

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA
ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE ALCOY
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Prácticas: INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN.



SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

Profesor: Pedro Ángel Blasco Espinosa

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

INDICE:

- 1. NORMATIVA APLICABLE**
- 2. OBJETIVO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA**
- 3. PARTES QUE COMPONEN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA**
- 4. DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LA PUESTA A TIERRA**
- 5. TIPOS DE PUESTA A TIERRA SEGÚN SU FUNCIÓN**
- 6. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA**
 - **Tensión de contacto máxima aplicable**
- 7. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. Según MIE.RAT-13**
- 8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO**
- 9. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA**

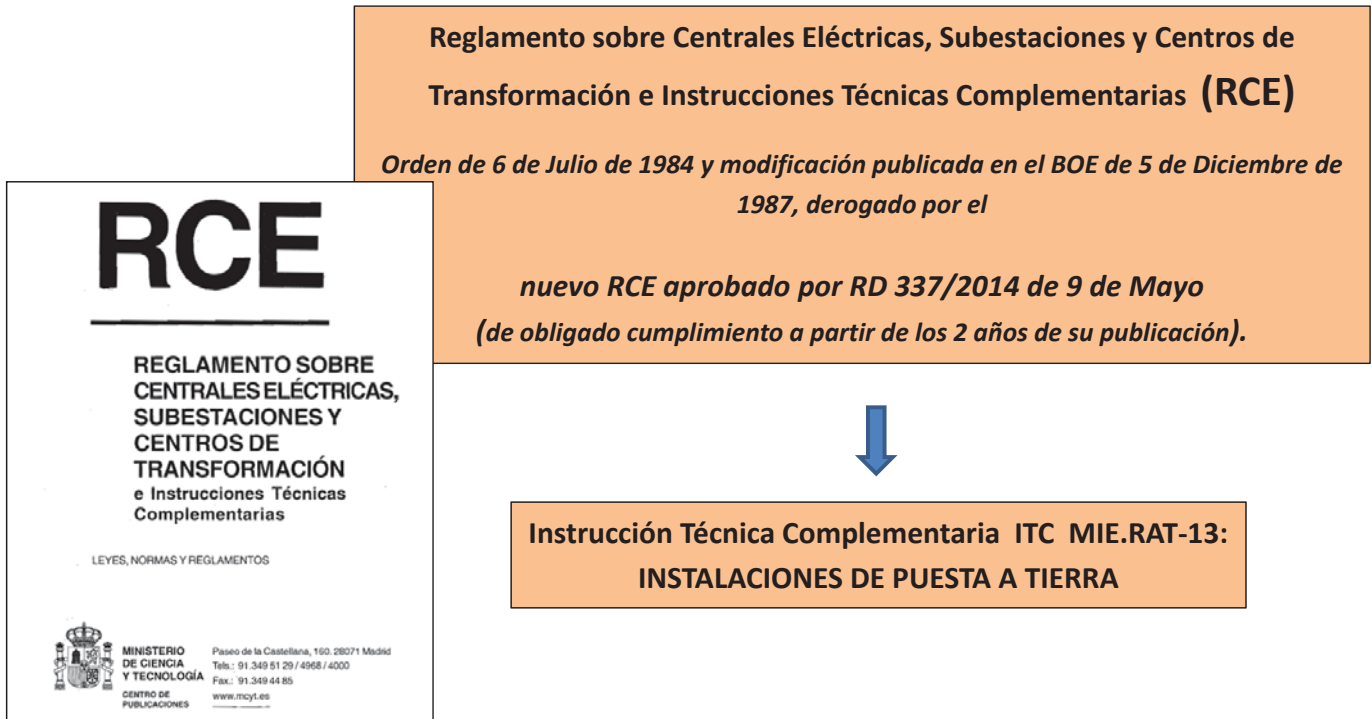
Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

- 10. RESISTIVIDAD SUPERFICIAL APARENTE DEL TERRENO**
- 11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO**
 - 11.1. Investigación de las características del suelo**
 - 11.2. Parámetros iniciales de diseño**
 - 11.3. Datos de partida**
 - 11.4. Cálculo de la sección de conductor de la red de tierra**
 - 11.5. Cálculo de la resistencia de la malla de tierra**
 - 11.6. Cálculo de las corrientes de defecto (para el cálculo de las Tensiones de Paso y Contacto reales)**
 - 11.8. Cálculo de las tensiones Máximas Admisibles de Paso y Contacto**
 - 11.9. Cálculo de los valores teóricos de las tensiones de Paso y Contacto**
- 12. INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSFERIBLES**
- 13. CORRECCIÓN Y AJUSTE DEL DISEÑO INICIAL**

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

1. NORMATIVA APLICABLE

¿Dónde se establecen la necesidad de instalar un SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN UNA INSTALACIÓN DE ALTA TENSIÓN?



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

1. NORMATIVA APLICABLE

Normativas relacionadas:

- **Reglamentación técnica Española.**
Reglamento sobre Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación e Instrucciones Técnicas Complementarias (RCE)
DE OBLIGADO CUMPLIMIENTO
MIE.RAT-13 “Instalaciones de Puesta a Tierra”
- **Normas UNE:**
 - *UNE-EN 50522: Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 KV en corriente alterna.*
 - *UNE-EN 60909: Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna.*
- **Normas particulares de las compañías de transporte y distribución de energía eléctrica.**
Red Eléctrica de España (REE), Iberdrola, Endesa, etc...
- **Normas internacionales (ANSI/IEEE, Normas CEI).**
IEEE Std 80-2000: Working Group D7, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding “IEEE Std 80-2000), New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, August 2000.
- **Normas de prevención de riesgos laborales y mediambientales.**

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

2. OBJETIVOS DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRAS

Bajo condiciones NORMALES de funcionamiento y de DEFECTO A TIERRA

Los principales objetivos a cumplir en las Instalaciones de puesta a tierra en las Centrales, Subestaciones y Centros de Transformación son:

1. Garantizar la seguridad y protección de las personas.
2. Proteger los equipos y las instalaciones.
3. Garantizar un camino rápido a las corrientes de defecto sin exceder los límites de operación de la red eléctrica.

Perturbaciones del sistema:

- Descargas atmosféricas.
- Faltas trifásicas asimétricas.
- Transitorios



Sobreintensidades de valor elevado
(corrientes de falta o defecto)

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

3. PARTES QUE COMPONEN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

- **La Tierra (terreno)**
 - Se considera a potencial cero.
 - Proporciona el camino de dispersión de las corrientes de falta o defecto.
 - Se caracteriza por su resistividad " ρ " \rightarrow (naturaleza del terreno).

