

Mallas de Tierra en Alta Tensión

Norma IEEE 80 - 2000

Dr. Ing. Mario Vignolo

Ing. Fernando Berrutti

Facultad de Ingeniería
Universidad de la República

Segundo semestre de 2011

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Objetivo de la puesta a tierra en estaciones	1
1.2. Elementos a ser aterrados	1
1.3. Implementación del sistema de puesta a tierra	2
1.4. Alcance del documento	2
1.5. Limitaciones de la norma IEEE 80	2
1.6. Metodología sistemática de cálculo	2
2. Modelado del terreno	5
2.1. Medición de resistividad del terreno	5
2.2. Modelado del terreno	6
2.2.1. Modelado del terreno en dos capas: Método de Tagg	7
2.2.2. Método de Endrenyi	10
3. Elección del conductor	12
3.1. Materiales empleados y corrosión	12
3.2. Dimensionado de conductores	13
4. Tensiones de paso y contacto admisibles	15
4.1. Efecto de la duración y magnitud de la corriente en el cuerpo humano	15
4.2. Resistencia del cuerpo humano	16
4.3. Tensiones admisibles	16
4.3.1. Circuito equivalente en caso de defectos	16
4.3.2. Tensiones de paso y toque admisibles	17
4.3.3. Tensiones de transferencia	18
5. Diseño preliminar de la malla de tierra	20
5.1. Generalidades	20
5.2. Características geométricas de la malla	21
5.3. Coexistencia con la obra civil de la estación	21
6. Cálculo de la resistencia de la malla	22
6.1. Cálculo de resistencia según Sverak	22
6.2. Cálculo de resistencia según Schwarz	23

7. Cálculo de corriente de circulación y GPR	25
7.1. Corrientes de cortocircuito	25
7.1.1. Componentes simétricas	26
7.2. Factor de asimetría del cortocircuito	28
7.3. Arquitectura de la red eléctrica de alta tensión	29
7.3.1. Inserción de instalaciones proyectadas a la red existente	29
7.3.2. Circuitos de tierra en alta tensión	29
7.4. Ampliaciones en la red eléctrica	30
7.5. Corriente de diseño	31
7.6. Cálculo del GPR	31
8. Evaluación de la malla de tierra	32
8.1. Cálculo de tensiones de paso y contacto en la malla	32
8.2. Modificación del diseño original	32
8.3. Elaboración de detalles de diseño	33
A. Cálculo de parámetros	34
A.1. Cálculo de tensión de mesh E_m	34
A.1.1. Cálculo del factor K_m	34
A.1.2. Cálculo del factor K_i	35
A.1.3. Cálculo de L_M	35
A.2. Cálculo de tensión de paso E_s	36

Capítulo 1

Introducción

1.1. Objetivo de la puesta a tierra en estaciones

Primordialmente son dos los objetivos de la realización de una puesta a tierra en las instalaciones eléctricas:

1. Proveer un camino de descarga a tierra de corrientes producidas por efecto de la operación normal o en falta de un sistema eléctrico, sin exceder los límites permisibles por los equipos afectados por la falta.
2. Asegurar la integridad física de cualquier persona que pueda encontrarse en las inmediaciones de la estación al momento de producirse una falta, mediante la limitación de las tensiones de contacto y paso.

Estos objetivos se logran controlando la interacción del sistema de puesta a tierra, específicamente diseñado para controlar la elevación de potencial en caso de falta, y los circuitos accidentalmente puestos a tierra por defectos propios de la instalación eléctrica.

1.2. Elementos a ser aterrados

Existen dos categorías de circuitos de tierra en las estaciones, cada uno de los cuales, engloba una serie de dispositivos con características en común:

1. **Tierra de protección:** Se encuentran en esta clasificación la puesta a tierra de todos los elementos metálicos que accidentalmente pueden quedar en tensión, como por ejemplo: bastidores y herrajes de seccionadores o disyuntores; carcasas de los transformadores; envolventes de los tableros de BT y celdas de MT/AT; puertas, portones, ventanas y barandas en edificios.
2. **Tierra de servicio:** Se encuentran en esta clasificación los dispositivos que intencionalmente se ponen a tierra: descargadores de sobretensión; seccionadores de puesta a tierra; neutro de transformadores de MT y BT.

La norma IEEE-80 aconseja la ejecución de una malla de tierra común, que interconecte ambos sistemas de tierra.

1.3. Implementación del sistema de puesta a tierra

Las puestas a tierra en estaciones se logran a través de la ejecución de mallas de tierra. Dichas mallas están constituidas por un sistema de electrodos desnudos interconectados, enterrados bajo tierra, dispuestos en forma tanto horizontal (conductores de cobre desnudo) como vertical (jabalinas), proveyendo una superficie "equipotencial" para los dispositivos eléctricos y las estructuras metálicas dispuestas en una estación.

1.4. Alcance del documento

El presente documento está basado en la metodología de diseño de mallas de tierra prevista en la norma IEEE 80-2000, pero incorporando también criterios de diseño establecidos por autores que son referidos en la norma, como otras normas publicadas por la propia IEEE.

Los cálculos presentados en esta norma permiten la utilización de la misma para mallas de tierra con forma de L ó T y están previstos para las mallas de tierra de estaciones intemperie. Esta misma norma es aplicable a las instalaciones interiores, bajo determinadas condiciones de montaje.

El presente documento fue elaborado con el objetivo de introducir al estudiante en el diseño de mallas de tierra de alta tensión, pero a efectos de elaborar un diseño riguroso resulta insustituible el estudio de la norma IEEE-80/2000.

1.5. Limitaciones de la norma IEEE 80

Se deben considerar las siguientes hipótesis de trabajo:

- El terreno presenta una resistividad uniforme.
- Los cálculos de las tensiones de paso y contacto que aparecen durante un defecto son validados en base a aproximaciones realizadas mediante el cálculo de elementos finitos, y cotejando estos resultados con simulaciones hechas por computadora.
- Se supone una distribución de corriente uniforme en toda la malla.
- El documento refiere exclusivamente al diseño de malla de instalaciones exteriores, sin embargo, puede ser aplicada a instalaciones interiores tomando precauciones.

1.6. Metodología sistemática de cálculo

El diagrama de flujos explica cómo proceder en forma sistemática para diseñar una malla de puesta a tierra. Si bien se explicarán todos los puntos con detalle, a continuación se hará un breve comentario sobre cada paso a realizar de

forma de poder comprender rápidamente el criterio de diseño, y la característica iterativa del mismo.

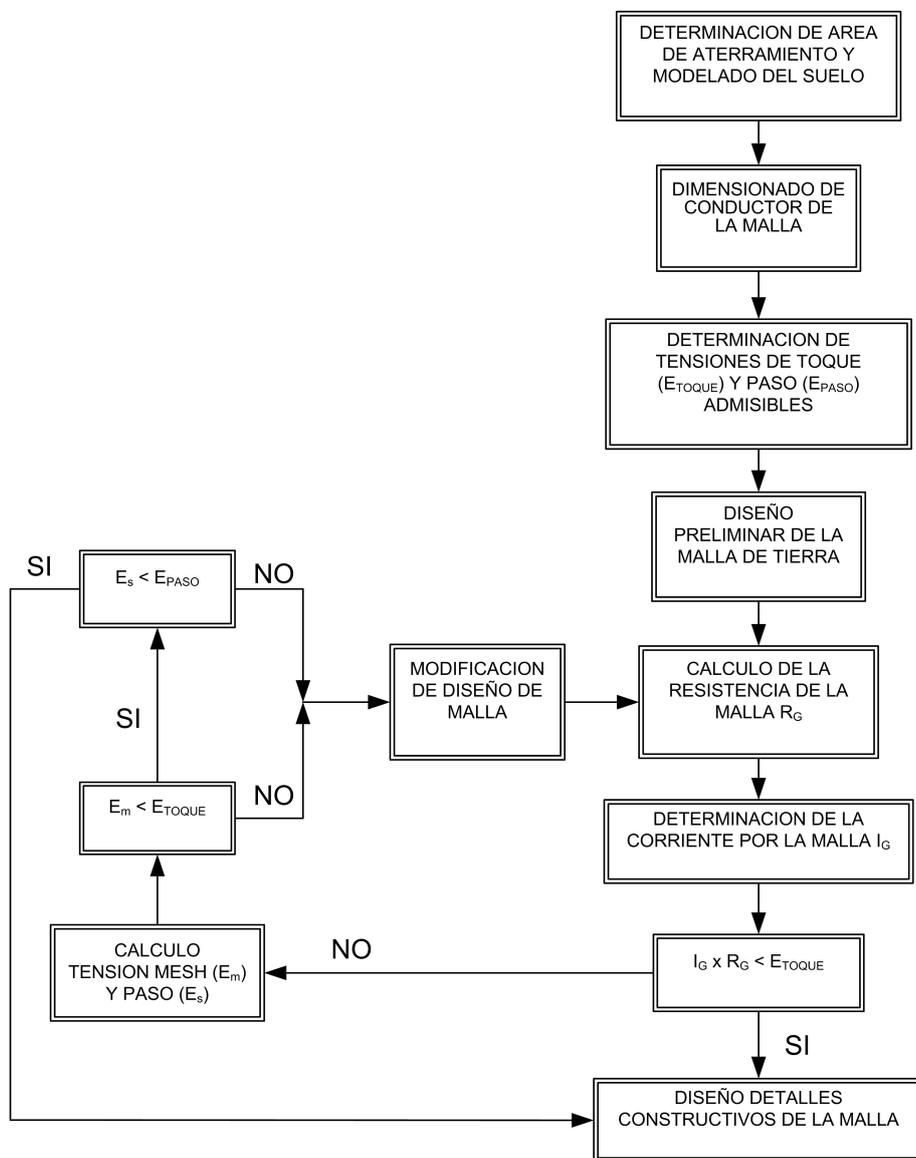


Figura 1.1: Metodología sistemática de cálculo

Paso 1: Determinación del área de aterramiento y modelado del suelo

Implica el conocimiento de dónde se va a realizar la instalación, qué área se dispone para la misma, cómo es la red de distribución y transmisión en el emplazamiento y cuáles son las características del suelo donde se ejecuta la malla.

