

Liliana O.
26/12/17

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA EN CENTRALES Y
SUBESTACIONES APLICADO A LA CENTRAL HIDRO-
ELECTRICA DE PISAYAMBO.

INFORMACION
INVENTARIO FISICO

03 SEP 2018

Libro O.

19/11/2015
Ing. Maria José Nieto Morán
ASISTENTE DE ACTIVOS FIJOS - CIB

T E S I S

VICTOR LEON NAVAS

D6611

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

1 9 7 6

6/04/2018
Libro

621.312134



ESPOL
CENTRO DE INVESTIGACIONES
CIB

D-6611

Tesis Elect. Leon



D-6011

DISEÑO DE PUESTA A TIERRA EN CENTRALES Y
SUBESTACIONES APLICADO A LA CENTRAL HIDRO-
ELECTRICA DE PISAYAMBO.

TESIS PARA OPTAR EL TITULO DE INGENIERO
EN ELECTRICIDAD DE LA ESCUELA SUPERIOR PO
LITECNICA DEL LITORAL.

POR

VICTOR LEON NAVAS

DIRECTOR

ING. JORGE CHIRIBOGA

LA RESPONSABILIDAD POR LOS HECHOS ,
IDEAS Y DOCTRINAS EXPUESTAS EN ESTA
TESIS CORRESPONDEN EXCLUSIVAMENTE AL
AUTOR Y EL PATRIMONIO INTELECTUAL
DE ESTA TESIS DE GRADO CORRESPONDE
A LA ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA
DEL LITORAL (REGLAMENTO DE EXAMENES
Y TITULOS PROFESIONALES DE LA ESCUELA
SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL)

A LA MEMORIA DE
MI MADRE

A MI PADRE , ESPOSA
E HIJOS

A MIS PROFESORES

DISEÑO DE SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA EN CENTRALES
Y SUBESTACIONES APLICADAS A LA CENTRAL
HIDROELECTRICA DE PISAYAMBO

INDICE

	Pág.
PREMISA	
1. ESTUDIO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 ESTUDIO PRELIMINAR DE LA MALLA	2
1.2.1 Ventajas del sistema de la malla de tierra	2
1.2.2 Conexión de la malla	3
1.2.3 Designación preliminar de la malla	4
1.2.4 Objeto del diseño	4
1.3 DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO	6
1.3.1 Tipo de suelo	6
1.3.2 Medición de la resistividad	7
1.3.3 Efecto de la gradiente de voltaje	10
1.3.4 Efecto de la humedad	10
1.3.5 Efecto de la temperatura	11
1.3.6 Efecto de la magnitud de la corriente	12
1.3.7 Estimación de la resistividad del terreno en la Central Hidroeléctrica de Pisayambo	12
1.4 DETERMINACION DEL AREA CUBIERTA POR EL SISTEMA DE TIERRA	14
1.5 ESTIMACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA	14

1.5.1	Estimación de la resistencia de puesta a tierra de la Central de Pisayambo	16
1.6	DETERMINACION DE LA CORRIENTE DE FALLA	18
1.6.1	Procedimiento	18
1.6.2	Tipos de falla a tierra considerados en este problema	19
1.6.3	Determinación de la corriente de falla a tierra en la Central de Pisayambo	20
1.6.4	Efecto del cierre de la corriente directa. Factor de decremento	23
1.6.5	Efectos de cambios futuros	27
1.7	DURACION DE LA FALLA DE ACUERDO AL SISTEMA DE PROTECCION PROYECTADO	28
1.8	DETERMINACION DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR A APLICARSE	30
1.9	DETERMINACION DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR ENTERRADO	36
1.10	ESTUDIO DE CORROSION EN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	45
1.11	DISEÑO DE LOS CONTRAPESOS DE COBRE A LO LARGO DE LA TUBERIA DE PRESION	47
1.12	DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA EN LA CASA DE FUERZA	48
1.13	INVESTIGACION DE LAS TENSIONES DE TRANSFERENCIA	50
1.13.1	Generalidades	50
1.13.2	Circuitos de comunicación	51

1.13.3	Rieles	52
1.13.4	Alambres neutros de bajo voltaje.	52
1.13.5	Equipos portátiles y herramientas suministradas por la subestación	53
1.13.6	Tuberías	54
1.13.7	Edificios auxiliares	55
1.14	ESTUDIOS DE LOS EMPALMES Y ACCESORIOS	55
1.14.1	Material de los conductores a tie- rra	55
1.14.2	Características, elección y cálculo de la varilla de tierra	58
2.	VERIFICACION DEL COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE TIE <u>RRA</u>	66
2.1	CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIE- RRA SEGUN MODIFICACIONES HECHAS AL DISEÑO PRELIMINAR	66
2.2	CALCULO DE LA ELEVACION DEL POTENCIAL DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA	72
2.3	TENSIONES DE PASO Y DE TOQUE DENTRO DEL SIS <u>T</u> TEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA CENTRAL	73
2.4	CALCULO DE LAS TENSIONES DE PASO EN EL EXTE <u>R</u> RIOR DEL SISTEMA DE TIERRA	75
3.	COORDINACION DEL AISLAMIENTO EN LA CENTRAL DE PISA <u>Y</u> YAMBO	82
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	86

PREMISA

El presente estudio se basa en el Diseño de Puesta a Tierra de la Central Hidroeléctrica de Pisayambo, considerando específicamente la primera etapa.

En el estudio se han considerado los siguientes propósitos:

- Considerar que un estudio de puesta a tierra debe ser revisado con sumo cuidado y con especial referencia para la protección de la Central, como la del personal que en ella labora.
- Establecer como una ley básica, los límites de seguridad para los diferentes potenciales que pueden existir en la Central bajo condiciones de falla, entre puntos que pueden estar en contacto con el cuerpo humano.
- Diseñar una malla de tierra paso por paso para conseguir sistemas de tierra seguros basados en estos límites.
- Recomendar los diferentes métodos para obtener los datos del estudio de puesta a tierra y para verificar el adecuado sistema de tierra en su construcción.
- Demostrar métodos matemáticos como una ayuda para la comprensión y solución de los problemas típicos de gradientes de tierra.
- Proveer una bibliografía comprensible, resúmenes de Literatura, para poder buscar mayor información adicional no incluida en este estudio.

1. ESTUDIO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE TIERRA

1.1 GENERALIDADES

El presente capítulo describe el diseño preliminar de la malla de tierra de la Central de Pisayambo.

Se considera una resistividad apropiada de acuerdo a la configuración del terreno en el cual se encuentra la Central y a las áreas que van a ser cubiertas por este diseño.

Se utiliza el valor de la corriente de falla a tierra calculado por la firma Italconsult y la duración de la falla de acuerdo al sistema de protección proyectado para la Central de Pisayambo.

Se determina también la sección del conductor que se va a enterrar y la longitud del conductor con sus diferentes accesorios de conexiones de la malla base, que para este caso será el Patio de Llaves.

Se estudian las tensiones de transferencia, para la protección tanto del personal como de los equipos de la Central.

En este diseño se intercala también conocimientos teóricos en casi todos los pasos para dar una mejor visión de cada una de las ecuaciones y de los cálculos realizados, de esta manera poderlos considerar en cualquier tipo de diseños de sistemas de puesta a tierra.

1.2 ESTUDIO PRELIMINAR DE LA MALLA¹⁶

1.2.1 Ventajas del sistema de la malla de tierra

El amplio uso de la malla de tierra es debido a las siguientes ventajas:

- a) En sistemas donde la máxima corriente de tierra puede ser muy alta, rara vez se consigue una resistencia de tierra tan baja como para garantizar que la total elevación de potencial del sistema de tierra no alcance valores peligrosos para el contacto humano.

En estos casos el peligro puede ser corregido solamente por el control de los potenciales vecinales. Una malla es la solución práctica para el control de estos potenciales.

- b) En una estación de cualquier tamaño, se utilizan electrodos sencillos especiales para proveer conductividad y capacidad de transporte de energía necesarios. Sin embargo, cuando algunos de éstos se conectan entre sí a la carcasa de las máquinas y a los neutros de los circuitos aterrizados, el resultado es necesariamente una malla. Es decir que si un diseñador une múltiples electrodos puede utilizar una malla de tierra en vez de éstos, que para este caso serían superfluos.

Por esta razón, en algunas instalaciones se usa mucho el sistema de malla de tierra. Las varillas de tierra son relativamente de bajo costo y tiene una importancia particular, si la resistividad de la capa superior

de suelo, en el cual la malla se entierra es de mucha más alta resistividad que la de la capa inferior.

1.2.2 Conexión de la malla

Conductores de capacidad adecuada, de buena resistencia mecánica se usan para ser conectadas a la malla de tierra:

- a) Todas las partes metálicas no transportadoras de corriente, las cuales podrían accidentalmente llegar a ser energizadas, tales como, estructuras de metal, interruptores de aceite, carcasas de las máquinas, etc.
- b) Electrodo tales como varillas de tierra, armazones metálicas de pozos, tuberías de agua, etc.
- c) Bobinas limitadoras de corrientes, condensadores de acoplamiento, neutro de transformadores, circuitos secundarios de alumbrado, y otros circuitos eléctricos que se deseen.

Es conveniente que en la mayoría de los casos se coloquen a tierra los secundarios de los transformadores de potencial y de corriente, excepto que la tierra en tales circuitos deben ser restringidos a un solo punto para evitar corrientes ramificadas las cuales podrían tener un serio efecto sobre la eficiencia en los relés y las mediciones.

Cables de cobre o platinas son generalmente empleados para este tipo de conexión a tierra. Sin embargo, se usan frecuentemente los tanques de los transformado-

res como parte del camino a tierra para las bobinas limitadoras de corriente montadas en el sistema.

De la misma manera las estructuras de acero pueden ser usadas como parte del camino a tierra, si se puede establecer que la conductividad, incluyendo cualquiera de las uniones puede ser mantenida como equivalente a los conductores de cobre que de otra manera serían requeridos.

Estudios realizados en algunas instalaciones han demostrado el uso satisfactorio del acero como parte del camino a tierra.

Donde se acostumbra usar lo anteriormente explicado, cualquier película de pintura debe ser eliminada para evitar que en una unión se presente alta resistencia, sin embargo, se puede aplicar algún compuesto o cualquier otro medio para prevenir deterioro de la unión por oxidación.

Donde se usan estructuras de aluminio, se puede proveer un excelente camino de corriente a tierra para equipos montados sobre ellas. La unión entre varios terminales, y conexiones dentro de la malla es generalmente del tipo de engrampe o soldadura. La conexión de soldadura ordinaria se debe evitar debido a los posibles efectos ocasionados por las corrientes altas de falla o debido a corrosión galvánica. Sin embargo las conexiones soldadas de plata (silfos) se usan generalmente.

1.2.3 Designación preliminar de la malla

La designación práctica de una malla generalmente comienza con una inspección del plan trazado por el diseñador considerando las estructuras del edificio y el equipamiento de las máquinas.

En las mallas de tierra lo correcto es unir completamente el área perimetral, para así poder encerrar muchas conexiones de tierra a los equipos y evitar concentración de corrientes además de altas gradientes, proyectando conexiones finales de tierra.

Dentro de una malla de tierra los conductores son colocados paralelamente y preferentemente con un espaciamiento razonable.

Estos conductores se localizan a lo largo de una fila de equipos o estructuras metálicas para dar mayor facilidad a la conexión de la puesta a tierra.

En el diseño preliminar se calcula la longitud mínima del conductor a enterrarse, incluyendo las conexiones en cruz y las varillas. Los puntos en el cual la sobre intensidad es notoria se encuentra en las conexiones en cruz, especialmente en una malla cuadrada y representa la parte más deficiente en el uso de los conductores para una malla a tierra.

1.2.4 Objeto del diseño

En el terreno de la subestación que es de dimensiones físicas moderadas sobre un terreno de figura irregular se provee solamente un conductor a tierra perimétrico y conexiones mínimas a estructuras y equipos

donde la resistividad del terreno y la corriente de falla máxima son bajas, de tal manera que una malla mínima será suficiente.

Para este caso colocamos los puntos en las cuales están las máquinas y equipos que son necesarios proteger además de las estructuras de la estación, luego graficamos una malla mínima necesaria.

Sin embargo para las condiciones de este problema los cálculos demuestran que una malla más cerrada es aproximadamente más necesaria para un control de la gradiente de potencial.

El diseño a realizarse se efectúa tomando en consideración una superficie con piedra picada para disminuir la cantidad de conductores de malla necesarios y bajar los potenciales perimétricos.

1.3 DETERMINACION DE LA RESISTIVIDAD DEL TERRENO

1.3.1 Tipo de suelo

La investigación del sitio de la Estación incluye por lo menos una determinación del comportamiento general del suelo, esto se realiza a una razonable profundidad por medio de perforaciones, de esta manera se consigue una idea general del terreno así como su homogeneidad.

Existe literatura que presentan varios rangos de resistividad para suelos y rocas, como se muestra en la tabla de Rudenberg.

*constitución
comparativa*

TABLA DE RUDENBERG

PROMEDIO DE RESISTIVIDAD DE LA TIERRA

<u>Tipo de Suelo</u>	<u>Resistividad en Ohmio-Metro</u>		
Terreno orgánico húmedo	10	-	m
Terreno húmedo	100	-	m
Terreno seco	1000	-	m
Lecho de Roca	10000	-	m
Pizarra pura	10000000	-	m
Arenisca	100000000	-	m
Agua de mar	de 0,01	a 1	- m
Terreno Cenagoso	de 10	a 100	- m

1.3.2 Medición de la resistividad

Las estimaciones basadas sobre la configuración de suelos permiten solamente una aproximación ligera de la resistividad.

Las pruebas de resistividad eléctrica son por consiguiente descables. Estas deben ser hechas en algunos lugares dentro del terreno y con diferentes espacios de prueba para conseguir una indicación de cualquier variación importante de resistividad con el espaciamiento o la profundidad.

