


203
145
UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA



Estudios de Sistemas de Tierras para
Subestaciones Encapsuladas en SF6

TESIS PROFESIONAL

Que para Obtener el Título de
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
AREA DE INGENIERIA ELECTRICA Y ELECTRONICA

P r e s e n t a n

Angel Alfonso Romero Sánchez
Benjamin Cervantes Echevarría
Elfego Santiago Pedro

Director de Tesis: ING. ARTURO MORALES COLLANTES

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

México, D. F.

1994





Universidad Nacional
Autónoma de México



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.

**AGRADECEMOS AL ING. ARTURO MORALES COLLANTES
POR SU VALIOSO APOYO Y ORIENTACION EN LA
REALIZACION DE ESTE TRABAJO.**

A.A.R.S. / B.C.E. / E.S.P.

A MIS PADRES,

**SARA SANCHEZ MENDIETA
GUADALUPE ROMERO MARTINEZ**

**POR HABERME BRINDADO LO MEJOR
DE ELLOS PARA CONSEGUIR MIS
METAS.**

A MI ESPOSA,

NIDIA ELENA

POR SU APOYO Y COMPRENSION.

A MIS HERMANOS:

POR SU GRAN AYUDA.

A.A.R.S.

A LA MEMORIA DE MI PADRE

JOSE APOLINAR CERVANTES VILLEGAS

A MI MADRE,

MARIA ECHEVARRIA VALENCIA

**POR HABERME BRINDADO TODO
SU APOYO Y COMPRENSION PARA
LOGRAR UNO DE MIS PRINCIPALES
OBJETIVOS EN MI VIDA.**

B.C.E.

A MIS PADRES,

*ELFEGO SANTIAGO JOSE
CATARINA PEDRO DE SANTIAGO*

PORQUE GRACIAS A SU ESFUERZO
Y APOYO HE LOGRADO LA SATIS-
FACCION MAS GRANDE DE MI VIDA.

A MIS HERMANOS,

*FRANCISCA, ANA MARIA, ANGELICA
OYUKI Y DAUL.*

QUE EL PRESENTE TRABAJO, LOS
MOTIVE A LOGRAR SUS METAS
FIJADAS.

A MI ESPOSA E HIJAS,

*ESPERANZA MARTINEZ DE SANTIAGO
LAURA NAYELY Y ARELI ITZEL.*

POR SU COMPRESION EN LA REA-
LIZACION DE ESTE TRABAJO.

E.S.D.

*ESTUDIOS DE SISTEMAS DE TIERRAS
PARA SUBESTACIONES ENCAPSULADAS
EN SF6.*

I N D I C E

ANTECEDENTES

INTRODUCCION.

- CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL SF6.
- CONCEPTO DE SUBESTACION ENCAPSULADA EN SF6.
- CARACTERISTICAS DEL BLINDAJE.
- ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA SUBESTACION ENCAPSULADA EN SF6.

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS

1.0 CONCEPTO DE SISTEMA DE TIERRAS.

*1.1 COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS Y
FUNCIONES PRINCIPALES.*

1.2 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS.

1.3 METODOS BASICOS PARA EL ANALISIS DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO.

1.4 LIMITES DE CORRIENTES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

1.5 POTENCIALES PELIGROSOS.

- CONCEPTO DE POTENCIAL DE PASO.
- CONCEPTO DE POTENCIAL DE CONTACTO.
- CONCEPTO DE POTENCIAL DE TRANSFERENCIA.

1.6 TIPOS DE FALLAS A TIERRA.

CAPITULO 2

FALLAS INTERNAS

2.0 CORRIENTES PARASITAS (CORRIENTES DE EDDY).

2.1 CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA SUBESTACIONES EN SF₆.

2.2 EQUIVALENTE "T" DE UN TRANSFORMADOR IDEAL.

2.3 FALLAS INTERNAS.

CAPITULO 3

FALLAS EXTERNAS.

3.0 CONSIDERACIONES GENERALES.

3.1 LIMITACIONES PARA BUS ATERRIZADO Y NO ATERRIZADO.

3.2 RECOMENDACIONES.

CAPITULO 4

DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRA.

4.0 SISTEMA RADIAL.

4.1 SISTEMA EN ANILLO.

4.2 SISTEMA DE MALLA.

CAPITULO 5

ECUACIONES DE REDES DE TIERRAS

5.0 CORRIENTE MAXIMA DE LA MALLA.

5.1 EFECTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA.

5.2 CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

5.3 CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR.

5.4 CALCULO DE POTENCIALES EN LA MALLA.

CAPITULO 6

EJEMPLO PRACTICO

INTRODUCCION.

6.0 CALCULO DE CORTO CIRCUITO.

6.1 CALCULO DE LA RED DE TIERRAS.

6.2 CALCULO DE FALLA INTERNA.

6.3 CALCULO DE FALLA EXTERNA.

6.4 CONCLUSIONES.

BIBLIOGRAFIA.

ANTECEDENTES

Durante los últimos años el desarrollo como la aplicación de modelos y técnicas de evaluación para los estudios de sistemas de potencia se han ido mejorando considerablemente, por lo que esto ha implicado cambios, los cuales se han dado a conocer en diferentes publicaciones realizadas por varias asociaciones dedicadas a esta materia a nivel nacional e internacional.

El objetivo que se persigue en la elaboración de este trabajo es el de dar a conocer toda la herramienta necesaria, para la aplicación en el diseño de un sistema de tierras para subestaciones encapsuladas en hexafluoruro de azufre (SF₆).

En los capítulos siguientes se expondrá el porque de utilizar un sistema de tierras adecuado y cual es la importancia de este en los sistemas de potencia.

Llamaremos sistema de potencia al conjunto de elementos que interconectados entre si transportan la energía eléctrica desde los centros de generación hasta los centros de consumo.

Si bien la necesidad de un adecuado sistema de tierras ha sido reconocido por muchos años; los primeros avances normalizados de diseño fueron establecidos por la norma AIEE (GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING) del American Institute of Electric Engineers (AIEE), a partir de entonces se han venido publicando diferentes trabajos en los cuales se han mejorado los criterios de diseño, así como los métodos de análisis para determinar un buen funcionamiento de los sistemas de tierras.

El procedimiento de diseño a seguir en la elaboración de este trabajo, está basado básicamente en la última publicación realizada por la norma ANSI/IEEE STD.80 edición 1986, en la que se reflejan los mayores cambios que han ido generando para los criterios a seguir en el diseño.

Además de el contenido que cubre este trabajo de los aspectos para un sistema de tierras se describirán los conceptos básicos

relacionados con sus componentes, materiales, instalación, verificación del diseño en campo, así como otras características importantes relacionados con el tema.

INTRODUCCION

CARACTERISTICAS Y PROPIEDADES DEL SF6.

La primera aplicación del SF6 fue como medio aislante y posteriormente se usó como medio de extinción del arco eléctrico, características que han permitido que dicho gas se emplee en subestaciones blindadas, con magníficos resultados.

En la fabricación del SF6 existen ciertas impurezas por lo que es imposible obtener SF6 con un grado de pureza del 100% ya que durante el mismo proceso de manufactura se producen impurezas como resultado de la reacción química del flúor y el azufre.

Dichas impurezas se pueden clasificar en tres grupos principalmente:

- Las tóxicas.
- Las que afectan la seguridad del equipo.
- Las que diluyen el producto.

Dentro del grupo de las impurezas tóxicas se encuentran los fluoruros de menor valencia como el tetrafluoruro de azufre (SF4), el difluoruro de azufre (SF2), así como otros.

La segunda categoría incluye las impurezas tóxicas que solas o en combinación pueden provocar un mal funcionamiento del equipo. Tal es el caso del agua, el oxígeno e impurezas ácidas, que dependiendo de su combinación pueden provocar corrosión o condensación en el equipo.

Por último, las impurezas del tercer grupo son aquellas que no se desean simplemente porque diluyen el producto y pueden causar problemas posteriormente.

La siguiente tabla muestra las máximas concentraciones de impurezas permitidas de acuerdo con las normas IEC-376-1971 y ANSI/ASTM D 2472-71.

Conviene hacer notar que las impurezas presentes en el SF6 tienen un efecto mínimo sobre su rigidez dieléctrica.

TABLA I.- MAXIMO NIVEL DE IMPUREZAS EN EL SF6 NUEVO

IMPUREZA	I E C	A N S I
TETRAFLUORURO DE CARBONO (CF4)	0.05 % en peso	0.05 % en peso
AIRE, O2 ó N2	0.05 % en peso	0.05 % en peso
AGUA	15 ppm en peso	8.9 ppm en peso
ACIDEZ EXPRESADA COMO ACIDO FLUORHIDRICO (HF)	0.3 ppm en peso	0.3 ppm en peso
FLUORUROS HIDROLIZABLES EXPRESADOS COMO HF	1.0 ppm en peso	0.3 ppm en peso
ACEITE MINERAL	10 ppm en peso	
TOXICIDAD	Cinco ratones expuestos por 24 horas a una atmosfera compuesta de 79 % de SF6 y 21 % de O2 por volumen; no deben mostrar sintomas de lesiones dentro de las 72 horas posteriores a la prueba.	Consejillos de Indias expuestos durante 2 horas a una concentración de gas del 20% por volumen de aire; no deberán presentar lesiones.

CONCEPTO DE SUBESTACION ENCAPSULADA EN SF6.

Como se mencionó anteriormente, las excelentes características del SF6 como medio aislante y medio de extinción del arco han permitido su aplicación en el diseño de subestaciones blindadas.

Una subestación encapsulada en SF6 se puede definir como un ensamble compacto de varios elementos contenidos en una envolvente metálica aterrizada, en la cual el medio de aislamiento primario es el SF6.

Ahora, si comparamos las subestaciones convencionales con las aisladas en SF6 nos podremos dar cuenta que las subestaciones aisladas en SF6 requieren de un menor espacio, tanto en área como en volumen que una subestación convencional.

La reducción considerable en las dimensiones de la subestación se debe a la mayor rigidez dieléctrica del SF6 comparada con el aire, lo cual reduce significativamente las distancias de aislamiento para un voltaje dado.

CARACTERISTICAS DEL BLINDAJE.

El objetivo principal del blindaje de una subestación aislada en SF6 es contener bajo un valor determinado de presión al gas aislante, evitando al mismo tiempo su fuga al medio ambiente. Este blindaje está formado por una envoltura metálica aterrizada que limita la interacción de la subestación con el medio que la rodea.

Los fabricantes de esta clase de subestaciones utilizan diferentes diseños de blindajes, consistiendo la diferencia tanto en el material (acero o aluminio) como en el tipo (monofásico o trifásico).

Como se mencionó anteriormente los materiales utilizados en la fabricación del blindaje son el aluminio y el acero, una comparación de ambos materiales debe incluir los siguientes puntos:

- a) Peso.
- b) Resistencia a la corrosión.
- c) Rigidez dieléctrica.
- d) Dimensiones.
- e) Resistencia al arco.

- f) Resistencia a la presión y a la hermeticidad.
- g) Costo.

- ELEMENTOS CONSTITUTIVOS DE UNA SUBESTACION ENCAPSULADA EN SF6.

Una característica importante de las subestaciones blindadas aisladas en SF6 es su modularidad, o sea que todos los elementos que la constituyen se fabrican en forma de módulos intercambiables que se unen mediante bridas, cada módulo cuenta con aisladores herméticos en los extremos que le proporcionan independencia entre un elemento y otro, con lo que se divide la subestación en secciones separadas de gas.

Los elementos constitutivos principales son:

- Barras colectoras.
- Interruptor de potencia.
- Seccionador.
- Cuchilla de puesta a tierra.
- Transformadores de instrumentos.
- Conexiones terminales.
- Elementos de acoplamiento, conexión y compensadores de dilatación.
- Apartarrayos.
- Sistema de gas.
- Cubículo de control local.

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de subestaciones en SF6, así como diferentes arreglos.

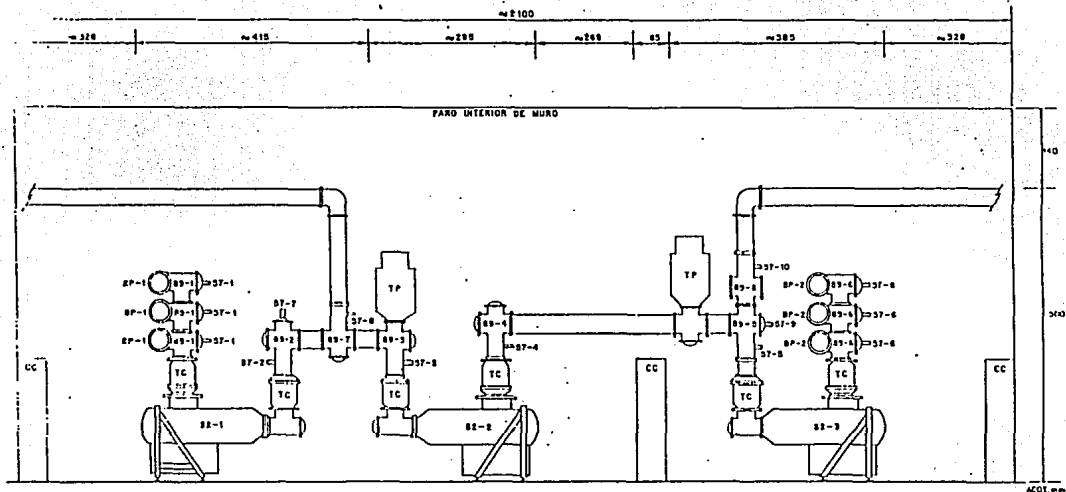


FIGURA 1 .- ARREGLO DE SPRECHER & SCHUI DE INTERRUPTOR Y MEDIO (1 1/2), 230 KV.

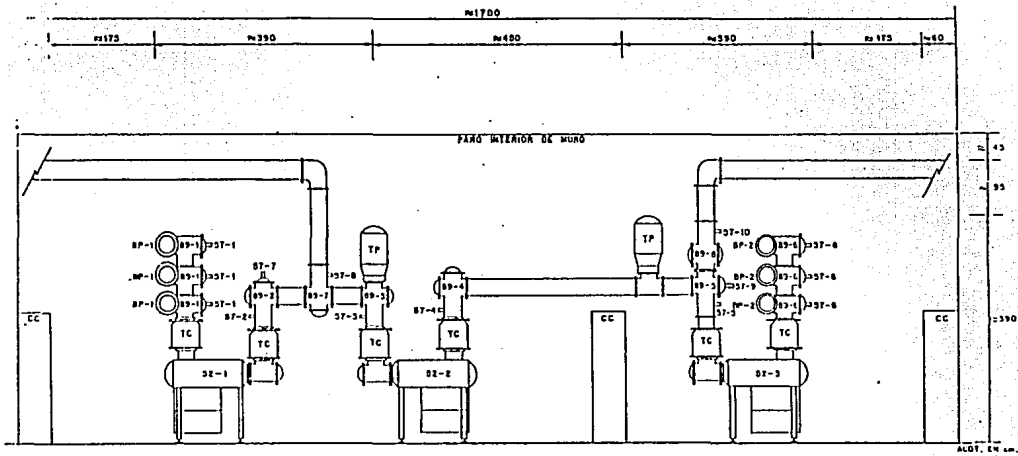


FIGURA 2 .- ARREGLO DE SPECHER & SCHUH INTERRUPTOR Y MEDIO, 115 KV.

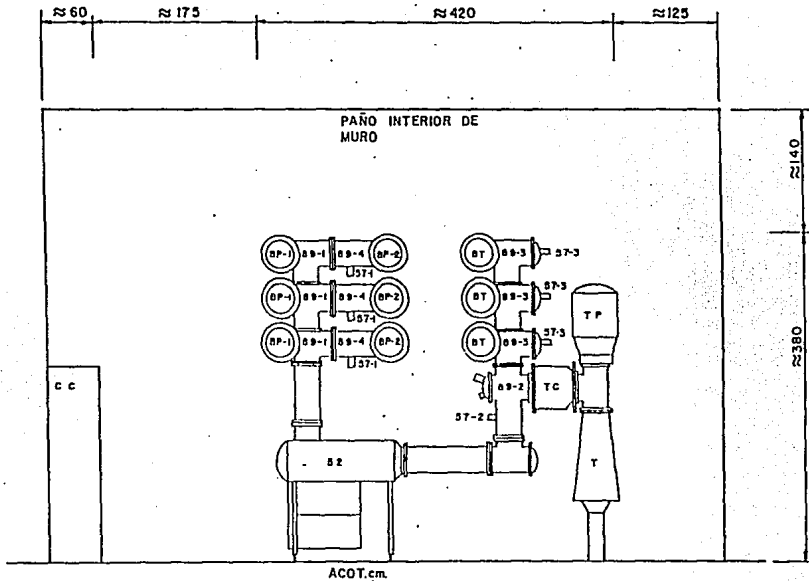


FIGURA 3 .-ARREGLO DE SPRECHER & SCHUH,
DOBLE BARRA PRINCIPAL Y

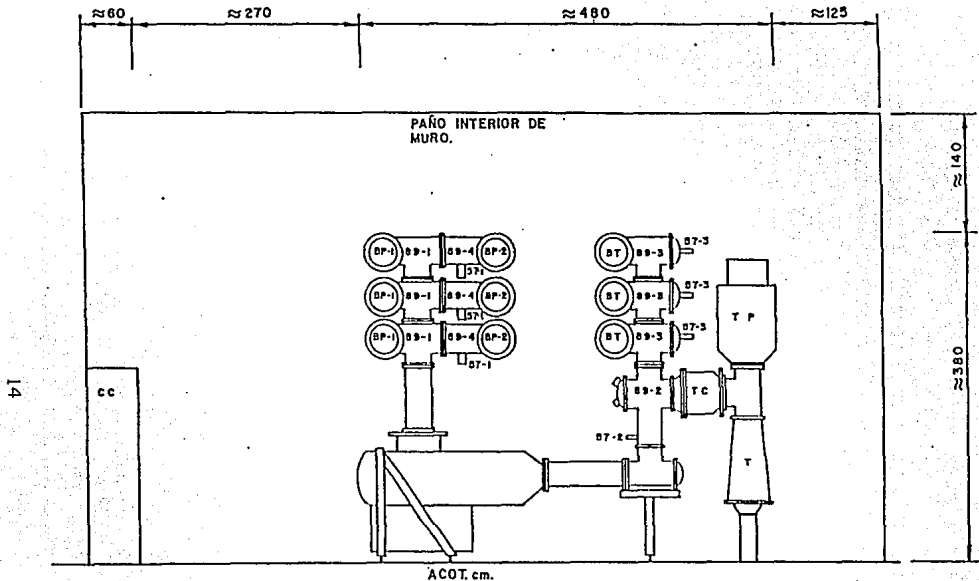


FIGURA 4 ...ARREGLO DE SPRECHER & SCHUH,
 DOBLE BARRA PRINCIPAL Y
 BARRA DE TRANSFERENCIA: 230 kv.

CAPITULO 1
CONCEPTOS BASICOS

CAPITULO 1

CONCEPTOS BASICOS

1.0 CONCEPTO DE SISTEMA DE TIERRAS

Llamaremos sistema de tierras al conjunto de elementos, tales como cable de cobre desnudo de calibre adecuado, conectores, electrodos de tierra (varillas de acero recubiertas de cobre) que interconectados entre si forman una red que se instala a una profundidad adecuada bajo el terreno natural de toda subestación eléctrica o industria con el fin de obtener el minimo valor de resistencia a tierra a la cual se conectaran todos los equipos eléctricos que así lo requieran.

NECESIDAD DE UN SISTEMA DE TIERRAS

- a) Proporcionar un medio seguro para proteger al personal en la proximidad de sistemas o equipos conectados a tierra de los peligros de una descarga eléctrica bajo cualquier condición de falla que se presente.
- b) Proporcionar un circuito de muy baja impedancia para la circulación de las corrientes de tierra que se generen ya sea por una falla del sistema eléctrico o al mal funcionamiento de cualquier equipo a tierra.
- c) Mantener superficies equipotenciales lo más bajas posibles dentro de la subestación para así proporcionar una mayor seguridad al personal que labora en ellas.
- d) Facilitar mediante la operación de relevadores u otros elementos adecuados la eliminación de las fallas a tierra en los sistemas eléctricos.

- e) Proveer un medio de descarga y desenergización de equipos antes de proceder a tareas de mantenimiento.
- f) Proporcionar mayor confiabilidad y continuidad en el servicio eléctrico.

1.1 COMPONENTES BASICOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS Y FUNCIONES PRINCIPALES.

El sistema de tierras de una subestación se integra con los siguientes elementos:

- Conductores.
- Electrodo o varilla de tierra.
- Conectores o juntas.
- Barras para pararrayos.

Cada elemento tendrá las siguientes características:

- 1.- Resistencia a la corrosión con el fin de retardar su deterioro según el ambiente en que se localice.
- 2.- Conductividad eléctrica de tal manera que no contribuya sustancialmente con diferencias de potencial locales en el sistema de tierras.
- 3.- Capacidad de conducción de corriente suficiente para soportar los esfuerzos térmicos y mecánicos durante las más severas condiciones de magnitud y duración de la corriente de falla.
- 4.- Resistencia mecánica y robustez de tal manera que soporte esfuerzos electromecánicos y daño físico.

1.2 CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE TIERRAS

CONDUCTORES.

Los conductores utilizados en los sistemas de tierras son de cable de cobre de calibres arriba de 4/0 AWG dependiendo del sistema que se utilice. Se ha escogido el calibre de 4/0 AWG en cobre por razones mecánicas, ya que eléctricamente pueden usarse cables de cobre hasta calibre 2 AWG, para sistemas en anillo se ha usado cable de cobre de 1000 MCM y en cambio para el sistema de malla, se esta usando en la actualidad cable de cobre calibre 4/0 AWG, recomendado por N.T.I.E capitulo 6.

Por otra parte el cobre es la selección más común para los conductores ya que es económico y tiene buena conductividad, además de ser resistente a la corrosión y a la fusión.

Sin embargo el calibre de los conductores se determinará por requerimientos de conducción de corriente y el diámetro de las varillas por resistencia mecánica.

ELECTRODOS

Son varillas que clavan en terrenos más o menos blandos y que sirven para encontrar zonas húmedas, y por lo tanto con menor resistividad eléctrica. Son especialmente importantes en terrenos desprotegidos de vegetación y cuya superficie, al quedar expuesta a los rayos del sol, está completamente seca.

Los electrodos o varillas de tierras son generalmente de acero, acero galvanizado, acero inoxidable, copperweld o acero embebido en concreto.

El factor principal en la selección de los materiales es la característica de corrosión que presentan al estar enterrados.

En el caso del fierro galvanizado, se puede usar en terrenos cuya constitución química no ataque a dicho material.

En terrenos cuyas componentes son más corrosivas, se utiliza la varilla copperweld que consiste en una varilla de fierro a la cual se adhiere una lamina de cobre. Este material combina

las ventajas de alta conductividad del cobre con la alta resistencia mecánica del hierro, tiene buena conductividad, excelente resistencia a la corrosión, buena resistencia mecánica para ser clavada en el terreno y se puede conectar a los cables de la red de tierras a través de conectores.