Paso 2: Elección del conductor de la malla

Implica la determinación de los materiales a ser utilizados, no solamente en la propia malla, sino en todos los elementos auxiliares, como ser; los elementos de unión entre conductores, las diferentes derivaciones y conexiones para el aterramiento de las diversas partes metálicas de la instalación. Luego de tener cierta experiencia en el diseño de mallas de tierra, y conocer las limitaciones a nivel constructivo a la cual se encuentran sujetas, este paso es generalmente salteado.

Paso 3: Determinación de tensiones de paso y contacto admisibles

Conociendo la red eléctrica local y las diferentes posibles configuraciones de la misma, así como las características del suelo, se determina cuáles son las máximas tensiones de contacto y paso admisibles por el cuerpo humano, sin sufrir daños irreversibles.

Pasos 4...11: Diseño físico y cálculo de la malla de tierra

Estos pasos implican la determinación del cortocircuito fase-tierra de acuerdo a la instalación particular, la proposición de una malla de aterramiento preliminar, y la evaluación del desempeño de la misma en caso de ocurrencia de una falla. En caso de no cumplir con los requisitos de seguridad, se deberá rediseñar la malla hasta que los cumpla, debiendo repetirse cada uno de los pasos, hasta que todas las condiciones de seguridad se verifiquen (paso 11).

Paso 12: Definción de detalles constructivos

Habiendo determinado la geometría de la malla, se deben determinar los detalles correspondientes al aterramiento de los diversos componentes de la instalación.

Capítulo 2

Modelado del terreno

2.1. Medición de resistividad del terreno

Para diseñar una malla de puesta a tierra es imperativa la realización de ensayos mediante el método de Wenner para determinar las características de resistividad del terreno en el sitio donde se montará la instalación correspondiente, determinando el modelo de suelo más conveniente de acuerdo a los datos recabados. Esto será útil para la evaluación de la resistencia de la malla de tierra diseñada, y para el cálculo de las tensiones de paso y contacto que se producen frente a la aparición de un defecto.

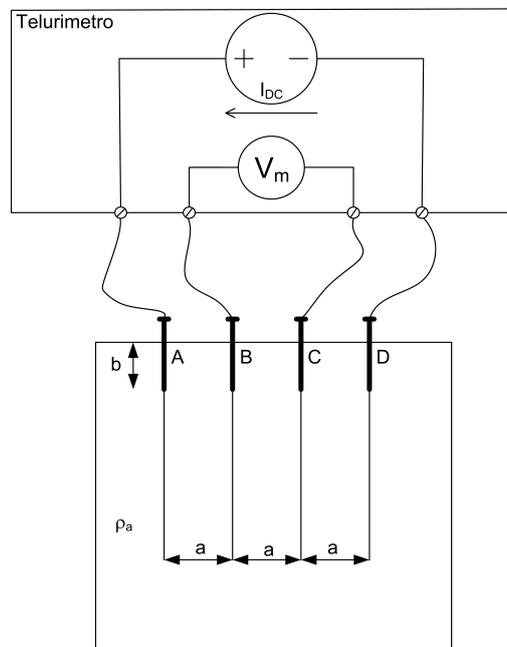


Figura 2.1: Método de Wenener

De la teoría electromagnética, se puede deducir la siguiente expresión relacionando la tensión medida, con la corriente inyectada por el telurímetro:

$$V = \frac{\rho I}{4\pi} \left(\frac{1}{a} + \frac{2}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}} \right) \quad (2.1)$$

Tomando en cuenta que $R = \frac{V}{I}$:

$$\rho = \frac{4\pi a R}{1 + \frac{2a}{\sqrt{a^2 + 4b^2}} - \frac{2a}{\sqrt{4a^2 + 4b^2}}} \quad (2.2)$$

Bajo el supuesto que $a > 20b$, lo cual se cumple prácticamente en todos los casos (la distancia "a" varía generalmente entre 2 y 30 metros y "b" no suele ser más de 20 cm), se puede simplificar la expresión anterior, llegando a:

$$\rho(a) = 2\pi a R \quad (2.3)$$

Dependiendo de la distancia "a" entre las jabalinas de prueba y la dirección tomada, se puede establecer la resistividad aparente del terreno a una profundidad "a" en la dirección establecida. Este ensayo debe repetirse para diversos valores de "a", tan altos como sea posible, dentro del terreno donde se montará la instalación, y en por lo menos tres direcciones. Luego de realizados los ensayos, se deberá determinar una única serie de valores $\rho(a)$ ya sea mediante el promedio de los valores de resistividad para un valor dado de "a" en las diferentes direcciones medidas, o tomando el valor de resistividad más conservador para la profundidad "a" en todas las direcciones medidas.

2.2. Modelado del terreno

Existen básicamente tres formas de modelar el suelo, a partir del relevamiento de los datos de campo:

- Modelo uniforme.
- Modelo en dos capas.
- Modelo multicapa.

El objetivo en todos los casos es lograr obtener un modelo de suelo, con el cual se puedan realizar los diferentes cálculos que se explicitarán más adelante.

El modelo uniforme se utiliza solamente en caso que exista una dispersión muy baja de los datos de resistividad relevados en campo respecto a la media (menor al 10%), siendo la resistividad aparente el promedio de las resistividades relevadas, la utilización de este criterio es tan sencilla como limitada. Para el modelado en dos capas se utiliza el método de Tagg o de Sunde que posteriormente será utilizado para determinar la resistividad aparente del terreno, a partir del método gráfico de Endrenyi. Por último, existen varios métodos de modelado para terrenos multicapa, los cuales no serán tratados en el presente curso, que igualmente permiten llegar mediante reducciones sucesivas a un modelo de dos capas para posteriormente aplicar el método de Endrenyi.

2.2.1. Modelado del terreno en dos capas: Método de Tagg

El modelado del terreno en dos capas supone la existencia de una primera capa, de profundidad "h", cuyo límite con la segunda capa es paralelo al suelo.

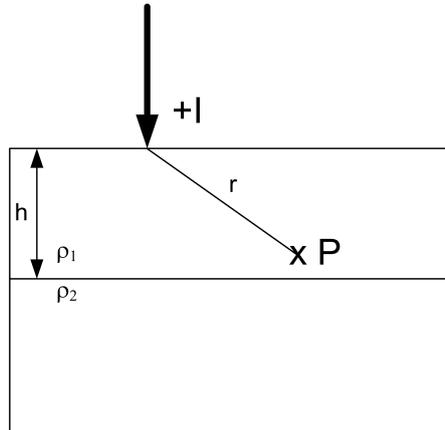


Figura 2.2: Método de Tagg

A partir de la teoría electromagnética, el método de Tagg se basa en la siguiente expresión para calcular la tensión de un punto P respecto a una referencia infinita, para un suelo modelado en dos capas como indica la figura. Siempre que se inyecte una corriente I por la superficie, y que el punto se encuentre en la primera capa a una distancia r de la fuente de corriente, la tensión del punto P será:

$$V_P = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{r} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{r^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.4)$$

Donde:

- V_P : Es la tensión de un punto P cualquiera de la capa superior respecto al infinito.
- ρ_1 : Resistividad de la primera capa.
- h: Profundidad de la primera capa
- r: Distancia del punto "P" a la fuente de corriente
- K: Coeficiente de reflexión, según la fórmula $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$
- ρ_2 : Resistividad de la segunda capa (de profundidad infinita).