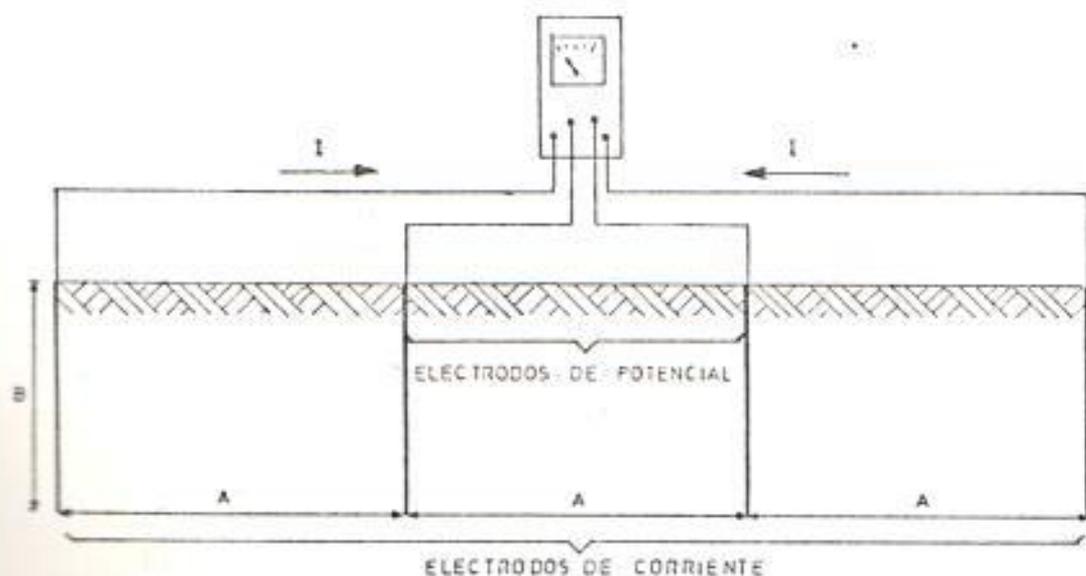
En donde la resistividad varía apreciablemente con la profundidad se debe usar un rango de espacios de prueba suficiente de tal manera que un resultado más exacto puede ser obtenido para un espacio más grande usando extrapolación.

Un método que comunmente se usa es el descrito por el Dr. F. Wenner de la U. S. Bureau of Standards.

Dos electrodos de corrientes y dos electrodos intermedios de potencial, cada uno de dimensiones pequeñas son clavados en la tierra y separados a una igual distancia (A) en línea recta a una profundidad (B).

El voltaje en los dos electrodos de potencial es luego medido y dividido por la corriente entre los dos electrodos de corriente para dar un valor de resistencia mútua, ésta se calcula mediante la fórmula $R = V/I$.

Algunos instrumentos dan directamente la lectura en ohmios.



Luego se calcula la resistividad del terreno por la fórmula:

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

Donde:

ρ = es la resistividad del terreno en Ohmios-metros.
 R = es la resistencia en ohmios que resulta de dividir el voltaje entre los electrodos de potencial y la corriente que fluye entre los electrodos de corriente.

A = es la distancia entre dos electrodos adyacentes, en metros.

B = es la profundidad de los electrodos en metros.

Si B es pequeña con respecto a A , la expresión anterior se reduce a:

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

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

La ecuación anterior está basada en la suposición de que la resistividad del terreno es uniforme.

Sin embargo, las resistividades como son medidas por este método varían de alguna manera con las diferentes pruebas.

Esto generalmente indica que la resistividad del terreno varía con la profundidad, ya que las corrientes de prueba fluyen principalmente cerca de la superficie para las mediciones en donde la distancia entre electrodos es pequeña, en cambio, la mayoría de ésta fluye más profunda para espacios más largos de electrodos.

1.3.3 Efecto de la gradiente de voltaje

Esta resistencia no es afectada por la gradiente de voltaje a menos que sobrepase un valor crítico. Este valor varía con la naturaleza del terreno, pero es del orden de algunos kilovoltios por centímetro.

Si la gradiente de potencial sobrepasa los límites de seguridad se forman arcos en la superficie de los electrodos y aumentan dentro de la tierra de tal manera que incrementan el tamaño efectivo del electrodo, hasta que las gradientes de voltaje son reducidas a valores en los cuales el terreno es seguro.

Ya que el sistema de puesta a tierra normalmente es diseñado para conservar estos gradientes por debajo de los valores críticos, la resistencia y resistividad se consideran no afectadas.

1.3.4 Efecto de la humedad

La resistividad del suelo se eleva rápidamente cuando el contenido de humedad cae más abajo del 22% por peso.

De aquí, en donde sea posible el electrodo debe ser en terrado bién profundo, lo suficiente para asegurar un contacto con la humedad permanente de la tierra.

En donde ésto no es posible se coloca sobre un sistema varillas verticales bién distribuídas unidas a la malla y alcanzando las capas más profundas.

Generalmente se cubre el piso con cascajo o piedra picada de 3 ó 4 pulgadas de profundidad tales como se usan en los terrenos de las subestaciones para ayudar a separar la evaporación y así limitar el secado de la capa superior durante periodos prolongados de sequedad.

Este cubrimiento de la superficie del terreno con mate rial de alta resistividad es valioso porque reduce las corrientes de cortocircuito.

1.3.5 Efecto de la temperatura

La resistividad del terreno se eleva rápidamente cuando la temperatura cae por debajo de los 32 grados F.

De aquí que los electrodos deben extenderse más abajo de la línea de congelamiento cuando sea posible.

Para temperaturas superiores a los 32 grados F. la resistividad disminuye, sin embargo, en casos no comunes de prolongada corriente de cortocircuito el punto de ebullición del agua puede obtenerse alrededor de un electrodo, de tal manera que el secado del terreno y una resistividad alta se presentan.

Estas condiciones, son raras veces encontradas en las actuales instalaciones de puesta a tierra de las subestaciones.

1.3.6 Efecto de la magnitud de la corriente

Es importante conocer, si las mediciones de resistencia y resistividad hechas de la manera normal con corrientes muy pequeñas, son estables bajo condiciones de cortocircuito.

Algunas pruebas que se han realizado demuestran que estas mediciones son estables y seguras, sobre la presunción de que las altas corrientes no son de suficiente magnitud para que den como resultado gradientes de extremado voltaje o de suficiente duración, para calcinar la tierra alrededor del electrodo.

1.3.7 Estimación de la resistividad del terreno en la Central de Pisayambo

La consideración de la resistividad del terreno sobre el cual se construye la Central de Pisayambo varía según la estructura de que se trate.

Así por ejemplo, podemos suponer que como esta Central está situada en la Cordillera de los Andes podemos considerar que la Casa de Fuerza está enclavada en una zona de roca sana, mientras que el Patio de Llaves está situado en una zona de roca descompuesta.

La tubería de presión corre a lo largo de terrenos

diversos, tales como, areniscas, roca descompuesta, roca sana, etc.

Estas calidades de terreno se considera de acuerdo con los estudios realizados por los Geólogos Ecuatorianos en la configuración del terreno de la Cordillera de los Andes, por lo tanto podemos decir que en general el sistema de puesta a tierra de la Central cubre zonas de roca descompuesta, roca sana, conglomerados de arena, arcilla, pizarra, lajas areniscas, lutitas, etc., de profundidad variable.

Para la Central de Pisayambo se estima la resistividad del terreno para las zonas cubiertas por el sistema de puesta a tierra, en base a la constitución del terreno con las características siguientes:

- Zona del Patio de Llaves (Roca descompuesta)	-----	800 Ω -m
- Zona de Casa de Fuerza	-----	10.000 Ω -m
- Tubería de Presión y Cámara de Válvulas	-----	10.000 Ω -m
- Otras zonas de roca descompuesta	-----	3.000 Ω -m

Para el estudio preliminar de la malla de puesta a tierra de la Central de Pisayambo se considera una resistividad de la superficie del terreno de 3.000 Ω -m, que corresponde a la de piedra picada con una capa de 15 centímetros de profundidad, que es el valor que tiene la piedra picada para condiciones de humedad.

1.4 DETERMINACION DEL AREA CUBIERTA POR EL SISTEMA DE TIERRA

Según las diversas estructuras, las áreas cubiertas por el sistema de puesta a tierra fueron las siguientes:

Patio de Llaves	-----	4.800 mts. ²
Casa de Fuerza	-----	640 mts. ²
Tubería de Presión		
Cámara de Válvulas	-----	2.200 mts. ²
Entre Casa de Fuerza y Patio de Llaves	-----	3.800 mts. ²

1.5 ESTIMACION DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA⁵⁻⁶

Para calcular la resistencia de puesta a tierra estimada a utilizarse en los cálculos de este diseño, usaremos un simple método empleado por Laurent y Niemann empleando un electrodo de plato circular cuya fórmula es la siguiente:

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad \text{ohmios} \quad (3)$$

Donde:

R = Resistencia de tierra

r = Es el radio en metros de un plato circular teniendo la misma área como la ocupada por la malla.

L = Longitud total del conductor enterrado en metros

ρ = Resistividad del terreno en ohmios-metros.

El segundo término reconoce el hecho, que la resistencia de una malla, es mayor, que la de un plato sólido y esta diferencia disminuye cuando la longitud del conductor aumenta, llegando a ser cero cuando se alcanza las condiciones de un plato sólido en donde la longitud del conductor es igual a infinito.

La resistencia de una subestación con un radio promedio (r) construida sobre una tierra homogénea y teniendo una longitud (L) de cable enterrado (Fig. 1), puede ser expresada por la ecuación anterior, o simplemente por la ecuación:

$$R = \frac{2\rho}{\text{Perímetro}} \quad \text{ohmios} \quad (4)$$

La resistencia de los circuitos a tierra de una estación grande, en tierra homogénea, difiere solamente en una pequeña cantidad del cociente de la resistividad de la tierra sobre la mitad del perímetro de la instalación.

En la primera expresión para R, el primer término es la resistencia de un plato superficial teniendo un radio (r). El segundo término, el cual es generalmente más pequeño, expresa la divergencia de la tierra real comparado con la del plato sólido.

El voltaje correspondiente $\frac{\rho I}{L}$, el cual es proporcio

nal a la corriente promedio que fluye por el conductor a tierra, representa la caída de potencial entre los electrodos enterrados y el área central de las mallas más o menos regulares que ellos forman. (Ver Fig. 2)

La diferencia de potencial entre el sólido en la mitad de la malla y las estructuras conectadas a los circuitos de tierra es del orden de ρI .

El potencial de paso en los alrededores de los electrodos enterrados está entre 0,10 a 0,15 ρI , siendo algo superior hacia el perímetro y algo inferior hacia el centro.

1.5.1 Estimación de la resistencia de puesta a tierra de la Central de Pisayambo

Conociendo el área cubierta por la malla en las diferentes zonas de la Central de Pisayambo, podemos calcular el radio aproximado del plato circular de igual área como la malla.

Así para el Patio de Llaves tenemos que:

Area = 4.800 metros cuadrados.

$$A = \pi r^2 \quad r^2 = \frac{A}{\pi} \quad r = \sqrt{\frac{4.800}{3,1416}} = 39,1 \text{ m.}$$

r = 39,1 m.

En la resistencia de tierra calculada por la ecuación presentada a continuación, se asume un valor de 1000 m

para la longitud del conductor a enterrarse.

$$R = \frac{\rho}{4r} + \frac{\rho}{L} \quad \text{ohmios.}$$

$$R = \frac{800}{4(39,1)} + \frac{800}{1000} = 5,12 + 0,80 = 5,92 \text{ ohmios.}$$

Para la Casa de Fuerza tenemos:

Area = 640 metros cuadrados.

$$r^2 = \frac{A}{\pi} \quad r = \sqrt{\frac{640}{3,1416}} = 14,3 \text{ m.}$$

$$\underline{r = 14,3 \text{ m.}}$$

$$R = \frac{10.000}{4(14,3)} + \frac{10.000}{1.000} = 174,82 + 10 = 184,82 \text{ ohmios}$$

Para la tubería de Presión tenemos:

Area = 2.200 metros cuadrados.

$$r^2 = \frac{A}{\pi} \quad r = \sqrt{\frac{2.200}{3,1416}} = 26,45 \text{ m.}$$

$$\underline{r = 26,45 \text{ m.}}$$

$$R = \frac{10.000}{4(26,45)} + \frac{10.000}{1.000} = 94,52 + 10 = 104,52 \text{ ohmios}$$

Para la zona entre la Casa de Fuerza y el Patio de Lla
ves tenemos:

Area = 3.800 metros cuadrados.

$$r^2 = \frac{A}{\pi} \qquad r = \sqrt{\frac{3.800}{3,1416}} = 34,8 \text{ m.}$$

$$\underline{r = 34,8 \text{ m.}}$$

$$R = \frac{3.000}{4(34,8)} + \frac{3.000}{1.000} = 21,55 + 3 = 24,55 \text{ ohmios}$$

Para cada una de las áreas cubiertas el estimado de resistencia de puesta a tierra de la Central de Pisayambo es como sigue:

Patio de Llaves	-----	5,92 ohmios.
Casa de Fuerza	-----	184,82 ohmios.
Tubería de Presión		
Cámara de Válvulas	-----	104,52 ohmios.
Entre Casa de Fuerza		
y Patio de Llaves	-----	24,55 ohmios.

La resistencia combinada paralelos de todas es :

$$\underline{R = 4,45 \text{ ohmios.}}$$

1.6 DETERMINACION DE LA CORRIENTE DE FALLA⁸⁻¹⁰

1.6.1 Procedimiento

Nuestro objetivo en esta sección, es determinar el valor eficaz de la corriente de falla a tierra.

En los cálculos del diseño de puesta a tierra utilizamos el siguiente procedimiento:

- a) Determinar cual de los tipos posibles de falla a tierra da una máxima corriente entre la malla de tierra y los terrenos alrededores, de aquí la elevación de potencial más alto de la malla a tierra y los mayores gradientes en el área de la subestación.
- b) Determinar por cálculos o por medio de analizador de redes, los máximos valores rms simétricos de la corriente de falla a tierra, fluyendo entre la malla de la estación y los terrenos alrededores en el momento de iniciarse la falla.
- c) Aplicar un factor de corrección donde sea apropiado, para permitir el efecto de cierre de la corriente directa, alterna y los decrementos de la corriente continua en el momento de iniciación de la falla.
- d) Aplicar un factor de corrección en donde sea apropiado para permitir futuros incrementos de la corriente de falla debido a expansiones del sistema.

