 60 Hz. A 5000 Hz la penumbra de percepción sube de 1.1 a 7.0 mA. Arriba de 100 a 200 KHz la sensación cambia de cosquilleo a calor. Se cree que a más altas frecuencias los únicos efectos son calor y quemaduras.

### 2.2.2 CORRIENTES DE REACCION CAUSADA POR MOVIMIENTOS INVOLUNTARIOS

Las corrientes más débiles que pueden producir una reacción inesperada, involuntaria y por ello algún accidente se llaman corrientes de reacción; a ellas pueden atribuirse accidentes como las caídas de trabajadores que se encuentran sobre una escalera o que tiendan líneas de transmisión sobre postes o torres. Se han fijado límites entre 0.5 a 0.75 mA porque, a pesar de que la media de las corrientes

tes de percepción es de 1.1 mA -como se dijo con anterioridad-, existen intervalos de porcentaje de corrientes mucho menores.

### 2.2.3 CORRIENTES DE ENGARROTAMIENTO

Cuando se sujeta un electrodo con la mano, aumentan en severidad las sensaciones de calor y hormigueo al aumentar la intensidad de la corriente, llegando a reacciones musculares y de dolor que pueden hacerse insoportables. Si la intensidad sigue en aumento, llega el momento en que el sujeto pierde el control sobre sus músculos y ya no puede soltar voluntariamente al conductor. La corriente máxima que una persona puede soportar y a la cual puede todavía soltar el conductor, se le llama corriente de soltar, y apenas arriba de ese valor, corriente de engarrotamiento.

La media de las corrientes límites de engarrotamiento para hombres y mujeres tienen valor de 26 y 10.5 mA en la proporción cercana de 2/3 para mujeres.

Las corrientes seguras e ininterrumpidas en un intervalo de porcentaje de 0.5 son de 9 mA para hombres normales y de 6 mA para mujeres normales. Es decir, que en --

99.5% de los casos, tales corrientes no producirán efectos de engarrotamiento. Hasta ahora no ha sido posible fijar valores seguros para niños, debido a que éstos simplemente lloran a valores altos.

Corrientes ligeramente mayores de 18 mA contraen los músculos del tórax de manera que se interrumpe la respiración durante el choque, sin embargo, se restablece la respiración normal al interrumpirse la corriente. Si la corriente persiste sobrevienen colapsos, pérdida de la conciencia y la muerte en cuestión de minutos.

#### 2.2.4 CORRIENTE DE FIBRILACION

Otro efecto serio que se presenta cuando el choque lo producen corrientes mayores es fibrilación ventricular que afecta al corazón. Es un paro de la acción cardíaca y de la circulación de la sangre, pues induce su coagulación. Por tanto, se necesita establecer, cuál es la corriente máxima que no produzca fibrilación ventricular en un trabajador adulto.

Los experimentos que lo determinan no pueden efectuarse en seres humanos y el único recurso con que se

cuenta a la fecha es sacrificar animales y extrapolar los resultados a hombres. Para estos experimentos se usan perros, en la mayor parte de ellos, aunque también se sacrifican animales con pesos del corazón y del cuerpo similares a los humanos, tales como becerros, cerdos y corderos. En 1968, diversos investigadores presentaron un análisis revisado de los experimentos que se efectuaron en laboratorios de diversas partes del mundo sobre los datos que correlacionan los factores de peso corporal, magnitud de la intensidad de la corriente y duración del choque para una trayectoria de corriente comparable al de humanos durante un accidente.

Se concluyó por medio del estudio de estos resultados y de la casualidad de accidentes sufridos por humanos que "la fibrilación ventricular, a frecuencias que se utilizan comercialmente, no es probable en un trabajador - adulto normal si la intensidad de la corriente es menor a  $116/t^{1/2}$  mA con t en segundos" así:

$$I_k \leq \frac{116}{t} \text{ mA} \quad (2.1)$$

donde  $I_k$  - corriente efectiva a través del cuerpo en mA

t - tiempo de duración del choque eléctrico en segundos

Nótese que la ecuación (2.1) da valores de 116 mA para  $t = 1$  s y de 367 mA para  $t$  equivalente a 6 ciclos a 60 Hertz.

#### 2.2.5 EFECTOS A CORRIENTES SUPERIORES

Las corrientes con intensidades considerablemente superiores a aquéllas apenas necesarias para producir fibrilación ventricular pueden producir paros cardiacos, - inhibición respiratoria, daños irreversibles al sistema nervioso, quemaduras serias e inconciencia. Desafortunadamente, no existen valores numéricos que den tales magnitudes de corrientes.

#### 2.2.6 RECIERRES

En las prácticas modernas de operación, son -- comunes los recierres después de una falla. Normalmente, - un recierre rápido automático provocaría un segundo choque en algo menos de  $\frac{1}{2}$  segundo después de iniciado el primero, lo que da muy poca oportunidad a la víctima de liberarse de este intervalo, principalmente si sufrió engarrotamiento. Con recierres manuales e intervalos de varios segundos a -- unos minutos, habría la posibilidad, pero no la seguridad - de que la víctima evitará un segundo choque.

Se asegura que los choques sucesivos no tienen efectos acumulativos sobre la susceptibilidad del corazón a la fibrilación, aunque no se justifica aplicar este criterio al caso en estudio con intervalos de muy corta duración, ya que se encontró que el corazón siempre volvía a la normalidad en los 5 minutos siguientes a la aplicación de la corriente, siempre que no se producirá fibrilación. Esto sugiere que es posible se presente cierta tolerancia en los choques por recierre, pero no es aconsejable fijar una guía cuantitativa a este respecto.

Por consiguiente, el diseñador de sistema de tierras no debe ignorar este factor sino permitir un aumento en el valor de  $t$  en la ecuación (2.1). Puede, por ejemplo, considerar que la severidad de 2 choques seguidos con duración cada uno de 0.1 s sea mayor que la de un choque de la misma duración, y que no sea tan severo como un choque único con duración de 0.2 s, debido a que el tiempo aparece en la ecuación (2.1) elevado a la potencia  $\frac{1}{2}$ . Aun así, que daría la corriente  $I_k$  limitada a un valor menor que se usará para el diseño de la red.

### 2.2.7 IMPORTANCIA DE LA ELIMINACION RAPIDA DE FALLAS

Es de mucha importancia, como factor de seguridad, eliminar la falla en muy corto tiempo por medio de interruptores rápidos que, por otro lado, son necesarios para conservar la estabilidad de grandes sistemas interconectados, debido a que la probabilidad de un choque se reduce, si existe una apertura de interruptor que elimine la falla en un tiempo razonablemente corto, en contraposición son situaciones en las cuales ésta persiste durante varios minutos o quizás horas. Tanto las pruebas experimentales como las experiencias de campo demuestran que la probabilidad de daños severos o la muerte se reduce, en mucho, cuando la duración del paso de la corriente por el cuerpo es de muy corta duración.

## CAPITULO 3

## METODOS DE CONEXION A TIERRA DEL NEUTRO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA

Un sistema eléctrico de potencia estará conectado a tierra cuando el neutro de un generador o transformador de dicho sistema se conecte por cualesquiera de los métodos abajo mencionados:

1. Sólidamente conectado a tierra
2. A través de una resistencia
3. A través de una reactancia
4. A través de un neutralizador de falla a tierra.

En cada caso, debe entenderse que la impedancia del generador o transformador (cuyo neutro esté conectado a tierra) está en serie con el circuito externo.

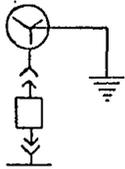
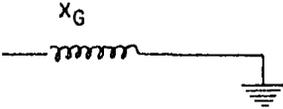
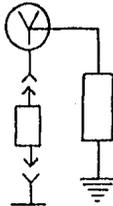
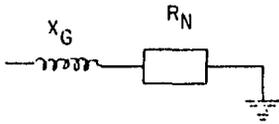
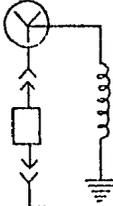
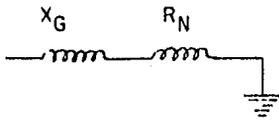
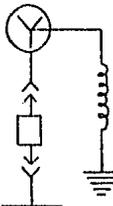
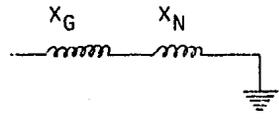
Las características de estos métodos de conexión a tierra se resumen en la Tabla 3-1 y los circuitos y diagramas equivalentes se muestran en la Figura 3.1.

TABLA 3.1 CARACTERISTICAS DEL SISTEMA CON DIFERENTES METODOS DE CONEXION A TIERRA

	SIN CONEXION A TIERRA	CONEXION A TIERRA A TRAVES DE:		CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA DE ALTO VALOR	NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA	CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA
		SOLIDAMENTE	UNA REACTANCIA DE BAJO VALOR			
CORRIENTE DE FALLA DE FASE A TIERRA EN % DE LA CORRIENTE TRIFASICA	MENOS DEL 1%	VARIA, PUEDE SER 100% O MAYOR	DISEÑADA GENERALMENTE PARA PRODUCIR 25 a 100%	5 A 25%	CERCANA A LA CORRIENTE DE FALLA CERO	5 A 20%
SOBRETENSIONES TRANSITORIAS	MUY ALTA	NO EXCESIVA	NO EXCESIVA	MUY ALTA	NO EXCESIVA	NO EXCESIVA
DESCONEXION AUTOMATICA DE LA ZONA DE FALLA	NO	SI	SI	SI	NO	SI
APARTARRAYOS	SIN TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA	CON TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA	CON TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA SI LA CORRIENTE ES 60% O MAYOR	SIN TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA	SIN TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA	SIN TERMINAL PARA CONEXION A TIERRA
OBSERVACIONES	NO RECOMENDABLE DEBIDO A SOBRETENSIONES Y NO DEBE CONEXION DE LA ZONA DE FALLA	GENERALMENTE USADO EN: - 600 V Y MENORES - MAS DE 15 KV		NO ES USADA, DEBIDO A SOBRETENSIONES EXCESIVAS	MEJOR UBICADO EN LINEAS AEREAS DE ALTA TENSION	USADO GENERALMENTE EN SISTEMAS INDUSTRIALES DE 2.4 A 15 KV.

### 3.1. SOLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA

Un sistema de potencia está sólidamente conectado a tierra cuando el neutro de un generador o transformador está conectado directamente a tierra, como se muestra en la Figura 3-2. La conexión sólida a tierra no puede considerarse como un circuito de impedancia cero.

DESCRIPCION	CIRCUITO	DIAGRAMA EQUIVALENTE
1. SOLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA		
2. CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA		
3. CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTANCIA		
4. NEUTRALIZADOS DE FALLA A TIERRA		

$X_G$ .- REACTANCIA DEL GENERADOR O TRANSFORMADOR QUE SE CONECTA A TIERRA.

$X_N$ .- REACTANCIA DEL DISPOSITIVO PARA CONEXION A TIERRA.

$R_N$ .- RESISTENCIA PARA CONEXION A TIERRA

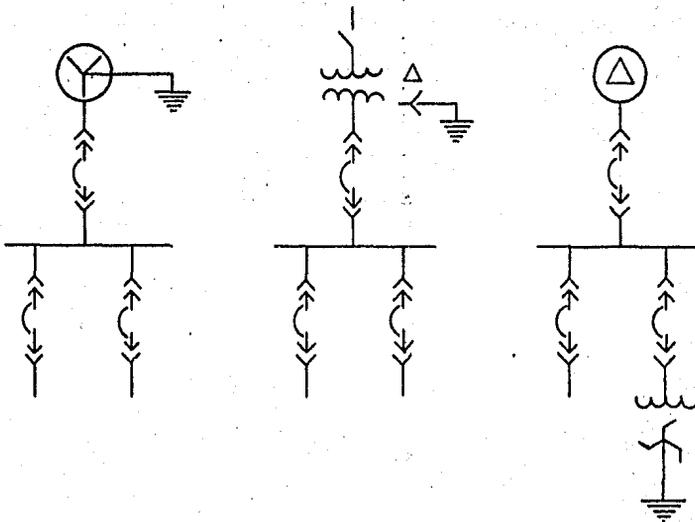
FIG. 3-1 SISTEMAS DE CIRCUITOS NEUTROS Y METODOS DE CONEXION A TIERRA.

