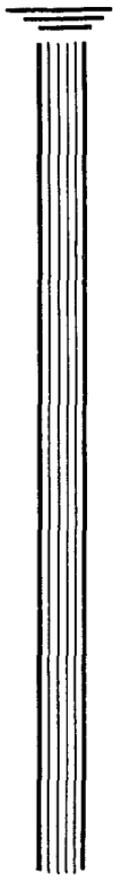


2/173



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA
DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



SISTEMA DE
TIERRAS

T E S I S

Que para obtener el Título de:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P r e s e n t a:
ALFREDO MADRIGAL OCHOA

Director de Tesis:
ING. FRANCISCO LOPEZ RIVAS

México, D. F.

1988



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 está 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

	Pág.
INTRODUCCION	1
CAPITULO 1. DEFINICIONES	2
CAPITULO 2. CONSIDERACIONES GENERALES	6
2.1. Objetivos	6
2.2. Peligro de un choque eléctrico ..	6
CAPITULO 3. METODOS DE CONEXION A TIERRA DEL NEUTRO DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA . . .	13
3.1. Sólidamente conectado a tierra ..	16
3.2. Conexión a tierra a través de una resistencia	17
3.3. Conexión a tierra a través de una reactancia	19
3.4. Conexión a tierra mediante un neu tralizador de falla a tierra . . .	19
3.5. Transformadores para conexión a - tierra	21
CAPITULO 4. CRITERIOS Y PARAMETROS DE DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS PARA UNA SUBESTACION . .	26
4.1. Criterios de diseño	26
4.2. Parámetros de diseño	31
4.3. Mediciones de la resistividad del terreno	34

CAPITULO 5. CALCULO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES ELECTRICAS	45
5.1. Datos para el diseño.	45
5.2. Determinación de los elementos de la red	45
5.3. Cálculo de la red de tierras	55
APENDICE A. ESTUDIO DEL CORTO CIRCUITO	63
APENDICE B. MEDICION DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ELECTRODO	76
CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA	

INTRODUCCION.

La consideración tradicional para el diseño de las redes de tierras 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 este trabajo se realiza un análisis de los crite--rios 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; también se propone una metodología para la elaboración de diseños preliminares así como su descripción matemática.

CAPITULO 1. DEFINICIONES.

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 todas los puntos del sistema a la porción específica, no sea mayor de tres.

$$\frac{X_0}{X_1} \leq 3 \quad (1.1)$$

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.

$$\frac{R_0}{X_1} \leq 1 \quad (1.2)$$

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 de tierras.

Corriente residual: Es la suma vectorial de las corrientes exclusivamente en los conductores de fase. Su valor normal es $3I_0$, donde I_0 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 algunas cargas conectadas en estrella o en bancos de transformadores, o bien fluyen en la delta de los mismos transformadores, y 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 las 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.

Tensión de paso: 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.

Tensión de contacto: Es la tensión máxima que experimentará una persona que se encuentre 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.

Tensión de transferencia: Son las tensiones que se -- presentan en los sitios alejados del lugar donde ocurre la fa lla.

Neutralizador de falla a tierra: Es un dispositivo -- para conexión a tierra, el cual proporciona una componente in ductiva de corriente durante una falla a tierra que es aproxi madamente igual a la componente capacitiva de frecuencia nomi nal de la corriente de falla o por lo tanto la neutraliza, de esta manera se origina un sistema resonante conectado a tie-- rra.

Transformador para conexión 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 las 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 atmosféricos; límites que sirvan de base para un diseño adecuado.
- 2) Suministrar una guía metódica para el diseño práctico de un sistema de tierras basado en esos límites.
- 3) Recomendar los métodos de prueba que ayuden a obtener los datos técnicos para el diseño y que sirvan para comprobar si la construcción de ese sistema resulto 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 eléctrico.

La importancia de los objetivos indicados es más clara, si se toman en cuenta los efectos que produce el paso de la corriente eléctrica 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 la corriente se da, por la ley de Ohm, $I = E/Z$, donde E es la tensión aplicada en dos puntos del circuito del que forma parte el cuerpo humano y Z es la impedancia total entre esos dos puntos y no sólo lo que existe entre el cuerpo humano y uno de ellos. A frecuencias bajas la impedancia del cuerpo humano 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 instantánea y dejan con frecuencia una quemadura profunda. 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 sea demostrado que la impedancia se reduce a menos del 50% con un aumento de la frecuencia de 50 a 50,000 Hz. La resistencia de la piel humana, a las frecuencias normales usadas en los sistemas eléctricos de potencia es 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 100,000 a 300,000 ohms/cm², pero la humedad puede abatirse al 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 un 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 influencias 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 en la piel que - reducen aún más la resistencia. Los contactos sobre una piel lastimada por una cortadura 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 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 reacción 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 la caída 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 por que, a pesar de que la media de las corrientes 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 serenidad 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 el 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, se le denomina corriente de engarrotamiento.

La media de las corrientes límites de engarrotamiento para hombres y mujeres, tienen un valor de 26 a 10.5 mA. 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 el 99.5% de los casos, tales corrientes no producirán efectos de engarrotamiento. Hasta ahora no ha sido posible fijar valores de corriente seguros para niños, debido a que éstos simplemente lloran a valores altos.

Corrientes ligeramente mayores de 10 mA contraen los músculos del tórax de manera que se interrumpe la respiración mediante 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 fibrilación.