1.6.2 Tipos de falla a tierra considerados en este problema

En el estudio de fallas a tierra, se consideran tres tipos de fallas que influyen en un sistema de

puesta a tierra y son:

- Falla trifásica a tierra.
- Falla bifásica a tierra.
- Falla monofásica a tierra.

Los tres tipos de falla a tierra son posibles, aunque las fallas trifásicas y bifásicas, se presentan muy pocas veces.

En este caso la falla que se considera para el estudio es la falla monofásica a tierra, que es la que comúnmente ocurre.

Para el caso de las fallas monofásicas a tierra existen algunas alternativas, cuando se producen, dentro y fuera de la estación, por esta razón vamos a ilustrar algunos casos, en donde una falla puede ser producida.

En los casos 1, 2, 3 y 4, que se muestran en la Fig. 3 se excluye cualquier corriente que no fluya entre el sistema de tierra local y la tierra misma.

1.6.3 Determinación de la corriente de falla a tierra en la Central de Pisayambo

En la determinación de la corriente de falla a tierra, se considera el cálculo de la corriente de corto circuito monofásico, puesto que, para condiciones más severas, ésta alcanza valores bastantes altos.

Según estudios realizados en Inecel por la firma Italconsult para corrientes de falla en la Central de Pisayambo, con la contribución de los sistemas de Quito,

Latacunga, Ambato y Riobamba, se han considerado diferentes pruebas, suponiendo en las estaciones una tensión preexistente a la avería igual a la tensión nominal.

Las corrientes de cortocircuito se determinaron no solo en las estaciones, si no también a lo largo de las líneas de 138 KV.

Las líneas se subdividieron en tramos iguales de breve longitud o sea:

- Línea Quito - Latacunga (90 Km) en 10 tramos
- Línea Latacunga - Pucará (17 Km) en 3 tramos
- Línea Pucará - San Miguelito (22 Km) en 3 tramos
- Línea San Miguelito - Ambato (10 Km) en 2 tramos

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito monofásico se consideraron 5 pruebas, para condiciones diferentes como se muestra en la tabla que se da a continuación:

T A B L A

VALORES MAXIMOS DE CORRIENTE Y DE POTENCIA ALCANZADOS EN RED POR CORTOCIRCUITO MONOFASICO

RED DE PISAYAMBO - CON TENSION NOMINAL DE 138 KV.

Prueba 1		Prueba 2		Prueba 3		Prueba 4		Prueba 5	
I (KA)	P (MVA)								
4,1	980	4,0	960	4,1	980	4,0	960	1,7	410

La corriente de avería monofásica a tierra, se ha calculado empleando los componentes simétricos y suponiendo la impedancia de secuencia positiva igual que la de secuencia negativa.

La fórmula empleada para el cálculo de la corriente de cortocircuito monofásico es la siguiente:

$$I'' = \frac{3 E}{2 Z_1'' + Z_0} \text{ amperios} \quad (5)$$

Donde:

I'' = Corriente de corto circuito monofásico

E = Tensión de fase

Z_1'' = Impedancia total directa

Z_0 = Impedancia de secuencia cero.

El valor más elevado de la corriente de cortocircuito monofásico se los encuentra en las pruebas 1 y 3 de la tabla anterior, y es de 4,1 KA. y una potencia alcanzada por la red de 980 MVA.

Para la Central de Pisayambo se puede considerar un tiempo de duración de la falla de 0,1 segundos que, según la tabla que en la siguiente sección se explica, corresponde a un factor de decremento de 1,25.

Por lo tanto para una corriente de falla de 4.100 amperios multiplicado por el factor de decremento de 1,25, resulta una corriente total de falla a tierra de 5.125 amperios, que es la que vamos a considerar en los cálculos del diseño del sistema de puesta a tierra de la Central de Pisayambo.

1.6.4 Efecto del cierre de la corriente directa

Factor de Decremento

Para el estudio de corrientes de falla se considera la onda de corriente y no la onda de voltaje, puesto que, esta última se utiliza más para estudios de aislamiento.

Por esta razón que para permitir condiciones severas es necesario asumir un cierre completo en los cálculos de fallas asimétricas a tierra para la duración del choque.

Ya que los datos experimentales sobre la fibrilación ventricular que ocurre en el organismo humano están basados sobre las ondas de senos simétricos de amplitud constante, es necesario determinar el valor rms de una corriente de onda de senos simples, lo cual equivale a lo más complejo de las ondas de corriente de falla asimétrica.

El valor eficaz de la onda de corriente total de falla, en cualquier instante, es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados del valor eficaz de la componente alterna en aquel instante y los valores de lo componente continuo.

$$I_{\text{falla}} = \sqrt{I_{\text{rms}}^2 + I_{\text{cc}}^2} \quad \text{amp.} \quad (6)$$

. Donde:

I_{falla} = es el valor eficaz de la onda de corriente de falla en amperios.

I_{rms} = es el valor eficaz de la componente de corriente alterna en amperios.

I_{cc} = es el valor de la componente de corriente continua en amperios.

El valor instantáneo de una corriente alterna corresponde a la intensidad en un instante y el valor máximo de una corriente alterna corresponde a un valor instantáneo máximo.

La raíz cuadrada de la media de los cuadrados de los voltajes instantáneos (o valor medio cuadrático ó geométrico) de una corriente alterna durante un periodo completo se denomina valor eficaz de una corriente alterna (valor rms).

La razón para elegir esta función especial de los valores instantáneos de una corriente alterna como medida de la intensidad, es que la desviación de todos los instrumentos utilizados para la medición de corriente alterna son funciones de dicho valor eficaz.

Para el cálculo de la corriente de cortocircuito se considera un factor, llamado "Factor de Decremento", cuya resolución matemática es muy complicada y externa para ser considerada en este estudio, sin embargo, se considera un valor práctico que se deduce por el decremento de la onda de la corriente de cortocircuito en función del tiempo.

El "Factor de Decremento" (D) corresponde al efecto de la corriente continua, de corriente alterna y los decrementos de la componente de corriente continua en el momento de iniciación de la falla.

Los valores de los decrementos para tiempo de duración de la falla fueron calculados prácticamente, estableciendo una falla en que a cada tiempo de duración de la falla corresponde un factor de decremento, así tenemos que:

T A B L A

Tiempo de duración de la falla en segundos	Ciclos (60 ciclos CA)	Factor de Decremento (D)
0,08	0,5	1,65
0,1	6	1,25
0,25	15	1,10
0,5 ó más	30 ó más	1,00

Para valores intermedios de duración de falla a tierra, los factores de decremento se obtienen usando interpolación lineal.

Para tiempos cortos de choques sucesivos se deben usar factores de decrementos correspondientes a la duración del choque más corto aún si el tiempo usado en algún otro lugar en los cálculos, es la suma de la duración de los choques individuales.

Se comprende que tanto los componentes de corriente continua y corriente alterna

El método para determinar los factores de decrementos es despreciando la resistencia en el paso de la falla y de aquí resultarán valores de corrientes al go más alto que los valores reales, sin embargo, el error dará más seguridad al sistema.

1.6.5 Efectos de cambios futuros

Es necesario considerar que si un sistema aumenta su capacidad o la construcción de nuevas interconexiones, la corriente máxima de falla también se incrementará. Si no se provee algún margen en el sistema de tierra original, éste podría llegar a ser inseguro.

Más aún, cualquier adición necesaria para cubrir las condiciones de cambio, generalmente será menos conveniente y más costoso instalarlo más tarde, que si se lo incluye en el diseño y construcción inicial.

Es prudente permitir un margen para el crecimiento del sistema. Este margen puede ser hecho disminuyendo el valor de la impedancia del sistema usado en los cálculos; o simplemente multiplicando el valor de la corriente de falla calculada por un valor apropiado.

Para estaciones en donde el crecimiento es muy grande se han considerado hasta un 50%, de la corriente de falla calculada, pero para el caso de la Central de Pisayambo en la cual probablemente no existan aumentos, no se considerará ningún incremento en la corriente de falla calculada.

1.7 DURACION DE LA FALLA DE ACUERDO AL SISTEMA DE PROTECCION PROYECTADO³

En muchos sistemas de transmisión, la mayoría de las fallas se trata de cruces con tierra, está muy generalizado el uso de relés de tierra en combinación con los relés de fase para la protección de las líneas de transmisión. La corriente residual, o de orden de sucesión, y la tensión se usa separadamente o en combinación para obtener los valores de disparo correspondientes para el funcionamiento de los relés de tierra.

Durante el funcionamiento en sistemas normalmente equilibrados, no existe ni corriente residual ni tensión, pudiéndose dar por consiguiente a los relés de tierra una sensibilidad mucho mayor que a los relés de fase. Además se logra generalmente una selectividad con mayor facilidad debido a la presencia de muchas fuentes de corrientes de tierra en la mayoría de los sistemas.

La protección de sobreintensidad para averías de tierra, que utilizan el tiempo para el efecto de la selectividad, siguen los mismos principios indicados para la protección de las fases.

Las diferentes combinaciones de ajuste pueden únicamente efectuarse cuando se conozcan los valores de la corriente de cortocircuito.

Las fallas a tierra no suelen perturbar un sistema con tanta intensidad como las fallas entre fases, pero si no se despejan con la rapidez suficiente, pueden desarrollarse hasta llegar a ocasionar averías en

tre dos fases activas teniendo en cuenta este detalle, es conveniente la instalación de protecciones de tierra de alta velocidad.

Por lo general, las fallas en las líneas y aparatos, están caracterizados por la aparición de un arco eléctrico que calienta y destruye los aislantes y conductores en el lugar de la falla; pero estas destrucciones son proporcionales a la duración del arco, por lo que, para una protección eficiente, el correspondiente relé ha de separar la parte afectada lo más rápidamente posible.

Los tiempos de trabajo de los relés han de ser lo más cortos posibles porque el mantenimiento de la estabilidad de una red, en caso de cortocircuito es, ante todo, una cuestión de tiempo de desconexión.

De forma apropiada, podemos decir que en una red de interconexión se mantiene el sincronismo si todos los circuitos quedan eliminados en un tiempo inferior a 0,1 segundos.

Con tiempos de desconexión cortos existe la ventaja de reducir los daños en las proximidades del cortocircuito.

Se llevará el tiempo de funcionamiento de un relé a algunas décimas de segundos (0,5 segundos como máximo) si se desea aprovechar un disyuntor con poca potencial de ruptura, mientras se espera su sustitución por otro disyuntor más apropiado.

En el caso de la Central de Pisayambo para la protección de las líneas de transmisión algunas casas fabri

cantes de equipos de protección consideran poder garantizar, también en los casos más desfavorables, tiempos de intervención de los aparatos de protección en el primer grado menores de 40 milisegundos.

Con este valor, considerando el estudio de los interruptores y protecciones hechas por la firma Italconsult se ha asumido un tiempo base de eliminación de las averías de 0,15 segundos, tanto para interruptores más cercanos a la avería como para aquel más lejano, en las líneas de transmisión.

Para el estudio del sistema de puesta a tierra de la Central de Pisayambo se utilizará para los cálculos un tiempo de despeje de la falla a tierra de 0,1 segundo para de esta manera asegurar una mayor protección de los equipos.

1.8 DETERMINACION DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR A APLICARSE³

Cada elemento del sistema de tierra incluyendo la malla, se hace conectando a tierra las puntas y electrodos, éstos podrían ser diseñados de tal manera que:

- a) Resistan la fusión y deterioro de las uniones eléctricas bajo las más severas combinaciones de corrientes de falla y duración de la falla a los cuales éstas podrían estar sujetas.
- b) Ser mecánicamente fuertes en alto grado, especialmente en lugares expuestos a daños físicos.
- c) Tener suficiente conductividad de tal manera que

no contribuya a diferencias de potenciales locales peligrosos.

Para calcular el área del conductor a aplicarse usamos la fórmula siguiente:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\log\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{3.3t}}} \quad \text{C.M. (7)}$$

Donde:

I = Corriente máxima de falla en amperios.

A = Área de la sección del conductor en circular mils.

T_m = Temperatura máxima permisible en grados centígrados.

(Para uniones soldadas es de 450 grados centígrados.)

(Para uniones atornilladas 250 grados centígrados.)

(Para puntos fundidos de cobre 1.083 grados centígrados.)

T_a = Temperatura ambiente en grados centígrados.

t = Tiempo durante el cual se aplica la corriente I en segundos.

La siguiente tabla nos muestra los calibres mínimos de los conductores para evitar la fusión; para diferentes corrientes, estos valores se han calculado partiendo de la fórmula anterior y son:

Duración de la falla en segundos (t)	Cable desnudo solamente CM/Amp.	Cable desnudo con uniones soldadas CM/Amp.	Cable desnudo con juntas atornilladas CM/Amp.
30	40	50	65
4	14	20	24
1	7	10	12
0.5	5	6.5	8.5

Antiguamente se consideraba el tiempo de duración de la falla como 30 segundos, pero actualmente puede considerarse como normal un tiempo de 4 segundos, ya que han mejorado los dispositivos de protección y todavía este valor está exagerado para mayor seguridad.

Sin embargo para hacer el cálculo lo más exactamente posible, sería conveniente investigar el tiempo de duración de la corriente de falla.

La tabla anterior nos muestra un factor que determinado por el tiempo de duración de la falla para uniones que pueden ser aplicadas en el diseño de la malla a tierra, el cual multiplicándose por la corriente de falla calculada nos da el área del conductor a ser aplicado en el diseño, así tenemos que:

$$\text{AREA} = \text{FACTOR} \times \text{CORRIENTE} \quad \text{CM.}$$

Considerando el tiempo de duración de la falla de 4 segundos para mayor seguridad para uniones soldadas tenemos que el factor dado por la tabla es 20 y aplicándolo a la corriente de falla de 5.125 amp. tenemos:

$$\text{Area} = (20) \times (5.125) = 102.500 \text{ CM.}$$

El conductor más próximo al área calculada es el cable de cobre desnudo 2/0 A.W.G. que tiene un área de 133.100 CM. y vamos a utilizarlo en los cálculos como el conductor mínimo en el diseño de puesta a tierra.

