



**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN  
CONTINUA Y A DISTANCIA**

**DIPLOMADO  
DISEÑO Y CÁLCULO DE  
INSTALACIONES ELÉCTRICAS  
(RESIDENCIALES, INDUSTRIALES Y  
ESPECIALES)**

**MÓDULO III  
C. CA411 PUESTA A TIERRA**

**EXPOSITOR: DR. FERNANDO TOLEDO TOLEDO  
DEL 29 DE OCTUBRE AL 08 DE DICIEMBRE DE 2007  
PALACIO DE MINERÍA**

## *INTRODUCCIÓN*

La ingeniería de puesta a tierra se ocupa del eficiente, seguro y económico traspaso de corrientes eléctricas, de diversas naturalezas, hacia la tierra en las variadas instalaciones electrotécnicas, considerando la importancia que tiene el proceso de propagación de las corrientes eléctricas a través de la tierra.

Su trascendencia radica en procurar seguridad para los seres vivos (personas y animales), el factor social (la seguridad de los seres vivos) es la preocupación primordial al diseñar cualquier sistema de tierras ya sea para servicio o protección.; por lo que el sistema debe ser planeado tomando en cuenta las exigencias de seguridad (voltajes de contacto y de paso, por ejemplo).

La importancia de entender el comportamiento de la electricidad y cuáles son sus aplicaciones, hoy en día es un hecho que todas las personas se ven involucradas de cualquier modo con electricidad tanto en sus casas como en el trabajo.

De ahí surge la importancia que tiene las protecciones tanto para el hombre como para los aparatos eléctricos.

Un sistema de puesta a tierra, es el conjunto de medidas que se han de tomar para conectar una pieza eléctricamente conductora a tierra.

Algunos elementos de un sistema de puesta a tierra pueden disponerse para que cumplan una finalidad específica, pero sin embargo forman parte de un único sistema de puesta a tierra. Las normas exigen que todos los elementos de puesta a tierra de una instalación estén conectados entre sí, formando un sistema.

Por la importancia de los sistemas de puesta a tierra, es necesario conocer la mayor cantidad de factores que hacen variar la resistencia del sistema. Algunos de estos factores pueden ser: las condiciones climatológicas, compactación del terreno, características físicas del electrodo de

conexión a tierra, etc. Debido a lo antes mencionado es que surge la necesidad de crear mejores sistemas de puesta a tierra y mejores instrumentos que midan las características del terreno en donde se va a instalar un sistema de puesta a tierra.

Es muy importante contar con instrumentos de alta precisión para poder entender cuál es el comportamiento de la tierra. Por eso este trabajo primero hace una mención de los elementos y la importancia de un sistema de puesta a tierra, así como algunos de los métodos más usados para poder realizar mediciones de la resistencia del terreno.

Otro tema importante son las características de los diferentes tipos de electrodos que hay para la conexión a tierra, así como las configuraciones de electrodos más usadas para la instalación de un sistema de puesta a tierra. También los esquemas de conexión a tierra. Otro aspecto importante son las características que debe tener el conductor de sistema a tierra, como son: la sección transversal, longitud, material, etc. Los conceptos más esenciales que se deben conocer para poder entender el lenguaje de un sistema de puesta a tierra, son:

- ***CONDUCTOR DE PUESTA A TIERRA***

Es aquel conductor de un circuito que se conecta a tierra intencionalmente. Este conductor garantiza la conexión física entre las partes metálicas expuestas a alguna falla y la tierra. Por medio de este conductor circula la corriente no deseada hacia la tierra.

- ***ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA***

Es un cuerpo metálico conductor desnudo que va enterrado y su función es establecer el contacto con la tierra física.

- ***PUENTE DE UNIÓN***

Este puente es un conductor que nos sirve para proporcionar la conductividad eléctrica entre partes de metal que requieren ser conectadas eléctricamente.

- ***RED DE TIERRA***

Es la porción metálica subterránea de un sistema aterrizado que dispara hacia la tierra todo flujo de corriente no deseado. Esta red se puede componer de varias mallas interconectadas.

- ***RESISTENCIA DE TIERRA***

Es la resistencia que nos ofrece el terreno hacia la corriente en un sistema de puesta a tierra, esta resistencia depende de la resistividad del terreno y área de los conductores.

- ***RESISTIVIDAD DEL TERRENO***

Es la propiedad del terreno que se opone al paso de la corriente eléctrica, la resistividad varía de acuerdo a las características del terreno.

- ***SISTEMA DE TIERRA***

Son varios conductores desnudos que se interconectan con una o varias mallas o electrodos enterrados.

- ***SUPRESOR DE PICOS***

No son más que elementos de protección contra sobretensiones transitorias.

- ***TIERRA AISLADA***

Es un conductor de tierra con aislamiento que se conecta a algún equipo, este conductor se coloca en los mismos soportes donde se encuentran los cables de energía.

También se deben de conocer los procedimientos básicos para diseñar sistemas de tierras, los cuales se basan en conceptos tradicionales, pero su aplicación puede ser muy compleja.

Los conceptos son ciencia, pero la aplicación correcta es un arte, ya que cada instalación es única en su localización, tipo de suelo, y equipos a proteger

Para su estudio apropiado se estudiarán los sistemas de tierra según su aplicación.

- Puesta a tierra de los sistemas eléctricos.

El propósito de aterrizar los sistemas eléctricos es para limitar cualquier voltaje elevado que pueda resultar de rayos, fenómenos de inducción o, de contactos no intencionales con cables de voltajes más altos.

Se logra uniendo mediante UN CONDUCTOR APROPIADO A LA CORRIENTE DE FALLA A TIERRA TOTAL DEL SISTEMA, una parte del sistema eléctrico al planeta tierra.

- Puesta a tierra de los equipos eléctricos.-

Su propósito es eliminar los potenciales de toque que pudieran poner en peligro la vida y las propiedades y, para que operen las protecciones por sobrecorriente de los equipos. Se logra conectando al punto de conexión del sistema eléctrico con el planeta tierra, todas las partes metálicas que pueden llegar a energizarse, mediante CONDUCTOR APROPIADO A LA CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO DEL PROPIO SISTEMA EN EL PUNTO EN CUESTION.

- Puesta a tierra en señales electrónicas.-

Para evitar la contaminación con señales en FRECUENCIAS diferentes a la deseada. Se logra mediante blindajes de todo tipo conectados a una referencia cero, que puede ser el planeta tierra.

- Puesta a tierra de protección electrónica.-

Para evitar la destrucción de los elementos semiconductores por VOLTAJE, se colocan

dispositivos de protección conectados entre los conductores activos y la referencia cero, que puede ser el planeta tierra.

- Puesta a tierra de protección atmosférica.-

Sirve para canalizar la ENERGIA de los rayos a tierra sin mayores daños a personas y propiedades.

Se logra con una malla metálica igualadora de potencial conectada al planeta tierra que cubre los equipos o edificios a proteger.

- Puesta a tierra de protección electrostática.-

Sirve para neutralizar las CARGAS ELECTROSTATICAS producidas en los materiales dieléctricos. Se logra uniendo todas las partes metálicas y dieléctricas, utilizando el planeta tierra como referencia de voltaje cero.

# **MODULO. *Sistemas y Redes de Tierra***

## **OBJETIVO GENERAL**

Capacitar profesionales en el área de ingeniería eléctrica en los rubros técnico y científico, que les permita resolver problemas relacionados con el diseño, operación, control y mantenimiento de sistemas de aterrizamiento en instalaciones eléctricas industriales.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Brindar al ingeniero electricista ó afin, herramientas normalizadas para el análisis del comportamiento de las fallas a tierra.
- Presentar estrategias de diseño, operación óptima y uso eficiente de los sistemas de aterrizamiento en sistemas industriales con ó sin generación propia.

## **CONTENIDO SINTÉTICO**

1. Equipo a tierra y Sistema a tierra.
2. Métodos de aterrizamiento empleados en sistemas industriales.
3. Influencia del método de aterrizamiento en el comportamiento de voltajes y corrientes durante fallas a tierra.
4. Limitación de los valores de corriente de falla a tierra. Selección y cálculo del tipo y equipo de conexión del equipo de neutro a tierra. Aplicaciones.
5. Esquemas de protección de línea a tierra. Descripción y ajustes recomendados.
6. Cálculo de Redes de Tierra.
  - 6.1. Componentes de una red de tierra.
  - 6.2. Diseño preliminar de la red.
  - 6.3. Comprobación de las condiciones de seguridad para redes nuevas ó ya existentes.
  - 6.4. Programas de verificación y mantenimiento de redes de tierra.
  - 6.4. Cálculo computacional.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. WESTINGHOUSE ELECTRIC CORPORATION.  
*ELECTRIC UTILITY ENGINEERING REFERENCE BOOK.*  
*VOL 3 DISTRIBUTION SYSTEMS.* 1978.
2. IEEE/ANSI STD 141-1986 (R93) [Red Book]  
*Recommended Practice for Electric Power Distribution*  
*for Industrial Plants.*
3. ANSI/IEEE STD 242-1986 (R90) [Buff Book]  
*Recommended Practice for Protection and Coordination of*  
*Industrial and Commercial Power Systems.*
4. TURAN GÖNEN.  
*ELECTRIC POWER DISTRIBUTION SYSTEM ENGINEERING.*  
MC GRAW HILL. 1992.
5. IEEE GUIDE FOR SAFETY IN AC SUBSTATION GROUNDING.  
ANSI/IEEE STD 80-1986.
6. ANSI/IEEE STD 142-1992, *IEEE Recommended Practice for Grounding of*  
*Industrial and Commercial Power Systems.* [Green Book].
7. ANSI/NFPA 70-1999, NATIONAL ELECTRIC CODE.
8. ANSI/IEEE Std 1100-1992, *IEEE Recommended Practice for Powering and*  
*Grounding Sensitive Electronic Equipment.* [Emerald Book].



# PUESTA A TIERRA Y REDES DE TIERRA

## 1. PANORAMA GENERAL

El aterrizar ó no un sistema eléctrico es una decisión que debe tomarse a través del grupo de ingeniería encargado del diseño y/o mantenimiento del sistema de distribución. La justificación de no aterrizar un sistema se basa en la necesidad de la continuidad del servicio, no obstante debido al adelanto en los esquemas de protección en cuanto a velocidad y selectividad han propiciado que los sistemas modernos apliquen alguna forma de aterrizamiento. El término **conexión a tierra** en sistemas eléctricos se usa tanto para designar el sistema como al equipo que se utiliza para conectarlo a tierra, aunque cada uno se diseña con diferentes objetivos.

Existen varios métodos y criterios para el aterrizamiento de sistemas; cada uno tiene su propio propósito. Es la intención de esta sección ayudar al ingeniero en la toma de decisiones en el tema, presentando razones fundamentales para aterrizar o no un sistema y repasar prácticas generales y métodos de sistemas de aterrizamiento, con sus respectivas ventajas y desventajas.

## PUESTA A TIERRA

Conviene distinguir los términos de *equipo a tierra* y *sistema a tierra*.

*Equipo a tierra.* Implica el conectar partes conductoras de equipos -no necesariamente eléctricos- a una referencia fija de potencial cero. Su finalidad principal es la de ofrecer un camino de baja impedancia a la circulación de corrientes debidas a la presencia de potenciales inducidos ó de contacto.

*Sistema a tierra.* Se refiere al establecimiento de una vía de comunicación entre la o las fases del sistema eléctrico y la tierra (normalmente a través del neutro), esto implica la existencia de un camino físico entre cualquier conductor de fase de un equipo y el suelo o tierra física.