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 cardiaca y de la circulación de la sangre, pues induce su coagulación. Por lo 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, aunque también se sacrifican animales con pesos del corazón y del cuerpo similares al de 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 distintas 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 a la del humano durante un accidente.

Se concluyó por medio del estudio de estos resultados y de la casualidad de accidentes sufridos por humanos que "LA FIBRILACION VENTRICULAR" a las frecuencias que se utilizan comercialmente, no es probable en un trabajador adulto normal - si la intensidad de la corriente es menor a $116/t_k$ 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 mA

t - tiempo de duración del choque eléctrico en segundos.

Nótese que la ecuación (2.1) da valores de 116 mA - - para $t = 1$ seg 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 graves e inconciencia. Desafortunadamente no existen valores numéricos que den tales magnitudes de corriente.

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 cual da muy poca oportunidad a la víctima de liberarse en 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 evitara un segundo choque.

Se asegura que los choques sucesivos no tienen efec--tos acumulativos sobre la susceptibilidad del corazón a la fibrilación, aunque no se justifica usar 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 produjera fibrilación. Esto sugiere que es posible se presente cierta tolerancia en los choques de recierre, pero no es aconsejable fijar una gafa cuantitativa a este respecto.

Por consiguiente el diseñador de sistemas de tierras no debe ignorar este factor sino permitir un aumento en el valor de t en la ecuación (2.1). Puede por ejemplo, que la severidad de 2 choques seguidos con duración cada uno de 0.1 segundos 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 segundos, debido a que el tiempo aparece en la ecuación - (2.1) elevado a la potencia $\frac{1}{2}$. Aun así quedaría la corriente I_k limitada a un valor menor que se usara para el diseño de - la red.

2.2.7. Importancia de la eliminación rápida 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 razo- nablemente corto, en contraposición con situaciones en las cuales está persiste durante varios minutos o quizás horas. Tanto las pruebas experimentales como las experiencias de campo de- muestran 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 cualquiera de los siguientes métodos:

- 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 sus diagramas equivalentes se muestran en la figura 3.1.

	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	MEJOS 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
APANTARRAYOS	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 DESCONECION 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.

Tabla 3.1 Características del sistema con diferentes métodos de conexión a tierra.

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 conexión a tierra.

3.1. Sólidamente conectado a tierra

Un sistema de potencia está sólidamente conectado a tierra cuando el neutro de un generador o transformador este 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.

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. Entre más alto sea el valor de la corriente de falla trifásica, se dice que el sistema -- 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. Consecuentemente, 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 apartarrayos para sistemas con neutro -- conectado a tierra cuando el sistema esté conectado a través de una baja impedancia para prevenir un 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.

3.2. Conexión a tierra a través 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.

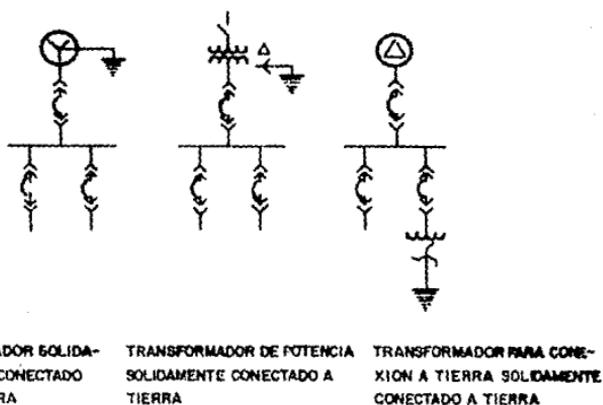


Fig 3.2 Métodos para conectar solidamente a tierra el neutro de sistemas de potencia.

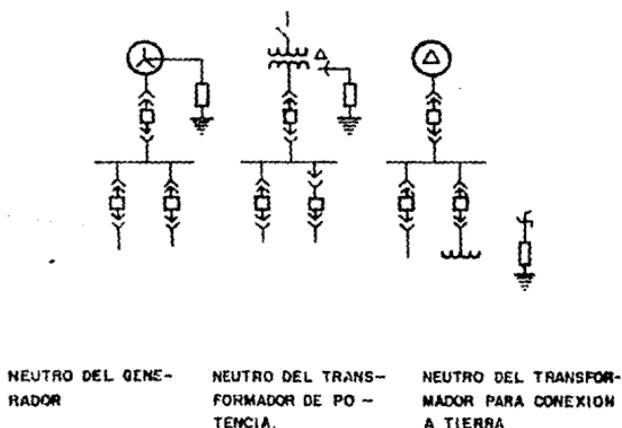


Fig 3.3 Métodos de conexión a tierra del neutro a través de una resistencia de sistemas eléctricos de potencia.

3.3. Conexión a tierra a través de una reactancia.

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 observa; si un sistema va a ser conectado a -- tierra a través de una reactancia, la corriente de falla a -- tierra deberá ser cuando menos el 25% de la corriente de fa-- lla trifásica.

3.4. Conexión a tierra mediante un neutralizador de falla a tierra.

De la figura 3.4 tenemos que la corriente está defasa

da 180° y es aproximadamente igual en magnitud a las corrientes de carga resultante de las dos fases que no presentan falla I_b e I_c . Las componentes inductiva y capacitiva de las corrientes se anulan unas con otras y la única corriente que permanece en la falla es debida a la resistencia, fugas de aislamiento y efecto 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 así la continuidad en el servicio.