Si se realiza la medición a partir del método de Wenner se estaría en la siguiente situación:

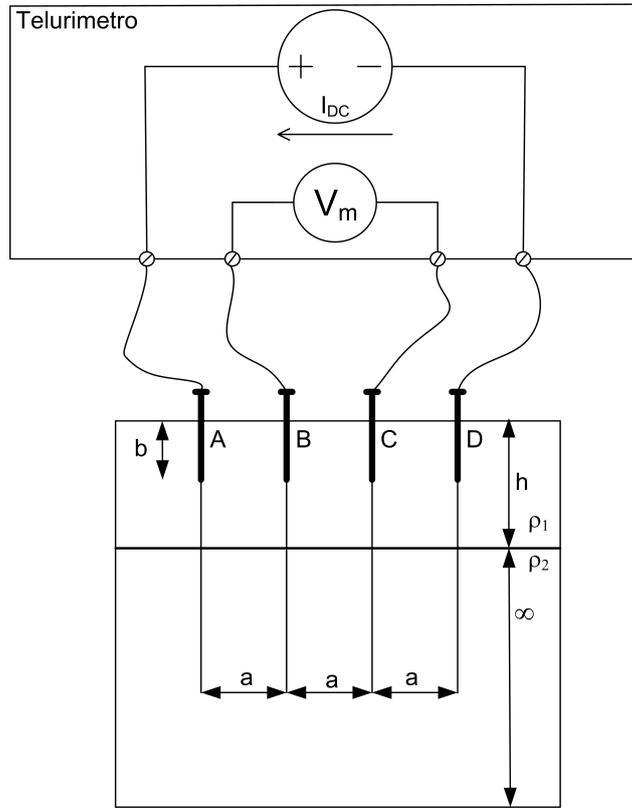


Figura 2.3: Método de Wenner aplicado a suelo estratificado en dos capas

Suponiendo una profundidad de entierro de las jabalinas despreciables, se llega a la siguiente expresión de tensión entre B y C cuando se inyecta una corriente I entre los electrodos A y B:

$$V_C = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.5)$$

$$V_B = \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{a^2 + (2nh)^2}} \right] - \frac{\rho_1 I}{2\pi} \left[\frac{1}{2a} + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K^n}{\sqrt{(2a)^2 + (2nh)^2}} \right] \quad (2.6)$$

Por lo tanto, la tensión establecida entre los bornes B y C es:

$$V_{BC} = \frac{\rho_1 I}{2\pi a} \left\{ 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \right\} \quad (2.7)$$

Tomando en cuenta que la resistencia medida es numéricamente $R = \frac{V_{BC}}{I}$ y que $\rho(a) = 2\pi a R$:

$$M(h) = \frac{\rho(a)}{\rho_1} = 1 + 4 \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{K^n}{\sqrt{1 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} - \frac{K^n}{\sqrt{4 + \left(\frac{2nh}{a}\right)^2}} \right] \quad (2.8)$$

A partir de esta ecuación se obtiene el coeficiente $\frac{\rho(a)}{\rho_1} = f\left(\frac{h}{a}, K\right)$

Suponiendo que la gráfica de resistividad en función de la distancia sea monótona (creciente o decreciente), es posible hallar un modelo en dos capas a partir del siguiente método:

- Trazar la curva $\rho(a)$ obtenida de los datos relevados en campo.
- Prolongar la curva hasta interceptar el eje de ordenadas ($a = 0$). La resistividad en este punto será ρ_1 , correspondiente a la primera capa del modelo.
- Prolongar la curva hacia valores de a muy altos, de forma de hallar la asíntota de la curva. En este caso, se impondrá que $\rho(\infty) = \rho_2$.
- Calcular el coeficiente de reflexión: $K = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1}$.
- Se evalúa $M(h = a)$, con lo cual, se obtiene $\frac{\rho(h = a)}{\rho_1}$, y por consiguiente $\rho(h = a)$.
- Con el valor $\rho(h = a)$ se entra a la curva $\rho(a)$ trazada en la parte 1, y se determina el valor de a que es igual a h , determinando la profundidad de la primera capa.

A partir de este método, se obtiene la resistividad de las dos capas y el valor de profundidad h de la primera capa, que se ajusta a los datos recabados en los ensayos.

Llegado a este punto se deberá determinar la resistividad aparente del terreno de acuerdo al método de Endrenyi, para poder evaluar posteriormente, la resistencia de la malla calculada y las tensiones de paso y contacto que surgen cuando hay un defecto.

2.2.2. Método de Endrenyi

Determinado el modelo de dos capas, se puede deducir un valor de resistividad aparente en función de las características geométricas de la malla utilizando el método gráfico de Endrenyi. Al igual que en el caso del método de Tagg, el método de Endrenyi está basado en la teoría electromagnética de imágenes para la resolución de la ecuación de Laplace.

En forma resumida, el método de Endrenyi calcula la resistividad aparente del terreno en función de dos parámetros adimensionados:

- $\alpha = \frac{A}{hD}$: coeficiente de penetración.
- $\beta = \frac{\rho_2}{\rho_1}$: coeficiente de divergencia.

Donde:

- A: Área cubierta por la malla.
- D: Mayor dimensión del aterramiento (diagonal en caso de una malla rectangular).
- h: profundidad de la primera capa.
- ρ_1 : resistividad de la primera capa.
- ρ_2 : resistividad de la segunda capa.

A partir de estos dos coeficientes, es posible deducir la relación existente entre la resistividad aparente del terreno y la resistividad de la primera capa $N = \frac{\rho_a}{\rho_1}$ en función de la gráfica que se expone a continuación.

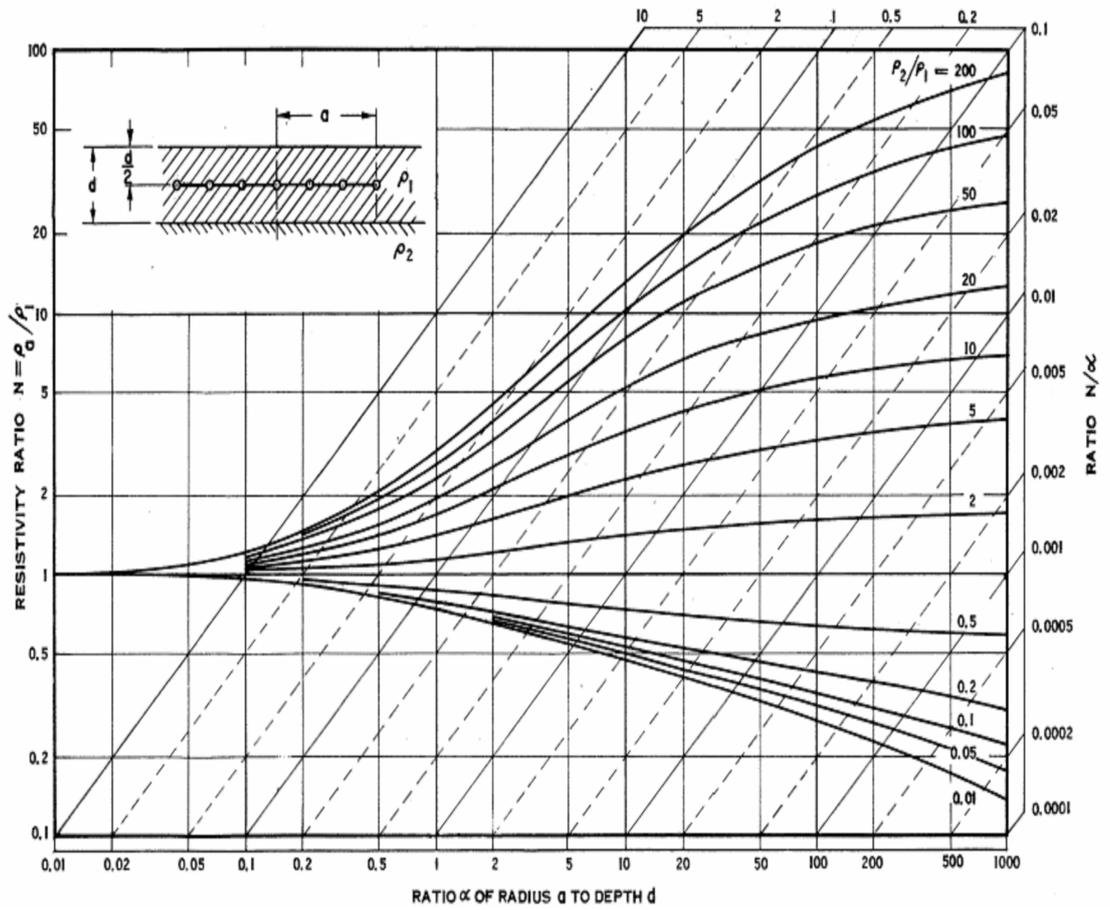


Figura 2.4: Curvas de Endrenyi

Por ejemplo, si de los cálculos surge que $\alpha = 20$ y $\beta = 200$, de la gráfica se deduce que $N = 20$ y por lo tanto, la resistividad aparente será numéricamente veinte veces mayor que la resistividad de la primera capa.

Capítulo 3

Elección del conductor

3.1. Materiales empleados y corrosión

Los materiales empleados usualmente son cobre o aluminio. El primer material es preferido ya que a pesar de ser más costoso, tiene la ventaja de tener una alta conductividad, y ser resistente a la corrosión. El aluminio si bien es menos costoso, presenta problemas de corrosión que pueden perjudicar el desempeño de la malla de tierra por no ser la capa corroída buena conductora.

Las derivaciones de la malla a los equipos se realiza generalmente con soldaduras exotérmicas, las cuales garantizan continuidad en el circuito de tierra, así como un punto de fusión más alto que el del propio cobre, con lo cual, las derivaciones en este caso no constituyen puntos débiles en la instalación, factibles de fusión como es el caso de los conectores a presión de bronce, que tienen un punto de fusión bajo respecto al cobre, y que en determinados cortocircuitos, podrían llegar a fundirse.

