

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA



**TENSIONES DE TOQUE Y PASO
EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**

INFORME DE SUFICIENCIA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO ELECTRICISTA

PRESENTADO POR:

MARCO ANTONIO ARIAS GARCIA

**PROMOCIÓN
2003 - II**

**LIMA – PERÚ
2008**

TENSIONES DE TOQUE Y PASO EN UN SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

SUMARIO

El presente trabajo abarca el estudio y análisis de las tensiones de toque y paso en un sistema de Puesta a Tierra de una subestación eléctrica; su desarrollo abarca un sistema real sobre el cual se simula una falla eléctrica mediante un método de elaboración especial, de acuerdo a lo indicado en el reglamento español “Instrucciones Técnicas Complementarias MIERAT-13”.

Al comienzo se determinaran los criterios de evaluación utilizados, los parámetros eléctricos y físicos (topología) de una Red de Puesta a Tierra que va a ser estudiada, lo cual implica la realización de mediciones de Resistividad de terreno y Resistencia del sistema de dispersión.

Luego se desarrolla un sistema de Puesta a Tierra real, correspondiente a una SE de generación en la selva central del Perú, se analiza el comportamiento de este sistema ante una falla, calculándose los valores de las Tensiones de Toque y Paso originadas en diferentes puntos, para compararlas con similares Tensiones calculadas en calidad de admisibles y con aquellas efectivamente medidas en el lugar de la instalación.

Para obviar el proceso de diseño se utiliza el software especial Cymgrd, con el que se desarrolla el sistema de Puesta a Tierra y se calculan los gradientes de Potencial, debido a que se basa en los criterios que recomienda el estándar IEEE Std 80-2000, que es de aceptación internacional y aplica soluciones basadas en el método de elementos finitos.

Finalmente se hará el análisis comparativo de los resultados hallados teóricamente con aquellos que se obtuvieron con medidas directas en campo, dando las respectivas apreciaciones y justificaciones de las desviaciones y diferencias resultantes.

INDICE

PRÓLOGO	01
CAPITULO I - LÍMITES TOLERABLES DE CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO	03
1.1 Efectos de la corriente eléctrica	03
1.1.1 Efectos de la frecuencia.	07
1.1.2 Efectos de la magnitud y duración de la corriente eléctrica	08
1.1.3 Duración del contacto eléctrico	09
1.2 Límites tolerables de corriente	10
1.2.1 Fórmula de la duración	10
1.2.2 Impedancia del cuerpo humano	11
1.2.3 Recorrido de la corriente a través del cuerpo	12
CAPITULO II - MÉTODOS Y CRITERIOS PARA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE TOQUE Y DE PASO	14
2.1 Efectos de la resistividad del suelo	14
2.1.1 Naturaleza de los suelos	15
2.1.2 La humedad	15
2.1.3 La temperatura del terreno	16
2.1.4 La concentración de sales disueltas	16
2.1.5 La estratificación del terreno.	16
2.2 Criterios del estándar IEEE 80-2000 para determinación de tensiones de toque y paso	17
2.3 Criterios del reglamento español MIE-RAT 13 para determinación de tensiones de toque y paso	20
2.4 Criterio del Código Nacional de Electricidad	22

CAPITULO III - ANÁLISIS DE TENSIÓN DE TOQUE Y PASO PARA LA PUESTA A TIERRA DE UN PATIO DE LLAVES	24
3.1 Topología del Sistema Eléctrico	24
3.2 Parámetros Eléctricos de la Puesta a Tierra	27
3.2.1 Resistividad del terreno	27
3.2.2 Resistencia de tierra	30
3.3 Límites permisibles de tensión de toque y paso	31
CAPITULO IV - TENSIONES DE TOQUE Y PASO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA	37
4.1 Método de Medición	37
4.1.1 Procedimiento de medición	40
4.2 Resultado de Medidas Aplicadas	43
4.3 Resultados por modelamiento de la red de puesta a tierra	48
4.4 Evaluación comparativa de los resultados	56
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	59
CONCLUSIONES	59
RECOMENDACIONES	61
ANEXOS	62
ANEXO A – Catálogo de Equipo Let 60 VPC	63
ANEXO B – Catálogo de Software Cymgrd	65
BIBLIOGRAFIA	67

PROLOGO

El presente trabajo tiene como objetivo fundamental dar a conocer una metodología asistida por un software especial, que resulte práctica y confiable para hallar las Tensiones de Toque y Paso que aparecerán en la superficie del suelo, durante posibles fallas en una subestación eléctrica.

Se toma como guía técnica estandarizada lo indicado por la reglamentación española MIE-RAT 13, a su vez se comparan los resultados medidos con los límites establecidos por la misma MIE-RAT 13 y por lo recomendado en el estándar IEEE 80-2000, dando los resultados de las apreciaciones y comentarios sobre las diferencias de los resultados encontrados.

En la simulación y análisis de la Red de Puesta a Tierra, no se han considerado dispersión de corrientes debido a descargas atmosféricas, sólo se han considerando corrientes de falla propias de la red a 60 Hz

El capítulo I, trata principalmente sobre los límites de corriente tolerables por los seres humanos, se explica sobre los efectos de la corriente eléctrica para distintas frecuencias, distintas magnitudes y distintos tiempos de duración de contacto eléctrico; se termina el capítulo explicando que muchos de los resultados fatales de un contacto eléctrico depende del recorrido que la corriente eléctrica hace a través del cuerpo humano.

El capítulo II, empieza dando una breve introducción sobre los efectos de la Resistividad del suelo en la dispersión de la corriente eléctrica, luego hacemos una revisión sobre los métodos y criterios más conocidos para el cálculo de los límites de tensiones de Toque y Paso, se recogen las recomendaciones relacionadas al rubro, del estándar internacional IEEE-80 2000, de la reglamentación española MIE-RAT 13 y además se hace un comentario de lo propuesto en nuestro Código Nacional de Electricidad.

El capítulo III, abarca principalmente el conocimiento que se debe tener, de los parámetros eléctricos del sistema de Puesta a Tierra a ser analizado, empezamos conociendo la topología de la instalación, la Resistividad del suelo, la Resistencia de dispersión de la red de Puesta a Tierra y finalmente se termina resolviendo las expresiones propuestas por el estándar IEEE-80 2000 y la MIE-RAT 13, para el cálculo de los límites de Tensiones de Toque y Paso permisibles durante una falla en el sistema eléctrico involucrado.

En el capítulo IV, realizamos principalmente la comparación de los resultados medidos en campo con los resultados calculados mediante el software especializado cymgrd; se hace una explicación de la metodología utilizada para la medición de las Tensiones de Toque y Paso y se realiza una evaluación comparativa de los resultados tanto teóricos como prácticos, dando una explicación de las diferencias encontradas.

Finalmente se hace una apreciación de los resultados obtenidos, se opina sobre la eficacia del método aplicado y se dan las conclusiones respectivas.

CAPITULO I

LÍMITES TOLERABLES DE CORRIENTE EN EL CUERPO HUMANO

El criterio definitivo para establecer el correcto comportamiento de una Puesta a Tierra es que garantice en primer lugar condiciones seguras al personal que labora o esté presente en sus cercanías cuando una falla a tierra se presente, y en segundo lugar, que asegure la confiabilidad de la operación de los subsistemas de baja tensión durante cualquier tipo de disturbios.

Para la primera finalidad, que se relaciona con el tema del presente trabajo, se requiere conocer los efectos de la corriente en el cuerpo humano, dado que es prácticamente imposible garantizar que ninguna corriente recorrerá el cuerpo de las personas en condiciones de ocurrencias de falla o bajo condiciones normales de operación, deben en todo caso establecerse límites relacionados con el daño posible que pueda causarle.

1.1. Efectos de la Corriente Eléctrica

El conocimiento de los efectos de la corriente en el cuerpo humano es de carácter interdisciplinario y complejo y existen muchas variables en juego para pretender establecer límites precisos; en efecto, las investigaciones en este campo arrojan resultados de carácter probabilístico y aunque se pueden evaluar límites razonablemente seguros, siempre podrían existir personas y condiciones para las que no lo fueran.

Son numerosos los investigadores que han aportado el conocimiento disponible sobre los efectos de la corriente en el cuerpo humano, pero cabe destacar a dos que han dado el soporte a las normas y recomendaciones que orientan el diseño de las puestas a tierra que ofrezcan seguridad a los humanos; se trata de Charles F. Dalziel y de Gottfried Biegelmeir.

Dalziel publicó por mas de treinta años resultados de sus diversas investigaciones en animales y, en la medida en que las limitaciones éticas se lo permitieron, en humanos; en particular, propuso una sencilla ecuación que mediante la “constante de energía de aguante” permite evaluar el umbral de corriente con riesgo de fibrilación ventricular (pérdida del sincronismo cardiaco), efecto con alta probabilidad de desembocar en una situación letal; dicha ecuación continúa siendo una referencia internacional y por ende del estándar mas completo que existe, IEEE Std 80 2000 [1], para establecer las tensiones permisibles a las que puede ser sometida una persona por causa de los gradientes de potencial en la superficie del suelo durante la dispersión de corriente, constituyéndose entonces en la restricción fundamental del diseño de las Puestas a Tierra.

Biegelmeier y Lee presentaron una caracterización de la curva corriente-tiempo del umbral de fibrilación en humanos, identificando tres zonas típicas y configurando una característica empírica “z”, que posteriormente ha sido complementada con estudios estadísticos y finalmente ha sido refinada en las curvas recomendadas por la publicación IEC-479-1 (1994) para establecer las tensiones permisibles.

La Fig.1.1, muestra una comparación entre la característica propuesta por Biegelmeier y la gráfica de las ecuaciones propuestas por Dalziel, para personas con peso de 70 kg y 50 kg respectivamente, ambas consideradas en baja frecuencia.

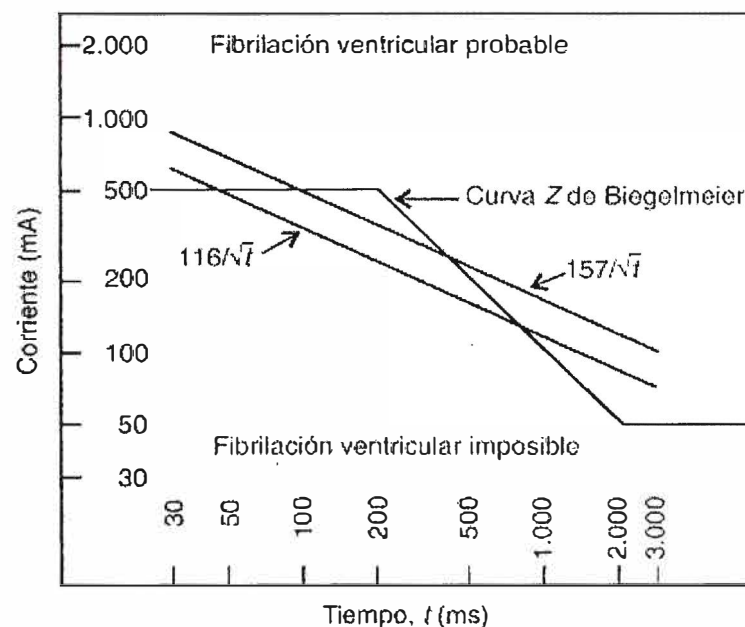


Fig. 1.1 Comparación de umbrales de fibrilación ventricular

Dichas características muestran que los efectos del paso de la corriente eléctrica a través del cuerpo humano dependen de su duración, magnitud y frecuencia, y complementariamente del recorrido que hacen y de la masa corporal involucrada.

A partir de la percepción temporal de la corriente, (del orden de 0,5 mA en AC y de 2mA en DC); mediante un suave calentamiento con DC o un hormigueo con AC, los efectos de la corriente van pasando por movimientos involuntarios que afectan primero los músculos estriados (controlables) y luego los músculos lisos (no controlables), traduciéndose en contracciones dolorosas, paro respiratorio, fibrilación ventricular y después de ella, muy probablemente, la muerte; un valor importante es el máximo al cual aun la persona todavía es capaz de soltar el objeto conductor energizado (let go current), que en AC es cercana de 10 mA, dicho límite indica que con mayores corrientes, una persona ya no tendrá capacidad de controlar sus músculos estriados.

La fibrilación ventricular, en términos sumamente simplificados y prácticos es un estado de desincronización del funcionamiento del corazón (que se controla así mismo); significa que sus movimientos han perdido el paso y no consigan bombear oportunamente la sangre, con lo que rápidamente se produce el paro cardiaco. Se sabe que una pequeña corriente produce este efecto cuando afecta el corazón durante el “periodo vulnerable”, que cubre una porción relativamente corta del ciclo cardiaco, durante la cual las fibras del corazón están en un estado de excitabilidad inhomogénea.

Una persona se electriza cuando la corriente eléctrica circula por su cuerpo, es decir, cuando la persona forma parte del circuito eléctrico, pudiendo al menos, distinguir dos puntos de contacto: uno de entrada y otro de salida de la corriente; la electrocución se produce cuando dicha persona fallece debido al paso de la corriente por su cuerpo.

Otros factores fisiopatológicos tales como contracciones musculares, aumento de la presión sanguínea, dificultades de respiración, electrolisis sanguínea, parada temporal del corazón, etc. pueden producirse sin fibrilación ventricular; tales efectos no son necesariamente mortales, son normalmente reversibles y a menudo, producen marcas por el paso de la corriente. Las quemaduras profundas pueden llegar a ser mortales.

Para evaluar las quemaduras existen las curvas de la Fig.1.2, que indican las alteraciones de la piel humana en función de la densidad de corriente que circula por un área determinada (mA/mm^2) y el tiempo de exposición a esa corriente. Se distinguen las siguientes zonas:

Zona 0: habitualmente no hay alteración de la piel, salvo que el tiempo de exposición sea de varios segundos, en cuyo caso, la piel en contacto con el electrodo puede tomar un color grisáceo con superficie rugosa.

Zona 1: se produce un enrojecimiento de la piel con una hinchazón en los bordes donde estaba situado el electrodo.

Zona 2: se provoca una coloración parda de la piel que estaba situada bajo el electrodo; si la duración es de varias decenas de segundos se produce una clara hinchazón alrededor del electrodo.

Zona 3: se puede provocar una quemadura o carbonización de la piel.

Es importante resaltar que con una intensidad elevada y cuando las superficies de contacto son importantes se puede llegar a la fibrilación ventricular sin ninguna alteración de la piel, asimismo que ello pueda ocurrir en un periodo muy corto, inferior a 2 segundos.

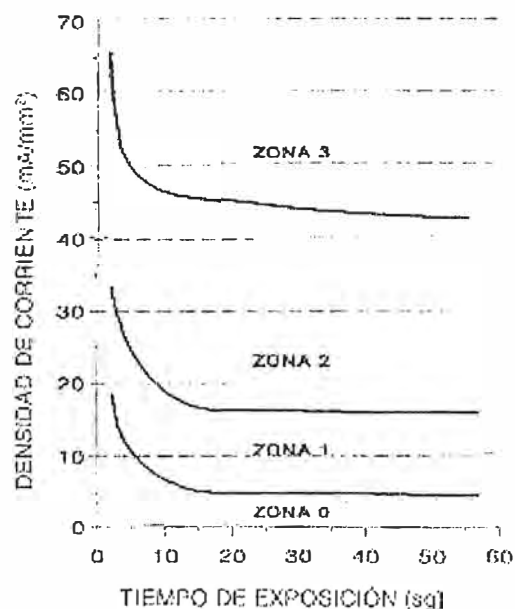


Fig. 1.2: Efecto de la Densidad de Corriente sobre la piel

Cuando una corriente eléctrica atraviesa el cuerpo humano, puede producir diferentes efectos, dependiendo de la trayectoria que recorra. En la Fig.1.3, se indican los

efectos que produce una corriente alterna de frecuencia comprendida entre 15 y 100 Hz con un recorrido mano izquierda -los dos pies. Se distinguen las siguientes zonas:

Zona 1: Habitualmente ninguna reacción.

Zona 2: Habitualmente ningún efecto fisiológico peligroso.

Zona 3: Habitualmente ningún daño orgánico. Con duración superior a 2 segundos se pueden producir contracciones musculares dificultando la respiración, paradas temporales del corazón sin llegar a la fibrilación ventricular.

Zona 4: Riesgo de paro cardiaco por: fibrilación ventricular, paro respiratorio, quemaduras graves, etc.