La *puesta a tierra* se define como una forma de conexión entre partes conductoras de equipos y una referencia fija de potencial cero (normalmente la *tierra física* ó *suelo*). Esta medida siempre es aconsejable en función de proveer un mecanismo de protección tanto a los equipos como al personal que labora con ellos. La eficiencia de esta puesta a tierra dependerá fundamentalmente de dos aspectos:

- ♦ *El método de aterrizamiento utilizado.*
- ♦ *Las características de la referencia de potencial cero (red de tierra).*

Mucho se ha discutido sobre las ventajas y desventajas de aterrizar un sistema eléctrico, no obstante en la actualidad, dado el avance en la rapidez y selectividad de las protecciones, la tendencia es la que un sistema eléctrico este aterrizado de alguna forma, se discuten a continuación los lineamientos generales para el aterrizamiento de sistemas eléctricos.

Los sistemas y circuitos conductores son puestos a tierra para limitar las sobretensiones debidas a descargas atmosféricas, a fenómenos transitorios en el propio circuito o a contactos accidentales con líneas de mayor tensión así como para estabilizar la tensión a tierra en condiciones normales de operación. Los sistemas y circuitos conductores se ponen a tierra de manera sólida para facilitar la acción de los dispositivos de sobrecorriente en caso de fallas a tierra. Adicionalmente el sistema de conexión a tierra es un requisito del NEC (*National Electric Code*), para proteger adecuadamente al personal que tiene acceso al sistema bajo análisis.

La puesta a tierra de los materiales conductores que encierran a los conductores y equipos o que forman parte de éstos se hace para limitar la tensión a tierra de tales partes conductoras y para facilitar la acción de los dispositivos de protección contra sobrecorriente, en caso de falla a tierra.

Los sistemas de conexión a tierra aseguran una mayor vida del aislante de motores, transformadores y otros componentes mediante la supresión de sobretensiones transitorias y continuas. La figura 1 muestra el comportamiento fasorial de voltajes para el sistema delta, estrella aterrizado y delta aterrizado.

Los sistemas aislados de tierra se justifican cuando se requiere una continuidad de servicio mayor, dado que una falla a tierra no originará una rápida desconexión del circuito bajo falla. No obstante, una segunda falla a tierra en otra fase del sistema causará una falla de fase a fase y consecuentemente se desconectarán ambos circuitos en falla, según se muestra en la figura 2.

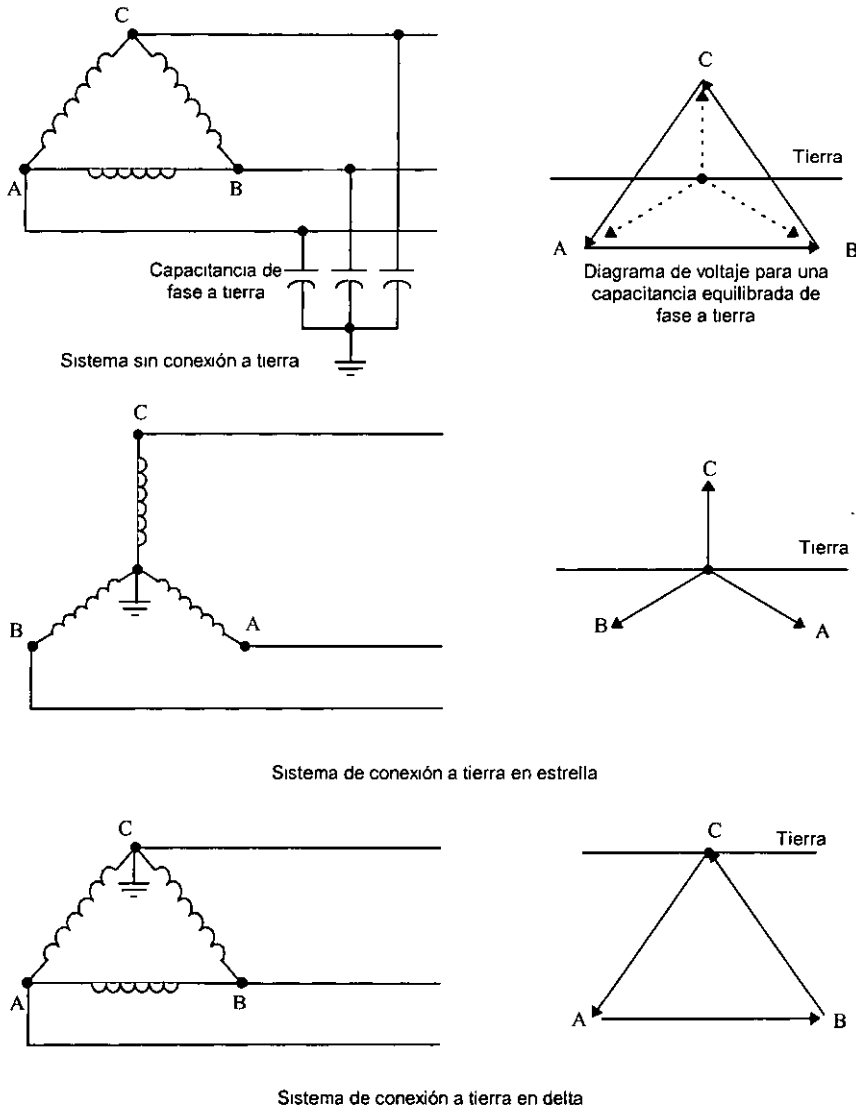


Figura 1 Diagramas de tensión a tierra bajo condiciones permanentes.

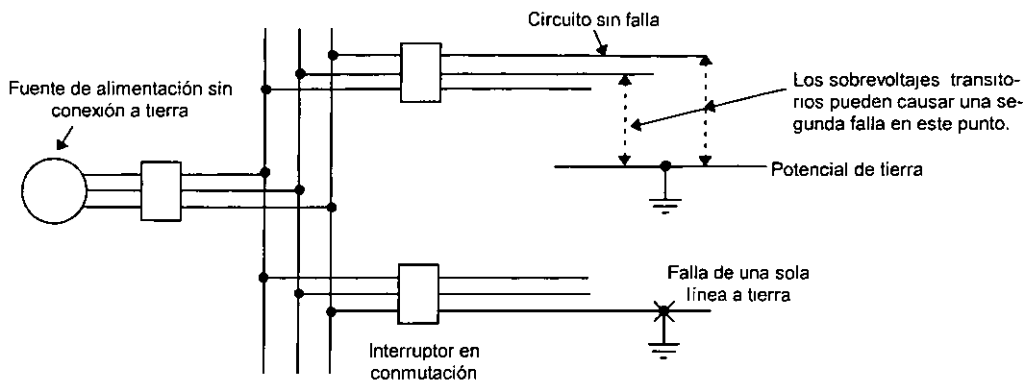


Figura 2 La conexión de un circuito que tiene pérdidas a tierra genera sobretensiones momentáneas sobre un sistema sin conexión a tierra.

Las prácticas expuestas aquí son principalmente aplicables a sistemas industriales de potencia que distribuyen y utilizan energía en mediano o bajo voltaje. Sin embargo, tienen que considerarse adicionalmente restricciones de normas aplicables (como el NEC), necesidades particulares de servicio y la experiencia del grupo de ingeniería. Donde el sistema industrial de potencia incluye su propio equipo de generación, pueden aplicarse los mismos conceptos que los empleados en los centros de generación de la red de potencia. Los métodos de aterrizamiento generalmente tendrían semejanzas bajo las mismas condiciones de servicio. Sin embargo, en el caso industrial, las consideraciones a tomar referentes a la forma de aterrizamiento pueden ser influenciadas por:

- 1) Ubicación con respecto al gran sistema interconectado.
- 2) Características individuales de el (los) generador (es).
- 3) Requisitos de suministro de energía de los procesos industriales.

El NEC, respaldado por la NFPA (Asociación Nacional de Protección contra Fuego), en su artículo 250 contiene regulaciones sobre el aterrizamiento de equipos y sistemas aplicable a industrias, comercios y procesos especiales. Se consideran estas reglas como requerimientos mínimos para la protección de la vida y propiedad debiéndose contemplar cuidadosamente durante el proceso de diseño del sistema.

## DEFINICIONES BÁSICAS

Se presenta a continuación los términos básicos empleados en la metodología de aterrizamiento de sistemas, para información adicional consulte IEEE Std 100-1988.

**Aterrizado.** Conectado a tierra ó a otro objeto conductivo que realiza las funciones de tierra física, ya sea de forma intencional ó accidental.

**Sistema.** Un sistema de aterrizamiento es el conjunto de todas las puesta a tierra que están interconectadas entre sí y a su vez aisladas de otros sistemas de tierra. Este aislamiento hacia otros sistemas puede ser mediante los devanados primario y secundario de un transformador en donde el acople es únicamente magnético. Consecuentemente los límites del sistema quedan definidos por la ausencia de una conexión física a tierra, ya sea esta sólida o a través de una alta impedancia. La figura 3 muestra los límites y fronteras de los sistemas de aterrizamiento.

**Sistema no aterrizado.** Un sistema sin una conexión intencional a tierra, excepto a través de dispositivos indicadores o medidores de potencial, o de otros dispositivos de muy alta impedancia.

**Sistema aterrizado.** Un sistema en el cual al menos un conductor ó un punto de referencia (generalmente el punto intermedio de un devanado ó el neutro de un transformador o generador) está intencionalmente conectado a tierra ya sea de manera sólida (impedancia cero) o a través de una impedancia.

**Efectivamente aterrizado.** Aterrizado a través de una impedancia lo suficientemente baja, por la cual, bajo cualquier condición operativa del sistema, el cociente entre la reactancia de secuencia cero y la reactancia de secuencia positiva ( $X_0 / X_1$ ) es positiva y menor que 3, y la relación entre la resistencia de secuencia cero y la reactancia de secuencia positiva ( $R_0 / X_1$ ) es positiva y menor que 1.

**Sólidamente aterrizado.** Conectado directamente a tierra a través de una adecuada conexión en la que no se ha insertado deliberadamente un valor de impedancia.

**Aterrizado por alta resistencia.** Una forma de aterrizamiento con una resistencia insertada deliberadamente, la cual limita el valor de falla a tierra a un valor para el cual, para un intervalo extendido de tiempo, limita el daño al equipo. Este nivel de corriente comúnmente es de 10 amperes ó menos. Los sistemas aterrizados por alta resistencia se diseñan cumpliendo el criterio de  $R_0 \leq X_{C0}$  para limitar los sobrevoltajes transitorios debidos a fallas de arqueo.  $X_{C0}$  es la reactancia capacitiva a tierra por fase del sistema y  $R_0$  es la resistencia de secuencia cero por fase del sistema, todas ellas equivalentes de Thevenin al punto de aterrizamiento.

**Aterrizado por baja resistencia.** Un sistema aterrizado intencionalmente a través de una resistencia de valor óhmico bajo pudiendo en valor cumplir los criterios de aterrizamiento a través de alta resistencia. La resistencia se selecciona para brindar el valor requerido de disparo de protecciones a tierra.

**Aterrizado por reactancia.** Aterrizado a través de una impedancia, donde su principal componente es una reactancia inductiva.

**Corriente de carga capacitiva por fase ( $I_{C0}$ ).** Es la corriente ( $V_{LN} / X_{C0}$ ) que fluye por el efecto capacitivo en cada fase del sistema,  $V_{LN}$  es el voltaje de línea a neutro y  $X_{C0}$  es la reactancia capacitiva por fase del sistema.

**Corriente de carga del sistema.** La corriente total de carga capacitiva del sistema trifásico:  
( $3V_{LN} / X_{C0}$ )

**Resonancia.** La característica de respuesta de un sistema físico (sistema ó circuito eléctrico) a una excitación periódica en donde la frecuencia ( $f$ ) es igual a la *frecuencia natural del sistema*. En un circuito serie que contiene resistencia (R), inductancia (L) y capacitancia (C), corresponde a los valores de L y C para los cuales el valor de reactancia resultante es cero y la corriente es máxima, se dice entonces que el circuito *está en resonancia*. Esto ocurre cuando:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \quad \text{ó} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (a)$$

Similarmente, para un circuito RLC en paralelo, la admitancia es mínima cuando  $1/X_L = 1/X_C$  y el circuito está en *resonancia paralelo*. Esto ocurre también al cumplirse las expresiones (a).