Para todos aquellos sistemas sólidamente conectados a tierra, es necesario que las corrientes de falla - estén en un rango del 25 al 100% de la corriente de falla trifásica para prevenir la aparición de sobretensiones -- transitorias. Esto puede significar corrientes de falla a tierra simétricas del orden de 10,000 a 40,000 amperes. En tre más alto sea el valor de la corriente de falla trifásica, el sistema se dice que está más sólidamente conectado a tierra.

La conexión directa a tierra de un generador sin una impedancia externa puede causar que la corriente - de falla a tierra exceda el valor máximo de corriente de - falla trifásica que el generador puede suministrar. Conse cuently, en los casos donde la conexión sólida a tierra del sistema sea indicada, los generadores deberán ser conectados a tierra a través de una reactancia de bajo valor, el cual limitará la corriente de falla a un valor no mayor que la corriente de falla trifásica.

Pueden usarse los apartarrayos para sistemas con neutro conectado a tierra cuando el sistema esté conectado a través de una baja impedancia para prevenir el desplazamiento del neutro del sistema con respecto a tierra, más allá de los límites especificados. En este caso, la -

impedancia máxima puede ser expresada en términos de la mínima corriente de falla a tierra. Esta corriente deberá ser cuando menos del 60% de la corriente de corto circuito para la aplicación de apartarrayos con terminal para conexión a tierra.



GENERADOR SOLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA

TRANSFORMADOR DE POTENCIA SOLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA

TRANSFORMADOR PARA CONEXION A TIERRA SOLIDAMENTE CONECTADO A TIERRA

FIG. 3-2 METODOS PARA CONECTAR SOLIDAMENTE A TIERRA EL NEUTRO DE SISTEMAS DE POTENCIA.

### 3.2.- CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA RESISTENCIA.

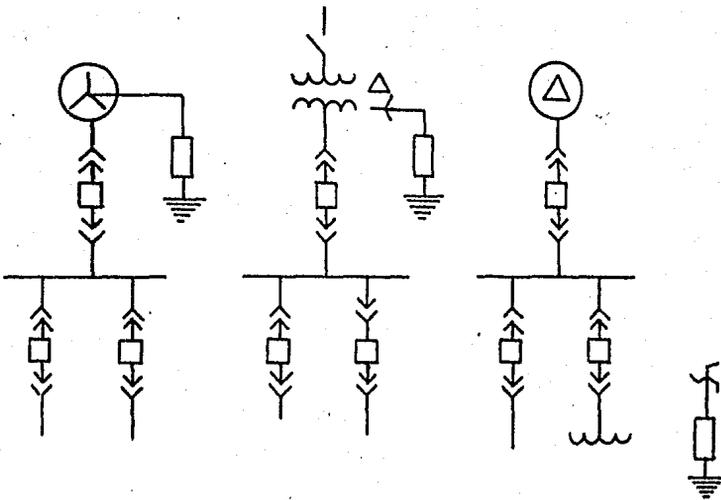
En este caso, el neutro se conecta a tierra a través de una o más resistencias, como se muestra en la Figura 3.3.

Un sistema conectado a tierra mediante una resistencia, no está sujeto a sobretensiones transitorias - destructivas. Para sistemas de 15 Kv. o menores, conectados a tierra a través de una resistencia, dichas sobretensiones no son destructivas a menos que la resistencia sea tan alta que limite la corriente de falla a tierra a una pequeña fracción del 1% de la corriente de falla trifásica.

Las razones para limitar la corriente mediante conexión del neutro a través de resistencias, son las siguientes:

1. Reducir daños en equipo eléctrico, tales como interruptores, cables y máquinas rotatorias, cuando se presente una falla.
2. Reducir esfuerzos mecánicos en circuitos y máquinas.

3. Reducir los peligros de choque eléctrico cuando el personal hace contacto con el equipo.
4. Reducir la caída de tensión momentánea, ocasionado por la aparición y término de una falla.



NEUTRO DEL GENE  
RADOR

NEUTRO DEL TRANS  
FORMADOR DE PO--  
TENCIA.

NEUTRO DEL TRANSFOR  
MADOR PARA CONEXION  
A TIERRA

FIG. 3.3 METODOS DE CONEXION A TIERRA DEL NEUTRO A TRAVES DE UNA RESISTENCIA DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA.

### 3.3 CONEXION A TIERRA A TRAVES DE UNA REACTAN CIA.

Es el caso en el cual una reactancia es conectada entre el neutro de la máquina y tierra como se muestra en la Figura 3.1.

La magnitud de la reactancia del neutro, determina que tan sólidamente está conectado a tierra y por lo - tanto cual será su característica. Dado que la corriente de falla a tierra, la cual puede fluir en un sistema conectado a través de una reactancia está en función de la reactancia conectada al neutro, la magnitud de la corriente de falla a tierra es frecuentemente utilizada como criterio - para obtener el valor de la reactancia.

Puede ser necesario agregar una reactancia de bajo valor para limitar las corrientes de falla a tierra a través del generador a un valor no mayor que la corriente de falla trifásica con que contribuye el generador.

Las características de la conexión a tierra a través de una reactancia, las cuales son dependientes de - la magnitud de la corriente de falla a tierra, se resumen

para cualquier punto del sistema en la Tabla 3.1.

Como se verá, si un sistema va a ser conectado a tierra a través de una reactancia, la corriente de falla a tierra deberá ser cuando menos 25% de la corriente de falla trifásica.

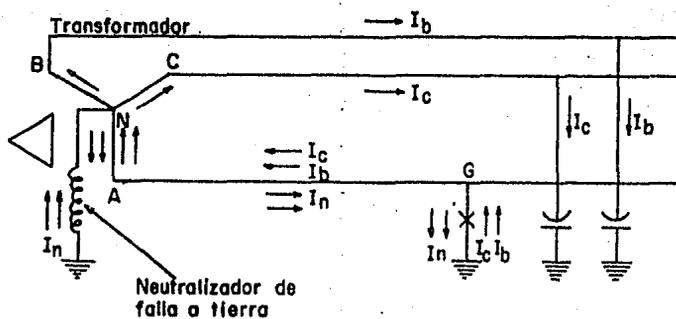


Fig. 3.4. MODELO DE CORRIENTE DE FALLA A TIERRA EN UN SISTEMA CONECTADO MEDIANTE UN NEUTRALIZADOR DE FALLA A TIERRA.

### 3.4. CONEXION A TIERRA MEDIANTE UN NEUTRALIZADOR DE FALTA A TIERRA.

De la figura 3.4, la corriente  $I_a$  está defasada  $180^\circ$  y es aproximadamente igual en magnitud a las corrientes de carga resultantes de las dos fases no falladas  $I_b$  e  $I_c$ . Las componentes inductiva y capacitiva de la corriente se anulan una con otra y la única corriente que permanece en la falla es debida a la resistencia, fugas de aislamiento y corona. Esta corriente es relativamente pequeña, y está en fase con la tensión. El arco es extinguido y las descargas eléctricas son eliminadas sin interrumpir la línea fallada del servicio. Para sistemas en los cuales las fallas en líneas aéreas son relativamente frecuentes, los neutralizadores de fallas son muy útiles debido a que reducen el número de operaciones del circuito de apertura, requeridos para aislar las fallas, incrementando esto la continuidad en el servicio.

Los neutralizadores han sido usados principalmente en sistemas mayores de 15 Kv consistentes esencialmente en líneas de transmisión aéreas. Se utilizan también para limitar las corrientes de falla a tierra a un valor aproximadamente igual a cero, cuando la falla a tierra ocurre en un sistema de 6900 volts con neutro conectado a tierra.

Los neutralizados de falla a tierra han sido utilizados en sistemas que tienen las siguientes características:

1. En sistemas que tienen solamente dos transformadores de corriente por circuito.
2. Donde el interruptor es tal que la adición de un tercer transformador de corriente - implique un gasto considerable.
3. En sistemas que tengan corrientes de carga de valor alto, en cuyo caso el daño a las máquinas puede resultar en una falla a tierra si el sistema se deja sin conectar a tierra.
4. En sistemas que son susceptibles de arcos a tierra por ejemplo las líneas de transmisión aéreas.

Un neutralizador de falla a tierra más una resistencia de tierra son también aplicables para sistemas - como los descritos anteriormente excepto que tres transformadores de corriente y un relevador "residual" son necesarios.

### 3.5 TRANSFORMADORES PARA CONEXION A TIERRA.

El neutro de un sistema puede no estar disponible, particularmente en sistemas viejos de 600 volts o menores y en muchos sistemas existentes de 2400, 4800 y -- 6900 volts o en algún sitio donde no hay banco de transformadores que pueda ser conectado a tierra.

Cuando se desea conectar a tierra los sistemas de baja tensión conectados en delta, se usan transformadores para conexión a tierra para formar el neutro, el cual puede conectarse sólidamente a tierra. De manera similar los sistemas de 2.4 a 15 kv que tienen equipo conectado en delta, pueden conectarse a tierra por medio de transformadores y resistencias. La mejor manera de obtener el neutro de un sistema es usando transformadores o generadores conectados en estrella, los transformadores están disponibles para todos los valores de tensión. Para sistemas de 2400 o 4800 volts. Pueden adquirirse transformadores conectados en estrella o se pueden usar transformadores para conexión Zig-Zag.

### 3.5.1 TRANSFORMADOR PARA CONEXION ZIG-ZAG.

El tipo de transformador para conexión a tierra usado más comúnmente es el transformador trifásico - - Zig-Zag sin devanado secundario. La configuración típica del transformador de conexión a tierra se muestra en la -- figura 3.5

Han sido diseñadas otras configuraciones, pero ésta es la más económica y es prácticamente universal.

La impedancia del transformador a las corrientes trifásicas es alta, de tal manera que cuando no hay fa lla en el sistema fluye a través de los embobinados del -- transformador solamente una pequeña corriente de magnetizaci ón, sin embargo, la impedancia del transformador a la - corriente de falla a tierra es baja, de modo que permite - que circule una alta corriente de falla. El transformador divide la corriente de falla en tres componentes iguales; estas corrientes están en fase entre si y fluyen en los -- tres embobinados del transformador.

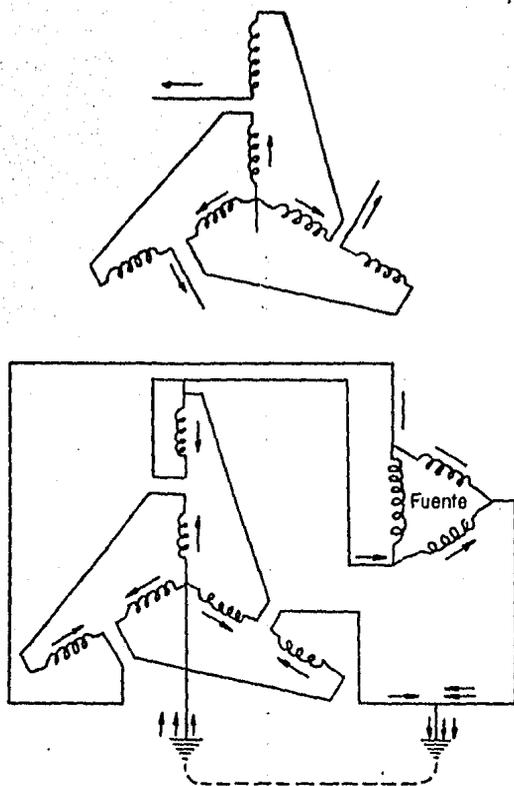


FIG. 3.5. CONFIGURACION TIPICA DEL TRANSFORMADOR DE CONE-  
XION A TIERRA.

La corriente de la impedancia a tierra (representada por una de las tres flechas de la Figura 3.5), es igual a la suma de la impedancia del sistema a los tres -- componentes en línea, en el mismo sentido, más la impedancia del transformador, medida en forma usual, poniendo en corto circuito un devanado secundario y haciendo circular corriente en el primario.

El lapso durante el cual llevará corriente el transformador conector variará con la configuración de la protección mediante relevadores, pero estos transformadores generalmente se diseñan para llevar corriente durante un tiempo limitado de 10 segundos a un minuto, sin excesivo calentamiento, por lo tanto su tamaño es normalmente al rededor de 1 décimo del tamaño de un transformador trifásico ordinario para los mismos Kva nominales.