Para comprobar este valor podemos aplicar la fórmula que se expuso anteriormente.

Si reemplazamos los valores:

$$I = 5.125 \text{ amp.}$$

$$T_m = 450 \text{ grados centígrados.}$$

$$T_a = 30 \text{ grados centígrados.}$$

$$t = 4 \text{ segundos.}$$

En la fórmula (7) tenemos que:

$$A = \frac{5.125}{\sqrt{\frac{\log. \frac{450 - 30}{234 + 30} + 1}{33 \times 4}}} = \frac{5.125}{\sqrt{\frac{\log. 2.0588}{132}}} =$$

$$\text{Log. } 2,0588 = 0,31345$$

$$A = \frac{5.125}{\sqrt{0.00237}} = \frac{5.125}{0.0487} = 105.236 \text{ CM.}$$

$$\underline{A = 105.236 \text{ CM.}}$$

Este valor se aproxima mucho al valor calculado por la tabla que anteriormente se expuso, por lo tanto

Se considera que el valor calculado anteriormente es aceptable.

Un conductor de aluminio teniendo una conductividad equivalente a la del conductor de cobre, tiene también una capacidad de transporte de corriente igual a la del cobre en un tiempo corto.

Esto resulta de que para conductividades equivalentes a la corriente directa, los coeficientes de temperatura, calores específicos y densidades del cobre y del aluminio respectivamente, son tales que causan sus respectivos puntos de fusión en aproximadamente el mismo tiempo.

El tiempo de fusión de la soldadura de cobre es de alguna manera más largo que la del conductor de cobre con la misma capacidad de transporte de la corriente directa; el acero interior del núcleo provee un reservorio de calor para el calor generado en el cobre.

El tamaño del alambre requerido, donde la descarga podría incidir directamente, se considera más grande que para el conductor en que la descarga surge a través de éste. El problema es más de protección mecánica y dureza mecánica.

Los tamaños de los cables de cobre no menos del 2 A. W. G. para la protección contra descargas, se encuentran en las tablas de la American Standard C. S. Así el tamaño del cable debería ser más que adecuado para conducir la corriente de descarga y tener buena dureza mecánica.

La última guía de la AIEE para mallas de tierra, reco

mienda tamaños mínimos de 1/0 y 2/0 de cables, para uniones atornilladas y soldadas respectivamente, además establece que muchas instalaciones han usado tamaños más pequeños como el número 3 A.W.G., obteniendo resultados favorables sin apreciable problema mecánico.

Es propio de cada diseñador establecer el tamaño mínimo del conductor en las condiciones locales, la dureza mecánica se deberá considerar con más énfasis.

Es penoso observar porciones quemadas y circuitos abiertos del sistema de tierra, en instalaciones donde no se ha tenido cuidado al determinar el calibre del conductor que forman la malla de tierra.

Es por ésto que frecuentemente se usan terminales de tierra duplicados en diferentes puntos sobre la malla, especialmente en los puntos importantes como transformadores y neutros de generadores, se debe considerar el tamaño del conductor de tal manera que su conductividad sea suficiente para que no contribuya a la elevación de potenciales peligrosos.

El efecto del diámetro del conductor sobre la resistencia del electrodo a tierra y el formado por el conductor enterrado sobre la gradiente local no han sido mencionados como un factor determinante en el tamaño del conductor.

En algunas instalaciones prefieren usar conductores de malla algo más pequeños que los que se acostumbra considerar, para espacios lo más cercanamente posible. Las ecuaciones del voltaje de malla y de la constante K_m , proporciona evidencia interesante en el (K_m factor de acoplamiento explicado en la sección 19)

apoyo de esta aproximación.

Si los espacios de la malla son cortados por la mitad, un conductor será solamente $\frac{1}{4}$ del valor original, suficiente para mantener el mismo valor de Km y de los potenciales de peligro.

Los costos de instalación y requerimientos mecánicos deberán ser estudiados cuidadosamente para el uso de mallas más pequeñas y alambres también pequeños.

1.9 DETERMINACION DE LA LONGITUD DEL CONDUCTOR ENTERRADO³⁴

Una ecuación puede ser desarrollada para permitir un cálculo aproximado de la longitud de los conductores de malla enterrados necesarios para conservar los voltajes de toque dentro del perímetro de la malla y dentro de los límites de seguridad.

Los voltajes de toque, más que los voltajes de paso o de transferencia, son usados como la base para estos cálculos porque:

- ? Ecuación > Ecuación*
- a) Los voltajes de paso encontrados en instalaciones son generalmente más pequeños que los voltajes de toque; las resistencias de tierra más allá de los 2 pies están en serie más que en paralelo y son efectivas en las corrientes límites que pasan a través del cuerpo humano; también el cuerpo puede tolerar corrientes altas a través de un camino pie a pie.
 - b) Los voltajes de transferencia son afectados con más frecuencia por la corriente de cortocircuito y

generalmente requieren aislamientos o algún otro tratamiento especial, para limitar esta corriente.

Los voltajes de toque de una estructura a tierra con respecto al centro de una malla rectangular son usados más, que los voltajes de toque a una distancia horizontal de un metro al cable de la malla, habiendo la posibilidad que se toque un objeto colocado a una distancia de más de un metro. Este caso especial de voltaje de toque es considerado como un voltaje de malla.

Este voltaje de malla generalmente tendrá un valor mayor que el voltaje de toque a una distancia de un metro del cable de la malla.

Según experiencias hechas por Pierre Laurent tenemos que los voltajes de paso, de toque y de malla son los siguientes:

$$E_{\text{paso}} = 0,1 \text{ a } 0,15 \quad \rho I$$

$$E_{\text{toque}} = 0,6 \text{ a } 0,8 \quad \rho I$$

$$E_{\text{malla}} = \rho I$$

Donde:

- ρ = Resistividad del terreno en ohmios-metros
 I = Corriente de falla, en amperios, por metro de conductor enterrado que fluye sobre la tierra
 E_{paso} = Voltaje de paso sobre una distancia horizontal de un metro, en voltios.

E_{toque} = Voltaje de toque a una distancia horizontal de un metro desde los conductores de la malla, en voltios.

E_{malla} = Diferencia de potencial en voltios, desde la superficie de los conductores de una malla de tierra al centro de la malla.

Laurent advierte que estos valores son solamente aproximados, ésto se debe a que están basados sobre rangos promedios de diámetro de conductores profundos y espaciamiento de conductores de malla, esta aproximación es posible porque las cantidades están dentro del logaritmo de las ecuaciones más exactas y pueden variar sobre un rango amplio sin cambiar grandemente el valor de los voltajes de paso, toque y malla.

Las variaciones en la corriente y resistividad, cambian estos voltajes peligrosos en proporción directa.

En otras palabras podemos definir el voltaje de malla como la máxima tensión que se puede presentar entre el centro de un rectángulo formado por los conductores de la malla de tierra y la malla misma.

La definición de esta tensión nos permitirá cubrir la eventualidad de que un operador esté parado en cualquier parte de la estación, y pueda tocar con algún elemento metálico ciertas estructuras en el momento en que se produce una falla.

Completando la ecuación de Laurent en que establece para los rangos de tamaño de conductor, profundidad de enterramiento y espaciamiento, la tensión de malla está dada por la siguiente ecuación:

$$E_{\text{malla}} = \frac{\rho I}{L} \quad (8)$$

Donde:

L = es la longitud del conductor enterrado.

Para tomar en consideración la conformación real de la malla de tierra proyectada, usamos el factor Km o factor de forma de la malla, que está definida por la siguiente ecuación:

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \ln \frac{D}{16 h d} + \frac{1}{\pi} \ln (3/4) (5/6) (7/8) (9/10) \dots \text{etc.} \quad (9)$$

Donde:

D = es el espaciamiento en metros entre los conductores de la malla.

d = es el diámetro de los conductores que forman la malla.

h = es la profundidad a que está enterrada la malla.

El número de factores encerrados entre paréntesis debe ser igual a (n-2) siendo n el número de conductores paralelos en la rejilla básica, tomados en una sola dirección.

Para tomar en consideración el flujo irregular de corriente hacia el terreno, aplicamos el factor Ki que está definido por la ecuación:

$$K_i = 0,65 + 0,172 n \quad (10)$$

n = Números de conductores paralelos

La aplicación de estos factores a la ecuación del voltaje de malla la convierte en la forma siguiente:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \frac{\rho I}{L} \text{ voltios} \quad (11)$$

De la igualdad de la tensión de malla así definida, con la máxima tensión de toque tolerable definida en el apéndice 3, tenemos que:

$$\frac{K_m K_i \rho I}{L} = \frac{165 + 0,25 \rho_s}{\sqrt{t}}$$

Esta igualdad se ha considerado porque el voltaje de malla deberá ser igual al voltaje de toque tolerable para poder estar dentro de los límites de seguridad.

De aquí podemos despejar L, que es la mínima longitud de conductor a ser enterrado para conservar el voltaje de malla límite en caso de falla.

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{165 + 0,25 \rho_s} \text{ metros.} \quad (12)$$

Donde:

ρ_s = es la resistividad de la superficie del terreno en ohmios-metros.

t = es el tiempo máximo de duración de la falla en segundos.

A más de los conductores horizontales de la malla, la corriente podría entrar a la tierra a través de varillas de tierra, armazones de pozos profundos, pilares metálicos, etc., en donde éstas existan.

Probablemente sería razonable añadir la suma de la

longitud de estos elementos a la de los conductores de la malla aún cuando tal adición se podría considerar rigurosa, ésto daría una aproximación más cercana que si tales elementos de electrodo vertical fueran ignorados.

El valor apropiado para ser usado en K_i varía de 1,2 a 2 dependiendo de la simetría de la malla.

Podría ocurrir casos en donde la longitud del conductor sea demasiado grande para ser factible económicamente, para ésto, se tendrán que realizar nuevos cálculos y obtener una malla menos costosa para ser considerada.

En donde la resistividad del terreno y la corriente de tierra total son más bajas, la longitud del conductor podría ser demasiado pequeña para conectar todos los objetos metálicos a ser aterrizados, en cuyo caso más conductores que el necesitado para controlar el gradiente de potencial serán requeridos.

Los conceptos anteriores solo se aplicarán al patio de llaves, ya que la Casa de Fuerza poseerá en el piso una armadura de acero que bajo cualquier condición, establecerá una superficie equipotencial de un valor igual a la máxima elevación del potencial del sistema de puesta a tierra por lo tanto de los equipos metálicos conectados a él.

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

Para el cálculo de la longitud del conductor a enterrarse en la Central de Pisayambo, primeramente en el plano de la Central asumimos conductores de la malla que pasen sobre o cerca de las estructuras o equipos que se van a terrizar.

Así tenemos que en el Patio de Llaves se asume 14 conductores paralelos en una dirección y 8 conductores paralelos en la otra dirección.

Consideramos para mayor exactitud del cálculo de las constantes K_m y K_i los 14 conductores paralelos en una misma dirección, que en la fórmula es n .

Para este cálculo se considerará también una profundidad promedio donde irá enterrada la malla de 0,5 metros la cual es recomendada por muchos especializados instaladores de sistemas de puesta a tierra.

Procedemos a calcular los factores K_m y K_i con los datos anteriormente encontrados.

Datos:

$$n = 14$$

$$h = 0,5 \text{ mts.}$$

$$d = 0,414 \text{ pulg.} = 0,0105 \text{ mts.}$$

$$D = 6 \text{ mts.}$$

$$I = 5.125 \text{ Amp.}$$

$$\rho = 800 \text{ ohmios-metros.}$$

$$\rho_s = 3.000 \text{ ohmios-metros.}$$

$$t = 0,1 \text{ seg.}$$

$$K_m = \frac{1}{2,8} \ln \frac{6^2}{16 \times 0,5 \times 0,0105} + \frac{1}{11} \ln \left(\frac{3}{4} \right) \left(\frac{5}{6} \right) \left(\frac{7}{8} \right) \left(\frac{9}{10} \right) \left(\frac{11}{12} \right) \left(\frac{13}{14} \right) \left(\frac{15}{16} \right) \left(\frac{17}{18} \right) \left(\frac{19}{20} \right) \left(\frac{21}{22} \right) \left(\frac{23}{24} \right)$$

$$K_m = \frac{1}{2,8} \ln \frac{36}{16 \times 0,5 \times 0,0105} + \frac{1}{11} \ln \frac{3 \times 5 \times 7 \times 9 \times 11 \times 13 \times 15 \times 17 \times 19 \times 21 \times 23 \times 25}{4 \times 6 \times 8 \times 10 \times 12 \times 14 \times 16 \times 18 \times 20 \times 22 \times 24 \times 26}$$

$$K_m = 0,16 \ln 428,5 + 0,318 \ln 0,31 = 0,16(6,059) + 0,318(-1,17128)$$

$$K_m = 0,96948 - 0,37243 = 0,597 \approx 0,6 \quad \underline{K_m = 0,6}$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 n = 0,65 + 0,172 \times 14 = 0,62 + 2,408 = 3,03 \approx 3$$

$$\underline{K_i = 3}$$

$$L = \frac{K_m K_i I \sqrt{C}}{165 + 0,25 f_s} = \frac{0,6 \times 3 \times 800 \times 5125 \times \sqrt{C}}{165 + 0,25 \times 3000} = \frac{0,6 \times 3 \times 800 \times 5125 \times 0,3165}{165 + 750}$$

$$L = \frac{0,6 \times 3 \times 800 \times 5125 \times 0,3165}{915} = 2.553 \text{ mts.}$$

$$\underline{L = 2.553 \text{ mts.}}$$

De los cuales:

L = 1,954 mts. es la longitud en las 2 direcciones.

L = 323 mts. es la longitud de las misceláneas.

L = 276 mts. es la longitud de 92 varillas de cobre.

Con una longitud total de la malla de 2.553 mts.

Con este valor de la longitud del conductor, se vuelve a reemplazarlo en la ecuación 3, para determinar con más exactitud la resistencia de puesta a tierra.