- **Electrodos de puesta a tierra**
 - Pueden ser de Cobre, Aluminio o Acero, (Generalmente de cobre)
 - Deben mejorar la equipotencialidad del suelo evitando que se produzcan gradientes de tensión elevados.
 - Estarán constituidos por una malla (tierras inferiores) enterrada a una determinada profundidad que permita reducir las tensiones de paso y contacto a niveles admisibles (Según MIE.RAT-13, pto 1.1)



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

3. PARTES QUE COMPONEN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

Elementos que componen las instalaciones de puesta a tierra:

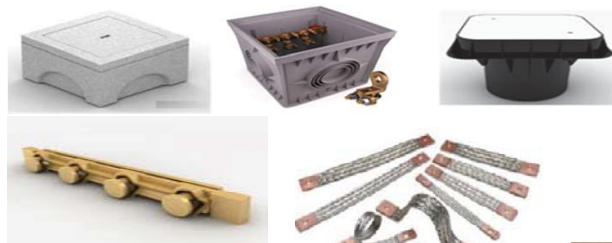
- **Electrodos de puesta a tierra**

- Estarán constituidos por:

- Picas
- Cables
- Placas
- Mallazos
- Barras químicas



- **Arquetas y registros**



- **Uniones:**

Soldaduras aluminotérmicas (Cadweld)



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

4. DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LA PUESTA A TIERRA

Disposiciones más usadas en las instalaciones de puesta a tierra:

- **Zanjas**

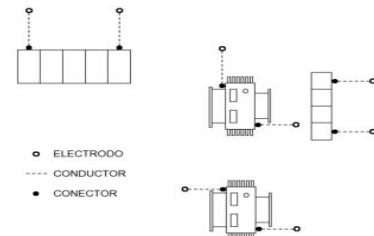
Electrodo horizontal enterrado en el suelo a una profundidad variable



- **Radial**

Ramificaciones en ángulos de 60°, con longitudes de hasta 30 m

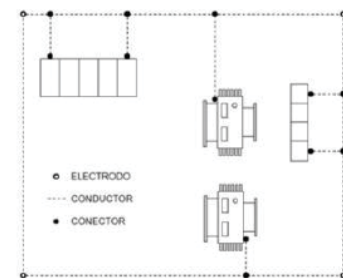
Se emplea en torres de comunicaciones



- **Anillo**

Habitual en los apoyos

Se pueden conectar electrodos en paralelo



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

4. DISPOSICIÓN GEOMÉTRICA DE LA PUESTA A TIERRA

Disposiciones más usadas en las instalaciones de puesta a tierra:

- **Mallas**

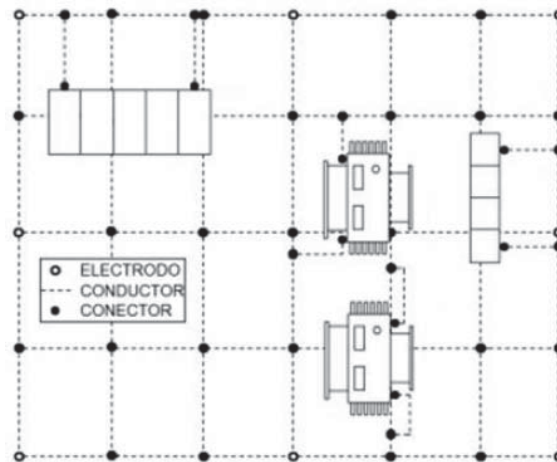
Electrodo horizontal enterrado con cables dispuestos horizontal y longitudinalmente, formando una cuadrícula.

Se pueden conectar electrodos en paralelo.

Limita los potenciales en el área de la subestación.

Valores bajos de resistencia a tierra.

Es la más habitual en las subestaciones.



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

5. TIPOS DE PUESTA A TIERRA SEGÚN SU FUNCIÓN

Según la MIE.RAT-13 y atendiendo a la función que desempeñan se distinguen:

- Tierras de PROTECCIÓN.
- Tierras de SERVICIO.

Tierras de PROTECCIÓN:

Une todas las partes metálicas de una instalación que no están en tensión normalmente, pero que pueden estarlo como consecuencia de averías, descargas atmosféricas o sobretensiones.

Se unirán a la malla metálica (al menos dos conductores).

Se conectarán a la tierra de protección:

- Chasis y bastidores de aparatos de maniobra.
- Bastidores de armarios metálicos.
- Puertas metálicas, vallas y cercas metálicas, columnas, bastidores, pórtico, etc.
- Las estructuras y armaduras metálicas de los edificios que alberguen instalaciones.
- Hilos de guarda, blindajes de los conductores.
- Carcasa de los transformadores,...



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

5. TIPOS DE PUESTA A TIERRA SEGÚN SU FUNCIÓN

Tierras de SERVICIO:

Conectarán directamente los siguiente elementos:

- Neutros de transformadores de potencia o redes con neutro.
- Circuitos de B.T. de los transformadores de medida.
- Dispositivos de protección de sobretensiones y/o descargas atmosféricas; limitadores, descargadores, autoválvulas, etc.
- Seccionadores de PaT.

Se unirán a la malla metálica (sin uniones desmontables).

Puede ser: Directa: conexión a tierra sin ningún elemento.

Indirecta: a través de resistencias o impedancias limitadoras

Las tierras de PROTECCIÓN y de SERVICIO estarán unidas a la misma malla de tierras inferiores, constituyendo un único sistema de puesta a tierra general (Sistema de tierras interconectadas)

Tierras de TRABAJO O MANTENIMIENTO:

Para la protección del personal en operaciones de mantenimiento o reparaciones.



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

6. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

El MIE-RAT-13 establece como de obligado cumplimiento a fin de garantizar la seguridad y protección de las personas y equipos las siguientes prescripciones básicas referentes a:

- Corrientes tolerables por el cuerpo humano (UNE-IEC/TS 60479-1).
- Tensiones máximas aplicables al cuerpo humano.
- Dimensionamiento.

Corrientes tolerables por el cuerpo humano:

Se considera que un valor seguro para un corazón sano es de $I < 25$ mA con tiempos de aplicación de 0.03 a 3 sg

El diseño de la puesta a tierra debe garantizar que no se alcancen.