$R_N$  . Es el valor de la resistencia conectada del neutro a la tierra en un sistema aterrizado a través de resistencia. En sistemas aterrizados por alta resistencia donde  $R_N$  es la componente principal de  $R_0$  , es aplicable la expresión  $R_0 = 3R_N$  .

**Carga estática.** Es la electricidad producida cuando dos sustancias distintas entran en contacto. Su presencia está íntimamente relacionada con la fricción entre dos cuerpos.

**Sobrevoltaje de switcheo.** Una onda transitoria -generalmente sobrevoltaje- presente en un circuito causada por la operación de un circuito interruptor ante condiciones de corriente de carga normal ó falla.

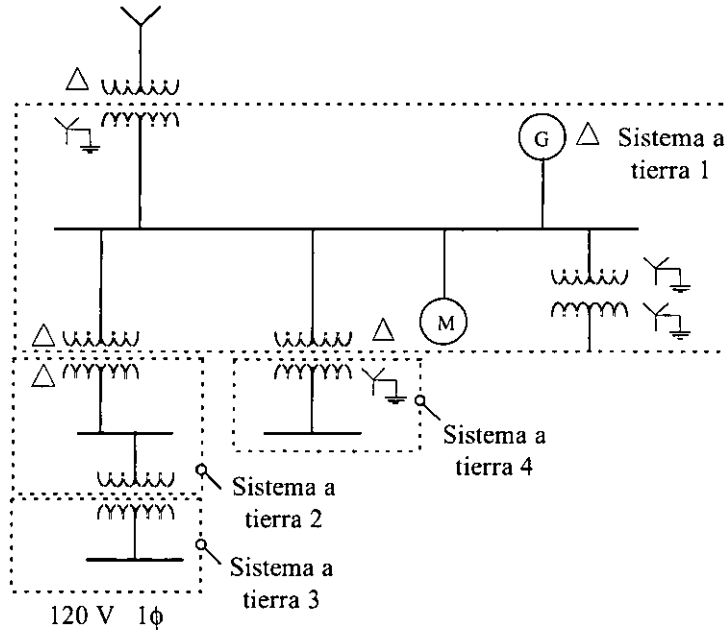


Figura 3 Límites de Sistemas a Tierra.

## 2. OBJETIVOS DEL ATERRIZAMIENTO DE SISTEMAS

El aterrizamiento del sistema, o la conexión intencional de un conductor neutro o de fase a la tierra, tiene como propósito controlar el voltaje a tierra o suelo dentro de ciertos valores predecibles. También provee un camino de circulación de corriente que permite la detección y liberación mediante dispositivos automáticos, de una conexión no deseada entre los conductores del sistema y tierra.

El control del valor del voltaje a tierra limita y permite evaluar mas fácilmente los esfuerzos dieléctricos de los aislantes del equipo.

## MÉTODOS DE ATERRIZAMIENTO DEL NEUTRO DEL SISTEMA

La mayor parte de los sistemas eléctricos emplean algún método de aterrizamiento del neutro en uno o varios puntos. Estos métodos pueden dividirse en dos grandes categorías: Aterrizados sólidamente y a través de impedancia. Este último grupo puede ser dividido en subcategorías: por resistencia, por reactancia y mediante un neutralizador de fallas a tierra. La figura 4 muestra ejemplos de estos métodos de aterrizamiento. En cada caso la impedancia del generador ó del transformador -cuyo neutro es puesto a tierra- está en serie con el circuito externo. Dependiendo del sistema en particular puede o no requerirse el aterrizamiento de estos equipos.

Si se modifica la forma de aterrizamiento del sistema, traerá como consecuencia cambios en los valores de fallas a tierra, por lo que deberán analizarse las nuevas condiciones de operación bajo falla del equipo de protección.

**Sistemas no aterrizados.** Sistemas de potencia los cuales operan sin una conexión intencional de los conductores del sistema a tierra se definen como *no aterrizados*. En realidad estos sistemas están aterrizados a través de la capacitancia a tierra, cuyo valor es tan grande que en la mayor parte de los casos la magnitud de la corrientes circulantes hacia tierra se desprecia.

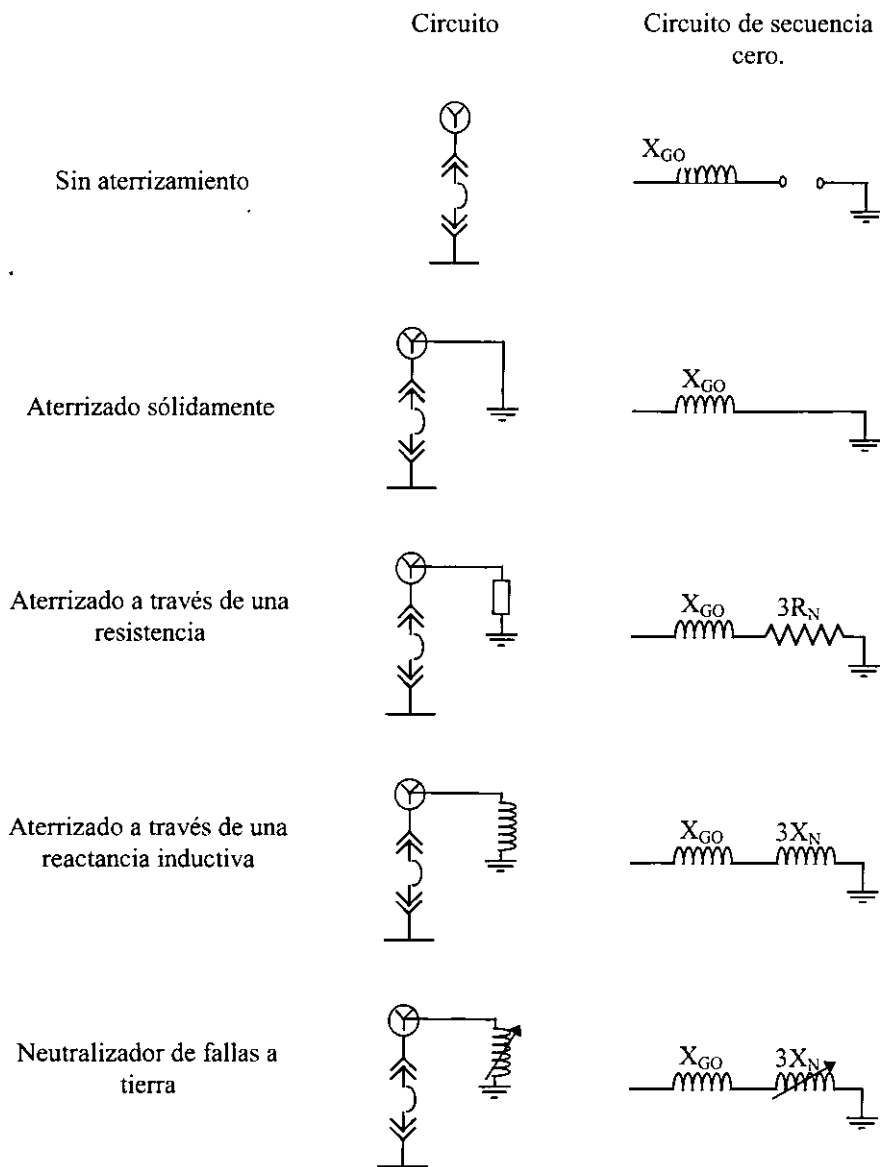


Figura 4 Sistemas de conexión al neutro y diagramas equivalentes para no aterrizamiento y varios tipos de aterrizamiento.

Se tienen dos ventajas importantes de los sistemas no aterrizados. La **primera** es de carácter operacional: la primera falla a tierra en el sistema causa solamente una pequeña corriente a tierra, de tal manera que *el sistema puede seguir operando con una falla a tierra* aumentando la continuidad del servicio. La **segunda** es económica: No se realizan gastos en conductores, equipos ni accesorios de puesta a tierra.

Cuando se elige un sistema no aterrizado, es necesario implementar un esquema de detección de fallas a tierra. Este tipo de esquema frecuentemente utiliza transformadores trifásicos con los devanados primarios en estrella con neutro aterrizado. Los devanados secundarios se conectan en delta abierta, con un relevador de voltaje conectado en la esquina abierta cuya función es la de disparar un circuito de alarma o señalización. Pueden requerirse adicionalmente resistencias de carga en el primario o en el secundario para impedir la presencia de fenómenos de ferro-resonancia.

**Sistemas aterrizados a través de resistencia.** El neutro se conecta a tierra a través de una o más resistencias. En éste método partiendo de los valores de resistencia normalmente empleados, y exceptuando los sobrevoltajes transitorios, los voltajes línea a tierra presentes durante una falla a tierra tienen un valor muy cercano a los que se presentan en sistemas no aterrizados.

Un sistema adecuadamente aterrizado por resistencia no está sujeto a sobrevoltajes transitorios destructivos. Para sistemas hasta de 15 kV esto se cumple si el valor de la resistencia de puesta a tierra  $R_0$  queda en los límites:  $2X_0 \leq R_0 \leq X_{C0}$ , quedando definido el sistema como *aterrizado a través de alta impedancia*. El valor correspondiente de falla a tierra es mucho menor que el de un sistema aterrizado por baja resistencia.

Las razones para limitar la corriente de falla a tierra mediante resistencias puede ser una ó mas de las siguientes:

- ♦ Reducir los efectos de calentamiento y fusión durante fallas en equipo como: interruptores, transformadores, cables y máquinas rotatorias.
- ♦ Reducir los esfuerzos mecánicos en circuitos y aparatos que conducen fallas a tierra.
- ♦ Reducir los riesgos de descarga eléctrica al personal que pueda incluirse en la trayectoria de la falla a tierra.
- ♦ Reducir los efectos dañinos de la presencia de un arco al personal que accidentalmente produjo ó está cercano a la falla.
- ♦ Reducir la caída momentánea de voltaje causada por la presencia y eliminación de la falla.
- ♦ Asegurar el control de sobrevoltajes transitorios, al mismo tiempo que se impide la salida del circuito por falla a tierra (sistemas aterrizados por alta resistencia).

La diferencia principal entre los sistemas de alta y baja resistencia es el valor de limitación de falla a tierra: los de alta resistencia limitan en valor a 10 A ó menos, pudiendo ser mayor para sistemas de clase 15kV. Los sistemas de baja resistencia tienen valores de falla de al menos 100 A, siendo comúnmente ajustado el valor de falla a tierra entre 200 y 1000 A.

Ambos sistemas están diseñados para limitar los sobrevoltajes transitorios a un nivel seguro (dentro del 250% del nominal). Consecuentemente, el método de alta resistencia no requiere de la liberación inmediata de la falla a tierra debido a que su valor en corriente está limitado a un valor muy bajo. Este nivel debe ser al menos igual al equivalente a la contribución debida a la capacitancia a tierra.

El esquema de protección utilizado en puesta a tierra por alta resistencia debe señalar ó alarmar más que disparar inmediatamente. En general no se recomienda el empleo de este método en sistemas con un valor superior de 10 A de falla a tierra, debido al potencial dañino de la energía de arco para corrientes mayores a 10 A.

El método por baja resistencia tiene la ventaja de selectividad y rapidez en la detección y eliminación de fallas a tierra.

Ambos métodos requieren la implementación de apartarrayos diseñados para circuitos no aterrizados. Si se emplean apartarrayos de óxido metálico deben seleccionarse considerando que durante la presencia de la falla a tierra tanto el voltaje de operación continua como el sobrevoltaje máximo por un segundo serán excedidos.

### 3. PROCEDIMIENTO MANUAL

Los cálculos de forma manual efectuados en este apartado están basados en las normas: *ANSI/IEEE Std 80-1986, 142-1991 y 1100-1992*; tiene aspectos diferentes a los cálculos tradicionales anteriormente utilizados, ya que algunas fórmulas han cambiado, se han integrado nuevos factores y manejado opciones muy marcadas (peso de las personas, profundidad de enterramiento de la rejilla, etc.) que al final determinan resultados diferentes según estas consideraciones.