Si el diseño tanteado hubiera resultado en una longitud de conductor demasiado pequeño, hubiera sido necesario revisar el diseño para usar un espaciamento de

malla más pequeño, en cambio si el diseño tanteado hubiera resultado muy grande se podría haber decidido ampliar el desplazamiento por motivos económicos.

En tales casos sería necesario recalcular la constante K_m y revisar las suposiciones para K_i basadas en el nuevo diseño y finalmente recalcular la longitud del conductor requerido sustituyendo los nuevos valores apropiados en la ecuación para calcular la longitud del conductor a enterrarse.

Ahora solo resta chequear una corriente a tierra que está por debajo del valor de fuga de la corriente que pasa a través del cuerpo humano.

Para esto recordamos que el voltaje de malla deberá ser menor o en el peor de los casos igual, al voltaje de toque para estar dentro de los límites de seguridad.

Así tenemos que:

$$\text{Si } K_m K_i \frac{\rho I}{L} < (1.000 + 1,5 \rho_s) \frac{9}{1.000}$$

La corriente a tierra permisible deberá ser:

$$I < \frac{[1 + (1,5) \rho_s / 1.000] 9}{K_m K_i \rho} \times L \text{ Amp.}$$

$$I < \frac{[1 + (1,5) \frac{3000}{1000}] 9}{0,6 \times 3 \times 800} \times 2553 = \frac{[1 + (1,5) 3] 9 \times 2553}{0,6 \times 3 \times 800} =$$

$$I < \frac{[(1 + 4,5) 9] \times 2553}{0,6 \times 3 \times 800} = \frac{5,5 \times 9 \times 2553}{1.440} = \frac{126373,5}{1.440} = 88 \text{ Amp.}$$

$$I < 88 \text{ Amp}$$

Los relés despejando una falla a tierra, deberán ser preparados por consiguiente para una corriente de elevación mínima de menos de 88 amp., o si ésto presenta inconveniente, una longitud de conductor adicional deberá ser enterrado para satisfacer la ecuación anterior para poder disminuir cualquier variación del relé.

En el plano 2 mostramos el diseño preliminar de la malla de tierra de la Central de Pisayambo con los valores calculados en esta sección.

1.10 ESTUDIO DE CORROSION EN EL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Las condiciones del terreno deben ser primero examinadas al diseñar un sistema de puesta a tierra, ya que no todos los suelos presentan la misma resistividad y puede darse el caso de que se requiera un sistema extenso de puesta a tierra cuando hablamos de suelos de alta resistividad.

Otros suelos tienen valores de resistividad bajos, lo que resulta sumamente conveniente para el diseño de puesta a tierra, pero no para la corrosión.

El diseño más común de aterrizaje es usando varillas de cobre o Copperweld por tres razones:

- 1) El cobre es altamente resistente a la corrosión.
- 2) El cobre es un buen conductor de electricidad por su baja resistividad.
- 3) Es fácil enterrar las varillas de cobre y más fá-

cil aún las de Copperweld por su dureza y rigidez.

Otros metales son igualmente aceptables para aterrizaje, pero la corrosión puede afectarlos.

En general como la conexión a tierra debe ofrecer baja impedancia a las corrientes de fallas y de descargas atmosféricas, el metal seleccionado debe tener buena conductividad eléctrica.

En vista del problema corrosivo creado a las estructuras subterráneas por el uso de varillas de puesta a tierra de cobre, se han realizado investigaciones para determinar el efecto de varillas de zinc en conjunto con varillas de cobre en estructuras subterráneas de acero.

Del resultado de estas investigaciones se consideró que no se perderá eficiencia en el aterrizaje si se sustituye las varillas de cobre por varillas de zinc en el sistema de puesta a tierra.

En cambio el uso de varillas de acero merece un mayor estudio y habría que considerar si se puede tolerar el enmohecimiento del metal con la consiguiente pérdida de eficiencia en el aterrizaje.

Esto se comprobó enterrando una varilla de acero por un mes, y su resistencia a tierra ya era algo más alta que la del cobre.

Si se instalan nuevas estructuras de acero donde existen viejas estructuras de cobre, la diferencia de potencial entre los dos metales es suficiente para causar rápidamente la corrosión del acero.

En lugares donde se requieren simples varillas de puesta a tierra se utilizan electrodos de zinc o de magnesio con mejores resultados que el cobre en efecto de corrosión.

No se puede considerar el uso de varillas de zinc o de magnesio como electrodos de puesta a tierra en sistemas grandes porque, el tamaño del conductor que conecta la varilla al sistema es de dimensión muy pequeña, pero se podría utilizar si los fabricantes de estas varillas la proporcionan con el conductor requerido.

Para la Central de Pisayambo se ha considerado los conductores y varillas de la malla de tierra de cobre, por su eficiencia de aterrizaje, por su resistencia a la corrosión y su fácil adquisición en los mercados nacionales y extranjeros.

1.11 DISEÑO DE LOS CONTRAPESOS DE COBRE A LO LARGO DE LA TUBERÍA DE PRESION

Como la tubería de presión estará conectada al sistema de tierra de la Central, se transferirán potenciales a la Cámara de Válvula debido a la elevación del potencial de la malla en caso de falla.

Con el objeto de mantener la tensión de toque a lo largo de toda la tubería dentro de límites tolerables se ha previsto la colocación de un par de contrapesos de cobre a lo largo de todo el recorrido y los cuales finalmente se conectarán a la malla de tierra de la Cámara de Válvula.

En la Fig. 4 se muestra un corte de la tubería de pre-

sión, así como la posición de los contrapesos de cobre y la distribución de potencial en el suelo.

De la figura 5 se puede deducir que la resistividad de la capa superficial del terreno deberá ser menor que 3.300 ohmios-metros, por lo cual, se ha especificado que en zonas donde el terreno tenga su resistividad menor éste deberá cubrirse con una capa de 15 centímetros de piedra picada.

Debido a la impedancia longitudinal del cable, así como a la impedancia transversal, el potencial que alcanzará la malla de tierra de la Cámara de Válvula será menor que el del sistema de tierra de la Central; este hecho someterá al aislamiento de los cables de control y de fuerza, que llegan a la Cámara desde la Central, a un esfuerzo igual a la diferencia de tensión entre la malla de la Cámara y el sistema de tierra de la Central. Sin embargo, se calculó que esta diferencia de potencial no pasará de los 300 voltios, los cuales podrán ser soportados perfectamente por el aislamiento de los cables.

1.12 DISEÑO DE LA MALLA DE TIERRA DE LA CASA DE FUERZA[†]

Para la Central de Pisayambo se construirá la Casa de Fuerza enclavada en la roca, es decir del tipo de Central en Caverna.

Para la Central en Caverna es muy importante tomar en cuenta que en el caso de la red subterránea, se ha supuesto que la malla de puesta a tierra está formada de igual manera en el sentido horizontal como en el sentido transversal, y que toda ella está en terreno

homogéneo, caso que en la práctica no sucede, ya que para estos casos todo el conductor queda embebido en concreto, con lo que aumenta la resistencia de conexión a tierra.

Además, por otro lado, la humedad del terreno es mucho mayor que en la superficie y hay la posibilidad de que este hecho compense al anterior, pero de cualquier manera hay que tener todo esto en consideración para formarse un criterio más amplio del verdadero comportamiento eléctrico de la malla a tierra.

En la Casa de Fuerza se colocará una malla con elementos rectangulares de cable de cobre N° 2/0 A.W.G. Estos son los que se tenderán entre las dos capas de la armadura de acero de las losas del piso, con el objeto de obtener superficies equipotenciales.

Las conexiones a los equipos se harán con platina de cobre expuesta que conectará todas las partes metálicas de los equipos eléctricos, máquinas, tuberías, etc., éstas a su vez estarán conectadas entre sí en cada piso de la Casa de Fuerza y de aquí se conectarán por el túnel hasta la malla del Patio de Llaves que es la malla base.

Para la parte de la Cámara de Válvula donde estará situada la Válvula Mariposa, se clavarán algunos electrodos conectados entre sí y éstos a su vez conectados al contrapeso de cobre que sube por la Tubería de Presión.

Se consideran solo electrodos en la Cámara de Válvula, puesto que en este lugar no existirá peligro, se necesitará personal en esta zona únicamente en caso

de alguna falla en su sistema o por algún mantenimiento, puesto que la válvula se opera automáticamente de la sala de mandos de la Casa de Fuerza.

Los contrapesos de cobre que van por la Tubería de Presión se conectarán a la malla de la Casa de Fuerza para mayor seguridad de la Central y del personal que opera en ella.

Para el caso del túnel y los espacios entre la Casa de Fuerza y el Patio de Llaves se clavarán varillas de cobre conectadas entre sí y a su vez a las partes metálicas que encuentre en el camino para evitar cualquier elevación de la gradiente de potencial en caso de falla.

En los planos 3 y 4 se presenta el diseño de la malla en la Casa de Fuerza, tanto en planta como en corte.

1.13 INVESTIGACION DE LAS TENSIONES DE TRANSFERENCIA¹

1.13.1 Generalidades

Durante una falla, podría haber un serio peligro por causa de los potenciales de transferencia entre la malla y los conductores exteriores, tales como, circuitos de comunicación y de señal, neutros de bajo voltaje, tubos para conductores, tuberías, rieles, cercas metálicas, etc., este peligro es generalmente del tipo de toque o contacto.

El problema en sí, es la elevación de la diferencia de potencial de la malla total de tierra que se eleva

bajo condiciones de falla en función de una porción pequeña representada por conductores externos.

La única posibilidad de tensiones de transferencia en nuestro estudio está dada por la ubicación lejana de la Cámara de Válvula, situación que se controlará como se ha descrito en la sección 1.11.

En el caso de la Central de Pisayambo no existen sistemas de agua, desagüe o de telefonía que permitan transferir tensiones peligrosas al exterior de la Central.

El estudio de las tensiones de transferencia es bastante extenso, por esta razón, no se lo analiza profundamente, puesto que, nos saldríamos del tema propuesto, pero sí, se menciona en forma general la importancia de estas tensiones en los diferentes sitios dentro y fuera de una Central grande.

1.13.2 Circuitos de Comunicación

Se han desarrollado muchos diagramas de circuitos de comunicación en los cuales se involucran instrumentos de protección y aislamiento para salvaguardar el personal y los equipos del terminal de telecomunicación.

Como los neutros de los circuitos de telecomunicación, deben estar también aterrizados, se debe enfatizar la importancia de adecuados aislamientos y protección de contacto accidental de cualquiera de los instrumentos y sus cables, los cuales pueden alcanzar un alto voltaje con respecto al terreno local en caso de falla, pero esto muy rara vez sucede.

1.13.3 Rieles

Las rieles que se encuentran cerca a una estación se conectan intencionalmente, o de cualquier otra manera a la malla de tierra, ésta puede crear teóricamente un peligro en un punto remoto, por la transferencia de la elevación de potencial de la malla durante una falla, aún si se las entierra remotamente el peligro puede ser introducido en la estación. En donde se consideran estos peligros, las rieles pueden ser cambiadas de lugar y aisladas dejándolas fuera del área de la malla de tierra.

1.13.4 Alambres neutros de bajo voltaje

Pueden existir peligros en donde las alimentadoras de baja tensión o circuitos secundarios que sirven a puntos fuera del área de la estación, tienen sus neutros conectados a tierra de la estación.

Cuando el potencial de la malla a tierra de la estación se eleva debido a un flujo de corriente de falla a tierra, todo o una gran parte de esta elevación de potencial puede aparecer en puntos remotos como un voltaje de peligro entre el neutro enterrado y la tierra adyacente.

Para evitar esta dificultad, el neutro de bajo voltaje puede ser aislado de la tierra de la estación; previniendo que no influya en una disminución del tiempo de despeje de la falla de bajo voltaje, principalmente en los puntos donde el peligro se puede incrementar.

Muchas veces el neutro de bajo voltaje se los aisla de la tierra para evitar situaciones peligrosas si se transmiten los potenciales de tierra remota a través de éstos.

Por esta razón el neutro de bajo voltaje, en y cerca de la estación debe ser tratado como un conductor vivo, además de ser aislado del sistema de tierra mediante un aislamiento adecuado para resistir la máxima elevación de potencial de la malla a tierra y debe ser localizado adecuadamente para eliminar el peligro de ser tocado por el personal.

1.13.5 Equipo portátil y herramientas suministradas por la Subestación

Los equipos portátiles de minería, de excavación, manejo de material o herramientas portátiles, que se energizan desde la subestación y generalmente se usan fuera del área de la malla donde puede presentarse peligros de elevación de potencial de la malla con respecto a estas cargas se deben tomar muy en cuenta.

Estos equipos se energizan utilizando postes temporales o cables largos portátiles, se observa generalmente cuando se está construyendo un aumento en una estación existente.

Es probable que un potencial peligroso puede aparecer entre la estructura de una máquina y la tierra próxima durante una falla, cuando el neutro de la máquina está conectado a la tierra de la subestación.

Para evitar ésto, generalmente, se aíslan los circuitos de suministro de energía, los neutros a tierra y las estructuras de las máquinas de la malla de tierra de la subestación en los sitios de trabajo, para estar seguro que la corriente de falla al estar así limitada, no causará gradientes peligrosos.

1.13.6 Tuberías

Las tuberías de agua deben ser siempre unidas al sistema de tierra de la estación, preferiblemente en varios puntos, para evitar peligros dentro del área de la estación, se debe hacer lo mismo en las redes de tubería de gas y otros conductores los cuales están en contacto más o menos directo con el terreno.

En donde estos sistemas son grandes pueden ayudar a la reducción de la resistencia de la malla de tierra de la estación, a tal punto que transportarán corrientes de tierra.

La distancia a la cual una tubería u otro conductor enterrado transfiera un potencial hacia afuera de la estación, varía inversamente proporcional a la raíz cuadrada de su impedancia por unidad de longitud.

En terrenos de baja resistividad, estos potenciales no son transferidos muy lejos, si se lo piensa detenidamente en el límite de la malla, se colocarán secciones de aislamientos del orden de unos 30 pies de longitud para evitar desviaciones por terrenos adyacentes.

1.13.7 Edificios auxiliares

Los edificios auxiliares, incluyendo la casa de empleados, pueden ser tratados como parte de la estación para propósitos de puesta a tierra, o como instalaciones separadas, dependiendo de las circunstancias.