Tensión de contacto aplicada admisible (valor máximo), U_{ca} :

Valores máximos de U_{ca} a los que puede estar sometido el cuerpo humano entre la mano y los pies

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

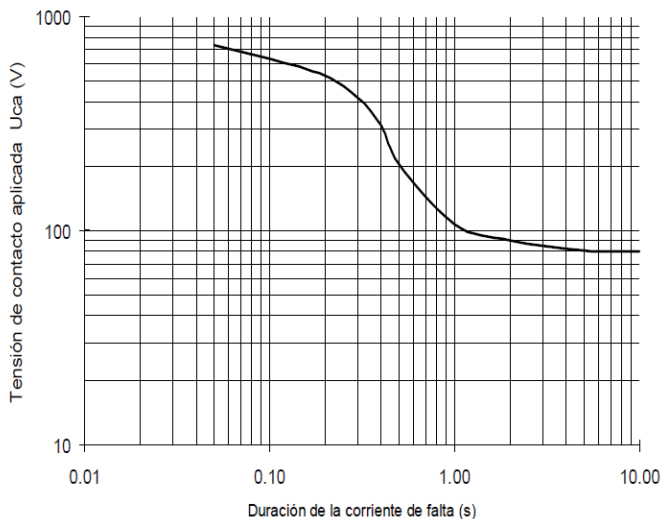
6. CONSIDERACIONES BÁSICAS DE SEGURIDAD EN LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA

Tensión de contacto aplicada admisible

Según RCE - 2014

Tensión de contacto aplicada admisible (valor máximo), Uca:

La tensión máxima de contacto aplicada aceptable, en función de la duración de la falta:



Duración de la corriente de falta, t_f (s)	Tensión de contacto aplicada admisible, Uca (V)
0.05	735
0.10	633
0.20	528
0.30	420
0.40	310
0.50	204
1.00	107
2.00	90
5.00	81
10.00	80
> 10.00	50

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

7. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. Según MIE.RAT-13

Procedimiento de DISEÑO del sistema de puesta a tierra. Según MIE.RAT-13

El MIE-RAT-13 en el pto. 2 establece el procedimiento para la elaboración del proyecto.

Se realizará teniendo en cuenta las tensiones máximas aplicadas:

1. Investigación de las características del suelo.
2. Determinación de las corrientes máximas de PaT y del tiempo máximo de eliminación del defecto.
3. Diseño preliminar de la instalación de tierra.
4. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.
5. Cálculo de las tensiones de paso en el exterior de la instalación.
6. Cálculo de las tensiones de paso y contacto en el interior de la instalación.
 - Por UNE, IEEE Std 80-2000 (valores teóricos reales)
 - Por MIE.RAT-13 (valores máximos admisibles)

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

7. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. Según MIE.RAT-13

El proyectista de la instalación de tierra deberá comprobar mediante el empleo de un procedimiento de cálculo sancionado por la práctica que los valores de las tensiones de contacto U'_c , y de paso, U'_p , que calcule para la instalación proyectada en función de la geometría de la misma, de la corriente de puesta a tierra que considere y de la resistividad correspondiente al terreno, no superen en las condiciones más desfavorables las calculadas por las fórmulas (1) y (2) en ninguna zona del terreno afectada por la instalación de tierra.

- **UNE-EN 50522:** Puesta a tierra en instalaciones de tensión superior a 1 KV en corriente alterna.
- **UNE-EN 60909:** Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna.
- **IEEE Std 80-2000:** Working Group D7, IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding "IEEE Std 80-2000), New York, Institute of Electrical and Electronics Engineers, August 2000.

RCE - 2014

7. Comprobar que las tensiones de paso y contacto calculadas en los puntos 5º y 6º son inferiores a los **valores máximos admisibles** definidos por MIE.RAT-13:

- Tensión de Paso:
$$U_p = U_{pa} \left[1 + \frac{2R_{a1} + 2R_{a2}}{Z_B} \right] = 10U_{ca} \left[1 + \frac{2R_{a1} + 6\rho_S}{1000} \right]$$
- Tensión de Contacto:
$$U_c = U_{ca} \left[1 + \frac{R_{a1} + R_{a2}}{2Z_B} \right] = U_{ca} \left[1 + \frac{R_{a1} + 1,5\rho_S}{1000} \right]$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

7. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO DEL SISTEMA DE PUESTA A TIERRA. Según MIE.RAT-13

8. Investigación de las tensiones transferibles al exterior por las tuberías, railes, vallas, conductores de neutro, blindajes de cables de circuitos de señalización y de puntos especialmente peligrosos, y estudio de las formas de eliminación y reducción.
9. Corrección y ajuste del diseño inicial estableciendo el definitivo.

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Las **faltas a tierra ocurren** de forma fortuita debido a:

- Faltas próximas del aislamiento externo que se dan en subestaciones o líneas eléctricas provistas de electrodos de puesta a tierra.
- Sobretensiones
- Contaminación húmeda.

Elevación del potencial debida a las corrientes de falta; son proporcionales a:

- La magnitud de la corriente de la red de tierra.
- Al tiempo de actuación (tiempo de apertura de dispositivos de protección)
- La resistencia de dispersión de dicha red.

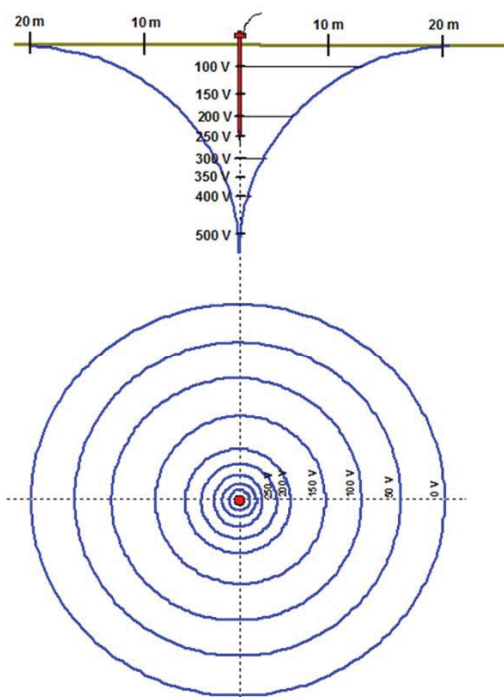
La forma de efectuarse la **difusión (disipación) de la corriente de falta** está en función de:

- **Disposición geométrica** de la puesta a tierra. Longitud del electrodo enterrado, profundidad de soterramiento, superficie abarcada por la red mallada, densidad del metal conductor que constituye el electrodo
- Valor superficial de la **resistividad** del terreno.