#### 3.1 DATOS NECESARIOS PARA EL CÁLCULO.

- a) La superficie del terreno en metros (largo y ancho).
- b) El tiempo de duración de la falla de cortocircuito ( $t_c$ ) en segundos. Dependerá generalmente del tipo de protecciones que se tengan en la instalación.
- c) El valor de la corriente de corto circuito o corriente de falla ( $I_{fa}$ ) en Amperes . Así como los factores de:
  - Proyección de crecimiento ( $C_p$ ), cuando no hay crecimiento previsto del sistema  $C_p = 1$ .
  - La duración de la falla ( $D_f$ ). Ver Tabla 6 Cap. 13 del ANSI/IEEE Std 80-1986.
  - Divisor de corriente relativo a la magnitud de la falla de corriente y el flujo proporcional entre la malla de aterrizamiento y alrededor de la tierra ( $S_f$ ).
- d) El valor de la resistividad del suelo ( $\rho$ ) donde se colocará la malla en  $\Omega\cdot m$ . El no tener este dato implica realizar todo un procedimiento de medición (consultar ANSI/IEEE Std 81-1983, IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and EarthSurface Potentials of a Ground System.)
- e) El valor de la resistividad de la capa superficial ( $\rho_s$ ) en  $\Omega\cdot m$ , (ver como referencia Tabla 3 del Cap. 10 del ANSI/IEEE Std 80-1986). Y el valor del grueso de la capa superficial ( $h_s$ ) en metros.
- f) La temperatura máxima ( $T_{m\acute{a}x}$ ) y temperatura ambiente ( $T_a$ ) en grados centígrados ( $^{\circ}C$ ), que soportarán los accesorios a emplear para sujetar las uniones de los conductores que formarán la red.
- g) La profundidad ( $h$ ) en metros, donde se va a enterrar la red de conductores, deberá ser donde las capas de suelo tengan una resistencia que no varíe (que permanezca de valor constante) sensiblemente por efecto de las lluvias. Los valores típicos de la profundidad de enterramiento de la malla son de 0.25-0.5 m o de 0.5-1.3 m. También se debe de considerar la tensión de trabajo del sistema (a mayor tensión, mayor profundidad) para el control de los gradientes de potencial de superficie.
- h) La referencia del peso promedio de las personas (50 ó 70 Kg) que circularán por el área, ya que el valor del voltaje tolerado por el cuerpo humano esta en función de su peso, a mayor peso, mayor es el voltaje que puede soportar el cuerpo humano.

Los datos empleados para el ejemplo que se desarrollará son :

Largo = 54 m ; Ancho = 49 m

Tiempo de duración de la falla de  $t_c = 0.22$  s

$I_{fa} = 15,000.0$  Amperes ;  $C_p = 1.0$  ;  $D_f = 1.25$  ;  $S_f = 1.0$

$\rho = 177.6.0$   $\Omega\cdot m$

$\rho_s = 10,000.0$   $\Omega\cdot m$ ; con un grueso de capa superficial  $h_s = 0.1$  m

Para el material de empleado tenemos,  $T_{m\acute{a}x} = 1,084^{\circ}C$  y  $T_a = 40^{\circ}C$

Profundidad de enterramiento de la red  $h = 0.80$  m

Peso de cuerpo humano promedio de 50 Kg.



### 3.2 CORRECCIÓN DEL VALOR DE LA CORRIENTE DE FALLA

La corriente de falla calculada  $I_{fa}$ , se corrige de acuerdo a los factores siguientes, es la corriente que finalmente circulará por la malla, sin embargo, para el cálculo del calibre del conductor se manejará la del valor mas grande:

$$I_g = I_{fa} C_p D_f S_f$$

Donde:

- $C_p$  Factor de proyección de corriente por crecimiento del sistema.
- $D_f$  Factor de decremento para el cálculo de  $I_g$
- $S_f$  Factor de división de corriente.

Sustituyendo valores:

$$I_g = (15,000) (1.0) (1.25) (1.0)$$

$$I_g = 18,750.0 \text{ A} = 18.75 \text{ kA}$$

### 3.3 CÁLCULO DEL CALIBRE DEL CONDUCTOR

Anteriormente se venía utilizando la ecuación de Onderdonk, pero ahora se sustituye por la siguientes:

$$A_{mm^2} = I_g \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP}}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{T_{max} - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

$$A_{CM} = I_g (1973.52) \sqrt{\frac{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP}}{\ln \left[ 1 + \left( \frac{T_{max} - T_a}{K_o + T_a} \right) \right]}}$$

donde:

- A = sección del conductor en mm<sup>2</sup> o en circular-mils.
- $I_g$  = corriente corregida de falla a tierra (kA)
- $t_c$  = tiempo de duración de la falla en segundos.
- $\alpha_r$  = coeficiente térmico de resistencia a 20°C.
- $\rho_r$  = constante de resistividad a 20°C en mΩ-cm.
- $T_{m\acute{a}x}$  = temperatura máxima admisible en °C.
- $T_a$  = temperatura ambiente en °C.
- $K_o$  =  $1/\alpha_o$  a 0°C.
- TCAP = constante de la capacidad térmica del conductor en J/cm<sup>3</sup>/°C

Cabe hacer notar que el valor de las constantes de los materiales empleados en las anteriores fórmulas, variarán de acuerdo al tipo de construcción del conductor empleado (Ver Tabla 1, Cap. 9 de ANSI/IEEE Std 80-1986). En la práctica se utiliza comúnmente el conductor de cobre desnudo con alma de acero, sin embargo, existen otros conductores de fabricación diferente, a los que les corresponde sus respectivos valores.

Por lo que tenemos:

- $I_g$  = 18.75 kA
- $t_c$  = 0.22 seg
- $T_{m\acute{a}x}$  = 1084°C

$$\begin{aligned}
 T_a &= 40^\circ\text{C} \\
 \rho_r &= 5.862 \text{ m}\Omega\text{-cm} \\
 \alpha_r &= 0.00378 \\
 K_o &= 245 \\
 \text{TCAP} &= 3.846 \text{ J/cm}^3/^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

sustituyendo en la fórmula:

$$A_{\text{mm}^2} = 18.75 \sqrt{\frac{(0.22)(0.00378)(5.862)(10^4)}{3.846 \ln\left[1 + \left(\frac{1084 - 40}{245 + 40}\right)\right]}} = 53.7972 \text{ mm}^2$$

Puesto que el área del un círculo es  $A = \pi d^2 / 4$ , el diámetro que se tiene es de  $d = 8.2762 \text{ mm}$ , este valor de diámetro corresponde a un conductor de calibre # 1/0 AWG, sin embargo, por resistencia mecánica se recomienda usar como **mínimo** el calibre # 4/0 AWG ( $12.06 \text{ mm}$ ,  $107.2 \text{ mm}^2$ ).

### 3.4 CÁLCULO DE LAS TENSIONES TOLERABLES POR EL CUERPO HUMANO

Existen diversos casos que pueden presentarse al hacer contacto con superficies a diferente potencial, por lo que es necesario calcular las tensiones de "paso" y de "contacto" para saber los límites de tolerancia que el cuerpo humano tiene. Como ya se había mencionado, existen dos valores de pesos promedio del cuerpo humano que se manejan para el cálculo, de 50 y 70 Kg. Para cada uno de estos valores se tienen las siguientes fórmulas:

• Voltaje de paso:

$$E_{\text{paso } 50} = \frac{(1000 + 6C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.116}{\sqrt{t_c}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = \frac{(1000 + 6C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.157}{\sqrt{t_c}}$$

• Voltaje de contacto:

$$E_{\text{contacto } 50} = \frac{(1000 + 1.5C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.116}{\sqrt{t_c}}$$

$$E_{\text{contacto } 70} = \frac{(1000 + 1.5C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.157}{\sqrt{t_c}}$$

donde:

$t_c$  = tiempo de duración de la falla en segundos.

$\rho_s$  = resistividad de la capa superficial en  $\Omega\text{-m}$ , que puede ser concreto o roca triturada (grava).

$C_s$  = factor reductor para la duración del valor nominal de la resistividad de la capa de superficie.

$C_s$  a su vez, esta en función de  $\{h_s, K\}$ , donde

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$K$  = factor de las relaciones de resistividad del suelo y la capa superficial.

$h_s$  = espesor de la capa de superficie.

El valor de  $C_s$  puede obtenerse directamente de la Fig. 8, Cap. 5 del ANSI/IEEE Std 80-1986.  $C_s = 1$  cuando la resistividad de la capa superficial es igual a la resistividad del suelo. Otra manera de saber el valor de  $C_s$  es por medio de la siguiente fórmula:

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2n h_s}{0.08}\right)^2}} \right]$$

Aprovechando una alternativa más simple, basado en el concepto del hemisferio equivalente, tenemos:

$$C_s = 1 - a \left[ \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + a} \right]$$

$a$  es una constante igual a 0.106 m, el cual evita la sumatoria de una serie infinita. Por lo tanto, sustituyendo valores, tenemos.

$$C_s = 1 - 0.106 \left[ \frac{1 - \frac{177.6}{10000}}{2(0.1) + 0.106} \right] = 0.65974$$

$$E_{\text{paso}_{50}} = \frac{(1000 + 6(0.659)10000)0.116}{\sqrt{0.22}} = 10,037.14 \text{ volts}$$

$$E_{\text{contacto}_{50}} = \frac{(1000 + 1.5(0.659)10000)0.116}{\sqrt{0.22}} = 2,694.771 \text{ volts}$$

### 3.5 DISEÑO PRELIMINAR DE LA RED DE TIERRAS

La longitud mínima de conductores requerida para el diseño preliminar de la malla, se obtiene suponiendo un valor determinado de conductores paralelos en el lado ANCHO del área. Para luego por fórmula encontrar esa longitud mínima preliminar (óptima) que debe tener la malla. En base a esta primer suposición del número de conductores paralelos, se calcula el número de conductores transversales y finalmente se encuentra el valor real de la longitud total de conductores que tendrá la malla. Cuando la longitud real de conductor sea menor a un 15% respecto a la longitud óptima, el diseño preliminar se habrá establecido y por lo tanto quedarán definidos el número de conductores paralelos y transversales que se supusieron inicialmente.

Para determinar la longitud preliminar de la malla, se utiliza cualquiera de las siguientes expresiones, dependiendo del peso promedio del cuerpo humano que se eligió. Observe la inclusión de una nueva variable  $I_G$  que corresponde al valor de la corriente corregida **en amperes**.

• Para 50 Kg:

$$L_{\text{preliminar}} = \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_c}}{(116 + 0.174 C_s \{h_s, K\} \rho_s)}$$

• Para 70 Kg:

$$L_{\text{preliminar}} = \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_c}}{(157 + 0.235 C_s \{h_s, K\} \rho_s)}$$

a su vez, el valor de  $K_m$  (factor de geometría de la red) está definido por :

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

donde:

$K_{ii}$  (factor de peso en función de las varillas enterradas), igual a 1 para rejillas que tienen varillas enterradas. Si no existen varillas en el sistemas de tierras se aplica la fórmula:

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

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

$h_o = 1$  m (profundidad de referencia).

$D =$  separación entre conductores paralelos en m.

$d =$  diámetro del conductor en m.

$h =$  profundidad de enterramiento de la red en m.

$n =$  número de conductores paralelos.