Si están relativamente cerca y unidas a la subestación por tuberías de agua, fundas de cables, líneas de teléfonos, etc., es apropiado tratar tales edificios como parte de la subestación incluyéndolos a ellos dentro de la malla de tierra y aplicando los mismos criterios de seguridad.

Si están más lejos y tales vínculos de conducción son escasos se pueden tratar tales edificios como unidades separadas, con sus propios terrenos de seguridad.

Si están energizados desde la subestación, ellos deben tener su propio transformador de distribución, de un tipo tal que provea adecuado aislamiento contra elevaciones de potenciales de transferencia de la malla de tierra de la subestación.

El neutro de los secundarios pueden, en este caso, ser conectados a la tierra local en los edificios auxiliares solamente.

1.14 ESTUDIOS DE LOS EMPALMES Y ACCESORIOS

1.14.1 Material de los conductores a tierra

El cobre es el metal más comunmente usado para los conductores de malla a tierra, al menos en los EE.UU. y

en nuestro País.

El cobre con acero es comunmente usado para las varillas de tierra y algunas veces para los conductores de tierra.

El cobre, además de su alta conductividad tiene la ventaja de que no se corroe bajo tierra, siendo este catódico con respecto a los otros metales empotrados en la vecindad.

Así puede haber una mayor seguridad que la integridad de la malla enterrada será mantenida por varios años, más aún si los conductores son de tamaño adecuado y que no están sujetos a daños mecánicos.

Sin embargo, una malla de cobre forma celdas galvánicas con tuberías de acero, otros tipos de conductores, cables de plomo, etc., enterrados con los cuales éste es conectado y por consiguiente originará la corrosión de este último.

En algunas instalaciones se ha tratado de construir la malla de tierra, tiñendo el cobre enterrado para reducir el potencial de la celda galvánica, esto reduce el potencial con respecto al zinc y el acero aproximadamente 50% y elimina el potencial con respecto al plomo, estaño, siendo ligeramente perjudicial.

Otros métodos para eliminar corrosión bajo tierra incluye aislamiento de la superficie de metales ramificados con cintas plásticas, compuesto asfáltico, ó ambos; dirigiendo los electrodos metálicos enterrados de tal manera que los conductores de cobre cruzarán tuberías, conductores etc., hechas de otros metales,

lo más cerca posible en ángulo recto y luego aplicando aislamiento a un metal ó al otro en donde ellos están más cerca. El uso de tuberías no metálicas, conductores; y protección catódica eliminan la corrosión.

Muchos utilizan el acero como material de tierra, ésto elimina el efecto adverso de la malla sobre los otros conductores enterrados el cual es mencionado anteriormente.

En un diseño sin embargo la protección de la malla por sí misma requiere atención.

Esto es generalmente acompañado de alguna forma a través de protección catódica, frecuentemente en combinación con galvanización del acero ó el uso del acero resistente a la corrosión.

En forma menos frecuente, el aluminio ha sido usado como material para mallas a tierra.

En tales casos la relativa alta pureza del grado de conductor eléctrico es más satisfactorio que para otras aleaciones.

El uso del aluminio como el del acero evita la contribución a la corrosión de tuberías bajo tierra, etc.

Sin embargo el aluminio por sí mismo se podría correr en ciertos tipos de terreno.

La corrosión del aluminio producido por la corriente alterna podrá ser también un problema bajo algunas condiciones.

De aquí el aluminio podría ser usado después de una completa investigación de algunas circunstancias.

La materia de la corrosión bajo tierra y la protección catódica es compleja.

1.14.2 Características, elección y cálculo de la varilla de tierra

Cuando una toma de tierra de resistencia R se ve atravesada por una corriente de valor I , el conductor de llegada adquiere una diferencia de potencial $V=IR$, con relación a los puntos del suelo, donde la densidad de corriente es despreciable.

Esta diferencia de potencial recibe el nombre de tensión de contacto o toque.

En electrodos verticales la resistencia de la toma de tierra viene dada por la fórmula:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \log \frac{3L}{d} \quad (13)$$

Donde:

R = es la resistencia de la toma de tierra.

ρ = es la resistividad del terreno.

L = es la longitud del electrodo de tierra.

d = es el diámetro del electrodo de tierra.

Y como en la práctica, el factor $\frac{1}{2\pi} \log \frac{3L}{d}$ se aproxima a la unidad, la fórmula se reduce a:

$$\rho = R.L$$

Por lo tanto, la tensión que adquiere la varilla viene dada por:

$$V = IR = \rho \frac{I}{L}$$

Los factores que deben conocerse para la elección e instalación racional de las varillas de tierra son los siguientes:

- Longitud de la varilla
- Resistencia mecánica
- Indestructibilidad (Resistencia a la corrosión)

Es interesante mencionar que el diámetro de la varilla entra en la fórmula en un rango logarítmico, de donde se deduce que la influencia de este valor sobre la resistencia, es tan pequeña que de hecho se predetermina el diámetro por consideraciones de orden puramente mecánico.

La figura N° 6, nos muestra la pequeña variación de resistencia debido al diámetro.

La resistencia a la corrosión es de una característica fundamental para que la varilla de tierra garantice una eficaz protección, pues de nada sirve obtener una pequeña resistencia de tierra en el momento de realizar la instalación, si el valor de dicha resis-

tencia no se mantiene sin variaciones importantes por un tiempo ilimitado.

Para conseguir esta característica, es preciso que las varillas estén constituidas o recubiertas por un material en que los efectos de la corrosión sean inapreciables.

La figura Nº 7, representa los efectos de la corrosión sobre el hierro, zinc y cobre.

Las varillas de tierra galvanizadas por inmersión, presentan el problema de la corrosión, ya que en la galvanización es difícil obtener una capa de zinc de más de 1,5 ó 2 décimas de milímetro, por lo cual esta capa de zinc desaparece al cabo de 6 ú 8 años y por otra parte antes de que esta capa llegue, ha desaparecido el óxido de zinc formado, reduciendo considerablemente la conductividad de la varilla, aumentando por consiguiente la resistencia a tierra.

En consecuencia las varillas de tierra que presentan las mejores características son las de acero con recubrimiento de cobre, ya que este material es prácticamente inatacable.

Hay que considerar el espesor del cobre en las varillas acero-cobre, ya que, si el cobre es dado por un simple baño electrolítico, el espesor es solamente de unas micras y al hincar, los rozamientos del terreno son suficientes para eliminar la capa dada.

Al elegir una varilla de tierra de acero-cobre, es preciso tener en cuenta que es de extraordinaria importancia que ambos metales estén aleados molecular-

mente, ya que de otro modo, al hincar la varilla ocurre con frecuencia que la camisa de cobre se desliza sobre el alma de acero debido al rozamiento con el terreno.

La longitud de la varilla es la que nos da los valores de la resistencia eléctrica de la puesta a tierra, y ha de ser tal que llegue a una profundidad en la que se encuentre un terreno de gran conductividad.

Cuanto más profundo se hincó la varilla menor es la resistencia de puesta a tierra.

La figura N° 8, indica una disminución típica de la resistencia de puesta a tierra al aumentar la profundidad del enterramiento suponiendo un terreno de conductividad constante.

Realmente al lograr mayores profundidades de hincado se encuentran terrenos más húmedos aumentando por consiguiente la conductividad, pudiéndose conseguir mayores reducciones de la resistencia de puesta a tierra que las de la figura N° 8.

Cuando sea necesario enterrar los conductores a profundidades mayores a los 3 metros es aconsejable utilizar varillas alargables que se pueden manejar más convenientemente y con gran facilidad.

Varillas alargables acero-cobre han sido enterradas a 20 metros sin que hayan sufrido ni daños ni deformaciones de roscas o de uniones en las secciones.

Las roscas de las extremidades llevan un baño de cobre electrolítico que cubre totalmente las varillas.

Estas varillas la suministran en atados de 5 piezas convenientemente protegidas y con una "sufridera" para el hincado. Las varillas roscables se suministran también en atados de 5 piezas y llevan un tornillo sufridero por atado.

El dato más importante que se debe conocer, es la resistencia eléctrica del terreno donde habrá de instalarse la varilla de tierra.

La resistividad del terreno es de suma importancia ya que de ella depende el número de varillas a emplearse.

En terrenos de resistividad muy elevada, es posible mejorarla mediante diversos compuestos químicos, tales como sal común o sulfato de magnesio, aún ha de procurarse que el compuesto que se utilice no esté directamente en contacto con las varillas de tierra.

En la figura N° 9 se ilustra el empleo de estos compuestos.

Cuando el subsuelo no puede ser penetrado o presenta una resistividad superior a la superficie, se puede disminuir la resistencia clavando dos o más varillas en paralelo.

La resistencia total de varios electrodos conectados en paralelo es mayor que la que resultaría de la aplicación de las leyes de Kirchoff.

En la figura N° 10, se ha presentado el coeficiente de aumento de resistencia, dado por la fórmula:

$$K = n \frac{R}{R_t} \quad \text{en función de } D/L \quad (14)$$

Siendo:

n = el número de varillas en paralelo.

R = la resistencia del grupo de varillas.

R_1 = La resistencia individual de cada varilla.

D = la distancia entre cada dos varillas.

L = la longitud de cada varilla.

Cuando se empleen varillas de tierra en paralelo, se conectará como se representa en la figura N° 11, y sus campos de acción no deben interferirse, por lo cual es preciso mantener una cierta distancia entre ellos.

La experiencia ha demostrado que el intervalo obtenido entre electrodos conectados en paralelo es de una vez y media la longitud de los mismos.

En este caso los resultados obtenidos son los siguientes:

- 2 varillas de tierra reducen la resistencia al 60% de la obtenida con una sola.
- 3 varillas de tierra reducen la resistencia al 45% de la obtenida con una sola.
- 4 varillas de tierra reducen la resistencia al 33% de la obtenida con una sola.

En la práctica casi siempre, la resistencia ofrecida por dos varillas separadas una vez y media su longitud y conectadas en paralelos por conductores enterrados, es de la mitad de una sola, tres varillas un tercio, etc., puesto que el conductor enterrado actúa como electrodo suplementario.

Dada la importancia que presenta la permanencia del valor de la resistencia de puesta a tierra dentro de unos límites, es importante que la instalación sea fácilmente revisable, lo cual se consigue instalando las varillas en arquetas de hormigón tal como se presenta en la figura N° 12.

Como procedimientos prácticos de hincado se recomienda los siguientes:

- Utilizar martillos neumáticos o electrodos, que proporcionan un elevado número de golpes ligeros por minuto.
- Golpeando con la masa deslizante de arriba a abajo, terminando el hincado con la masa.

Empleando una masa pesada en terreno duro, la varilla corre el peligro de curvarse. Para evitarlo es aconsejable el empleo de unas masas de peso inferior de 2 Kg. dando el mayor número de golpes suaves posibles.

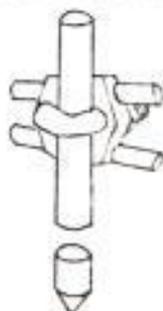
Es de suma importancia un buen contacto entre las masas metálicas y los conductores y entre éstos y los electrodos mediante: tornillos, grapas, remaches, etc.

A continuación se puede apreciar el detalle de estas conexiones.

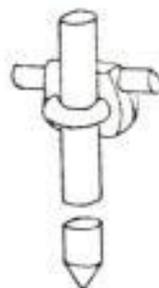
GRAPA TERMINAL



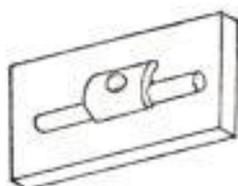
GRAPA DOBLE DE PASO



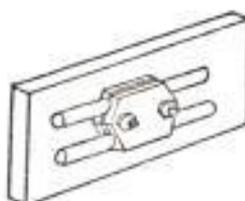
GRAPA DE PASO



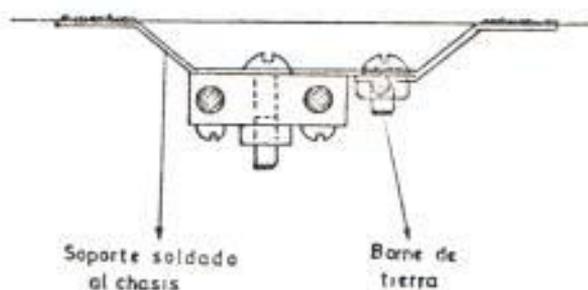
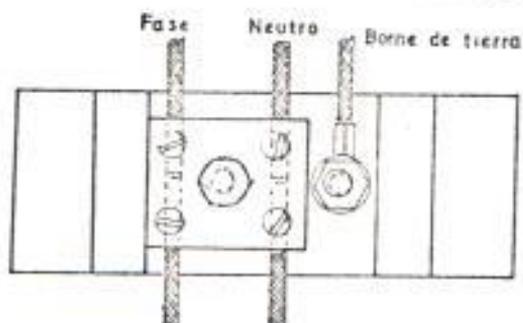
GRAPA DE MASA



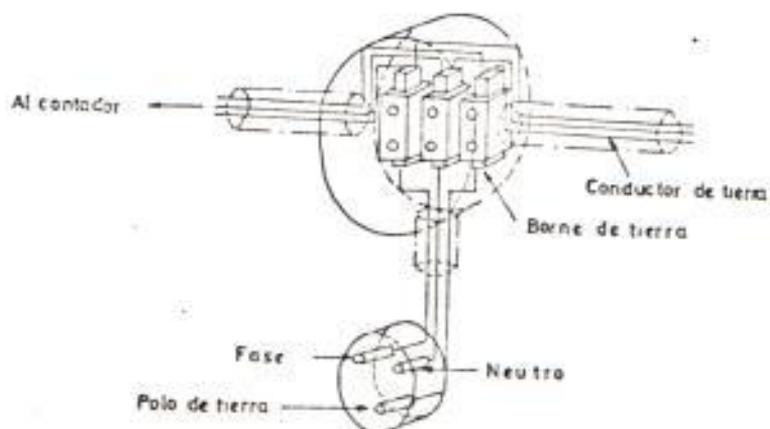
GRAPA DOBLE DE MASA



BORNES DE CONEXION



CAJA DERIVACION



En las figuras del 13 al 20 se muestran típicas conexiones de tierra en subestaciones.