Los neutralizadores de fallas han sido usados principalmente en sistemas mayores a los 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.

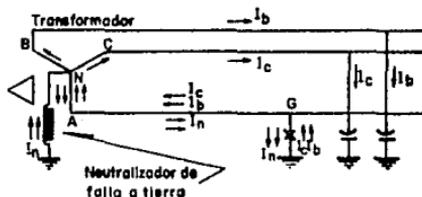


Fig 3.4 Modelo de corriente de falla a tierra en un sistema conectado mediante un neutralizador de falla a tierra.

Los neutralizadores 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 a arcos a tierra por ejemplo las líneas de transmisión aérea.

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 conexión a tierra.

El neutro de un sistema puede no estar disponible, particularmente en sistemas antiguos de 600 volts o menores y en muchos sistemas existentes de 2400, 4800 y 6000 volts ó en algún donde no hay bancos de transformadores que puedan ser conectados 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 k

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, podrán adquirirse transformadores conectados en estrella o si no se podrán usar transformadores con su conexión en zig-zag.

3.5.1. Transformador con conexión zig-zag.

El tipo de transformador para conexión a tierra usado más comunmente 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 diseñados 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 falla en el sistema fluye a través de los embobinados del transformador solamente una pequeña corriente de magnetización, sin embargo, la impedancia del transformador a la corriente de falla a tierra es baja, de manera 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.

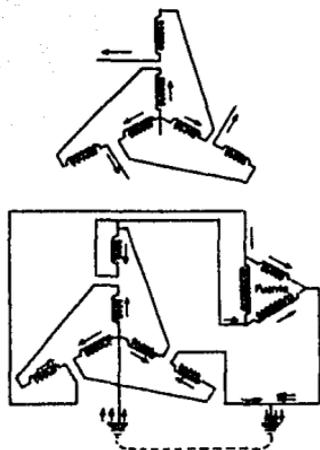


Fig 3.5 Configuración típica del transformador de conexión a tierra.

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 las 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 1 minuto, sin excesivo calentamiento, por lo tanto su tamaño es normalmente alrededor 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 temperatura de 175°C durante un minuto, 125°C durante 10 minutos y de 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 así es 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 observa en la figura se suma tres veces la impedancia del neutro a la del transformador para determinar la impedancia de secuencia cero de la combinación.

3.5.2. Transformador para conexión a tierra delta-estrella.

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 proporcionar 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 deberá ser del mismo valor de voltaje nominal que el del circuito el cual está conectado a tierra, las conexiones de dicho transformador se muestran en la figura 3.6.

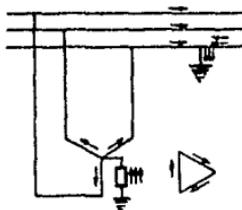


Fig 3.6 *Conexión y distribución de corriente en un transformador para conexión a tierra Delta-Estrella cuando ocurre una falla de línea a tierra en un sistema trifásico.*

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 divide en dos grupos los cuales analizaremos a continuación:

4.1.1. Seguridad del personal.

Como es bien sabido, debido a la circulación de una -- corriente a través de un 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. Así mismo, 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 encuentren 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.

a) Tensión de contacto.

La tensión de contacto es la tensión máxima que experimentar una persona que se encuentra de pie dentro del área de la subestación y que durante la ocurrencia de una falla este 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

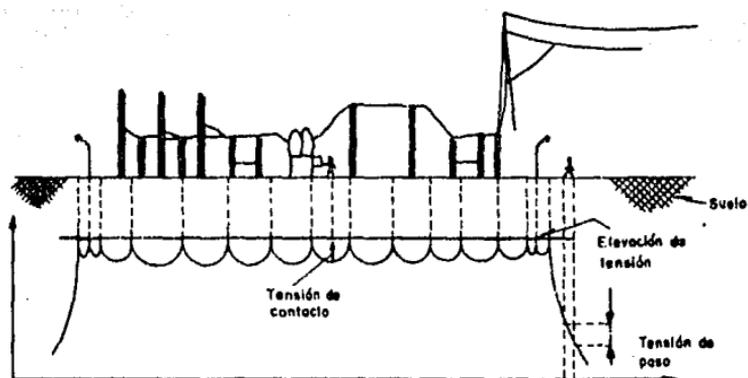
I_g = corriente de falla a través de la red

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 lo tanto:

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

*Fig 4.1*

donde:

V_{contacto} = tensión de contacto

V_m = tensión de malla

b) Tensión 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. (Véase la figura 4.1)

Por lo tanto:

$$V_p = V_a - V_b \quad (4.3.)$$

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).

c) 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 neu--

tros 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 lo tanto, su valor deberá limitarse a lo establecido por la ecuación (4.6).

4.1.2. Protección del equipo de control y de 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, quedará expresa por la ecuación (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 5kv, por lo que este valor se presentara como una limitación para el valor de la resistencia de la red, ya que a partir de la ecuación (4.1) se tendrá:

$$R_g = 5kV/I_g$$

(4.4.)

4.2. Parametros de diseño.

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

El area donde se ubicará la subestación deberá -- siempre conocerse al iniciar el 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 un valor del tiempo igual a 0.5 segundos.

e) Nivel del aislamiento del equipo de comunicaciones.

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

Generalmente, tiene un nivel de aislamiento de 5 a 10kv, por consiguiente, este valor determinará, en gran parte, la resistencia de la red, ya que una elevación de tensión mayor a estos valores dañarfa los cables de control y comunicación.

f) Tensiones de paso y de contacto.