BARRAS PARA PARARRAYOS

Con este título distinguimos al conjunto de electrodos que se instalan sobre la parte más elevada de las estructuras de una subestación y que sirven para complementar la red de cables de guarda que se extienden sobre los copetes de las estructuras de la S.E. para proteger las subestaciones de las posibles descargas atmosféricas que originan los rayos.

Sin embargo debido a que las descargas de los rayos son de alta frecuencia es recomendable que las terminales de descarga de la red del hilo de guarda así como las terminales de descarga de los pararrayos deban tener, como mínimo calibre del cable de la red de tierras.

CONECTORES Y ACCESORIOS

Son aquellos elementos que nos sirven para unir a la red de tierras, los electrodos profundos, las estructuras, los neutros de los bancos de transformadores, etc.

Los conectores deberán seleccionarse con el mismo criterio con que se seleccionan los conductores, así mismo tendrán las siguientes propiedades:

- a) Tener dimensiones adecuadas para absorber el calentamiento que se produce al circular por él corrientes elevadas; (resistente a la fusión).
- b) Tener suficientemente asegurados los conductores para soportar los esfuerzos electrodinámicos originados por las fallas, además de no permitir que el conductor se mueva dentro de él.

Los conectores utilizados en los sistemas de tierras son principalmente de tres tipos:

- a) Conectores atornillados.
- b) Conectores a presión.
- d) Conectores soldados.

Todos los tipos de conectores deben poder soportar las corrientes de la red de tierras en forma continua.

Los conectores atornillados se fabrican con alto contenido de cobre, formando dos piezas que se unen por medio de tornillos cuyo material está formado por bronce al silicio que les da alta resistencia mecánica.

La utilización del bronce, que es un material no magnético, proporciona una conducción segura para las descargas atmosféricas que son de alta frecuencia.

Conectores de presión. Incluye todas las conexiones que mediante presión mantienen en contacto al conductor con el conector. En este tipo están comprendidos los de tornillo y los de compresión. Estos conectores deberán diseñarse para una temperatura de 250-350 grados centígrados.

Los conectores a presión son más económicos que los atornillados y dan mayor garantía de buen contacto.

Los conectores soldables o exotérmicos. El cual mediante una reacción química el conductor y el conector se sueldan en una conexión molecular. Este tipo de conector por su naturaleza soporta la misma temperatura de fusión que el conductor.

Los conectores para sistemas de tierras difieren de los usados en barras colectoras, en que se fabrican para unir los electrodos de tierras al cable; de la malla de tierra al cable de la estructura, etc.. En general se utilizan en los siguientes tipos de conexiones atornilladas:

- a) Del electrodo al cable de cobre, tomando en cuenta si el cable es paralelo o perpendicular al electrodo.
- b) Del electrodo a dos cables verticales.
- c) Del electrodo a tres cables verticales.
- d) De un cable a un tubo o columna.

- e) De dos cables a un tubo perpendicular a ellos.
- f) Zapata para conexión a diferentes equipos.
- g) Conector "T" de cable a cable.
- h) De un cable a placa.
- i) De dos cables a placa.
- j) De tres cables a placa.
- k) De varilla a placa.

1.3 METODOS BASICOS PARA EL ANALISIS DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO O SUELO.

La conductividad eléctrica de los materiales que constituyen la superficie de la tierra es muy baja comparada con la alta conductividad de los metales, dos principales componentes de la tierra, óxido de silicio y óxido de aluminio son excelentes aislantes y la conductividad de la tierra es debido en gran medida a las sales y humedad contenida entre estos dos componentes. Por otra parte hasta un semiconductor puede conducir una considerable cantidad de corriente si la sección transversal es suficientemente grande y respecto a esto la tierra por su gran profundidad no presenta limitaciones.

RESISTIVIDAD DEL TERRENO

La resistividad eléctrica (ρ) o resistencia específica de un terreno se puede definir como la resistencia de un volumen de éste, el cual tiene un área con sección transversal y longitud unitaria, tal como se muestra en la figura No. 5.

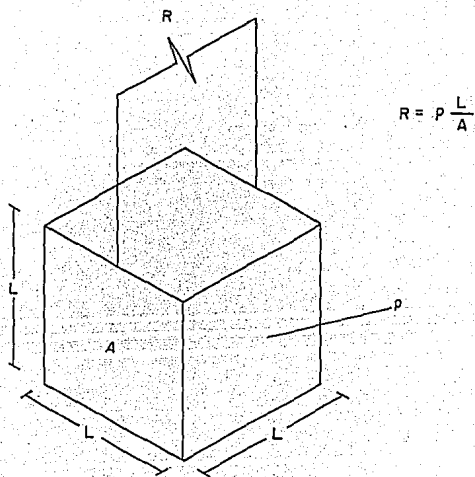
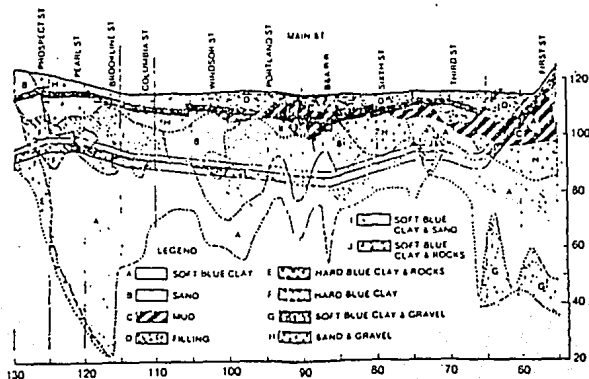


fig. 5

La resistividad del terreno depende de algunos parámetros, estos pueden ser de la distancia del terreno, así como de la profundidad, la composición física del terreno, etc.

La resistividad es mucho más pequeña abajo del subsuelo con nivel de agua abajo de éste. La siguiente figura muestra un estrato del subsuelo debajo de una calle principal en Cambridge Massachusetts.



ESTRATO DE SUBSUELO DEBAJO DE UNA
CALLE PRINCIPAL EN CAMBRIDGE
MASSACHUSETTS

fig. 6

Para determinar las características del suelo, normalmente se obtienen muestras hasta una profundidad razonable que pueda permitir juzgar de la homogeneidad y condiciones de humedad o nivel de aguas freáticas. Para determinar la resistividad eléctrica es conveniente hacer mediciones con métodos y aparatos aceptados para estos fines. Las mediciones deben incluir datos sobre temperatura y condiciones de humedad en el momento de efectuarlas, tipo de terreno, profundidad de la medición y concentración de sales en el terreno.

TECNICAS DE MEDICION

Existen 2 métodos para la medición de la resistividad del terreno:

a) METODO DE LOS 4 PUNTOS O METODO DE WENNER

Este método es el más usado para la medición de la resistividad promedio del terreno.

Se entierran pequeños electrodos a una profundidad "b" y espaciados a intervalos "a". Se hace circular una corriente de prueba I entre los dos electrodos exteriores y se mide con un voltmetro de alta impedancia el voltaje en los 2 interiores. La relación V/I nos dará la resistencia en ohms.

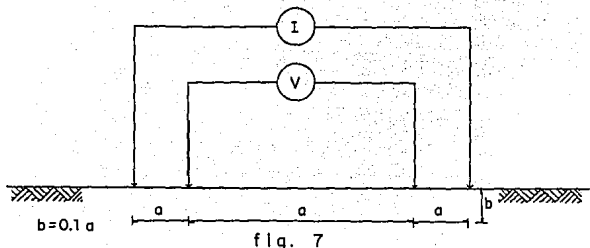
Sin embargo existen 2 variaciones en este método:

A) Electrodos igualmente espaciados o Arreglo de Wenner. Con este arreglo los electrodos están igualmente espaciados como se muestra en la figura 7.

Sea "a" la distancia entre 2 electrodos adyacentes, entonces la resistividad en términos de las longitudes "a" y "b" que podemos medir será:

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

La localización de los electrodos es sobre una línea recta.



Si la longitud "b" es mucho menor que la longitud "a", puede despreciarse y la fórmula se reduce a:

$$\rho = 2 \pi a r$$

y da aproximadamente la resistividad promedio (también conocida como resistividad aparente) del terreno.

Las lecturas obtenidas en campo pueden graficarse en función de su espaciamento, indicándose donde existen capas de diferente suelo con sus respectivas resistividades y profundidades.

- B) Electrodos no igualmente espaciados o Arreglo de Schlumberger-Palmer.

Una desventaja del método de Wenner es el decremento rápido en la magnitud del voltaje entre los dos electrodos interiores cuando su espaciamento se incrementa a valores muy grandes. Para medir la resistividad con espaciamento grande entre los

electrodos de corriente, puede usarse el arreglo mostrado en la figura 8.

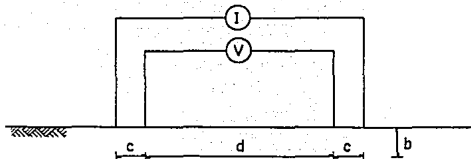


fig. 8

Los electrodos de potencial se localizan lo más cerca de los correspondientes electrodos de corriente, esto incrementa el potencial medido.

La fórmula empleada en este caso puede determinarse fácilmente. Si la profundidad "b" de los electrodos es pequeña comparada con la separación "d" y "c", entonces la resistividad aparente puede calcularse como:

$$\rho = \frac{\pi c(c+d)r}{d}$$

Además con los valores grandes de $(d/(2c + c))$, las variaciones de las resistividades medidas debidas a irregularidades en la superficie son reducidas a un mínimo, dando resultado a mediciones más precisas.

b) METODO DE 3 PUNTOS O CAIDA DE POTENCIAL

El diagrama de conexiones se muestra en la siguiente figura 9:

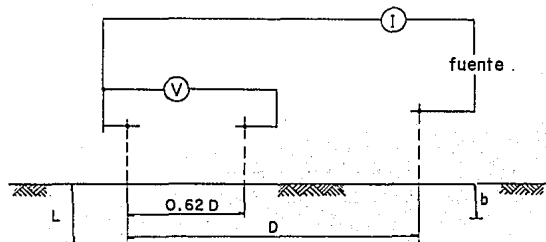


fig. 9

En este método la profundidad L de la varilla de prueba localizada en el terreno es variable. Las otras dos varillas conocidas como varillas de referencia se entierran a poca profundidad "b" y espaciadas sobre una línea recta; con la varilla de voltaje localizada a 62% de la distancia entre la varilla de corriente y la varilla de prueba.

Para minimizar la interferencia inter-electrodos, la varilla de corriente deberá de localizarse al menos a una distancia $5L_{max}$ alejada de la varilla de prueba.

Estas especificaciones para la localización de las varillas de referencia están basadas en la suposición de un suelo uniforme.

Para un suelo uniforme, la resistencia de una varilla de longitud L y diámetro D enterrada en el suelo de resistividad (p) está dada por la siguiente fórmula:

$$r = \frac{\rho}{2\pi L} \left[L_n \frac{2.943 L}{D} \right]$$

Para cada longitud L de la varilla, la resistencia r medida determina el valor de resistividad aparente, el cual cuando se grafica contra L es de gran ayuda para determinar las variaciones de la resistividad del terreno con la profundidad.

La siguiente tabla da una idea de los valores medidos de resistividad:

RESISTIVIDADES MEDIDAS DEL TERRENO

TIPO DE TERRENO	RESISTIVIDAD EN OHMS METROS
TIERRA ORGANICA MOJADA	10
TIERRA HUMEDA	100
TIERRA SECA	1000
ROCA SOLIDA	10000

1.4 LIMITES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO

Uno de los aspectos más importantes que se deben tomar en cuenta en un sistema de tierras, es la circulación de altas corrientes a tierra en las instalaciones eléctricas, las cuales son provocadas por descargas atmosféricas o fallas en los equipos, por lo tanto, nos obliga a tomar precauciones para que los gradientes eléctricos o las tensiones resultantes no ofrezcan algún peligro a los operadores o en general al personal que labora en el recinto (subestación).

Los efectos de las corrientes eléctricas que circulan a través de las partes vitales del cuerpo humano, dependen de la duración, magnitud y frecuencia de estas corrientes.

Intensidades del orden de miles de amperes, producen gradientes de potencial en el punto o puntos de contacto a tierra y si además, se da la circunstancia de que algún ser viviente se apoye en dos puntos, entre los cuales existe una diferencia de potencial debida al gradiente anteriormente mencionado, puede llegar a sufrir una descarga de tal magnitud que sobrepase el límite de su engarrotamiento muscular y que provoque su caída. En tal situación la corriente que circula por su cuerpo aumenta y si por desgracia esta pasa por algún órgano vital como su corazón, puede resultar en fibrilación ventricular y sobrevenir la muerte.

EFECTO DE LA FRECUENCIA

El cuerpo humano es muy vulnerable a los efectos de la corriente eléctrica, en frecuencias de 50 y 60Hz.

El umbral de percepción se acepta generalmente como de aproximadamente 1ma; sin embargo en estas frecuencias una corriente con una magnitud de 100ma puede resultar letal.

En estudios realizados, se ha observado que el cuerpo humano puede soportar mayores corrientes a frecuencias de 25Hz o a la corriente directa o a las frecuencias en el rango de 3000-10000Hz.

EFFECTOS DE LA MAGNITUD Y DURACION

Los efectos fisiológicos más comunes que se presentan al ir incrementando la corriente eléctrica que circula por el cuerpo humano son:

Percepción.

Contracción muscular.

Pérdida del conocimiento.

Fibrilación ventricular.

Paro respiratorio.

Quemaduras.

Las corrientes de 1 a 6ma, generalmente llamada "CORRIENTE DE SOLTAR", no daña la habilidad de la persona sujeta al objeto o equipo energizado, y puede controlar sus músculos y soltarse.

Dentro del rango de 9 a 25ma, las corrientes pueden resultar dolorosas, lo que ocasiona que sea difícil soltar el objeto energizado. Para corrientes más altas, las contracciones pueden dificultar la respiración.

En sí, hasta que la corriente alcanza un rango de 60 a 100ma, es cuando se puede presentar la fibrilación ventricular, paro cardíaco o paro respiratorio y causar la muerte.

Por lo tanto conociendo el umbral de la fibrilación, las corrientes podemos mantenerlas por debajo de este valor, mediante un buen estudio y desarrollo en el diseño de el sistema de tierras.

La corriente de magnitud I_b y un rango de duración de 0.03 a 3 segundos, la cual no ocasiona fibrilación, se relaciona con la energía absorbida por el cuerpo y se describe por la siguiente ecuación:

$$(I_b) 2ts = S_b$$

$$Ec. (1)$$

de donde:

I_b = Magnitud RMS de la corriente que circula por el cuerpo humano.

t_s = Duración del flujo de corriente en segundos.

S_b = Constante empirica que se relaciona con la energia tolerada por un cierto porcentaje de una poblacion dada.

La magnitud y duracion de la corriente que circula por el cuerpo humano, debera ser menor que aquella que cause fibrilacion ventricular. La duracion para la cual una corriente de 50 a 60Hz puede ser soportada por la mayoria de las personas, esta relacionada con su magnitud de acuerdo con la ecuacion (1).

En estudios realizados, se ha supuesto que el 99.5% de las personas pueden soportar de manera segura, sin fibrilacion ventricular, el paso de una corriente en magnitud y duracion, por lo que es determinada por la siguiente formula.

$$I_b = \frac{K}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec.(2)}$$

Donde en adiccion, a los terminos definidos en la ecuacion (1)

$$K = \sqrt{S_b}$$

Entonces la energia que puede tolerar o soportar el 99.5% de las personas con un peso aproximado de 50Kg, da como resultado $S_b=0.0135$, por lo que $K_{50}=0.116$ y por lo tanto la formula para la corriente permisible por el cuerpo humano es:

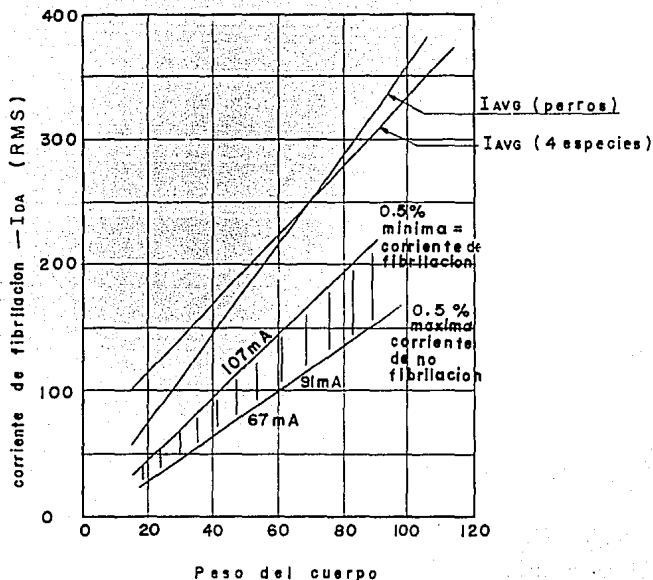
$$I_b = 0.116 \sqrt{t_s} \quad \text{Ec.(3)}$$

Para un peso aproximado de 70 Kg la formula queda:

$$I_b = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec.(4)}$$

Este valor podemos considerarlo típico para los cálculos, ya que la mayoría de la población tiene un peso alrededor de los 70Kg.

En la gráfica siguiente se muestran las corrientes de fibrilación promedio en base a diferentes pesos del ser humano y varios animales, basándose en un tiempo de shock de 3 segundos.



valores de la constante K para valores efectivos RMS de:

$$I_{13} (K = I_{13} \sqrt{t_s})$$

$$K_{70} = 0.091 \sqrt{3} = 0.157$$

$$K_{50} = 0.067 \sqrt{3} = 0.116$$

$$K_{50_{\text{fibrilacion}}} = 0.107 \sqrt{3} = 0.185$$

fig. 9A

1.5 POTENCIALES PELIGROSOS

Generalmente las personas asumen que cualquier objeto aterrizado puede ser tocado con seguridad, cuando la resistencia a tierra del sistema es baja, es posible que esta creencia ha ocasionado accidentes.

Las condiciones que pueden provocar un posible accidente son:

- 1.- La corriente de falla a tierra muy elevada en relación con el área que ocupa el sistema de tierras y su resistencia a una tierra remota.
- 2.- La resistividad del suelo y la distribución de la corriente que pueda generar gradientes de potencial elevados en la superficie.
- 3.- La posición de un individuo entre dos puntos con una alta diferencia de potencial.
- 4.- La duración de la falla, el flujo de corriente a través del cuerpo humano por un tiempo suficiente para causar quemaduras y hasta la muerte.

Sin embargo es necesario para una buena comprensión tomar en cuenta los diversos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial. Las diferencias de potencial tolerables se determinan de acuerdo con los conceptos de:

- a) Resistencia del cuerpo humano.
- b) Potencial de "paso".
- c) Potencial de "contacto".
- d) Potencial de "transferencia".

a) RESISTENCIA DEL CUERPO HUMANO

Para la corriente directa y corriente alterna a frecuencia nominal, el cuerpo humano puede representarse por una resistencia. Esta resistencia esta medida entre extremidades, esto es, entre una mano y ambos pies o entre un pie y otro. Un valor de resistencia para el cuerpo humano es

aproximadamente de 300 ohms, sin embargo por estudios realizados más a fondo se ha determinado un rango entre 500 y 300 ohms.

Para altos voltajes y corrientes (arriba de 1KV y 5A), la resistencia disminuye por daño o perforación de la piel en el punto de contacto.

Para fines de cálculo se han hecho las siguientes consideraciones:

- a) La resistencia de contacto para las manos y los zapatos es igual a cero.
- b) Se ha seleccionado el valor de 1000 ohms para representar el valor de resistencia del cuerpo humano, de una mano a ambos pies, entre mano y mano o entre un pie y el otro:

Rb:1000 ohms

b) POTENCIAL DE "PASO"

Es el potencial que puede soportar un individuo que se encuentra parado o caminando cerca del lugar de la falla, si se llega a rebasar este potencial, se produce una contracción muscular en las piernas, es decir, no responden a los impulsos del cerebro y el individuo cae al piso, donde queda expuesto a las corrientes que circulan por el corazón.

Este punto será tratado con mayor detenimiento en el Capítulo V.

c) POTENCIAL DE "CONTACTO".

Este potencial se presenta cuando se toca una estructura por la cual circula una corriente de falla. Tomando las consideraciones de corriente de fibrilación y de resistencia del cuerpo humano.

Al igual que en el inciso anterior este tema será tratado en el capítulo V.

d) POTENCIAL DE "TRANSFERENCIA".

Este potencial se produce cuando existen elementos metálicos que salen del lugar de la falla, como son rieles, hilos de guarda, tuberías, etc.

Bajo condiciones normales del equipo eléctrico que está puesto a tierra opera a nivel de voltaje cero o cercano a cero, siendo este potencial idéntico al de una red remota. Durante una condición de falla se eleva el potencial con respecto a la red remota, existiendo una diferencia de potencial, que es proporcional a la magnitud de la corriente en la malla de tierras y a su resistencia.

La figura 10 muestra este tipo de potencial y su circuito equivalente.

1.6 TIPOS DE FALLAS A TIERRA

Existen diferentes tipos de fallas a tierra en los sistemas eléctricos, sin embargo es difícil determinar que tipo de falla puede ocurrir y en que lugar el flujo de corriente será mayor entre la malla de tierras y el terreno que la rodea.

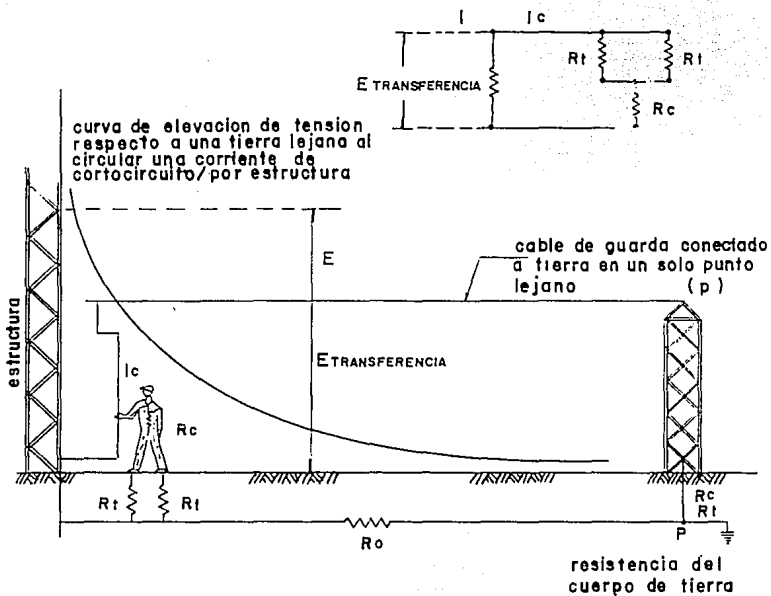
Para nuestro caso consideraremos dos casos críticos:

- a) Falla monofásica a tierra.
- b) Falla de línea a línea a tierra (falla bifásica a tierra).

Las fórmulas para calcularlas son:

$$I_o = \frac{E}{X_1 + X_2 + X_o} \quad \text{Falla Monofásica}$$

$$I_o = \frac{EX_2}{X_1(X_o + X_2) + X_2X_o} \quad \text{Falla Bifásica a tierra}$$



POTENCIAL DE TRANSFERENCIA

fig. 10

donde:

I_0 = Corriente RMS simétrica de secuencia cero en el punto de falla.