La corrosión puede ser considerada como el deterioro de una sustancia o sus propiedades debido a una reacción con el entorno, pudiendo ser esta reacción química, electroquímica, o física. La misma es observada generalmente en las estructuras metálicas y equipos expuestos a la atmósfera, así como enterrados directamente en la tierra. En el caso de los metales, la corrosión es predominantemente electroquímica, debido a la diferencia de potencial en la superficie de un metal o a la diferencia de potencial entre dos metales en contacto.

Este aspecto debe ser considerado al momento de diseñar una malla de tierra dado que en el caso de aterramiento en edificios, el cobre puede causar seria corrosión a los hierros de la estructura y a tuberías de acero.

Algunas medidas preventivas son:

- La utilización de metales galvanizados para la interconexión de estructuras metálicas a la malla de tierra.
- Utilización de protección catódica para estructuras o metales de acero.
- Utilización de cable de cobre aislado en áreas próximas a tuberías de acero.

Esto trae consigo problemas de seguridad y mantenimiento que deben ser considerados y que van más allá del alcance del presente trabajo, y que deberán ser considerados en la etapa de ejecución de la instalación correspondiente.

3.2. Dimensionado de conductores

Los electrodos que conforman la malla, así como todas las uniones o chicones, deben poder soportar sin fundirse las corrientes de cortocircuito que puedan afectar la instalación. La sección mínima de conductor que soporta una determinada corriente de cortocircuito está dada por la siguiente expresión:

$$I = A_{mm^2} \sqrt{\left(\frac{TCAPx10^{-4}}{t_c \alpha_r \rho_r}\right) Ln \left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)} \quad (3.1)$$

Donde:

- I: Corriente de la falta en kA (definida en el diseño).
- A_{mm^2} : Sección del conductor en mm^2 (magnitud a determinar).
- T_m : Máxima temperatura permitida en °C (1083°C).
- T_a : Temperatura ambiente en °C (definido en el diseño).
- T_r : Temperatura de referencia en °C (20°C)
- α_o : Coeficiente térmico de resistividad a 0°C en 1/°C (ver K_o)
- α_r : Coeficiente térmico de resistividad a T_r (0.00393/°C).
- ρ_r : Resistividad del conductor a T_r (1,72 $\mu\Omega.cm$).
- K_o : Constante numérica igual a $\frac{1}{\alpha_o}$ (234).
- t_c : Duración de la falta en segundos (generalmente 1 seg.)
- TCAP: Capacidad térmica del material por unidad de volumen (3.42 J/cm³.°C)

Generalmente, los conductores de tierra son de cobre desnudo de 50 mm^2 de sección a nivel de instalaciones de distribución debido a tres razones fundamentales:

1. Deben ser capaces de resistir la corrosión durante toda la vida útil de la instalación y el cobre presenta, además de una alta conductividad, una corrosión menor que el aluminio con el correr del tiempo.
2. Deben poder soportar esfuerzos mecánicos debido a la ocurrencia del cortocircuito y a la presión ejercida por las diversas máquinas auxiliares utilizadas para el montaje electromecánico que circulan durante la ejecución de la obra (camiones, grúas, etc.).
3. Las corrientes de falta tienen una magnitud entre los 500A y 2500A despojándose por lo general en menos de un segundo.

En el caso de instalaciones de transmisión o centrales generadoras la sección podría inclusive ser mayor debido a la corriente de cortocircuito aportada por los generadores, o por el funcionamiento mallado de la red. En este caso se deberá tener en cuenta que si las tomas de tierra desde la malla no se realizan con soldadura exotérmica, el material con el cual se realiza la derivación, también debe ser considerado para este cálculo, dado que pueden constituir un punto débil de la malla de tierra.

Capítulo 4

Tensiones de paso y contacto admisibles

4.1. Efecto de la duración y magnitud de la corriente en el cuerpo humano

Suponiendo corrientes a frecuencia industrial (50 ó 60 Hz), empíricamente se ha determinado que la máxima corriente que puede soportar el ser humano está vinculada con el tiempo de exposición al choque eléctrico de acuerdo a la ecuación $S_B = I_B^2 t_s$, donde S_B es una constante que depende del peso de la persona e I_B es la corriente en Amperes a la cual se somete el cuerpo durante un tiempo t_s en segundos.

La máxima corriente que puede circular es, por lo tanto:

$$I_B = \frac{k}{\sqrt{t_s}} \quad (4.1)$$

Siendo:

- $k = 0,116$ para una persona de 50kg de peso (lo más usual a los efectos del cálculo).
- $k = 0,157$ para una persona de 70kg de peso.

El tiempo de exposición a la falta se asume igual al tiempo de actuación de las protecciones que se determina en función de las características de la red, siendo el valor típico asumido de actuación de un segundo. En el caso particular de redes aéreas de gran extensión geográfica, este valor podría eventualmente ser más alto dada la programación de los ciclos de reconexión (ver fig. 4.1) y el tiempo de detección de la falta. Asimismo, un tiempo de un segundo es suficiente para que actúe la protección situada aguas arriba de la que se encuentra más inmediata al defecto, en caso que la misma falle por algún motivo.

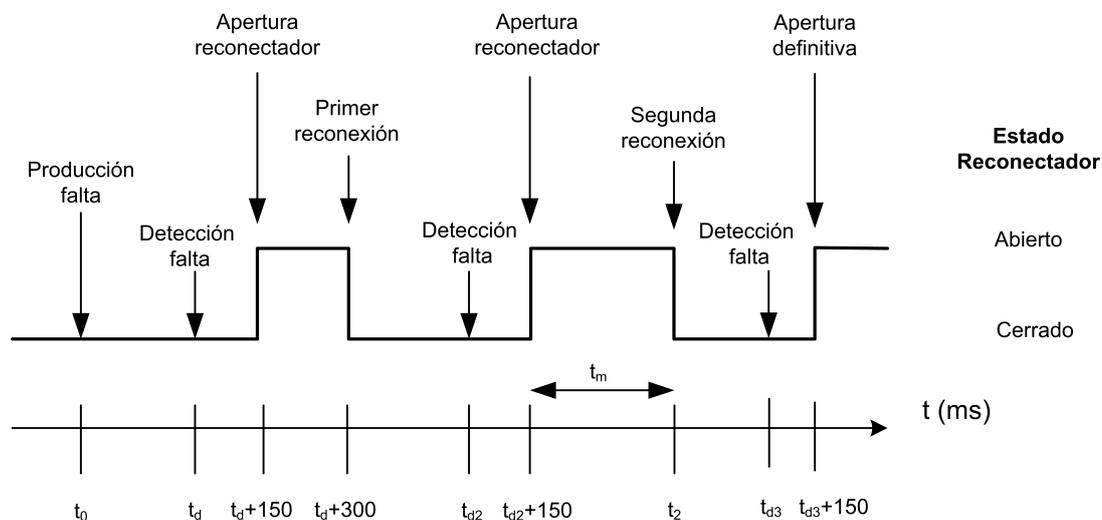


Figura 4.1: Cronograma de ciclos de reconexión

4.2. Resistencia del cuerpo humano

A frecuencia industrial, la resistencia del cuerpo humano se asume como una resistencia. Los caminos que la corriente puede recorrer, básicamente, son tres: de manos a pie; de mano a mano; de pie a pie.

Los experimentos de Dalziel indican que la resistencia que presenta el cuerpo depende de la trayectoria por la que circula la corriente, alcanzando valores que pueden ser de 2330Ω para el contacto mano a mano y de 1130Ω para una trayectoria mano pie, en condiciones en las cuales manos y pies estarían humedecidas con agua salina. En serie con la resistencia del cuerpo en el circuito eléctrico en caso de accidente, se encontrarían las resistencias de contacto de manos/pies con la malla de tierra, las cuales se consideran nulas.

A los efectos de los cálculos, la resistencia del cuerpo humano se asume con un valor de $R_B = 1000\Omega$ independientemente del camino de circulación de corriente a través del cuerpo.

4.3. Tensiones admisibles

4.3.1. Circuito equivalente en caso de defectos

Habiendo determinado la corriente durante un defecto y la resistencia del cuerpo humano, se está en condiciones de calcular la tensión que puede soportar un ser humano, tomando en cuenta dos puntos cualesquiera de contacto. Para la realización de estos cálculos, se realizan dos hipótesis:

1. Se supone el pie como un disco conductor sobre un suelo homogéneo de

resistividad ρ , de radio $b = 0,08m$: $R_F = \frac{\rho}{4b}$. Por lo tanto, para la tensión de toque: $Z_{TH} = 1,5\rho$ y para la tensión de paso: $Z_{TH} = 6,0\rho$

2. A efectos de un cálculo conservador, la resistencia del terreno entre el pie y la malla de tierra, se considera despreciable.