Para asegurar la protección del personal dentro de la 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 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:

s = resistividad superficial del terreno

t = tiempo de liberación de la falla

En general se recomiendan valores de:

s = 3000 Ω/m ; cuando se hace uso de roca tritura
da

t = 0.5 seg; valor conservador

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

Tomando al pie como un electrodo de placa circular la resistencia de contacto con el suelo es aproximadamente 3 Ps. 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:

$$R = 1000 \Omega + 6 \rho s \text{ (resistencia de los dos pies en serie).}$$

Y en el caso de la tensión de contacto:

$$R = 1000 + 1.5 \rho s \text{ (la resistencia de los dos pies en paralelo)}$$

De esta manera se podrán calcular las dos tensiones - del cuerpo humano:

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

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

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.

4.3.1. Medición de la resistividad específica 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; pero en general se basan en

<u>Naturaleza del suelo</u>	<u>Resistividad promedio (Ω - m)</u>
Terreno vegetal	1 - 50
Arcilla	2 - 100
Arena y grava	50 - 1000
Superficie calcáreas	5 - 4000
Arcilla granulada	5 - 100
Roca porosa	20 - 2000
Granito, basalto, etc.	1000
Roca cristalina	50 - 500
Terrano de cultivo	10 - 100

Cuadro 4.1

Medición de la resistividad específica del suelo.

la teoría desarrollada por Frank Wenner.

La configuración de los cuatro electrodos se muestra en la figura 4.2. como se observa éstas 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) Método de Wenner

Como ya se indicó, la teoría que desarrollo 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 figura 4.3)

Al emplear está configuración si se conocen las profundidades 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:

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

Por lo que la expresión (4.9) puede aproximarse a:

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

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

En el método de 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 a lo anterior se sugieren 3 configuraciones alternativas para -- las mediciones, estas se presentan en la tabla 4.2. acompañadas de la expresión correspondiente.

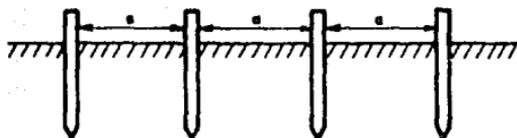


Fig 4.2 Configuración de los cuatro electrodos para mediciones de resistividad.

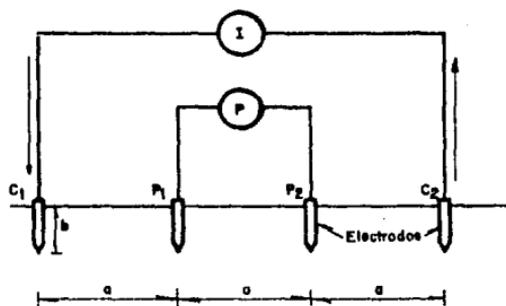


Fig 4.3 Configuración universal del método Wenner.

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) Método de Schlumberger

El método de Schlumberger es una modificación del método 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 (ua) 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 ecuación (4.14) respectivamente.

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

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, introduce errores si se emplean aparatos de poca precisión cuando la resistividad del terreno es del orden de 20 Ω/m y los valores de resistencia proporcionados por el aparato son del orden de 10^{-3} ohms.

Configuración de electrodos	Expresión de resistividad
C-P-P-C	$\rho_1 = 2waR_1$
P-C-C-P	
C-C-P-P	$\rho_2 = 6waR_2$
P-P-C-C	
C-P-C-P	$\rho_3 = 3waR_3$
P-C-P-C	

Cuadro 4.2

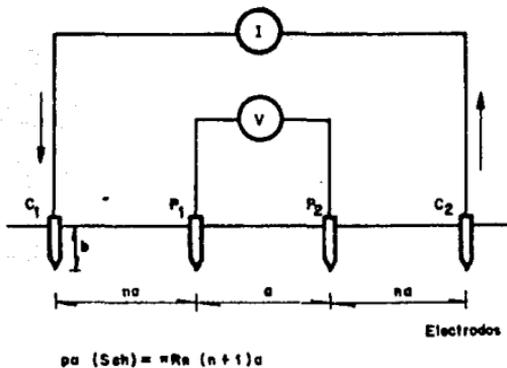


Fig.4.4 Configuración del método de Schlumberger.

4.3.2. Selección de un modelo estratificado del suelo no homogéneo.

En el diseño de los electrodos de tierra la resistividad es uno de los parámetros de diseño más importantes; 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 resistividad contra la distancia entre electrodos, se obtienen los tipos de curvas mostrados en la figura 4.6.

Donde se observa que la variación de la resistividad es notoria al incrementar la separación entre electrodos; al aplicar el método de Wenner de los cuatro electrodos, las variaciones observadas se atribuyen fundamentalmente a la variación exponencial de la resistividad en función de la profundidad.

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 metros, dependiendo de la profundidad requerida para dar firmeza a --

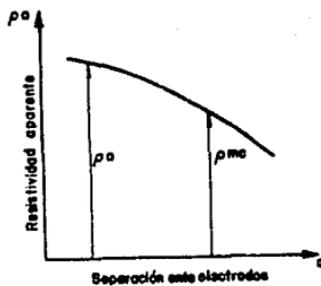


Fig 4.5 Variación aparente de resistividad con la distancia entre electrodos.