E = Voltaje en el punto de falla.

X_1 = Reactancia equivalente de secuencia positiva en el punto de falla.

X_2 = Reactancia equivalente de secuencia negativa en el punto de falla.

X_0 = Reactancia equivalente de secuencia cero en el punto de falla.

En los esquemas siguientes se puede observar la probabilidad de que pueda ocurrir una falla en el sistema.

caso 1.- falla dentro del local de la estacion,
sistema de tierras local solamente, la cor-
riente de falla sigue el camino metalico sumi-
nistrado por la red de tierras, ninguna cor-
riente apreciable fluye en la tierra

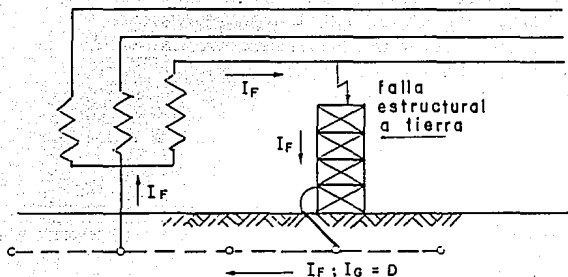


fig. 11

caso 2.- falla en el local de la estación.
 neutro conectado a tierra solo en punto
 remoto.
 la corriente total de falla fluye de la
 red de tierras hacia la tierra.

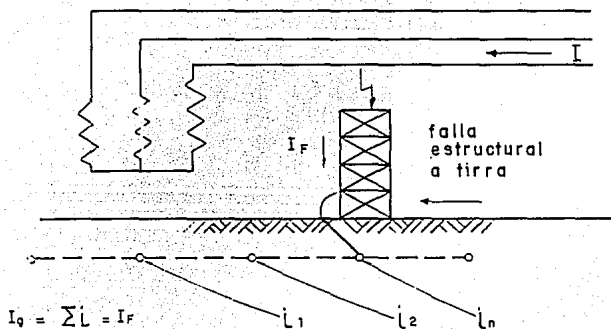


fig. 12

caso 3.- falla en la estacion. sistema conectado a tierra tanto en la estacion como en otros puntos. la corriente de falla regresa al neutro local a través de la red de tierras y a los neutros remotos a través de la tierra. esta es la componente que impera en el estudio de tensiones peligrosas.

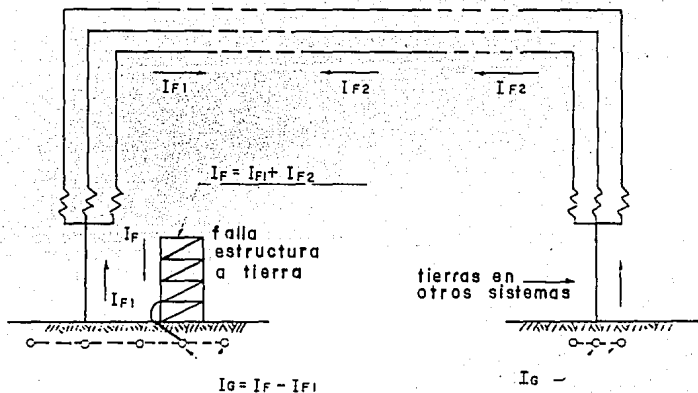


fig. 13

caso 4.-falta en la linea fuera de la estacion.
 sistema a tierra localmente y en otros puntos.
 parte de la corriente regresa de la tierra
 al sistema de tierras local y determina el
 aumento de potencial y gradientes alli.
 casos 1, 2 y 3 muestran fallas dentro del
 local de la estacion.
 el caso 4 muestra una falla externa en
 la linea.

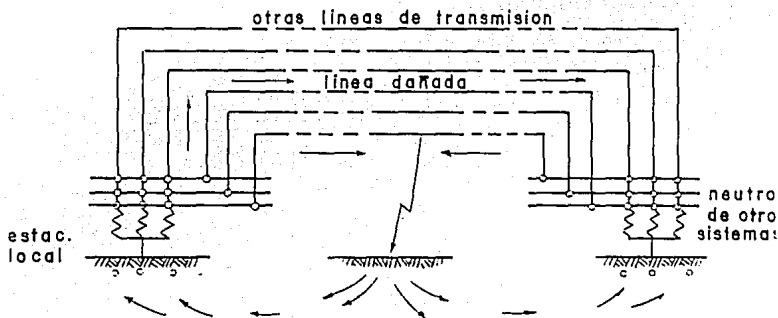


fig. 14

CAPITULO 2
FALLAS INTERNAS

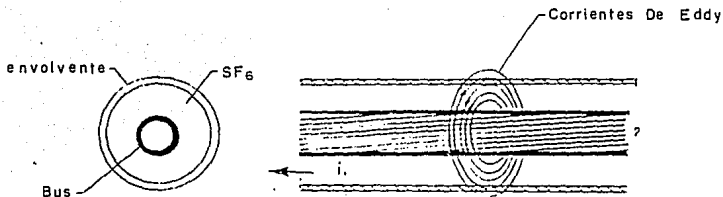
CAPITULO 2

2.0 FALLAS INTERNAS

2.0 CORRIENTES PARASITAS.

El tipo de pérdidas magnéticas que se producen en el acero está causado por las corrientes parásitas originadas por la presencia de corrientes eléctricas en el acero. En la misma forma que se produce voltaje y corriente eléctrica en los conductores de cobre que están sometidos a campos magnéticos alternos o giratorios.

Este tipo de corrientes son indeseables y se les denomina corrientes parásitas o de Eddy. Son causa de calentamiento y de pérdidas en el acero. En la siguiente figura se da una idea general de la importancia de este tipo de corrientes y su relación con el campo magnético que recorre el acero.



Como se puede ver en la figura, la dirección de la corriente forma un ángulo recto con la dirección del campo

magnético y cuando el campo se invierte, la corriente nominal lo hará.

En las envolventes trifásicas los campos eléctricos generados por la corriente de los conductores prácticamente se compensan, por lo que las corrientes que se inducen en la envolvente son nulas y se eliminan las pérdidas por el concepto indicado.

2.1 CONSIDERACIONES ESPECIALES PARA SUBESTACIONES AISLADAS EN GAS (SF₆).

Antes de examinar los conceptos básicos de los buses equivalentes de las subestaciones aisladas en gas (GIS), es útil aclarar la diferencia entre corrientes circulantes y corrientes de Eddy, así como su papel en la generación de voltajes en el blindaje para envolventes a tierra y enlazadas entre fases, la ocurrencia de voltajes en el exterior sobre del blindaje es de dos tipos, un voltaje de modo común inducido longitudinalmente y un voltaje de modo transversal causado por las corrientes de Eddy.

Los dos tipos de voltaje pueden asumirse superpuestos.

Analizando primero el modo transversal, cualquier blindaje tubular no magnético alrededor de un conductor contendrá en algún grado un campo magnético alterno producido por el flujo de corrientes en el interior del conductor, por lo tanto se reducirá un poco el efecto de ese campo sobre otros conductores exteriores.

Este efecto de blindaje resulta únicamente por la presencia de las corrientes de Eddy circulando en un plano perpendicular respecto al conductor como si la envolvente consistiera de segmentos circulares con flujo de corriente no longitudinal entre ellos. Y como las corrientes producen su propio campo magnético opuesto y de sentido contrario al campo del conductor interno, un voltaje transversal ocurrirá a través de la envolvente ya sea que esté o no aterrizada.

Sin embargo a 60 Hz, ninguna envolvente no magnética de un espesor práctico proporciona suficiente blindaje para considerarse importante ya que los voltajes inducidos no

son mayores a unos cuantos volts y la eficiencia relativa del blindaje será usualmente menor del 10%, debido a que la envolvente típica de diseño continuo de las GIS es efectiva de 80 a 90 %, el efecto de blindaje predominante resulta de la circulación longitudinal de corrientes en una trayectoria cerrada vía las envolventes de cada fase y sus uniones.

Con este análisis se pueden hacer las siguientes suposiciones:

- 1.- Para envolventes continuas el efecto de las corrientes de Eddy puede ser completamente despreciado como un factor de contribución de voltaje.
- 2.- La interconexión de un conductor interno de una fase con cualquier otro conductor externo puede ser vista como no afectada por el efecto de las corrientes de Eddy en el blindaje de su propia envolvente.

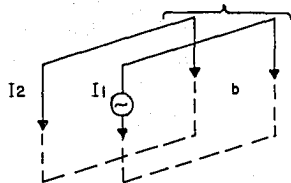
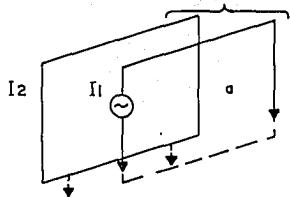
La diferencia de potencial tolerable entre dos puntos de contacto puede ser calculado en términos de las constantes del circuito y de la corriente tolerable por el cuerpo humano, a través del teorema de thevenin (teorema de la fuente equivalente de helmholz).

La corriente del cuerpo resultante del contacto deberá ser igual a aquella ocasionada por el voltaje preexistente y cuyo flujo sería a través de la resistencia del cuerpo, asumiendo que la resistencia es de 1000 ohms, en serie de la red equivalente conectada a los puntos de contacto. En realidad la red siempre incluye al menos dos trayectorias en paralelo, una trayectoria directa a través de la envolvente y de la estructura de soporte hasta tierra y otra trayectoria paralela de el circuito accidental, en el que la corriente pasa entre mano y mano o mano y pie, ahora tomando en cuenta los efectos longitudinales consideremos un par de circuitos elementales modelos A y B. Figura 16.

Cada esquema ilustra dos circuitos acoplados descritos por las siguientes ecuaciones generales.

$$V_s = Z_i I_1 + Z_m I_2 \quad \dots \text{Ec. (5)}$$

$$0 = Z_m I_1 + Z_e I_2 \quad \dots \text{Ec. (6)}$$



Par de Circuitos Elementales

fig. 16

Donde:

Z = Impedancia propia de el conductor de fase con retorno de tierra.

Z_e = Impedancia propia de la envolvente exterior.

Z_m = Impedancia mutua entre el conductor de fase y la envolvente.

S = Espaciamiento entre el par de circuitos acoplados.

Despejando I₂ de la ecuación (6) y sustituyendo en la ecuación (5) se obtienen las expresiones para las impedancias Z del circuito aparente como se vio por la fuente y la magnitud relativa, así como la dirección de I₂ con respecto a I₁:

$$I_2 = -\frac{Z_m}{Z_e} I_1 \quad \dots \text{Ec. (7)}$$

$$Y \quad V_s = I_1 Z_1 \quad \dots \text{Ec. (8)}$$

2.2 EQUIVALENTE "T" DE UN TRANSFORMADOR IDEAL.

$$Z = Z_i - \left[\frac{Z_m}{Z_e} \right]^2 \quad \dots \text{Ec. (9)}$$

Por otro lado estos resultados pueden ambos ser interpretados y manejados en términos del equivalente conocido como "T" de un transformador ideal, con las siguientes implicaciones.

- 1.- Si la trayectoria de la corriente de retorno incluye conexión a tierra y la mayor parte de esta regresa via

el blindaje, la impedancia será cercana a Z' definida como:

$$Z' = Z_i + Z_e - 2Z_m \quad \dots \text{Ec. (10)}$$

Esta condición es equivalente al eliminar la rama de tierra de el equivalente "T" de la Fig. 17.

Es importante notar que todas las conversiones de las ecuaciones (5) y (6) se mantienen, si por ejemplo, ambos conductores son asumidos con igual radio geométrico (RGM) colocados horizontalmente a una distancia.

Se tiene que:

$$h = \frac{S_0}{2}$$

Con respecto a tierra, entonces X_i , X_e y X_m pueden ser expresados con respecto a un plano de tierra como:

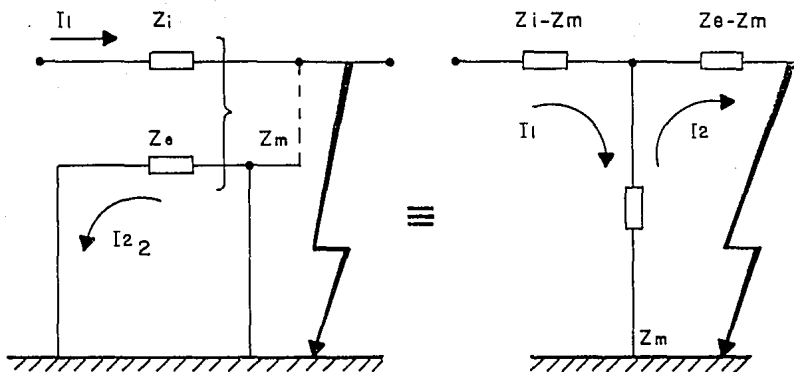
$$X_e = X_i = C \ln \left(\frac{S_0}{\text{RGM}} \right) \quad \dots \text{Ec. (11)}$$

$$X_m = C \ln \left(\frac{S_0}{S} \right) \quad \dots \text{Ec. (12)}$$

Usando la ecuación 24¹ se tiene que:

$$X = C \left[2 \ln \left(\frac{S_0}{\text{RGM}} \right) - 2 \ln \left(\frac{S_0}{S} \right) \right]$$

$$X = 2C \ln \left(\frac{S}{\text{RGM}} \right) \quad \dots \text{Ec. (13)}$$



T-Equivalente de un Transformador Ideal

Lo cual por supuesto es la inductancia de malla cerrado de dos conductores largos paralelos separados por una distancia S.

$$(1) E_{STEP_{50}} = (1000 + C_s(h_s, K) \rho_s) 0.116 \sqrt{ts}$$

2.3 FALLAS INTERNAS.

Como se muestra en las siguientes figuras 18, 19 y 20 en un bus monofásico básico, hay tres posibles sitios donde puede ocurrir una falla dentro del bus con respecto a la fuente de corriente.

- 1.- Falla interna remota de un punto de la envolvente a tierra y la corriente de falla lejos de la fuente.
- 2.- Falla interna remota de un punto de la envolvente a tierra y la corriente de falla cerca de la fuente.
- 3.- Falla interna entre dos puntos de puesta a tierra de la envolvente y la corriente de falla al centro de ambos puntos.
 - 1.- *Falla interna.* - como se muestra en la figura 18 la descarga ocurre en el punto "A" y la envolvente se encuentra aterrizada en el punto E.

Analizando este primer caso se puede ver que la corriente recorrerá un camino largo primero a través del conductor hasta el punto de falla y después por la envolvente hasta el punto donde está aterrizada.

De acuerdo a la ecuaciones 06-09 las caídas de voltaje en la resistencia e inductancia son:

$$X_e = C \ln \left(\frac{S_0}{RMG} \right) \quad \dots Ec.(14)$$

$$X_i = C \ln \left[\frac{S_0}{r_0} \right] \quad \dots \text{Ec (15)}$$

$$2 X_m = 2 C \ln \left(\frac{S_0}{\text{RMG} - r_0} \right) = C \ln \left[\frac{S_0^2}{(\text{RMG} - r_0)^2} \right] \quad \dots \text{Ec (16)}$$

Consecuentemente:

$$V_{eR} = \ell R_e I \quad \dots \text{Ec.(17)}$$

$$V_{eL} = J \ell I (4.61 \omega \cdot 10^{-7}) \text{Log} \frac{(\text{RMG} - r_0)^2}{r_0 \text{RMG}} \quad \dots \text{Ec(18)}$$

Donde:

r_0 = Radio efectivo del bus interno, tomado como $r_0 = 0.9 d/2$ siendo d el diámetro real en m.

RMG = Radio medio geométrico de la envolvente.

$\text{RMG} = D_e/2$ D_e = Radio interno + Radio externo en m.

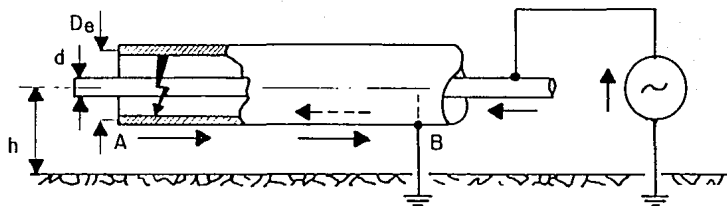
I = Corriente del bus interno en el punto A.

R_e = Resistencia de la envolvente por unidad de longitud en Ω/m .

ℓ = Longitud de la envolvente en m.

h = Altura sobre el nivel de tierra en m.

w = $2\pi f$, siendo f la frecuencia en hertz.



Falla Interna Remota de un Punto de la Envolvente a Tierra y la
Corriente de Falla Lejos de la Fuente.

Fig. 18

Si la resistencia del blindaje e inductancia son considerados la caída de voltaje total a lo largo de la envolvente es:

$$V_e = [V_{eR}^2 + V_{eL}^2]^{1/2} \quad \dots Ec(19)$$

Sin embargo, dado que únicamente un campo magnético mínimo existe fuera de la envolvente y la mayor parte del flujo es retenido dentro del blindaje, actuando como un cable coaxial se tiene que:

$$X_e + X_i - 2X_m \approx 0 \quad \dots Ec(20)$$

Y V_e SE REDUCE A

$$V_e = V_{eR} \quad \dots Ec(21)$$

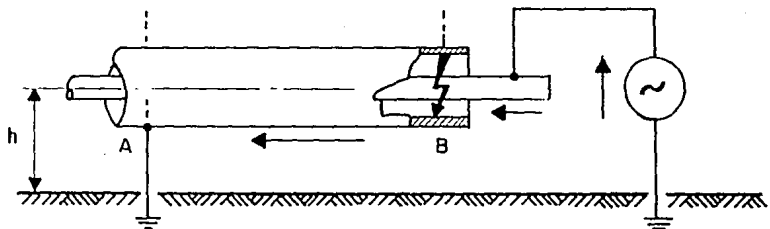
Esta caída de voltaje está en fase con la corriente de falla.

- 2.- *Falla interna:* envolvente a tierra en el punto "A"; descarga ocurrida en el punto "B", Fig. 19.

En contraste con la condición (1), aquí la resistencia puede ser despreciada puesto que el efecto de la inductancia de la envolvente es predominante. La caída de voltaje será:

$$V_e = V_{e0} = J \lambda [4.61 \omega \times 10^{-2}] \text{Log.} [2h/RMG] I \quad \dots Ec(22)$$

- 3.- *Falla interna:* envolvente a tierra en ambos extremos; descarga ocurrida entre los puntos A y B Fig. 20.



FALLA INTERNA REMOTA DE UN PUNTO DE LA ENVOLVENTE
A TIERRA Y LA CORRIENTE DE FALLA CERCA DE LA FUENTE

Fig. 19

Para una falla en cualquier punto entre A y B, la corriente de falla se dividirá de acuerdo a las impedancias a tierra.

Por lo tanto la caída de voltaje longitudinal será máxima cuando se presentan las siguientes condiciones para las corrientes respectivas, corrientes de lado izquierdo y derecho I_A e I_B .

$$V = Z_A I_a \quad \dots \text{Ec. (23)}$$

$$V = Z_B I_b \quad \dots \text{Ec. (24)}$$

$$I_a + I_b = I \quad \dots \text{Ec. (25)}$$

Con Z_A y Z_B determinamos en unidades de longitud por unidad, λ_A y λ_B y la longitud total de envolvente entre los puntos a tierra A y B son:

$$Z_A = \lambda_a Z_A \quad \dots \text{Ec. (26)}$$

$$Z_B = \lambda_b Z_B \quad \dots \text{Ec. (27)}$$

$$\lambda_{ob} = \lambda_a + \lambda_b \quad \dots \text{Ec. (28)}$$

Aplicando la expresión de la ecuación (22) y la fórmula de la ecuación (20), para determinar Z_A y Z_B puede demostrarse que para λ_a y λ_b desconocidas, satisface la implicación de forzar a que: $\lambda_a + \lambda_b = \lambda_{ob}$

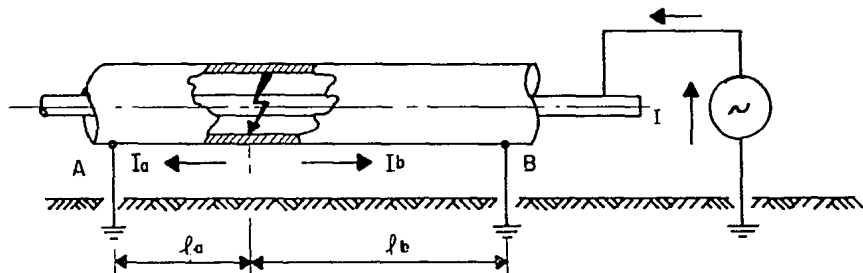
Donde la solución será:

$$\lambda_a = \frac{1 - \sqrt{Z_A / Z_B}}{1 - Z_A / Z_B} \times \lambda_{ob} \quad \dots \text{Ec. (29)}$$

$$\lambda_b = \frac{1 - \sqrt{Z_B / Z_A}}{1 - \sqrt{Z_B / Z_A}} \times \lambda_{ob} \quad \dots \text{Ec. (30)}$$

En el caso de que $Z_A = Z_B$ la corriente se podría dividir igualmente con una falla interna ocurriendo en el centro:

$$I_a = I_b = 0.5 I_{ab}$$



57

Falla Interna entre dos puntos a tierra
y la corriente de falla al centro

CAPITULO 3
FALLAS EXTERNAS

CAPITULO 3

FALLAS EXTERNAS

3.0 CONSIDERACIONES GENERALES.

Para el diseño de un arreglo típico continuo, donde las envolventes de cada una de las fases presentan una continuidad eléctrica en cada uno de sus extremos, es correcto considerar que todas las corrientes del blindaje pueden retornar por las envolventes de las otras fases y que las corrientes no inducidas fluirán dentro y fuera a través de la trayectoria a tierra.

Desarrollo.

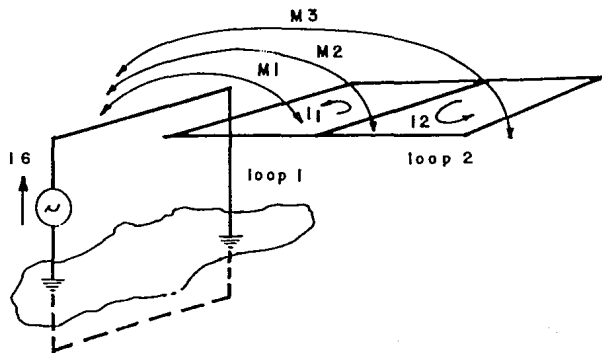
Ahora bien, si se consideran 3 buses ubicados en un sólo plano, las envolventes se podrán considerar como si fueran 2 ciclos superpuestos cada uno de el otro y cada uno por separado del conductor energizado como se muestra en la Fig. 21 donde se ve que, es la fase exterior la que está energizada en este caso.

Por otro lado, haciendo un análisis de la figura antes mencionada, podemos encontrar que las ecuaciones que rigen en el sistema son las que se enuncian a continuación:

$$(Z_{M1} - Z_{M2}) I_0 + Z_{LOOP} I_1 = 0 \quad \dots \text{Ec. (31)}$$

$$(Z_{M2} - Z_{M3}) I_0 + Z_{LOOP} I_2 = 0 \quad \dots \text{Ec. (32)}$$

Si I_0 es conocida, la cual para nuestro estudio corresponde a la corriente que fluye dentro del bus al punto de falla



modelo equivalente de un circuito de envolvente no aterrizada.