Suponemos un número de conductores paralelos  $n = 20$ .

$$K_h = \sqrt{1 + \frac{0.8}{1}} = 1.3416$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times 20)^{2/20}} = 0.6915$$

$$D = \frac{L}{n-1} = \frac{49}{20-1} = 2.5789 \text{ m.}$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{2.578^2}{16(0.8)0.0133} + \frac{(2.578+2(0.8))^2}{8(0.8)(0.0133)} - \frac{0.8}{4(0.0133)} \right) + \frac{0.6915}{1.3416} \ln \frac{8}{(20-1)} \right]$$

$$K_m = 0.4881471$$

$$K_i = 0.656 + (0.172)(n) = 4.096$$

$$L_{\text{preliminar}} = \frac{(0.488)(4.096)(177.6)(18750)\sqrt{0.22}}{(116 + 0.174(0.6597)(10000))} = 2470.775 \text{ m.}$$

De acuerdo a esta longitud preliminar, la malla deberá tener una longitud real de conductores, como se indica a continuación:

Al suponer para los conductores paralelos  $n = 20$ , el número de conductores transversales es:

$$\frac{54}{49} = 1.102 \quad ; \quad m = 20 \times 1.102 = 22.04 \cong 23$$

donde  $m$  es el número de conductores transversales, por lo que la longitud total real del conductor es:

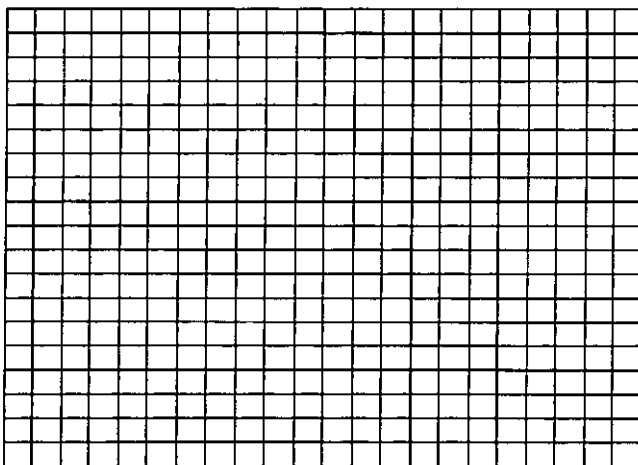
$$L_{\text{conductor}} = n (\text{Largo}) + m (\text{Ancho})$$

$$L_{\text{conductor}} = 20 (54 \text{ m}) + 23 (49 \text{ m}) = 2207 \text{ m.}$$

y como ya se había visto, con una separación entre conductores paralelos de 2.5789 m.

Como la diferencia entre  $L_{\text{preliminar}}$  y  $L_{\text{conductor}}$  no es mayor a un 15%, el diseño preliminar es aceptable, al igual que el número de conductores paralelos y transversales que se han determinado.

En este caso tenemos un 10.67% de diferencia entre las longitudes y será necesario cubrir esta longitud ya sea agregando mas conductores a la malla o enterrando varillas, esto se determinará más adelante . Por el momento el diseño preliminar de la red de tierras queda de la siguiente manera:



$n = 20$  conductores  
 $m = 23$  conductores  
 $D = 2.589 \text{ m}$  entre conductores

Es importante observar que la separación entre los conductores paralelos es de 2.5789 m, mientras para los conductores transversales es de 2.57 m, esto aún no es definitivo, sin embargo el diseño preliminar nos da un arreglo entre conductores en cualquier dirección casi cuadrado.

### 3.6 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA RED

La resistencia del sistema de tierras con un enterramiento menor a 0.25 m puede determinarse por:

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L}}$$

Para mallas enterradas entre 0.25 y 2.5 m, se usa la aproximación de Sverak:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[ 1 + \frac{1}{1+h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \right]$$

donde:

- $R_g$  = resistencia del área aterrizada.
- $\rho$  = resistividad promedio del terreno en  $\Omega\text{-m}$ .
- $A$  = área ocupada por la malla aterrizada en  $\text{m}^2$ .
- $L$  = longitud total del conductor enterrado en m.
- $h$  = profundidad de enterramiento de la malla.

considerando los valores del ejemplo:

$$\begin{aligned} \rho &= 177.6 \Omega\text{-m} \\ L &= 2207 \text{ m} \\ A &= (54 \times 49) = 2646 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

sustituyendo en la fórmula:

$$R_g = 177.6 \left[ \frac{1}{2207} + \frac{1}{\sqrt{20(2646)}} \left[ 1 + \frac{1}{1+0.8\sqrt{\frac{20}{2646}}} \right] \right] = 1.5743 \Omega$$

El valor de la resistencia de la red obtenida, resultó estar en el rango establecido de 1 a 5  $\Omega$  como se indica en el Cap. 12 del ANSI/IEEE Std 80-1986.

### 3.7 CÁLCULO DEL MÁXIMO AUMENTO DE POTENCIAL EN LA MALLA (GPR)

$$E = I_g \times R_g$$

sustituyendo valores, tenemos:

$$E = (18750) (1.574323) = 29,518.55 \text{ volts}$$

Como el valor máximo del aumento de potencial en la malla es mayor a la tensión de contacto tolerable por el cuerpo humano ( $29,518.55 \text{ v} > 2,694.771 \text{ v}$ ), se deben calcular los potenciales de malla y de paso de la red de tierras. En el caso de que el valor máximo del potencial de la malla (GPR) hubiera sido menor a la tensión de contacto, el diseño de la red de tierras, habría terminado.

### 3.8 CÁLCULO DEL POTENCIAL DE LA MALLA

La ecuación general para el voltaje de la malla puede ser expresada como:

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

donde  $K_m$  y  $K_i$  ya se indicó la manera de como se determinan,  $L$  es la longitud del sistema de tierras, de tal manera que  $L = L_c + 1.15 L_r$ ;  $L_c$  es la parte correspondiente a la longitud de conductores y  $L_r$  a la longitud de las varillas enterradas en el sistema de tierras.

Como la rejilla es rectangular, se debe considerar el tener el mismo espacio entre conductores paralelos y transversales, es decir, misma distancia en cualquier dirección de conductores. Para lograr una distribución uniforme del potencial en la rejilla o malla.

El valor del número de conductores paralelos afecta el cálculo en la determinación de  $E_{\text{malla}}$  y en consecuencia a los factores  $K_m$  y  $K_i$ , por lo que se debe verificar si es necesario el recalcularlos. El valor medio geométrico del número de conductores en cualquier dirección para la malla, se determina por:

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

donde  $n_A$  y  $n_B$  son el número de conductores paralelos y transversales de la malla. Por lo tanto:

$$n = \sqrt{(20)(23)} = 21.447 \cong 21 \text{ conductores en cualquier lugar}$$

Debido a que  $n = 21$  conductores, sí será necesario volver a calcular los factores  $K_m$  y  $K_i$ , como se hizo anteriormente. Por lo que tenemos:

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times 21)^{2/21}} = 0.70049$$

$$K_m = 0.4810732$$

$$K_i = 0.656 + (0.172)(n) = 4.268$$

$$E_{\text{malla}} = \frac{(177.6)(18750)(0.4810732)(4.268)}{2207} = 3098.02 \text{ volts}$$

Debido a que el valor de la tensión de malla NO es menor a la tensión de contacto límite, (3098.02volts > 2694.771 volts), al analizar el porcentaje de diferencia:

$$\text{Razon} = \frac{3098.02 - 2694.771}{3098.02} = 0.1301 = 13.01\%$$

es decir, hay una diferencia de más del 10%. **El diseño preliminar debe modificarse.**

Generalmente hay dos acercamientos para modificar la malla preliminar y encontrar el voltaje de contacto tolerable requerido.

- 1) Reducir la elevación del potencial de malla (GPR) a un valor por debajo del voltaje de contacto tolerable.
- 2) Modificar el diseño preliminar para disminuir el valor de  $E_{\text{malla}}$ .

Ambas aproximaciones son relativas, e involucran cualquiera de los siguientes cambios:

- Espaciamiento de los conductores de la red.
- Longitud total de los conductores.
- Profundidad de la red.
- Añadir longitud adicional (varillas de enterramiento, ect.).

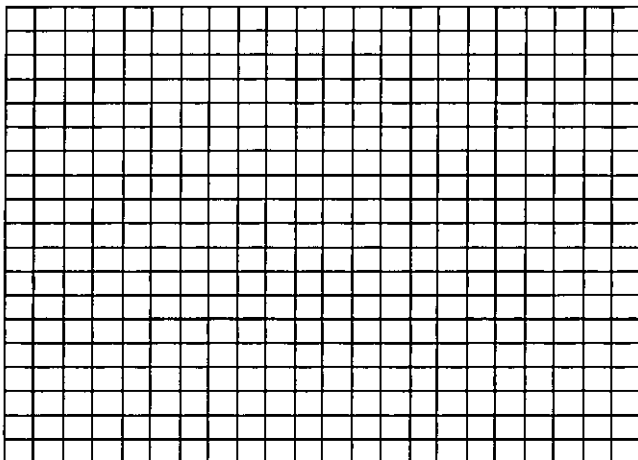
En este ejemplo, debido a que entre  $E_{\text{malla}}$  y  $E_{\text{contacto } 70}$  hay mas del 10% de diferencia, el diseño preliminar será modificado aumentando un conductor en los paralelos y transversales.

$n = 21$ ,  $m = 24$  con lo que:

$$L_{\text{conductor}} = 21 (54 \text{ m}) + 24 (49 \text{ m}) = 2310 \text{ m}$$

$$D = 49 / (21-1) = 2.45 \text{ m}$$

El nuevo diseño de la red de tierras será entonces:



$n = 21$  conductores  
 $m = 24$  conductores  
 $D = 2.45 \text{ m}$  entre conductores

Calculando nuevamente la resistencia de la malla  $R_g$ ,  $E$ ,  $n$  y  $E_{\text{malla}}$ , tenemos que:

$$R_g = 1.570735 \Omega$$

$$E = (18750) (1.1570735) = 29,451.28125 \text{ volts}$$

$$n = \sqrt{(21)(24)} = 22.449 \cong 22 \text{ conductores en cualquier lugar}$$

$$E_{\text{malla}} = 2981.718 \text{ volts}$$

$$E_{\text{paso}} = 2943.436 \text{ volts}$$

analizando el porcentaje de diferencia:

$$\text{Razon} = \frac{2981.718 - 2694.771}{2981.718} = 0.09623 = 9.6235\%$$

es decir, hay menos de un 10% de diferencia entre las tensiones  $E_{\text{malla}}$  y  $E_{\text{contacto } 70}$ , por lo tanto sin modificar el diseño preliminar, se agregarán varillas de enterramiento. Por lo que la nueva longitud, será:

$$0.087 \times 2310 = 200.97; \text{ No. de varillas} = 200.97 / 7.5 = 26.796 \cong 27$$

$$L_r = 27 \times 7.5 = 202.5 \text{ m}$$

$$L = L_c + 1.15 L_r = 2310 + 1.15 (202.5) = 2567.6 \text{ m}$$

Calculando nuevamente la resistencia de la malla  $R_g$ ,  $E$ , y  $E_{\text{malla}}$ , tenemos que:

$$R_g = 1.5630210 \Omega$$

$$E = (18750) (1.5630210) = 29,306.64375 \text{ volts}$$

$$E_{\text{malla}} = 2,120.556 \text{ volts}$$

Analizando, vemos que las tensiones  $E_{\text{malla}}$  y  $E_{\text{contacto } 70}$  son  $2120.556 \text{ volts} < 2694.771 \text{ volts}$ , es decir se cumple que el voltaje de contacto tolerado es mayor al voltaje de la malla, con lo cual ya no es necesario aumentar la longitud de la malla.

### 3.9 CÁLCULO DEL POTENCIAL DE PASO

La ec. que determina su valor es:



$$E_{\text{paso}} = \frac{\rho I_g K_s K_i}{L}$$

donde,  $L = L_c + L_r$  para rejillas sin varillas de aterrizamiento, o para rejillas con varillas de aterrizamiento  $L = L_c + 1.15 L_r$ .

Dependiendo de la profundidad de enterramiento, la constante  $K_s$  será:

- Para profundidades de enterramiento de  $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$ , tenemos:

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

- Para pequeñas profundidades menores a  $0.25 \text{ m}$ , se utiliza:

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

donde:

$$W = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/(n-1).$$

$$\text{Para } n \geq 6: W \approx 1/2(n-1) + \ln(n-1) - 0.423$$

El uso de una ec. diferente para  $K_s$ , dependerá de la profundidad de la rejilla  $h$ , reflejando un factor de crecimiento rápido del voltaje de paso con el incremento de la profundidad.