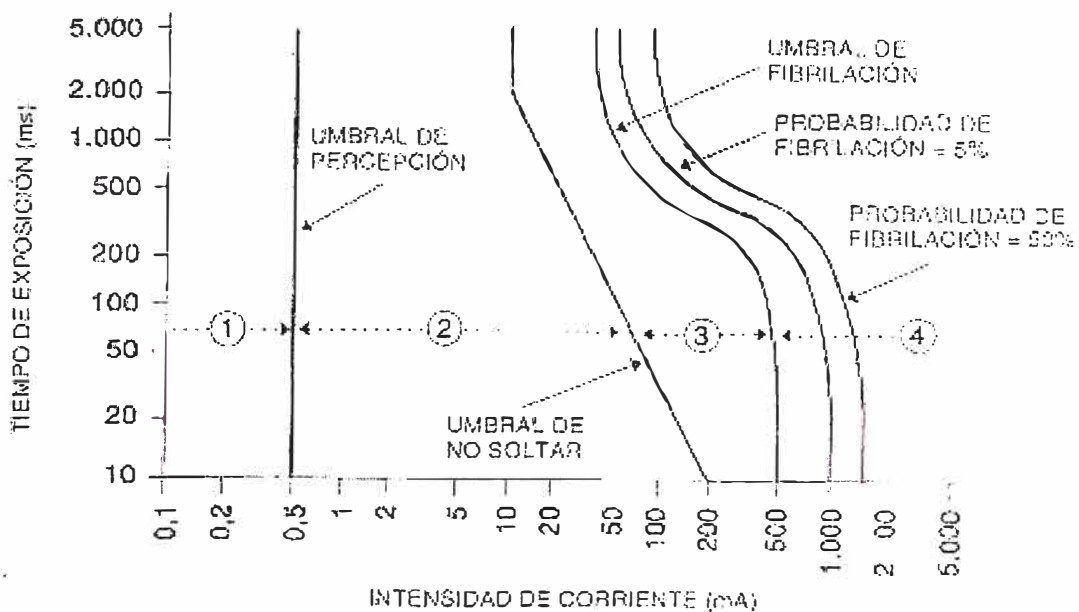


Fig. 1.3: Efecto de la corriente eléctrica sobre el cuerpo humano

1.1.1. Efectos de la frecuencia

Los seres humanos son muy vulnerables a los efectos de la corriente eléctrica a frecuencias de 50 Hz o 60 Hz. corrientes de aproximadamente 0,1 A pueden ser letales, las investigaciones indican que el cuerpo humano puede tolerar corrientes ligeramente mayores a menor frecuencia de 25 Hz y aproximadamente cinco veces más para corrientes directas; de otro lado, a frecuencias de 3000-10 000 Hz, incluso mayores corrientes pueden ser toleradas.

En algunos casos, el cuerpo humano es capaz de tolerar corrientes muy altas debido a las descargas eléctricas atmosféricas; la Comisión Electrotécnica-CEI proporciona

curvas sobre la tolerancia del organismo ante corrientes eléctricas en función de la frecuencia. Otros estudios de los efectos de la corriente tanto directos como de impulsos oscilatorios son reportados por Dalziel.

1.1.2. Efectos de la magnitud y duración de la corriente eléctrica

Los más comunes efectos de la corriente eléctrica sobre el cuerpo son fisiológicos. Dependiendo directamente del incremento de la magnitud, estos son: umbral de percepción, la contracción muscular, inconsciencia, la fibrilación del corazón, bloqueo de las vías respiratorias, y quemaduras.

Corrientes de 1 mA, Son generalmente reconocidas como el umbral de percepción, es decir, la magnitud de corriente en la cual una persona es capaz de detectar una ligera sensación de hormigueo en las manos o dedos causada por el paso de la corriente.

Corrientes de 1-6 mA, Aunque desagradable, en general, no afecta a la capacidad de una persona que sostiene un objeto energizado en el control de los músculos y de su liberación.

Dalziel experimentó con 28 mujeres y 134 hombres obteniendo datos que indican un promedio de conducción de corriente de 10,5 mA para la mujer y 16 mA para hombres, y de 6 mA y 9 mA como los respectivos valores umbrales.

En el rango 9-25 mA, las corrientes pueden ser dolorosas y pueden hacer que sea difícil o imposible de liberarse de objetos energizados agarrados con la mano, ocasionando la falta de control muscular.

Para niveles más altos de corrientes, las contracciones musculares que afectan a los músculos lisos podrían hacer difícil la respiración y conducir a la asfixia.

Estos efectos no son permanentes y desaparecen cuando se interrumpe la corriente, a menos que la contracción haya sido muy severa y la respiración se haya detenido por uno

o más minutos y no en segundos. Sin embargo, incluso en estos casos suelen responder a la reanimación respiratoria y cardiaca.

No es hasta magnitudes de corriente en el rango de 60-100 mA que se llega a la fibrilación ventricular, paro del corazón, o inhibición de la respiración; al ocurrir una de estas, pueden causar lesiones graves o la muerte; una persona entrenada en reanimación cardiopulmonar (RCP) al aplicarla debe administrar la RCP hasta que la víctima puede ser tratada por un médico.

Por lo tanto, se debe resaltar la importancia del umbral de la fibrilación. Si las corrientes de falla pueden mantenerse por debajo de este valor debido a un sistema cuidadosamente diseñado de tierra, las lesiones o la muerte pueden evitarse.

Como se muestra por Dalziel y otros científicos, la magnitud de corriente de No-fibrilación I_B en duraciones que van desde 0.03-3.0 s se relaciona con la energía absorbida por el organismo, tal como se describe por la siguiente ecuación:

$$S_B = (I_B)^2 \times t_s \quad (1.1)$$

Donde:

I_B : es la magnitud rms de la corriente a través del cuerpo en A.

t_s : es la duración de la actual exposición en s.

S_B : es la constante empírica relacionada con la descarga eléctrica de energía tolerada por un cierto porcentaje de una población dada.

1.1.3. Duración del contacto eléctrico

Junto con la intensidad es el factor que más influye en el resultado del accidente. Por ejemplo, en corriente alterna y con intensidades inferiores a 100 mA, la fibrilación puede producirse si el tiempo de exposición es superior a 500 ms.

Teniendo en cuenta la importancia de la duración de la falla, tanto en términos de la ecuación (1.1) e implícitamente como un factor de exposición, la velocidad de despeje de la falla es ventajosa por dos razones:

a) La probabilidad de que la exposición a la descarga eléctrica se reduce en gran medida debido al rápido despeje, en contraste con las situaciones en las que las corrientes de falla podrían persistir durante varios minutos o tal vez horas.

b) Las pruebas y la experiencia demuestran que la posibilidad de lesiones graves o de muerte se reduce en gran medida si la duración del flujo de corriente a través del cuerpo es muy breve.

Los valores de corriente pueden, por lo tanto, basarse en el tiempo de despeje de los dispositivos de protección primaria, o el de la protección de respaldo de seguridad.

1.2. Límites tolerables de corriente

La magnitud y duración de la corriente a través de un cuerpo humano a 50 Hz o 60 Hz debería ser menor que el valor que pueden causar fibrilación ventricular del corazón.

1.2.1 Formula de la duración

La duración de la corriente para 50 Hz o 60 Hz que puede ser tolerado por la mayoría de la gente está relacionada con su magnitud de acuerdo con la ecuación (1.1). Basado en los resultados de los estudios de Dalziel, El 99,5% de las personas pueden soportar en condiciones seguras, sin fibrilación ventricular, el paso de una corriente con la magnitud y duración determinada por la siguiente fórmula:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (1.2)$$

Donde, además de los términos previamente definidos para la Ecuación (1.1)

$$k = \sqrt{S_B} \quad (1.3)$$

Dalziel descubrió que la corriente de choque a la que el 99,5% de las personas que pesan alrededor de 50 kg (110 lb) podrían sobrevivir resulta de un valor de la S_B de 0,0135. Así, $k_{50} = 0.116$ y de la fórmula para la corriente permisible (1.2) se convierte en:

$$I_B = \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (1.4)$$

Para 50 kg de peso. Válida en el rango de 0.03 a 3 segundos.

De manera similar se halló valores para una persona de 70 kg. Donde $k_{70} = 0.157$

$$I_B = \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (1.5)$$

Para 70 kg de peso

Con los años, otros investigadores han sugerido otros valores de I_B .

En 1936 Ferris Etal. sugiere 100 mA como umbral de la fibrilación. El valor de 100 mA se elaboró a partir de una amplia experimentación en Universidad de Columbia. En los experimentos, los animales que tengan el cuerpo y el corazón pesos comparables a los seres humanos fueron sometidos a la duración máxima de choque de 3 s. Algunos de los experimentos más recientes sugieren la existencia de los dos umbrales: uno donde la duración del choque eléctrico es más corta que la duración de un período del latido del corazón y el otro donde la duración de la corriente es mayor que un periodo de latido del corazón.

1.2.2 Impedancia del cuerpo humano

Su importancia en el resultado del accidente depende de las siguientes circunstancias: de la tensión, de la frecuencia, de la duración del paso de la corriente, de la temperatura, del grado de humedad de la piel, de la superficie de contacto, de la presión de contacto, de la dureza de la epidermis, etc.

Las diferentes partes del cuerpo humano, tales como la piel, los músculos, la sangre, etc., presentan para la corriente eléctrica una impedancia compuesta por elementos resistivos y capacitivos. Durante el paso de la electricidad la impedancia de nuestro cuerpo se comporta como una suma de tres impedancias en serie:

- Impedancia de la piel en la zona de entrada.
- Impedancia interna del cuerpo.
- Impedancia de la piel en la zona de salida.

Para corrientes DC y AC de 50 Hz o 60 Hz, el cuerpo humano puede ser aproximado por una resistencia. El camino de la corriente es típicamente considerado de una mano hacia ambos pies, o de un pie al otro.

La resistencia interna del cuerpo es de aproximadamente 300Ω , mientras que los valores de resistencia del cuerpo incluyendo la piel van desde 500 a 3000Ω . La resistencia del cuerpo humano disminuye con el daño o punzadas de la piel en el punto de contacto.

De los experimentos de Dalziel realizando extensas pruebas usando agua salada para humedecer las manos y los pies para determinar las condiciones seguras de conducción de corrientes, con las manos y los pies mojados. Los valores obtenidos usando 60 Hz para los hombres fueron los siguientes: Con corrientes de 9,0 mA; las tensiones correspondieron a 21 V para trayectoria mano-mano y 10.2 V para trayectoria mano-pie.

Por lo tanto, la resistencia AC para un contacto mano-mano es igual a $21/0.009$ ó 2330Ω y para contacto de la mano-a-pies, la resistencia es igual a $10.2/0.009$ ó 1130Ω .

De los valores basados en este experimento, se considerará como aceptable representar la resistencia del cuerpo humano en un valor de 1000Ω .

1.2.3 Recorrido de la corriente a través del cuerpo

La gravedad del accidente depende del recorrido de la misma a través del cuerpo. Una trayectoria de mayor longitud tendrá, en principio, mayor resistencia y por tanto menor intensidad; sin embargo, puede atravesar órganos vitales (corazón, pulmones, hígado, etc.) provocando lesiones mucho más graves. Aquellos recorridos que atraviesan el tórax o la cabeza ocasionan los mayores daños.

Hay que recordar que la elección de una resistencia de 1000Ω se refiere a recorridos de corriente entre la mano y un pie o ambos pies, de donde sin embargo una parte importante de la corriente pasa a través de partes del cuerpo que contienen órganos vitales, incluyendo el corazón. En general se considera que las corrientes que recorren de un pie al otro son menos peligrosas.

Basados en estas conclusiones, valores de resistencias de más de 1000Ω podrían ser permitidos, en lo que se refiere a trayectorias de un pie al otro pie. Sin embargo, los siguientes factores deben ser considerados:

- a. La tensión entre los dos pies, dolorosa, pero no mortal, podría provocar una caída que a su vez podría provocar un mayor flujo de corriente a través de la zona del pecho. El grado de este peligro aún más dependen de la duración de la falla y la posibilidad de otra descarga sucesiva, tal vez en un recierre.
- b. Una persona puede estar trabajando o descansando en posición propensa cuando se produce una falla.

Es evidente que los peligros de contacto pie a pie son bastante inferiores a las de otro tipo. Sin embargo, desde que fallecimientos han ocurrido por estos casos, Se debe considerar este tipo de contactos como un riesgo que no debe pasarse por alto.

CAPITULO II

MÉTODOS Y CRITERIOS PARA DETERMINACIÓN DE LA TENSIÓN DE TOQUE Y DE PASO

2.1 Efectos de la Resistividad del Suelo

La Resistividad del suelo es la propiedad que tiene éste, para conducir electricidad, es conocida además como la Resistencia Específica del suelo. En su medición, se promedian los efectos de las diferentes capas que componen el terreno bajo sondeo, ya que éstos no suelen ser uniformes en cuanto a su composición, obteniéndose lo que se denomina, una "Resistividad Aparente".

La finalidad principal de las mediciones de Resistividad es la obtención del perfil estratificado del suelo con valores de resistividad de cada estrato o capa y de sus espesores, hasta la profundidad del sondeo exploratorio.

En la NOM-022-STPS-1999 (Norma Oficial Mexicana), se define el término Resistividad, como la Resistencia que ofrece al paso de la corriente un cubo de terreno de un metro por lado y se representa por la letra griega ρ . La resistividad de los suelos se expresa en Ohm-m, Ohm-cm ó Ohm-mm. En la Fig. 2.1 Representación matemática de la resistividad del terreno, se aprecia dicho planteamiento:

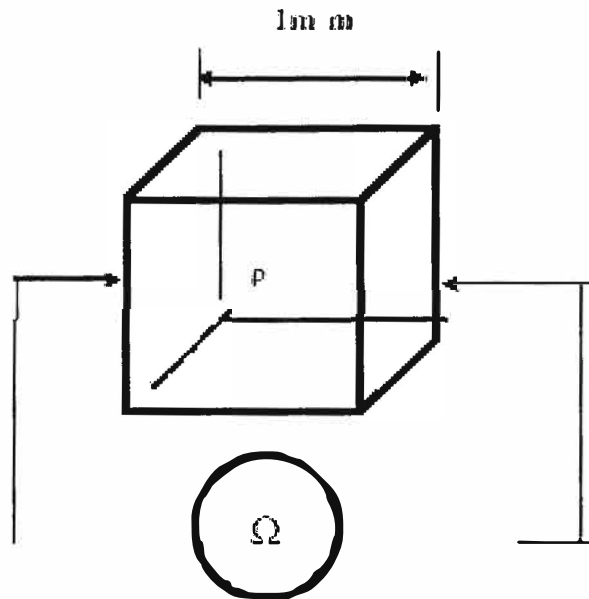


Fig.2.1 Representación matemática de la resistividad del terreno

Donde la Resistividad del terreno varía ampliamente a lo largo y ancho del globo terrestre, estando determinada por:

- Naturaleza de los suelos.
- La humedad.
- La temperatura del terreno.
- La concentración de sales disueltas.
- La compactación del terreno.
- La estratificación del terreno.

2.1.1 Naturaleza de los suelos.

Los suelos son buenos, regulares o malos conductores de la electricidad en función de su naturaleza. El análisis y conocimiento de esta naturaleza es el primer paso para la instalación adecuada del sistema de puesta a tierra.

2.1.2 La humedad.

La Resistividad que presenta un terreno esta en relación directa a los porcentajes de humedad contenida en él; es decir, depende de su estado hidrométrico, al aumentar la

humedad disminuye la Resistividad y viceversa. En todo caso siempre que se añada agua a un terreno disminuye su Resistividad respecto al que tendría si estuviera seco.

2.1.3 La temperatura del terreno.

La Resistividad de los suelos también depende de la temperatura, esta característica térmica del terreno depende de su composición, de su grado de compactación y del grado de humedad.

2.1.4 La concentración de sales disueltas.

Al presentar mayor concentración de sales disueltas en un terreno, mejora notablemente la Conductividad y por lo tanto la Resistividad. En la Fig. 2.2 Efectos de la humedad, temperatura y sales disueltas en el terreno, se muestran estas variaciones:

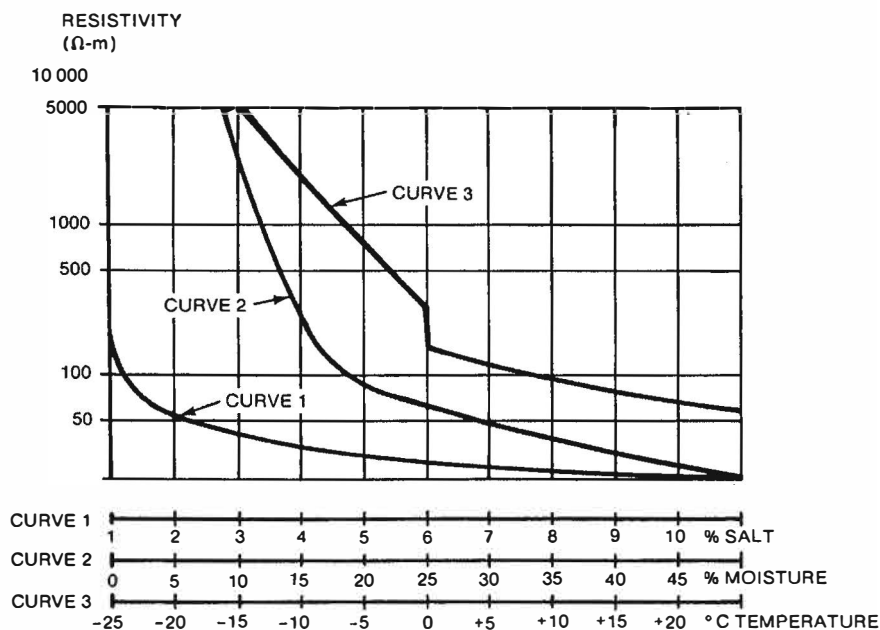


Fig.2.2 Efectos de la humedad, temperatura y sales disueltas en el terreno

2.1.5 La estratificación del terreno.

El suelo está formado por capas (estratos) que tienen diferentes características, Resistividades y profundidades debido a la formación geológica, siendo generalmente horizontales y paralelas a la superficie. Existen estratos que se presentan en forma

inclinada o vertical debido a fallas geológicas pero para los estudios de Puesta a Tierra se asumen horizontales.