Fig. 21

externa; podemos conocer las otras dos corrientes que estarán fluyendo en los loop's que correspondientemente son e , mediante una relación con I_o, esto es:

$$(-I_1 / I_o) = (Z_{M1} - Z_{M2}) / Z_{LOOP} = (\lambda'_m / \lambda'_o) \frac{\text{Log} [S / (\text{GMR} - r_o)]}{2 \text{Log} (S / \text{GMR})} \quad \dots \text{Ec (33)}$$

$$(-I_2 / I_o) = (Z_{M2} - Z_{M3}) / Z_{LOOP} = (\lambda'_m / \lambda'_o) \frac{\text{Log} [2S / S]}{2 \text{Log} (S / \text{GMR})} \quad \dots \text{Ec (34)}$$

Donde S, ahora será el espaciamiento entre dos buses paralelos y además:

$$\lambda'_o = \lambda_{BUS} + \frac{1}{2} \lambda_{UNIONES}$$

Alternativamente cuando el conductor de la fase central es el que va a alimentar la falla, el valor aproximado de la corriente en la envolvente podrá ser determinado mediante la aplicación de la Ecuación (33) sustituyendo por o como el problema en cuestión lo requiera, asumiendo que la corriente en la envolvente de la fase central será entre un 10% y 15% mayor que la calculada, por otro lado cuando se calcula la corriente que fluye en una envolvente de una fase que esté ubicada en los extremos, tenemos que:

$$\lambda''_o = \lambda_{BUS}$$

$$\lambda''_o = \lambda_m$$

Una vez que las corrientes inducidas son determinadas independientemente para la falla monofásica de cada una de las fases; para determinar el valor total de la corriente que fluye durante la falla bifásica o trifásica, se deberá tomar en cuenta que la corriente de la falla está atrasada 180° con respecto a la corriente de la falla bifásica y 120° de la trifásica.

3.1 LIMITACIONES PARA BUS ATERRIZADO Y NO ATERRIZADO.

Debido a que los buses en una subestación en SF₆ (Hexafluoruro de azufre) presentan un número de rutas envolventes unidas eléctricamente en sus extremos, podemos considerar los siguientes casos:

Primero: como ya se ha demostrado en la Fig. 16 asumiremos que el circuito del bus energizado y cualquier otro circuito acoplado a la envolvente tendrán una ruta común de retorno a tierra; así tenemos:

Z_{II} = Impedancia propia de J_{TH} conductor con retorno de tierra.

Z_{IJ} = Impedancia mutua entre J_{TH} y J_{TH} conductores con retorno común de tierra.

Usando el índice "0" para denotar el bus energizado, la caída de voltaje a lo largo del conductor y la relación entre la corriente de corto circuito I_0 e I_N en un sistema, será definido por las siguientes ecuaciones:

$$E_s = Z_{00} I_0 + Z_{0N} I_N \quad \dots \text{Ec. (35)}$$

$$0 = Z_{N0} I_0 + Z_{NN} I_N \quad \dots \text{Ec. (36)}$$

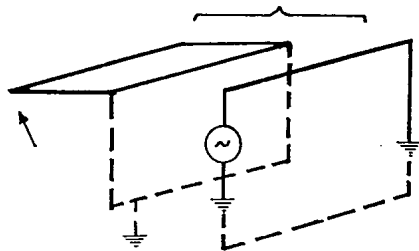
$$\frac{I_N}{I_0} = \frac{Z_M}{Z_{NN}}$$

NOTA: $Z_{N0} = Z_{0N} = Z_M'$

Alternativamente, si el circuito de envolvente se asume no aterrizado y forma un circuito cerrado, como se representa en la Fig. 22, las ecuaciones anteriores cambiarán por:

$$E_s = Z_{00} I_0' + (Z_{01} - Z_{0c}) I_N' \quad \dots \text{Ec. (36a)}$$

$$0 = (Z_{10} - Z_{20}) I_0' + (Z_{12} - Z_{21}) I_N' \quad \dots \text{Ec. (36b)}$$



Concepto simplificado de un loop de envolvente
no aterrizada

Donde: Z'_{NN} es la impedancia propia de la cubierta de la envolvente la cual consiste de dos conductores.

$$Z'_{NN} = Z_{12} - Z_{21}, I_N = I_1 = I_2 = I_{12}, \text{ y } Z'_N = Z_{10} - Z_{20}$$

Desarrollando los conceptos anteriores en un sistema de buses múltiples y considerando un conductor por fase energizado y otro conductor de fase flotando o no conduciendo corriente, donde todas las envolventes están unidas y a la vez aterrizadas; el procedimiento anterior se puede unificar principalmente siguiendo la forma general:

$$\begin{bmatrix} E_s \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} & \dots & Z_{0N} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1N} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{N0} & Z_{N1} & Z_{N2} & \dots & Z_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_0^* \\ I_1^* \\ \vdots \\ \vdots \\ I_N^* \end{bmatrix} \dots \text{Ec. (3)}$$

En cada notación la corriente primitiva I^* puede ser relacionada con la corriente actual I , mediante alguna transformación matricial C , que contendrá arreglos apropiados de 0, 1 y -1.

$$\begin{aligned} [I^*] &= [C][I] \\ \text{Y} \\ [I] &= [C]^{-1}[I^*] \end{aligned} \dots \text{Ec. (3E)}$$

Si la corriente del bus energizado I_0 es conocida (máxima falla asumida), la matriz del sistema ZI podrá ser dividida a lo largo, como lo muestra la línea y el sistema se reduce resolviendo para las corrientes en la envolvente I_1, I_2, \dots, I_N .

Si un sistema trifásico es considerado y la falla en el bus es como se muestra en la figura 17, únicamente necesitamos 3 ecuaciones para conocer la corriente en el blindaje.

Sin embargo, igual que una matriz de 3 x 3 la cual contenga elementos completos, llegará a ser un arreglo de 6 x 6 en los cálculos reales, se considera que los términos de inductancia son significativos y además introduciendo las identidades típicas, se caracteriza una plataforma espaciada de tres envolventes idénticas:

$$X_{10} I_0 + X_{SS} I_1 + X_{1S} I_2 + X_{2S} I_3 = 0 \quad \dots \text{Ec. (39)}$$

$$X_{1S} I_0 + X_{1S} I_1 + X_{SS} I_2 + X_{1S} I_3 = 0 \quad \dots \text{Ec. (40)}$$

$$X_{2S} I_0 + X_{2S} I_1 + X_{1S} I_2 + X_{SS} I_3 = 0 \quad \dots \text{Ec. (41)}$$

En donde: para $i, j = 1, 2, 3$

$$Z_{SS} = Z_{ii} \text{ y}$$

$$Z_{ij} = Z_{ji}$$

$$Z_{1S} = Z_{iS} \text{ Para } i-j = 1$$

$$Z_{2S} = Z_{iS} \text{ Para } i-j = 2$$

Sumando las ecuaciones (39)-(41) y dividiendo entre 3, tenemos como resultado una ecuación de una ganancia de circuito simple, recordando el concepto media geométrica:

$$I_0 (X_{10} + X_{1S} + X_{2S}) / 3 + (I_1 + I_3) (X_{SS} + X_{1S} + X_{2S}) / 3 + \dots \text{Ec (42)}$$

$$I_2 (X_{SS} + 2X_{1S}) / 3 = 0$$

Donde: $(X_{10} + X_{1S} + X_{2S}) / 3 = X_{\text{avg}}(\text{DMG } 0) \quad \dots \text{Ec. (43)}$

$$(X_{SS} + X_{1S} + X_{2S})/3 = X_{2avg} (DMG_2) \quad \dots Ec.(44)$$

$$(X_{SS} + 2X_{1S})/3 = X_{1avg} (DMG_1) \quad \dots Ec.(45)$$

Acomodando $I_1 + I_2 + I_3 = I_N$, la corriente total del blindaje puede ser determinada de la ecuación (46) donde ahora el lado derecho de la ecuación incluye un término de resistencia "R", que representa la resistencia de una trayectoria de retorno de la corriente de la fuente con la reactancia promedio para:

$$(X_{SS} + X_{1S} + X_{2S})/3 \text{ y } (X_{SS} + 2X_{1S})/3$$

Representado por el término medio GMMD como la expresión:
 I_N/I_0 y podrá ser:

$$-I_N/I_0 = \frac{jI_m U \text{Log}(S_0/RMG)}{jI_0 U \text{Log}(S_0/GMMD) + R} \quad \dots Ec.(46)$$

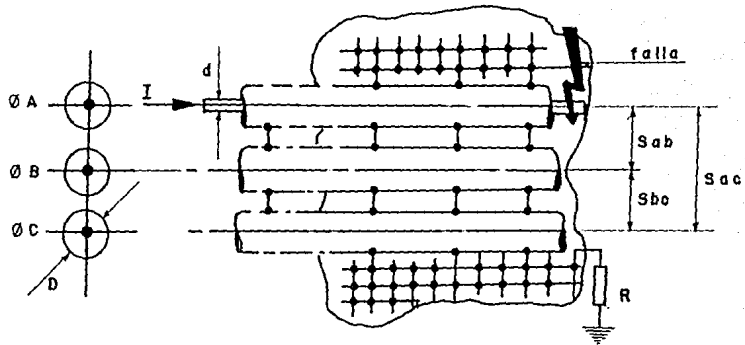
$$GMDo = \left\{ (RMG - r_0) (S) (2S) \right\}^{1/3} \quad \dots Ec.(47)$$

$$GMMD = \left[(DMG_0) (DMG_1) (DMG_2) \right]^{1/3}$$

$$= \left[RMG^3 (S)^4 (2S)^2 \right]^{1/9}$$

$$GMMD = \sqrt[3]{1.587 RMG S^2} \quad \dots Ec.(48)$$

S_0 = Distancia a cada plano o punto de la corriente de retorno, sobre la cual todo el flujo puede ser asumido integralmente, para la consideración de un plano metálico infinito a tierra. S_0 es igual a 2 veces la altura de la GIS sobre el plano de tierra $S_0 = 2h$.



planta arreglo de envolvente de gis con multiples conexiones de tierra.

fig. 23

GMR- r_0 = Distancia de la red interna de la envolvente.

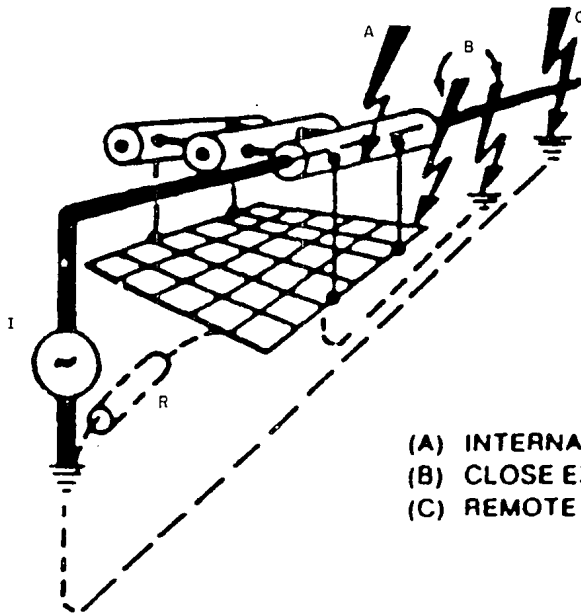
$U(f) = 2.396 f \times 10^{-3}$, donde f es la frecuencia en Hz.

GMR = Radio medio geométrico del blindaje.

3.3 RECOMENDACIONES.

Generalmente si la fuente neutra es remota y no está conectada con la malla de tierra o como en el caso usual, una combinación de envolventes enlazadas y aterrizadas presentará una mucho menor impedancia al paso de la corriente por las uniones de las envolventes horizontales en comparación de las bajadas de los hilos de tierra en, tales casos el uso de las ecuaciones (33 y 34) es adecuado.

Por otra parte, si la fuente neutra es aterrizada y la impedancia de las bajadas de los hilos de tierra es comparable (o menor que) a la impedancia combinada de las uniones de la malla, entonces se produciría una corriente excesiva en la envolvente en tal caso el uso de la ecuación (46) es el adecuado.



- (A) INTERNAL FAULT
- (B) CLOSE EXTERNAL FAULT
- (C) REMOTE EXTERNAL FAULT

CAPITULO 4

DISPOSICIONES BASICAS DE LAS

REDES DE TIERRAS

CAPITULO 4

DISPOSICIONES BASICAS DE LAS REDES DE TIERRAS

Para las redes de tierra, consideraremos 3 sistemas básicos que son los más comúnmente utilizados, estos sistemas los podemos clasificar de la siguiente manera:

- a) Sistema radial.
- b) Sistema de anillo.
- c) Sistema de red o malla.

La aplicación de cada uno de estos sistemas dependerá de la necesidad requerida en cada caso.

A continuación se describirá cada uno de estos sistemas indicando cuales serían sus ventajas o desventajas.

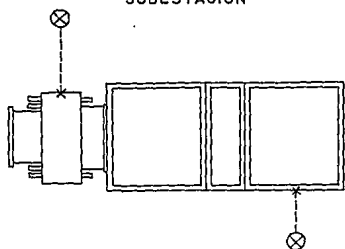
4.0 SISTEMA RADIAL.

Es un sistema barato, pero no es muy recomendable, ya que al producirse una falla en algún equipo de la subestación, se producirían grandes gradientes de potencial; lo cual sería peligroso para los operadores de la subestación o para cualquier persona que se encontrara cerca del equipo en falla, por lo tanto este sistema es el menos satisfactorio.

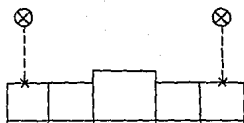
Este sistema consiste en uno o varios electrodos a los cuales se conectan las derivaciones a cada aparato.

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de este tipo de sistema .

SUBESTACION



CCM'S

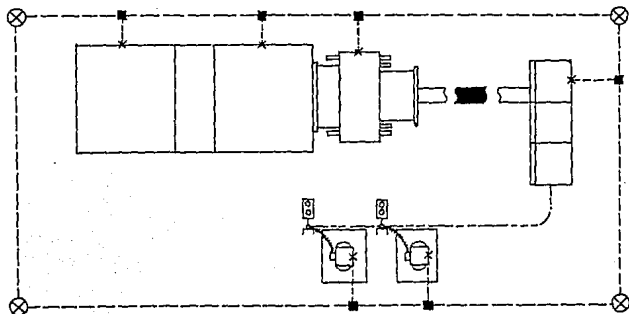


- CABLE DE COBRE DESNUDO
- ⊗ ELECTRODO DE TIERRA
- x CONECTOR MECANICO
- CONECTOR SOLDABLE

4.1 SISTEMA ANILLO.

Como su nombre lo indica, se obtiene colocando un conductor de calibre adecuado en todo el perímetro ocupado por los equipos de la subestación. A todo este perímetro o anillo se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos usando un conductor derivado más delgado. Este es un sistema económico y puede considerarse eficiente ya que se eliminan las grandes distancias de descarga a tierra del sistema radial.

Los potenciales peligrosos tienden a disminuir al disiparse la corriente de falla por varios caminos en paralelo.



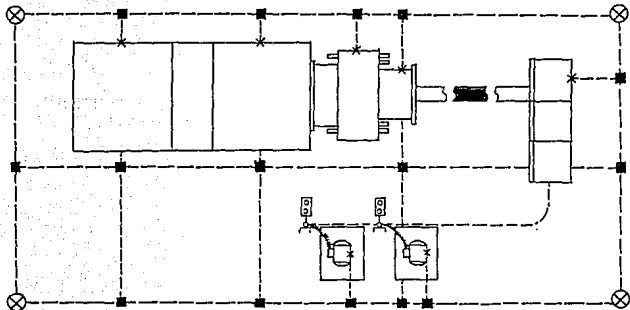
4.3 SISTEMA DE MALLA.

El sistema de red o malla es el más comúnmente usado actualmente en subestaciones eléctricas. Este sistema consiste en un arreglo de conductores paralelos y transversales formando una malla o retícula, a la cual se conectan las derivaciones de cada uno de los equipos de la subestación.

En el perímetro de la malla generalmente se conectan electrodos o varillas de tierra copperweld en partes más profundas para buscar zonas de menor resistividad. Este sistema es el más eficiente ya que permite tener superficies equipotenciales, lo cual dará como resultado una disminución de la corriente de falla rápidamente al tener diferentes caminos de descarga.

Este sistema es el que se considera más eficiente, ya que se limitan los potenciales originados por la circulación de la corriente de falla.

La siguiente figura muestra este tipo de sistema.



CAPITULO 5

ECUACIONES DE REDES DE TIERRAS

CAPITULO 5

ECUACIONES DE REDES DE TIERRAS

5.0 CORRIENTE MAXIMA EN LA MALLA

DETERMINACION DE LA CORRIENTE MAXIMA DE LA MALLA

Para determinar el valor correcto de la corriente máxima de malla que nos servirá en el cálculo de la red de tierras de la subestación, se seguirán los siguientes pasos:

- Evaluar el tipo y localización de fallas a tierra que contribuyan con los mayores flujos de corriente entre la malla y el terreno circundante, produciendo la mayor elevación en el potencial de la malla con respecto a tierra (GPR) y los mayores gradientes de potencial en el área de la subestación.
- Determinar por cálculo, el factor de división de la corriente de falla S_f , para cada uno de los tipos de falla seleccionados en el inciso a) y establecer los valores correspondientes de corriente simétrica de malla, I_g .
- Para cada uno de los tipos de falla y basado en su tiempo de duración t_f , determinar el valor del factor de decremento D_f para los efectos de asimetría de la onda de la corriente de falla.
- Seleccionar el valor más grande del producto $D_f I_g$ y por lo tanto la peor condición de falla; y establecer el valor del factor de proyección C_f para obtener los márgenes para crecimiento futuro del sistema.

CORRIENTE SIMETRICA DE MALLA.

Es una parte de la corriente simétrica de falla a tierra que fluye de la malla de tierras hacia el terreno que la rodea. Puede expresarse como:

$$I_g = S_f I_f \quad \dots Ec (49)$$

Donde:

I_g = Corriente simétrica de malla en Amperes.

I_f = Valor rms de la corriente simétrica de falla a tierra en Amperes.

S_f = Factor de división de corriente que relaciona la magnitud de la corriente de falla a la parte de esta corriente que fluye de la malla hacia el terreno.

CORRIENTE MAXIMA DE MALLA.

Se define como:

$$I_G = C_p D_f I_g \quad \dots Ec (50)$$

Donde:

I_G = Corriente máxima de malla en Amperes.

D_f = Factor de decremento para un tiempo de duración total de la falla t_f en segundos.

C_p = Factor de la proyección que toma en cuenta los incrementos relativos de la corriente de falla a lo largo de la vida útil de la instalación, cuando o existirán incrementos en la corriente de falla, $C_p = 1$.

I_g = Corriente simétrica de malla (valor rms) en Amperes, (calculada anteriormente).

EFECTO DE LA ASIMETRIA (FACTOR DE DECREMENTO).

La máxima corriente de malla I_G , como se describió en el punto anterior, es la máxima corriente asimétrica que fluye entre la malla de tierras y el terreno que la rodea.

Esta corriente incluye la corriente simétrica I_g , así como una corrección para la componente de corriente directa. Esta componente decae exponencialmente y se le conoce como desplazamiento de la corriente cd .

Ya que el diseño de la red de tierra debe considerar la corriente asimétrica, debemos encontrar un factor llamado de decremento D_f el cual tomará en cuenta el efecto de desplazamiento de la componente de cd .

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_0}{t_f} \left[1 - e^{-2t_f/T_0} \right]} \quad \dots Ec (51)$$

Donde:

t_f = Duración de la falla en segundos.

T_0 = Constante de tiempo subtransitoria en segundos.

$$T_0 = \frac{X''}{WR}$$

La relación X''/R es la relación X/R en el punto de falla y para un determinado tipo de falla.

Se presenta la siguiente tabla 1 para D_f y diferentes valores de X/R :

TABLA No. 1

t f (seg)	Ciclos 60 Hz	Factor D f			
		X/R =10	X/R =20	X/R =30	X/R =40
.00833	0.5	1.576	1.648	1.675	1.688
.05	3	1.232	1.378	1.462	1.515
.10	6	1.125	1.232	1.316	1.378
.20	12	1.064	1.125	1.181	1.232
.30	18	1.043	1.085	1.125	1.163
.40	24	1.033	1.064	1.095	1.125
.50	30	1.026	1.052	1.077	1.101
.75	45	1.018	1.035	1.052	1.068
1.00	60	1.013	1.026	1.039	1.052

FACTOR DE DIVISION DE LA CORRIENTE DE FALLA.

Se define como:

$$S_f = \frac{I_g}{3I_0} = \frac{I_g'}{I_f} \quad \dots \text{Ec. (52)}$$

Donde:

I_g = Corriente simétrica de malla.

I_0 = Corriente de secuencia cero en el punto de falla.

S.1 EFECTO DE LA RESISTENCIA A TIERRA DE LA MALLA.

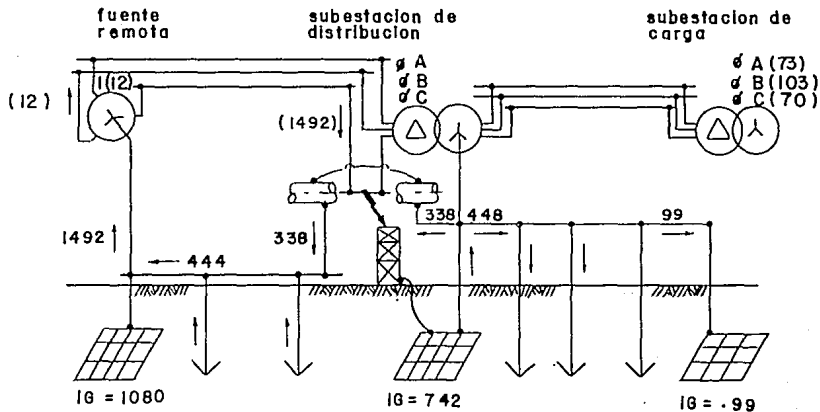
CONSIDERACIONES.

En la mayoría de los casos, es suficiente calcular la corriente máxima de malla I_g como se describió anteriormente, despreciando las resistencias de los elementos del sistema eléctrico, la resistencia a tierra de la malla y la impedancia de la falla. Por lo tanto el error que se introduce en los cálculos es despreciable dando un margen de seguridad a la red, por lo que la corriente calculada es ligeramente mayor.

RESISTENCIA A TIERRA.

Un sistema de tierras deberá proveer una resistencia a tierra con valores cercanos a cero; en la práctica la elevación del potencial a tierra en el lugar de la subestación se incrementa proporcionalmente con la corriente de falla, a altas corrientes se deberá tener un valor muy bajo de resistencia a tierra del sistema.

Para subestaciones de potencia es recomendable tener valores de resistencia a tierra cercanos a 1 Ohm o menos; mientras que en subestaciones de distribución un rango aceptable es de 1 a 5 Ohms dependiendo de las condiciones locales.



división de corrientes para una falla en el lado de alta tensión de una subestacion de distribución

fig. 27

CALCULOS SIMPLIFICADOS.