El calentamiento excesivo para un transformador Zig-Zag, significa una temperatura superior a la de un transformador ordinario, la norma para transformadores de conexión a tierra permite un límite de aumento calculado -- de la temperatura de 175°C durante un minuto, 125°C durante 10 minutos y 75°C para aumento continuo de temperatura, pero limitado a un tiempo de servicio de conexión total a tierra de sólo 90 días por año.

La posible corriente de tierra está limitada en primer lugar por la impedancia del transformador, y una tierra es así equivalente a un corto circuito, si no hay otra impedancia en el neutro o en las líneas. La impedancia del neutro se suma a la impedancia efectiva del transformador, como se ve en la Figura tres veces se suma la impedancia - del neutro a la del transformador para determinar la impedancia de secuencia cero de la combinación.

### 3.5.2      TRANSFORMADOR PARA CONEXION A TIERRA DELTA-ES TRELLA.

Un transformador con conexión delta-estrella puede usarse también como un transformador para conexión a tierra. En este caso la delta debe estar cerrada para propor-cionar un circuito a las corrientes de secuencia cero y debe hacerse para un nivel de voltaje arriba del nivel conveniente. Puede o no usarse para alimentar otras cargas. El embobinado conectado en estrella debe ser del mismo valor de voltaje nominal que el de el circuito el cual está conectado a tierra. Las conexiones del transformador se muestran en la Figura 3.6.

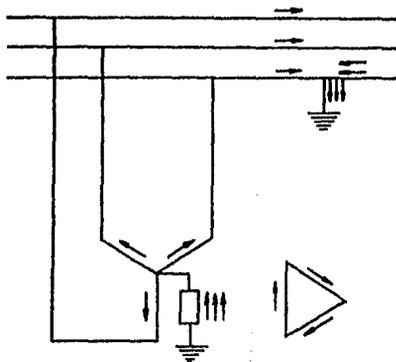


FIG. 3.6 CONEXION Y DISTRIBUCION DE CORRIENTE EN UN TRANS-  
 FORMADOR PARA CONEXION A TIERRA DELTA-ESTRELLA --  
 CUANDO OCURRE UNA FALLA DE LINEA A TIERRA EN UN --  
 SISTEMA TRIFASICO.

## CAPITULO 4

### CRITERIOS Y PARAMETROS DE DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS DE - UNA SUBESTACION

Los criterios y parámetros de diseño de la red de tierras para una subestación, sólo podrán establecerse si se define apropiadamente la función de la misma. En -- una subestación dicha función es proporcionar un elemento de conexión a tierra de los neutros, tanques o carcazas de cada uno de los diferentes equipos dentro de su área.

#### 4.1 CRITERIOS DE DISEÑO

Los criterios de diseño aplicables al análisis del comportamiento de un electrodo o red de tierras en una subestación se dividen en dos grupos.

##### 4.1.1 SEGURIDAD DEL PERSONAL

Como es bien sabido, debido a la circulación - de una corriente a través del electrodo de puesta a tierra, se presentará una elevación de tensión del propio electrodo en relación con una tierra remota, que se considera a

tensión cero. Asimismo, se presentarán durante la falla - gradientes de tensión sobre la superficie del suelo; éstas tensiones medidas en relación con la tierra remota de tensión cero, introducen situaciones que ponen en peligro la vida de los seres vivos que se encuentran dentro del área de la subestación o en la vecindad de la misma en el instante que se presenta la falla.

Las situaciones peligrosas y su designación -- dentro de la terminología de las redes de tierra, así como su significado conceptual se describen a continuación:

#### TENSION DE CONTACTO.

La tensión de contacto es la tensión máxima que experimentará una persona que se encuentra de pie dentro - del área de la subestación y que durante la ocurrencia de una falla esté tocando con una o ambas manos una estructura o cualquier elemento conductor, directamente unido a la red de tierras.

Desde el punto de vista práctico, la tensión - de contacto queda establecida por la diferencia máxima de tensión que existe en condiciones de falla entre la red de

tierras y un punto cualquiera sobre la superficie del suelo. Generalmente, esta diferencia se obtendrá al comparar la tensión de la red con la tensión de malla, siendo cada uno de ellos:

$$EPR = I_g R_g \quad (4.1)$$

Donde:

$EPR$  - elevación de tensión de la red

$I_g$  - corriente de falla a través de la red

$R_g$  - resistencia a tierra de la red

La tensión de malla es aquella que existirá sobre la superficie del suelo en el centro de una de las mallas de la red. Para este análisis se tomará cualquier valor, como se indica en la figura 4.1.

Por tanto:

$$V_{\text{contacto}} = EPR - V_m \quad (4.2)$$

Donde:

$V_{\text{contacto}}$  - Tensión de contacto

$V_m$  - Tensión de malla

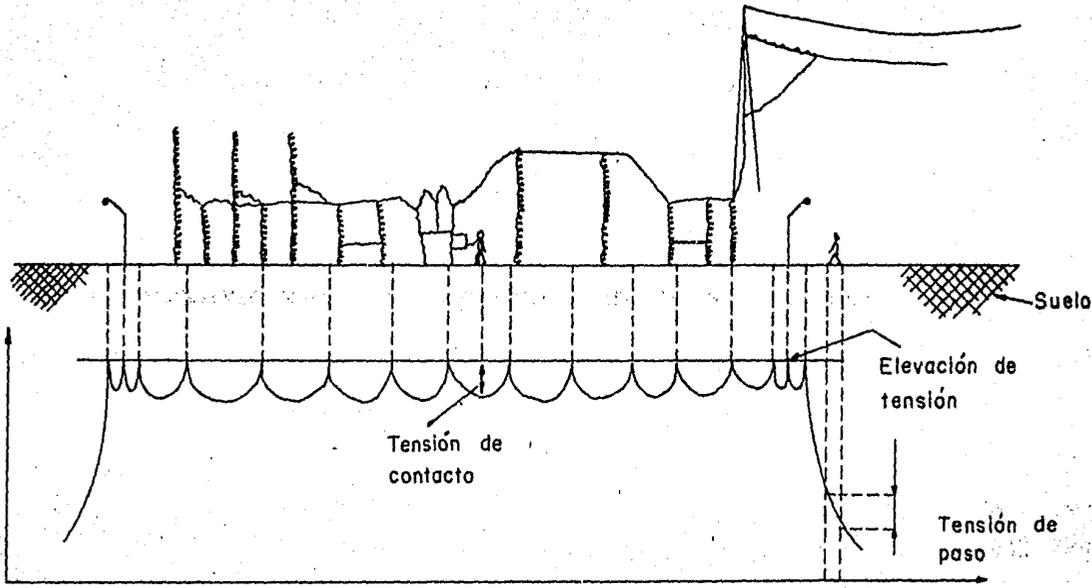


FIGURA 4.1.

### TENSION DE PASO

La tensión de paso es: La tensión máxima que se aplicará a una persona entre sus pies, cuando en el instante de una falla se encuentre caminando en el área o inmediatamente fuera de la red. Prácticamente, la tensión de paso es aquella que existe entre dos puntos separados un metro - sobre la superficie del suelo; en general este valor es más crítico en los límites del área que cubre la red (veáse Fig. 4.1).

Por tanto:

$$V_p = V_a - V_b$$

Donde:

$V_p$  - tensión de paso

$V_a$  - tensión en el punto a

$V_b$  - tensión en el punto b (localizado a - un metro del punto a)

## TENSIONES DE TRANSFERENCIA

Las tensiones de transferencia son aquellas -- que se presentan en sitios alejados de la subestación donde ocurre la falla, usualmente esto se debe a la presencia de estructuras enterradas en la cercanía de la subestación como tuberías, cercas metálicas, rieles de ferrocarril, -- etc., o bien a neutros e hilos de comunicación que salen -- de la subestación. Las tensiones transferidas pueden resultar peligrosas si no se analizan y limitan sus valores cuando sea necesario.

Para esta situación no pueden establecerse recomendaciones generales, pues cada situación deberá estudiarse con atención especial. En forma general, el procedimiento que se aplica para limitar el peligro de tensiones transferidas, consiste en instalar juntas aislantes en las estructuras enterradas o superficiales cercanas a la subestación y para los cables de comunicación, en conectar transformadores de aislamiento.

La tensión transferida se considera como un -- caso especial de tensión de contacto, por tanto, su valor deberá limitarse a lo establecido por la expresión (4.6).

#### 4.1.2 PROTECCION DE EQUIPO DE CONTROL Y COMUNICACIONES

La protección de estos equipos, desde el punto de vista de la red de tierras, es importante debido a la posibilidad de tensiones muy elevadas en el área de la subestación. Como se estableció con anterioridad, la elevación de la tensión de la red estará en la expresión (4.1).

Esta elevación de tensión natural del suelo, en el área de la subestación, obliga a coordinar el aislamiento para el equipo de control y comunicaciones, ya que por norma el nivel de aislamiento de estos equipos es de 5 KV, por lo que este valor se presentará como una limitación para el valor de la resistencia de la red, ya que a partir de la expresión (4.1) se tendrá:

$$R_g = \frac{5 \text{ KV}}{I_g} \quad (4.4)$$

#### 4.2 PARAMETROS DE DISEÑO

Las características naturales del suelo y la capacidad de corto circuito de la red eléctrica en el lu-

gar de la instalación determinan los parámetros básicos -- para el diseño de una red de tierras, por lo que los factores indispensables que deben considerarse en un diseño son:

a) CORRIENTE DE FALLA

La corriente de falla del sistema es el punto de partida para establecer la magnitud de la corriente que se inyectará a tierra a través del electrodo o red de tierras. En general, es menor que la correspondiente corriente de falla de una fase a tierra calculada por medio de estudios de corto circuito. Por el momento se considerará - la corriente que se inyecta a la red igual al valor de la corriente de falla de línea a tierra.

b) RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad del terreno es, junto con la - corriente de falla, el factor de mayor influencia para la determinación de las características de una red de tierras, por lo mismo es indispensable conocer su valor y estructura a través de mediciones de campo.

c) AREA DE LA SUBESTACION

El área donde se ubicará la subestación deberá siempre conocerse al iniciar un diseño, ya que, la resistencia de la red de tierras es una función directa del área donde se instalará.

d) TIEMPOS DE APERTURA DE INTERRUPTORES

Como se indica en las expresiones normalizadas de las tensiones de paso y de contacto (4.5 y 4.6), el tiempo en el que persiste la falla determinará la magnitud de la tensión. Sin embargo, actualmente se usan interruptores rápidos, para lo cual se sugiere el valor de  $t = 0.5$  segundos.

e) NIVEL DE AISLAMIENTO DE EQUIPO DE COMUNICACIONES

El equipo de comunicaciones consta del cableado de control y comunicaciones dentro de una subestación.

Generalmente, tiene un nivel de aislamiento de 5 a 10 KV, por consiguiente, este valor determinará, en -

gran parte, la resistencia de la red, ya que una elevación de tensión mayor a estos valores dañaría los cables de control y comunicación.

#### f) TENSIONES DE PASO Y DE CONTACTO

Para asegurar la protección del personal dentro del área de la subestación durante la ocurrencia de falla, es necesario limitar estas tensiones a valores normalizados, los cuales se han establecido a través de experimentos. Para calcular los valores máximos tolerables de tensiones de paso y de contacto, se establecen las siguientes ecuaciones:

$$V_{\text{paso}} = \frac{116 + 0.7 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (4.5)$$

$$V_{\text{contacto}} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (4.6)$$

Donde:

$\rho_s$  - resistividad superficial del terreno

$t$  - tiempo de liberación de la falta

En general se recomiendan valores de:

$\rho_s = 3000 \Omega\text{-m}$ ; cuando se hace uso de roca triturada

$t = 0.5 \text{ s}$  (valor conservador)

Las tensiones transferidas pueden tratarse como tensiones especiales de contacto y por lo mismo deberán limitarse al valor establecido en la expresión (4.6).