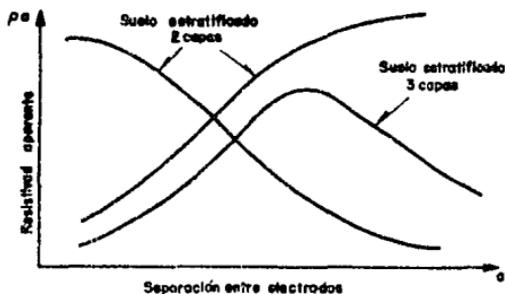


Fig 4.6 Posibles variaciones de la resistividad aparente con la separación entre electrodos.

los electrodos enterrados. Las mediciones deberán realizarse, aumentando la separación entre electrodos de 2 a 3 metros, hasta llegar a una separación máxima entre electrodos de $1/3 L$. Los resultados se anotarán en una forma como la que se muestra en la figura 4.8. donde además de los datos de resistividad, deberá proporcionarse el tipo de suelo, la fecha, la temperatura ambiente y las observaciones que se consideren pertinentes. Así mismo, durante las mediciones de campo deberá realizarse la gráfica correspondiente de resistividad entre la separación entre electrodos, ya que está permitirá detectar errores de medición.

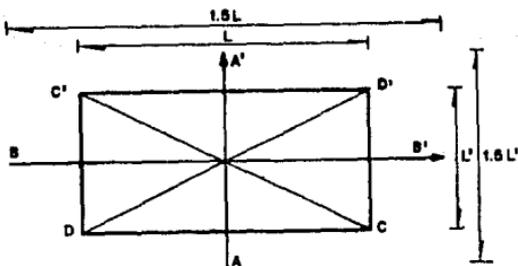


Fig 4.7 Direcciones y longitud recomendadas para las mediciones de resistividad.

MEDICION DE LA RESISTIVIDAD DEL SUELO

Fecha _____

Equipo usado _____

Método _____

Temperatura _____

DESCRIPCION DEL SUELO

Estado superficial del terreno _____

Naturaleza del terreno excavado _____

Profundidad de la excavación _____

RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

Instrumento de medición _____

a - Distancia entre electrodos

R.- Resistencia

ρ - Resistividad del suelo (Ω -m)

a	R	$2\pi aR$	Observaciones
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____
_____	_____	_____	_____

Fig 4.8

CAPITULO 5. CALCULO DE REDES DE TIERRA PARA SUBESTACIONES -- ELECTRICAS.

El diseño de una red de tierras 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 una 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 Ω /metro medido de acuerdo en 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 impecionando el proyecto de la subestación, referente a la dis-

posición del equipo y 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 los calculados. 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 metros en muchos casos es conveniente instalar varillas verticales de 5/8" de diámetro y de 3 metros de longitud, principalmente cuando la resistividad del terreno es alta en la superficie del mismo.

5.2.1. Cálculo de 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 deterioran en las condiciones más desfavorables de magnitud y duración de la corriente de falla a que quedan expuestas.

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

La ecuación de Onderdonk permite seleccionar el calibre del conductor:

$$I = A \sqrt{\frac{\text{LOG} \frac{(T_m - T_a + 1)}{234 + T_a}}{33t}}$$

de donde obtenemos:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\text{LOG} \frac{(T_m - T_a + 1)}{234 + T_a}}{33t}}} \quad (5.1)$$

donde:

- I - corriente en amperes
 A - sección de cobre, en circular mils.
 t - tiempo durante el cual circula la corriente I en segundos
 T_m - temperatura máxima permisible, en grados centígrados.
 T_a - temperatura ambiente en grados centígrados

Pueden suponerse normalmente los siguientes valores:

- T_a = 40°C
 1093°C temperatura de fusión del cobre
 450°C temperatura permisible para las uniones soldadas

250°C temperatura permisible para las uniones con conectores (atornilladas).

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).

5.2.2. Cálculo de las tensiones de paso, contacto y malla de la red de tierras.

Se escogen generalmente las tensiones de contacto de estructuras conectadas a tierra al centro del rectángulo de -- una malla 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 distancias superiores de un metro, esté conectado a la malla. Este caso especial de tensión de contacto se llamará tensión de malla.

Los valores de las tensiones para instalaciones con ca libre 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:

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

- E_{contacto} - tensión de contacto a una distancia horizontal de un metro de la malla de tierra en volts.
- E_{malla} - Diferencia de tensión L , en volts, - de la malla y la superficie del terreno en el centro del rectángulo de la malla.
- ρ - Resistividad del terreno en ohms-
- 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 formulas 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:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \ln \left[\frac{3}{1} \cdot \frac{5}{6} \cdot \frac{7}{8} \dots \text{etc} \right] \quad (5.6)$$

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

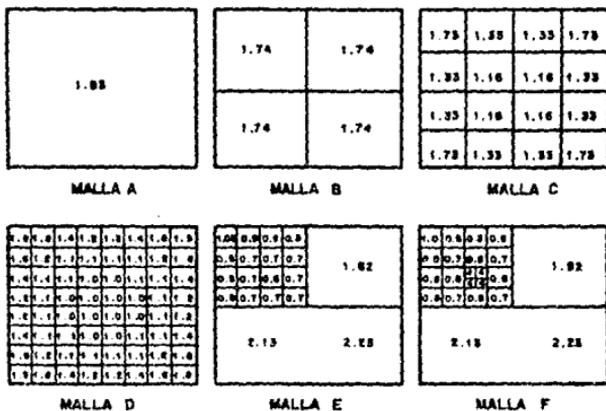
Tabla 5.1 Calibres del conductor de cobre mínimo que previenen la fusión.