El valor estimado de la resistencia a tierra es uno de los primeros pasos para determinar el tamaño y el arreglo básico del sistema de tierras.

La resistencia depende en primer lugar del área ocupada por el sistema de tierras, la cual es conocida desde que se inicia el diseño.

Como primera aproximación, el valor mínimo de la resistencia a tierra en la subestación en suelo uniforme puede estimarse por medio de la fórmula de una placa metálica circular una vez que se ha determinado la resistividad del suelo.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad \dots \text{Ec. (53)}$$

Donde:

R_g = Resistencia a tierra en Ohms.

ρ = Resistividad promedio del suelo en Ohm-metro.

A = Área ocupada por la malla de tierra en m².

Puede obtenerse un valor límite de la resistencia agregando un término a la fórmula anterior:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L}} \quad \dots \text{Ec. (54)}$$

Donde L es la longitud total de conductores enterrados de la red en m.

El segundo término reconoce el hecho de que la resistencia de cualquier sistema que consiste en un número de conductores es mucho mayor que el formado por una placa sólida, y que esta diferencia decrecerá cuando se incremente la longitud de los conductores enterrados, aproximándose a cero cuando L sea infinita, alcanzándose la condición de placa sólida.

Las ecuaciones anteriores pueden emplearse con razonable precisión para profundidades de la red menores a 0.25 metros.

Para profundidades entre 0.25 y 2.5 metros se requiere una corrección por profundidad:

$$R_g = P \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1+h\sqrt{20A}} \right) \right] \quad \dots \text{Ec. (55)}$$

Donde h es la profundidad de la malla en metros.

La ecuación 1 se usará solamente cuando se requiera un valor estimado de la resistencia a tierra.

Las ecuaciones 2 y 3 son de gran ayuda para calcular la elevación de potencial a tierra para evaluar un diseño preliminar y determinar la longitud aproximada de conductores enterrados que se necesitan para el control de los voltajes de paso y de contacto.

FORMULA DE SCHWARZ.

Para una mejor estimación de la resistencia a tierra de mallas con varillas de tierra, deberá emplearse la fórmula de Schwarz, en la cual fundamentalmente se toma en cuenta que la resistencia total de un sistema que consiste de una combinación de conductores horizontales (malla) y electrodos verticales (electrodos varilla), es menor que la resistencia de cualquiera de los componentes por separado, pero mayor que su combinación en paralelo.

La resistencia total es:

$$R_g = \frac{R_1 R_2 - R_{12}^2}{R_1 + R_2 - 2R_{12}} \quad \dots \text{Ec. (56)}$$

Donde:

R_1 = Resistencia de los conductores de la malla.

R_2 = Resistencia de todos los electrodos de tierra.

R_{12} = Resistencia mutua entre el grupo de conductores y el grupo de electrodos.

Esta fórmula supone condiciones de suelo uniforme.

Sin embargo, en la práctica es común que al enterrarse el electrodo alcance capas de suelo de mayor conductividad por lo que las expresiones para R_1 y R_2 han sido modificadas.

$$R_1 = (P_1 / \pi \lambda_1) (\ln(2\lambda_1/h') + K_1(\lambda_1/\sqrt{A}) - K_2) \quad \dots \text{Ec. (57)}$$

$$R_2 = (P_0 / 2n\pi \lambda_2) [\ln(8\lambda_2/d_2) - 1 + 2K_1(\lambda_2/\sqrt{A})(\sqrt{n} - 1)^2] \quad \dots \text{Ec. (58)}$$

$$R_{12} = (P_0 / \pi \lambda_1) [\ln(2\lambda_1/\lambda_2) + K_1(\lambda_1/\sqrt{A}) - K_2 + 1] \quad \dots \text{Ec. (59)}$$

Donde:

P_1 = Resistividad del terreno a una profundidad h de los conductores, en Ohm - metro.

P_0 = Resistividad aparente del terreno vista por el electrodo de tierra, en Ohm - metro.

H = Espesor de la capa superior del terreno, en metros.

P_2 = Resistividad del terreno desde la profundidad de H hacia abajo, en Ohm - metro.

λ_1 = Longitud total de conductores de la red, en metros.

λ_2 = Longitud promedio de el electrodo de tierra, en metros.

h = Profundidad de enterramiento de la red, en metros.

h' = Coeficiente de la profundidad de enterramiento.

$h' = \sqrt{d_1 h}$ Para conductores enterrados a la profundidad h

$h' = 0.5d$ Para conductores localizados a h = 0 (en la superficie).

A = Area cubierta por la red de dimensiones a.b. en metros.

n = No. de electrodos de tierra localizadas en el área A.

K_1, K_2 = Constantes relacionadas con la geometría del sistema (ver gráficas).

d_1 = Diámetro del conductor de la red, en metros.

d_2 = Diámetro de los electrodos de tierra, en metros.

a = Ancho de la red, en metros.

b = Largo de la red, en metros.

Las ecuaciones 57, 58 y 59 son válidas para suelos de 2 capas, una superior de espesor H , con un cierto valor de resistividad y por donde penetran los electrodos y una inferior de más baja resistividad con la cual los electrodos quedan en contacto.

En este caso, para $\rho_1 \geq \rho_2$, la malla se localiza en la capa de resistividad ρ_1 pero los electrodos están en contacto tanto con la capa de resistividad ρ_1 como con la capa de resistividad ρ_2 , por lo que R_2 y R_{12} se calculan con una resistividad aparente vista por los electrodos de tierra, ρ_0 :

$$\rho_0 = \lambda_2(\rho_1 \rho_2) / (\rho_2 H + \rho_1(\lambda_2 - H))$$

Para el caso más general, en que la parte superior de los electrodos están a la misma profundidad que la malla:

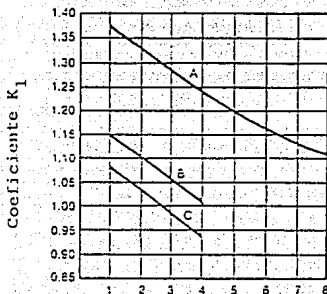
$$\rho_0 = \lambda_2(\rho_1 \rho_2) / (\rho_2(H-h) + \rho_1(\lambda_2 + h - H))$$

Para suelos de resistividad uniforme:

$$\rho_2 = \rho_1$$

Si la diferencia entre ρ_1 y ρ_2 no es muy grande, de preferencia ρ_2 no menor que $0.2 \rho_1$, y el espesor de la capa superior H es al menos $0.1b$, las ecuaciones anteriores son bastante precisas para la mayoría de los cálculos y además fáciles de aplicar.

COEFICIENTE K_1 Y K_2 DE LA FORMULA DE SCHWARZ



Relación Longitud a Ancho

Curva A - Para $h = 0$

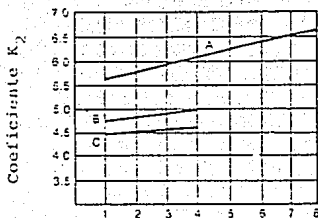
$$\gamma_A = -0.04x + 1.41$$

Curva B - Para $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_B = -0.05x + 1.20$$

Curva C - Para $h = 1/8 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_C = -0.05x + 1.13$$



Relación Longitud a Ancho

Curva A - Para $h = 0$

$$\gamma_A = 0.15x + 5.50$$

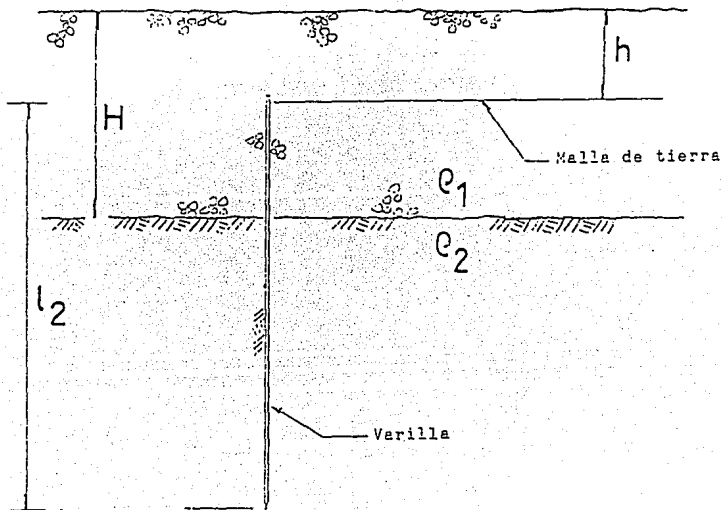
Curva B - Para $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_B = 0.10x + 4.68$$

Curva C - Para $h = 1/8 \sqrt{\text{AREA}}$

$$\gamma_C = -0.05x + 4.40$$


RESISTIVIDAD APARENTE VISTA POR UN ELECTRODO DE TIERRA EN UN MODELO DE 2 CAPAS.



$$e_a = l_2 (e_1 e_2) / (e_2 (H - h) + e_1 (l_2 + h - H))$$

OTRA FORMA DE CALCULAR LA RESISTENCIA A TIERRA DE UN ARREGLO DE ELECTRODOS, ES MEDIANTE LA APLICACION DE LA TABLA.

FORMULAS PARA EL CALCULO DE RESISTENCIAS A TIERRA*

	Hemisphere radius a	$R = \frac{\rho}{2a}$
•	One ground rod length L , radius a	$R = \frac{\rho}{2aL} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right)$
• •	Two ground rods $s = L$, spacing s	$R = \frac{\rho}{4sL} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) - \frac{\rho}{4s} \left(1 - \frac{L^2}{3s^2} - \frac{2L^4}{3s^4} \right)$
• • •	Two ground rods $s = L$, spacing s	$R = \frac{\rho}{4sL} \left(\ln \frac{4L}{a} - \ln \frac{4L}{s} - 2 - \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} - \frac{\rho^3}{512L^3} \right)$
—	Buried horizontal wire length $2L$, depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4sL} \left(\ln \frac{4L}{a} + \ln \frac{4L}{s} - 2 - \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} - \frac{\rho^3}{512L^3} \right)$
L	Right-angle turn of wire length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4sL} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 0.2373 - 0.2145 \frac{\rho}{L} + 0.1035 \frac{\rho^2}{L^2} - 0.0474 \frac{\rho^3}{L^3} \right)$
人	Three-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{6sL} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 1.071 - 0.208 \frac{\rho}{L} + 0.238 \frac{\rho^2}{L^2} - 0.054 \frac{\rho^3}{L^3} \right)$
+	Four-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{8sL} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 2.912 - 1.071 \frac{\rho}{L} - 0.645 \frac{\rho^2}{L^2} - 0.143 \frac{\rho^3}{L^3} \right)$
*	Six-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{12sL} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 6.651 - 3.128 \frac{\rho}{L} - 1.738 \frac{\rho^2}{L^2} - 0.490 \frac{\rho^3}{L^3} \right)$
*	Eight-point star length of arm L , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{16sL} \left(\ln \frac{2L}{a} + \ln \frac{2L}{s} - 10.95 - 5.51 \frac{\rho}{L} - 3.26 \frac{\rho^2}{L^2} - 1.17 \frac{\rho^3}{L^3} \right)$
○	Ring of wire diameter of ring D , diameter of wire a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{2sD} \left(\ln \frac{4D}{a} - \ln \frac{4D}{s} \right)$
—	Buried horizontal strip length $2L$, section a by b , depth s , $b = 2a$	$R = \frac{\rho}{4sL} \left(\ln \frac{4L}{a} + \frac{s^2 - 2a^2}{2(a + b)^2} + \ln \frac{4L}{s} - 1 - \frac{\rho}{2L} - \frac{\rho^2}{16L^2} - \frac{\rho^3}{512L^3} \right)$
⊗	Buried horizontal round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{4a} \cdot \frac{\rho}{4s} \left(1 - \frac{7}{12} \frac{s^2}{a^2} + \frac{33}{40} \frac{s^4}{a^4} \right)$
⊗	Buried vertical round plate radius a , depth $s/2$	$R = \frac{\rho}{5a} \cdot \frac{\rho}{4s} \left(1 - \frac{7}{24} \frac{s^2}{a^2} + \frac{99}{320} \frac{s^4}{a^4} \right)$

*See Ref [4].

† Approximate formulas, including effects of images. Dimensions must be in centimeters to give resistance in ohms.

ρ = resistivity of earth in ohm-centimeters.

For 10 ft (3 m) rods of $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, and $\frac{3}{4}$ in (12.7, 19.05, and 31.75 mm) diameters, the grounding resistance may be quickly determined by dividing the soil resistivity ρ , $\Omega \cdot \text{cm}$, by 292, 302, and 311, respectively.

5.2 CALCULO DE POTENCIALES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO.

CIRCUITOS EQUIVALENTES ACCIDENTALES.

Usando el valor de la corriente tolerable por el cuerpo establecida anteriormente y las constantes apropiadas del circuito, es posible determinar el voltaje tolerable entre dos puntos críticos de contacto.

Para el análisis del circuito equivalente se aplicará la siguiente notación:

I_A = Corriente a través del circuito accidental.

R_A = Resistencia efectiva total del circuito accidental.

I_B = Corriente permisible por el cuerpo humano, definidas por la ecuaciones y obviamente, por condiciones de seguridad se requiere que:

$$I_A < I_B$$

Debido a que la resistencia del cuerpo se supone constante ($R_B = 1000$ Ohms), requerir que I_A sea menor que I_B es equivalente a decir que puede prevenirse la fibrilación siempre y cuando los Watts-segundo (Ws) de energía absorbida por el cuerpo durante un choque, se mantengan por debajo de cierto valor. Este valor es 0.0135 Ws para $K_{50} = 0.116$ A y 0.0246 Ws para $K_{70} = 0.157$ A, respectivamente.

La resistencia R_A del circuito es función de la resistencia del cuerpo R_B y de la resistencia R_F (resistencia de la tierra debajo de cada pie).

La resistencia R_F puede afectar apreciablemente el valor de R_A , un hecho que puede ser útil en algunas situaciones difíciles.

Para el análisis del circuito, el pie humano puede representarse como un disco metálico conductor, despreciando la resistencia de contactos de los zapatos.

Las resistencias propia y mutua para dos discos metálicos de radio b , separados una distancia d_F sobre la superficie de un terreno homogéneo de resistividad ρ son:

$$R_{foot} = \rho / (4b) \quad \dots Ec.(60)$$

$$R_{Mfoot} = \rho / (2\pi d_{foot}) \quad \dots Ec.(61)$$

Donde:

R_{foot} = Resistencia propia a tierra de cada pié en Ohms.

R_{Mfoot} = Resistencia mutua entre los pies en Ohms.

b = Radio equivalente de un pié en m.

d_{foot} = Separación de los pies en m.

Las resistencias de la tierra bajo los dos pies, en serie y en paralelo son:

$$R_{2FS} = 2(R_{foot} - R_{Mfoot}) \quad \dots Ec.(62)$$

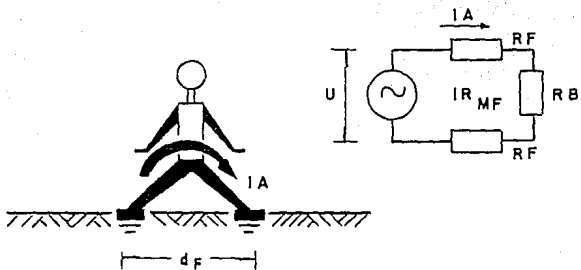
$$R_{2FP} = 1/2(R_{foot} + R_{Mfoot}) \quad \dots Ec.(63)$$

Donde:

R_{2FS} = Resistencia de los dos pies en serie.

R_{2FP} = Resistencia de los dos pies en paralelo.

La figura 28 define el circuito equivalente de un contacto pié a pié. El potencial U es la diferencia de potencial máxima entre dos puntos sobre la superficie del terreno, separados por la distancia de un paso.



$$d_F = m$$

$$R_A = R_B + 2R_F - 2R_{MF}$$

$$I_A = U/R_A$$

$$R_B = 1000 \Omega$$

Potencial de Paso

fig. 28

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de paso es:

$$R_A = R_B + 2(R_{foot} - R_{Mfoot})$$

El circuito equivalente para el contacto entre una mano y los dos pies se muestra en la figura 29.

La resistencia equivalente para el circuito del potencial de contacto está dada por:

$$R_A = R_B + 1/2(R_{foot} + R_{Mfoot})$$

Se ha seleccionado para los cálculos un radio de 0.08 m (3 pulgadas) para el disco que representaría a un pie, despreciando el término correspondiente a la resistencia mutua.

Con esta aproximación, las ecuaciones para las resistencias en serie y paralelo de los 2 pies se obtienen en forma numérica y expresadas en términos de ρ como:

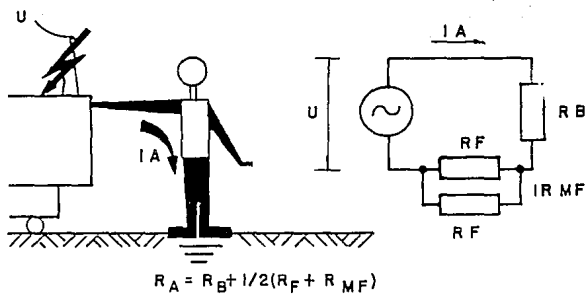
$$R_{2FS} = 6(\rho) \quad \dots \text{Ec. (64)}$$

$$R_{2FP} = 1\ 1/2(\rho) \quad \dots \text{Ec. (65)}$$

Efecto de la capa de roca triturada en la superficie de la subestación.

Las ecuaciones (60) y (61) se determinaron basándonos en la suposición de un terreno con resistividad uniforme. Sin embargo, cuando se tiene una capa de roca triturada en la superficie de la subestación (8 a 15 cm.), se incrementa la resistencia de contacto entre el terreno y los pies del personal en la subestación.

El área cubierta por esta capa, es generalmente de suficiente tamaño para validar la suposición de que el pie está en contacto con un material de resistividad uniforme en la dirección lateral. Sin embargo, lo relativamente poco



Potencial de Contacto

fig. 29

profundo de la capa de roca triturada comparada con el radio equivalente del pié, excluye la suposición de resistividad uniforme en la dirección vertical cuando se calculan las resistencias propia y mutua del pié.

Si el terreno tiene una resistividad menor que la de la roca triturada, solamente alguna corriente de la malla irá hacia la capa superior de la roca triturada y el voltaje superficial será el mismo que si no existiera la capa.

La corriente a través del cuerpo será considerablemente más baja con la adición de la capa de roca en la superficie, por la gran resistencia de contacto entre el terreno y los pies.

Sin embargo, esta resistencia puede ser considerablemente menor que aquella que presenta una capa de roca triturada con un gran espesor (esto es, de un espesor suficiente para suponer resistividad uniforme en todas las direcciones).

Las siguientes ecuaciones para R_{foot} y R_{Mfoot} serán ahora:

$$R_{foot} = \frac{\rho_1}{4b} F(X_1) \quad \dots Ec.(66)$$

$$R_{Mfoot} = \frac{\rho_1}{2\pi d_{foot}} F(X_2) \quad \dots Ec.(67)$$

Donde:

b y d_{foot} se definieron anteriormente y $F(x)$ es una función basada en el espaciamento entre los pies y los valores relativos de las resistividades del terreno y de la roca triturada en la superficie:

$$F(X) = 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} Q \quad \dots Ec.(68)$$

$$Q = \frac{K^n}{\sqrt{1+(2nX)^2}} \quad \dots Ec.(69)$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s} \quad \dots Ec.(70)$$

Donde:

ρ_s = Resistividad de la roca triturada en Ohms-metro.

ρ = Resistividad del terreno en Ohms-metro.

$X = X_1 = h_s/b$ para R_{foot}

$X = X_2 = h_s/d_{foot}$ para R_{Mfoot}

h_s = Espesor de la capa de roca triturada, en metros.

Como la cantidad $F(X)$ es difícil de evaluar si no se cuenta con una computadora, estos valores han sido precalculados y graficados para un amplio rango de valores x y del factor K como se muestra en la figura 30.

POTENCIAL DE PASO TOLERABLE.

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito equivalente estudiados anteriormente.

$$E_{paso} = (R_B + R_{2Fs}) I_B$$

$$E_{paso50} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) 0.116/\sqrt{t_s} \quad \dots Ec.(71)$$

$$E_{paso70} = (1000 + 6C_s (h_s, K) \rho_s) 0.157/\sqrt{t_s} \quad \dots Ec.(72)$$

5.3.3 POTENCIAL DE CONTACTO TOLERABLE.

Se calcula a partir de las ecuaciones y circuito

equivalente estudiados anteriormente.

$$E_{cont} = (R_B + R_{2Fp}) I_B$$

$$E_{cont50} = (1000 + 1.5C_s (h_s, K) \rho_s) 0.116 / \sqrt{t_s} \quad \dots Ec. (73)$$

$$E_{cont70} = (1000 + 1.5C_s (h_s, K) \rho_s) 0.157 / \sqrt{t_s} \quad \dots Ec. (74)$$

Donde:

$C_s = 1$ para cuando no existe una capa superficial en la subestación o determinado a partir de la tabla 2 cuando se tenga una capa superficial de alta resistividad y pequeño espesor.

$\rho_s =$ Resistividad del material de la superficie en Ohms-metro.

$t_s =$ Duración de la corriente en segundos.

5.3 CALCULO DE LA SECCION DEL CONDUCTOR.

Los conductores empleados en el sistema de tierra serán capaces de soportar la máxima corriente de falla durante un tiempo determinado sin llegar a la fusión.

La ecuación que evalúa la ampacidad de cualquier conductor del cual se conocen las constantes de su material es:

$$I = A \sqrt{\left(\frac{TGAP \cdot 10^4}{t_c \alpha r Pr} \right) \ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_o} \right)} \quad \dots Ec. (75)$$

Donde:

$I =$ Corriente rms en Kiloamperes.