El valor de conductores  $n$  usado en el cálculo de tensiones de paso, es diferente al usado en el de tensión de malla, pues cuando  $n_A$  y  $n_B$  son el número de conductores en cada dirección. El valor de  $n$  para usar en la determinación de la tensión de paso en los factores  $K_s$  y  $K_i$ , debe ser el valor máximo de  $n_A$  y  $n_B$ ; estableciéndose que  $n = \max(n_A, n_B)$  para el cálculo de  $E_{\text{paso}}$ . Así,  $n_A = 21$ ;  $n_B = 24$ .

Sustituyendo valores, vemos que  $n = 24$  además, tenemos  $n \geq 6$ , sustituyendo:

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[ \frac{1}{2(0.8)} + \frac{1}{2.45+0.8} + \frac{1}{2.45} (1 - 0.5^{24-2}) \right] = 0.4829$$

$$K_i = 0.656 + (0.172)(n) = 4.784$$

$$E_{\text{malla}} = \frac{(177.6)(18750)(0.4829)(4.784)}{2567.6} = 2648.129 \text{ volts}$$

Si comparamos este voltaje de paso de la malla, con el voltaje de paso tolerable, vemos que  $2648.129 \text{ V} < 2694.77 \text{ V}$ , por lo que la malla cumple ampliamente a la tensión tolerable. En caso de que los resultados hubieran sido contrarios ( $E_{\text{paso}} > E_{\text{paso } 70}$ ), se hubiera tenido que modificar el diseño de la malla y vuelto a calcular sus respectivos valores como ocurrió en el cálculo de la tensión de malla.

### 3.10 RESULTADOS FINALES DEL CÁLCULO

21	Conductores paralelos
24	Conductores transversales
2.45 m	Separación entre conductores
2310 m	Longitud del conductor

2470.77 m	Longitud óptima preliminar
2567.6 m	Longitud total
64	Número de varillas
3.771%	Variación
29,518.55 V	Aumento de potencial en la red
2694.77 V	Voltaje de contacto
2120.55 V	Voltaje de malla
10,037.14 V	Voltaje de paso tolerado por el cuerpo humano
2,648.13 V	Voltaje de paso calculado.

## 4. SIMULACIÓN COMPUTACIONAL Y MANUAL DE USUARIO

### 4.1 INSTALACIÓN DEL PAQUETE DE ANÁLISIS Y DISEÑO DE REDES DE TIERRA EN DISCO DURO

El paquete de Análisis y Diseño de Redes de Tierra consta de 3 discos de instalación, los cuales son:

- \* Disco #1.- Disco de instalación (Inicio), que contiene los archivos de INSTALAR.BAT , el cuál es el archivo principal de la instalación, y el archivo ADIOSRED.BAT, que es el archivo para desinstalar el paquete de Redes de Tierra.
- \* Disco #2.- INSTALACION VGA, éste disco contiene los archivos para crear la aplicación en monitor VGA.

Para instalar la aplicación inserta el disquete #1 en la unidad A y ejecuta el archivo INSTALAR.BAT, el cuál creará el directorio RED en tu disco duro instalando el archivo RED\_T.EXE, e instalará los archivos necesarios en C:\WINDOWS\SYSTEM para poder correr la aplicación.

INSTALAR , antes de insertar el disquete #2, manda un mensaje en pantalla indicando que insertes el disquete #2 de acuerdo al tipo de monitor declarado en WINDOWS (VGA ó SUPER VGA), esto es importante para poder trabajar adecuadamente con tu paquete, si no lo haces correctamente, deberás volver a iniciar la instalación.

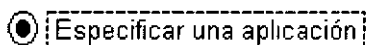
### 4.2 INSTALACION DEL PROGRAMA EN APLICACIONES DE WINDOWS

Una vez instalado el paquete en tu disco duro, ejecutamos WINDOWS, ya estando en ambiente WINDOWS, primero seleccionamos el icono principal de WINDOWS.

Ya seleccionado aparece la ventana de INSTALAR WINDOWS en donde ingresamos al menú de opciones, como se muestra a continuación:



Una vez seleccionando instalar las aplicaciones, aparece la ventana de APLICACIONES PARA INSTALAR, aquí seleccionamos:



Ya seleccionada, presionamos el botón de aceptar y vuelve a aparecer una ventana con el mismo nombre en donde debemos indicar el nombre y ruta de acceso de la aplicación, un ejemplo es el siguiente:

**Nombre y ruta de acceso de la aplicación:**

C:\RED\RED\_T.EXE

Al presionar el botón acepta, WINDOWS automáticamente agrega en el icono de aplicaciones, el icono correspondiente a REDES DE TIERRA, pudiendo ahora correr el paquete con solo hacer doble click en este icono.

El icono correspondiente a REDES DE TIERRA es el mostrado en la siguiente figura:

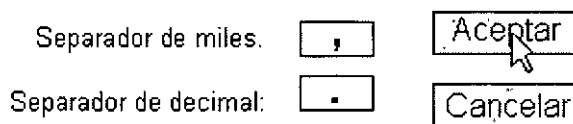


¡ I M P O R T A N T E !

### ANTES DE CORRER EL PROGRAMA

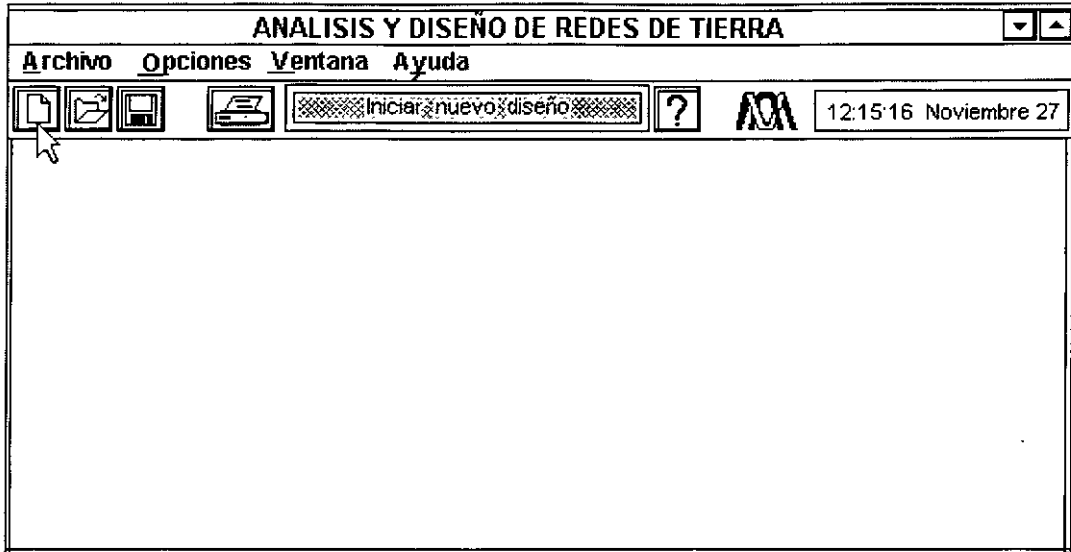
Antes de correr el programa es importante cambiar la configuración de WINDOWS en el separador de miles y en el separador de decimal, debido a que al instalar WINDOWS, éste toma por default al separador de miles como punto (.) y al separador de decimal como coma (,), y al correr el paquete nos crea problemas en los cálculos.

Para esto necesitas entrar al menú PRINCIPAL de WINDOWS; ya estando en este selecciona y activa el icono de PANEL DE CONTROL; una vez activado, selecciona y activa el icono INTERNACIONAL; ya estando en el menú de INTERNACIONAL, sitúa el mouse en la casilla de Formato Numérico, seleccionando el botón de Cambiar..., y en el cuadro de texto del Separador de miles introduce una coma (,) y en el cuadro de texto del Separador de decimal introduce un punto (.), después presiona el botón Aceptar y salte de PRINCIPAL, como se muestra:



### COMO CORRER EL PROGRAMA

Para correr el programa, solo se debe hacer doble click en el icono como ya se indicó, inmediatamente después, aparece la presentación del programa en donde aparecen dos botones, uno que nos muestra los requerimientos necesarios para poder correr el programa y otro para continuar, al presionar el botón continuar o aceptar entramos a la llamada ventana madre.



Como podemos observar, al pasar el mouse por alguno de los botones de la barra de herramientas, aparece en la pantalla de la barra de herramientas el nombre de la función de cada botón, para elegir la función que queramos, solo basta con hacer click en ella.

En las etiquetas se tienen las siguientes funciones correspondientes:






<u>A</u> rchivo	
<u>N</u> uevo	Ctrl-N
<u>A</u> brir	Ctrl-A
<u>G</u> uardar	Ctrl-G
<u>G</u> uardar como..	Ctrl-U
<u>I</u> mprimir	Ctrl-I
<u>S</u> alir	Ctrl-S

<u>V</u> entana	
<u>C</u> ascada	F1
<u>M</u> osaico horizontal	F2
<u>M</u> osaico vertical	F3
<u>O</u> rganizar iconos	F4

<u>A</u> yuda	
<u>I</u> ndice	Shirf+F1
<u>A</u> cerca de....	Shirf+F2
<u>I</u> ntroducción	Shirf+F3
<u>F</u> ormulario	Shirf+F4

<u>O</u> pciones	
✓ <u>B</u> arra de herramientas	Ctrl+B

Los botones tienen las siguientes funciones:

BOTON	FUNCION	EQUIVALENTE	
	Crear nuevo diseño	<u>N</u> uevo	Ctrl+N
	Abrir archivo existente	<u>A</u> brir	Ctrl+A
	Guardar datos del diseño	<u>G</u> uardar Guardar <u>co</u> mo..	Ctrl+G Ctrl +U
	Imprimir información	<u>I</u> mprimir	Ctrl+I
	Ayuda		

Ayuda	
<u>I</u> ndice	Shif+F1
<u>A</u> cerca de....	Shif+F2
<u>I</u> ntroducción	Shif+F3
<u>F</u> ormulario	Shif+F4

En el menú de opciones sólo aparece: Barra de herramientas, depende del usuario si desea hacer uso de ellas o no.

Opciones	
<input checked="" type="checkbox"/> <u>B</u> arra de herramientas	Ctrl+B

El menú de Ventana, sólo es aplicable cuando se tienen abiertas las ventanas de diseño, estas son: ventana de datos, resultados y gráfico.

Ventana	
<u>C</u> ascada	F1
<u>M</u> osaico horizontal	F2
<u>M</u> osaico vertical	F3
<u>O</u> rganizar iconos	F4

Al elegir la opción de crear nuevo diseño, se puede hacer por las dos formas mencionadas anteriormente, al hacerlo nos manda un mensaje de bienvenida, y al aceptarlo aparece dentro de la ventana madre la ventana de datos generales del diseño:

**DATOS GENERALES DEL DISEÑO**

Longitud del terreno	<input type="text"/>	
Ancho del terreno	<input type="text"/>	
Profundidad de la rejilla enterrada	<input type="text"/>	
Espesor de la capa superficial	<input type="text"/>	
Duración de la falla	<input type="text"/>	
Resistividad del terreno	<input type="text"/>	
Resistividad de la roca triturada	<input type="text"/>	
Longitud de la varilla de aterrizamiento	<input type="text"/>	
Factor divisor de corriente	<input type="text"/>	
Factor de crecimiento a futuro	<input type="text"/>	
Valor de la lcc	<input type="text"/>	

Constante de materiales

<input type="text"/>	<input type="text"/>
<input type="text"/>	<input type="text"/>

Tabla de valores

Accesorios

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>

Información

Peso promedio de las personas

<input type="radio"/>	<input type="radio"/>
-----------------------	-----------------------

Información

Volver al menu principal

Aceptar

Resultados

Una vez que aparece esta ventana, el cursor se sitúa en el primer cuadro de texto, una vez introduciendo el valor desde el teclado, presionando la tecla del tabulador, el cursor se posiciona en el siguiente cuadro de texto, así sucesivamente hasta llegar al cuadro correspondiente al valor de la corriente de falla.