2.2 Criterio del estándar IEEE 80-2000 para determinación de tensiones de toque y paso

La IEEE (The Institute of Electrical and Electronics Engineers) con su estándar IEEE std. 80-2000 (IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding) [1] para el diseño de Puesta a Tierra se basa en un modelo simplificado de un choque eléctrico, los parámetros utilizados para este modelo, se basan en valores y criterios experimentales, como los de Dalziel los cuales han sido probados, tanto en animales como en humanos.

La intención de dicho estándar es el de proveer una guía e información pertinente para la práctica segura en el diseño de puestas a tierra.

El propósito principal de esa guía se resume como sigue:

- a. Establecer como una base para el diseño, los límites de diferencia de potencial que pueden existir en una subestación bajo ciertas condiciones de falla entre puntos que pueden tener contactos con personas.
- b. Revisar las prácticas de aterramientos de subestaciones con especial énfasis en la seguridad, y criterios de desarrollo para un diseño seguro.
- c. Proveer un procedimiento para el diseño práctico de los sistemas de tierra, basado en estos criterios.
- d. Desarrollar métodos analíticos como una ayuda al entendimiento y solución de problemas típicos de gradientes.

Este estándar nos indica lo siguiente:

La seguridad de una persona depende de prevenir la cantidad crítica de energía que puede ser absorbida por esta al momento de una falla antes del despeje de la misma.

La máxima diferencia de potencial que soportaría una persona ante cualquier falla eléctrica no debería exceder de los límites definidos en función del circuito eléctrico propio que representa; según ello se deducen las siguientes ecuaciones que se basan en la ley de Ohm.

Cuando se involucran Tensiones de paso los límites admisibles son:

Para personas de un peso corporal de 50 kg:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.1)$$

Para personas de un peso corporal de 70 kg:

$$E_{step70} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.2)$$

Del mismo modo, cuando se involucran tensiones de toque los límites admisibles son:

Para personas de un peso corporal de 50 kg:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.3)$$

Para personas de un peso corporal de 70 kg:

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.4)$$

Donde:

E_{step} : es la Tensión de paso en V

E_{touch} : es la Tensión de toque en V

ρ_s : es la Resistividad del material en la superficie del terreno en Ω -m

ρ : es la Resistividad del suelo en Ω -m

h_s : es la altura de la capa superficial de suelo en m

t_s : es la duración de la falla en segundos

C_s : se denomina al factor de capa superficial del suelo (factor de contacto), se determina a partir de la siguiente expresión:

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (2.5)$$

Si no se utiliza grava (piedra picada) o una capa superficial protectora (losa, carpeta), entonces $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$.

Los límites de Tensión de Toque entre superficies metal-metal se derivan de las ecuaciones (2.3) y ecuación (2.4). Estas superficies, no presentan capa superficial protectora, por lo que $\rho_s = \rho$ y $C_s = 1$.

Con estos resultados, las ecuaciones (2.3) y (2.4) se convierten en:

Para personas de un peso corporal de 50 kg:

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5\rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.6)$$

Para personas de un peso corporal de 70 kg:

$$E_{touch70} = (1000 + 1.5\rho_s) \times \frac{0.157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.7)$$

Para tensiones de Toque entre metal-metal, tanto cuerpo a cuerpo y cuerpo a los pies, se traducirá en $\rho_s = 0$. Por lo tanto, la resistencia total en el momento de la falla es igual a la resistencia corporal R_B .

Con la sustitución de $\rho_s = 0$ en la ecuación (2.6) y la ecuación (2.7), el límite de la tensión de toque para metal-metal es:

Para personas de un peso corporal de 50 kg:

$$E_{mn-touch50} = \frac{116}{\sqrt{t_s}} \quad (2.8)$$

Para personas de un peso corporal de 70 kg:

$$E_{mn-touch70} = \frac{157}{\sqrt{t_s}} \quad (2.9)$$

Donde

E_{mm} es la tensión de toque metal-metal en V

De las ecuaciones mencionadas, se deduce que la tensión de toque, tensión de paso y tensión de toque metal-metal debe ser inferior a los respectivos límites de tensión máxima permitidos para garantizar la seguridad de las personas.

2.3 Criterios del reglamento español MIE-RAT 13 para determinación de tensiones de toque y paso

El Reglamento Español mediante la Instrucción técnica complementaria MIE-RAT 13 [2], nos indica lo siguiente sobre los métodos y criterios para la determinación de la Tensión de Toque y Paso:

Toda instalación eléctrica deberá disponer de una protección o instalación de Puesta a Tierra diseñada en forma tal que, en cualquier punto normalmente accesible del interior o exterior de la misma donde las personas puedan circular o permanecer, estas queden sometidas como máximo a las Tensiones de Toque y Paso (durante cualquier defecto en la instalación eléctrica o en la red unida a ella) que resulten de la aplicación de las formulas que se indican a continuación.

La Tensión máxima de Toque aplicada, en voltios, que se puede aceptar se determina en función del tiempo de duración del defecto, según la formula siguiente:

$$V_{ta} = \frac{K}{t^n} \quad (2.10)$$

Donde:

K = 72 y n = 1 para tiempos inferiores a 0.9 segundos.

K = 78.5 y n = 0.18 para tiempos superiores a 0.9 segundos e inferiores a 3 segundos.

t = duración de la falla en segundos.

Para tiempos comprendidos entre 2 y 5 segundos la Tensión de Toque aplicada no sobrepasará los 64 v. para tiempos superiores a 5 segundos la tensión de contacto aplicada no será superior a 50 v.

Salvo casos excepcionales justificados no se consideraran tiempos inferiores a 0,1 segundos.

En caso de instalaciones con reenganche automático rápido (no superior a 0,5 segundos) el tiempo a considerar en la formula será la suma de los tiempos parciales de mantenimiento de la corriente de defecto.

A partir de la formula anterior (2.10) se pueden determinar las máximas tensiones de Toque y Paso admisibles en una instalación, considerando todas las resistencias que intervienen en el circuito.

A efectos del cálculo de proyecto se podrán emplear, para la estimación de las mismas, las expresiones siguientes:

Tensión de paso:

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right) \quad (2.11)$$

Tensión de toque:

$$V_t = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1000} \right) \quad (2.12)$$

Que responden a un planteamiento simplificado del circuito, al despreciar la Resistencia de la piel y del calzado, y que se han determinado suponiendo que la Resistencia del cuerpo humano es de 1.000 ohmios, y asimilando cada pie a un electrodo en forma de placa de 200 centímetros cuadrados de superficie, ejerciendo sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N, lo que representa una Resistencia de Toque con el suelo evaluada en función de la Resistividad superficial del suelo de (2.11).

Si son de prever contactos del cuerpo humano con partes metálicas no activas que puedan ponerse a distinto potencial, se aplicara la formula (2.12) de la tensión de toque haciendo $\rho_s = 0$.

El proyectista de la instalación de tierra deberá comprobar mediante el empleo de un procedimiento de calculo sancionado por la práctica que los valores de las Tensiones de Paso, V_p , y de Toque, V_t , que calcule para la instalación proyectada en función de la geometría de la misma, de la corriente de Puesta a Tierra que considere y de la Resistividad correspondiente al terreno, no superen en las condiciones mas desfavorables las calculadas por las formulas (2.11) y (2.12) en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra.

Se deberá verificar que las Tensiones de Toque y Paso aplicadas estén dentro de los límites admitidos con un voltímetro de Resistencia interna de mil ohmios. Los electrodos de medida para simulación de los pies deberán tener una superficie de 200 cm. cuadrados cada uno y deberán ejercer sobre el suelo una fuerza mínima de 250 N cada uno. Se emplearan fuentes de alimentación de potencia adecuada para simular el defecto, de forma que la corriente inyectada sea suficientemente alta, a fin de evitar que las medidas queden falseadas como consecuencia de corrientes vagabundas o parásitas circulantes por el terreno. Consecuentemente, y a menos que se emplee un método de ensayo que elimine el efecto de dichas corrientes parásitas, por ejemplo, método de inversión de la polaridad, se procurara que la intensidad inyectada sea del orden del 1 por 100 de la corriente para la cual ha sido dimensionada la instalación y en cualquier caso no inferior a 50 Amp. para centrales y subestaciones y 5 Amp. para centros de transformación. Los cálculos se harán suponiendo que existe proporcionalidad para determinar las tensiones posibles máximas.

2.4 Criterio del Código Nacional de Electricidad

En el Perú, con la entrada en vigencia de nuestro Código Nacional de Electricidad – Utilización [3], a partir del 1 de Julio del 2006, no se mejoró mucho en cuanto a lo referente a estas Tensiones de Toque y Paso.

Dicho tema se encuentra en la “Sección 190 – Instalaciones de Alta Tensión” en las siguientes reglas:

- 190-304 Resistencia de Puesta a Tierra de la Subestación.
- 190-306 Exoneraciones en la Subestación.
- 190-308 Conexiones al Electrodo de Puesta a Tierra de la Subestación.

- 190-310 Puesta a Tierra de Manivelas de Interruptores con Operación Simultánea de Todas las Fases.
- 190-312 Puesta a Tierra de Cercos Metálicos Perimetrales de Subestaciones a la Intemperie.

Todas estas reglas hacen referencia a la tabla 52 de dicho Código.

Los valores que da nuestro Código, se aprecian en la tabla 2.1, que es una réplica de la tabla 52 del Código Nacional de Electricidad - Utilización:

Tabla 2.1 Tensiones de toque y paso tolerables de acuerdo al CNE-Utilización

Tipo de suelo	Resistividad Ω -m	Duración de falla 0,5 segundos		Duración de falla 1,0 segundos	
		Tensión de paso V	Tensión de toque V	Tensión de paso V	Tensión de toque V
Orgánico Mojado	10	174	166	123	118
Humedo	100	253	188	186	132
Seco	1 000	1 154	405	816	286
Piedra Partida 105 mm	3 000	3 149	985	2 218	628
Cama de Roca	10 000	10 085	2 589	7 116	1 815

Nota 1: Tabla calculada de acuerdo al estándar [1]

Nota 2: La instalación de una subestación típica se diseña para una duración de falla de 0,5 segundos y el total de la superficie dentro del cerco es cubierto con una capa de piedra partida de 150 mm de espesor con una Resistividad de 3 000 Ω -m.

Nota 3: Se debe tener en cuenta el cumplimiento de la Norma IEC 60479.

Se debe considerar que la numeración de las reglas del Código no es consecutiva deliberadamente. En algunas de las reglas se ha indicado que ha sido expresamente dejadas en blanco, para la incorporación de futuras reglas.

CAPITULO III
ANÁLISIS DE TENSIÓN DE TOQUE Y PASO PARA LA
PUESTA A TIERRA DE UN PATIO DE LLAVES

3.1 Topología del sistema eléctrico

El sistema de tierra a analizar pertenece al patio de llaves de una central hidroeléctrica ubicada en la selva central del Perú, en el departamento de Junín.

Las características generales de la central hidroeléctrica, son las siguientes:

Potencia Instalada	:	42	MW
Caudal máximo	:	20	m ³ /seg.
Altura bruta de Caída	:	275	m
Longitud de túnel	:	5 082	m
Diámetro de Túnel	:	3	m
Energía Media Anual generable	:	285	GWh
Tipo de Turbina	:	Francis	01 Unidad

En cuanto al sistema de Puesta a Tierra, la red principal se compone de la red de la central y la red del patio de la subestación 220kV, presentando una topología reticular asimétrica unidas por conexiones soldadas formando cuadrículas cuyos lados varían entre los 2.3 a 21 metros por lado, cubriendo un área aproximada total de 5 042,88 m².

Asimismo, la Red de Puesta a Tierra de la central comprende las áreas donde se encuentran ubicados los equipos del Patio de 220 kV, y los otros lados que rodean a la Casa de Maquinas o Edificio de la Central, extendiéndose hasta aproximadamente 1 metro fuera del cerco perimetral de la Central, tal como se puede apreciar en la Fig.3.1, Diagrama de la malla analizada.

Se aprecia además, una instalación con abundante grava dispuesta en toda la superficie de la subestación, criterio que se considera comúnmente en las subestaciones por la alta Resistividad que presenta dicho material.

Todas las estructuras metálicas como los soportes de equipos, pórticos, caja de agrupamiento, accionamiento, escaleras metálicas, puentes metálicos, puertas metálicas y masas de los mismos se encuentran aterradas mediante dos conexiones independientes con conductores de cobre de 70 mm², instalados independientemente cada una con su respectiva conexión.

Las conexiones a las estructuras metálicas y pórticos de los equipos se encuentran instaladas en la parte baja de las estructuras a 30 cm de la base de los equipos como promedio; y todas las bases de las estructuras y soportes de los equipos tales como pórticos y cajas de agrupamiento y accionamiento, están sobre una base de concreto; así mismo, cabe mencionar que la grava esta dispersa prácticamente en el mismo nivel de las bases de los equipos y pórticos. Se observa, además, que las conexiones se encuentran empernadas en su mayoría y otras conectadas mediante conectores o grampas bifilares a las estructuras metálicas y derivadas a la malla del sistema de puesta a tierra.

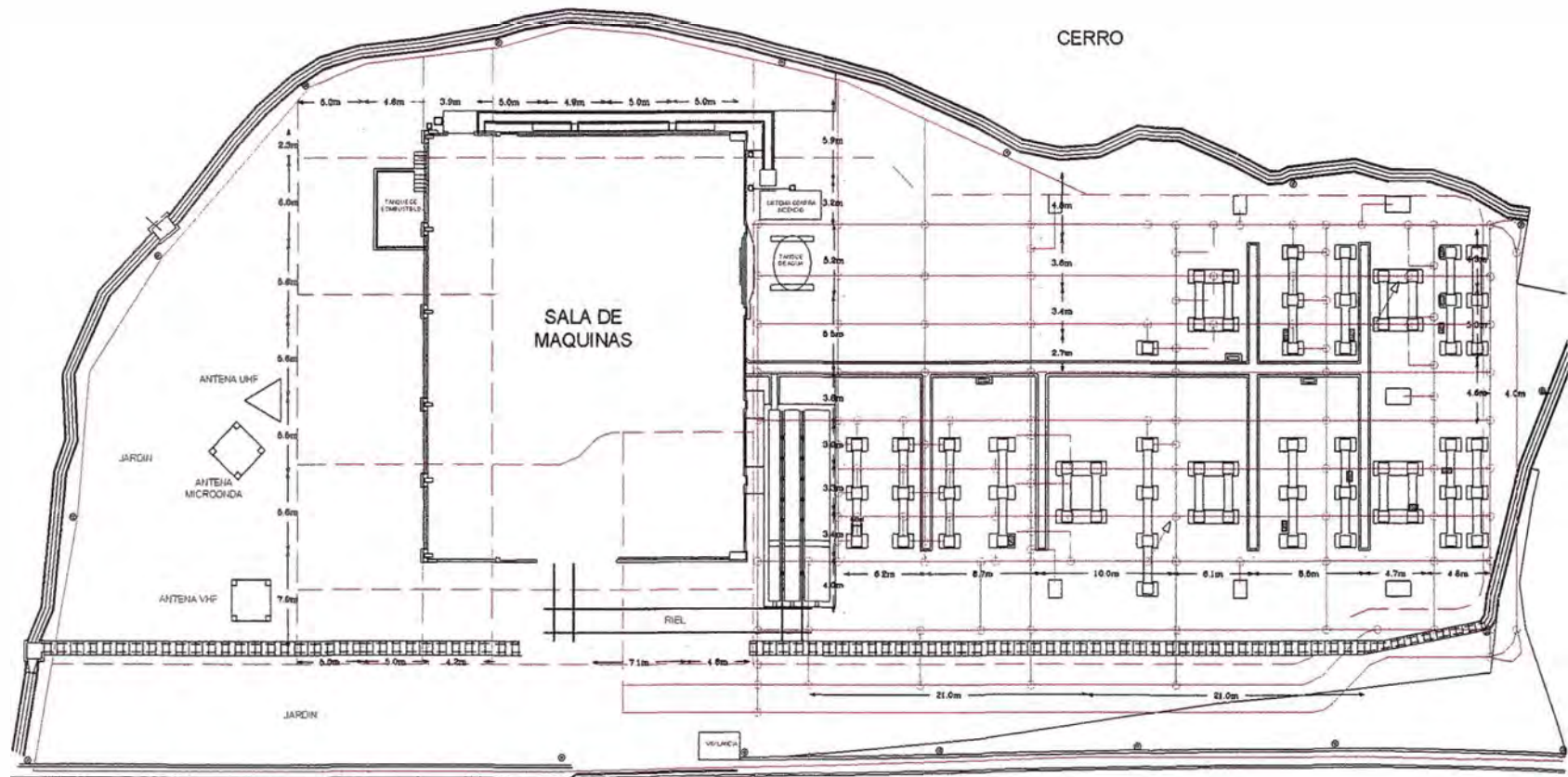


Fig.3.1 Diagrama de la Red de Puesta a Tierra analizada

3.2. Parámetros Eléctricos de la Puesta a Tierra

3.2.1. Resistividad del Terreno

Se tomaron medidas de la resistividad del terreno, usando el método de Wenner, que es una aplicación del principio de caída de tensión con 4 electrodos, solo que aquí los electrodos auxiliares se disponen en línea recta y equidistantes una distancia “a” en forma simétrica respecto al punto donde se desea medir la Resistividad aparente del suelo, no siendo necesario que la profundidad de los electrodos auxiliares, supere los 20 cm; el aparato de medida es un telurómetro clásico de 4 terminales, siendo los dos electrodos extremos (V1 y V4) los de inyección de corriente de medida “I” y los centrales (V2 y V3) de medida de potencial “P”.