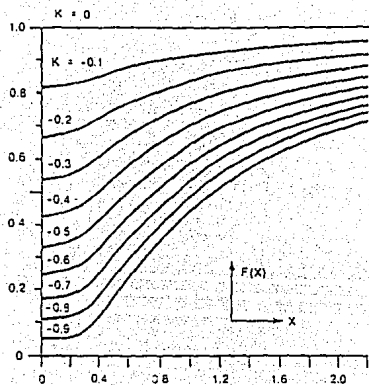
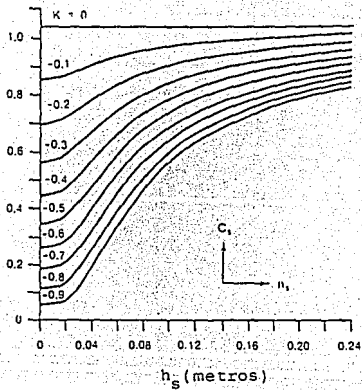
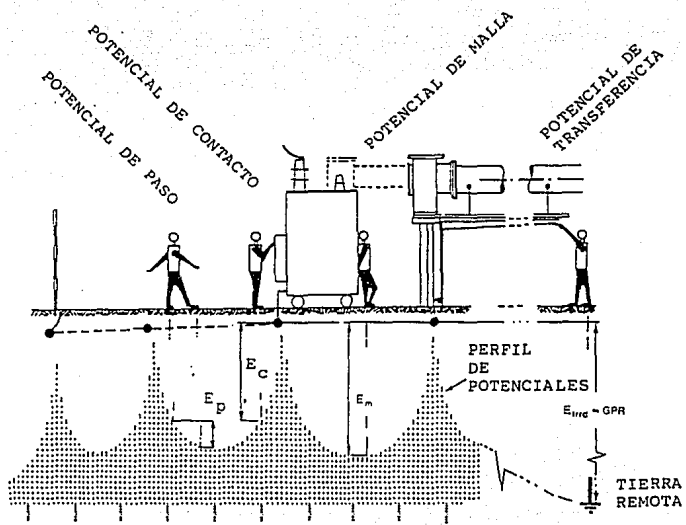


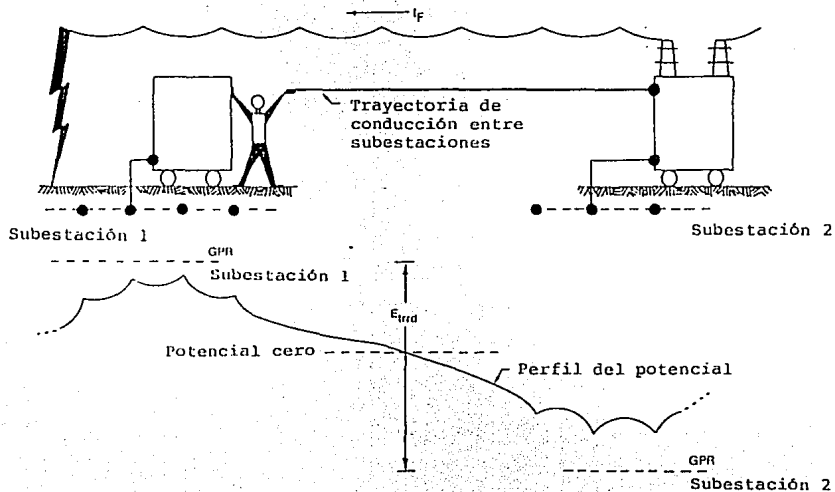
FIG. 30





Situación de Potenciales

fig. 31



Situación típica de potencial transferido

fig. 32

Resistividad típica de materiales empleados como material de superficie en Subestaciones.

TABLA No. 3

No.	Description of <u>Surface Material</u>	Resistivity of Sample (ohm-meters)	
		Dry	Wet
1	Crusher Run Granitn with Fines.	140 x 10	1,300
2	N57 Washed Granite Similar to 3/4 in. Gravel	190 X 10	800
3	Clean Limestone Slightly Coarser than Number 2	7 x 10	2,000 3,000
4	Washed Granite Similar to 3/4 in. Gravel	2 x 10	10,000
5	Washed Granite Similar to Pea Gravel	40 x 10	5,000
6	Crushed Aggregate Base Granite (with fines)	--	500-1,000
7	Concrete	2,000 - 10,000	50-100
8	Concrete	1,200 - 280,000	21-63
9	Asphalt	--	10,000
10	Asphalt	2 x 10 30 x 10	10,000 to 6 x 10

Referencia: Practical Applications of ANSI/IEEE Std. 80-1986
Guide for Safety.

Tutorial Course 86 EH0253-5-PWR.

- A = Sección transversal del conductor en mm².
- T_m = Temperatura máxima permisible en °C.
- T_a = Temperatura ambiente en °C.
- T_r = Temperatura de referencia para las constantes del material en °C.
- α₀ = Coeficiente térmico de resistividad a 0°C.
- α_r = Coeficiente térmico de resistividad a la temperatura de referencia T_r.
- ρ_r = Resistividad del conductor a la temperatura de referencia T_r en μΩ-cm.
- K₀ = 1/α₀, ó (1/α_r) - T_r.
- t_c = Tiempo de duración del flujo de corriente en segundos
- T_{CAP} = Factor de capacidad térmica en J/cm³/°C

Nótese que α_r y ρ_r están dados para la misma temperatura de referencia. Se muestran las constantes del material en la tabla No. 1.

Si el tamaño del conductor está dado en Circular Mils, la ecuación se modifica a:

$$I = 5.0671 \times 10^{-6} A \sqrt{\left(\frac{T_{CAP}}{t_c \alpha_r \rho_r} \right) \ln \left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a} \right)} \quad \dots \text{Ec. (76)}$$

TABLA No. 4

DESCRIPTION	MATERIAL CONDUCTIVITY (%)	FACTOR @ 20°C	(1/) @ 0°C	FUSING TEMPERATURE (°C)	@20°C (CM)	TCAP FACTOR EFFECTIVE VALUE (J/cm ³ /°C)
STANDARD ANNEALED SOFT COPPER WIRE	100.0	0.00393	234	1083	1.7241	3.422
COMMERCIAL HARD DRAWN COPPER WIRE	97.0	0.00381	242	1084	1.7774	3.422
COPPER-CLAD STEEL CORE WIRE	40.0	0.00378	245	1084/ 1300	4.397	3.846
COMMERCIAL EC ALUMINUM WIRE	61.0	0.00403	228	657	2.362	2.556
ALUMINUM ALLOY WIRE 5005	53.5	0.00353	263	660	3.2226	2.556
ALUMINUM ALLOY WIRE 6201	52.5	0.00347	268	660	3.2840	2.598
ALUMINUM-CLAD STEEL CORE WIRE	20.3	0.00360	258	660/	8.4805	2.670
ZINC-COATED STEEL CORE WIRE	8.5	0.00320	293	419/	20.1	3.931
STAINLESS STEEL No. 304	2.4	0.00130	749	1400	72.0	4.032

CONSTANTES DE MATERIALES

Referencia: ANSI/IEEE Std. 80-1986

Las ecuaciones anteriores pueden ordenarse de tal manera que se calcule el tamaño o calibre del conductor requerido en función de la corriente:

$$A_{mm^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t \propto \rho \times 10}{T \cdot CAP}}{\ln \left[1 + \left(\frac{T - T_0}{K + T} \right) \right]}} \quad \dots Ec. (76a)$$

$$A_{cMILS} = 1973.52 I \sqrt{\frac{\frac{t \propto \rho \times 10}{T \cdot CAP}}{\left[1 + \left(\frac{T - T_0}{K + T} \right) \right]}} \quad \dots Ec. (76b)$$

La figura 33 y la tabla 5, proporcionan una referencia rápida para algunos materiales, suponiendo los siguientes parámetros de diseño:

1. Temperatura ambiente de 40°C.
2. Temperatura límite de fusión del conductor como se muestra en la tabla 1.
3. Temperatura máxima de 450 y 250°C para los conectores.

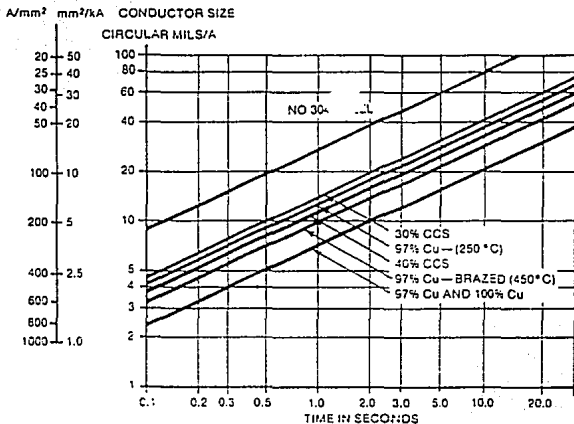
TABLA No. 5

FAULT TIME (S)	100% CU ONLY	97% CU ONLY	40% CCS ONLY	30% CCS ONLY	97% CU/TEMPERATURE LIMITS (450°C) (250°C)	
30.0	38.4	38.7	57.0	65.8	51.1	64.5
4.0	14.0	14.2	20.8	24.0	19.7	23.5
1.0	7.0	7.1	10.4	12.0	9.3	11.8
0.5	4.9	5.0	7.4	8.5	6.6	8.3

TAMARO MINIMO DEL CONDUCTOR (cmils/A)

CALIBRE Y DIAMETRO DE CONDUCTORES

CALIBRE		DIAMETRO CONDUCTOR	
Circular Mills.	A.W.G.	Pulgadas	Milímetros
1,000,000		1.152	29.26
800,000		1.031	26.15
750,000		.988	25.35
700,000		.964	24.45
600,000		.893	22.68
500,000		.813	20.65
400,000		.728	18.49
350,000		.681	17.25
300,000		.630	16.00
250,000		.575	14.60
211,600	4/0	.528	13.41
167,800	3/0	.470	11.93
133,100	2/0	.419	10.64
105,500	1/0	.373	9.47
83,690	1	.332	8.43
68,370	2	.292	7.41
52,530	3	.260	6.60
41,740	4	.232	5.89
26,240	6	.184	4.67
16,510	8	.146	3.70
10,380	10	.116	2.94
6,530	12	.0915	2.32
4,110	14	.0726	1.84



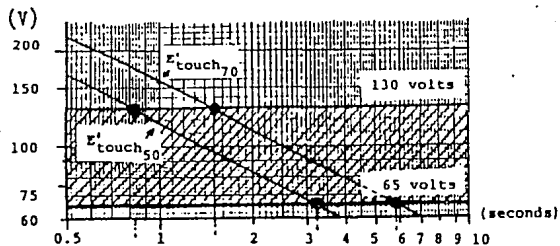
Nomograma para cálculo de conductores

Referencia: ANSI/IEEE Std 80-1986

CALIBRE Y DIAMETRO DE CONDUCTORES

TABLA No. 6

CALIBRE		DIAMETRO CONDUCTOR	
CIRCULAR MILLS.	A. W. G.	PULGADAS	MILIMETROS
1,000.000		1.152	29.26
800.000		1.031	26.18
750.000		.998	25.35
700.000		.964	24.48
600.000		.893	22.68
500.000		.813	20.65
400.000		.726	18.49
350.000		.681	17.29
300.000		.630	16.00
250.000		.575	14.60
211.600	4/0	.528	13.41
167.800	3/0	.470	11.93
133.100	2/0	.419	10.64
105.500	1/0	.373	9.47
83.690	1	.332	8.43
66.370	2	.292	7.41
16.510	3	.260	6.60
41.380	4	.232	5.89
26.240	6	.184	4.67
16.510	8	.146	3.70
10.380	10	.116	2.94
6.530	12	.0915	2.32
4.110	14	.0726	1.84



LIMITES DE VOLTAJE DE TOQUE PARA CONTACTO METAL A METAL Y RANGO TÍPICO DE VOLTAJES DE ENVOLVENTE A TIERRA.

SEGURIDAD EN SUBESTACIONES

(SISTEMAS DE TIERRAS)

SUMARIO: Una vez que se han determinado los valores de potencial de paso y contacto el diseño de la red de tierras puede ser iniciado, el criterio para definir estos límites fue definido con anterioridad. El presente reporte expone aspectos para un diseño de tierras común para toda la subestación y muestra las diferencias entre equipo convencional y equipo con aislamiento en SF₆.

El presente material es un reporte preliminar que sustituye las secciones 7-12 de IEEE STD. 80/1976, y los siguientes párrafos complementan el método citado con anterioridad.

CONSIDERACIONES SOBRE EL VOLTAJE DE TOQUE EN UNA SUBESTACION SF₆.

En el análisis del sistema de tierras en una subestación en SF₆, se deberá tener mayor cuidado con las consideraciones del voltaje de toque. Se deben tomar diferentes consideraciones con respecto a una S.E. convencional ya que las características de el equipo estriban primordialmente en que están aisladas con una cubierta y dentro de ésta con gas SF₆ tanto los buses como interruptores de operación en alto voltaje. Cada bus es completamente cubierto con un forro metálico y estos últimos son aterrizados. Sin embargo, puesto que un voltaje es inducido en la parte exterior de la cubierta cuando fluye una corriente en el interior (bus) de esta manera algunas partes de la envolvente presentan una diferencia de potencial con respecto a la referencia de tierra de la subestación.

Para evaluar el máximo potencial que se presenta en la envolvente del bus durante una falla, será necesario determinar la inductancia que presenta la cubierta con respecto de tierra, la inductancia dentro del conductor y la inductancia mutua que se presenta en una configuración de buses monopolares.

Generalmente cuando una persona toca la parte exterior de la envolvente en una subestación en SF₆ puede quedar expuesta a un potencial que es resultado de 2 tipos de falla a revisar:

- 1) Una falla interna en el bus debido a una ruptura en

el medio aislante entre el bus y su envolvente.

- 2) Una falla externa en la S.E. SF6 en la cual la corriente de falla fluye a través de los buses e induce corrientes en los envolventes.

Así una persona puede estar parada entre una parte aterrizada y de esta manera ser parte del circuito accidental donde el flujo de corriente se puede presentar entre mano y mano, o entre mano y pie, de esta manera se deberá visualizar estas dos condiciones para el voltaje permisible metal con metal según se ilustra en la figura 9A.

La mayor parte de fabricantes considera apropiado que se aterricen las envolventes de tal manera que la diferencia de potencial entre envolventes individuales y las estructuras y equipos aterrizados no exceda 65-130 volts durante una falla, sea cualquiera. Como se muestra a continuación, la sustitución de $P = 0$ en el término $1.5 C (P)$ revela que este rango de voltaje corresponde a los tiempos de falla de entre 0.8 a 3.2 segundos si se considera una persona con un peso de 50 Kg., y de 1.46 a 5.8 segundos para una persona de 70 Kg. Esta relación es sin embargo más entendible en la gráfica 11, la cual también ayuda a el problema con los suficientes márgenes de seguridad.

NOTAS SOBRE CORRIENTES PERMISIBLES DE TIERRA

Una vez definidos los límites de potenciales tolerables de paso y de contacto, el diseño de un sistema puede ser llevado a cabo teniendo en cuenta los requerimientos de liberación de la misma. Sin embargo, corrientes menores al ajuste de los dispositivos de protección pueden fluir en periodos grandes de tiempo. Estas deberán ser checadas ya que causan corrientes por debajo de las corrientes permisibles de umbral de fibrilación. Corrientes de falla entre estos dos extremos requerirán especiales consideraciones, sin embargo las características de tiempo de los dispositivos de protección, usualmente permiten el paso de corrientes de falla las que están en el rango permitido ($I_2 \times t$) valores están abajo del límite de corriente máxima de falla. Las corrientes baja y con larga duración de esta manera podrán ser consideradas como que producen corrientes debajo del nivel de fibrilación.

5.4 CALCULO DE POTENCIALES EN LA MALLA.

POTENCIAL DE CONTACTO.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_m = \rho K_m K_i I_g / L \quad \dots \text{Ec. (77)}$$

Es el producto del factor geométrico K_m , el factor de corrección K_i , la resistividad del terreno y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_g/L .

Cálculo del factor K_m :

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[\ln \left(\frac{D^2}{16nd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)} \right]$$

Donde:

$$K_{ii} = 1$$

Para mallas con varillas de tierra a lo largo del perímetro o con varillas en las esquinas de la malla o con varillas a lo largo del perímetro y por toda la malla.

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}}$$

Para mallas sin varillas de tierra o mallas que contengan sólo algunas varillas, ninguna localizada en las esquinas o en el perímetro.

$$K_h = \sqrt{1+h/h_0}$$

h = Profundidad de la malla en metros.

h_0 = 1 metro (Profundidad de referencia de la malla).

D , n y d se definen en la tabla No.6.

Cálculo del factor K_i :

$$K_i = 0.656 + 0.172n$$

Cálculo de la longitud L :

Para mallas con varillas de tierra:

$$L = L_c + 1.15 L_r$$

Donde:

L_c = Longitud de conductores enterrados en la malla.

L_r = Longitud total de las varillas de tierra.

El factor 1.15 refleja el hecho de que la densidad de corriente es mucho mayor en las varillas cerca del perímetro que en los conductores de la malla.

Para malla sin varillas de tierra, o mallas con varillas pero localizadas lejos del perímetro:

$$L = L_c + L_r$$

POTENCIAL DE PASO.

Se calcula con la siguiente expresión:

$$E_s = \rho K_s K_i I_G / L \quad \dots \text{Ec. (78)}$$

Es el producto del factor geométrico K_s , el factor de corrección K_i , la resistividad del terreno ρ y la densidad de corriente promedio por unidad de longitud de conductor enterrado I_G/L .

Cálculo del factor K_s :

Para una profundidad 0.25 m < h > 2.5 m

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right]$$

Para una profundidad menor que 0.25 metros:

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

Donde:

$$W = \frac{1}{2} + \frac{1}{3} + \frac{1}{4} \dots + \frac{1}{n-1}$$

O para $n \geq 6$

$$W = \frac{1}{2(n-1)} + \ln(n-1) - 0.423$$

El empleo de las diferentes ecuaciones para el factor K_s , depende de la profundidad h de la malla, ya que el potencial de paso decrece rápidamente cuando se incrementa la profundidad.

NOTA:

Cuando se emplean las ecuaciones anteriores, se recomiendan los siguientes límites para aquellas mallas que sean cuadradas o rectangulares y que tengan el mismo número de conductores en ambas direcciones:

$$\begin{aligned}
 n &< 25 \\
 0.25 \text{ m} &< h < 2.5 \text{ m} \\
 d &< 0.25 h \\
 D &> 2.5 \text{ m}
 \end{aligned}$$

Para mallas rectangulares, con conductores igualmente espaciados en ambas direcciones (reticula cuadrada), el valor de n para calcular los factores K_m y K_i del potencial de contacto E_m , será la media geométrica del número de conductores en ambas direcciones:

$$n = \sqrt{n_A n_B}$$

El valor de n para calcular los factores K_s y K_i del potencial de paso E_s , será el valor máximo de

$$n = \max(n_A, n_B)$$

LONGITUD MINIMA DE CONDUCTORES EN LA MALLA.

Puede desarrollarse una ecuación que permita determinar de manera preliminar, la longitud de conductor necesaria en la malla para mantener el potencial de contacto dentro de límites seguros.

De las ecuaciones 26, 27 y 32:

Para $E_m < E_{CONT50}$:

$$\frac{K_m K_i P I_g}{L} < (1000 + 1.5 C_s (h_s, K) P_s) 0.116 / \sqrt{I_s} \quad \dots Ec.(79)$$

Ordenando la ecuación:

$$L > \frac{K_m K_i P I_g \sqrt{I_s}}{(0.116 + 0.174 C_s (h_s, K) P_s)}$$

De manera similar, para $E_m < E_{CONT70}$:

$$L = \frac{K_m K_d p I_g \sqrt{t_g}}{(157 + 0.235 C_s (h_s, k) p s)} \quad \dots \text{Ec. (80)}$$

PARAMETROS DE DISEÑO DE RED DE TIERRAS.

- A = Área cubierta por la red en m².
- p = Resistividad del terreno en Ohms-m.
- 3I_o = Corriente de falla simétrica en la subestación para dimensionar el conductor en amperes.
- t_c = Duración de la corriente de falla para dimensionar el conductor de tierra, en seg.
- d = Diámetro del conductor de la malla en metros.
- E_{CONT50} = Voltaje de contacto tolerable por el cuerpo humano (50 Kg. de peso), en volts.
- E_{CONT70} = Voltaje de contacto tolerable por el cuerpo humano (70 Kg. de peso), en volts.
- E_{PASO50} = Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano (50 Kg. de peso), en volts.
- E_{PASO70} = Voltaje de paso tolerable por el cuerpo humano (70 Kg. de peso), en volts.
- D = Espaciamiento entre conductores paralelos, en metros.
- n = No. de conductores paralelos en una dirección.
- L = Longitud total de conductores del sistema de tierras, incluyendo malla y varillas de tierra, en metros.
- h = Profundidad de enterramiento de los conductores de la malla, en metros.

- R_g = Resistencia del sistema de tierras, en Ohms.
- L_r = Longitud total de las varillas de tierra, en metros.
- I_g = Máxima corriente de malla que fluye entre la malla de tierras y el terreno que la rodea en amperes.
- t_f = Duración de la corriente de falla para determinar el factor de decremento, en segundos.
- E_m = Voltaje de contacto en la malla, en volts.
- E_s = Voltaje de paso en la malla, en volts.
- K_m = Factor de espaciamento para voltaje de malla, método simplificado.
- K_s = Factor de espaciamento para voltaje de paso, método simplificado.
- K_i = Factor de corrección para la geometría de la red, método simplificado.
- K_{ii} = Factor de corrección que ajusta los efectos de los conductores interiores de la malla.
- K_h = Factor de corrección que enfatiza el efecto de la profundidad de la malla.
- L_c = Longitud total de los conductores de la malla, - en metros.

CAPITULO 6
EJEMPLO PRACTICO

CAPITULO 6

INTRODUCCION

En los capitulos anteriores se han desarrollado los procedimientos a seguir en el diseño de una red de tierras para subestaciones encapsuladas en SF₆.

Este método de cálculo está encaminado a dar una solución práctica al diseño de sistemas de tierra basados en establecer límites seguros de diferencias de potencial que pueden existir en una subestación encapsulada (SF₆), bajo condiciones de falla, entre puntos que pueden ser tocados por algún ser humano.

En el cálculo del sistema de tierras que aquí se presenta, se considera que el sistema está formado por una malla de conductores enterrados horizontalmente, asimismo se deberá considerar el aterrizamiento de los elementos más importantes que componen la subestación en SF₆ tales como: transformadores, envolventes, estructuras, etc.

El ejemplo práctico se basará en datos correspondientes a la subestación ODON DE BUEN ubicada en Av. Insurgentes Sur Esq. Llanura, ésta cuenta con un voltaje de operación de 230/23 KV, compuesta con un banco de transformadores (3) de 60 MVA, dos en operación y uno en reserva.

6.0 CALCULO DE CORTO CIRCUITO.

Para el cálculo de corto circuito consideraremos lo siguiente:

Potencia de corto circuito proporcionada por la compañía suministradora.

$$S_{3\phi} = 2500 \text{ MVA} \quad ; \quad S_{\phi} = 2000 \text{ MVA}$$

Impedancia de los transformadores obtenida de la tabla 10 de la American National Standard C57.12.10-1988.

$$Z = 8\%$$

BILs and Percent Impedance Voltages at Self-Cooled (OA) Rating

High-Voltage BIL (kV)	Without Load Tap Changing		With Load Tap Changing
	Low Voltage 480 V	Low Voltage 2400 V and Above	Low Voltage 2400 V and Above
60-110	5.75*	5.5*	-
150	6.75	6.5	7.0
200	7.25	7.0	7.5
250	7.75	7.5	8.0
350	-	8.0	8.5
450	-	8.5	9.0
550	-	9.0	9.5
650	-	9.5	10.0
750	-	10.0	10.5

*For transformers greater than 5000 kVA self-cooled, these values shall be the same as those shown for 150 kV HV BIL.

El método a utilizar en el cálculo será por unidad (0/1).