Ejemplo:



Nota: Si se cometió un error en algún valor. directamente con el mouse se puede posicionar en el recuadro deseado con solo presionar o hacer click en el botón del mouse.

Ejemplo:



Una vez seleccionados estos valores escogemos el tipo de accesorio a utilizar, en el cuadro de constantes de materiales aparecen 4 cuadros de texto con valores diferentes de cero, estos valores se pueden cambiar de acuerdo al tipo de material a utilizar, debajo de éstos, en el botón de Tabla de Valores, al oprimirlo nos aparece en pantalla una tabla con 10 tipos de materiales de los cuales al seleccionar cualquiera de ellos aparecen los valores correspondientes en el cuadro de Constantes de materiales y Accesorios.

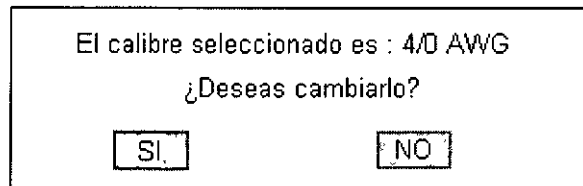
Si el material que nosotros queremos no aparece en la tabla, podemos cambiar o agregar los valores de las constantes del material con solo posicionar el mouse en el cuadro correspondiente a la variable.

Para el tipo de accesorio sólo basta hacer click en el botón deseado *Nombre* Accesorio (para indicar la *Tambiente* y *Tmáxima* de fusión del material escogido). En este cuadro está el botón INFORMACION que al oprimirlo nos muestra la información más relevante sobre accesorios.

Para seleccionar el peso promedio de las personas, solo basta hacer click en cualquiera de las dos opciones 50 Kg. ó 70 Kg.; al igual que en el caso anterior, el botón INFORMACION nos muestra la información más relevante sobre la importancia de seleccionar un peso promedio de las personas.

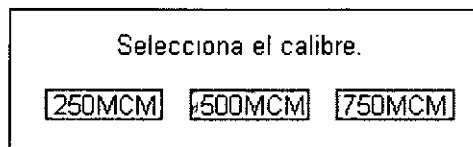
Nota: No hay una secuencia fija para introducir los valores, se puede realizar en la forma deseada.

Se puede observar que los 3 botones de la parte superior sólo el botón Resultados aparece desactivado, esto implica que antes de mostrar los resultados del diseño, primero se debe oprimir el botón Aceptar, al oprimirlo aparece una pequeña ventana:



El calibre seleccionado es : 4/0 AWG  
¿Deseas cambiarlo?

Si la elección es SI, aparece otra ventana dándonos 3 opciones de calibres a elegir:

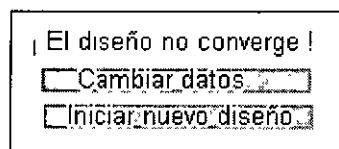


Selecciona el calibre.

Una vez seleccionado el nuevo calibre, o aceptando al calibre seleccionado en el cálculo oprimiendo la tecla NO en la ventana anterior, se activa el botón Resultados y se desactiva el botón Aceptar, ahora ya podemos seleccionar el botón Resultados.

Al oprimir el botón Resultados, aparece la ventana de Resultados del diseño.

Si el diseño o el diseño preliminar no converge, se muestra la ventana siguiente:



¡ El diseño no converge !

Al oprimir el botón Cambiar datos, esta ventana se cierra, dejando solo la ventana de datos, en donde por medio del mouse podemos posicionarnos en el lugar deseado para cambiar el o los valores deseados.

Al oprimir el botón Iniciar nuevo diseño, se cierra esta ventana dejando solo la ventana de datos pero sin ningún valor (como en un principio), y se procede de la misma forma en el llenado de ésta.

El botón Volver al menú principal nos cierra la ventana pero nos da la opción de guardar los cambios actuales de la siguiente forma:



El diseño a cambiado  
¿Deseas guardar los cambios?

[Si]    No    [Cancelar]

escogiendo la opción que nos convenga.

La ventana que muestra los resultados del cálculo es la siguiente:

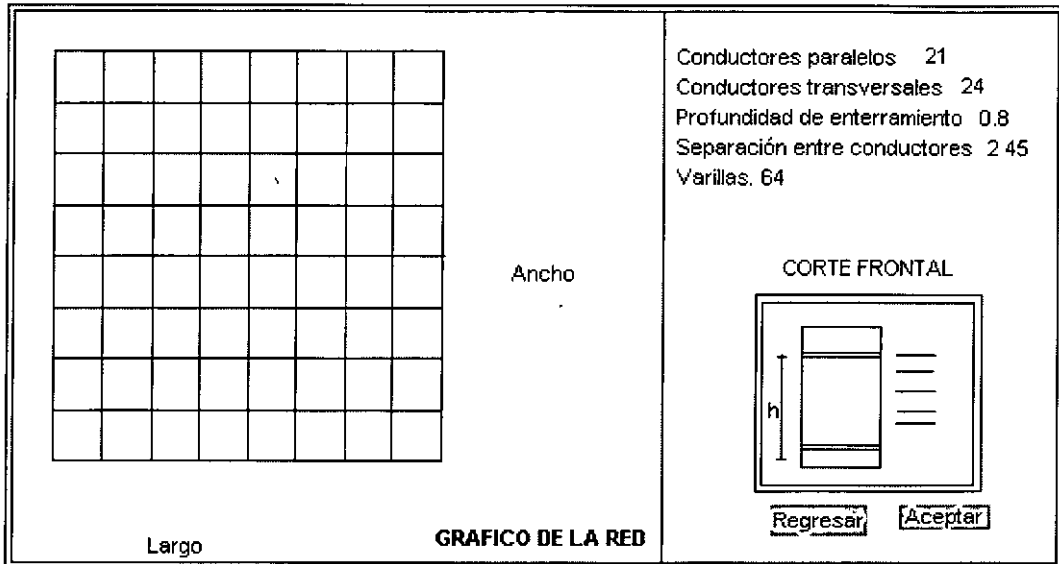
**RESULTADOS DEL DISEÑO**

El calibre del conductor es:	<input type="text"/>	Variación del <input type="text"/> % entre long.
El diámetro del conductor es:	<input type="text"/>	óptima del diseño preliminar y la real
Conductores paralelos	<input type="text"/>	Resistencia de la red <input type="text"/>
Conductores rtransversales	<input type="text"/>	Aumento de potencial de la red <input type="text"/>
Separación entre conductores	<input type="text"/>	Voltaje tolerable de contacto <input type="text"/>
Longitud del conductor	<input type="text"/>	Voltaje de malla <input type="text"/>
Longitud óptima preliminar	<input type="text"/>	Voltaje tolerable de paso <input type="text"/>
Longitud total	<input type="text"/>	Voltaje de paso <input type="text"/>
Número de varillas	<input type="text"/>	

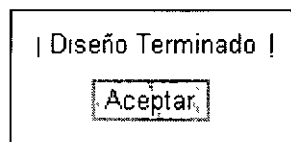
Esta ventana nos muestra los resultados del diseño, en ésta tenemos 3 alternativas a elegir que son: Ver gráfico, Regresar y Volver al menú principal.

Si seleccionamos el botón Volver al menú principal, aparece la misma alternativa que en la ventana de datos, teniendo la opción de cambiar los valores del diseño (datos introducidos), ya que al regresar el botón Resultados se desactiva y el botón Aceptar queda activado.

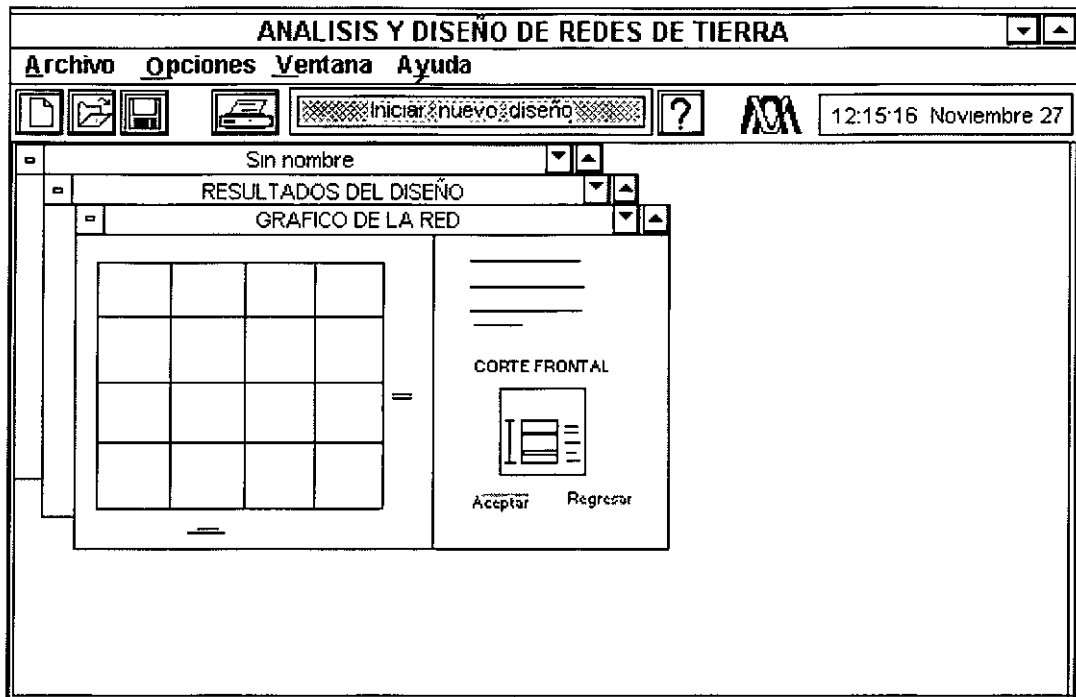
Al oprimir el botón Ver gráfico, se muestra la ventana que contiene el gráfico de la red con sus datos correspondientes.



En esta ventana, solo tenemos las opciones de Regresar y Aceptar. Al presionar Regresar se cierra esta ventana dejando las dos ventanas anteriores (datos y resultados), quedando activada la ventana de resultados. Al presionar Aceptar aparece el siguiente mensaje:



Este botón (Aceptar) se puede presionar con el mouse o directamente presionando la tecla Enter del teclado, al hacerlo, esta pequeña ventana se cierra quedando las 3 ventanas del diseño abiertas, como se muestra a continuación:



Para guardar el diseño, ya sea que se seleccione en Archivo o presionando el botón de Guardar, en cualquiera de las 2 opciones, indique el nombre deseado con extensión \*.RED .

Si queremos iniciar un nuevo diseño, seleccionamos en el menú de Archivo la opción Nuevo ó el botón de Iniciar nuevo diseño, automáticamente se cierran las tres ventanas y se vuelve a abrir la ventana de datos realizando el mismo procedimiento ya establecido.

Para abrir algún diseño ya elaborado, solo presionamos el botón de Abrir archivo existente ó en el menú de Archivo seleccionamos Abrir, indicando el nombre y la extensión \*.RED de algún diseño ya elaborado con anterioridad.

### COMO DESINSTALAR EL PAQUETE

Para desinstalar el paquete inserta el disquete #1 en la unidad A y ejecuta el archivo ADIOSRED.BAT, el cuál borrará el directorio C:\RED\EJEMPLOS de tu disco duro junto con todos los archivos contenidos en él, también eliminará los archivos instalados en el directorio C:\WINDOWS\SYSTEM

Una vez borrado el directorio matriz C:\RED, tendrás que borrar la aplicación REDES DE TIERRA, para borrar ésta aplicación tienes que entrar a WINDOWS; ya estando en ambiente WINDOWS, posícionate en el icono de REDES DE TIERRA y dale un click, oprime la tecla suprimir (Supr ó Del) y presiona el botón aceptar en el mensaje en pantalla, sino tienes más aplicaciones, haz lo mismo con el icono del grupo APLICACIONES.