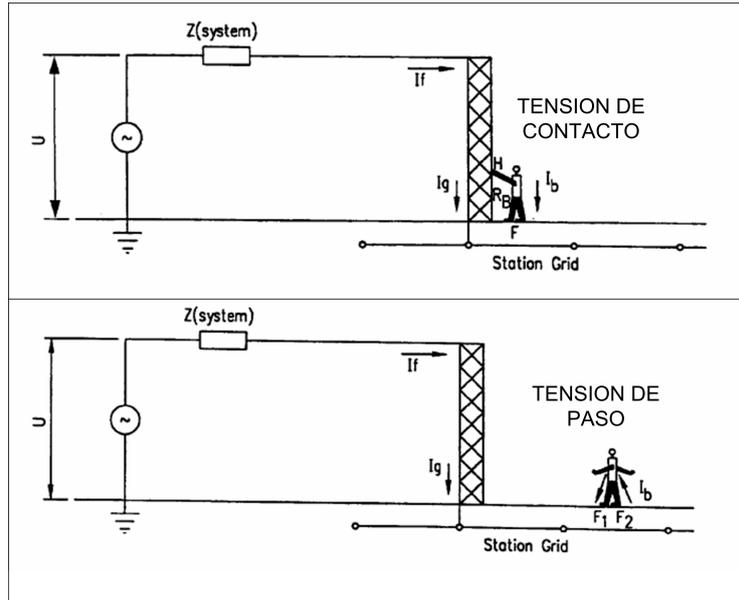


Figura 4.2: Tensiones de paso y toque

4.3.2. Tensiones de paso y toque admisibles

De acuerdo a las secciones anteriores, las máximas tensiones de toque y paso admisibles, para una persona ubicada sobre una superficie de resistividad uniforme ρ estarán dadas por las siguientes expresiones:

$$\begin{aligned} E_{TOQUE} &= I_B (R_B + 1,5\rho) \\ E_{PASO} &= I_B (R_B + 6,0\rho) \end{aligned} \quad (4.2)$$

Por lo tanto, las ecuaciones correspondientes de tensión máxima de toque y paso admisibles para una persona de 50kg son las siguientes:

$$\begin{aligned} E_{TOQUE} &= \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (R_B + 1,5\rho) \\ E_{PASO} &= \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (R_B + 6,0\rho) \end{aligned} \quad (4.3)$$

Habitualmente, se agrega una capa de piedra partida de entre 10 y 15 cm al suelo donde se construye la malla de tierra; en caso que la misma sea intemperie, o una losa de hormigón armado de aproximadamente 20 cm de espesor en caso que se trate de una estación interior. En el caso de las estaciones intemperie, las

calzadas para el acceso de camiones y grúas se realiza con hormigón armado.

Estos materiales tienen una alta resistividad e incrementan la resistencia de contacto existente entre los pies y el suelo natural de la estación, por lo tanto, aumentan la tensión admisible. La ecuación de resistencia de contacto pies-suelo se ve afectada por un término de corrección:

$$R_F = \frac{\rho_s}{4b} C_s (h_s, \rho_s)$$

$$C_s (h_s, \rho_s) \simeq 1 - \frac{0,09 \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0,09} \quad (4.4)$$

Donde:

- ρ_s es la resistividad de la capa superficial (2500 $\Omega.m$ en caso de hormigón seco, 3000 $\Omega.m$ en caso de la piedra partida seca).
- h_s es el espesor de la capa superficial.
- ρ es la resistividad aparente del suelo natural.

Corresponde indicar que el valor de C_s es aproximado, existiendo una desviación máxima del 5 % respecto al valor analítico presentado en la norma IEEE 80 - 2000.

Por lo tanto, se llega a la expresión definitiva para las tensiones de toque y paso admisibles:

$$E_{TOQUE} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1000 + 1,5C_s (h_s, \rho_s) \rho_s)$$

$$E_{PASO} = \frac{0,116}{\sqrt{t_s}} (1000 + 6,0C_s (h_s, \rho_s) \rho_s) \quad (4.5)$$

A partir de la expresión de corrección de la resistencia de contacto con el suelo se puede concluir que la variación de dicha resistencia no será significativa con el índice de humedad que presente el terreno, con lo cual, las tensiones de paso y contacto admisibles tendrán una variabilidad menor que en el caso que no exista la capa de material aislante.

4.3.3. Tensiones de transferencia

Las tensiones de transferencia constituyen un caso especial de la tensión de contacto, en las cuales una persona toma contacto con un objeto accidentalmente puesto en tensión e interconectado en forma directa o indirecta con el sistema de puesta a tierra de la estación. Dicho contacto tiene lugar en un espacio fuera del área cubierta por la malla. Esto trae como consecuencia que la tensión de contacto pueda ser tan alta como el GPR o muy cercana a cero, dependiendo de la distancia donde ocurre el incidente respecto a la ubicación de la malla de tierra, la intensidad de la falla y la resistividad del terreno circundante.

En la etapa de proyecto de una malla de tierra, deberá estudiarse el emplazamiento de la instalación correspondiente y sus alrededores, para determinar

la existencia o no de objetos metálicos que puedan llegar a presentar tensión de forma accidental, y provocar un accidente por transferencia de potencial.

Lo sugerido por la norma en estos casos, es intentar aislar eléctricamente dichos objetos susceptibles a ser puestos en tensión accidentalmente, de forma que no sean accesibles a operadores o público en general.

Capítulo 5

Diseño preliminar de la malla de tierra

5.1. Generalidades

Como fue mencionado anteriormente, las mallas están constituidas por un sistema de electrodos desnudos interconectados, enterrados bajo tierra, básicamente constituidos por conductores de cobre desnudo y jabalinas.

Básicamente, las razones por las cuales se utiliza este tipo de sistemas de puesta a tierra en estaciones son las siguientes:

- La magnitud de las corrientes disipadas en los sistemas de puesta a tierra en estaciones o subestaciones de distribución y subtransmisión son del orden de 1kA, por lo cual, la utilización de jabalinas en forma aislada, provocaría un gradiente de potencial sobre la superficie donde se realiza la puesta a tierra que puede ser peligroso tanto para quienes operan y mantienen la estación, como para los propios equipos de la misma.
- Las grillas son útiles ya que son el factor fundamental de la reducción de las tensiones de paso y toque en las estaciones, pero al estar enterradas entre 50 cm y 150 cm de profundidad, tienen la desventaja que su resistencia es muy dependiente de las condiciones ambientales, las jabalinas permiten llegar a las capas profundas de tierra, cuya dependencia de los parámetros mencionados es mucho menor, homogeneizando la resistividad aparente del terreno independientemente de estas condiciones. Adicionalmente, las jabalinas facilitan la disipación de la corriente en las capas inferiores de menor resistividad.
- Las jabalinas instaladas en el perímetro de la malla contribuyen a disminuir los gradientes de las tensiones de toque y paso en los extremos de la malla, los más peligrosos.

5.2. Características geométricas de la malla

A partir de un layout de la estación a construir, se puede diseñar una malla de tierra siguiendo las siguientes recomendaciones:

- Rodear la estación con un conductor a lo largo de todo el perímetro, extendiéndose del cerco perimetral o límite de 1m a 1.5m, abarcando un área lo suficientemente grande como para tener una resistencia adecuada (este conductor no forma parte integral de la malla calculada, pero sirve para disminuir el gradiente de potencial en el acceso a la instalación).
- Tender conductores de cobre electrolítico desnudo de 50mm^2 a una profundidad de 0.5 a 1.5 metros, formando una grilla con separación de entre 3 y 7 metros (estos conductores sí forman parte integral de la malla a calcular, la cual es enterrada en el terreno natural, y luego, por los motivos ya mencionados, se agrega la capa aislante de piedra partida o eventualmente hormigón).
- Todos los cruces entre conductores se deben realizar con soldadura exotérmica, así como las uniones entre conductores y jabalinas, asegurando un control adecuado de los gradientes de potencial producidos durante la ocurrencia de una falta a tierra.
- Luego de enterrada la malla, se cubre el terreno con una capa de piedra partida de entre 10cm, 15cm o 20cm de espesor (de acuerdo a los requerimientos de diseño), si se trata de una estación exterior. En el caso de estaciones interiores, la losa de hormigón tiene un espesor de entre 10cm y 15cm y presenta una resistividad similar a la de la piedra partida ($2500 \Omega.m$).

5.3. Coexistencia con la obra civil de la estación

Usualmente, no es posible respetar la configuración original de la malla de tierra debido a las fundaciones utilizadas para la obra civil de la estación. Esto incluye:

- Bases de columnas pórtico.
- Bases de reconectores.
- Bases de transformadores y sus descargadores de sobretensión.
- Bases de seccionadores y disyuntores.
- Bases de transformadores de medida y protección.
- Fundaciones de edificios en caso de tratarse de estación interior.

En estos casos, se sacrifica la configuración original de diseño de la malla, procurando agregar conductores de forma de no tener un reticulado con rectángulos mayores a los del valor de diseño, para controlar el gradiente de potencial sobre la superficie.

Capítulo 6

Cálculo de la resistencia de la malla

Ubicados los equipos en la planta civil y eléctrica del proyecto, se procede a evaluar la resistencia de la malla, lo cual en primera instancia permitirá evaluar la elevación de tensión respecto a tierra remota, y eventualmente, considerar la inclusión de la resistencia de la malla dentro de los cálculos de cortocircuito que se deben realizar.

6.1. Cálculo de resistencia según Sverak

La expresión más sencilla para el cálculo de la resistencia de la malla con un alto nivel de precisión está dada por la fórmula de Sverak:

$$R_G = \rho \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left(1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (6.1)$$

Donde:

- ρ : resistividad aparente del suelo, supuesto homogéneo.
- L: longitud total de conductor horizontal enterrado y jabalinas.
- A: área total abarcada por la malla de tierra.
- h: profundidad de entierro de la malla de tierra.