Potencias base

$$S_B = 60 \text{ MVA}$$

$$V_B = 230 \text{ KV}$$

DESARROLLO DE CALCULO

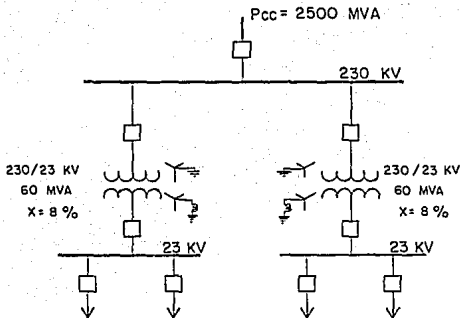


DIAGRAMA UNIFILAR GENERAL

1.0 Procederemos a determinar las reactancias de secuencia positiva y negativa y las corrientes base en el lado primario y secundario del transformador.

$$X_{sc} = \frac{S_B}{S_{cc}}$$

$$X_{cc} = \frac{60}{2500}$$

$X_{cc} = 0.024 \text{ 0/1}$ Aportación del sistema

2.0 X_T del transformador de 60 MVA.

$X_T = 8\%$ (Valor determinado de la tabla 10 del ANSI C-57.12.10-1988 hoja anexa).

$$X_T = \frac{8}{100}$$

$X_T = 0.08$ 0/1 Transformador

3.0 Determinación de la reactancia de secuencia cero

$$X_0 = \frac{3S_{B3\phi}}{S_{CC3\phi}} - 2 \left(\frac{S_{B3\phi}}{S_{CC3\phi}} \right)$$

$$X_0 = \frac{60(3)}{2000} - 2 \left(\frac{60}{2500} \right)$$

$$= 0.09 - 0.048$$

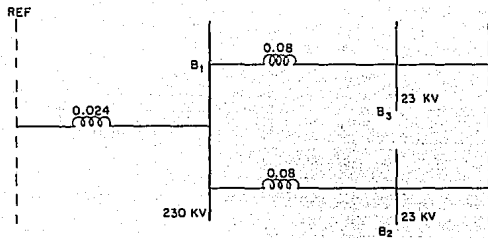
$$X_0 = 0.042$$
 0/1

4.0 Determinación de las corrientes base.

$$I_B = \frac{S_B}{\sqrt{3} \times V_B}$$

$$I_B_{230 \text{ KV}} = \frac{60000}{\sqrt{3} \times 230} ; I_B_{230 \text{ KV}} = 150.79 \text{ AMP.}$$

$$I_B_{23 \text{ KV}} = \frac{60000}{\sqrt{3} \times 23} ; I_B_{23 \text{ KV}} = 1507.91 \text{ AMP.}$$



BASES APLICABLES AL LADO PRIMARIO DEL BANCO DE TRANSFORMADORES 230 KV

$$S_B = 60 \text{ MVA}$$

$$V_B = 230 \text{ KV}$$

$$I_B = \frac{60000}{\sqrt{3} \times 230}$$

$$I_B = 150.79 \text{ A.}$$

BASES APLICABLES AL LADO SECUNDARIO DEL BANCO DE TRANSFORMADORES 23 KV

$$S_B = 60 \text{ MVA}$$

$$V_B = 23 \text{ KV}$$

$$I_B = \frac{60000}{\sqrt{3} \times 23}$$

$$I_B = 1507.91 \text{ A.}$$

CALCULO DE FALLA TRIFASICA EN BARRAS DE 230 KV

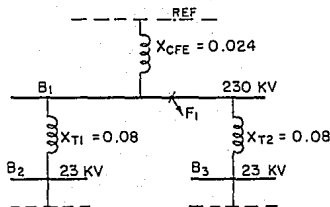


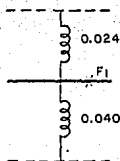
DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS

X_{EQ} en barra de 230 KV.

$$X_{EQ} = \frac{X_{T_1} \times X_{T_2}}{X_{T_1} + X_{T_2}} = \frac{0.08 \times 0.08}{0.08 + 0.08}$$

$$X_{EQ} = \frac{0.064}{0.16}$$

$$= 0.040 \text{ [0/1]}$$



$$X_{EQ} = \frac{0.040 \times 0.024}{0.040 + 0.024}$$

$$= \frac{0.0010}{0.064}$$

$$X_{EQ_{F1}} = 0.015$$

$$I_{CC_{F1}} = \frac{1}{X_{EQ_{F1}}}$$

$$= \frac{1}{0.015}$$

$$I_{CC_{F1}} = 66.66 \text{ [0/1]}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Ahora: } I_{CCF1} &= I_{CCF1} \times 0.1 \times I_B \quad 230KV \\
 &= 66.66 \times 150.79 \\
 &= 10,051.66 \text{ A.} \\
 I_{CCF1} &= 10,051.66 \text{ A.}
 \end{aligned}$$

CALCULO DE FALLA TRIFASICA EN 23 KV

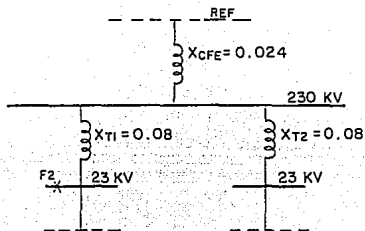


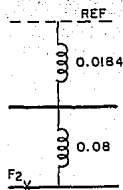
DIAGRAMA DE IMPEDANCIAS

$$X_{EQ} = \frac{X_{CFE} \times X_{T2}}{X_{CFE} \times X_{T2}}$$

$$= \frac{0.024 \times 0.08}{0.024 + 0.08}$$

$$= \frac{0.00192}{0.104}$$

$$X_{EQ} = 0.0184$$



$$X_{EQ} = 0.0184 + 0.08$$

$$X_{EQ} = 0.0984$$

$$I_{CCF2} = \frac{1}{0.0984}$$

$$I_{CCF2} = 10.16 \text{ O/1}$$

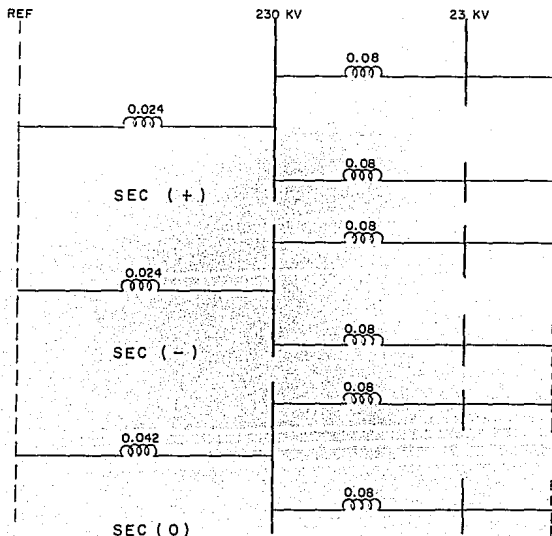
$$\text{Ahora: } I_{CCF2} = I_{CCF2} \times I_B \text{ 23KV}$$

$$= 10.16 \times 1507.91$$

$$I_{CCF2} = 15380.68 \text{ A.}$$

CALCULO DE FALLA MONOFASICA EN 230 KV

DIAGRAMAS DE SECUENCIA POSITIVA NEGATIVA Y CERO



INTERCONEXION DE MALLA DE SECUENCIAS (+), (-) Y (0)

$$I_{cc} \text{ 230 KV} = 22.22 \times 3 \quad I_{cc} \text{ 230 KV} = 66.66$$

$$I_{cc} \text{ 230 KV} = 66.66 \times 150.79 \quad I_{cc} \text{ 230 KV} = 10051.66 \text{ AMP.}$$

CALCULO DE FALLA MONOFASICA EN 23 KV

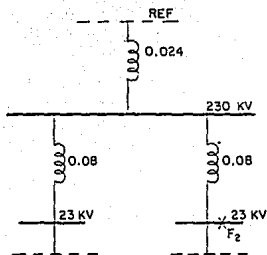


DIAGRAMA DE SECUENCIA (+) Y (-)

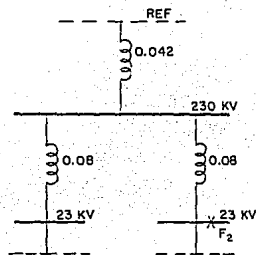
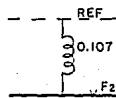
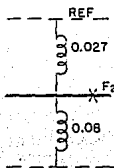
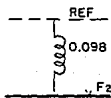
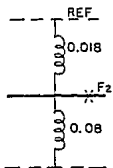


DIAGRAMA DE SECUENCIA (0)

REALIZANDO LAS REDUCCIONES DE THEVENIN NECESARIAS:



$$X_{E0} = 0.098 \text{ O/1 (+), (-)}$$

$$X_{E0} = 0.107 \text{ O/1 (0)}$$

$$I_{a0} = \frac{1}{0.098 + 0.098 + 0.107}$$

$$I_{a0} = 3.30$$

$$I_a = 3 I_{a0} = 3 \times 3.30$$

$$I_a = 9.90 \text{ O/1}$$

$$I_a = I \times I_b \text{ AMP.}$$

$$0/1$$

$$I_a = 9.90 \times 1507.91$$

$$I_{ccg} = 14928.309 \text{ AMP.}$$

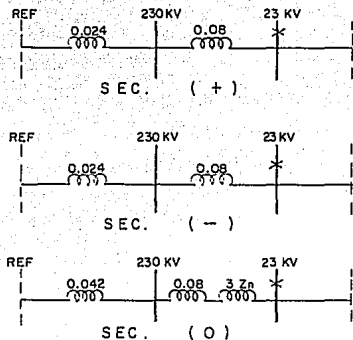
**CALCULO DE REACTOR PARA LIMITACION DE CORRIENTE DE
CORTO CIRCUITO**

Se limitará la corriente de corto circuito en el lado de 23 KV, con el fin de reducir costos en la selección de equipo en 230 KV y asimismo en la realización de la red de tierras.

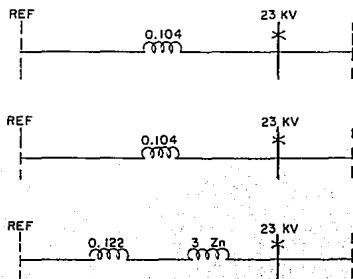
Esto implica que al limitar la corriente de falla, la red de tierras se reduce, lo cual traerá como beneficio un ahorro en cobre, es decir la cantidad de cobre será menor, lo cual resulta adecuado, debido a que las subestaciones (SF6) ocupan un espacio limitado.

Limitaremos la corriente de corto circuito a 8000 Amps.

A continuación se muestra la interconexión de las mallas de secuencia (+), (-) y (0).



REALIZANDO REDUCCIONES DE THEVENIN SE TIENE:



De donde:

$$I_{a0} = I_{a1} = I_{a2} = \frac{1}{2(0.104) + 0.122 + 3Z_n}$$

$$I_{a0/1} = 3 I_{a0} = \frac{3}{0.208 + 0.122 + 3Z_n} = \frac{3}{0.33 + 3Z_n} = \frac{8000}{1507.91}$$

$$\frac{3}{0.33 + 3Z_n} = 5.31$$

Despejando Z_n :

$$3 = 1.75 + 15.93 Z_n$$

$$1.25 = 15.93 Z_n$$

$$Z_n = \frac{1.25}{15.93} \quad Z_n = 0.08 \text{ O/1}$$

REALIZANDO REDUCCIONES DE THEVENIN EN EL DIAGRAMA ANTERIOR SE TIENE QUE:

$$Z_{E0} = 0.5832 \text{ O/1}$$

$$\text{Pero } \frac{1}{Z_{E0}} = \frac{1}{0.5832} = 1.714$$

$$I_a = 3 I_{a0,1,2} = 3(1.715) = 5.144$$

Finalmente se obtiene que:

$$I_{cc_{23 \text{ KV}}} = I_a \times I_b \quad ; \quad I_b = \text{corriente base en 23 KV}$$

$$I_{cc} = 5.144 (1507.91) = 7756.73 \text{ Amps.}$$

23 KV

CALCULANDO EL VALOR DEL REACTOR EN OHMS

$$Z_B = \frac{(KV_B)^2}{MVA_B}$$

$$Z_B = \frac{(23)^2}{60}$$

$$Z_B = 8.81$$

Por lo tanto:

$$\frac{Z}{0/1} = \frac{Z_{DADA}}{Z_{BASE}}$$

$$Z_{DADA} = \frac{Z}{0/1} \times Z_{BASE}$$

Donde:

$$Z_{DADA} = 0.08 (8.81)$$

$$Z_{DADA} = 0.70$$

Por lo tanto, el reactor se deberá seleccionar igual o mayor al valor calculado de acuerdo al valor que exista en el mercado.

6.1 CALCULO DE LA RED DE TIERRAS.

DATOS FISICOS DEL PROYECTO:

Longitud de subestación = 82 m

Ancho de subestación	=	50 m
ρ_t (Resistividad del terreno)	=	100 $\Omega \cdot m$
ρ_s (Resistividad de superficie)	=	3000 $\Omega \cdot m$
h (Profundidad de la malla)	=	0.60 m
hs (Profundidad de referencia)	=	0.12 m
Longitud de malla	=	81.250 m
Ancho de malla	=	50 m
Ig corriente de corto circuito	=	7756.73 A.
t_f (Tiempo de duración de falla)	=	0.5 seg. (30 ciclos)

CALCULO DE LA RED DE TIERRAS:

A) Datos:

Area considerada	A =	80 x 50 m
Resistividad del terreno	$\rho_t =$	100 $\Omega \cdot m$
Resistividad de roca triturada	$\rho_s =$	3000 $\Omega \cdot m$
Tiempo de liberación de falla	$t_s =$	30 ciclos (0.5 seg..)
Profundidad de la malla	h =	1.00 m

DEL CALCULO DE CORTO CIRCUITO

En tensión de 230 KV:

$$I_{cc} = 10,051.66 \text{ A.}$$

3ϕ

$$I_{cc} = 10,051.66 \text{ A.}$$

ϕ

En tensión de 23 KV:

$$I_{cc_{3\phi}} = 15,380.68 \text{ A.}$$

$$I_{cc_{\phi}} = 7756.73 \text{ A.}$$

B) Cálculo de la sección del conductor:

$$S = I_g \times \text{tamaño mínimo conductor.}$$

Datos:

$$I_g = 7756.73 \text{ A.,} \quad t_f = 0.5 \text{ seg. (30 ciclos)}$$

De la tabla 5

- Para una temperatura máxima de operación de 450°C (Conectores soldables).

$$\text{Tamaño mínimo conductor} = 6.6 \text{ [c mils/A]}$$

$$S_{450^\circ} = 7756.73 \times 6.6$$

$$= 51,194.15 \text{ [c mils]}$$

De la tabla diámetros de conductores (pág. 99) un conductor:

$$2 \text{ AWG} = 66,370 \text{ [c mils]}$$

- Para una temperatura máxima de operación de 250°C (Conectores mecánicos).

$$\text{Tamaño mínimo conductor} = 8.3 \text{ [c mils/A]}$$

$$= 66,431.208 \text{ [c mils]}$$

De la tabla diámetros de conductores, un conductor.

$$1/0 \text{ AWG} = 105,500 \text{ [c mils]}$$

Conclusión: por Norma Oficial Mexicana se selecciona calibre de conductor 4/0 como mínimo.

C) *Cálculo de resistencia a tierra.*

La resistencia a tierra se definió:

$$R_g = \rho_t \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{20/A}} \right) \right] \dots \text{Ec. (55)}$$

De la malla:

$$L = (\# \text{ Cond. Horiz.} \times \text{Largo}) + (\# \text{ Cond. Vert.} \times \text{Ancho})$$

$$= (17 \times 81.25) + (25 \times 50)$$

$$= 2631.25 \text{ m}$$

$$A = \text{Largo} \times \text{Ancho}$$

$$= 81.25 \times 50$$

$$= 4062.5 \text{ m}^2$$

Sustituyendo:

$$R_g = 100 \left[\frac{1}{2631.25} + \frac{1}{\sqrt{20(4062.5)}} \left(1 + \frac{1}{\sqrt{1 + 0.6 \frac{20}{4062.5}}} \right) \right]$$

$$= 100 (0.00038 + 0.003508 (1.9596))$$

$$R_g = 0.725 \Omega$$

D) *Cálculo de potenciales tolerables*

- *Potencial de contacto:*

De la fórmula: (considerando una persona de 50 Kg que es el caso más crítico)

$$E_{\text{CONT}} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec. (73)}$$

$$C_s = f(\rho_t, \rho_s, h_s)$$

$$\text{Así: } K = \frac{\rho_t - \rho_s}{\rho_t + \rho_s}$$

$$K = \frac{100 - 3000}{100 + 3000}$$

$$K = -0.9354$$

Con este valor de la pág 92 tenemos que:

$$C_s = 0.64 \quad \text{y} \quad t_s = t_f = 0.5$$

Sustituyendo:

$$E_{\text{CONT.}} = (1000 + 1.5 (0.64) (3000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{CONT.}} = 636.509 \text{ V}$$

- *Potencial de paso.*

(Considerando una persona de 50 Kg que es el caso más crítico).

De la fórmula:

$$E_{\text{PASO}} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad \text{Ec. (71)}$$

Sustituyendo valores:

$$= (1000 + 6 (0.64) (3000)) \frac{0.116}{\sqrt{0.5}}$$

$$E_{\text{PASO}} = 2053.890 \text{ V}$$

E) Cálculo de potenciales en la malla:

- Potencial de contacto.

El potencial de contacto se definió como:

$$E_m = \frac{\rho_T K_m K_i I_{cc}}{L} \dots \text{Ec. (77)}$$

Calculando cada uno de los factores:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \left(\frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{80d} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \ln \frac{8}{\pi(2n-1)}$$

Por otro lado se tiene que:

$K_{ii} = 1$ en mallas uniformes con varillas a largo del perímetro.

$h = 0.6$ m.

$h_o = 1$ m profundidad de referencia de la malla.

$D = 3.125$ m espaciamiento entre conductores, ver figura anexa.

$d = 0.0134$ m dato tomado de la tabla No. , para un conductor 4/0 AWG.

$$n = \sqrt{n_A \times n_B}$$

$$= \sqrt{17 \times 27}$$

$n = 21.424$ media geométrica del No. de conductores de la malla en ambas direcciones.

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_o}}$$

$$= \sqrt{1 + \frac{0.6}{1}}$$

$$K_h = 1.2649$$

Sustituyendo valores tenemos que:

$$K_m = 0.4104$$

Ahora de la fórmula:

$$K_i = 0.656 + 0.172 n$$

Sustituyendo:

$$\begin{aligned} K_i &= 0.656 + 0.172 (21.424) \\ &= 4.3409 \end{aligned}$$

Así pues tenemos que sustituyendo los valores:

$$E_m = \frac{(100) (0.4104) (4.3409) (8003.76)}{2631.25}$$

$$E_m = 541.899 \text{ V}$$

- *Potencial de paso en malla.*

El potencial de paso en malla se definió como:

$$E_s = \frac{\rho (K_s K_i I_{cc})}{L} \dots E_c. (78)$$

Donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right]$$

Sustituyendo valores:

$$K_s = 0.4525$$

Ahora sustituyendo en la fórmula de Es:

$$E_s = \frac{(100) (0.4525) (4.3409) (8003.76)}{2631.25}$$

$$E_s = 597.45 \text{ V}$$

F) *Comparación.*

Comparando los resultados obtenidos de los potenciales tolerables por el cuerpo humano, contra los potenciales que se generan en la malla con las condiciones vistas ver figura anexa, se tiene que:

*POTENCIALES
TOLERABLES*

*POTENCIALES
EN LA MALLA*

$$E_{\text{PASO}} = 2053.890 \text{ V} \\ 50$$

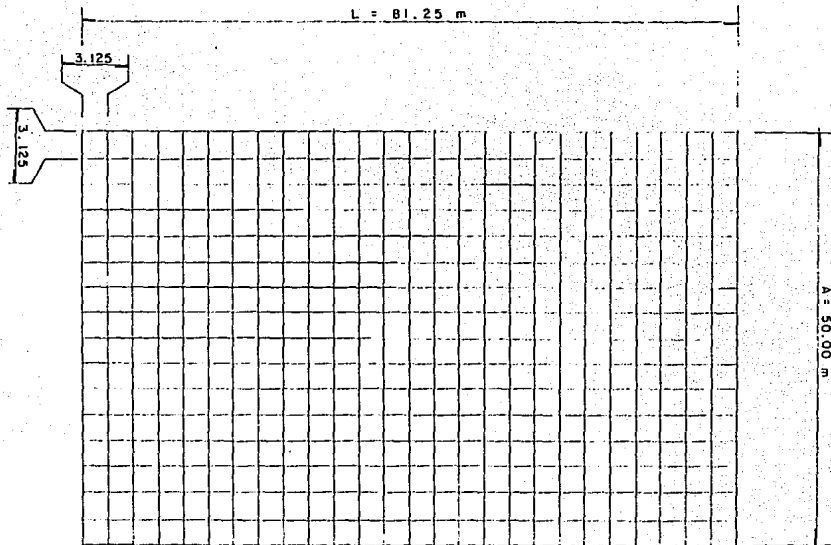
$$E_s = 597.450 \text{ V}$$

$$E_{\text{CONTACTO}} = 636.509 \text{ V} \\ 50$$

$$E_m = 541.899 \text{ V}$$

Conclusión: de las comparaciones anteriores, se puede deducir que la malla de tierras es segura, ya que en ambos casos, el voltaje que se generaría, bajo un régimen de corto circuito crítico, serían menores a los tolerables por el cuerpo humano.

DISEÑO DE LA RED DE TIERRAS.



n_A = # CONDUCTORES HORIZONTALES = 17

$S = 3.125$ m

n_B = # CONDUCTORES VERTICALES = 27

6.3 CALCULO DE FALLA INTERNA.

Tomaremos como referencia el plano de planta general de la S.E. Universidad (Odón de Buen) ver plano 17880-24697.

El voltaje de operación de la subestación encapsulada en SF₆ es de 230 KV.