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

- Ki - Factor de conexión por irregularidades -- para tomar en cuenta el flujo de corriente no uniforme de partes diversas de la red, veáse la fig. 5.1.
- ρ - Resistividad media del terreno, en ohm-m
- 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 Ki fluctua entre 1.2-2 ó 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 Km y Ki. 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 en 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.



LAS CIFRAS EN LOS DIAGRAMAS SON LOS PRODUCTOS DE LOS COEFICIENTES K_m x K_i DETERMINADOS DE DATOS EXPERIMENTALES OBTENIDOS POR KOCE.

MALLA	A	B	C	D	E	F
VALOR MAXIMO DE $K_m \cdot K_i$	1.03	1.74	1.73	1.50	2.23	2.23
COEFICIENTE K_m CALCULADO POR EL METODO DESCRITO	1.02	1.50	1.19	0.85	1.50	1.50
COEF. $K_i = \frac{K_m \cdot K_i}{K_m}$ Experiment. I	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

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i p \int$$

Fig 5.1

5.2.3. Cálculo de la longitud total del conductor.

Si igualamos el valor de E_{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:

ρs - Resistividad superficial del terreno Ω/metro
 t - Duración máxima de la falla, en seg.

5.2.4. Cálculo de la elevación máxima de tensión 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

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

ρ = Resistividad media en ohms-metro

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 -- Es el coeficiente que toma en cuenta el efecto de número de conductores "N" de la malla, es espaciamiento 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 terminos dentro del paréntesis es igual al número de conductores transversales en la malla básica excluyéndose las conexiones de los conductores paralelos; K_i , ρ , 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 triturizada de alta resistividad, colocada en la superficie y si dicha roca no se prolonga fuera del sistema de tierras, las tensiones de paso fuera de la malla pueden resultar peligrosas. Esto se evita prolongando la capa de roca triturada o eliminando esquinas de la malla.

5.3. Cálculo 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 ρ 100 Ω /metro
- c) Resistividad superficial del terreno ρ_s 7500 Ω /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)

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

sustituyendo obtenemos:

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

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

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 Standart 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 de la ecuación 5.6; D - espaciamiento y 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

$$\begin{aligned} K_i &= 0.650 + 0.172 n & h &= 0.5 \text{ m} \\ & & d &= 0.0134 \text{ m} \\ \text{para } N &= 9 & K_i &= 2.198 & D &= 6\text{m valor asumido} \end{aligned}$$

$$K_m = \frac{1}{6.2832} \ln \frac{6^2}{16(0.5 \times 0.0134)} + \frac{1}{3.1416} \ln \frac{3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11 \times 15 \times 17 \times 19}{4 \times 6 \times 8 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16 \times 20}$$

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

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

$$Km = 0.9257371357 - 0.3319988397$$

$$Km = 0.593738296$$

Por lo tanto:

$$L = \frac{(0.593738296) (2.198) (100) (19076) (0.258)}{116 + 0.17 (7500)} =$$

$$L = \frac{642287.9432}{1391}$$

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

$$\text{largo de malla} = 55.5 \text{ m}$$

$$\text{ancho de malla} = 35.0 \text{ m}$$

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

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

$$\text{Longitud del cable } 35 \times 11 = 385 \text{ m}$$

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

$$\text{Longitud del cable } 7 \times 55.5 = 388.5$$

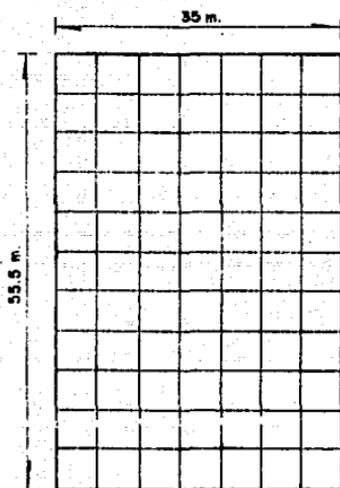


Fig 5.2 Malla preliminar

Resistencia de la malla

Para el cálculo de este valor aplicaremos la ecuación:

$$R = \frac{\rho}{4x} + \frac{\rho}{L} \quad (5.12)$$

donde:

ρ = Resistividad media Ω/m

L = Longitud total de la malla (m)

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

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

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

Sustituyendo en la ecuación 5.12 obtenemos:

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

$$R = 1.1349 \Omega$$

Consideramos el valor que nos da la menor resistencia.

Incremento máximo de potencial de la red utilizando - la ecuación (5.9).

$$E_{\max} = IR \quad (5.9)$$

$$E_{\max} = (19076 \times 1.1349) = 21649.352 \text{ Volts}$$

Tensión de paso en la periferia; las ecuaciones 5.10 y 5.11 nos permiten calcular este valor:

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

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

Si $h = 0.5$ y $D = 6$ m obtenemos:

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

$$K_s = 0.3183 [1 + 0.1538 + \dots +]$$

$$K_s = 0.3183 [1.475]$$

$$K_s = 0.4696$$

Por lo tanto sustituyendo valores en la ecuación (5.10) obtenemos:

$$E_{\text{paso}} = (0.4696)(2.198)(100) \left(\frac{19076}{773.5} \right) = 2545.556 \text{ Volts}$$

Obtendremos el valor permisible de voltaje por medio de la ecuación (4.6).

$$\frac{116 + 0.7 \text{ ps}}{\sqrt{t}} = \frac{116 + 0.7 (7500)}{\sqrt{0.0666}} = \frac{5366}{0.25806} = 20792 \text{ Volts}$$

También calcularemos las tensiones internas de paso y de toque:

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

el caso más severo es cuando $x = h$ por lo que:

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

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

$$E_{\text{paso}} = 890,774.045 \text{ Volts}$$

APENDICE A. ESTUDIO DEL CORTO CIRCUITO

Introducción.