La formula usada para el cálculo de la resistividad para la configuración de Wenner es la siguiente:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{a}{\sqrt{a^2 + b^2}}} \quad (3.1)$$

Donde:

ρ : Resistividad aparente del terreno en Ω -m

R : Resistencia aparente medida en Ω

a Distancia entre electrodos en m.

b Profundidad de penetración de los electrodos auxiliares.

Si b es mucho menor que a , la formula (3.1) se podría aproximar como sigue:

$$\rho = 2\pi a R \quad (3.2)$$

El procedimiento de medición fue el siguiente:

En aproximadamente 24 m a lo largo del terreno a medir la Resistividad se clavan las 4 picas equidistantes a una distancia “a” distribuidas en línea recta en la parte central.

Se conectan los electrodos al telurómetro por medio de cables en el mismo orden.

Se toman medidas para $a=1$ m, luego para 2 m y así sucesivamente hasta un mínimo de cuatro medidas, de acuerdo a la disponibilidad de terreno.

En la Fig.3.2, Conexión del método de Wenner, se muestra el esquema de conexión para la medición:

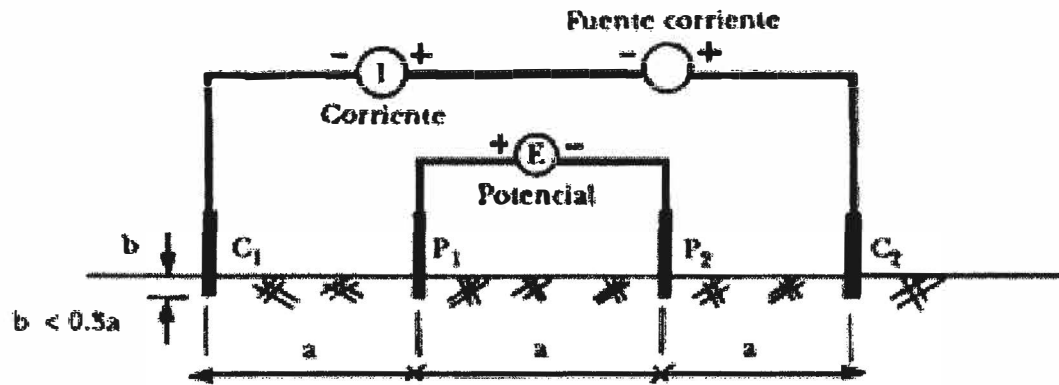


Fig.3.2 Conexión del Método de Wenner

Se realizaron estas medidas de Resistividad a lo largo de dos ejes A-B y C-D perpendiculares (en un espacio libre de suelo entre la central y el cerro).

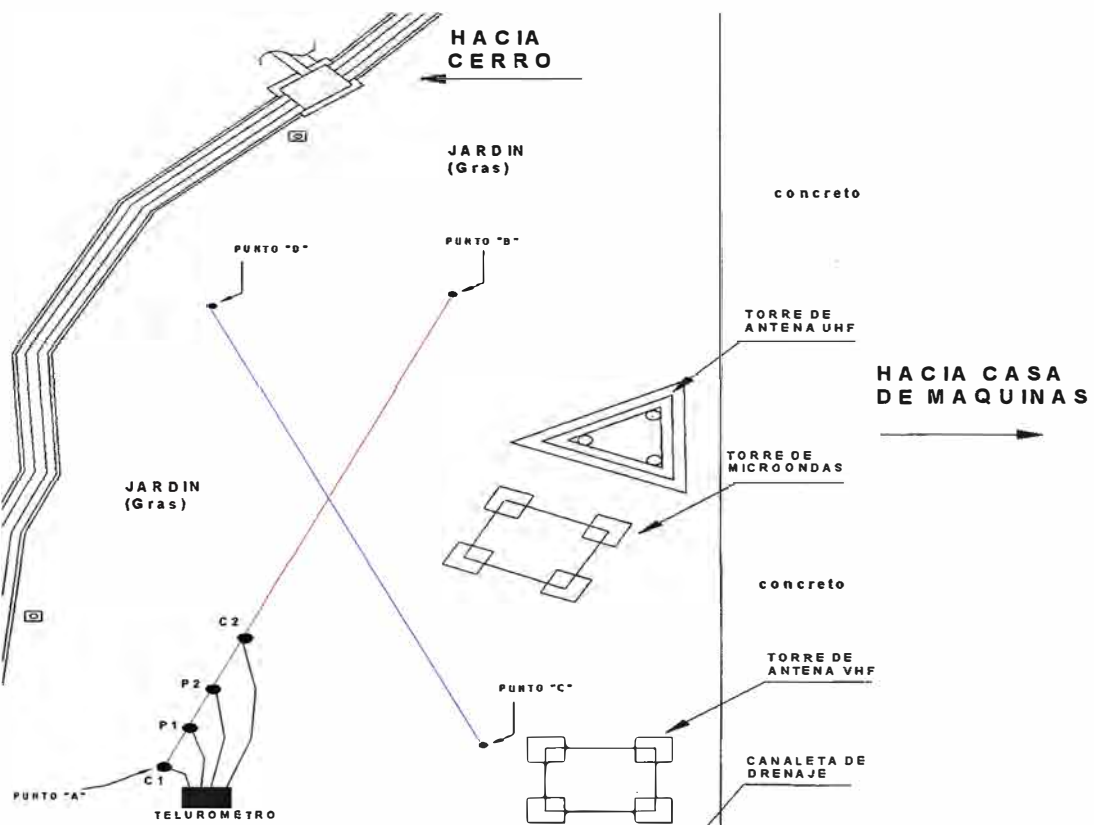


Fig.3.3 Esquema de medición de Resistividad del suelo

Los resultados de las mediciones tomadas en campo se muestran en la Tabla N° 3.1:

Tabla N° 3.1 Resultados de Medidas de resistividad del terreno

Punto	Distancia "a" Distancia equidistantes entre electrodos (metros)	Resistencia medida (ohms)		Resistividad calculada (ohm-m)	
		A - B	C - D	A - B	C - D
1	1.00	51.70	74.50	324.84	468.10
2	2.00	33.50	45.10	420.97	566.74
3	3.00	22.10	28.10	416.58	529.67
4	4.00	16.78	18.15	421.73	456.16
5	5.00	12.56	11.71	394.58	367.88
6	6.00	8.73	9.39	329.11	353.99
7	7.00	7.69	8.25	338.22	362.85
8	8.00	7.16	7.92	359.90	398.10

Luego, utilizando el análisis por 2 capas para cada juego de valores, se tienen los siguientes resultados:

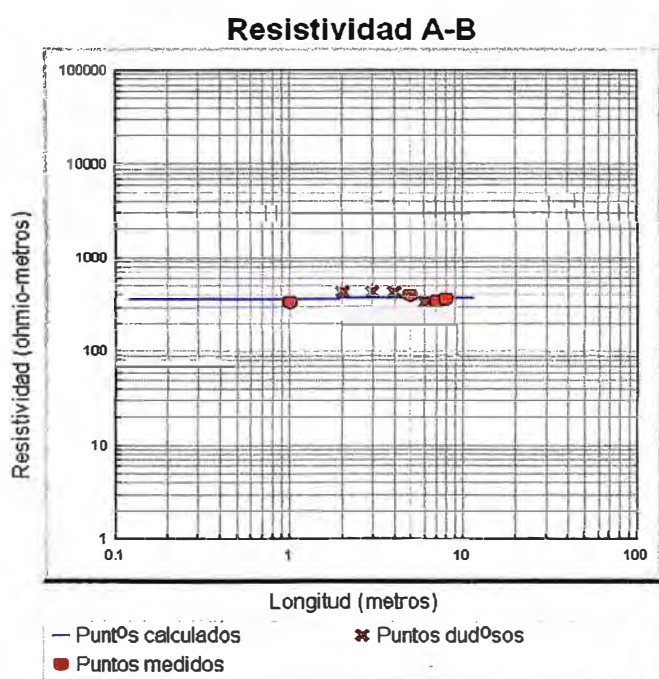


Fig.3.4 Gráfica del método de 2 capas, directriz A-B

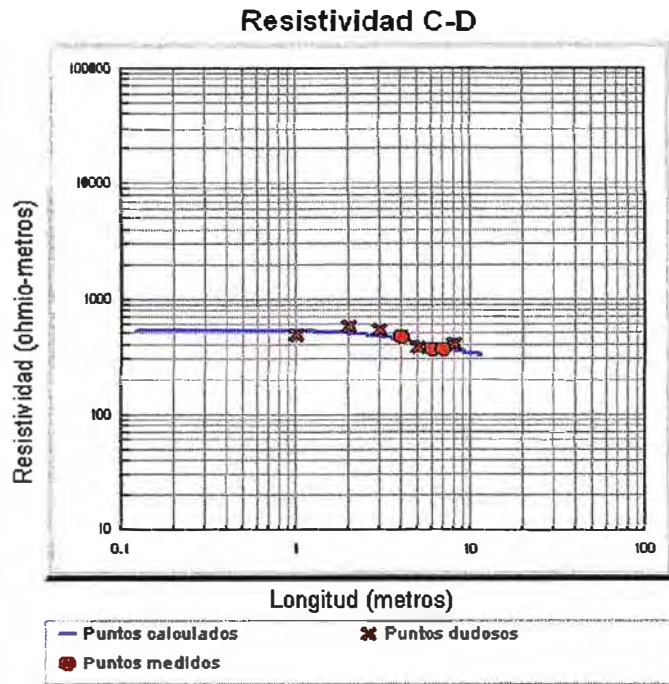


Fig.3.5 Gráfica del método de 2 capas, directriz C-D

Tabla N° 3.2 Valores de resistividad promedio del terreno

	Valor Resistividad (ohm - m)			
	Método de 1 Capa	Método de 2 Capas		
		1ra Capa	2da Capa	Profundidad 1ra Capa (m)
Directriz A-B	456.0	415	415	4.00
Directriz C-D	421.0	600	54	4.00

3.2.2, Resistencia de Tierra

Para la medición de Resistencia de la malla se utilizó el método de la curva de caída de potencial que es la recomendada por el Std. IEEE 81 – 1983 “Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground Systems” [5].

Los resultados de las mediciones se muestran a continuación en la tabla 3.3:

Tabla N° 3.3 Resultados de medidas de resistencia

Punto	Distancia C Electrodo de corriente malla de tierra (metros)	Distancia Ep Electrodo de potencial - malla de tierra (metros)		Resistencia (ohm)
1	300	10%C	30.0	1.52
2	300	30%C	90.0	2.04
3	300	50%C	150.0	2.15
4	300	60%C	180.0	3.50
5	300	62%C	186.0	4.00
6	300	65%C	195.0	4.35
7	300	70%C	210.0	6.33
8	300	80%C	240.0	4.49
9	300	90%C	270.0	5.35

Luego, aplicando el método de caída de potencial tenemos:

Tabla N° 3.4 Resistencia calculada

Resistencia calculada	Distancia C Electrodo de corriente malla de tierra (metros)	Distancia Ep Electrodo de potencial - malla de tierra (metros)	Resistencia (ohm)
62% de la distancia de Ec	300	186.0	4.00

3.3 Límites permisibles de tensión de toque y paso

Para el cálculo estimado de los límites de tensión de toque y de paso, se utilizaron los dos estándares más conocidos [1] y [2], para lo cual se consideraron los siguientes datos:

Para la resistividad superficial, se están considerando una capa de piedra molida (grava) de 0,15 m de espesor y, conforme lo indicado en la Tabla 3.5 extraída de [1] se considera un valor de 1200 Ohm-metro (grava húmeda, debido a las constantes lluvias en la zona).

Tabla N° 3.5 Valores de resistividad superficial

Number	Description of surface material (U.S. state where found)	Resistivity of sample $\Omega \cdot m$	
		Dry	Wet
1	Crusher run granite with fines (N.C.)	140×10^6	1300 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
2	1.5 in (0.04 m) crusher run granite (Ga.) with fines	4000	1200 (rain water, 100 W)
3	0.75–1 in (0.02–0.025 m) granite (Calif.) with fines	—	6513 (10 min after 45 $\Omega \cdot m$ water drained)
4	#4 (1–2 in) (0.025–0.05 m) washed granite (Ga.)	1.5×10^6 to 4.5×10^6	5000 (rain water, 100 $\Omega \cdot m$)
5	#3 (2–4 in) (0.05–0.1 m) washed granite (Ga.)	2.6×10^6 to 3×10^6	10 000 (Rain water, 100 $\Omega \cdot m$)
6	Size unknown, washed limestone (Mich.)	7×10^6	2000–3000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
7	Washed granite, similar to 0.75 in (0.02 m) gravel	2×10^6	10 000
8	Washed granite, similar to pea gravel	40×10^6	5000
9	#57 (0.75 in) (0.02 m) washed granite (N.C.)	190×10^6	8000 (ground water, 45 $\Omega \cdot m$)
10	Asphalt	2×10^6 to 30×10^6	10 000 to 6×10^6
11	Concrete	1×10^6 to 1×10^9 ^a	21 to 100

^aOven dried concrete (Hammond and Robson [B78]). Values for air-cured concrete can be much lower due to moisture content.

Para los datos de corriente de falla a tierra máxima y tiempo de despeje de esta falla, se están considerando los valores proporcionados por la empresa dueña de la subestación, los cuales se indican en la tabla N° 3.6

Tabla N° 3.6 Valores de corriente máxima de falla y tiempo de despeje

CORRIENTE MÁXIMA DE FALLA (kA)	TIEMPO DESPEJE DE FALLA	
	RELÉ DE DISTANCIA (seg)	RELÉ DE RESPALDO (seg)
3,55	0,12	0,22

Para estas consideraciones, calcularemos los niveles permisibles de tensión de toque y de paso para una persona de 50 kg que es la condición más desfavorable.

De acuerdo a [1], recordando las fórmulas de cálculo:

$$E_{step50} = (1000 + 6C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.3)$$

$$E_{touch50} = (1000 + 1.5C_s \times \rho_s) \times \frac{0.116}{\sqrt{t_s}} \quad (3.4)$$

$$C_s = 1 - \frac{0.09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{2h_s + 0.09} \quad (3.5)$$

Donde:

E_{step} es la tensión de paso en V

E_{touch} es la tensión de toque en V

ρ_s es la resistividad del material en la superficie del terreno en Ω -m

ρ es la resistividad del terreno en Ω -m

h_s es la altura de la capa superficial de terreno en m

t_s es la duración de la falla en segundos

Los límites permisibles son los siguientes:

Tabla N° 3.7 Límites permisibles de acuerdo al Std. IEEE 80-2000

TENSION DE TOQUE (Volt)		TENSION DE PASO (Volt)	
0,12 seg	0,22 seg	0,12 seg	0,22 seg
857.29	633.15	2424.56	1790.66

De igual manera, hagamos los cálculos considerando las recomendaciones de acuerdo a [2], recordando las fórmulas de cálculo:

Tensión de paso:

$$V_p = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right) \quad (3.6)$$

Tensión de toque:

$$V_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1.5\rho_s}{1000} \right) \quad (3.7)$$

Donde:

- K = 72 y n = 1 para tiempos inferiores a 0.9 segundos.
- K = 78.5 y n = 0.18 para tiempos superiores a 0.9 segundos e inferiores a 3 segundos.
- t = duración de la falta en segundos.

Para tiempos comprendidos entre 2 y 5 segundos la tensión de contacto aplicada no sobrepasará los 64 v. para tiempos superiores a 5 segundos la tensión de contacto aplicada no será superior a 50 v.

Los límites permisibles son los siguientes:

Tabla N° 3.8 Límites permisibles de acuerdo a MIERAT 13

TENSION DE TOQUE (Volt)		TENSION DE PASO (Volt)	
0,12 seg	0,22 seg	0,12 seg	0,22 seg
1003.87	547,56	22154,64	12084,35

Los resultados mostrados en las tablas N° 3.7 y 3.8, son los calculados de acuerdo a los valores de los parámetros del terreno recopilados en campo, siguiendo las recomendaciones de los estándares más conocidos: (IEEE 80-2000 y MIERAT 13).