Los datos que se tomarán para este cálculo son los siguientes:

$$f = 60 \text{ Hz.}$$

$$\text{RMG (envolvente)} = 0.157 \text{ m}$$

$$\text{RMG}_g \text{ (entre uniones de envolvente e hilos de tierra)} = 0.0067 \text{ m}$$

$$d_{\text{bus}} \text{ (diámetro del bus)} = 0.089 \text{ m}$$

$$R_e \text{ (resistencia de envolvente)} = 3.16 \mu\Omega/\text{m}$$

$$I_{cc} \text{ 230 KV } \varnothing = 10,051.66 \text{ A.}$$

$$S \text{ (espaciamiento entre buses)} = 1.10 \text{ m}$$

$$h \text{ (distancia entre envolvente y tierra)} = 4.41 \text{ m}$$

Calculando r_o como se definió anteriormente en la página 51.

$$r_o = \frac{0.9 d}{2}$$

$$r_o = \frac{0.9 (0.089)}{2}$$

$$r_o = 0.04 \text{ m}$$

Despejando h de la ecuación mostrada en la página 48.

$$S_o = 2h$$

$$S_o = 2(4.41)$$

$$S_o = 8.82 \text{ m}$$

Calculando Z_A y Z_B en unidades de Ω/m

$$Z_A = J C \text{ Log}_{10} \left(\frac{S_o}{RMG} \right) \quad \text{Ec. (11)}$$

$$Z_A = J 4.61 (377) 10^{-7} \text{ Log}_{10} \frac{8.82}{0.157} = 0.304 \times 10^{-3} \quad \Omega/m$$

$$Z_A = 0.304 \times 10^{-3} \quad \Omega/m$$

Ahora calculado Z_B .

$$Z_B = R_e + J C \text{ Log}_{10} \frac{(RMG - r_o)^2}{(r_o RMG)}$$

$$Z_B = (3.16 + J 173.3) \text{ Log}_{10} \frac{(0.157 - 0.04)^2}{(0.157 \times 0.04)} \times 10^{-6} \quad \Omega/m$$

$$Z_B = (3.16 + J 58.8) \times 10^{-6} \quad \Omega/m$$

$$Z_B = 0.059 \times 10^{-3} \quad \Omega/m$$

Considerando que la falla ocurre en la fase central que es el caso más crítico, la longitud equivalente de la envolvente (incluyendo la longitud de los hilos de tierra convertidos a longitud de envolvente) es:

$$\lambda_{AB} = 37.5 + 4.41 + \frac{4.41 \times \text{Log}_{10} (8.82 / 0.0067)}{\text{Log}_{10} (8.82 / 0.157)}$$

$$\lambda_{AB} = 49.77 \text{ m}$$

De la Ec. (29)

$$\lambda_a = 49.77 \times \frac{(1 - (304 / 59)^{1/2})}{(1 - (304 / 59))}$$

$$\lambda_a = 15.22 \text{ m}$$

Despejando λ_b de la Ec. (28) se tiene:

$$\lambda_b = \lambda_{ab} - \lambda_a$$

Donde:

$$\lambda_b = 49.77 - 15.22$$

$$\lambda_b = 34.55 \text{ m}$$

Calculando X_A y X_B en ohms:

$$X_A = \lambda_a Z_A$$

$$X_A = 15.22 \times (0.304 \times 10^{-3})$$

$$X_A = 4.62 \times 10^{-3} \Omega$$

$$X_B = \lambda_b Z_B$$

$$X_B = 34.55 (0.059 \times 10^{-3})$$

$$X_B = 2.038 \times 10^{-3} \Omega$$

Por lo tanto las corrientes serán:

$$I_A = \left(\frac{2.038}{4.62 + 2.038} \right) \times I_{cc}$$

$$I_B = \left(\frac{4.62}{4.62 + 2.038} \right) \times I_{cc}$$

$$I_A = 0.306 \times (10051.66)$$

$$I_A = 3075.80 \text{ A.}$$

$$I_B = 0.69 \times (10051.66)$$

$$I_B = 6935.64 \text{ A.}$$

Por lo tanto la caída máxima de voltaje es:

$$V = 3075.80 (4.62 \times 10^{-3})$$

$$V = 14.21 \text{ V.}$$

6.3 CALCULO DE FALLA EXTERNA.

Considerando que en el sistema se presentan dos tipos de falla:

- En el bus exterior.
- En el bus central.

Emplearemos los mismos datos calculados anteriormente en la falla interna.

Datos generales:

$$I_{cc} = 10051.66 \text{ A.}$$
$$230 \text{ KV}$$

$$\text{Longitud total de la envolvente } (\lambda) = 37.50 \text{ m}$$

$$\text{Altura sobre el nivel de tierra en m (h)} = 4.41 \text{ m}$$

$$\text{Espaciamiento entre buses (S)} = 7.70$$

$$\text{Radio medio geométrico de la envolvente (RMG)} = 0.157 \text{ m}$$

$$\text{Radio medio geométrico entre uniones de envolvente e hilos de tierra (RMGg)} = 0.0067 \text{ m}$$

Ahora calcularemos las longitudes entre la relación del par de envolventes y el ciclo cerrado (LOOP) como se muestra en la figura 21.

$$\lambda'_{m} = \lambda + h$$

$$\lambda'_{m} = 37.5 + 4.41$$

$$\lambda'_{m} = 41.91 \text{ m}$$

$$\lambda'_{o} = \lambda'_{m} + 0.5 (S) \left[\log_{10} (2h / \text{RMGg}) / \log_{10} (2h / \text{RMG}) \right]$$

$$\lambda'_{o} = 41.91 + 0.5 (1.10) (1.78)$$

$$\lambda'_{o} = 42.89 \text{ m (para la condición a)}$$

$$\lambda''_o = 41.91 \quad (\text{para la condición b})$$

Para un LOOP formado por cualquiera de las dos envolventes de bus paralelos y sus uniones, la impedancia propia del LOOP la podemos determinar como:

$$Z'_{\text{LOOP}} = 4.61 \times W \times 2 \log_{10} (S / \text{RMG}) \times \lambda''_o$$

$$Z'_{\text{LOOP}} = 1.74 \times 10^{-4} \times 2 \log_{10} (1.10 / 0.157) \times 42.89$$

$$Z'_{\text{LOOP}} = 12.62 \times 10^{-3} \quad \Omega \cdot \text{m} \quad (\text{para la condición a})$$

Entonces la impedancia propia para la condición b será:

$$Z''_{\text{LOOP}} = 0.294 \times 10^{-3} \times 41.91$$

$$Z''_{\text{LOOP}} = 12.33 \times 10^{-3} \quad \Omega \cdot \text{m}$$

Determinando el primer término de la Ec. (31) se tiene que, para la condición a).

$$(Z_{m1} - Z_{m2}) I_o = \lambda''_m \cdot c \cdot \log_{10} [S / (\text{RMG} - r_o)]$$

$$(Z_{m1} - Z_{m2}) I_o = 41.91 \times 1.74 \times 10^{-4} \times \log_{10} [1.10 / (0.157 - 0.04)] \times 3350.25$$

$$(Z_{m1} - Z_{m2}) I_o = 7.09 \times 10^{-3} \times 3350.25$$

$$(Z_{m1} - Z_{m2}) I_o = 23.75 \text{ V.}$$

Despejando I_1 de la Ec. (31)

$$I_1 = \frac{(Z_{m1} - Z_{m2}) I_0}{Z'_{\text{LOOP}}}$$

Donde:

$$I_1 = \frac{23.75}{12.62 \times 10^{-3}} = 1.881 \text{ KA}$$

Finalmente para la condición (a) la corriente en la envolvente para una falla en la fase exterior será igual a:

$$I_1 = 1.881 \text{ KA}$$

Y la corriente en la envolvente en la fase central será:

$$I_1 - I_2 = 1.881 - 0.582 \text{ KA}$$

$$I_1 - I_2 = 1.299 \text{ KA}$$

Y la corriente que circulará en la envolvente de la otra fase externa será:

$$I_2 = 0.582 \text{ KA}$$

Por lo tanto el máximo voltaje a lo largo de la envolvente se puede estimar como:

$$\frac{23.75}{2} = 11.875 \text{ V.}$$

Asimismo para el caso de la condición b tenemos:

$$\frac{1.926}{1.881} \times 11.875 = 12.15 \text{ V.}$$

6.4 CONCLUSIONES.

En el capítulo uno se da una idea general de lo que es un sistema de tierras, indicando sus funciones principales y elementos que la constituyen.

También se indican métodos para el análisis de la resistividad del terreno así como otros aspectos importantes sobre sistemas de tierras.

Los capítulos dos y tres son básicamente el punto fuerte de este trabajo, ya que aquí se menciona toda la teoría sobre fallas internas y externas que se pueden presentar en subestaciones en SF₆, estos capítulos están basados en el desarrollo de modelos y ecuaciones para el cálculo de cualquiera de los dos tipos de fallas que se puedan presentar en la subestación en SF₆ ya sea interna o externa.

El capítulo cuatro está enfocado a mostrar las disposiciones básicas de las redes de tierras, sugiriendo cual de éstas es la más adecuada de acuerdo al tipo de necesidad del usuario.

El capítulo cinco muestra todos los procedimientos necesarios para el desarrollo de cálculo de un sistema de tierras, considerando todos los factores importantes para la seguridad del personal que labora en las subestaciones en SF₆, asimismo se toman en cuenta las normas, tanto nacionales como internacionales que deben de cumplir este tipo de sistemas.

El capítulo seis es la aplicación de todos los capítulos anteriores, aplicados a la subestación Odón de Buen y de acuerdo con los cálculos obtenidos para falla interna y falla externa, podemos observar que los voltajes obtenidos en ambas fallas, fue muy inferior que los voltajes máximos recomendados por los fabricantes de equipo para subestaciones en SF₆ (ver págs. 102 y 103).

Por lo tanto si tomamos en cuenta que la longitud de los segmentos de envolvente son aproximadamente de 3 a 16 mts. de acuerdo con datos del fabricante de equipo para SF₆, se

ha determinado que para nuestro caso se tomó una distancia mayor a la del fabricante (37.50 mts.).

Como conclusión, es correcto que si partimos de la condición de aterrizar en dos puntos cada tramo de envolvente, se puede asegurar que los voltajes que se presenten en el momento de la falla, no representarán riesgos para el personal que se encontrase en contacto con el equipo.

BIBLIOGRAFIA

- 1.- GUIDE FAR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING STD 80-1986.
- 2.- I.E.E.E. RECOMMENDED PRACTICE FOR GROUNDING OF INDUSTRIAL AND COMMERCIAL POWER SYSTEMS I.E.E.E. STD 142-1982.
- 3.- DISEÑO DE SUBESTACIONES ELECTRICAS RAULL MARTIN JOSE, 1987.
- 4.- REDES ELECTRICAS SEGUNDA PARTE VIQUEIRA LANDA JACINTO, 1987.
- 5.- ANALISIS DE SISTEMAS ELECTRICOS DE POTENCIA WILLIAM D. STEVENSON.
- 6.- AMERICAN NATIONAL STANDARD FOR TRANSFORMER STD C57.12.10-1988.
- 7.- NORMA TECNICAS PARA INSTALACIONES ELECTRICAS N.T.I.E.-1981.
- 8.- METODOLOGIA GENERAL PARA EL PROYECTO DE SUBESTACIONES BLINDADAS AISLADAS EN SF6 PARA 115, 230 Y 400 KV.
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES ELECTRICAS FEB. 1993.

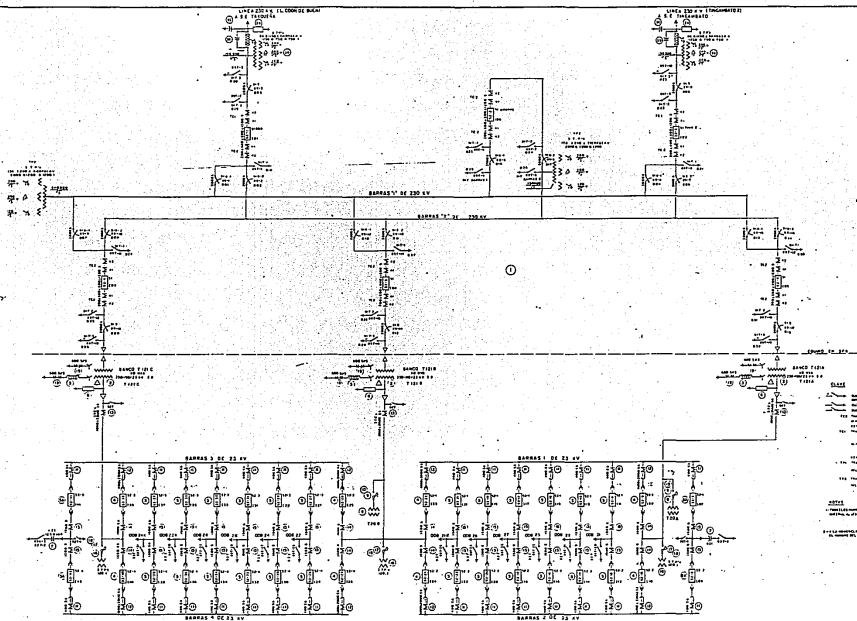


TABLA SIMBOLOS DE MATERIALES	
NO.	DESCRIPCION
1	1000
2	1000
3	1000
4	1000
5	1000
6	1000
7	1000
8	1000
9	1000
10	1000
11	1000
12	1000
13	1000
14	1000
15	1000
16	1000
17	1000
18	1000
19	1000
20	1000
21	1000
22	1000
23	1000
24	1000
25	1000
26	1000
27	1000
28	1000
29	1000
30	1000
31	1000
32	1000
33	1000
34	1000
35	1000
36	1000
37	1000
38	1000
39	1000
40	1000
41	1000
42	1000
43	1000
44	1000
45	1000
46	1000
47	1000
48	1000
49	1000
50	1000

NOTA: Este es un dibujo de referencia y no debe ser usado para la construcción de un sistema eléctrico.

LEYENDA

Simbolos de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

1. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

2. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

3. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

4. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

5. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

6. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

7. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

8. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

9. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

10. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

11. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

12. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

13. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

14. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

15. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

16. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

17. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

18. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

19. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

20. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

21. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

22. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

23. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

24. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

25. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

26. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

27. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

28. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

29. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

30. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

31. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

32. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

33. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

34. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

35. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

36. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

37. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

38. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

39. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

40. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

41. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

42. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

43. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

44. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

45. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

46. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

47. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

48. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

49. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

50. Simbolo de Materiales: (List of symbols and their corresponding material specifications)

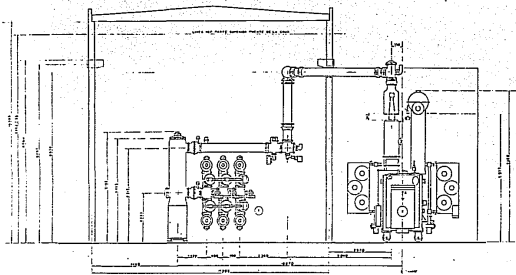
NO.	FECHA	REVISIONES	DIBUJOS RELACIONADOS
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			
11			
12			
13			
14			
15			
16			
17			
18			
19			
20			
21			
22			
23			
24			
25			
26			
27			
28			
29			
30			
31			
32			
33			
34			
35			
36			
37			
38			
39			
40			
41			
42			
43			
44			
45			
46			
47			
48			
49			
50			

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S.A.

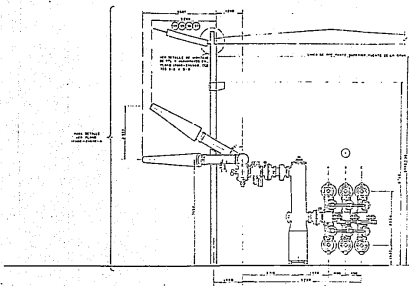
DIAGRAMA UNIELAR

S. E. ODON DE BUEN

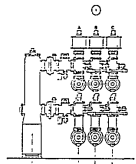
17880-246961



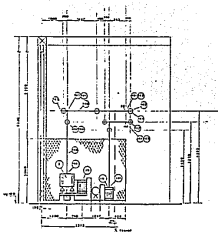
SECCION A - A



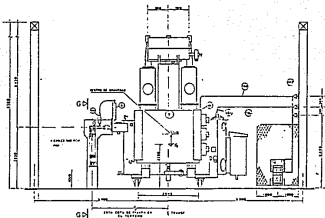
SECCIONES B - B Y D - O



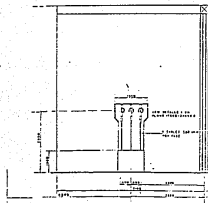
SECCION C - C



SECCION E - E



SECCION F - F

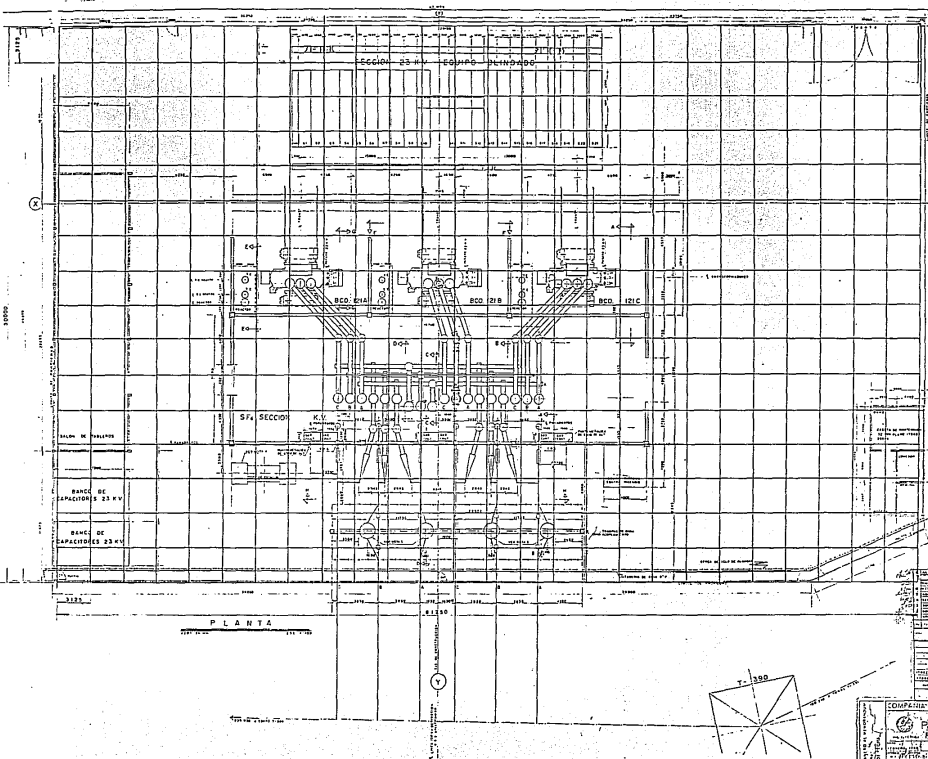


SECCION G - G

NOTAS:
 1. VER FIG. 100
 2. VER FIG. 100

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S. A.	
1. NOMBRE DEL PROYECTO	2. NOMBRE DEL CLIENTE
3. NOMBRE DEL INGENIERO	4. NOMBRE DEL DISEÑADOR
5. NOMBRE DEL EJECUTOR	6. NOMBRE DEL REVISOR
7. NOMBRE DEL APROBADO	8. NOMBRE DEL AUTORIZADO
9. NOMBRE DEL DISEÑADOR	10. NOMBRE DEL EJECUTOR
11. NOMBRE DEL REVISOR	12. NOMBRE DEL APROBADO
13. NOMBRE DEL AUTORIZADO	14. NOMBRE DEL DISEÑADOR
15. NOMBRE DEL EJECUTOR	16. NOMBRE DEL REVISOR
17. NOMBRE DEL APROBADO	18. NOMBRE DEL AUTORIZADO
19. NOMBRE DEL DISEÑADOR	20. NOMBRE DEL EJECUTOR
21. NOMBRE DEL REVISOR	22. NOMBRE DEL APROBADO
23. NOMBRE DEL AUTORIZADO	24. NOMBRE DEL DISEÑADOR
25. NOMBRE DEL EJECUTOR	26. NOMBRE DEL REVISOR
27. NOMBRE DEL APROBADO	28. NOMBRE DEL AUTORIZADO
29. NOMBRE DEL DISEÑADOR	30. NOMBRE DEL EJECUTOR
31. NOMBRE DEL REVISOR	32. NOMBRE DEL APROBADO
33. NOMBRE DEL AUTORIZADO	34. NOMBRE DEL DISEÑADOR
35. NOMBRE DEL EJECUTOR	36. NOMBRE DEL REVISOR
37. NOMBRE DEL APROBADO	38. NOMBRE DEL AUTORIZADO
39. NOMBRE DEL DISEÑADOR	40. NOMBRE DEL EJECUTOR
41. NOMBRE DEL REVISOR	42. NOMBRE DEL APROBADO
43. NOMBRE DEL AUTORIZADO	44. NOMBRE DEL DISEÑADOR
45. NOMBRE DEL EJECUTOR	46. NOMBRE DEL REVISOR
47. NOMBRE DEL APROBADO	48. NOMBRE DEL AUTORIZADO
49. NOMBRE DEL DISEÑADOR	50. NOMBRE DEL EJECUTOR
51. NOMBRE DEL REVISOR	52. NOMBRE DEL APROBADO
53. NOMBRE DEL AUTORIZADO	54. NOMBRE DEL DISEÑADOR
55. NOMBRE DEL EJECUTOR	56. NOMBRE DEL REVISOR
57. NOMBRE DEL APROBADO	58. NOMBRE DEL AUTORIZADO
59. NOMBRE DEL DISEÑADOR	60. NOMBRE DEL EJECUTOR
61. NOMBRE DEL REVISOR	62. NOMBRE DEL APROBADO
63. NOMBRE DEL AUTORIZADO	64. NOMBRE DEL DISEÑADOR
65. NOMBRE DEL EJECUTOR	66. NOMBRE DEL REVISOR
67. NOMBRE DEL APROBADO	68. NOMBRE DEL AUTORIZADO
69. NOMBRE DEL DISEÑADOR	70. NOMBRE DEL EJECUTOR
71. NOMBRE DEL REVISOR	72. NOMBRE DEL APROBADO
73. NOMBRE DEL AUTORIZADO	74. NOMBRE DEL DISEÑADOR
75. NOMBRE DEL EJECUTOR	76. NOMBRE DEL REVISOR
77. NOMBRE DEL APROBADO	78. NOMBRE DEL AUTORIZADO
79. NOMBRE DEL DISEÑADOR	80. NOMBRE DEL EJECUTOR
81. NOMBRE DEL REVISOR	82. NOMBRE DEL APROBADO
83. NOMBRE DEL AUTORIZADO	84. NOMBRE DEL DISEÑADOR
85. NOMBRE DEL EJECUTOR	86. NOMBRE DEL REVISOR
87. NOMBRE DEL APROBADO	88. NOMBRE DEL AUTORIZADO
89. NOMBRE DEL DISEÑADOR	90. NOMBRE DEL EJECUTOR
91. NOMBRE DEL REVISOR	92. NOMBRE DEL APROBADO
93. NOMBRE DEL AUTORIZADO	94. NOMBRE DEL DISEÑADOR
95. NOMBRE DEL EJECUTOR	96. NOMBRE DEL REVISOR
97. NOMBRE DEL APROBADO	98. NOMBRE DEL AUTORIZADO
99. NOMBRE DEL DISEÑADOR	100. NOMBRE DEL EJECUTOR

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO, S. A.
 ELEVACIONES 150/23 KV.
 S. E. UNIVERSIDAD
 17680-24698



FORMA DE LOCALIZACION
EN EL PLANO

- NOTAS:
- 1. VERIFICAR DATOS
 - 2. VERIFICAR NUMEROS
 - 3. LAS UNIDADES DE LA FUERZA DE TRACCION
 - 4. LAS UNIDADES DE LA FUERZA DE TRACCION
 - 5. LAS UNIDADES DE LA FUERZA DE TRACCION
 - 6. LAS UNIDADES DE LA FUERZA DE TRACCION

PLANTA

1	SECCION 23 KV	12	SECCION 23 KV
2	SECCION 23 KV	13	SECCION 23 KV
3	SECCION 23 KV	14	SECCION 23 KV
4	SECCION 23 KV	15	SECCION 23 KV
5	SECCION 23 KV	16	SECCION 23 KV
6	SECCION 23 KV	17	SECCION 23 KV
7	SECCION 23 KV	18	SECCION 23 KV
8	SECCION 23 KV	19	SECCION 23 KV
9	SECCION 23 KV	20	SECCION 23 KV
10	SECCION 23 KV	21	SECCION 23 KV
11	SECCION 23 KV	22	SECCION 23 KV

"DIBUJOS RELACIONADOS"

COMPANIA DE LUZ Y FUERZA DEL CENTRO S.A.

PLANTA GENERAL

REDES DE TIERRAS

S.E. UNIVERSIDAD

BOGOTA - COLOMBIA