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

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

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 denominan elementos pasivos del sistema.

Las principales fuentes de corto-circuito son los generadores en un generador la corriente de corto-circuito es limitada por sus reactancias que son:

1. Reactancia subtransitoria X''_d
2. Reactancia transitoria X'_d
3. Reactancia 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 sincrónica X_d , es la reactancia que determina el flujo de corriente de corto-circuito en condición de estado estable.

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

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

Método de la componente simétrica.

El método de la componente simétrica consiste en la reducción de cualquier sistema eléctrico de potencia trifásico desbalanceado de fasores, en tres sistemas simétricos balanceados los cuales son:

- a) Componente de secuencia positiva
- b) Componente de secuencia negativa
- c) Componente de secuencia cero

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

Los componentes de secuencia positiva consisten en -- tres fasores de igual magnitud defasadas 120° entre si, con el mismo sentido de giro que el de las fuentes de generación -- (ver figura A.1.a). Los componentes de secuencia negativa consisten en tres fasores de igual magnitud defasados 120° entre si, con una secuencia de fase opuesta a la de la secuencia positiva (ver figura A.1.b). Las componentes de secuencia cero consisten en tres fasores de igual magnitud a fase tal como -- se muestra en la figura A.1.c.

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 con la figura A.1, los tres fasores pueden expresarse en función de uno sólo, por convención se expresarán en función del fasor V_a .

SECUENCIA POSITIVA	SECUENCIA NEGATIVA	SECUENCIA CERO	
$\dot{V}_{a_1} = \dot{V}_{a_1}$	$\dot{V}_{a_2} = \dot{V}_{a_2}$	$\dot{V}_{a_0} = \dot{V}_{a_0}$	} (A.1.)
$\dot{V}_{b_1} = a^2 \dot{V}_{a_1}$	$\dot{V}_{b_2} = a \dot{V}_{a_2}$	$\dot{V}_{b_0} = \dot{V}_{a_0}$	
$\dot{V}_{c_1} = a \dot{V}_{a_1}$	$\dot{V}_{c_2} = a^2 \dot{V}_{a_2}$	$\dot{V}_{c_0} = \dot{V}_{a_0}$	

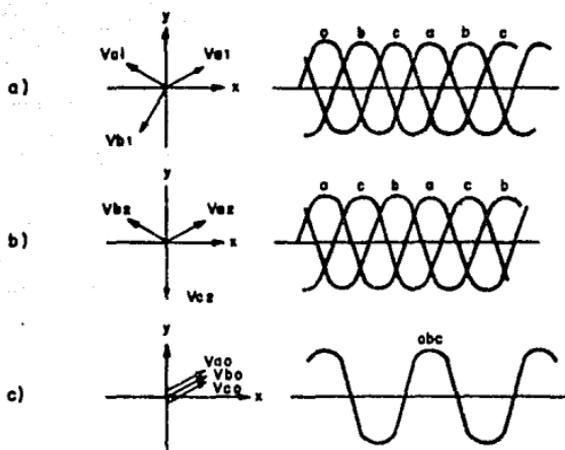


Fig A. 1. Componentes de secuencia de voltaje.

El operador a es un fasor unitario de magnitud unitaria y desplazamiento de 120°

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

En la figura A.2. se presenta las funciones del operador a .

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

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

Por lo que sustituyendo las ecuaciones de (A.1) en -- (A.2) obtenemos:

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

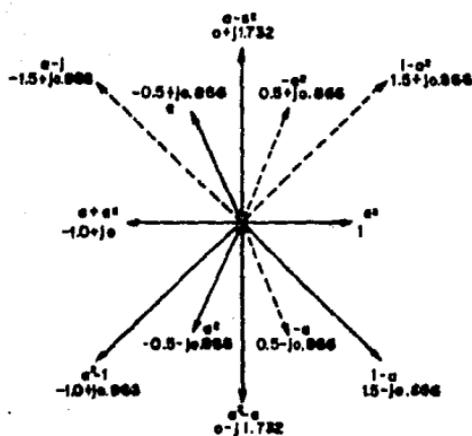


Fig A. 2 Funciones del operador a.

Por conveniencia escribimos el sistema de la ecuación (A.3) de la siguiente forma:

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

Si la ecuación (A.4) la expresamos en forma cuatricular obtenemos:

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

Si

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

Entonces:

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

Del sistema dado por la ecuación (A.5) se pueden encontrar los componentes de secuencia para un conjunto de fasores trifásicos, tal como se muestra a continuación:

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

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 matriz traspuesta de $[A]$

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

Resolviendo por menores

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

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

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

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

La matriz traspuesta de [A] será:

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

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:

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

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

Por lo tanto sustituyendo (A.7) en (A.6) las componentes de secuencia 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 obtenemos:

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

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

$$\begin{aligned} \dot{I}_{a_0} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + \dot{I}_b + \dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a_1} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a\dot{I}_b + a^2\dot{I}_c) \\ \dot{I}_{a_2} &= \frac{1}{3} (\dot{I}_a + a^2\dot{I}_b + a\dot{I}_c) \end{aligned} \quad (\text{A.9})$$

Es importante señalar que los 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 los componentes de secuencia positiva, negativa y cero, pueden existir en un sistema eléctrico de potencia trifásico, es importante señalar las relaciones existentes en ellos.