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

CONO DE TENSIONES DE UN ELECTRODO VERTICAL



En las proximidades circundantes al electrodo, **la caída de tensión es máxima en la vertical de la toma de tierra y disminuye a medida que aumenta la distancia radial desde la toma de tierra.**

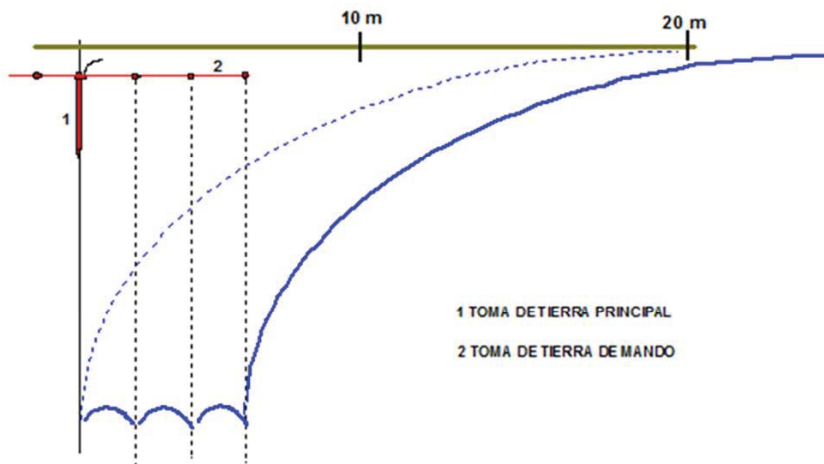
Se forma un “**cono de tensión**”

- Las **tensiones de contacto** ocasionan los mayores gradientes de tensión.
 - Interior de las subestaciones
 - Pie de las estructuras
 - Soportes de las líneas eléctricas.
- Las **tensiones de paso** originan menores gradientes de tensión. Pueden ser mayores en
 - La periferia
 - Estructuras o soportes de las líneas eléctricas.

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

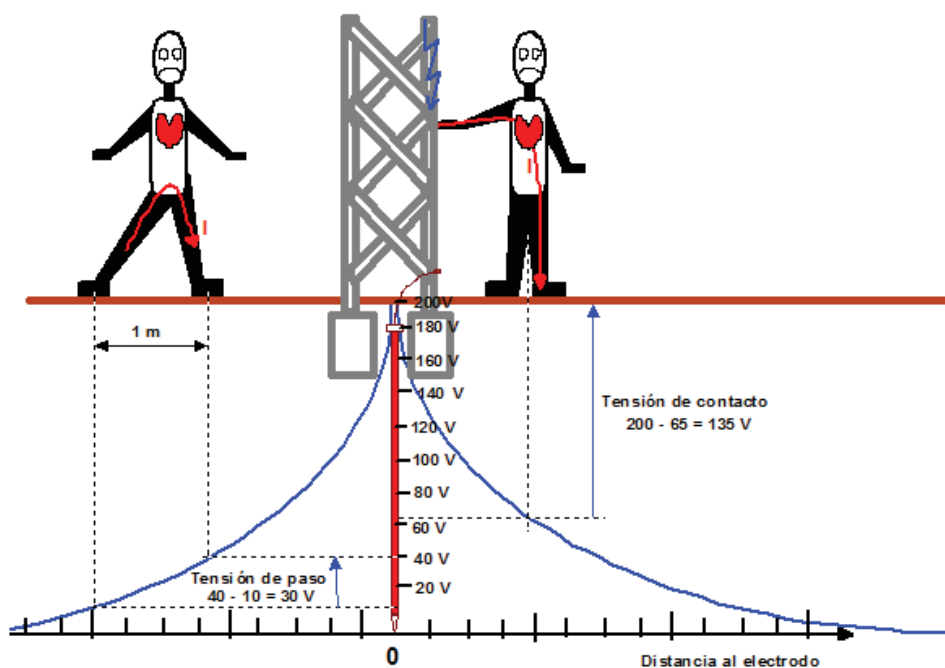
PUESTA A TIERRA DE MANDO



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

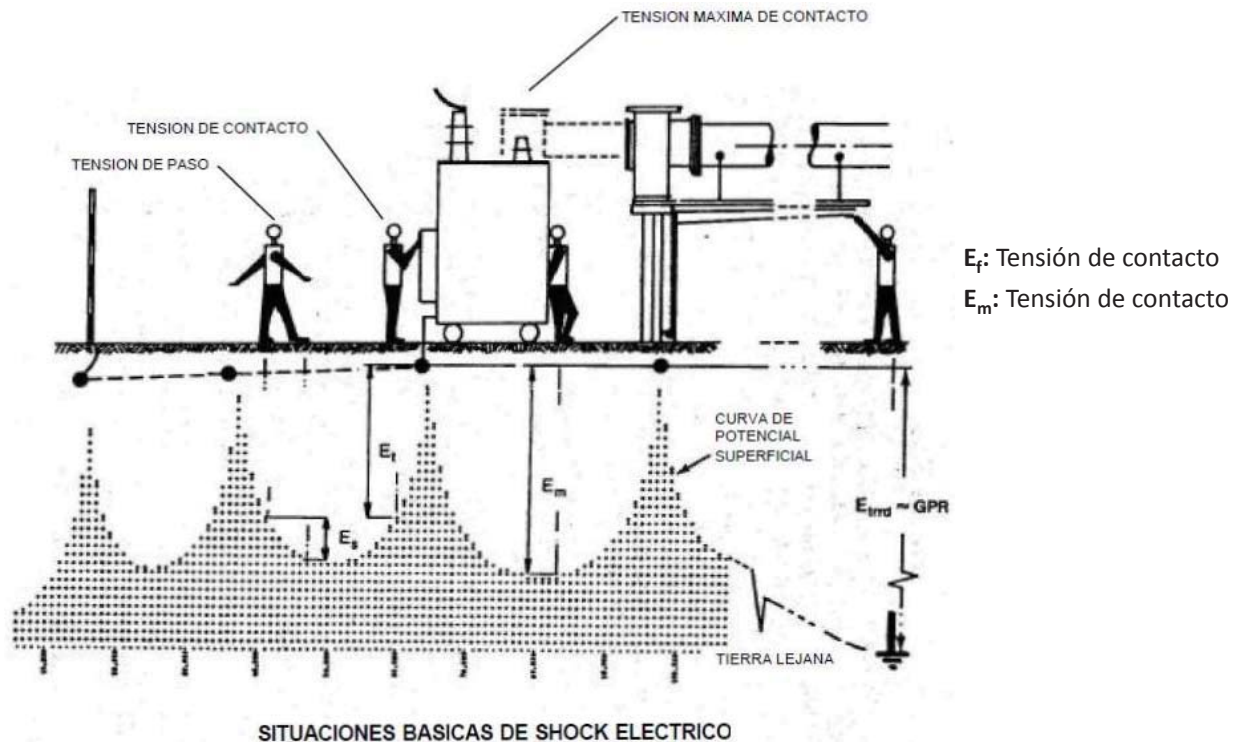
Valores de las Tensiones de Paso (V_p) y Contacto (V_c) en el caso de producirse una intensidad de falta en un apoyo de una línea aérea.