A partir de esta expresión se deduce que la resistencia, como función de la cantidad de cobre enterrado, tiene un valor asintótico, y por lo tanto, a partir de determinada cantidad de cobre enterrado, no se producirán cambios significativos en el valor de la resistencia de puesta a tierra. Por otra parte, un aumento en el área de aterramiento sí puede producir un descenso importante de la resistencia de puesta a tierra.

6.2. Cálculo de resistencia según Schwarz

La fórmula de Schwarz considera la interacción entre los conductores enterrados en forma horizontal y las jabalinas de puesta a tierra, de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$R_G = \frac{R_1 R_2 - R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (6.2)$$

Donde:

- R_1 : resistencia de los conductores enterrados horizontalmente.
- R_2 : resistencia de las jabalinas.
- R_m : resistencia mutua entre el grupo de conductores enterrados horizontalmente con el grupo de jabalinas.

Estas resistencias se calculan de acuerdo a las siguientes expresiones:

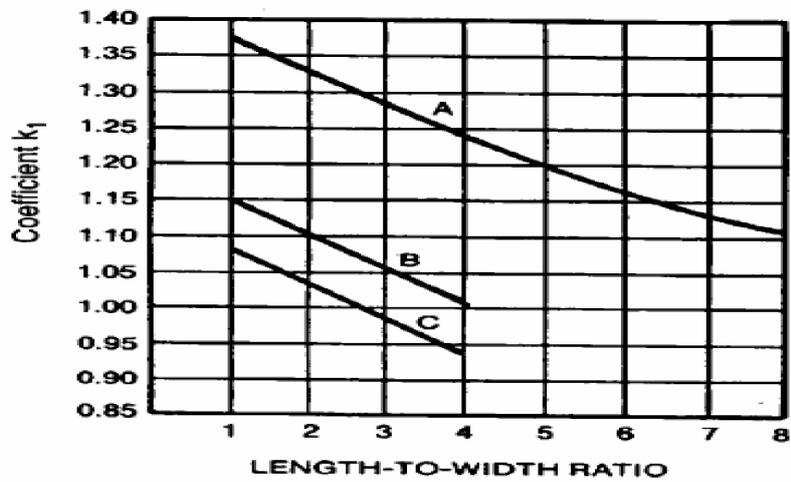
$$R_1 = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\text{Ln} \left(\frac{2L_C}{a'} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 \right] \quad (6.3)$$

$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi n_R L_R} \left[\text{Ln} \left(\frac{4L_R}{b} \right) - 1 + \frac{2k_1 L_r}{\sqrt{A}} (\sqrt{n_R} - 1)^2 \right] \quad (6.4)$$

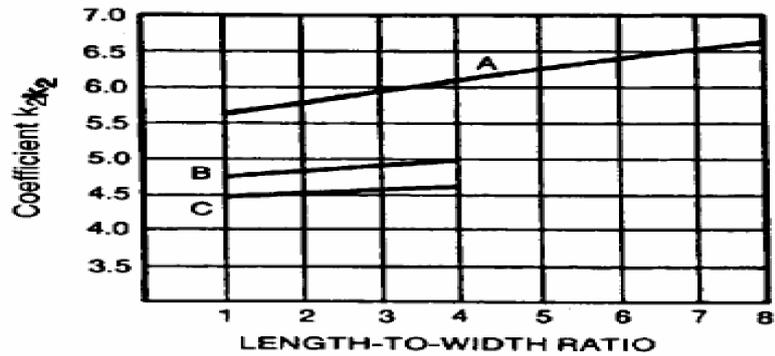
$$R_m = \frac{\rho}{\pi L_C} \left[\text{Ln} \left(\frac{2L_C}{L_r} \right) + \frac{k_1 L_C}{\sqrt{A}} - k_2 + 1 \right] \quad (6.5)$$

Donde:

- ρ : resistividad aparente del terreno.
- L_C : longitud total de los conductores enterrados horizontalmente.
- a' : es igual a $\sqrt{2ah}$ para conductores enterrados a una profundidad "h", o $.a$ para conductores dispuestos sobre la superficie, siendo $.a$ el radio de dicho conductor.
- A : área cubierta por la malla.
- L_r : longitud de una jabalina.
- b : radio de la jabalina.
- n_R : cantidad de jabalinas dentro del área A .
- k_1, k_2 coeficientes a ser calculados de acuerdo a las siguientes gráficas.



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $y_A = -0.04x + 1.41$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_B = -0.05x + 1.20$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_C = -0.05x + 1.13$



CURVE A — FOR DEPTH $h = 0$
 $y_A = 0.15x + 5.50$
 CURVE B — FOR DEPTH $h = 1/10 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_B = 0.10x + 4.68$
 CURVE C — FOR DEPTH $h = 1/6 \sqrt{\text{AREA}}$
 $y_C = -0.05x + 4.40$

Figura 6.1: Cálculo de coeficientes de Schwarz

Capítulo 7

Cálculo de corriente de circulación y GPR

La corriente de falla calculada para dimensionar la malla de tierra dependerá de los siguientes factores:

- La corriente de cortocircuito simétrica a tierra en el punto de interés.
- El factor de asimetría de la falta.
- La arquitectura de la red eléctrica, incluyendo aspectos como el régimen de neutro, y el modo de interconexión de los circuitos de tierra de las diferentes instalaciones de la red.
- Las posibles ampliaciones de la red eléctrica.

Brevemente se describe en que forma afectarán estos factores el cálculo.

7.1. Corrientes de cortocircuito

A los efectos de determinar la corriente de cortocircuito a utilizar para el cálculo de la malla de tierra, se deben considerar los cortocircuitos a tierra en los diferentes niveles de tensión que involucran la instalación a diseñar, prestando atención al sistema de aterramiento de neutro tanto de la fuente (o las fuentes) y el sistema de aterramiento de la propia instalación cuya malla se diseñará.

En el caso particular de las mallas de estaciones AT/AT o puestos de conexión en alta tensión, basta con diseñar un solo sistema de puesta a tierra y la elección del régimen de neutro adecuado para limitar el nivel de cortocircuito en las barras de menor tensión.

En el caso que se trate de una subestación AT/BT en la cual necesariamente el neutro debe estar aterrado (400V), se debe tener en cuenta que en el caso de los sistemas TN-S, la corriente de cortocircuito en baja tensión retornará por el conductor de protección, y por lo tanto, al no introducirse en la malla de tierra, no contribuirá a un aumento del GPR y por lo tanto no debe ser considerada

para el cálculo de la malla.

Desde el punto de vista estricto, se utilizará el método de componentes simétricas para el cálculo de corrientes de cortocircuito a tierra, pero realizando simplificaciones adecuadas, en la mayoría de los casos se puede obtener una cota superior de la corriente de cortocircuito a tierra a considerar con muy pocas operaciones.

7.1.1. Componentes simétricas

A partir del método de componentes simétricas es posible calcular las corrientes de cortocircuito 1FT y 2FT en un punto.

En el caso de un cortocircuito 1FT:

$$I_{1FT} = 3I_h = \frac{3E}{Z_s + Z_a + Z_h} \quad (7.1)$$

En el caso de un cortocircuito 2FT:

$$I_{2FT} = 3I_h = -3Z_a \frac{E}{Z_s Z_a + Z_a Z_h + Z_h Z_s} \quad (7.2)$$

Para la realización de estos cálculos, deben tomarse en cuenta varios aspectos que pueden simplificar de manera significativa los mismos:

1. El régimen de neutro de las fuentes que alimentan el cortocircuito sobre la malla de tierra a diseñar, así como el régimen de neutro de la propia instalación actuando como fuente de cargas a menores niveles de tensión.
2. El orden de magnitud de las impedancias de secuencia, y cómo afectan las mismas el cálculo de cortocircuito.
3. Los modelos adecuados de los diferentes componentes pasivos de la red (líneas, cables, transformadores, etc) en función de la red que se está modelando: en el caso de instalaciones de media tensión, las líneas aéreas y cables se modelan razonablemente como líneas de "longitud media o corta", si se trata de instalaciones de alta tensión, debe recurrirse a los modelos de línea larga; en el caso de máquinas eléctricas, siempre es recomendable utilizar el modelo subtransitorio de las mismas.

En el caso particular de los regímenes de neutro, es común encontrarse con el caso en el cual la fuente en las redes de distribución (31.5kV, 15kV, 6kV) se encuentra aterrada mediante una resistencia. Esta práctica presenta dos ventajas respecto a los sistemas de aterramiento rígido y de neutro aislado:

1. Limita las corrientes de cortocircuito excesivas respecto al aterramiento rígido, lo cual protege el aislamiento de los equipos por los cuales circula esta corriente, acotando el calentamiento para un tiempo de actuación de protecciones predefinido.

- Permite acotar, asimismo, las sobretensiones que sufrirán los equipos que ofician como fuente (generadores y transformadores), en un valor seguro, por debajo de su NBI.