De igual forma, debemos de calcular los potenciales producidos por la puesta a tierra durante la falla, para lo cual, utilizamos el método sugerido por [1], que se muestran en las ecuaciones (3.8) y (3.9):

Tensiones de Toque producidos por la corriente de falla en la malla:

$$V_{TR} = K_M K_i \frac{\rho I_F}{L_M} \quad (3.8)$$

Tensiones de Paso producidos por la corriente de falla en la malla:

$$V_{PR} = K_S K_i \frac{\rho I_F}{L_S} \quad (3.9)$$

Donde:

$$K_M = \frac{1}{2\pi} \left[\text{Ln} \left(\frac{D^2}{16Hb} + \frac{(D+2H)^2}{8Db} - \frac{H}{4b} \right) + \frac{K_r}{\sqrt{1+H}} \text{Ln} \left(\frac{8}{\pi(2n-1)} \right) \right] \quad (3.10)$$

$$K_S = \frac{1}{\pi} \left(\frac{1}{2H} + \frac{1}{D+H} + \frac{1}{D} (1-0.5^{n-2}) \right) \quad (3.11)$$

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (3.12)$$

$$K_r = \frac{1}{(2n)^{2/n}} \quad (3.13)$$

K_M : Factor de espaciamento, para tensión de Toque.

K_S : Factor de espaciamento, para tensión de Paso.

K_i : Factor de corrección debido a la geometría de la malla.

K_r : Factor de corrección debido al efecto de las jabalinas.

ρ : Resistividad equivalente del terreno.

I_F : Máxima corriente de falla.

L_M : Longitud efectiva para tensión de Toque.

L_S : Longitud efectiva para tensión de Paso.

D : Espaciamento entre conductores paralelos.

H : Profundidad de enterramiento de los conductores de tierra.

b : Diámetro del conductor de la malla.

Reemplazando estos valores en las ecuaciones 3.8 y 3.9, obtenemos los valores producidos por la puesta a tierra durante la falla, los cuales se muestran en la tabla 3.9:

Tabla N° 3.9 Potenciales producidos por la Puesta a Tierra durante la falla

TENSION DE TOQUE (Volt)	TENSION DE PASO (Volt)
1780.00	888.69

Estos valores serán comparados con los valores admisibles, así como con los valores medidos en campo.

CAPITULO IV

TENSIONES DE TOQUE Y PASO DE LA RED DE PUESTA A TIERRA

4.1 Método de medición

Para medir las tensiones de toque y de paso en una instalación en principio únicamente sería necesario lo siguiente:

- Provocar un defecto a tierra en la instalación y medir las tensiones.
- Medir, mediante un voltímetro adecuado y electrodos normalizados, las tensiones resultantes.

Todo lo anterior cumple enteramente con lo indicado por la reglamentación española MIE-RAT 13, así como por la normativa internacional IEEE 80-2000, pero cuenta con el inconveniente de que no es factible provocar un defecto en la instalación para poder medirla. Por consiguiente, es necesario buscar métodos alternativos que nos permitan simular el defecto.

Esta simulación se consigue inyectando una corriente alterna a través de la red de tierra que vamos a medir y considerando que las tensiones obtenidas son proporcionales a la corriente inyectada.

Este método está generalmente aceptado y únicamente existe un ligero inconveniente que debemos salvar: las corrientes erráticas.

Efectivamente, en una red de tierra de una instalación de A.T. existen normalmente corrientes erráticas debidas a distintas causas como las corrientes de fuga de los aisladores de las líneas y las corrientes de desbalance de carga y homopolares de equipos, corrientes capacitivas, corrientes geomagnéticas, etc.

Estas corrientes al introducirse en el circuito de medida pueden producir mediciones anormales de Tensiones de Toque y Paso atribuibles a la instalación, pero en valores generalmente muy reducidos.

En el momento en que ocurra una falla en la instalación, las tensiones producidas por las corrientes erráticas no tendrán absolutamente ninguna relevancia respecto a las producidas por la falla. Sin embargo, cuando nosotros hacemos una inyección reducida de corriente para simular la falla, las tensiones producidas por las corrientes erráticas a veces pueden ser muy significativas respecto a la que nos produce nuestra inyección e incluso de un valor superior a éstas (cuando se utilizan instrumentos portátiles clásicos); entonces al extrapolar los valores a la corriente de falla arrastraríamos los consiguientes errores en los resultados obtenidos.

Para evitar esto, la MIE-RAT 13 indica que debe aplicarse una corriente de inyección de, al menos, el 1 por 100 de la corriente para la que ha sido diseñada la instalación o bien utilizar un método que elimine el efecto de las corrientes parásitas.

Evidentemente cuanto más elevada sea la corriente de inyección, menos influyen las corrientes erráticas. Sin embargo, no es fácil alcanzar el 1% de la corriente de defecto de la red ya que puede representar algunos centenares de amperios en muchas instalaciones.

El método entonces a utilizar debe conseguir la eliminación de los efectos de las corrientes erráticas, y eso se consigue haciendo para cada medida dos inyecciones de corriente alterna del mismo valor absoluto pero desfasados 180° y realizando tres lecturas de Tensión de Toque y Paso:

V_0 : Medida de Tensión sin inyección de corriente (debido a las corrientes erráticas)

V_+ : Medida de Tensión con la primera inyección de corriente.

V_- : Medida de Tensión con la segunda inyección de corriente desfasada 180°

Con estas tres medidas se puede determinar fácilmente la tensión producida por la inyección, eliminando los efectos de las corrientes erráticas. Para ello es necesario únicamente resolver el problema geométrico que se describe en la Fig.4.1.

Donde:

V = Tensión esperada sin corrientes erráticas.

V_+ = Tensión medida con inyección de corriente en un sentido.

V_- = Tensión medida con inyección de corriente en el otro sentido (desfasada 180°)

V_o = Tensión medida sin inyección de corriente, debido a las corrientes erráticas.

De los fasores indicados en la Fig.4.1, se tiene:

$$V_+^2 = V_o^2 + V^2 - 2VV_o \cos(\alpha) \quad (4.1)$$

$$V_-^2 = V_o^2 + V^2 - 2VV_o \cos(\beta) \quad (4.2)$$

Sumando ambas ecuaciones, se tiene:

$$V_+^2 + V_-^2 = 2V_o^2 + 2V^2 \quad (4.3)$$

ya que $\cos(\alpha) = -\cos(\beta)$

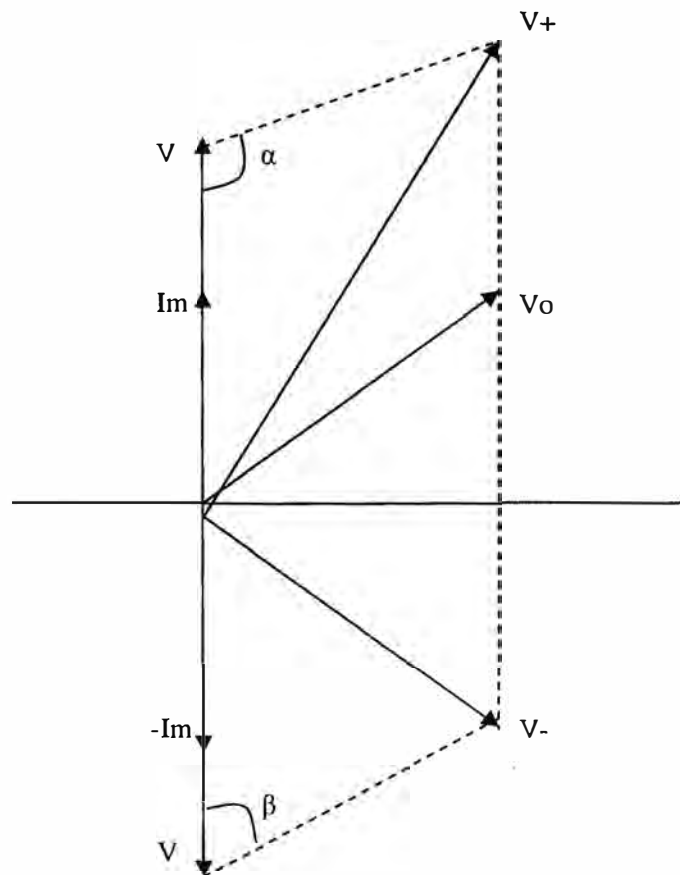


Fig.4.1 Representación matemática del método de medición

4.1.1 Procedimiento de medición

El equipo de medición utilizado: LET – 60 – VPC simula las corrientes de fallas a tierra entre la puesta a tierra de las estructuras bajo prueba y el electrodo auxiliar instalado para tal fin. Este electrodo auxiliar se instala lo suficientemente alejado de la puesta a tierra en estudio, con la finalidad de que las superficies equipotenciales generadas por la corriente de falla inyectadas no se superpongan.

- Primero, tomamos medida de las Tensión entre los electrodos de medición al inyectar una corriente alterna adecuada.
- Segundo, tomamos medida de la Tensión entre los mismos electrodos de medición, pero esta vez inyectando una corriente del mismo valor, pero desfasada 180° con respecto a la anterior.
- Por último, se toma medida de la Tensión entre los electrodos, pero esta vez sin ninguna inyección de corriente.

La falla a tierra simulada provoca la aparición de tensiones al circular por la Resistencia del suelo. El esquema de medición lo podemos apreciar en las figuras 4.2 y 4.3.

Esta Resistencia del suelo presenta la particularidad de ser elevada en las proximidades de los electrodos y de un valor despreciable en puntos alejados de los electrodos (en la práctica, las caídas de tensión más allá de un metro de la ubicación del electrodo suelen ser despreciables).

Una forma sencilla de observar la anterior particularidad, es imaginarse el electrodo de tierra, formado por una sola pica e imaginarse la resistencia de tierra como formada por la superposición de cilindros huecos de un mismo espesor pero que van aumentando de diámetro. Según esto la Resistencia de tierra sería la suma de la Resistencia de estos cilindros. Al ser todos los cilindros de igual espesor, la resistencia del cilindro más próximo a la pica (al ser menor su sección en contacto con la pica) presentará una Resistencia mayor que el cilindro más alejado de la pica. Como consecuencia de esta particularidad, al circular la corriente de falla por la resistencia de estos cilindros, las tensiones que aparecen entre la superficie interna y la superficie externa de estos cilindros,

de igual espesor, será mayor en los cilindros próximos al electrodo que en los cilindros alejados al electrodo.

Debido a esta circunstancia, si una persona estuviese en contacto por un lado con el electrodo o cualquier masa metálica con el mismo potencial y por otro con uno de estos cilindros imaginarios, estaría sometida a una diferencia de tensiones la cual sería máxima cuando el cilindro imaginario estuviese muy alejado del electrodo, dado que hubiese que sumar la resistencia de todos los cilindros internos hasta el electrodo, y al ser la resistencia “puenteada” por la persona máxima, también lo sería la tensión a que estaría sometido ante una falla a tierra.

Esta última circunstancia se da en las llamadas tensiones transferidas que se originan al dar toma de tierra a masas metálicas alejadas del electrodo de tierra, de esta forma lo que en realidad se está haciendo es acercar a las proximidades de un cilindro alejado del electrodo, una masa metálica con el mismo potencial que el electrodo.

La medición efectuada se ajusta a lo especificado por MIE-RAT 13 y consiste básicamente en efectuar un muestreo de cada instalación bajo las condiciones de falla apuntadas. Para ello se determina mediante un voltímetro de resistencia interna 1000Ω (aproximadamente el valor de la resistencia del cuerpo humano) el valor de la tensión que aparece entre unas pesas, de 25 kg cada una, que simulan los pies de una persona (tensiones de paso aplicadas, Fig. N° 4.2) o el valor de la tensión que aparece entre estas pesas y masas metálicas (tensiones de toque aplicadas, Fig. N° 4.3).

En las mediciones realizadas, se tomó las tensiones de paso en los ejes perpendiculares de cada estructura y como mínimo se tomara dos puntos de paso, con una distancia de un metro entre electrodos. En el caso de tensiones de toque se tomaron medida en los ejes perpendiculares de cada estructura con una distancia de un metro entre electrodos al punto de toque.

Dichas medidas se realizaron a solicitud de la supervisión, dado que ellos querían conocer los niveles de tensiones de toque y paso en todas las estructuras del patio de la central,

MEDIDA DE LA TENSION DE PASO

$$V_p = \frac{V_m \cdot I_{max}}{I_p}$$

I_{max} = Máxima corriente de falta calculada.

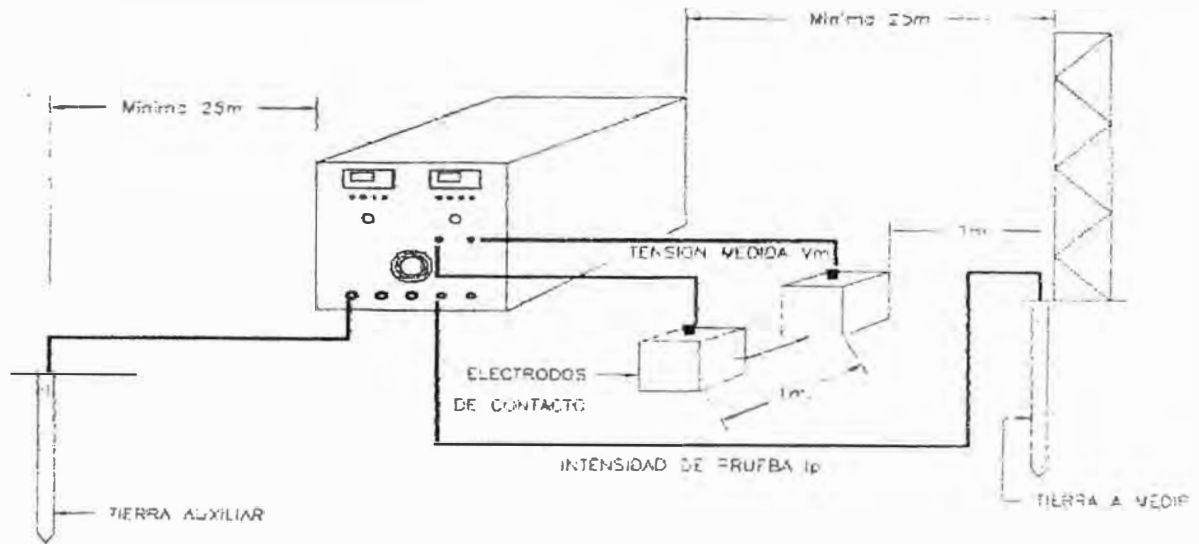


Fig.4.2 Esquema de conexión para medición de tensión de paso

MEDIDA DE LA TENSION DE CONTACTO

$$V_c = \frac{V_m \cdot I_{max}}{I_p}$$

I_{max} = Máxima corriente de falta calculada.

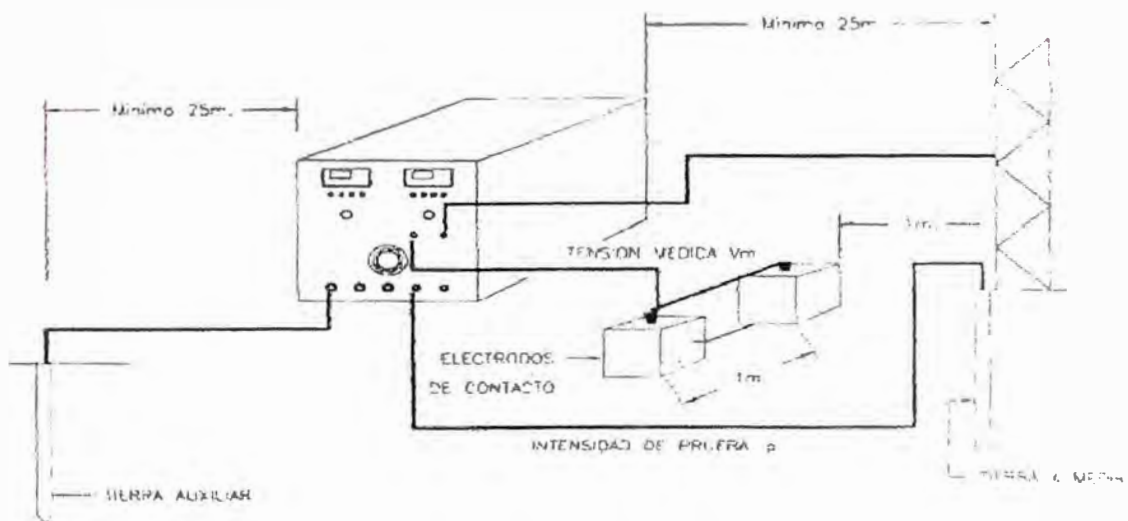


Fig.4.3 Esquema de conexión para medición de tensión de toque

4.2 Resultado de medidas aplicadas

En base al procedimiento de medición descrito en el subcapítulo anterior, se obtuvieron una serie de resultados para las distintas estructuras.

Los valores de corriente inyectados se encontraban alrededor de los 10 Amp. (en ciertos suelos, es muy difícil llegar a estos valores) y los valores medidos de tensión en el instrumento para esta corriente inyectada eran del orden de los milivoltios.

Para el cálculo de las tensiones de Toque y Paso que aparecerían al momento de una falla se procedía de la siguiente manera:

$$V_T = \frac{V_M \times I_F}{I_P} \quad (4.4)$$

$$V_P = \frac{V_M \times I_F}{I_P} \quad (4.5)$$

Donde:

V_T : Tensión de Toque calculada en V.

V_P : Tensión de Paso calculada en V.

V_M : Tensión leída en el instrumento en mV.

I_F : Corriente de falla en kA.

I_P : Corriente de prueba en A.

Para este caso la corriente de falla es de 3.55 kA.

Los resultados obtenidos de las mediciones se resumen en la tabla N° 4.1 para tensiones de paso y tabla N° 4.2 para tensiones de toque.