2. VERIFICACION DEL COMPORTAMIENTO DEL DISEÑO DE TIERRA

2.1 CALCULO DE LA RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA SEGUN MODIFICACIONES HECHAS AL DISEÑO PRELIMINAR

Según lo estudiado anteriormente se ha calculado una resistencia de puesta a tierra aproximada dada por la resistividad que se asumió, pero como es necesario para un diseño de puesta a tierra hacer pruebas en el terreno donde se construirá la malla de tierra, se efectuó esta medición.

Después de revisar el área del Patio de Llaves, se lograron tomar algunas mediciones de la resistividad del terreno de la Central de Pisayambo, usando un "resistívimetro", medición efectuada por Ingenieros de Inecel.

Los valores leídos por este aparato fueron los siguientes:

Lectura Nº	Profundidad de la varilla (L) de 3/8" ϕ , en cm.	Resistencia ohmios
1	60	100
2	50	279
3	57	1100
4	67,4	505

Luego de obtener estos valores se procedió a calcular la resistividad del terreno, para ésto, aplicamos la fórmula para calcular la resistencia a tierra, incluyendo el efecto de las imágenes para una sola varilla, tenemos que:

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \frac{4L}{a} - 1 \right) \Omega \quad (15)$$

Donde:

ρ = es la resistividad del terreno.

L = es la longitud de la varilla.

a = es el radio de la varilla = 0,794 cm.

De aquí la resistividad del terreno será igual a :

$$\rho = \frac{R \cdot 2\pi L}{\ln \frac{4L}{a} - 1} \text{ en } \Omega - m$$

Para la primera lectura:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{100 \times 2 \times 3,14 \times 60}{\ln \frac{4 \times 60}{0,794} - 1} = \frac{37699,112}{\ln 302 - 1} = \frac{37699,112}{5,71 - 1} \\ &= \frac{37699,112}{4,71} = 8003 \Omega - cm. \end{aligned}$$

Donde: $\rho = 8003 \Omega - cm. = 80,03 \Omega - m$

$$\underline{\rho = 80 \Omega - m}$$

Para la segunda lectura:

$$\begin{aligned} \rho &= \frac{279 \times 2 \times 3,14 \times 50}{\ln \frac{4 \times 50}{0,794} - 1} = \frac{87650,435}{\ln 251,8 - 1} = \frac{87650,435}{5,52545 - 1} \\ &= \frac{87650,435}{4,52545} = 19.368,3 \Omega - cm = 193,68 \Omega - m \end{aligned}$$

$$\underline{\rho = 193,7 \Omega - m}$$

Para la tercera lectura:

$$\rho = \frac{1100 \times 2 \times 3,14 \times 57}{\ln \frac{4 \times 57}{0,794} - 1} = \frac{393955,72}{\ln 287,15 - 1} = \frac{393955,72}{5,65948 - 1}$$

$$= \frac{393955,72}{4,65948} = 84549,28 \text{ } \Omega\text{-cm} = 845,5 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$\underline{\rho = 845,5 \text{ } \Omega\text{-m}}$$

Para la cuarta lectura:

$$\rho = \frac{505 \times 2 \times 3,14 \times 67,4}{\ln \frac{4 \times 67,4}{0,794} - 1} = \frac{213860,77}{\ln 339 - 1} = \frac{213860,77}{5,826 - 1}$$

$$= \frac{213860,77}{4,826} = 44314,3 \text{ } \Omega\text{-cm} = 443,1 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$\underline{\rho = 443,1 \text{ } \Omega\text{-m}}$$

De estos valores el promedio de la resistividad del terreno y el que vamos a usar en los cálculos es el siguiente:

$$\rho = \frac{80 + 193,7 + 845,5 + 443,1}{4} = \frac{1562,3}{4} = 390,5 = 390$$

$$\underline{\rho = 390 \text{ } \Omega\text{-m}}$$

El valor de 390 ohmios-metros, es la resistividad del terreno en la superficie.

Además de estas mediciones se realizaron otras mediciones en la Central de Pisayambo a mayores profundidades, a 2 y 6 metros, resultando una resistividad del terreno igual a 100 ohmios-metros.

Con los valores de la resistividad superficial del terreno calculado mediante pruebas hechas en la Central de Pisayambo y con los datos considerados anteriormente y cambiando el valor de la resistividad superficial así como la de la resistividad del terreno, tenemos que la longitud del conductor a enterrarse resultará:

Datos:

$$n = 14$$

$$h = 0,5 \text{ mts.}$$

$$d = 0,0105 \text{ mts.}$$

$$D = 6 \text{ mts.}$$

$$I = 5.125 \text{ amp.}$$

$$\rho = 100 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$\rho_s = 390 \text{ } \Omega\text{-m}$$

$$t = 0,1 \text{ seg.}$$

$$K_m = 0,6$$

$$K_i = 3$$

$$L = \frac{K_m K_i \rho I \sqrt{t}}{165 + 0,25 \rho_s} \quad (12)$$

$$L = \frac{0,6 \times 3 \times 100 \times 5125 \times \sqrt{0,1}}{165 + 0,25 \times 390}$$

$$L = \frac{291971,25}{262,5} = 1.112 \text{ mts.}$$

$$\underline{L = 1.112 \text{ mts.}}$$

La longitud del conductor de malla es:

L en las 2 direcciones	840 mts.
L miscelaneas	62 mts.
L de 70 varillas de cobre	<u>210 mts.</u>
	1.112 mts.

Ahora debemos comprobar la corriente a tierra sostenida que está por debajo del valor de fuga de la corriente que pasa a través del cuerpo humano, así tenemos:

$$Km Ki \varphi \frac{I}{L} < (1000 + 1.5 \%) \frac{9}{1000}$$

$$I < \frac{[1 + (1.5) \frac{9}{1000}] 9}{Km Ki \varphi} \times L \text{ amp.}$$

$$I < \frac{[1 + (1.5) \frac{390}{100}] 9}{0,6 \times 3 \times 100} \times 1112 = \frac{1,585 \times 9 \times 1112}{180}$$

$$= 88 \text{ amp.}$$

$$\underline{I < 88 \text{ amp.}}$$

De esta forma se confirma el resultado calculado en la sección 1.9 para la corriente mínima que está por debajo del valor de la corriente que pasa por el cuerpo humano, sin hacer daño.

Por consiguiente los relés de despeje de las fallas a tierra en la Central de Pisayambo deben ser preparados para una corriente mínima de 88 amperios.

Para calcular la resistencia de puesta a tierra de la Central de Pisayambo según modificaciones de la resis-

tividad del terreno en el Patio de Llaves y con la nueva longitud del conductor calculado tenemos que usando la fórmula (3) de la sección 1.5.1 resultará:

Patio de Llaves

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

$$R = \frac{100}{4 (39.1)} + \frac{100}{1.112} = 0,64 + 0,09 = 0,73 \Omega$$

$$\underline{R_1 = 0,73 \Omega}$$

Casa de Fuerza

$$R = \frac{10.000}{4 (14.3)} + \frac{10.000}{1.112} = 174,82 + 9 = 183,82 \Omega$$

$$\underline{R_2 = 183,82 \Omega}$$

Tubería de Presión

$$R = \frac{10.000}{4 (26.45)} + \frac{10.000}{1.112} = 94,52 + 9 = 103,52 \Omega$$

$$\underline{R_3 = 103,52 \Omega}$$

Casa de Fuerza y Patio de Llaves

$$R = \frac{3.000}{4 (34.8)} + \frac{3.000}{1.112} = 21,55 + 2,7 = 23,7 \Omega$$

$$\underline{R_4 = 23,7 \Omega}$$

De donde:

$$R = \frac{R_1 R_2 R_3 R_4}{R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_3 + R_1 R_3 R_4 + R_1 R_2 R_4}$$

$$\underline{R = 0.7 \Omega}$$

2.2 CALCULO DE LA ELEVACION DE POTENCIAL DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

Habiendo calculado la resistencia total de la malla a tierra, la elevación máxima del potencial sobre tierra será:

$$E_m = I \times R_m \quad \text{voltios} \quad (16)$$

Donde:

I = es la corriente máxima de corto-circuito que fluirá en el terreno.

R = es la resistencia total de la malla a tierra.

$$E_m = 5.125 \times 0.7 = 3.587,5 \quad \text{voltios}$$

Para valores muy bajos de resistencias y corrientes de corto-circuito, este voltaje podría ser menor que el valor determinado en la ecuación:

$$E_{\text{toque}} = \frac{165 + 0,25 \rho_c}{\sqrt{t}} \quad \text{voltios} \quad (17)$$

Y de aquí considerarse fuera de peligro.

Si ésto sucede las investigaciones podrían terminar en este momento, sujeto a la verificación del valor de la resistencia de la malla a tierra después de la construcción.

2.3 TENSIONES DE PASO Y DE TOQUE DENTRO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA DE LA CENTRAL

La mejor forma de comprobar que una Estación es segura, sería efectuando pruebas reales en el terreno, para los voltajes de paso y de toque, con una carga de corriente fuerte sobre la malla de tierra.

Pero debido a lo costoso del método muchas compañías constructoras no están al alcance de efectuar este tipo de experiencias prácticas, sin embargo existen grandes discrepancias entre las resistencias calculadas y las medidas en el terreno, conocidas al efectuar las pruebas de resistividad, muchas de éstas dejan dudas en los cálculos de los potenciales de paso y de toque, por esta razón se deberían considerar las pruebas en el terreno y hacerlas con el mayor cuidado posible.

Esto se debería considerar especialmente donde los valores calculados son cercanos a los límites tolerables, el mejoramiento del terreno provee un factor de seguridad mayor, aunque el considerarlo sería muy difícil y costoso.

En tales circunstancias sería valioso cargar la malla a tierra con una corriente de prueba del orden de los 100 amperios y tomar las mediciones de las gradientes

de potenciales en la localización de la Central y en la periferia de la misma.

Para obtener los potenciales reales que pueden existir en la Central bajo condiciones de falla reales, estas pruebas deberán multiplicar por la razón de la corriente de falla a tierra a la corriente de prueba considerada.

Debido a que los potenciales de interés son los existentes en la superficie de la tierra, el potencial de prueba usado será para un contacto de alguna persona en la superficie.

Por los altos valores de resistencias de contacto, se necesitan usar instrumentos diseñados para medir resistencias a tierra, debido a que éstos operan sobre un rango de resistencia límite con el potencial de prueba.

Por lo general se usa el método Amperímetro-Voltímetro, con un voltímetro de alta impedancia y una corriente de prueba alta para vencer los efectos de las corrientes residuales a tierra.

Los técnicos Langer y Bodies han descrito las técnicas de mediciones para los voltajes de contacto con resistencias del cuerpo humano simuladas.

Una persona con guantes de caucho y botas de suela de caucho en una Central hace contacto con la superficie de la malla metálica cuando existe una falla a tierra.

El voltaje entre las superficies de contacto son medidas por un voltímetro de tubo de vacío con una re-

sistencia igual o un valor muy próximo a la resistencia del cuerpo humano y la corriente es medida por un miliamperímetro.

De esta manera se puede determinar la relación entre corriente de choque y una corriente total de falla a tierra.

En este experimento se consideran la resistencia de contacto de pie a tierra como parte de este procedimiento y la conductividad de la superficie.

Por esta razón para obtener un factor de seguridad adicional, se debería cubrir la superficie del terreno con roca molida, una prueba con este adicional se consideran también en este método.

2.4 CALCULOS DE LAS TENSIONES DE PASO EN EL EXTERIOR DEL SISTEMA DE TIERRA³

Dentro de la malla, los voltajes de paso y toque pueden ser disminuídos a cualquier valor deseado reduciendo el intervalo de los conductores de la malla.

Ellos pueden ser hechos cero en el caso de límites teóricos de un plato sólido.

La situación es diferente en la zona inmediatamente fuera de la periferia de la malla, donde el problema podría existir aún para un plato sólido teórico.

Este problema podría ser serio en pequeñas estaciones en donde la malla puede cubrir solamente un área limitada. Afortunadamente, una estación puede ser diseñada para eliminar la posibilidad de contacto y de to-

que más allá de la periferia del sistema de la malla de tierra aunque las limitaciones de los potenciales de paso son menos exactos.

Previamente, Laurent ha sugerido que el potencial de paso tenga generalmente un valor de 0,10 a 0,15 φ_i , para tamaño de conductores normales, espaciamiento y profundidades de enterramiento.

Un coeficiente de 0,2 fué sugerido en 1.958 en un reporte de la revista AIEE.

Sin embargo, estudios subsecuentes de varios diseños y datos de prueba han demostrado que en muchos casos el coeficiente puede ser considerablemente más alto que éste.

Por consiguiente, en el cálculo de los potenciales de malla, toman en consideración la profundidad de enterramiento real y el espaciamiento.

Se selecciona un factor K_i de irregularidad estimado sobre la base de una geometría general de la malla.

La ecuación más exacta para voltajes de paso sería:

$$E_{\text{paso}} = K_s K_i \varphi \frac{I}{L} \quad (18)$$

Donde:

K_s = es un coeficiente el cual toma en cuenta los efectos del número de conductores n , el espaciamiento entre conductores D y la profundidad de enterramiento h de los conductores de la malla.

Donde:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} \dots \text{etc.} \right] \quad (19)$$

El número total de términos dentro del paréntesis será igual al número de conductores paralelos en la malla básica, excluyendo las conexiones transversales.

K_i , φ I y L son previamente definidas por la ecuación:

$$E_{\text{malla}} = K_m K_i \varphi \frac{I}{L} \quad (11)$$

Un valor de 1,2 a 1,3 para K_i es propuesto por Nieman.

Este posiblemente será suficiente para cubrir las esquinas de la mayoría de las mallas.

Valores más conservadores pueden ser asumidos especialmente si hay proyecciones angostas pero largas en la periferia de la malla. La densidad de corriente a tierra y la gradiente de la superficie por supuesto tenderán a ser más altas en las esquinas proyectadas de la periferia de la malla y más abajo que el promedio a las esquinas de reentrada. (La consideración analógica de un electrodo capacitor en un dieléctrico homogéneo podrá hacer esto más claro).