Tomando al pie como un electrodo de placa circular la resistencia de contacto con el suelo es aproximadamente  $3 \rho_s$ . La guía 80 del IEEE recomienda el uso de  $10^3 \Omega$  como la resistencia del cuerpo humano. Por lo que en el caso de la tensión de paso se tiene una resistencia total de:

$R = 1000 \text{ ohms} + 6 \rho_s$  (la resistencia de los dos pies en serie)

y en caso de la tensión de contacto:

$$R = 1000 + 1.5 \rho_s (\text{la resistencia de dos - pies de paralelo})$$

De esta manera se pueden calcular dos tensiones:

$$V_{\text{paso}} = \frac{(1000 + 6 \rho_s) (0.116)}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.696 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (4.7)$$

$$V_{\text{contacto}} = \frac{(1000 + 1.5 \rho_s) (0.116)}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.174 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (4.8)$$

#### 4.3 MEDICIONES DE RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La investigación que proporciona el lugar donde se construirá una subestación, deberá incluir una descripción de la composición del suelo y principalmente determinará las características del terreno desde el punto de vista de la ingeniería civil y eléctrica.

La determinación de la resistividad del terreno deberá obtenerse a través de mediciones directas, se evitará siempre la aplicación de tabulaciones de carácter general. Las mediciones se efectuarán en varios lugares dentro del predio de la instalación, siguiendo alguno de

los métodos que se analizan en este tema. Estas mediciones permitirán establecer la representación del suelo a través de un modelo homogéneo.

CUADRO 4.1

Naturaleza del suelo	Resistividad promedio ( $\Omega$ - m)
Terreno vegetal	1 - 50
Arcilla	2 - 100
Arena y grava	50 - 1000
Superficie calcárea	5 - 4000
Arcilla granulada	5 - 100
Roca porosa	20 - 2000
Granito, basalto, etc.	1000
Roca cristalina	50 - 500
Terreno de cultivo	10 - 100

#### 4.3.1 MEDICION DE LA RESISTIVIDAD ESPECIFICA DEL SUELO

Para medir la resistividad del suelo es necesario pasar corriente a través de él, lo que sólo se logra -

al insertar electrodos en el suelo para obtener la circulación de corriente. El método generalmente empleado es el de los cuatro electrodos. Del mismo existen varias versiones que dependen de la configuración de los electrodos; en general se basan en la teoría desarrollada por Frank Wenner.

La configuración de los cuatro electrodos se muestra en la figura 4.2, como se observa éstos se colocan en línea recta y a una misma profundidad, las mediciones de resistividad dependerán de la distancia que exista entre electrodos y la resistividad propia del terreno. Por lo contrario, no dependen en forma apreciable del tamaño y del material de los electrodos, a pesar de que dependen de la clase de contacto que se haga con la tierra.

#### A) METODO DE WENNER

Como ya se indicó, la teoría que desarrolló -- Wenner se aplica a cualquier configuración de cuatro electrodos para medir resistividad, habitualmente se conoce como método de Wenner a la disposición de los cuatro electrodos en línea recta, con igual separación y profundidad (véase la Fig. 4.3).

Al emplear esta configuración si se conocen - la profundidad de los electrodos, la distancia entre ellos y la resistencia que se opone al paso de la corriente, los electrodos 1 y 4 se utilizan para inyectar corriente, y la diferencia de tensión se mide entre los electrodos 2 y 3; la resistividad específica del suelo estará dada por la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{4\pi aR}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} = \frac{4\pi aR}{n} \quad (4.9)$$

Donde:

- $\rho$  - resistividad del terreno, en ohm-metro
- $R$  - resistencia medida, en ohms
- $a$  - distancia entre electrodos, en metros
- $b$  - profundidad de penetración de los electrodos, en metros
- $n$  - factor aproximado que tiene un valor entre 1 y 2 (depende de la relación  $b/a$ ; si  $b=a$ ,  $n=1.187$ ; si  $b=2a$ ,  $n=1.030$ ; si  $b=4a$ ,  $n=1.003$ ).

La expresión (4.9) puede aproximarse a:

$$\rho = 4\pi aR \quad \text{Si } b \gg a \quad (4.10)$$

$$\rho = 2\pi aR \quad \text{Si } b \ll a \quad (4.11)$$

FIGURA 4.2

CONFIGURACION DE LOS CUATRO ELECTRODOS PARA MEDICIONES DE RESISTIVIDAD

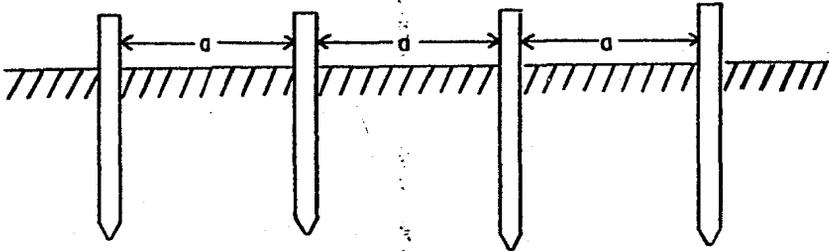
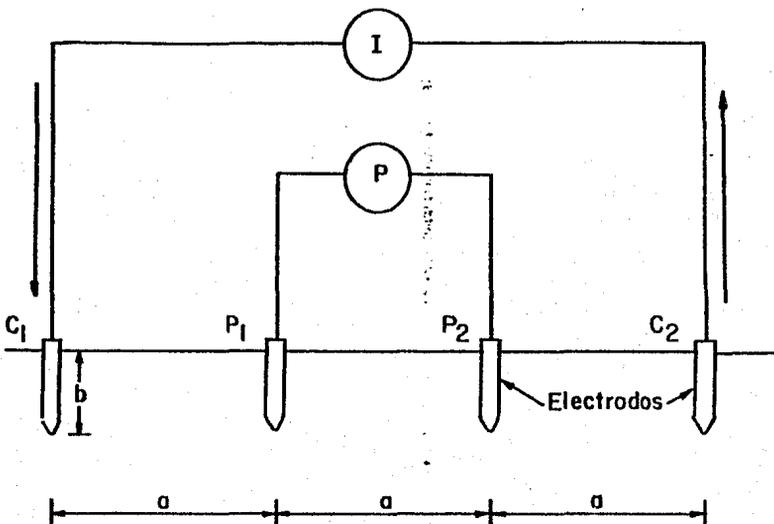


FIGURA 4.3

CONFIGURACION UNIVERSAL DEL METODO WENNER



En el método Wenner, la disposición habitual - de los electrodos es C-P-P-C.

Donde:

C = Electrodo de corriente

P = Electrodo de tensión

Sin embargo, los electrodos pueden intercambiarse sin alterar el resultado de la resistividad que se va a medir, siempre y cuando se aplique la expresión adecuada. Con base en lo anterior se sugieren 3 configuraciones alternativas para las mediciones, éstas se presentan en el cuadro 4.2 acompañadas de la expresión correspondiente.

CUADRO 4.2

Configuración de electrodos	Expresión de resistividad
C-P-P-C	$\rho_1 = 2\pi a R_1$
P-C-C-P	
C-C-P-P	$\rho_2 = 6\pi a R_2$
P-P-C-C	
C-P-C-P	$\rho_3 = 3\pi a R_3$
P-C-P-C	

Al realizar mediciones conjuntas en una misma área pueden emplearse para determinar la homogeneidad del terreno; en el caso de suelo homogéneo se tendrá:

$$3\rho_1 = \rho_2 + 2\rho_3 \quad (4.12)$$

$$R_1 = R_2 + R_3 \quad (4.13)$$

## B) METODO DE SCHLUMBERGER

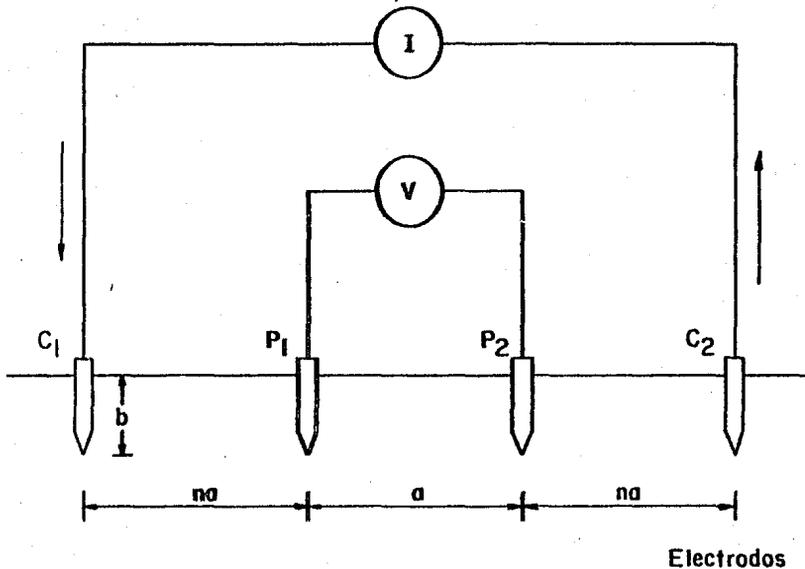
El método de Schlumberger es una modificación del método de Wenner. También emplea cuatro electrodos, en este caso la separación entre los electrodos centrales o de tensión ( $a$ ) se mantiene constante y las mediciones se realizan variando la distancia de los electrodos exteriores a partir de los electrodos interiores, a distancias múltiples ( $na$ ) de la separación base de los electrodos internos.

La configuración, así como la expresión de la resistividad correspondiente a este método de medición se muestra en la figura 4.4 y en la expresión (4.14), respectivamente.

FIGURA 4.4

## CONFIGURACION DEL METODO DE SCHLUMBERGER

$$\rho_a \text{ (Sch)} = \pi Rn (n + 1) a \quad (4.14)$$



El método de Schlumberger es de gran utilidad cuando el aparato de medición (Megger de tierras) no tiene la precisión adecuada para valores de resistencia pequeños, ya que la separación entre electrodos del método Wenner, se introducen errores si se emplean aparatos de poca presi

ción cuando la resistividad del terreno es del orden de --  
20Ω/m y los valores de resistencia proporcionados por el -  
aparato son del orden de  $10^{-3}$  ohms.

#### 4.3.2 SELECCION DE UN MODELO ESTRATIFICADO - DEL SUELO NO HOMOGENEO

En el diseño de los electrodos de tierra la re  
sistividad es uno de los parámetros de diseño más importan  
tes; en algunos casos es suficiente suponerlo homogéneo.  
Cuando se efectúan mediciones se encuentra generalmente --  
que la no-homogeneidad es el resultado más común, por lo -  
que al aplicar las fórmulas para obtener la resistividad,  
se encuentran valores como los presentados en la figura -  
4.5, donde en función de la separación entre electrodos se  
tiene una resistividad aparente.

Desde un punto de vista práctico, cuando se -  
grafican los resultados de las mediciones de campo de re-  
sistividad contra la distancia entre electrodos, se obtien  
nen los tipos de curvas mostrados en la figura 4.6.

Donde se observa que la variación de la resis  
tividad es notoria al incrementarse la separación entre -

electrodos; al aplicar el método de Wenner de los cuatro -  
electrodos, las variaciones observadas se atribuyen funda-  
mentalmente a la variación exponencial de la resistividad  
en función de la profundidad.