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

SITUACIONES BÁSICAS DE SHOCK ELÉCTRICO

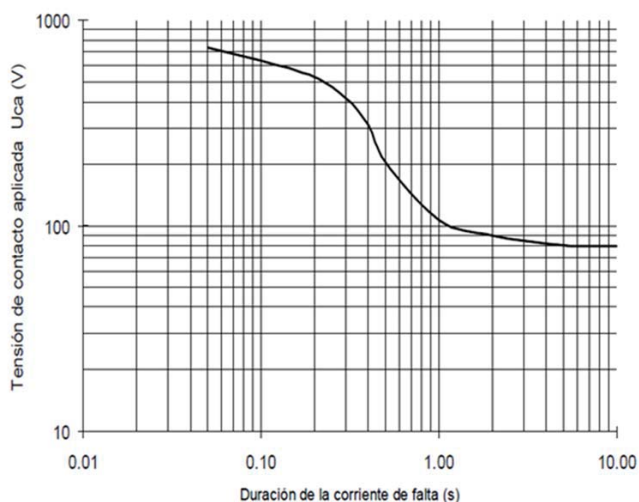


Fuente: Norma IEEE-Std 80-2000

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

TENSIÓN DE CONTACTO APLICADA ADMISIBLE (valor máximo), U_{ca}



Duración de la corriente de falta, t_f (s)	Tensión de contacto aplicada admisible, U_{ca} (V)
0.05	735
0.10	633
0.20	528
0.30	420
0.40	310
0.50	204
1.00	107
2.00	90
5.00	81
10.00	80
> 10.00	50

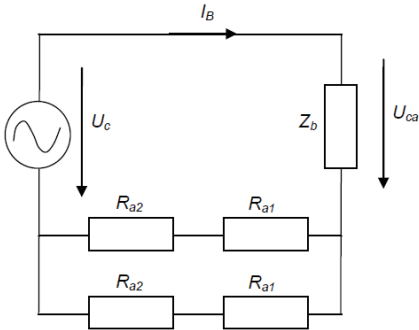
Determinación gráfica del valor de la tensión de contacto aplicable (U_{ca}) en función del tiempo de duración de la falta según MIE.RAT-13 de 2014

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

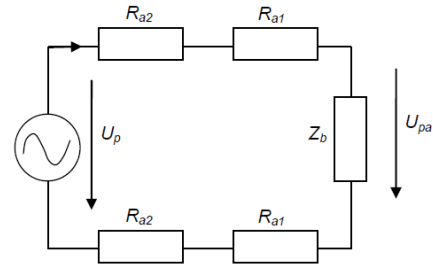
Procedimiento de DISEÑO del sistema de puesta a tierra. Según MIE.RAT-13 (RCE-2014, Corrección de errores)

Circuito para el cálculo de la Tensión de Contacto



- U_c : Tensión de contacto máxima admisible (V)
- U_p : Tensión de paso máxima admisible (V)
- Z_b : Impedancia del cuerpo humano (1000 Ω)
- I_B : Corriente que fluye a través del cuerpo (A)
- R_a : Resistencia adicional
- R_{a1} : Resistencia equivalente del calzado (2000 Ω)
- R_{a2} : Resistencia a tierra del punto de contacto; $R_{a2}=3\rho_s$
- ρ_s : Resistividad del suelo cerca de la superficie

Circuito cálculo de la Tensión de Paso



Resistividad superficial aparente del terreno (ρ_s)

Para terrenos recubiertos por una capa adicional de elevada resistividad (grava, hormigón)

$$\rho_s = \rho^* \cdot C_s$$

h_s : Espesor de la capa superficial (m)

ρ : Resistividad del terreno natural

ρ^* : Resistividad de la capa superficial

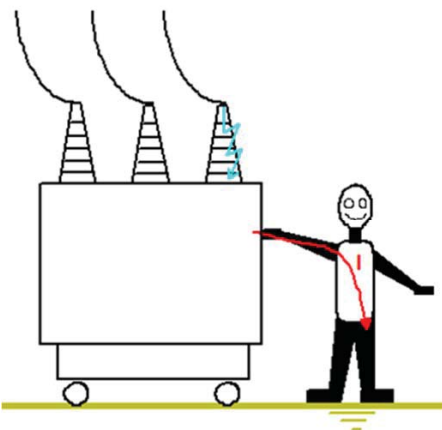
Coefficiente reductor:

$$C_s = 1 - 0,106 \left[\frac{1 - \frac{\rho}{\rho^*}}{2h_s + 0,106} \right]$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

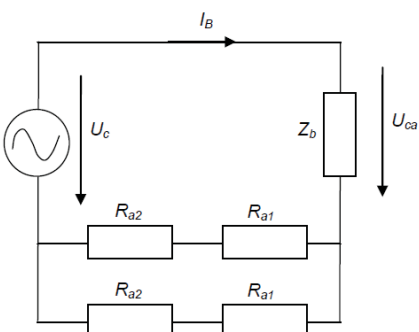
TENSIÓN DE CONTACTO



Diferencia de potencial existente entre la mano y el pie de una persona que este momento está en contacto con el electrodo de tierra y pisando el terreno a cierta distancia del mismo.