A efectos de ilustrar esta idea, se supondrá que se produce un cortocircuito en el sistema de la figura siguiente, donde se diseñará la malla de tierra correspondiente a la subestación de 31.5/0.4 kV:

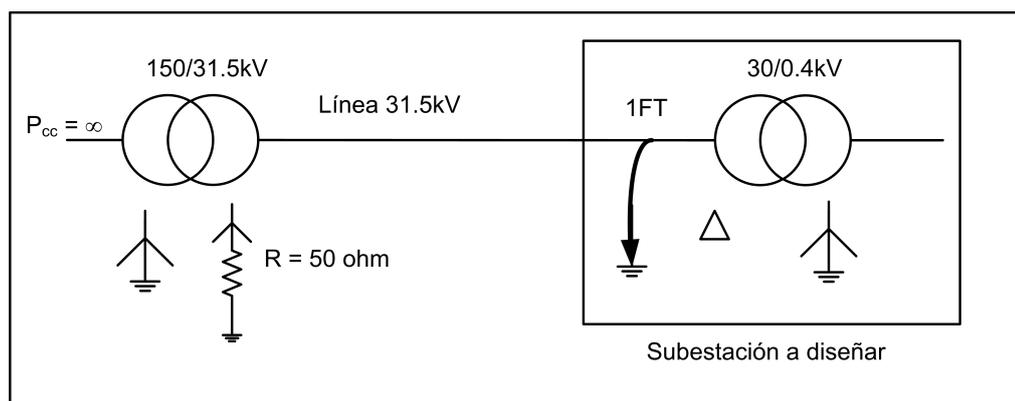


Figura 7.1: Ejemplo de cc-1FT en red con neutro aterrado

Dado que la fuente está aterrada mediante una resistencia, en el caso de un cortocircuito 1FT en el punto de interés, se tendrá que:

$$I_{1FT} = \frac{3E}{Z_s + Z_a + Z_h + 3R} \quad (7.3)$$

Comparando los órdenes de magnitud en sistemas de 31.5kV es usual suponer que $Z_s + Z_a + Z_h \ll 3R$, por lo tanto, se puede acotar rápidamente la corriente de falla por la siguiente expresión:

$$I_{1FT} \leq \frac{U}{\sqrt{3}R} \quad (7.4)$$

Otra ventaja sustancial del sistema de puesta a tierra mediante resistencia es que permite aumentar en forma arbitraria la potencia de la fuente sin alterar la corriente de cortocircuito fase-tierra.

De acuerdo a la figura siguiente, si se tiene la necesidad de ampliar la potencia de la fuente mediante la puesta en paralelo de un nuevo transformador, es posible interconectar los neutros y realizar la puesta a tierra mediante la resistencia existente. En caso de producirse una falta a tierra, la corriente de cortocircuito siempre estará limitada por la resistencia de puesta a tierra, y por lo tanto, estará acotada por el valor deducido anteriormente.

Este hecho surge rápidamente de la inspección de la red de secuencia cero asociada a esta red, y en términos generales, permite el acople de tantos

transformadores en paralelo como se requiera, sin aumentar la corriente de cortocircuito a tierra, y por lo tanto, sin necesidad de rediseñar la malla de tierra de la subestación en cada oportunidad que se realice el aumento de potencia instalada.

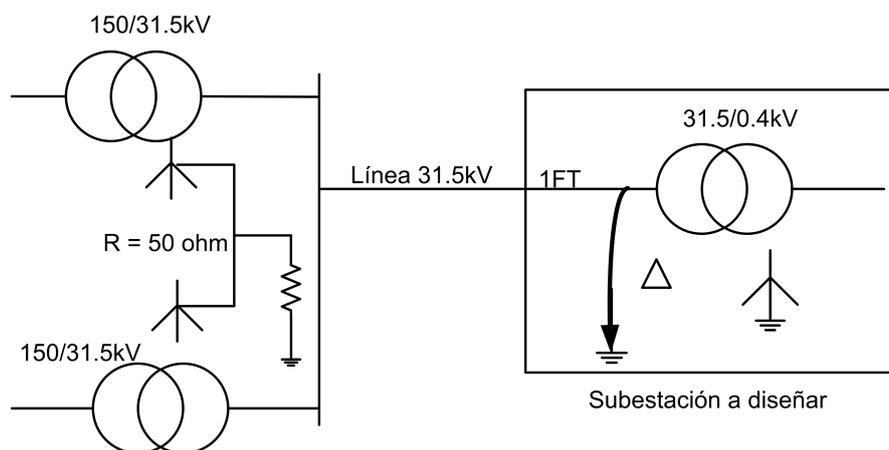


Figura 7.2: Limitación de cortocircuitos en redes con neutro aterrado

7.2. Factor de asimetría del cortocircuito

Dada la naturaleza inductiva de los circuitos eléctricos, al existir un cortocircuito a tierra, existirá una componente de continua asociada a la corriente de falta simétrica calculada en la parte anterior, cuyo valor dependerá de la relación X/R en el punto de defecto en régimen subtransitorio, del valor instantáneo de la tensión en el momento que se produce la falla y de la duración de la misma.

Si bien esta componente decae con el tiempo y su valor inicial depende de la tensión instantánea, a los efectos de dimensionado se supone que el valor de corriente de diseño será el valor de corriente simétrica calculada por el factor de asimetría. Este factor de asimetría se calcula tomando en cuenta la relación existente entre la corriente rms del cortocircuito asimétrico durante un tiempo t_f y la corriente de cortocircuito simétrica.

Se define el "Factor de asimetría", D_F , como el factor que debe multiplicarse a la corriente simétrica a fin de contemplar este efecto.

Numéricamente, corresponde al siguiente valor:

$$D_F = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (7.5)$$

Donde:

- t_f : tiempo de duración de la falta.
- T_a : constante de tiempo correspondiente al transitorio.

Dicho factor se encuentra tabulado en la norma para diferentes valores de X/R y tiempo de de apertura de protecciones. En el caso de circuitos con neutros aterrados mediante resistencias, la relación X/R es muy baja, y por lo general el factor de asimetría tiende a 1.

7.3. Arquitectura de la red eléctrica de alta tensión

7.3.1. Inserción de instalaciones proyectadas a la red existente

La arquitectura de la red y el modo en el cual se inserta dentro de la misma la instalación cuya malla de tierra se desea calcular, son factores determinantes a tener en cuenta, los cuales se detallarán brevemente:

- Si la instalación considerada se encuentra dentro de una red de operación radial (anillo abierto), deben considerarse las corrientes de cortocircuito de las dos posibles fuentes de alimentación, considerando la corriente de falla más alta para el diseño de la malla de tierra.
- En caso que se pueda prever el funcionamiento en anillo cerrado de una red en la cual se encuentra la instalación en cuestión, el cálculo de cortocircuito debe considerarse desde el principio con las dos fuentes alimentando en forma simultánea el cortocircuito.
- El caso en el cual la red es radial, si bien puede ser el más sencillo, es útil considerar un factor de crecimiento previendo la posibilidad que en algún momento puedan realizarse reformas que alteren la potencia de cortocircuito en el punto considerado.

7.3.2. Circuitos de tierra en alta tensión

Un aspecto peculiar a tener en cuenta en los sistemas de tierra en alta tensión es que en ciertos aspectos se comportan en forma similar a los sistemas TT de baja tensión, y al mismo tiempo, presentan características que se los puede comparar a los sistemas TN de baja tensión.

En primer lugar, cuando la red sobre la cual se trabaja corresponde a un sistema de transmisión o distribución de gran extensión geográfica, las diversas instalaciones que componen el sistema tendrán asociada sus propias instalaciones de puesta a tierra, de la misma forma que en los tradicionales sistemas TT de puesta a tierra en baja tensión. Adicionalmente a este hecho, en las redes de alta tensión, tanto subterráneas como aéreas, los hilos de guardia de las líneas, el aterramiento de las postaciones o las propias torres y las pantallas metálicas de los cables subterráneos ofician como conductores de retorno de tierra en caso de presentarse una falla, comportándose de forma similar a los conductores de protección de los sistemas TN-S de baja tensión, interconectando las

diferentes mallas de tierras de las diversas instalaciones del sistema considerado.

Este efecto contribuye a disminuir la corriente absorbida por la malla de tierra de la instalación sobre la cual se trabaja, disminuyendo los gradientes de potencial respecto a una posición conservadora en la cual no se supone distribución de circuitos de tierra, tal cual se supone en el método de componentes simétricas citado anteriormente.

Desde el punto de vista práctico, y a los efectos del cálculo, la norma IEEE-80 incluye un factor de división SF (Split Factor) para contemplar estos fenómenos.

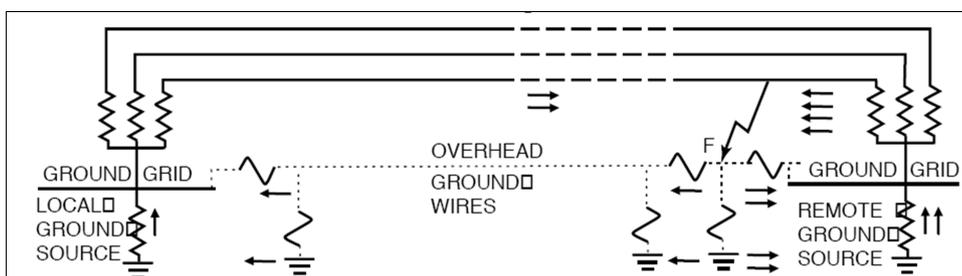


Figura 7.3: División de corrientes en circuitos de tierra

Si bien algunos autores recomiendan tomar un valor de S_F que varía entre 0.6 y 0.8 resulta muy difícil determinar analíticamente cuánta corriente realmente es autoneutralizada, ya que no solamente depende de los circuitos de tierra existentes entre la fuente y el punto donde se produce la falta, sino también del perfil de resistividades de los terrenos por donde circularía la corriente de falla, por lo cual, es preferible adoptar una posición conservadora y tomar el factor S_F como unitario, para mantener el margen de seguridad, lo que supondría la no existencia de corrientes autoneutralizadas.