FIGURA 4.5

VARIACION APARENTE DE RESISTIVIDAD CON LA DISTANCIA ENTRE ELECTRODOS

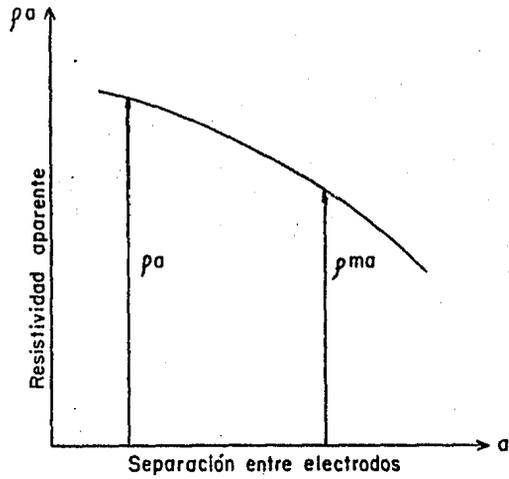
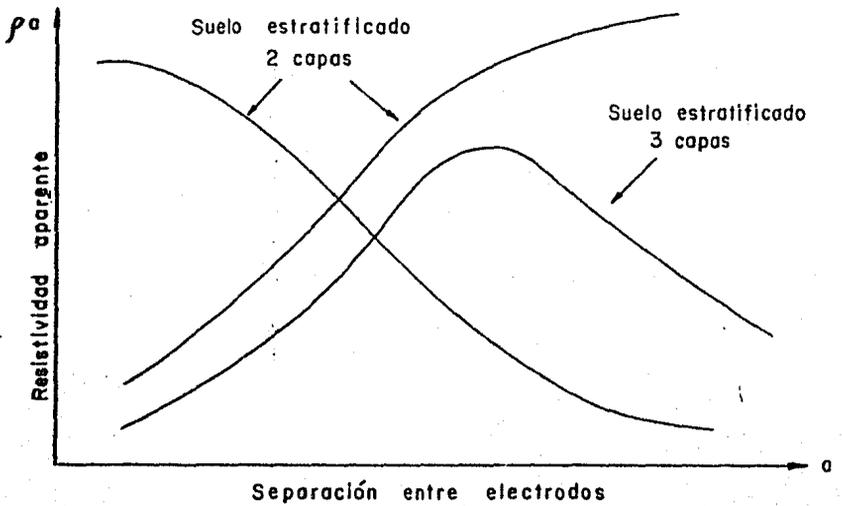


FIGURA 4.6

POSIBLES VARIACIONES DE LA RESISTIVIDAD APARENTE CON LA SEPARACION ENTRE ELECTRODOS



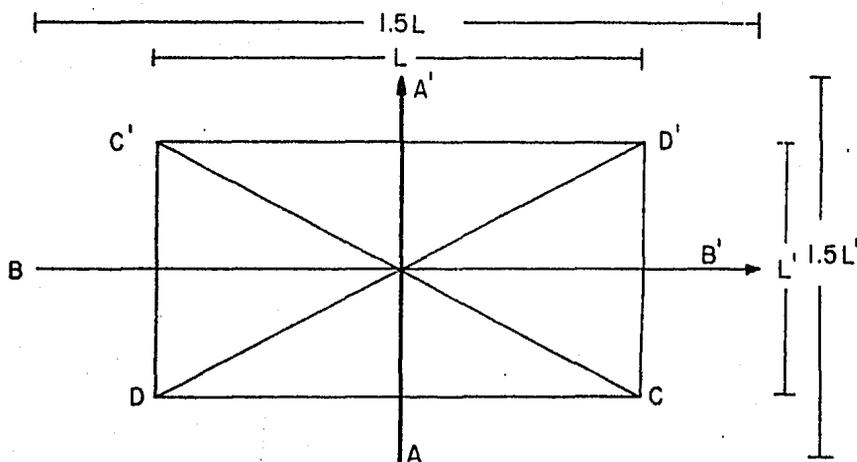
#### 4.3.3 PROCEDIMIENTOS PARA REALIZAR LAS MEDICIONES

Una vez que se conoce el área en que se instalará la subestación, las mediciones se efectuarán en las direcciones indicadas en la figura 4.7.

Cuando se realicen estas mediciones con el método Wenner, se dará una separación entre electrodos de 3 a 5 m, dependiendo de la profundidad requerida para dar firmeza a los electrodos enterrados. Las mediciones deberán realizarse, aumentando la separación entre electrodos de 2 a 3 m hasta llegar a una separación máxima entre electrodos de  $1/3 L$ . Los resultados se anotarán en una forma como la que se anexa a continuación, donde además de los datos de resistividad deberán proporcionarse el tipo de suelo, la fecha, temperatura ambiente y las observaciones que se consideren pertinentes. Asimismo, durante las mediciones de campo deberá realizarse la gráfica correspondiente de resistividad entre la separación entre electrodos, ya que ésta permitirá detectar errores de medición.

FIGURA 4.7

DIRECCIONES Y LONGITUD RECOMENDADAS PARA LAS MEDICIONES DE RESISTIVIDAD





## CAPITULO 5

### CALCULO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS.

El diseño de una red de tierra se considera, - un problema complejo, ya que intervienen todos los factores que determinan su comportamiento. Por ejemplo, la consideración de la resistividad del suelo, debido a las grandes variaciones de la composición del terreno, los cambios durante las estaciones del año y su estructura transversal y longitudinal plantean la necesidad de definir la metodología de medición y de interpretación para considerarla - parámetro de diseño.

#### 5.1 Datos para el diseño.

La información que se requiere para el cálculo preliminar de la red de tierra es el siguiente:

- a) Un plano de localización general que muestre la disposición del equipo en la subestación, incluyendo la localización de las ceras (perímetro externo).
- b) Corriente máxima de falla a tierra

- c) Resistividad media del terreno en  $\Omega$ /metro medido de acuerdo a lo indicado en el capítulo anterior.
- d) Valores máximos admisibles para las tensiones de paso y de contacto.

## 5.2 Determinación de los elementos de la red.

Antes de elaborar el diseño es conveniente empezar inspeccionando el proyecto de la subestación, referente a la disposición del equipo y de las estructuras.

Un cable debe bordear el perímetro de la malla para evitar concentraciones de corriente en los extremos de los cables.

El diseño debe ajustarse de tal manera que la longitud total de los conductores enterrados, incluyendo las varillas sean aproximadamente igual a la calculada.

Para que las diferencias de potencial locales permanezcan dentro de los límites tolerables.

Los conductores de las mallas deben reforzarse en los casos que lo ameriten, para que puedan llevar las corrientes de falla máximas.

Se supone que el sistema formado por mallas de cable de cobre enterrado a una profundidad de 0.3 a 0.5 m en muchos casos es conveniente instalar varillas verticales de 5/8" de diámetro y de 3 m de longitud, principalmente cuando la resistividad del terreno es alta en la superficie.

#### 5.2.1 Cálculo del calibre del conductor de la red.

Cada uno de los elementos del sistema de tierra, incluyendo los conductores de la propia malla, las conexiones y los electrodos, deberán ser diseñados de tal manera que:

- a) Las uniones de la malla no se fundan o deterioren en las condiciones más desfavorables de magnitud y duración de la corriente de falla a que quedan expuestas.

- b) Los elementos sean mecánicamente resistentes en alto grado.
- c) Tengan suficiente conductividad para que no contribuyan apreciablemente a producir diferencias de potencial locales.

La ecuación de Onderdonk permite seleccionar el calibre del conductor:

$$I = A \sqrt{\frac{\text{Log}_{10} \left( \frac{T_m - T_a + 1}{234 + T_a} \right)}{33t}}$$

De donde obtenemos:

$$A = \sqrt{\frac{I}{\frac{\text{Log}_{10} \left( \frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1 \right)}{33t}}} \quad (5.1)$$

Donde:

- I: Corriente en amperes
- A: Sección de cobre, en circular MILS
- t: Tiempo durante el cual circula la corriente I en seg.

**$T_m$ :** Temperatura máxima permisible, en grados centígrados

**$T_a$ :** Temperatura ambiente en grados centígrados

Pueden suponerse normalmente los siguientes valores:

**$T_a = 40^\circ\text{C}$**

**$1083^\circ\text{C}$**  Temperatura de fusión del cobre

**$450^\circ\text{C}$**  Temperatura permisible para las uniones soldadas

**$250^\circ\text{C}$**  Temperatura permisible para las uniones con conectores (atornillados).

La Tabla 5.1 nos permite seleccionar en forma rápida la sección de cobre necesaria a partir del tiempo de duración de la falla, basándose en la ecuación anterior. (ecuación de Onderdonk).

Tiempo de duración de la falla	Circular MILS por ampere		
	Cable solo	Con uniones de soldadura de	Con uniones de conectores (atornillados)
30 segundos	40	50	65
4 segundos	14	20	24
1 segundo	7	10	12
0.5 segundos	5	6.5	8.5

Tabla 5.1 CALIBRES DEL CONDUCTOR DE COBRE MINIMO QUE PREVIENEN LA FUSION

### 5.2.2 CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO, CONTACTO Y MALLA DE LA RED DE TIERRA.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto de estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de una ralla en vez de las tensiones de contacto de puntos a 1 metro de distancia horizontal al conductor, ya que existen muchas posibilidades de que el objeto tocado a distancia superiores a 1 metro, esté conectado a la malla. Este caso especial de tensión de contacto se llama rá tensión de malla.

Los valores de las tensiones para instalaciones con calibre de conductores, profundidad y espaciamientos dentro de los límites usuales, son de las siguientes magnitudes:

$$E_{\text{paso}} = 0.1 \text{ a } 0.15 \rho_i \quad 5.2$$

$$E_{\text{contacto}} = 0.6 \text{ a } 0.8 \rho_i \quad 5.3$$

$$E_{\text{malla}} = \rho_i \quad 5.4$$

Donde:

$E_{\text{paso}}$  = tensión de un paso, de una distancia horizontal de un metro, en volts.

$E_{\text{contacto}}$  = tensión de contacto a una distancia horizontal de un metro de la malla de tierra, en volts.

$E_{\text{malla}}$  = Diferencia de tensión  $L$ , en volts, de la malla y la superficie del terreno en el centro del rectángulo de la malla.

$\rho$  = Resistividad del terreno en ohms-m

$i$  = Corriente en amperes por cada metro de conductor enterrado que fluye a tierra.

Para tomar en cuenta la profundidad, la irregularidad del flujo de la corriente en partes diferentes de la red, el diámetro de los conductores y su espaciamento se usarán las fórmulas siguientes:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \frac{I}{L} \rho \quad 5.5$$

Donde:

$K_m$  = Coeficiente que toma en cuenta el efecto del número de conductores paralelos  $n$ , el espaciamento  $D$ , el diámetro  $d$  y la profundidad  $h$  y se calcula como - - sigue:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \text{Ln} \frac{D^2}{16 h d} + \frac{1}{\pi} \text{Ln} \left[ \frac{3}{1} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \cdots \text{etc} \right] \quad 5.6$$

El número de factores en el segundo término es de dos menos que el número de conductores paralelos en la red básica, excluyendo las conexiones transversales.

$K_i$  = Factor de corrección por irregularidades para tomar en cuenta el flujo de corriente no uniforme de partes diversas de la red, véase la Figura 5.1

$\rho$  = Resistividad media del terreno, en ohm-m

1.83
------

MALLA A

1.74	1.74
1.74	1.74

MALLA B

1.73	1.33	1.33	1.73
1.33	1.16	1.16	1.33
1.33	1.16	1.16	1.33
1.73	1.33	1.33	1.73

MALLA C

1.9	1.6	1.4	1.2	1.2	1.4	1.6	1.9
1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.6
1.4	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.4
1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2
1.2	1.1	1.0	1.0	1.0	1.1	1.1	1.2
1.4	1.1	1.1	1.0	1.0	1.1	1.1	1.4
1.6	1.2	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.6
1.9	1.6	1.4	1.2	1.2	1.4	1.6	1.9

MALLA D

1.00	0.90	0.80	0.80	1.82
0.80	0.70	0.70	0.70	
0.80	0.70	0.60	0.70	
0.80	0.70	0.70	0.70	
2.13		2.23		

MALLA E

1.00	0.80	0.60	0.80	1.82
0.80	0.70	0.60	0.70	
0.80	0.70	0.60	0.60	
0.80	0.70	0.60	0.70	
2.13		2.23		

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. $K_i = \frac{K_m \times K_i}{KM}$ (Experim)	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  $K_i = 0.650 + 0.172 n$  EN DONDE "n" ES EL NUMERO DE CONDUCTORES PARALELOS EN UNA DIRECCION.

DETERMINACION DE LOS COEFICIENTES  $K_m$  Y  $K_i$  DE LA ECUACION.

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

FIG. 5.1

$I$  = Corriente total efectiva máxima, en amperes, que fluye entre la red y tierra; -- ajustada para permitir la reducción o crecimiento futuro del sistema.

$L$  = Longitud total del conductor en metros.

El factor de irregularidad  $K_i$  fluctua entre -- 1.2 y 2 o más como se observa en la Figura 5.1, la cual depende de la geometría de la red. En la misma Figura están anotados los valores de  $K_m$   $K_i$ . Observe que los valores más altos resultan en las esquinas de la red, debiéndose al hecho de que la corriente se concentra más en las aristas y las esquinas.

Una vez calculadas las tensiones de paso de -- contacto y de malla, y utilizando la longitud aproximada -- del diseño preliminar, se comparan estas tensiones con los valores tolerables del cuerpo humano, y en esta forma se sabe si el diseño queda dentro de los límites de seguridad requeridos.