Tensión máxima de contacto admisible:

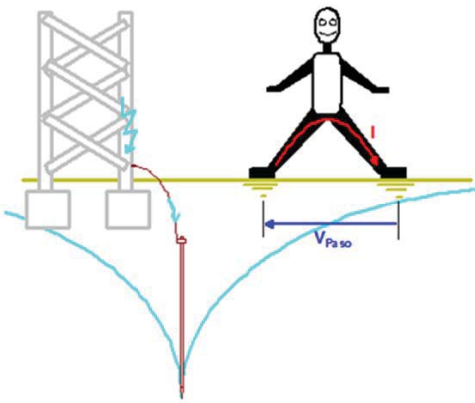
$$U_c = U_{ca} \left[1 + \frac{R_{a1} + R_{a2}}{2Z_B} \right] = U_{ca} \left[1 + \frac{\frac{R_{a1}}{2} + 1,5\rho_s}{1000} \right]$$



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

TENSIÓN DE PASO



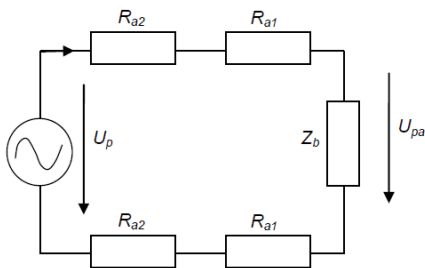
Diferencia de potencial existente entre dos puntos del terreno situados a 1,0 m de distancia entre sí en dirección al electrodo de tierra.

Afectaría a una persona que se encuentra caminando en las cercanías del electrodo de tierra en el momento de la avería.

Es tanto mayor cuanto más cerca se encuentre del electrodo.

Tensión máxima de paso admisible:

$$U_{pa} = 10 \cdot U_{ca}$$

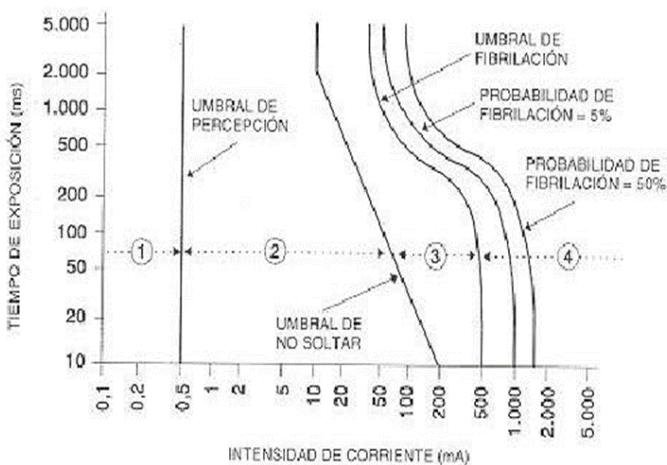


$$U_p = U_{pa} \left[1 + \frac{2R_{a1} + 2R_{a2}}{Z_B} \right] = 10U_{ca} \left[1 + \frac{2R_{a1} + 6\rho_S}{1000} \right]$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

8. TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

EFFECTOS FISIOLÓGICOS EN EL CUERPO HUMANO



(1) Umbral de Percepción

Percepción: 1mA

Corriente de soltar: 1 mA ÷ 6 mA

(2) Umbral de No Soltar

Corriente de NO soltar: 9 mA ÷ 25 mA; Dolorosa.

Corriente mayores: Contracciones musculares, dificultar respiratoria.

(3) Umbral de fibrilación ventricular:

Corriente de fibrilación: 60 mA ÷ 100 mA.

Paro cardíaco y/o respiratorio.

Se debe mantener por debajo de estos valores mediante un diseño adecuado del sistema de Puesta a tierra.

Corriente que circula por el cuerpo

$$I_B = \sqrt{\frac{S_B}{t_s}} = \frac{K}{\sqrt{t_s}}$$

I_B : Valor eficaz de la corriente que circula por el cuerpo (A)

t_s : Duración de la corriente circulante (s)

K : Variable empírica determinada en función del peso de la persona:

$$K = \sqrt{S_B}$$

Para una persona de 70 Kg; $K = 0,157$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

9. RESISTENCIA DE PUESTA A TIERRA

El valor real de la resistencia de tierra, ha de ser medido una vez efectuada la instalación del electrodo a fin de verificar la idoneidad del mismo.

$$R_{MIE.RAT-13} = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega)$$
$$R_{UNE, IEEE Std 80-2000} = \rho \cdot \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20 \cdot A}} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\Omega)$$

Siendo:

R: Resistencia de puesta a tierra del electrodo (Ω).

$\rho = \rho_s$: Resistividad superficial aparente del terreno (para terrenos recubiertos con una capa adicional de elevada resistividad (hormigón, grava, etc.).

L: Longitud del electrodo enterrado (m).

r: Radio de un círculo de la misma superficie del área cubierta por la malla de PaT (m).

A: Área cubierta por la superficie de la malla (m^2).

h = h_s : Espesor de la capa superficial de elevada resistividad (m).

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

10. RESISTIVIDAD SUPERFICIAL APARENTE DEL TERRENO

$$\rho = \rho_s = \rho^* \cdot C_s = \rho^* \cdot \left(1 - 0,106 \cdot \left[1 + \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_s}}{2 \cdot \rho_s + 0,106} \right] \right) \quad (\Omega \cdot m)$$

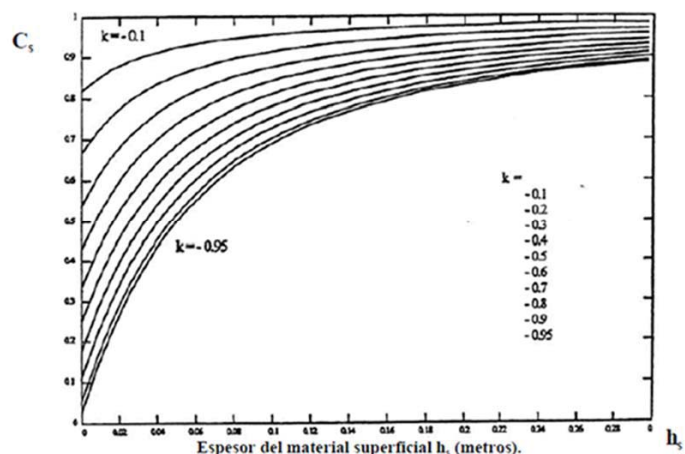
Siendo:

ρ : Resistividad del terreno natural ($\Omega \cdot m$).

ρ^* : Resistividad de la capa superficial ($\Omega \cdot m$).

h_s : Espesor de la capa superficial de elevada resistividad (m).

Efecto del espesor del material superficial



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES

MIE.RAT-4: CLASIFICACIÓN DE LAS INSTALACIONES

- **Primera Categoría: $220 \text{ KV} < V_n < 66 \text{ KV}$**
- **Segunda Categoría: $66 \text{ KV} < V_n \leq 30 \text{ KV}$**
- Tercera Categoría: $30 \text{ KV} < V_n \leq 1 \text{ KV}$

Si en las instalaciones coexisten varios niveles de tensión el conjunto del sistema se clasificará en el grupo correspondiente al valor de la tensión nominal más elevada.