Tabla N° 4.1 Valores medidos de tensión de paso

Zona de medición	Superficie de Medición	Rango de Valores (Volts)
Pararrayos L/Pachachaca	Grava / Concreto	Max 7.12 Min 6.07
Transformadores de Tensión L/Pachachaca	Grava / Concreto	Max 7,11 Min 6.20
Seccionador L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 9,06 Min 7.79
Pórtico Línea Pachachaca-Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 8.74 Min 6.32
Transformadores de Corriente L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 8.84 Min 6.95
Interruptores L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 8.59 Min 7.06
Pórtico de Barras	Grava / Concreto	Max 9.16 Min 6.06
Extintor de Incendios	Grava / Concreto	Max 7.96 Min 6,28
Seccionador de Barra L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 9.06 Min 3.83
Tablero Centralización Circuitos L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 9.05 Min 8.05
Soporte fase R	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 8.81 Min 7.84
Pararrayos L/Chimay	Grava / Concreto	Max 7,35 Min 5.82
Transformadores de Tensión L/Chimay	Grava / Concreto	Max 7.53 Min 6.29
Seccionador L/Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 7.45 Min 4.70
Transformadores de Corriente L/Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 7,54 Min 6.60
Interruptores L/Chimay	Grava / Concreto	Max 7.51 Min 6.18
Tablero Centralización Circuitos L/Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 8.21 Min 7.85
Seccionador de Barra L/Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 7,89 Min 6.56
Soportes de Barra	Grava / Concreto	Max 7.84 Min 6.47
Transformador de Tensión de Barra Fase S	Grava / Concreto	Max 7.04 Min 6.66
Secc. de Barra de Celda de Transf. de Potencia	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 7.22 Min 6.12

Interruptores de Transf. de Potencia	Grava/ Concreto	Max 6,82 Min 5,82
Tablero de Centralización Circuitos del Transf. de Potencia	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 6,54 Min 6,94
Transformadores de Corriente del Transf. de Potencia	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 6,98 Min 5,66
Transformadores de Tensión del Transf. de Potencia	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Max 7,52 Min 6,72
Pararrayos del Transf. de Potencia	Grava/ Concreto	Max 7,47 Min 6,54
Transformador de Potencia	Grava/ Concreto	Max 7,44 Min 6,74
Tanque Auxiliar de Sistema Contra Incendio	Grava/ Concreto	Max 8,26 Min 4,72
Tanque Combustible Grupo Diesel	Concreto	Max 7,29 Min 6,99
Puertas Ingreso a Casa Maquinas	Concreto	Max 7,57 Min 6,89
Comprensoras de Aire Acondicionado	Concreto	Max 7,92 Min 6,93
Reja pasamano	Concreto	Max 7,69 Min 6,76
Estructura de Alumbrado	Concreto/ Grava / Gras	Max 22,13 Min 7,04
Torre metálica de antena UHF	Tierra/Gras	Max 9,23 Min 6,51
Torre metálica de antena Microondas	Gras	Max 8,47 Min 6,96
Torre metálica de Antena VHF	Gras	Max 15,10 Min 6,87
Postes M.T.	Gras	Max 15,90 Min 9,61
Reja de Seguridad	Grava / Gras Concreto	Max 18,15 Min 6,70

Medición efectuada entre el 12 al 15 de noviembre, con una temperatura ambiental promedio de 25,18 ° C y humedad relativa de 62,12%.

Tabla N° 4.2 Valores medidos de tensión de toque

Zona de medición	Área de medición		Rango de Valores (Volts)
	Superficie de Medición	Punto de contacto	
Pararrayos L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,41 Min 6,10
Transformadores de Tensión L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,85 Min 6,74
Seccionador L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,81 Min 7,57
Pórtico Línea Pachachaca-Chimay (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 9,13 Min 6,37
Transformadores de Corriente L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 9,49 Min 4,44
Interruptores L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,98 Min 7,78
Pórtico de Barras (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 8,77 Min 5,78
Extintor de Incendios	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,53 Min 5,65
Seccionador de Barra L/Pachachaca (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 9,58 Min 8,75
Tab. Centralización Circuitos L/Pachachaca	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,12 Min 8,12
Soporte fase R (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,52 Min 7,90
Pararrayos L/Chimay (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,74 Min 6,75
Transformadores de Tensión L/Chimay (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,33 Min 6,44
Seccionador L/Chimay (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 7,49 Min 6,62
Transformadores de Corriente L/Chimay (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 7,90 Min 6,76
Interruptores L/Chimay (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,42 Min 6,33
Tablero Centralización Circuitos L/Chimay	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,16 Min 8,07
Seccionador de Barra L/Chimay (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 8,56 Min 6,82
Soportes de Barra (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,71 Min 6,58
Transformador de Tensión de Barra Fase S (*)	Grava / Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 6,82 Min 6,49
Secc. de Barra de Celda de Transf. de Potencia (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 6,86 Min 5,96

Interruptores de Transf. de Potencia (*)	Grava/ Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 6,53 Min 5,42
Tablero de Centralización Circuitos del Transf. de Potencia	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 6,51 Min 6,18
Transformadores de Corriente del Transf. de Potencia (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 7,81 Min 5,33
Transformadores de Tensión del Transf. de Potencia (*)	Grava / Concreto / Tapa Metálica	Estructura metálica con pintura	Max 7,56 Min 6,20
Pararrayos del Transf. de Potencia (*)	Grava/ Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,11 Min 6,72
Transformador de Potencia	Grava/ Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,25 Min 6,35
Tanque Auxiliar de Sistema Contra Incendio	Grava/ Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 8,21 Min 6,37
Tanque Combustible Grupo Diesel	Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,17 Min 7,71
Puertas Ingreso a Casa Maquinas	Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 8,03 Min 7,13
Comprensoras de Aire Acondicionado	Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 7,93 Min 6,98
Reja pasamano	Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 8,45 Min 6,62
Estructura de Alumbrado	Concreto/ Grava/Gras	Estructura metálica con pintura	Max 8,89 Min 6,84
Torre metálica de antena UHV	Tierra/Gras	Estructura metálica con pintura	Max 8,06 Min 6,73
Torre metálica de antena Microondas	Gras	Estructura metálica con pintura	Max 7,08 Min 6,55
Torre metálica de Antena VHF	Gras	Estructura metálica con pintura	Max 9,86 Min 6,62
Postes M.T.	Gras	Estructura metálica con pintura	Max 19,30 Min 12,14
Reja de Seguridad (*)	Grava/Gras Concreto	Estructura metálica con pintura	Max 8,22 Min 5,07

Medición efectuada entre el 12 al 15 de noviembre, con una temperatura ambiental promedio de 25,18° C y humedad relativa de 62,12%.

Adicionalmente a la medición sobre la superficie con pintura, se realizó una medición de toque en la bajada de tierra que simula punto de contacto en la estructura sin pintura.

Las mediciones de tensión de toque se realizaron sobre la superficie de las estructuras con pintura, a pedido de la supervisión, por ser una condición real de trabajo.

4.3. Resultados por modelamiento de la red de puesta a tierra

Para la simulación de las tensiones de toque y de paso se ha empleado el software especializado para el análisis de redes de tierra CYMGRD.

Las principales características técnicas de CYMGRD son:

- Análisis por elementos finitos de los conductores de malla de tierra, varillas y conexión de cables.
- Modelo de suelo uniforme o de dos capas, con mediciones de campo.
- Cálculos de evaluación de la seguridad para las máximas tensiones de paso y contacto, basados en el Std. IEEE 80-2000.
- Análisis de la elevación del potencial de tierra (GPR).
- Soporta mallas simétricas o asimétricas de cualquier forma.
- Varillas de puesta a tierra ubicadas arbitrariamente.
- Capacidad de modelar electrodos de retorno.
- Análisis de potenciales de paso con despliegue a colores en representación 2D o 3D.

El software de análisis CYMGRD permite determinar las curvas equipotenciales de la elevación de potencial de tierra (GPR) y sobre esa base calcular los niveles de tensión de paso teóricos los cuales serán comparados con los niveles de tensión de paso permisibles de acuerdo al estándar internacional **IEEE – 80 – 2000, “Guide For Safety in AC Substation Grounding”**.

Los modelamientos de los sistemas de Puesta a Tierra corresponden a la distribución física de la malla.

En base a los tiempos de despeje de falla y los datos de resistividad del terreno calculada y la resistividad superficial, se obtienen los siguientes resultados, basados en la simulación:

Soil analysis report

Station Name	Untitled
Project	INFORME

Study MALLA INFORME

Parameters

Title	CALCULO RESISTIVIDAD
Soil Model	Two-Layer
Safety Model	IEEE Std. 80-2000
Surface Layer Thickness	0.15 meters
Surface Layer Resistivity	1200 ohm-m
Shock Duration	0.12 secs
Body Weight	50 kg

Output Results

Upper Layer Thickness	4.0 meters
Upper Layer Resistivity	507.0 ohm-m
Lower Layer Resistivity	235.0 ohm-m
Maximum Permissible Touch	857.29 volts
Maximum Permissible Step Reduction Factor C	2424.56 volts 0.866731

Grid analysis report

Station Name	Untitled
Project Study	INFORME MALLA INFORME

Parameters

Upper Layer Thickness	4.0 meters
Upper Layer Resistivity	507 ohm-m
Lower Layer Resistivity	235 ohm-m

Output Results

Ground Potencial	7331.5 volts
------------------	--------------

Rise
 Calculated Ground
 Resistance 1.86932 ohms
 Equivalent
 Impedance 1.86897 ohms

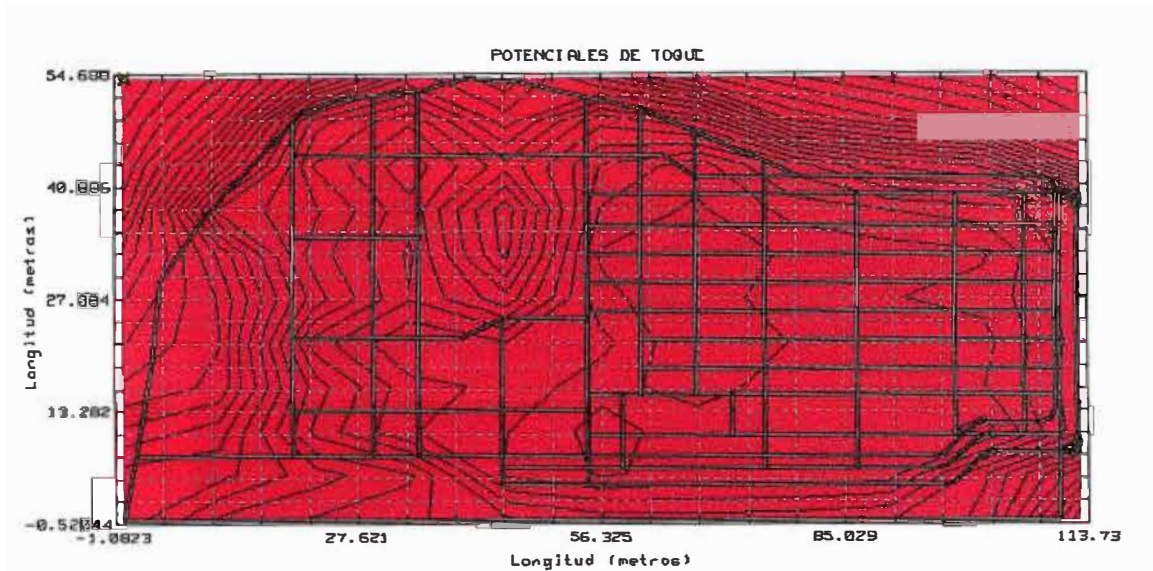


Fig.4.4 Valores de potenciales de toque 2D

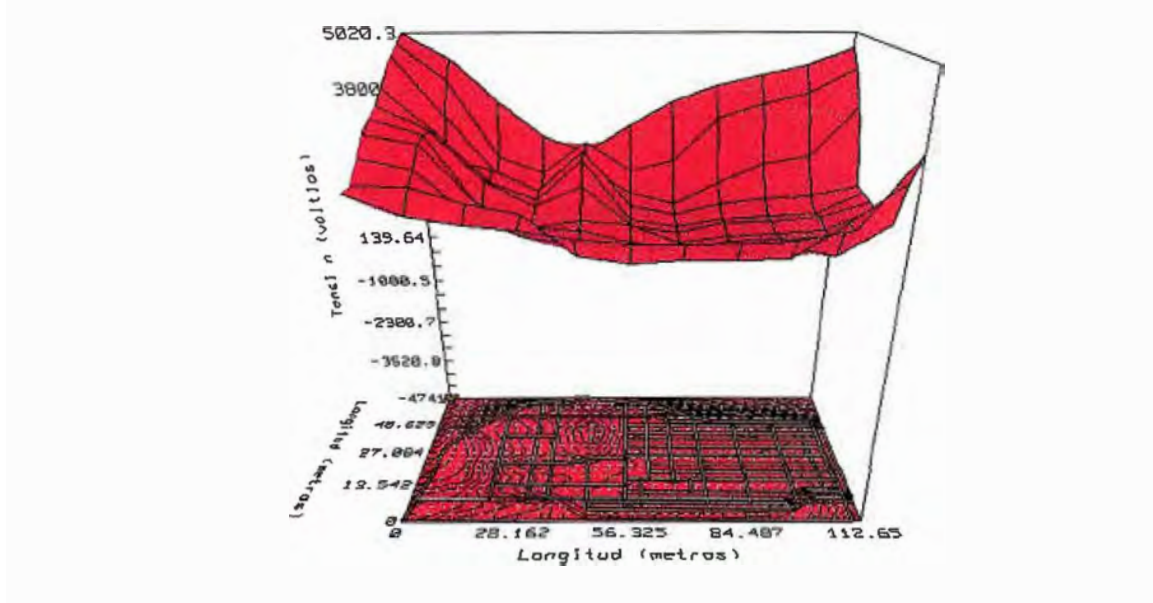


Fig.4.5 Valores de potenciales de toque 3D

Niveles de umbral del potencial de contacto

Tensión máxima de contacto 857.29 voltios

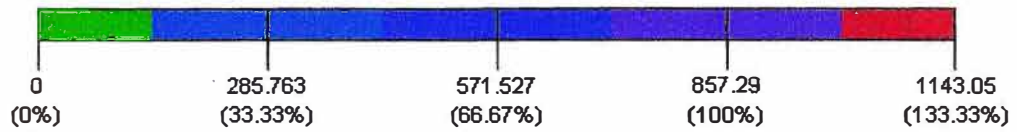


Fig.4.6 Umbrales de tensión de toque

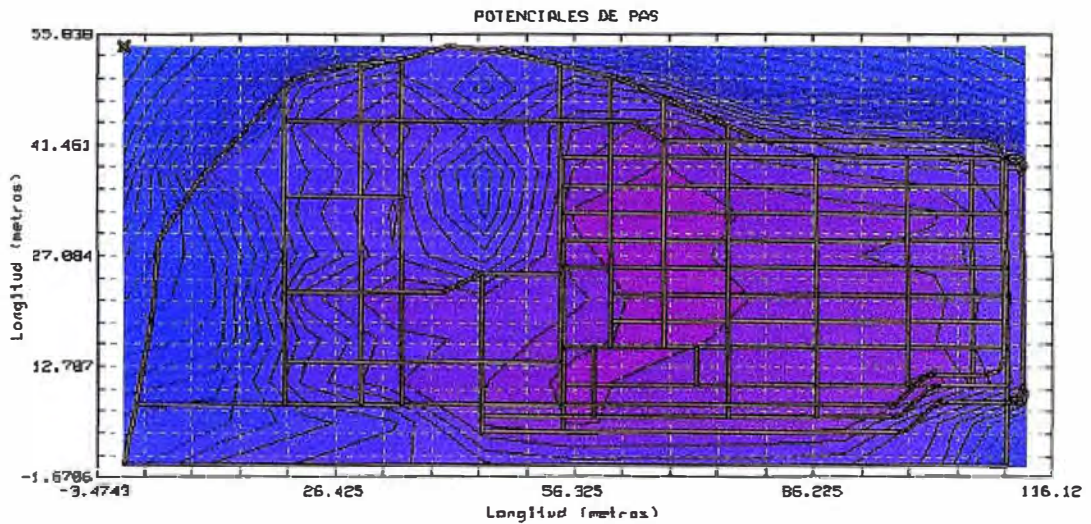


Fig.4.7 Valores de superficies equipotenciales 2D

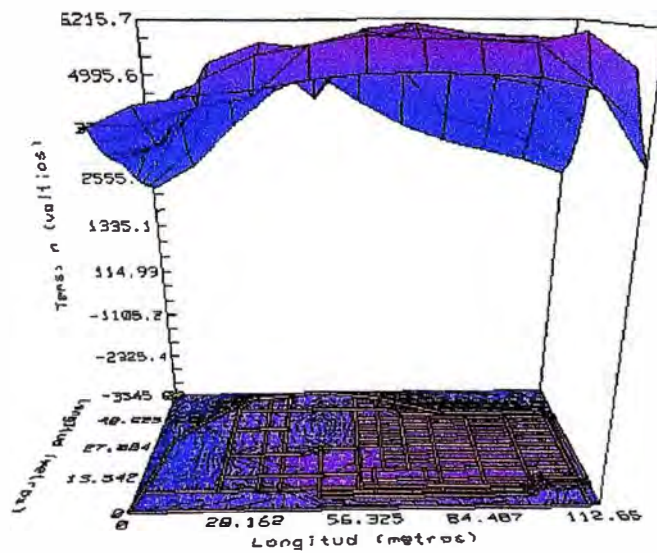


Fig.4.8 Valores de superficies equipotenciales 3D

Niveles de umbral del potencial de superficie

Elevación del potencial de tierra 7331.5 voltios

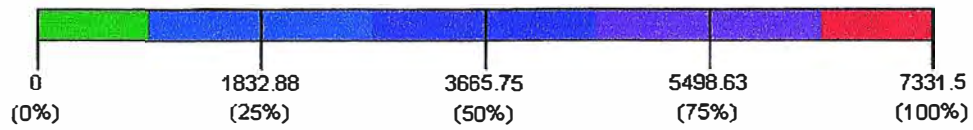


Fig.4.9 Umbrales de tensión de paso

Asimismo, trazando sobre la malla líneas verticales, horizontales y diagonales (las que simulan el recorrido de una persona caminando por encima de la malla), podemos verificar los niveles de tensión de toque y paso a las que estaría sometida una persona de acuerdo a lo simulado:

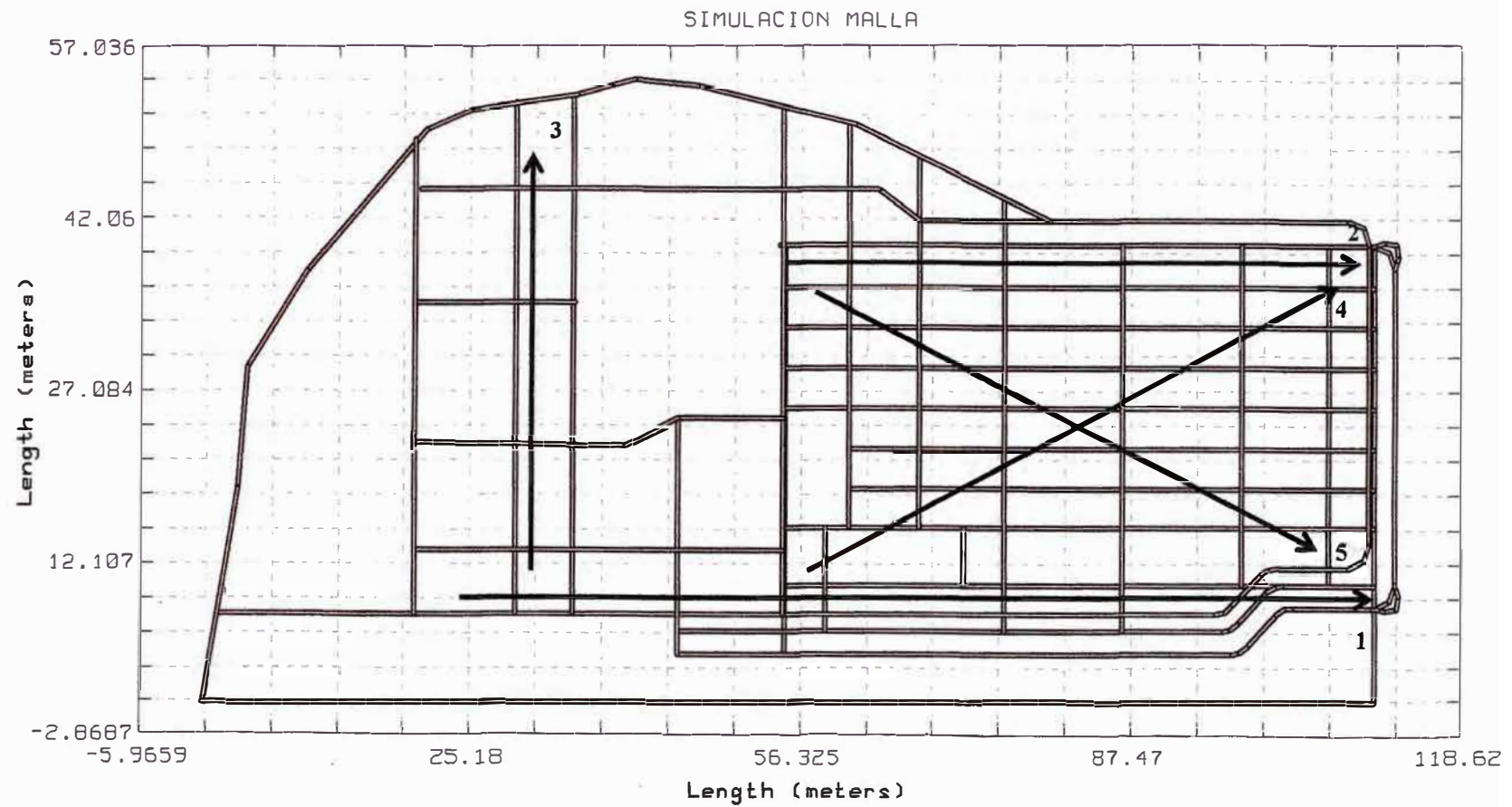


Fig.4.10 Malla de tierra simulada en software. Se indican 5 posibilidades de recorrido de una persona

- (1) RECORRIDO HORIZONTAL 1
- (2) RECORRIDO HORIZONTAL 2
- (3) RECORRIDO VERTICAL 1
- (4) RECORRIDO DIAGONAL 1
- (5) RECORRIDO DIAGONAL 2

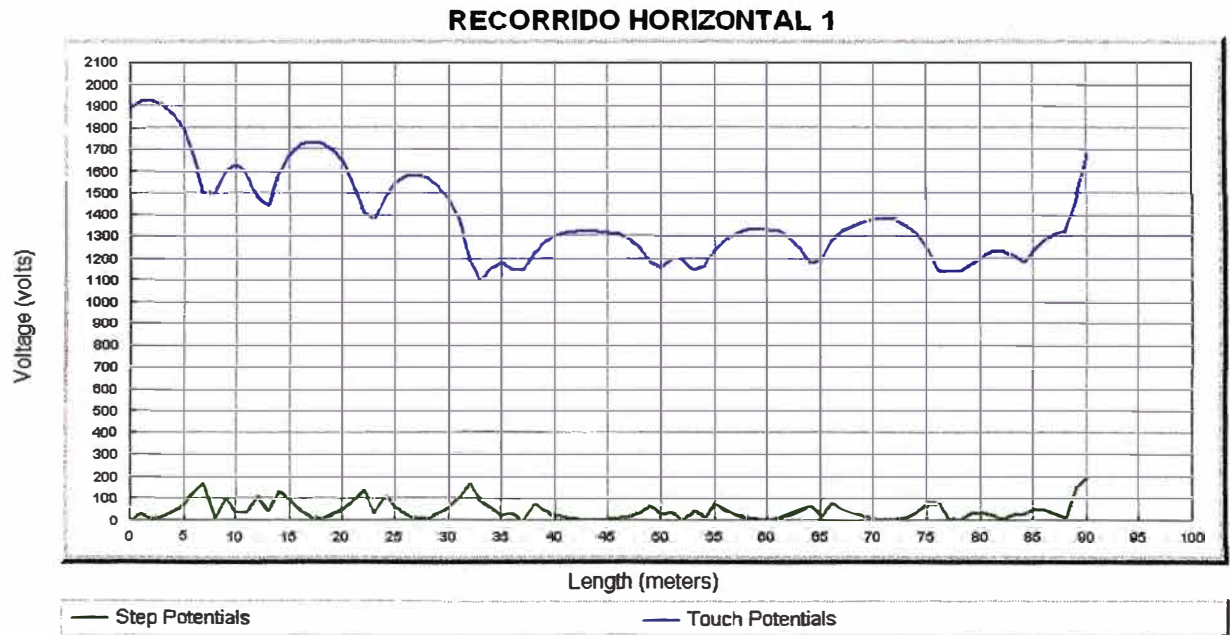


Fig.4.11 Tensiones de toque y paso para el recorrido horizontal 1

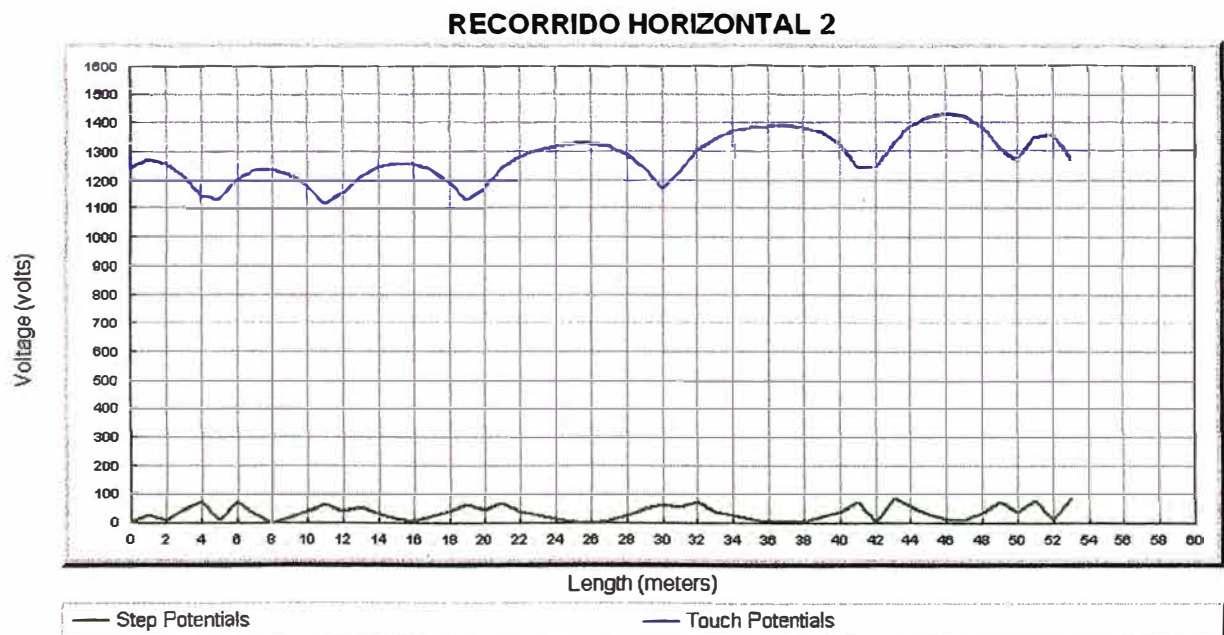


Fig.4.12 Tensiones de toque y paso para el recorrido horizontal 2

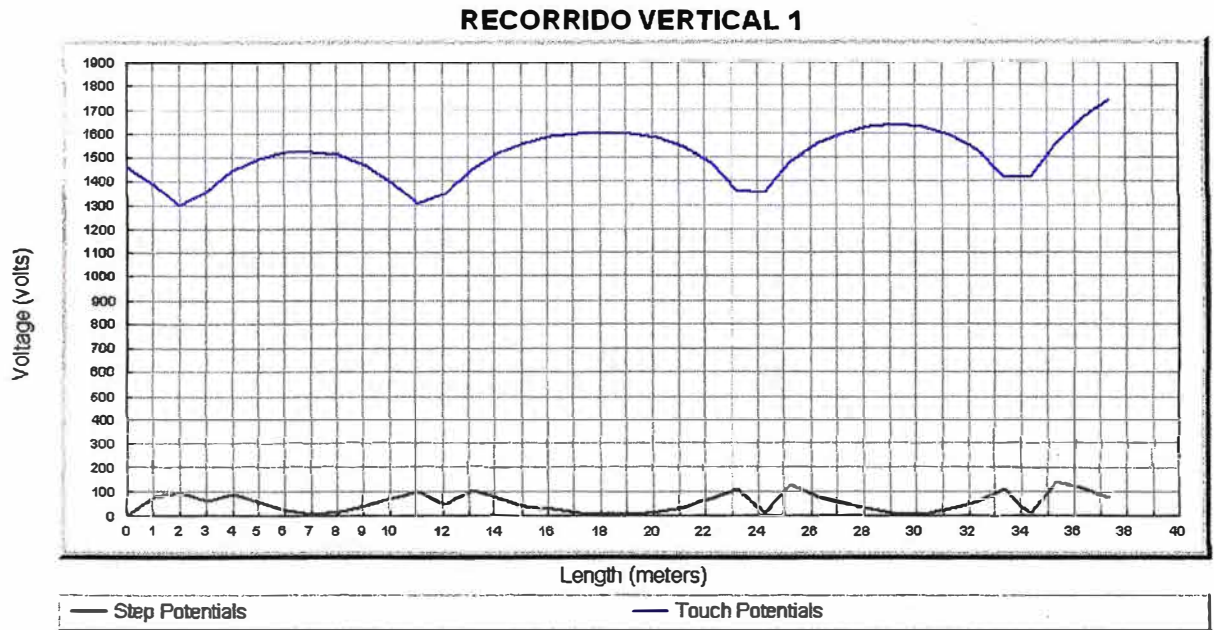


Fig.4.13 Tensiones de toque y paso para el recorrido vertical 1

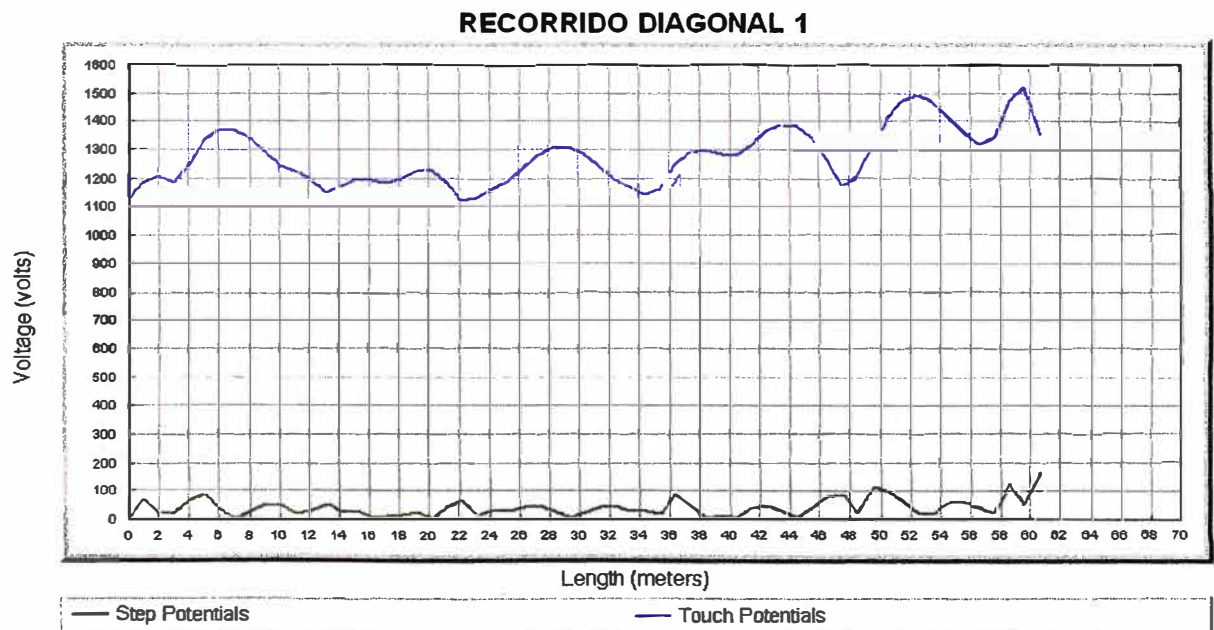


Fig.4.14 Tensiones de toque y paso para el recorrido diagonal 1

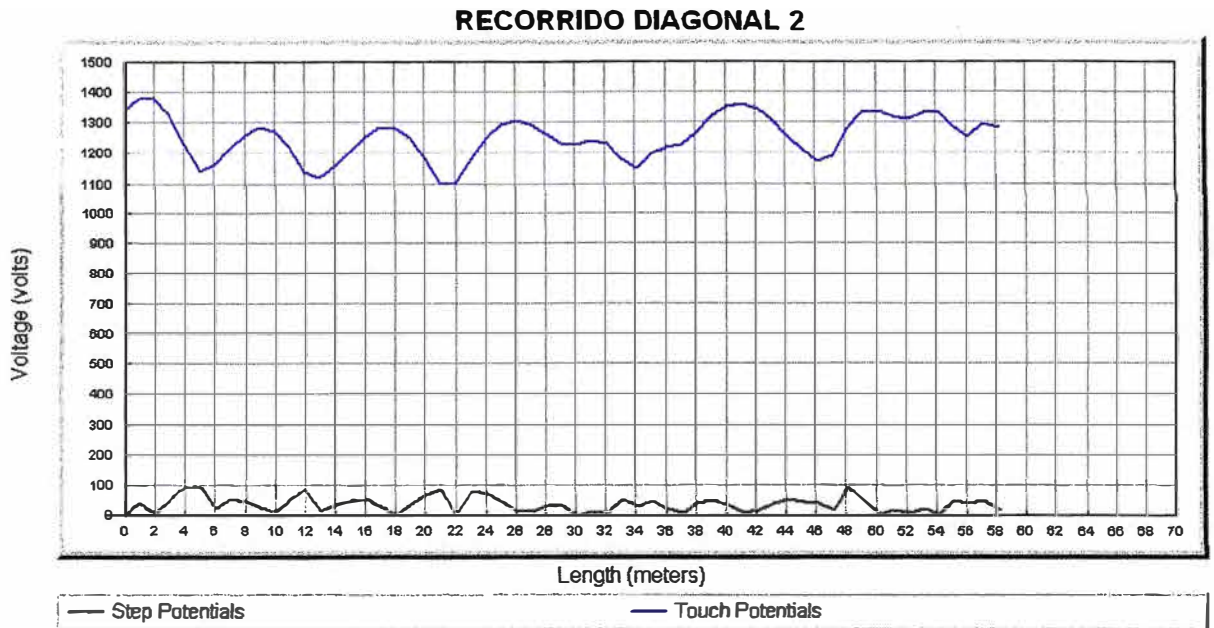


Fig.4.15 Tensiones de toque y paso para el recorrido diagonal 2

Si bien es cierto, se aprecia que los umbrales de tensión son elevados, en especial en las tensiones de toque, debemos de recordar que las tensiones a las que estarían sometidas una persona, es la tensión existente entre un metro de distancia como promedio.