### 5.2.3 CALCULO DE LA LONGITUD TOTAL DEL CONDUCTOR.

Si igualamos el valor de  $E_{\text{malla}}$  de la ecuación (5.5) al máximo valor tolerable de la ecuación (4.6) se obtiene.

$$\frac{K_m K_i \rho_i}{L} = \frac{116 + 0.17 \rho_s}{\sqrt{t}} \quad 5.7$$

Por lo que la longitud del conductor necesaria para mantener la tensión de malla dentro de los límites de seguridad es:

$$L = \frac{K_m K_i \rho_i \sqrt{t}}{116 + 0.17 \rho_s} \quad 5.8$$

Donde:

$\rho_s$  = Resistividad superficial del terreno -  
 $\Omega$  /metro.

$t$  = Duración máxima de la falla, en segundos.

**5.2.4 CALCULO DE LA ELEVACION MAXIMA DE TENSION DE LA RED Y DE LAS TENSIONES DE PASO EN LA PERIFERIA DE LA MALLA.**

El aumento máximo de tensión (E) de la red sobre un punto remoto de la tierra, se obtiene multiplicando el valor de R de toda la malla por la corriente total de la falla.

$$E = RI \quad 5.9$$

Donde:

I = Corriente máxima de corto circuito

$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L}$  Resistencia total de toda la malla.

$\rho$  = Resistividad media en ohms - metros.

L = Longitud total de los conductores de la malla en metros.

r = Radio del círculo que tenga la misma área que la ocupada por la malla en metros.

Para valores bajos de R y/o I la elevación de tensión E puede resultar dentro de los valores de seguridad, de no ser así es necesario hacer una comprobación de las tensiones locales.

Dentro de la malla es posible reducir las tensiones de contacto y de paso a cualquier valor deseado utilizando una placa sólida.

Para calcular las tensiones fuera de la malla se utiliza la siguiente ecuación.

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \quad 5.10$$

Donde:

$K_s$ : Coeficiente que toma en cuenta el efecto de número de conductores "N" de la malla, el espaciamento D y la profundidad, y su valor se calcula como sigue:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} + \dots \right] \quad 5.11$$

El número de términos dentro del paréntesis es igual al número de conductores transversales en la malla básica excluyéndose las conexiones de los conductores paralelos  $K_i$ ,  $\rho$ ,  $I$  y  $L$  son los parámetros definidos en la ecuación (5.6).

Cuando las resistividades de la superficie dentro de la malla como fuera de ella, son semejantes las tensiones de paso en la periferia no resultan peligrosas. Pero cuando la seguridad se consigue sólo utilizando roca triturada de alta resistividad, colocada en la superficie y si dicha roca no se prolonga fuera del sistema de tierra, las tensiones de paso fuera de la malla pueden resultar peligrosas. Esto se evita prolongando la capa de roca triturada o eliminando esquinas en la malla.

### 5.3 CALCULO DE LA RED DE TIERRAS.

En base a los capitulos anteriores se tienen los siguientes datos:

- a) Corriente de corto circuito  $I_{cc}$  19076 amperes.
- b) Resistividad del terreno  $\rho$  100  $\Omega$ /metro
- c) Resistividad superficial del terreno  $\rho_s$  7500  $\Omega$ /metro
- d) Profundidad de instalación de la malla  $h$  0.5 metros

- e) Tiempo de duración de la falla  $t$             0.0666 segundos  
 f) Temperatura máxima para conductores soldables  $t_m$     450°C  
 g) Temperatura ambiente  $t_a$                             40°C

**CALCULAR:**

1. Calibre del conductor
2. Longitud del conductor de la malla
3. Número de conductores lado corto
4. Número de conductores lado largo
5. Espaciamientos
6. Resistencia de la red
7. Tensión de toque tolerable
8. Tensión de la malla
9. Tensión de paso
10. Tensión de transferencia

**DESARROLLO:**

1. Para determinar el calibre del conductor - aplicamos la ecuación 5.1.

$$A = \frac{I}{\sqrt{\log \frac{(t_m - t_a) + 1}{234 + t_a} \cdot 10^{33t}}}$$

$$A = \frac{19076}{\sqrt{\frac{\log_{10}\left(\frac{450-40}{234+40} + 1\right)}{(33)(0.0666)}}} = \frac{19076}{\sqrt{\frac{0.3973}{2.1978}}} = \frac{19076}{\sqrt{0.18}}$$

$$A = 44866 \text{ C.M.}$$

De la tabla 5.1 considerando el tiempo mínimo de duración de la falla (0.5 segundos), obtenemos para el cable:

$$19076 \times 5 = 95380 \text{ C.M.}$$

lo que nos representa comercialmente un calibre de 1/0. - -  
AWG = 105600 C.M.

El std. 80-1976 de la IEEE recomienda para protección mecánica el uso de calibre 2/0 AWG.

## 2. Longitud mínima del conductor de la malla.

Para determinar este valor usamos la ecuación .

5.8.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17\rho_s}$$

y la ecuación 5.6

D - espaciamento

d - diámetro

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left( \frac{3}{4} \right) \left( \frac{5}{6} \right) \left( \frac{7}{8} \right) \left( \frac{9}{10} \right) \dots \text{ etc.}$$

De la tabla 5.1

$$K_i = 0.650 + 0.172 n$$

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

$$d = 0.0134 \text{ m}$$

$$\text{Para } n = 9 \quad K_i = 2.198$$

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

$$K_m = \frac{1}{6.2832} \ln \frac{6^2}{16(0.5)(0.0134)} + \frac{1}{3.1416} \ln \frac{3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11 \times 13 \times 15 \times 17}{4 \times 6 \times 8 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16 \times 20}$$

$$= 0.1592 \ln \frac{36}{0.1072} + 0.3183 \ln \frac{654729075}{1857945600}$$

$$= 0.1591549431 \ln 335.8208955 + 0.3183098861 \ln 0.352394104$$

## 2. Longitud mínima del conductor de la malla.

Para determinar este valor usamos la ecuación .

5.8.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{116 + 0.17\rho_s}$$

y la ecuación 5.6

D - espaciamiento

d - diámetro

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \text{Ln} \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \text{Ln} \left( \frac{3}{4} \right) \left( \frac{5}{6} \right) \left( \frac{7}{8} \right) \left( \frac{9}{10} \right) \dots \text{etc.}$$

De la tabla 5.1

$$K_i = 0.650 + 0.172 n$$

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

$$d = 0.0134 \text{ m}$$

$$\text{Para } n = 9 \quad K_i = 2.198$$

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

$$\begin{aligned} K_m &= \frac{1}{6.2832} \text{Ln} \frac{6^2}{16(0.5)(0.0134)} + \frac{1}{3.1416} \text{Ln} \frac{3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11 \times 13 \times 15 \times 17}{4 \times 6 \times 8 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16 \times 20} \\ &= 0.1592 \text{Ln} \frac{36}{0.1072} + 0.3183 \text{Ln} \frac{654729075}{1857945600} \end{aligned}$$

$$= 0.1591549431 \text{Ln} 335.8208955 + 0.3183098861 \text{Ln} 0.352394104$$

$$= 0.9257371357 - 0.3319988397$$

$$K_m = 0.593738296$$

$$L = \frac{(0.593738296)(2.198)(100)(19076)(0.258)}{116 + 0.17(7.500)} = \frac{642287.9432}{1391}$$

$$L = 461.745466 \text{ metros}$$

Largo de malla 55.5 m

Ancho de malla 35.0 m

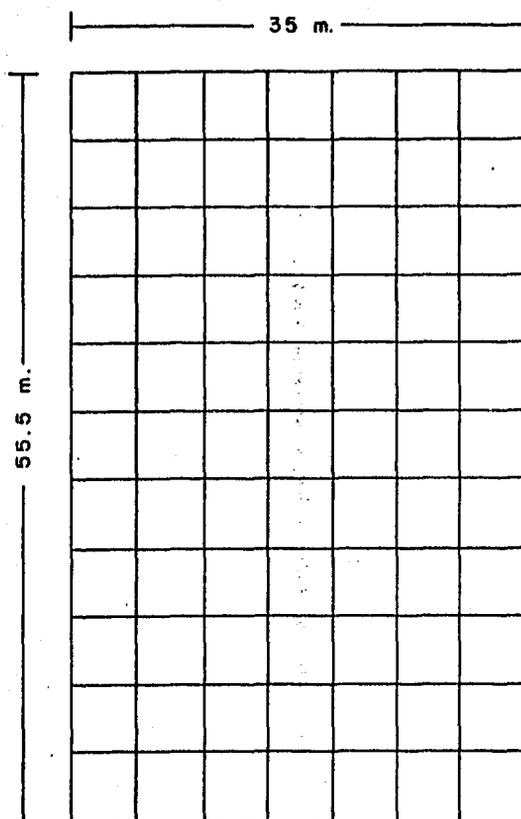
Para la malla preliminar con separación de 6m entre cables tenemos:

$$\text{Cables transversales } \frac{55.5}{6} + 1 = 9.25 + 1 \approx 11 \text{ cables}$$

$$\text{Longitud de cables } 35 \times 11 = 385 \text{ m}$$

$$\text{Cables longitudinales } \frac{35}{6} + 1 = 5.83 + 1 \approx 7 \text{ cables}$$

$$\text{long cab} = 7 \times 55.5 = 388.5$$



Malla preliminar

## RESISTENCIA DE LA MALLA

Para el calculo de este valor aplicaremos la ecuación:

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

$\rho$  = Resistividad media  $\Omega/\text{m}$

$L$  = Longitud total de la malla (m)

$r$  = Radio del circulo que tenga la misma área  
que la ocupada por la malla (m)

$$\text{Si } A = 55.5 \times 35 = 1942.5 \text{ m}^2$$

$$r = \sqrt{\frac{1942.5}{\pi}} = 24.86 \text{ m}$$

$$\Rightarrow R = \frac{100}{4(24.86)} + \frac{100}{461.74} = 1.0056 + 0.2165 = 1.2221 \Omega$$

Con  $L$  estimada preliminar ( $L = 7735$ )

$$R = \frac{100}{4(24.86)} + \frac{100}{773.5} = 1.0056 + 0.129 = 1.1349 \Omega$$

Consideramos el valor que nos da la menor resistencia.

Aumento máximo del potencial de la red utilizando la ecuación 5.9

$$E_{\max} = I R$$

$$E_{\max} = (19076)(1.1349) = 21649.352 \text{ Votts.}$$

Tensión de paso en la periferia

Las ecuaciones 5.10 y 5.11 nos permiten calcular este valor.

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \rho \frac{I}{L} \dots \quad 5.10$$

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

Si  $h = 0.5$     $D = 6m$     $K_i = 2.198$

$$K_s = \frac{1}{3.1416} \left[ \frac{1}{(2)(0.5)} + \frac{1}{6+0.5} + \frac{1}{12} + \frac{1}{18} + \frac{1}{24} + \frac{1}{30} + \frac{1}{36} + \frac{1}{42} + \frac{1}{48} + \frac{1}{54} + \frac{1}{60} \right]$$

$$= 0.3183 \left[ 1 + 0.1538 + \dots + 1 \right]$$

$$= 0.3183 \left[ 1.475 \right] = 0.4696$$

$$\Rightarrow E_{\text{paso}} = (0.4696)(2.198)(100) \frac{19076}{773.5} = 2545.556 \text{ Votts.}$$

Valor permisible de la ecuación 4.6

$$\frac{116 + 0.7 \rho s}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.7 (7500)}{\sqrt{0.0666}} = \frac{5366}{.25806} = 20792 \text{ V}$$

Tensiones internas de paso y toque

$$E_{\text{paso}} = \frac{\rho E}{\pi} \left[ \frac{x}{x^2 h^2} + \frac{D+x}{(D+x)^2 + h^2} + \frac{1}{2D+x} + \frac{1}{3D+x} + \dots + \right]$$

el caso más severo es cuando  $x = h$

$$\begin{aligned} \Rightarrow E_{\text{paso}} &= \frac{(100)(19076)}{3.1416} \left[ \frac{0.5}{(0.5)^2 + (0.5)^2} + \frac{1}{(6.5)^2 + (0.5)^2} + \right. \\ &+ \frac{1}{12+0.5} + \frac{1}{18+0.5} + \frac{1}{24+0.5} + \frac{1}{30+0.5} + \frac{1}{36+0.5} + \frac{1}{42+0.5} + \\ &\left. + \frac{1}{48+0.5} + \frac{1}{54+0.5} + \frac{1}{60+0.5} \right] \end{aligned}$$

$$E_{\text{paso}} = 607207.938 \quad [1.467]$$

$$\Rightarrow E_{\text{paso}} = 890774.045 \text{ Volts}$$

## APENDICE A. ESTUDIO DEL CORTO CIRCUITO

### A.1 INTRODUCCION

El estudio de corto circuito en un sistema de potencia es importante por la información que se obtiene y que se aplica en la determinación de las capacidades interruptivas, selección y coordinación de protecciones, cálculo de esfuerzos dinámicos y térmicos en las instalaciones, etc. Hay básicamente tres fuentes que producen corrientes de corto circuito, siendo éstas las siguientes:

1. Generadores
2. Motores síncronos y condensadores síncronos
3. Motores de inducción

A estas fuentes de corriente de corto circuito se les denomina elementos activos y a las fuentes o elementos que limitan estas corrientes se les denomina elementos pasivos del sistema.