7.4. Ampliaciones en la red eléctrica

Las ampliaciones en la red eléctrica, por lo general, tienden a aumentar la potencia de cortocircuito y por tanto, la corriente de falla a tierra. Las ampliaciones referidas pueden ser:

1. Puesta en paralelo de transformadores de potencia.
2. Pasaje de operación de redes trabajando en anillo abierto o en radiales a anillo cerrado.
3. Puesta en paralelo de líneas de alimentación.

Estos factores se encuentran contemplados con el factor de crecimiento C_F .

7.5. Corriente de diseño

Teniendo en cuenta los puntos anteriores, el valor de corriente de cálculo I_G , está dado por la siguiente expresión:

$$I_G = D_F S_F C_F I_F \quad (7.6)$$

Siendo:

- D_F : factor de asimetría del cortocircuito.
- S_F : factor de división.
- C_F : factor de crecimiento.
- I_F : corriente de cortocircuito simétrica en el punto de análisis.

7.6. Cálculo del GPR

A partir de los pasos anteriores se calcula la elevación de potencial respecto a tierra a remota (GPR):

$$GPR = R_G I_G \quad (7.7)$$

Si el valor de GPR es menor que el valor de tensión de contacto admisible calculado en el capítulo 4, el diseño es aceptable desde el punto de vista de la seguridad de personas y se debe pasar a los detalles de diseño referidas en el capítulo 8, pero por lo general, estos casos se darían en condiciones absolutamente excepcionales.

Otro aspecto a considerar, es que al momento de considerarse el diseño de una estación, es importante que el GPR tenga un valor tal que no sobrepase la tensión de aislación a frecuencia industrial durante un minuto de los equipos de menor tensión, para asegurar el no deterioro de los mismos, por lo tanto, si no se cumple esta última condición, es recomendable rediseñar la malla de forma de poder bajar la resistencia y alcanzar un GPR aceptable.

Capítulo 8

Evaluación de la malla de tierra

8.1. Cálculo de tensiones de paso y contacto en la malla

En caso que la magnitud del GPR sea mayor al del potencial de toque admisible, se procede a evaluar la tensión máxima sobre el reticulado E_m y la tensión de paso E_s que aparece en la malla durante el defecto.

En caso de cumplirse las siguientes condiciones:

$$E_m = \frac{\rho K_m K_i I_G}{L_M} < E_{TOQUE} \quad (8.1)$$

$$E_s = \frac{\rho K_s K_i I_G}{L_S} < E_{PASO} \quad (8.2)$$

el diseño se considera aceptable y es posible pasar a la etapa de diseño de detalles. Se aclara desde ya, que la resistividad utilizada en estas expresiones es la resistividad aparente del terreno, por lo cual, en el peor de los casos puede ser una hipótesis de cálculo optimista si la resistividad de las capas superiores del terreno es alta respecto a la resistividad de las capas más profundas.

La definición de los parámetros K_m, K_s, K_i, L_M y L_S se detalla en el apéndice A por claridad.

8.2. Modificación del diseño original

En caso de no satisfacer las condiciones de paso y contacto establecidas, se debe realizar un replanteo del diseño de malla de tierra inicialmente proyectado. Dependiendo de cada instalación en particular y de la red donde la misma se encuentra inserta, se podrá recurrir a algunas de las siguientes acciones:

- Aumentar la cantidad de conductor horizontal, reduciendo las dimensiones de la retícula.

- Agregar jabalinas sobre la superficie cubierta por la malla.
- Aumentar el área cubierta por la malla.
- Aumentar el espesor de la capa de piedra partida a efectos de aumentar la tensión de paso y contacto admisibles.

8.3. Elaboración de detalles de diseño

Luego de haber definido la malla de tierra, se debe especificar cómo se realizará la distribución del sistema de tierra en la estación, lo cual incluye:

- Prever los chicotes de conexión con la malla necesarios para el aterramiento de las masas y dispositivos que constituyen la instalación.
- Prever la unión de la malla de tierra con los hierros de la estructura del edificio (en caso de tratarse de una estación interior), mediante una unión adecuada, previo al llenado de hormigón del edificio.
- Instalar barras de tierra (estación interior), de forma de poder distribuir mediante uniones desconectables los diferentes elementos a aterrizar.
- En caso que el trazado de los conductores de la malla interfieran con alguna fundación de la obra civil (pueden ser bases de hormigón para los equipos para estaciones exteriores, como la fundación de un edificio en caso de estaciones interiores), agregar al diseño original más conductores de tierra, de forma que el cuadrículado a ejecutar en obra nunca tenga dimensiones mayores al calculado.
- El estudio de posibles transferencias de potencial hacia zonas fuera del aterramiento de la malla, que pueden poner en peligro a quienes circulen por estas zonas no protegidas.

Apéndice A

Cálculo de parámetros

A.1. Cálculo de tensión de mesh E_m

En esta sección se determinarán los parámetros K_m, K_i y L_M para calcular la tensión de toque máxima que aparece en la malla en caso de defecto.

A.1.1. Cálculo del factor K_m

El factor K_m es usualmente conocido como factor de Sverak y se calcula de acuerdo a la siguiente fórmula:

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

Siendo:

- D: máxima separación entre conductores horizontales de la malla (considerar los dos sentidos).
- h: profundidad de entierro de los conductores de la malla.
- d: diámetro de los conductores de la malla.
- K_{ii} : su valor es
 - 1 en caso que la malla tenga jabalinas a lo largo del perímetro, en las esquinas y en el interior de la misma.
 - $\frac{1}{(2n)^{\frac{2}{n}}}$ en caso de mallas con pocas jabalinas en el perímetro o sin jabalinas en las esquinas.
- K_h : se calcula como $\sqrt{1 + \frac{h}{h_o}}$ siendo $h_o = 1m$.
- n: factor geométrico, calculado como $n = n_a n_b n_c n_d$ siendo:
 - $n_a = \frac{2L_C}{L_P}$ para todos los casos.

- $n_b = 1$ para mallas con forma cuadrada.
- $n_c = 1$ para mallas con forma cuadrada o rectangular.
- $n_d = 1$ para mallas con forma cuadrada, rectangular, o de "L".

Para casos genéricos:

- $n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4\sqrt{A}}}$
- $n_c = \left(\frac{L_X L_Y}{A}\right)^{\frac{0,7A}{L_X L_Y}}$
- $n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}}$

Los parámetros referidos en las anteriores expresiones son:

- L_C : longitud total de conductor horizontal enterrado.
- L_P : perímetro de la malla.
- A : área de la malla.
- L_X : máxima longitud de la malla en la dirección "X".
- L_Y : máxima longitud de la malla en la dirección "Y".
- D_m : máxima distancia existente entre dos puntos de la malla.

A.1.2. Cálculo del factor K_i

Denominado factor de irregularidad, se calcula de la siguiente forma:

$$K_i = 0,644 + 0,148n \quad (\text{A.2})$$

A.1.3. Cálculo de L_M

Para mallas sin jabalinas, o con pocas jabalinas, pero no localizadas en el perímetro o en las esquinas:

$$L_M = L_C + L_R \quad (\text{A.3})$$

Con L_C , calculado según las secciones anteriores y L_R siendo la sumatoria de las longitudes de todas las jabalinas de la malla.

Si existen jabalinas a lo largo del perímetro de la malla y/o en las esquinas:

$$L_M = L_C + \left[1,55 + 1,22 \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_X^2 + L_Y^2}} \right) \right] L_R \quad (\text{A.4})$$

En este caso L_r es la longitud de una jabalina.

A.2. Cálculo de tensión de paso E_s

Las fórmulas son válidas para mallas enterradas con una retícula enterrada entre 0.25m y 2.5m.

Los parámetros a calcular son los siguientes:

- $K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0,5^{n-2}) \right]$
- $L_S = 0,75L_C + 0,85L_R$
- K_i corresponde al mismo parámetro calculado para la tensión de contacto.

Bibliografía

La preparación de los apuntes fue realizada en base a los siguientes documentos:

- [1] IEEE 80-2000 "Guide for Safety in AC Substation Grounding"
- [2] Aterramento Eléctrico Geraldo Kindermann, Jorge Mário Campagnolo 3era edición, Editorial Sagra - D.C. Luzzato, año 1995
- [3] Evaluation of resistivity test for design of station ground in nonuniform soils. J. Endrenyi - Diciembre de 1963
- [4] IEEE 665-1995 "Guide for Generating Station Grounding"
- [5] IEEE 367-1996 Recommended practice for determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltage from a Power Fault"