### LIBROS:

“ Raull Martín, José. Diseño de Subestaciones eléctricas.  
México, McGraw-Hill, 1992. 510 pp.

“ Lazar, Irwin. Análisis y diseño de sistemas eléctricos para plantas industriales.  
México, Limusa, 1992. 210 pp.

“ Olle L. Elgerd, Electric Energy System Theory an introduction.  
De. Mc Graw Hill, Second Edition.

#### **NORMAS:**

\* NOM-001-SEMP-1994 Norma Oficial Mexicana  
Relativa a las Instalaciones Destinadas al Uso de la Energía Eléctrica  
INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL  
MEXICO 1995, S.E.P  
CAP. 2 DISEÑO Y PROTECCION DE LAS INSTALACIONES ELECTRICAS  
secc. 250 puesta a tierra pp 72-96  
CAP. 24 SUBESTACIONES  
secc. 2403 sistemas de tierra pp 654-656

\* ANSI/IEEE Std 142-1982  
IEEE Recommended Practice for Grounding of Industrial and  
Commercial Power Systems.

\* ANSI/IEEE Std 81-1983  
IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity , Ground Impedance,  
and earth Surface Potentials of a Ground System.

\* ANSI/IEEE Std 80-1986  
IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding.

\* ANSI/NFPA 70-1993  
National Electric Code.

#### **MANUALES:**

- ° Microsoft VISUAL BASIC 3.0, Using Visual Basic.
- ° Microsoft VISUAL BASIC 3.0, Tools.
- ° Microsoft VISUAL BASIC 3.0, Microsoft Foundation Class Library

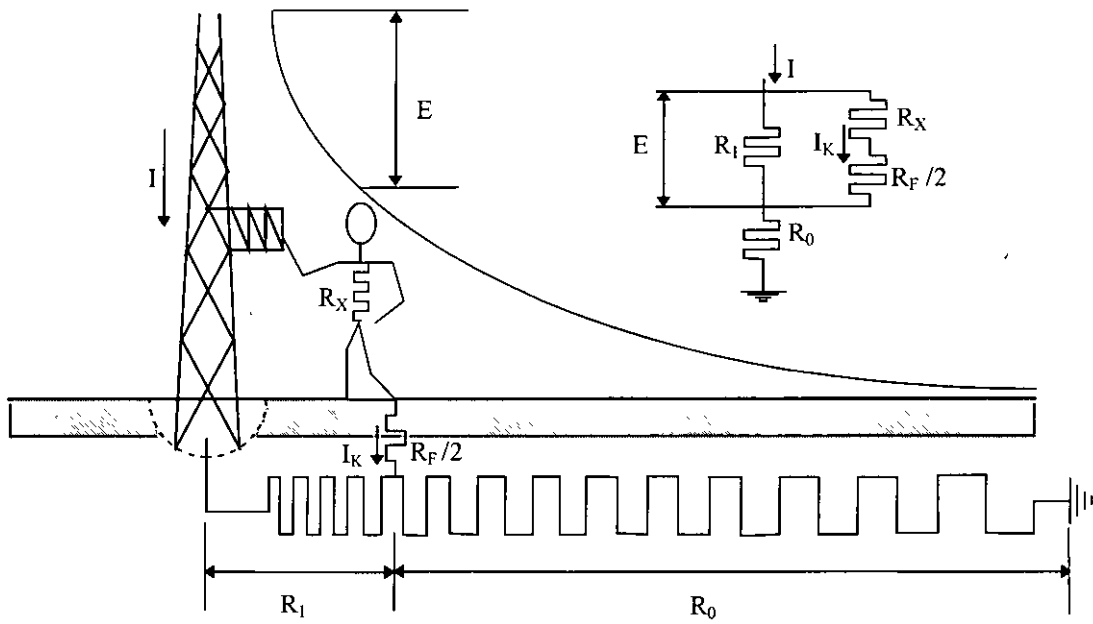
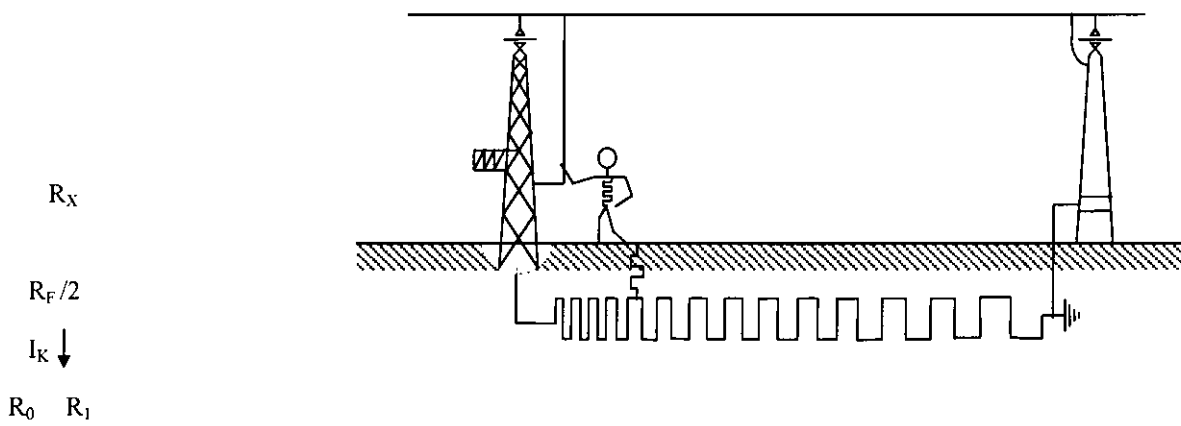


Figura 1 Tensiones de contacto.





**FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM  
DIVISIÓN DE EDUCACIÓN CONTINUA**



**DIVISIÓN DE EDUCACIÓN  
CONTINUA Y A DISTANCIA**

**DIPLOMADO  
DISEÑO Y CÁLCULO DE  
INSTALACIONES ELÉCTRICAS  
(RESIDENCIALES, INDUSTRIALES Y  
ESPECIALES)**

**MÓDULO III  
C. CA411 PUESTA A TIERRA**

**ANEXO-FORMULARIO**

**EXPOSITOR: DR. FERNANDO TOLEDO TOLEDO  
DEL 29 DE OCTUBRE AL 08 DE DICIEMBRE DE 2007  
PALACIO DE MINERÍA**

# FORMULARIO PARA EL CÁLCULO DE REDES DE TIERRA

$$I_g = I_{fa} C_p D_f S_f$$

Donde:

- $C_p$  = Factor de proyección de corriente por crecimiento del sistema.  
 $D_f$  = Factor de decremento para el cálculo de  $I_g$   
 $S_f$  = Factor de división de corriente.

$$A_{mm^2} = I_g \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[ 1 + \frac{T_{max} - T_a}{K_o + T_a} \right]}}$$

$$A_{CM} = I_g (1973.52) \sqrt{\frac{t_c \alpha_r \rho_r 10^4}{TCAP \ln \left[ 1 + \frac{T_{max} - T_a}{K_o + T_a} \right]}}$$

donde:

- $A$  = sección del conductor en mm<sup>2</sup> o en circular-mils.  
 $I_g$  = corriente corregida de falla a tierra (kA)  
 $t_c$  = tiempo de duración de la falla en segundos.  
 $\alpha_r$  = coeficiente térmico de resistencia a 20°C.  
 $\rho_r$  = constante de resistividad a 20°C en mΩ-cm.  
 $T_{máx}$  = temperatura máxima admisible en °C.  
 $T_a$  = temperatura ambiente en °C.  
 $K_o$  =  $1/\alpha_o$  a 0°C.  
 $TCAP$  = constante de la capacidad térmica del conductor en J/cm<sup>3</sup>/°C

Cabe hacer notar que el valor de las constantes de los materiales empleados en las anteriores fórmulas, variarán de acuerdo al tipo de construcción del conductor empleado (Ver Tabla 1, Cap. 9 de ANSI/IEEE Std 80-1986). En la práctica se utiliza comúnmente el conductor de cobre desnudo con alma de acero, sin embargo, existen otros conductores de fabricación diferente, a los que les corresponde sus respectivos valores.

Por lo que tenemos:

- $I_g$  = 18.75 kA  
 $t_c$  = 0.22 seg  
 $T_{máx}$  = 1084°C  
 $T_a$  = 40°C  
 $\rho_r$  = 5.862 mΩ-cm  
 $\alpha_r$  = 0.00378  
 $K_o$  = 245  
 $TCAP$  = 3.846 J/cm<sup>3</sup>/°C

• Voltaje de paso:

$$E_{paso\ 50} = \frac{(1000 + 6C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.116}{\sqrt{t_c}}$$

$$E_{\text{paso } 70} = \frac{(1000 + 6C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.157}{\sqrt{t_c}}$$

• Voltaje de contacto:

$$E_{\text{contacto } 50} = \frac{(1000 + 1.5C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.116}{\sqrt{t_c}}$$

$$E_{\text{contacto } 70} = \frac{(1000 + 1.5C_s \{h_s, K\} \rho_s) 0.157}{\sqrt{t_c}}$$

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$

$K$  = factor de las relaciones de resistividad del suelo y la capa superficial.  
 $h_s$  = espesor de la capa de superficie.

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2n h_s}{0.08}\right)^2}} \right]$$

$$C_s = 1 - a \left[ \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2h_s + a} \right]$$

$a$  es una constante igual a 0.106 m,

• Para 50 Kg:

$$L_{\text{preliminar}} = \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_c}}{(116 + 0.174 C_s \{h_s, K\} \rho_s)}$$

• Para 70 Kg:

$$L_{\text{preliminar}} = \frac{K_m K_i \rho I_G \sqrt{t_c}}{(157 + 0.235 C_s \{h_s, K\} \rho_s)}$$

a su vez, el valor de  $K_m$  (factor de geometría de la red) está definido por :

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



donde:

$K_{ii}$  (factor de peso en función de las varillas enterradas), igual a 1 para rejillas que tienen varillas enterradas. Si no existen varillas en el sistemas de tierras se aplica la fórmula:

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

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

$h_0 = 1$  m (profundidad de referencia).

$D =$  separación entre conductores paralelos en m.

$d =$  diámetro del conductor en m.

$h =$  profundidad de enterramiento de la red en m.

$n =$  número de conductores paralelos.

$$R_g = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A} + \frac{\rho}{L}}$$

Para mallas enterradas entre 0.25 y 2.5 m, se usa la aproximación de Sverak:

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left[ 1 + \frac{1}{1 + h \sqrt{\frac{20}{A}}} \right] \right]$$

donde:

$R_g =$  resistencia del área aterrizada.

$\rho =$  resistividad promedio del terreno en  $\Omega\cdot\text{m}$ .

$A =$  área ocupada por la malla aterrizada en  $\text{m}^2$ .

$L =$  longitud total del conductor enterrado en m.

$h =$  profundidad de enterramiento de la malla.

$$E = I_g \times R_g$$

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

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

donde  $n_A$  y  $n_B$  son el número de conductores paralelos y transversales de la malla.

$$E_{\text{paso}} = \frac{\rho I_g K_s K_i}{L}$$

donde,  $L = L_c + L_r$  para rejillas sin varillas de aterrizamiento, o para rejillas con varillas de aterrizamiento:

$L = L_c + 1.15 L_r$ . Dependiendo de la profundidad de enterramiento, la constante  $K_s$  será:

- Para profundidades de enterramiento de  $0.25 \text{ m} < h < 2.5 \text{ m}$ , tenemos:

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

- Para pequeñas profundidades menores a  $0.25 \text{ m}$ , se utiliza:

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

donde:

$$W = 1/2 + 1/3 + 1/4 + \dots + 1/(n-1).$$

$$\text{Para } n \geq 6: W \approx 1/2(n-1) + \ln(n-1) - 0.423$$