Las principales fuentes de corto circuito son los generadores. En un generador la corriente de corto cir

cuito es limitado por sus reactancias que son: Reactancia - subtransitoria  $X_d''$ , transitoria  $X_d'$  y síncrona  $X_d$ .

La reactancia subtransitoria  $X_d''$  es la reactancia aparente del estator en el instante mismo en que se produce el corto circuito y nos determina la corriente que circula en el devanado del estator durante los primeros ciclos.

La reactancia transitoria  $X_d'$  es la reactancia aparente inicial del estator considerando el devanado del campo y no tomando en cuenta los efectos de los devanados amortiguadores. La reactancia transitoria hace sentir sus efectos después de 1.5 segundos o más, dependiendo de la construcción de la máquina.

La reactancia síncrona  $X_d$ . Es la reactancia que determina el flujo de corriente de corto circuito en condición de estado estable.

Sólo se hace sentir sus efectos después de transcurridos algunos segundos desde el instante en que se ha producido el corto circuito y por tanto carece de valor en los cálculos de la corriente de corto circuito.

Un motor síncrono tiene las mismas clases de reactancias que un generador, aunque presentan diferente valor. En los motores de inducción solamente existe la reactancia subtransitoria, ya que las barras del rotor actúan como los arrollamientos amortiguadores de un generador.

El hecho de asignar tres reactancias a las máquinas rotatorias constituye una simplificación de los métodos para determinar las corrientes de corto circuito suministrada en instantes fijos.

#### METODO DE LAS COMPONENTES SIMETRICAS

El método de las componentes simétricas consiste en la reducción de cualquier sistema de potencia trifásico desbalanceado de fasores, en tres sistemas simétricos balanceados y son: componentes de secuencia positiva, negativa y cero.

Esta reducción puede estar en términos de corriente, tensión o impedancia.

Las componentes de secuencia positiva consisten en tres fasores de igual magnitud desfasados  $120^\circ$  con el mismo sentido de giro que el de las fuentes de generación, (ver figura A.1-a). Las componentes de secuencia negativa consisten de tres fasores de igual magnitud, desplazadas  $120^\circ$  con una secuencia de fase opuesta a la de secuencia positiva (ver figura A.1-b). Las componentes de secuencia cero consisten de tres fasores iguales en magnitud y en fase tal como lo muestra la figura A.1-c.

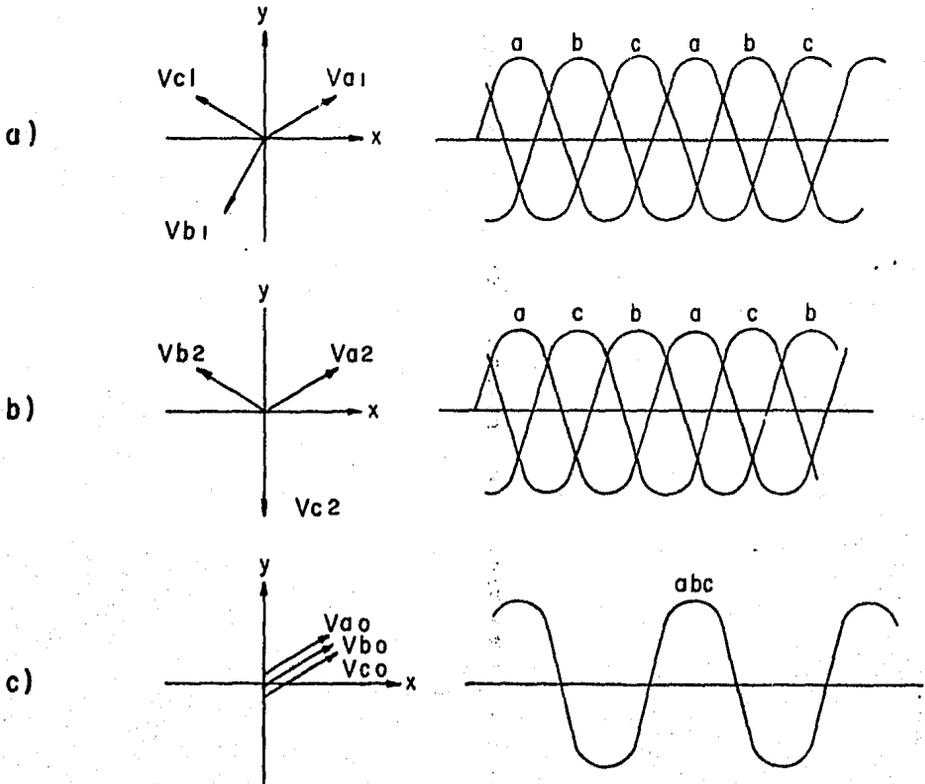


FIGURA A.1 COMPONENTES DE SECUENCIA DE VOLTAJES

Para identificar a las componentes de secuencia positiva le asignaremos el subíndice 1, para las de secuencia negativa el subíndice 2 y a las de secuencia cero el subíndice 0.

De acuerdo a la figura A.1, los tres fasores pueden expresarse en función de uno sólo, por convención se expresarán en función de el fasor  $V_a$ .

SECUENCIA  
POSITIVA

$$\dot{V}_{a_1} = \dot{V}_{a_1}$$

$$\dot{V}_{b_1} = a^2 \dot{V}_{a_1}$$

$$\dot{V}_{c_1} = a \dot{V}_{a_1}$$

SECUENCIA  
NEGATIVA

$$\dot{V}_{a_2} = \dot{V}_{a_2}$$

$$\dot{V}_{b_2} = a \dot{V}_{a_2}$$

$$\dot{V}_{c_2} = a^2 \dot{V}_{a_2}$$

SECUENCIA  
CERO

$$\dot{V}_{a_0} = \dot{V}_{a_0}$$

$$\dot{V}_{b_0} = \dot{V}_{a_0}$$

$$\dot{V}_{c_0} = \dot{V}_{a_0}$$

A.

El operador  $a$  es un fasor unitario de magnitud unitaria y desplazamiento de  $120^\circ$ .

$$a = 1 \angle 120^\circ$$

En la figura A.2 se presentan funciones del --  
operador a.

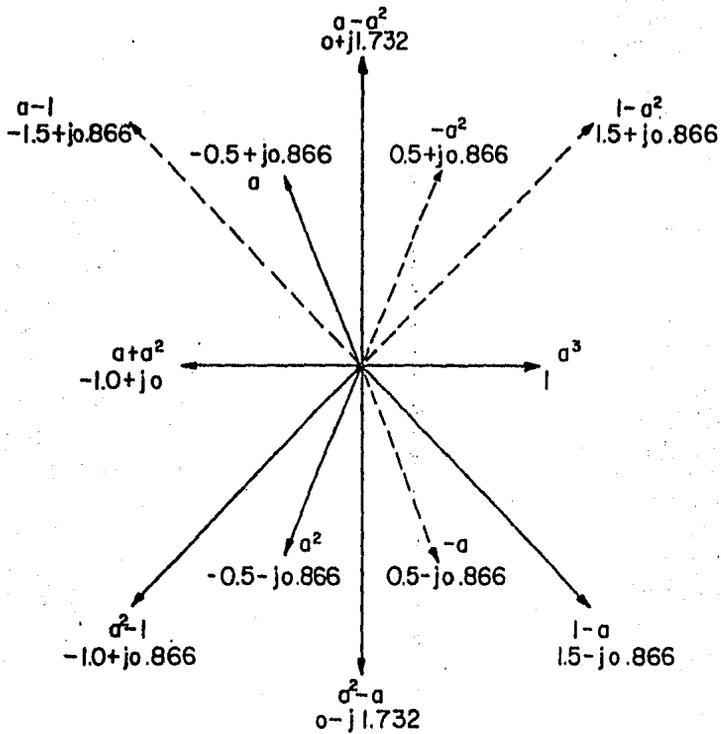


FIGURA A.2 FUNCIONES DEL OPERADOR a

Entonces el sistema trifásico de fasores será la suma de -  
las tres componentes

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_a &= \dot{V}_{a_1} + \dot{V}_{a_2} + \dot{V}_{a_0} \\
 \dot{V}_b &= \dot{V}_{b_1} + \dot{V}_{b_2} + \dot{V}_{b_0} \\
 \dot{V}_c &= \dot{V}_{c_1} + \dot{V}_{c_2} + \dot{V}_{c_0}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{aligned}} \right\} \text{----- A.2}$$

Por lo que substituyendo las ecuaciones A.1 en A.2, obtenemos:

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_a &= \dot{V}_{a_1} + \dot{V}_{a_2} + \dot{V}_{a_0} \\
 \dot{V}_b &= a^2 \dot{V}_{a_1} + a \dot{V}_{a_2} + \dot{V}_{a_0} \\
 \dot{V}_c &= a \dot{V}_{a_1} + a^2 \dot{V}_{a_2} + \dot{V}_{a_0}
 \end{aligned}
 \left. \vphantom{\begin{aligned} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{aligned}} \right\} \text{----- A.3}$$

Por conveniencia escribimos el sistema de la ecuación A.3 en la forma siguiente

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{V}}_a &= \dot{\mathbf{V}}_{a_0} + \dot{\mathbf{V}}_{a_1} + \dot{\mathbf{V}}_{a_2} \\ \dot{\mathbf{V}}_b &= \dot{\mathbf{V}}_a + a^2 \dot{\mathbf{V}}_{a_1} + a \dot{\mathbf{V}}_{a_2} \\ \dot{\mathbf{V}}_c &= \dot{\mathbf{V}}_{c_0} + a \dot{\mathbf{V}}_{a_1} + a^2 \dot{\mathbf{V}}_{a_2} \end{aligned} \right\} \text{--- A.4}$$

Si la ecuación A.4 la expresamos en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_a \\ \dot{\mathbf{V}}_b \\ \dot{\mathbf{V}}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{V}}_{a_0} \\ \dot{\mathbf{V}}_{a_1} \\ \dot{\mathbf{V}}_{a_2} \end{bmatrix}$$

Sea

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix} = [\mathbf{A}]$$

Entonces:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_a \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = [A] \begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} \quad \text{A.5}$$

Del sistema dado por la ecuación A.6 se pueden encontrar - las componentes de secuencia para un conjunto de fasores - trifásicos, tal como se muestra a continuación:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} = [A]^{-1} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{A.6}$$

Donde  $[A]^{-1}$  es la matriz inversa de  $[A]$ .

$$[A]^{-1} = \frac{1}{\det A} [A]_1^*$$

Donde:

$[A]_1^*$  es la matriz de cofactores de  $[A]^*$

$[A]^*$  es la transpuesta de  $[A]$

$$\det[A] = \begin{vmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{vmatrix}$$