4.4 Evaluación comparativa de los resultados

En esta sección presentaremos las siguientes comparaciones de los resultados obtenidos:

1. Compararemos los límites permisibles por los estándares IEEE 80-2000 y MIE-RAT 13 con los potenciales producidos por la puesta a tierra durante la falla (criterio de cálculo establecido en la IEEE 80-2000).
2. Haremos una comparación entre los valores medidos en campo y los criterios de la IEEE 80-2000 y MIE-RAT 13.
3. Finalmente realizaremos una comparación entre los valores medidos en campo y los valores obtenidos mediante simulación en software cymgrd.

Recordemos los límites calculados en el capítulo III:

Tabla N° 4.3 Límites permisibles de acuerdo al Std. IEEE 80-2000

TENSION DE TOQUE (Volt)		TENSION DE PASO (Volt)	
0,12 seg	0,22 seg	0,12 seg	0,22 seg
857.29	633.15	2424.56	1790.66

Tabla N° 4.4 Límites permisibles de acuerdo a MIERAT 13

TENSION DE TOQUE (Volt)		TENSION DE PASO (Volt)	
0,12 seg	0,22 seg	0,12 seg	0,22 seg
1003.87	547,56	22154,64	12084,35

Tabla N° 4.5 Potenciales producidos por la Puesta a Tierra durante la falla

TENSION DE TOQUE (Volt)	TENSION DE PASO (Volt)
1780.00	888.69

La tabla N° 4.5 nos muestra los valores calculados si hubiese una falla en la puesta a tierra, se puede observar que las tensiones de toque se encuentran encima de los límites admisibles dados por [1] y [2], mientras que las tensiones de paso si se encuentran dentro de los valores admisibles dados por los estándares [1] y [2]. Esta diferencia de valores se debe principalmente a que en los cálculos, se ha considerado que la malla no presenta electrodos verticales instalados en ningún punto, esto debido a que la empresa dueña de la subestación no contaba con los planos actualizados de la malla.

De los valores mostrados en la tabla N° 4.1, tabla N° 4.2, obtenemos las variaciones máximas y mínimas de tensiones de toque y paso para distancias de 1 metro. Estos valores son el resultado de las mediciones realizadas en campo mediante la inyección de corriente, la tabla N° 4.6 muestra los máximos valores medidos:

Tabla N° 4.6 Valores máximos y mínimos medidos en campo

	Valor Mínimo (Volt)	Valor Máximo (Volt)
Tensión de Toque	4.44	19.30
Tensión de Paso	3.83	22.13

Como se puede apreciar, estos valores se encuentran muy por debajo de los valores admisibles presentados en las tablas N° 4.3 y 4.4, que nos indica que la malla cumpliría su objetivo de proteger a una persona si se presentase una falla a tierra.

Así mismo, de los resultados de las simulaciones hechas en el software cymgrd, y que se muestran gráficamente en las fig. 4.11 a fig. 4.15, podemos concluir lo siguiente:

- Para tensiones de toque: a distancias menores de 1 metro, la diferencia de potencial se encuentra entre valores de 3 a 150V.
- Para tensiones de paso: a distancias menores a 1 metro, la diferencia de potencial se encuentra entre valores de 2 a 170V.

En ambos casos, tanto como para los valores medidos, como para los valores simulados, las tensiones de toque y paso no superan los límites establecidos por los estándares de la IEEE 80-2000, ni por la MIE-RAT 13.

La diferencia que existe entre los valores calculados y los valores medidos, se debe principalmente a que estamos considerando que la malla no presenta electrodos verticales en ningún punto. Esto se debe a que la empresa dueña de la subestación, no contaba con el plano que mostraba la ubicación de los mismos. Si se hubiese tenido la ubicación y cantidad de dichos electrodos, los valores medidos se asemejarían mucho a los valores simulados.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Para el cálculo de los valores de tensión de toque y paso, se ha considerado los datos mostrados en la tabla N° 3.6, entregados por la empresa dueña de la subestación.
2. Se han considerado para el cálculo de los límites permisibles de tensiones de toque y paso los estándares internacionales [1] y [2], El resultado de estos cálculos se muestran en las tablas N° 4.3 y 4.4.
3. La tabla N° 4.5 nos muestra los valores calculados si hubiese una falla en la puesta a tierra, se puede observar que las tensiones de toque se encuentran encima de los límites admisibles dados por [1] y [2], y mostrados en las tablas N° 4.4 y N° 4.5 mientras que las tensiones de paso si se encuentran dentro de los valores admisibles dados por los estándares [1] y [2]. Esta diferencia de valores se debe principalmente a que en los cálculos, se ha considerado que la malla no presenta electrodos verticales instalados en ningún punto, esto debido a que la empresa dueña de la subestación no contaba con los planos actualizados de la malla.
4. Las mediciones se han realizado, tomando en consideración lo recomendado por la normativa de España MIE-RAT 13, la cual nos da un procedimiento válido, que se debería de tener en cuenta para la realización de este tipo de mediciones en nuestro país.
5. El criterio del Código Nacional de Electricidad es muy pobre respecto a este tema tan importante, todas las recomendaciones nos remite a la tabla 52 de dicho código, la cual se transcribió en el capítulo II, tabla N° 2.1. Esta tabla basa su criterio en lo

especificado por la IEEE 80-2000. Algo muy rescatable de nuestro código es que se han dejado muchos Ítems vacíos, con la intención de que en un futuro estos puedan ser llenados por reglas nuevas respecto a estos temas.

6. Debemos precisar que las mediciones se efectuaron en el mes de noviembre del 2005, en condiciones ambientales promedio de 25°C y 62.1% de humedad relativa.
7. Los resultados de las mediciones, nos muestran que dicha instalación cumple con los límites establecidos por la IEEE 80-2000 y la MIE-RAT 13, esto quiere decir, que ante una condición de falla, las tensiones inducidas no serían peligrosas para una persona que se encuentre dentro de las instalaciones.
8. La diferencia entre los valores medidos y los valores simulados, se debe principalmente a que en la simulación, no se consideró la existencia de electrodos verticales, esto debido a la falta de información respecto a la ubicación de estos electrodos. Con este dato, los valores de las superficies equipotenciales hubieran disminuido, acercándose a lo medido.
9. En general se concluye que el método recomendado por la MIE-RAT 13 para la realización de mediciones de toque y paso es un método confiable y sencillo, no siendo necesario la inyección de corrientes elevadas para el cálculo de dichas tensiones y comprobando que estos valores guardan semejanza con los valores simulados.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda adoptar un criterio de medición de tensiones de toque y paso, la cual se deba de exigir antes de cada puesta en operación de una subestación, Línea de Transmisión, etc. A fin de comprobar si se cumple con los criterios de seguridad recomendados en el proyecto antes de la ejecución.
2. La normativa española MIE-RAT 13 nos da un criterio de medición segura y confiable, la cual debería ser corroborada en diferentes tipos de suelos, para poder tenerla como una referencia.
3. En general se debe tener presente las tensiones de toque y paso al instalar cualquier puesta a tierra, ya que como se ha demostrado en este informe, los accidentes dependen mucho de la magnitud de la corriente y el tiempo de duración de la falla.

ANEXOS

ANEXO A. Catalogo de Equipo Let 60 VPC**LET-60-VPC**

*Determinación de la Tensión
de Paso y Contacto*



SMC
S.M.C. S.p.A.



LET-60-VPC

CARACTERÍSTICAS

- Accesorios para medida incorporados.
- Inversión de la corriente de salida.
- Regulación: 0-60A / 6KVA.
- Medida de corriente: $\pm 0,5\%$.
- Medida de tensiones: $\pm 1\%$.

APLICACIONES

- Este equipo ha sido diseñado para el ensayo en circuitos de tierra para la determinación de las llamadas tensiones de paso y contacto de acuerdo con la Instrucción Técnica Complementaria MIERAT 13.



DESCRIPCIÓN

El equipo consta de dos partes bien diferenciadas, la parte de inyección y la parte de medida de tensión.

El primer sistema está resuelto mediante el empleo de un autotransformador variable de regulación continua conectado a un transformador productor de intensidad de diversos campos de salida. La corriente producida se mide a través de un sistema de shunt conectado a un instrumento digital. El sistema de inyección tiene la posibilidad de decelar 180 grados la corriente, en orden a anular los efectos de posibles corrientes parásitas errantes sobre el terreno.

El sistema de medida de tensión de paso y contacto está constituido por un voltímetro digital de 3 1/2 dígitos con una etapa de entrada diseñada especialmente para que su resistencia óhmica sea de 1K. La precisión del sistema se cifra en $\pm 1\%$.

ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Alimentación:	230V 50/60Hz
Salidas:	Salidas en 4 rangos: 0-6A (0-100V) 0-12A (0-50V) 0-24A (0-25V) 0-60A (0-10V)
Potencia Máxima:	6KVA de salida continua
MEDIDA DE TENSION	
Voltímetro digital:	3 1/2 dígitos tipo LED
Campos de medida:	4 campos de medida: 0-2V 0-20V 0-200V 0-2000V
Resistencia interna:	1K Ω en todos los campos
Precisión:	$\pm 1\%$ F.E.
MEDIDA DE CORRIENTE DE SALIDA	
Amperímetro digital:	3 1/2 dígitos tipo LED (1000mA)
Campos de medida:	4 campos de medida: 0-6A 0-12A 0-24A 0-60A

ACCESORIOS INCLUIDOS:

- 2 decenas de medida ("pie") de 20x100 mm de base y 20 Kg. de peso según norma.
- 2 cables de cable de 50 m. para prueba.
- Manual de instrucciones.

DIMENSIONES

Alt: 350 mm / 14" Ancho: 330 mm / 14" Fondo: 700 mm / 28" Peso: 85 Kg / 210 lb

OTRAS OPCIONES DISPONIBLES: LET-900-VPC. Equipo diseñado para medida en Subestación según la normativa (Instrucción Técnica Complementaria MIERAT 13). 90 KVA de potencia.

DISTRIBUIDO POR:

ANEXO B. Catalogo de Software Cymgrd



CYMGRD, Sistema de Puesta a Tierra para Subestaciones

CYMGRD, nuestra aplicación para el análisis y diseño de mallas de puesta a tierra de subestaciones ha sido diseñada especialmente para ayudar a optimizar el diseño de nuevas mallas y reforzar las existentes, de cualquier conformación, gracias a sus funciones integradas fáciles de usar de evaluación de puntos peligrosos.

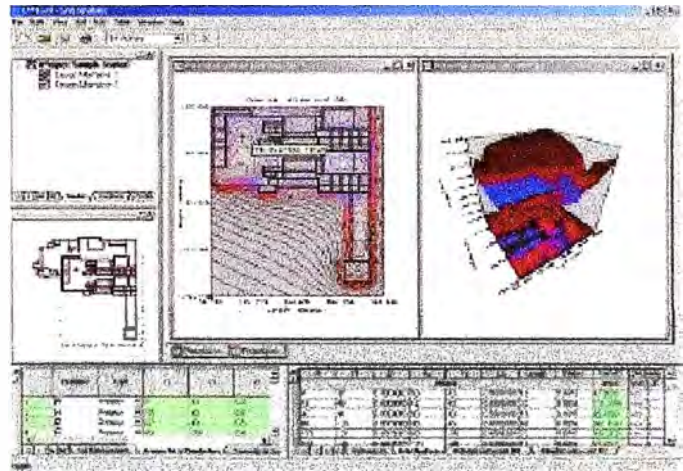
Características del programa

CYMGRD permite el rápido análisis de varias alternativas de diseño y elige una solución económica para cualquier instalación dada.

Entrada de datos amigable al usuario, eficientes algoritmos de análisis y poderosas funciones gráficas hacen de CYMGRD una herramienta eficaz que ayuda al ingeniero a concebir diseños óptimos de puestas a tierra desde los puntos de vista técnico y económico.

Capacidades analíticas

Las principales características técnicas de CYMGRD son:



- Análisis de elementos finitos de los conductores de la malla de tierra, varillas y ensamble de cables.
- Módulo de terreno uniforme o de dos capas para mediciones en el campo.
- Cálculos de evaluación de la seguridad para las máximas tensiones de paso y contacto, basados en IEEE 80-2000.
- Análisis de elevación de potencial de tierra.
- Soporte de mallas simétricas o asimétricas de cualquier forma.
- Varillas de puesta a tierra clavadas arbitrariamente.
- Capacidad de modelar electrodos de retorno.
- Capacidad de modelar distintos electrodos.
- Análisis de potenciales de paso y contacto con despliegue a colores en representación 2D o 3D.
- Análisis de tensión de paso.

CADGRD, el módulo de interfaz CYMGRD / AutoCAD

El programa utilitario CADGRD permite al usuario cambiar del entorno AutoCAD a CYMGRD y viceversa.

CADGRD no es un sustituto a AutoCAD. De hecho, AutoCAD sigue siendo un requerimiento firme de software para CADGRD puesto que AutoCAD producirá los ficheros necesarios *.DXF y *.DWG que contendrán la descripción pictorial de la configuración de la malla de la subestación.

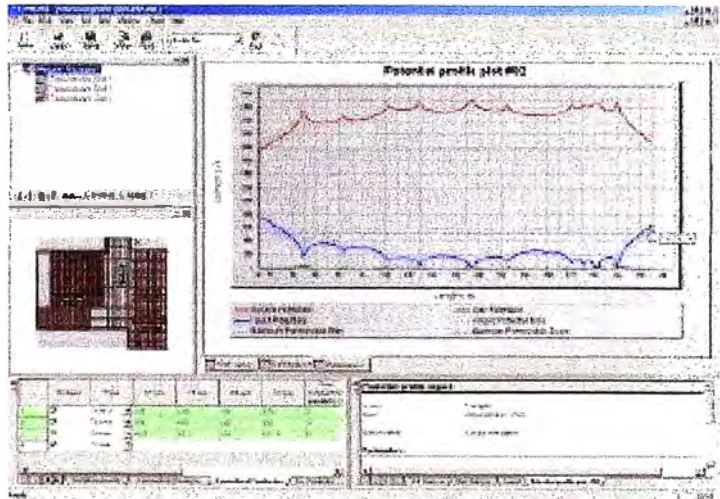
Nótese sin embargo que todos los datos pertinentes para el análisis de ingeniería de la malla de tierra de la subestación, además de la configuración real de la malla, pueden ser introducidos también por medio de CADGRD.



CYMVIEW, Administración de los resultados de simulación

CYMVIEW es común a todos los módulos de simulación que generan cualquier tipo de gráfico. CYMVIEW administra la salida gráfica de los distintos módulos.

- Comparación gráfica de modelos de terreno deducidos con mediciones de campo para aceptación del modelo.
- Codificación a colores de los gradientes de potencial de superficie, basados en umbrales definidos por el usuario para potenciales de contacto o de superficie. Se puede seleccionar cualquier área de la malla con el mouse para realizar cálculos detallados y evaluar los puntos peligrosos.
- Líneas equipotenciales para los potenciales de superficie en gráficas bi o tridimensionales que facilitan el examen de los gráficos desde cualquier ángulo de observación.
- Gráficas que muestran la variación de tensión de paso y contacto a lo largo de cualquier línea recta, comparado con los valores de seguridad calculados por el módulo de evaluación de seguridad.
- Indicaciones gráficas sobre la configuración de la malla bidimensional del área que se está analizando para tensiones de paso y contacto, para localizar fácilmente los puntos peligrosos.



BIBLIOGRAFÍA

1. IEEE std 80-2000, “Guide for Safety in AC Substation Grounding”
IEEE Power Engineering Society, January 2000.
2. Instrucciones Técnicas Complementarias MIE-RAT 13
Ministerio de Industria y Energía – España 1984
3. Código Nacional de Electricidad – Utilización
Ministerio de Energía y Minas – Dirección General de Electricidad – 2006.
4. NTP 400, “Corriente eléctrica: efectos al atravesar el organismo humano”
Luis Pérez Gabarda, http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_400.htm
5. IEEE-Std 81-1983, “IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance and Earth Surface Potentials of a Ground System”
IEEE Standards Board, September 17, 1981