De acuerdo a Laurent, la gradiente externa más cerca a la esquina de una malla cuadrada puede ser, cerca de 2 veces tan grande, que en la mitad de un lado.

Si la red tiene una malla más pequeña esta proporción disminuye aproximadamente 1,5 como el número de las mallas disminuye.

Mientras que Kock haciendo mediciones dentro de la malla de la periferia (ver Fig. N° 21), derivada de sus pruebas da una indicación del grado de irregularidad en mallas grandes y pequeñas.

Un aumento de K_i se podría hacer en donde se cubran apropiadamente las anomalías en la resistividad del terreno, porque los potenciales de paso son menos peli-grosos que los otros tipos de potenciales.

Como Laurent señaló que si los potenciales internos son conservados dentro de los límites tolerables y si la resistividad de la superficie es comparable dentro y fuera de la cerca del patio de la central, los po-tenciales de paso en la periferia son rara vez un problema, especialmente en donde los potenciales de paso más altos son generalmente permisibles.

Sin embargo, la seguridad del terreno es obtenida so-lamente con la asistencia de una capa de material de resistividad alta, tales como roca molida, los cuales no riegan fuera de la estación, luego los potenciales de paso podrían también ser un problema especialmente cerca de las esquinas y las proyecciones.

Para el análisis de los voltajes de paso en las zonas periféricas del sistema de tierra, sobre todo si se trata de terrenos de baja resistividad, merece un es-tudio especial.

La solución para la parte más ancha de la malla dará valores más conservadores.

El punto en que la gradiente de superficie de la periferia máximo en donde $x=h$ es cuando $D \gg h$ y da como resultado que:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{2D} + \frac{1}{3D} \dots \text{etc.} \right] \quad (19)$$

Como hemos visto en la sección 1.9 el valor para el número de conductores en la parte más ancha de la malla a tierra de la Central de Pisayambo es 8.

Por lo tanto:

$$n = 8$$

$$h = 0,5 \text{ mts.}$$

$$D = 12 \text{ mts.}$$

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2(0.5)} + \frac{1}{12+0.5} + \frac{1}{(2)12} + \frac{1}{(3)12} + \frac{1}{(4)12} + \right. \\ \left. + \frac{1}{(5)12} + \frac{1}{(6)12} + \frac{1}{(7)12} \right]$$

$$K_s = \frac{1}{3,14} \left[\frac{1}{1} + \frac{1}{12,5} + \frac{1}{24} + \frac{1}{36} + \frac{1}{48} + \frac{1}{60} + \right. \\ \left. + \frac{1}{72} + \frac{1}{84} \right] = 0,32 \left[1 + 0,08 + 0,042 + 0,028 \right. \\ \left. + 0,02 + 0,017 + 0,014 + 0,012 \right]$$

$$K_s = 0,32 \times 1,213 = 0,388 = 0,39$$

$$\underline{K_s = 0,39}$$

$$K_i = 0,65 + 0,172 n = 0,65 + 0,172 \times 8 = 0,65 + \\ + 1,376 = 2,02$$

$$\underline{K_i = 2}$$

Para $K_i = 2$

Tenemos que por la ecuación (18)

$$E_{\text{max paso}} = \frac{0,39 \times 2 \times 100 \times 5125}{1.112} = 359,5 \text{ voltios}$$

$$E_{\text{max paso}} = 359,5 \text{ voltios}$$

El voltaje de paso tolerable por la ecuación:

$$E_{\text{paso}} = \frac{165 + \rho_s}{\sqrt{t}} \quad (20)$$

Para la tierra natural es: $\rho = 100 \Omega\text{-m}$

$$E_{\text{paso}} = \frac{165 + 100}{\sqrt{0,1}} = \frac{265}{0,316} = 838,6 \text{ voltios}$$

$$\underline{E_{\text{paso}} = 838,6 \text{ voltios}}$$

El voltaje calculado anteriormente está dentro de los límites tolerados por el cuerpo humano.

Para la tierra en la superficie es: $\rho = 390 \Omega\text{-m}$

$$E_{\text{paso}} = \frac{165 + 390}{0,1} = \frac{555}{0,316} = 1.756 \text{ voltios}$$

$$\underline{E_{\text{paso}} = 1.756 \text{ V.}}$$

El valor calculado anteriormente cae también dentro de los límites tolerables en la superficie del terreno.

De tal manera que la tensión máxima de paso posible pa ra ser tolerada por el cuerpo humano es segura. Para mayor seguridad se entiende roca molida más allá del perímetro al punto donde el voltaje de paso será el va lor permitido para tierra natural.

3. COORDINACION DEL AISLAMIENTO EN LA CENTRAL HIDROELECTRICA DE PISAYAMBO^o

La elección del nivel de aislamiento de la maquinaria y de los equipos de un sistema resulta estrictamente ligada a la elección y a las características de los eventuales dispositivos de protección y de las condiciones ambientales de la región donde el sistema está situado.

El proceso de dimensionamiento y de coordinación del aislamiento se inicia generalmente con el exámen de las sobretensiones sea de origen externo que interno que pueden presentarse en la red en objeto.

Las sobretensiones de origen externo serán aquí diferenciadas como "Sobretensiones atmosféricas directas" (debidas a descargas que golpean directamente en las partes en tensión) y "Sobretensiones atmosféricas indirectas" (debido a descargas que golpean la tierra o partes como los cables de guardia).

Las sobretensiones de origen interno serán subdivididas en "Sobretensiones dinámicas" (Sobretensiones con frecuencia industrial con duración de varios períodos de 60 ciclos) y "Sobretensiones de maniobra" (sobretensiones con picos a frecuencias elevadas que se extinguen rápidamente).

Con respecto a las condiciones ambientales del sistema Pisayambo es necesario notar que para los aislamientos externos la resistencia resulta notablemente reducida con respecto a la que se tiene al nivel del mar

debido a causa de la reducción de las densidades del aire y a la altura.

En particular se recuerda que a 25° C. a 3.000 y 3.500 metros de cota, la densidad relativa del aire resulta respectivamente igual a 0,7 y 0,65, siendo la densidad standard del aire a 25° C. y la presión de 760 mm. de mercurio.

Para las distancias relativas a la línea de 138 KV la reducción de las tensiones de resistencia resulta a 3.000 y 3.500 metros.

Del 27% aproximadamente para la frecuencia industrial.

Del 30% aproximadamente para las tensiones impulsivas y de maniobra.

Para las distancias relativas a los niveles de tensión inferiores (69 - 46 - 23 - 13,8 KV) para todos los tipos de sollicitación la reducción resulta del 30%.

En la elección y en la coordinación del aislamiento para los aislamientos externos se ha considerado para todos los niveles de tensión provistos en el Sistema Písayambo una resistencia de los aislamientos externos igual al 70% de aquella al nivel del mar para 3.000 mts. de cota.

Dichos valores resultan conservadores con respecto a coeficientes 0,8 y 0,75 previstos por las normas I E C y ASA para 3.000 y 3.500 mts. de altura.

Siempre por lo que respecta a las condiciones ambientales, se debe notar que en la zona donde el sistema está situado no existe inquinamiento atmosférico, no han

sido necesarios por lo tanto estudios y medidas especiales para evitar defectos de aislamiento debidos a contaminación.

Por lo que respecta a los dispositivos de protección contra las sobretensiones se ha debido adoptar descargadores con resistencia no lineal aún en aquellos casos en que se podrían talvez haber considerado los espinterómetros, se recuerda que diferentemente de lo que ocurre con un descargador la eventual intervención de un espinterómetro es equivalente a una avería y provoca la consecuente abertura de los interruptores; esto especialmente para una mayor seguridad de funcionamiento, considerando la importancia del Sistema de Pisayambo.

En el caso de los espinterómetros en efecto, posibles errores en fase de manuntención y calibrado podrían llevar a la no protección de los equipos y a intervenciones inoportunas y consecuentes averías; causas exteriores. La tensión de descarga de los espinterómetros resulta además notablemente más sensible que aquella de los descargadores el tipo de solicitud (impulsiva ó de maniobra) y a la variación de presión, temperatura y humedad; no existen por otra parte datos suficientes relativos al comportamiento de espinterómetros a alta cota.

Sería necesario por lo tanto estudios especiales y pruebas aptas a suministrar datos para obtener un eficiente grado de protección ofrecido por los espinterómetros, compatiblemente con un número reducido de intervenciones inoportunas. Dichos estudios y pruebas estarían sin embargo injustificados dado que debido a

lo mencionado los espinterómetros no asegurarían una adecuada seguridad de operación.

Por lo que respecta al nivel de aislamiento de un material eléctrico, éste sería designado mediante las tensiones de resistencias a frecuencia industrial y a impulso.

No se ha considerado necesario especificar una resistencia a sobretensiones de maniobra, dado que para sistemas con tensión de 138 KV ó inferior las sobretensiones de maniobra mismas no comportan problemas especiales.

El nivel de protección a impulso de un descargador será designado por el valor más alto entre el máximo de la tensión de cebado ó impulso y la misma tensión residual por onda de corriente e impulso.

El nivel de protección a sobretensiones de maniobra será designado por el valor máximo de la tensión de cebado.

Por frecuencia industrial se considera indiferentemente 50 ó 60 Hz., no existiendo en práctica diferencias apreciables en las tensiones de resistencia y de cebedo en un amplio campo de frecuencia alrededor de estos dos valores.

Por impulso se entiende aquel de forma 1,2/50 μ s estandarizado por la IEC con las relativas tolerancias de manera de incluir sea la forma de onda europea de 1,50 μ s, sea aquella americana de 1,5/40 μ s.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Los métodos empleados en este estudio sustituyen ventajosamente, desde el punto de vista económico y de seguridad, al empírico basado en obtener una determinada resistencia de puesta a tierra, puesto que, se puede gastar mucho en obtener un valor de resistencia de puesta a tierra bajo, sin conseguir seguridad, cuando por el contrario se puede conseguir seguridad, con un valor de puesta a tierra alto, a un costo más bajo.

Sin embargo, los cálculos e investigaciones descritas son solamente una referencia útil para el diseño, más no constituyen una garantía de seguridad absoluta.

Las suposiciones y estimaciones se han hecho sobre los valores usualmente válidos e incluyendo un cierto margen de seguridad, pero debido al grado de incertidumbre que encierran no puede tomarse como definitivo el diseño elaborado en base a ellas.

Será necesario hacer pruebas de resistencia de puesta a tierra, después de completada la instalación del sistema de tierra.

Se tendrá que rechequear la resistencia de la malla de la estación mensualmente por unos pocos años para determinar las variaciones de estación y los efectos de la estabilización del terreno después de que una construcción ha sido terminada.

Se deberá también revisar el sistema de tierra de vez en cuando para chequear los posibles cambios en el

sistema y en las condiciones del mismo, lo cual pueden afectar los valores máximos de la corriente de falla a tierra, así mismo los exteriores de la estación podrían afectar las corrientes máximas de falla, la resistencia a tierra de la estación o la diferencia de potencial.

Ya que los cálculos previstos en este diseño son rara vez alcanzados en el terreno, las mediciones de los potenciales locales en el campo de la estación para el sistema de puesta a tierra son probadas con corrientes relativamente altas, estas pruebas por lo general son bastantes concluyentes, pero también son costosas para hacerlas rutinariamente.

Se espera que el material presentado en este estudio puede ayudar a evitar situaciones peligrosas.

Existen algunos factores que se deben tomar en cuenta tales como:

Una pronta eliminación de las fallas a tierra, es el mejor elemento de seguridad, estaciones de resistencias bajas a tierra no garantizan seguridad, a menos que esta sea tan baja que las corrientes de falla máxima siguiendo a través de éste no puedan llevar el voltaje del sistema a tierra a un valor mortal, para todos estos casos la gradiente deberá ser estudiada.

Es muy importante mantener en perfecto estado de operación el sistema de protección, pues como hemos visto, un corto tiempo de duración de la falla implica valores tolerables de tensión más altos, por lo tanto menos riesgos.

BIBLIOGRAFIA

1. AIEE. Substations committee report, "VOLTAGE GRADIENTS THROUGH THE GROUND UNDER FAULT CONDITIONS", Páginas 58-59, 1.957
2. Ralph H. Lee, "ELECTRICAL SAFETY IN INDUSTRIAL PLANTS". IEEE, Transactions on industry and general application. Volúmen IG A-7 N° 1, de Enero/Febrero, 1.971.
3. AIEE N° 80, "GUIDE FOR SAFETY IN ALTERNATING CURRENT SUBSTATION GROUNDING". American Institute of Electrical Engineers, Marzo, 1.961.
4. J. D. Humphries. "EARTH ELECTRODE SYSTEMS FOR LARGE ELECTRIC STATIONS". Proceedings of the Institution of Electrical Engineers. Volúmen 104, Parte A, Páginas 383-399, Octubre 1.957.
5. "GROUNDING PRINCIPLES AND PRACTICE FUNDAMENTAL CONSIDERATIONS ON GROUND CURRENTS", por Reinhold Rudenberg. Repinted from Electrical Engineering, Enero 1.945.
6. "GENERAL FUNDAMENTALS OF ELECTRICAL GROUNDING TECHNIQUE", por Pierre Laurent. Traducción del Boletín de la Societé Francaise des Elecriciens Volúmen 1, Series 7, Páginas 368-402, Julio 1.951.
7. "MEASUREMENT OF POTENTIALS IN A 220 KV SUBSTATION", por Heinrich Lauger Volúmen 75, Página 97-105, 1.954.
8. Central Station Engineers of the Westinghouse Electric Corporation, "TRANSMISSION AND DISTRIBUTION REFERENCE BOOK". Editado por R. R. Donnelley &

9. "GROUNDING METHODS FOR HIGH-VOLTAGE STATIONS WITH GROUNDED NEUTRALS". Por Walter Koch. Traducción del artículo del Elektro-technische Zeitschrift, Febrero de 1.950.

10. ESTUDIO GENERAL DEL SISTEMA ELECTRICO DEL PROYECTO PISAYAMBO, primera etapa, realizado por Italconsult, Consultores Internacionales, Inconec, Mayo de 1.971.



A.F. 142110