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

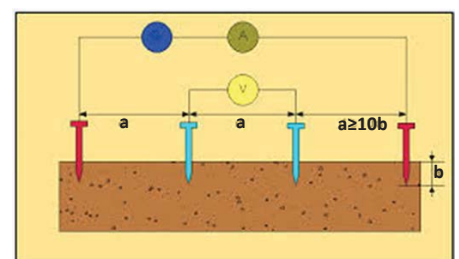
Determinación de la resistividad del terreno: ρ ($\Omega \cdot m$)

En instalaciones de 1ª y 2ª categoría **es necesario realizar mediciones reales en campo** mediante:

- **Método Wenner** (de 4 electrodos):

- Es el método más utilizado.
- Adecuado para realizar medidas a una sola profundidad.

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

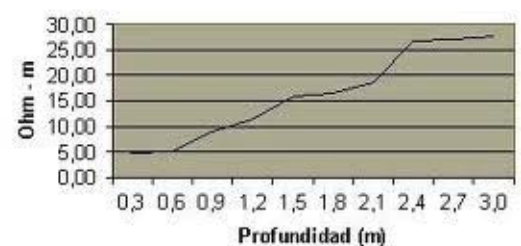


- **Método Schlumberger:**

- Adecuado para realizar medidas a distintas profundidades.
- Permite crear perfiles geológicos de los suelos

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot (n + 1) \cdot na$$

PERFIL DE RESISTIVIDAD



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Determinación de la resistividad del terreno: ρ ($\Omega \cdot m$)

En instalaciones de 3ª categoría (Centros de transformación) puede utilizarse la Tabla -1 del MIE.RAT-13 (para subestaciones solo usar a efectos orientativos)

Naturaleza del terreno	Resistividad en $\Omega \cdot m$
Terrenos pantanosos	de algunas unidades a 30
Limo	20 a 100
Humus	10 a 150
Turba húmeda	5 a 100
Arcilla plástica	50
Margas y arcillas compactas	100 a 200
Margas del jurásico	30 a 40
Arena arcillosa	50 a 500
Arena silíceas	200 a 3000
Suelo pedregoso cubierto de césped	300 a 500
Suelo pedregoso desnudo	1500 a 3000
Calizas blandas	100 a 300
Calizas compactas	1000 a 5000
Calizas agrietadas	500 a 1000
Pizarras	50 a 300
Rocas de mica y cuarzo	800
Granitos y gres procedentes de alteración	1500 a 10000
Granitos y gres muy alterados	100 a 600
Hormigón	2000 a 3000
Balasto o grava	3000 a 5000

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 1. INVESTIGACIÓN DE LAS CARACTERÍSTICAS DEL SUELO

Determinación de la resistividad del terreno: ρ ($\Omega \cdot m$)

Otros factores que influyen en la resistividad del terreno son:

- **Humedad y contenido de sales:**

- Son determinantes en el valor de la resistividad.
- Un alto contenido en sales hace que disminuya la resistividad.
- La resistividad decrece a medida que aumenta a humedad en el suelo.
- Para evitar la desecación del terreno en épocas estivales se emplean gravas superficiales.

Efecto de la humedad en la resistividad del terreno		
Contenido de humedad % por peso Resistividad ($\Omega \cdot cm$)	Terreno superficial	Arcilla arenosa
0.0	$1.000 \cdot 10^6$	$1.000 \cdot 10^6$
2.5	250.000	150.000
5.0	165.000	43.000
10	53.000	22.000
15	21.000	13.000
20	12.000	10.000
30	10.000	8.000

- **Temperatura:**

A medida que baja la temperatura, la resistividad aumenta drásticamente

Efecto de la temperatura en un terreno arcilloso-arenoso con 15% de humedad						
$^{\circ}C$	20	10	0 (agua)	0 (hielo)	-5	-15
ρ ($\Omega \cdot m$)	75	100	138	300	790	3300

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.2. PARÁMETROS INICIALES DE DISEÑO

Características del sistema de transmisión:

Las empresas responsables de las instalaciones de transporte (REE, Red Eléctrica de España) y/o distribución (Iberdrola, Fecsa, ...), **deben proporcionar los datos característicos de la red:**

Línea	$3 \cdot I_0$ (KA)	ρ_i	Z_s (Ω /Km)	R_a (Ω)	L (Km)	Z_{eqL} (Ω)
Siendo: $3 \cdot I_0$: Intensidad de falta aportada por las líneas (Intensidad homopolar) ρ_i : Coeficiente para el cálculo de la intensidad extraída por inducción. Z_s : Autoimpedancia del cable. R_a : Impedancia de puesta a tierra de un apoyo de la línea. L: Longitud media de un vano. Z_{eqL} : Impedancia equivalente de los cables de tierra de las líneas.						

- Intensidad máxima de cortocircuito (I_{cc})
- Tiempo de duración del defecto; ($t = 0,5$ sg)

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.3. DATOS DE PARTIDA

DATOS DE LA RED (deben ser proporcionados por la compañía responsable de las instalaciones de transporte, (REE))			
Nivel de Tensión de BAJA (V_b)	$V_b =$	20	KV
Nivel de Tensión de ALTA (V_a)	$V_a =$		KV
Frecuencia de la red	$f =$		Hz
Relación de impedancias (X''/R)	$X''/R =$		
Número de Líneas que conectan con la ST	n_{LAT}	2	Líneas AT
Impedancia equivalente de PaT exterior de las líneas	$Z_{eqL} =$		Ω
Coeficiente de cálculo de la I extraída por inducción	$\rho_i =$		
Tiempo de despeje de la falta	$t =$	0,5	sg
Sistema de conexión del Neutro	Conexión =		Rígido a tierra

TENSIONES DE PASO Y CONTACTO			
Tiempo máximo de despeje de la falta	$t =$	0,5	sg
Intensidad máxima de defecto ($3 \cdot I_0$)	$I_{cc} =$		A