En un sistema simétrico o balanceado, se cumple que:

- los componentes de secuencia positiva producen únicamente caídas de tensión con secuencia positiva;
- los componentes de secuencia negativa producen únicamente caídas de tensión con secuencia negativa;
- los componentes de secuencia cero producen únicamente caídas de tensión con secuencia cero.

Un sistema eléctrico de potencia balanceado o simétrico es aquel por el cual las tensiones generadas por las máquinas rotatorias son iguales en fase y desplazados 120° , 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 secuen-- cia cero producen caídas de tensión de secuencia positiva, ne-- gativa 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 determinar la elevación de su tensión durante una falla a tierra, como verificación de los cálculos hechos y así 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 metro, no parecen guardar una relación significativa con las variaciones observadas en la resistividad del terreno a esa profundidad. Esta situación indica que las resistencias 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 comprenda 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. Método de caída de tensión.

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.

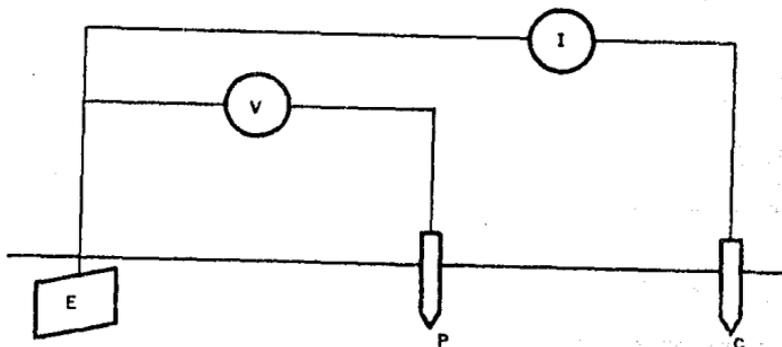


Fig B.1. Método clásico de caída de tensión.

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). Así mismo 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 en la medición.

B.2. Curvas de resistencias 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 electrodos que intervienen, lo que puede 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 la corriente se localiza a una distancia (A_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 una distancia D_2 , de tal manera que exista una zona más gran--

de entre las áreas 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 cual nos indica que en este punto no hay superposición de áreas de influencia, por consiguiente, este valor corresponde a la resistencia real del electrodo.

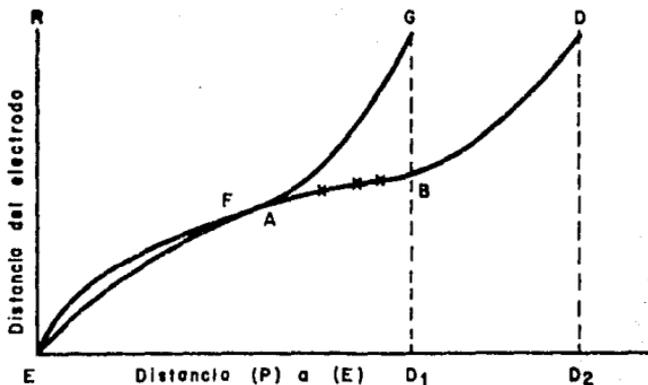


Fig B.2.

En primer término, como recomendación práctica y para evitar el traslape de áreas de influencia se sugiere colocar un 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 $6D$.

CONCLUSIONES

- 1.- Establecer los límites de seguridad, para las diferencias de tensión, que se lleguen a generar en una subestación, cuando se produzca alguna falla. Ya que es de vital importancia que los distintos puntos con los que pueda hacer contacto el cuerpo humano sean confiables, con ello se garantiza la completa 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 el menor tiempo posible 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 parámetros de diseño de la red de tierras se establecen en función de proporcionar un elemento de conexión a tierra para todo el equipo eléctrico - el cual se tenga que referir a tierra.

- 6.- Para el diseño de una red de tierras deberán considerar se 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 por lo cual se hace necesario plantear toda una metodología de medi ción e interpretación de la resistividad del terreno -- para ser considerada como el parámetro más importante - de todo el diseño.

BIBLIOGRAFIA

- "Reglamento de Obras e Instalaciones Eléctricas"
- "Transformadores para la Industria Eléctrica
Richard L. Beam, Nicholas Chackom.
- "Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia"
William D. Stevenson
- "Applied Protective Relaying"
Westinghouse Electric Corporation, New Silent Sentinels
- "IEEE Guide for Safety in Substations Grounding"
STD 80-1976
- "Threshold 60-Cycle Fibrillating Currents"
C.F. Dalziel, Aiee Trans. Vol. 79, parte III, 1960
- "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 Standars No 258
- "A new Contributions to Subsurface Studies by Means of
Electrical Measurements in Driu Holes"
C. y M. Schlumberger y E.G. Leonardon
Technical publication No 503, The American Institute of
Mining and Metalurgical Engineers.