Resolviendo por menores

$$= 1 \begin{vmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{vmatrix} - 1 \begin{vmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{vmatrix} + 1 \begin{vmatrix} 1 & a^2 \\ 1 & a \end{vmatrix}$$

$$= a^4 - a^2 - (a^2 - a) + (a - a^2) ; a^4 = a$$

$$= a - a^2 - a^2 + a + a - a^2$$

$$= 3(a - a^2)$$

La matriz transpuesta de  $[A]$  será:

$$[A]^* = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{bmatrix}$$

Y la matriz de cofactores de  $[A]^*$  será:

$$[A]_1^* = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} a^2 & a \\ a & a^2 \end{bmatrix} & - \begin{bmatrix} 1 & a \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & a^2 \\ 1 & a \end{bmatrix} \\ - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a & a^2 \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} & - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} \\ \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ a^2 & a \end{bmatrix} & - \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a \end{bmatrix} & \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & a^2 \end{bmatrix} \end{bmatrix}$$

$$[A]_1^* = \begin{bmatrix} a - a^2 & -(a^2 - a) & a - a^2 \\ - (a^2 - a) & a^2 - 1 & -(a - 1) \\ a - a^2 & -(a - 1) & -a^2 - 1 \end{bmatrix}$$

Por lo tanto:

$$[A]^{-1} = \frac{1}{3(a-a^2)} \begin{bmatrix} a - a^2 & a - a^2 & a - a^2 \\ a - a^2 & a^2 - 1 & 1 - a \\ a - a^2 & 1 - a & a^2 - 1 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \quad \text{A.7}$$

Por lo tanto substituyendo A.7 en A.6 las componentes de se cuencia vendrán dadas por:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{a_0} \\ \dot{V}_{a_1} \\ \dot{V}_{a_2} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_a \\ \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix}$$

y entonces

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_{a_0} &= \frac{1}{3} (\dot{V}_a + \dot{V}_b + \dot{V}_c) \\ \dot{V}_{a_1} &= \frac{1}{3} (\dot{V}_a + a\dot{V}_b + a^2\dot{V}_c) \\ \dot{V}_{a_2} &= \frac{1}{3} (\dot{V}_a + a^2\dot{V}_b + a\dot{V}_c) \end{aligned} \right\} \text{--- A.8}$$

Los desarrollos anteriores se cumplen para fasores de corriente, por lo tanto:

$$\dot{I}_{a0} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c)$$

$$\dot{I}_{a1} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) \quad \text{A.9}$$

$$\dot{I}_{a2} = \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c)$$

Es importante señalar que las componentes de secuencia positiva, negativa y cero se tienen que resolver por separado, dado que el sistema debe estar desacoplado para su análisis.

Asumiendo que las componentes de secuencia +o pueden existir en un sistema de potencia trifásico, es importante señalar las relaciones existentes en ellos.

En el sistema simétrico o balanceado, se cumple que: a) las componentes de secuencia positiva producen únicamente caídas de (tensión) con secuencia (positiva); b) las componentes de secuencia negativa producen únicamente

caídas de tensión con secuencia negativa; y c) las componentes de secuencia cero producen únicamente caídas de tensión con secuencia cero. Un sistema de potencia balanceado o simétrico es aquel por el cual las tensiones generadas por -- las máquinas rotatorias son iguales en fase y desplazados  $120^\circ$ , y las impedancias en las tres fases son iguales en magnitud.

En cualquier sistema no balanceado o asimétrico se cumple que: a) las corrientes de secuencia positiva producen caídas de tensión de secuencia positiva, negativa y posiblemente de secuencia cero, b) las corrientes de secuencia negativa producen caídas de tensión de secuencia positiva, negativa y posiblemente de secuencia cero, y c) las corrientes de secuencia cero producen caídas de tensión de secuencia positiva, negativa y cero.

APENDICE B MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO.

Las mediciones tienen por objeto establecer el valor real de la resistencia a tierra de la malla y así de terminar la elevación de su tensión durante una falla a tierra, como verificación de los cálculos hechos y poder saber si resultan efectivos para limitar los gradientes a valores tolerables. La resistencia total de una nueva red tiende a estabilizarse en el primer o en los dos primeros años, debido a los cambios ambientales cíclicos anuales. Sin embargo, es conveniente hacer mediciones de la resistencia de una nueva red, al quedar ésta terminada. Las variaciones de la resistencia de redes grandes, a pesar de estar enterradas a profundidades menores de 1 m, no parecen guardar una relación significativa con las variaciones observadas en la resistividad del terreno a esa profundidad. Esta situación indica que la resistencia que ofrecen las redes instaladas en grandes áreas de terreno depende de la resistividad de las capas más profundas donde se registran variaciones menores.

Por consiguiente, la resistencia será prácticamente la de todo el suelo que rodea al electrodo, debido a

que es única; aunque teóricamente esto comprende una distancia infinita, en la práctica la mayor proporción, aproximadamente 98% del total, se encuentra contenida dentro de una distancia finita. Por lo que el área que rodea al electrodo se considerará su área de influencia. Durante las mediciones se tomaron en cuenta dos factores: primero, el área total donde queda contenido el valor de la resistencia del electrodo (98%) deberá incluirse en la medición, y segundo, si se utiliza un electrodo auxiliar, es fundamental buscar que el área de influencia de éste no se traslape con el área del principal o del electrodo a medir.

Existen varios métodos para determinar la resistencia de las mallas de tierra, como los de dos o tres puntos, sin embargo es preferible utilizar, por sus ventajas, el método llamado de caída de tensión.

#### B.1 METODO DE CAIDA DE TENSION

Este método es de uso común y se muestra en la figura B.1, donde (E) es el electrodo de tierra bajo prueba (P) y (C) son dos electrodos auxiliares. Al circular una corriente conocida (I) entre los electrodos (E) y (C) midiendo la diferencia de tensión (V) entre (E) y (P), la relación  $V/I$  dará el valor de resistencia.

Es evidente que para obtener la resistencia de (E), no se deberá incluir la de los electrodos auxiliares. Puesto que la resistencia del electrodo (C), es uno de los factores que determinan la magnitud de la corriente (I) y ésta a su vez, determina el valor (V), la relación  $V/I$  es independiente de la resistencia de (C). Asimismo, a pesar de que la resistencia del electrodo auxiliar (P) es parte del circuito empleado para medir la diferencia de tensión (V) y como usualmente la medición se realiza con un aparato de equilibrio en cero, no circulará corriente a través de (P) en el instante de lograr el equilibrio para la medición.

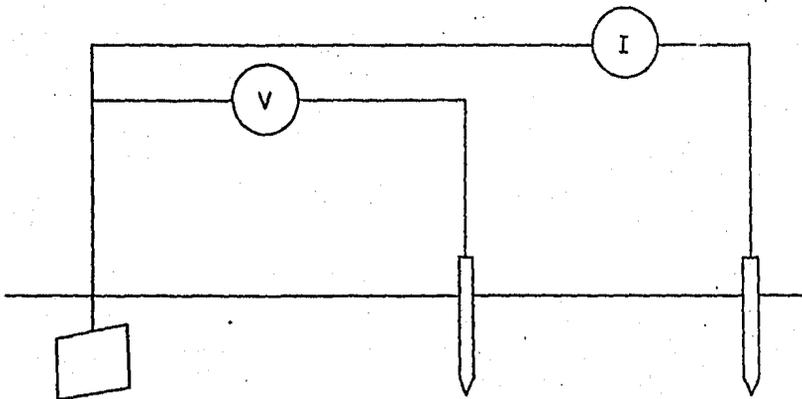


FIGURA B.1 METODO CLASICO DE CAIDA DE TENSION

## B.2 CURVAS DE RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO.

Como se inició con anterioridad, durante las mediciones de resistencia a tierra de un electrodo es fundamental evitar el traslape de las áreas de influencia de los tres lectrodos que intervienen, lo que pueden lograrse, en general, al graficar una curva de la resistencia a tierra - como se indica en la figura B.2.

Si por ejemplo, el electrodo de corriente se localiza a la distancia ( $D_1$ ) del electrodo de prueba, al realizar mediciones variando la distancia del electrodo de tensión (P) a partir del electrodo por medir (E), hasta llegar a la posición del electrodo de corriente (I), se obtendrá - la curva EFG. Donde se observa que el valor de la resistencia se incrementa continuamente, a medida que se desplaza el electrodo de tensión a lo largo de la línea que une al electrodo de corriente. Esto se debe al traslape de las áreas de influencia.

Ahora bien, si el electrodo de corriente se coloca a la distancia  $D_2$ , de tal manera que exista una zona de influencia de cada uno

de los electrodos, se obtendrá una curva del tipo EFABD, - en la que se encontrará que entre los puntos A y B el valor presenta estabilidad. Lo que indica que en este punto no hay superposición de áreas de influencia, por consiguiente, este valor corresponde a la resistencia real de electrodo.

En primer término, como recomendación práctica y para evitar el traslape de áreas de influencia, se sugiere colocar el electrodo (C) a una distancia  $4D$  de (E), donde  $D$  es el diámetro equivalente del área del electrodo de tierra. Si con esta distancia no se obtienen 3 valores -- iguales de resistencia (porción A-B de la figura B.2), se deberá incrementar la distancia a  $6D$ .

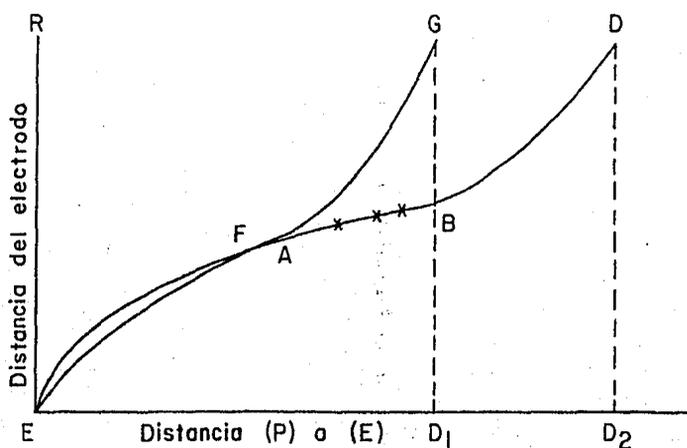


FIGURA B.2

## CONCLUSIONES

1. Establecer los límites de seguridad en las diferencias de tensión, que pueden existir en una subestación entre distintos puntos con los que puede hacer contacto el cuerpo humano, cuando se produce una falla es de vital importancia, ya que con ello se garantiza la seguridad del personal y del equipo.
2. Los efectos de la corriente eléctrica son consecuencia de la magnitud de la corriente y de la duración del choque.
3. Eliminar la falla en muy corto tiempo es de mucha importancia, como factor de seguridad y además para conservar la estabilidad en grandes sistemas interconectados.
4. Existen diferentes métodos para conectar a tierra el neutro de sistemas eléctricos de potencia, cada método tiene características particulares las cuales se resumen en la tabla 3-1.
5. Los criterios y parametros de diseño de la red de tie

rras se establecen en función de proporcionar un elemento de conexión a tierra de los neutros tanques y carcazas de cada uno de los diferentes equipos dentro de su area.

6. Para el diseño de una red de tierras debe considerarse factores tales como: la resistividad del suelo, en función de las grandes variaciones de la composición del terreno, los cambios durante las estaciones del año y su estructura transversal y longitudinal los cuales plantean la necesidad de definir la metodología de medición e interpretación para ser considerada parametro de diseño.

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

- "REGLAMENTO DE OBRAS E INSTALACIONES ELECTRICAS"
- "TRANSFORMADORES PARA LA INDUSTRIA ELECTRICA"  
Richard L. Beam, Nicholas Chackom.
- "IEEE GUIDE FOR SAFETY IN SUBSTATIONS GROUDING"  
STD80-1976
- "THERESHOLD 60-CYCLE FIBRILLATING CURRENTS"  
C.F. Dalziel, Aiee Trans. Vol. 79, parte III, 1960
- "REEVALUATIONS OF LETHAL ELECTRIC CURRENTS"  
C.F. Dalziel y R. Lee, IEEE Transactions on Industry  
and General Applications Vol. IGA-4, núm. 5 sept/oct, 1968
- NEUTRAL GROUNDING DEVICES  
AIEE STD-32
- NATIONAL ELECTRIC CODE, U.S.A.
- "A METHOD OF MEASURING EARTH RESISTIVITY"  
F. Wenner,  
Scientific paper of the bureau of standards No. 258
- "A NEW CONTRIBUTIONS TO SUBSURFACE STUDIES BY MEANS OF  
ELECTRICAL MEASUREMENTS IN DRILL HOLES"  
C. y M. Schlumberguer y E.G. Leonardon  
Technical publication No. 503, The American Institute  
of Mining and Metalurgical Engineers.