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

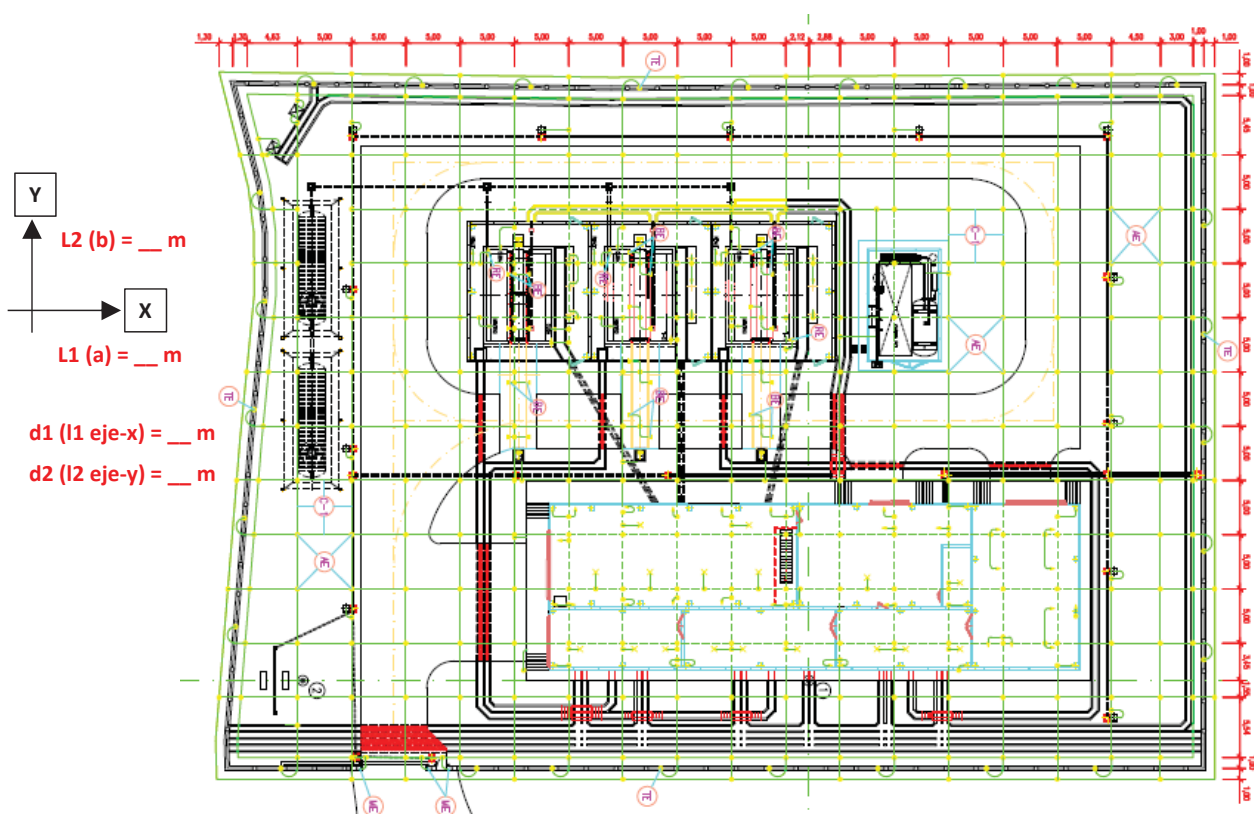
11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO 11. 3. DATOS DE PARTIDA

CARACTERÍSTICAS GEOMÉTRICAS

Profundidad de soterramiento RED MALLADA	h =	m
Profundidad de soterramiento RED PERIMETRAL	hcp =	m
Retícula		
Área media de la retícula ($\geq 2m$)	A retícula=	m ²
Distancia media entre conductores Eje-X	d1 = l1 eje-x =	m
Distancia media entre conductores Eje-Y	d2 = l2 eje-y =	m
Malla		
Longitud del conductor enterrado: $L = (n_1 * L_1) + (n_2 * L_2)$	L =	m
Superficie de la malla		
Perímetro Longitudinal de la ET (Lado mayor)	L₁ (a) =	m
Perímetro Transversal de la ET (Lado Menor)	L₂ (b) =	m
Nº de conductores paralelos al lado mayor $n_1 = \frac{L_1}{l_1} + 1$	n₁ =	Cond.
Nº de conductores paralelos al lado menor $n_2 = \frac{L_2}{l_2} + 1$	n₂ =	Cond.
Radio (Superficie circulo = Área cubierta por la malla)	r =	m
DATOS DEL TERRENO		
Naturaleza del terreno	Arcilla plástica	
Resistividad del Terreno	$\rho =$	$\Omega \cdot m$
Espesor capa de grava superficial	e =	m
Resistividad de la capa Superficial de grava	$\rho_{sup} =$	$\Omega \cdot m$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO 11. 3. DATOS DE PARTIDA



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.4. CÁLCULO DE LA SECCIÓN DEL CONDUCTOR DE LA RED DE TIERRA

- La sección será uniforme en toda la instalación.
- Comprenderá las tierras de Protección y de Servicio.
- Los cables pueden ser de Cobre, Aluminio o Acero

Densidad de corriente:	δ cobre = 160 A/mm²
	δ aluminio = 100 A/mm ²
	δ acero = 60 A/mm ²

- A efectos de cálculo de secciones: **t = 1 sg**
- La sección viene determinada por:

$$S_{MIE.RAT-13} = \frac{I_{cc}}{\delta_{cu} \cdot 1,2} \quad (mm^2)$$

$$S_{UNE, IEEE Std 80-2000} = \frac{I_{cc}}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t \cdot \rho_r \cdot \alpha_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_0 + T_m}{K_0 + T_a}\right)}} \quad (mm^2)$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.5. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA

- La malla de tierra estará constituida por una retícula de conductores dispuestos longitudinal y transversalmente (uniones soldadas).

$$R_{MIE.RAT-13} = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega)$$

L: Longitud total de conductores de la malla (m)

ρ : Resistividad del terreno ($\Omega \cdot m$)

r: Radio de un círculo de la misma superficie que el área cubierta por la malla (m)

$$R_{UNE, IEEE Std 80-2000} = \rho \cdot \left[\frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20} \cdot A} \cdot \left(1 + \frac{1}{1 + h \cdot \sqrt{\frac{20}{A}}} \right) \right] \quad (\Omega)$$

- La $R_{UNE, IEEE Std 80-2000}$ considera la profundidad de enterramiento y la superficie mallada.
- Un incremento de la profundidad, generalmente, hace disminuir la resistencia. (No considerado por MIE.RAT).
- La R puede disminuir añadiendo electrodos adicionales (picas, placas, etc.)

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.5. CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DE LA MALLA DE TIERRA

Según UNE, IEEE Std. 80-2000

Ecuaciones de Schwarz; Cálculo de la Resistencia considerando adicionales (picas, placas, etc.)

Resistencia combinada (Malla + Picas):
$$R_{combinada} = \frac{R_1 \cdot R_2 + R_m^2}{R_1 + R_2 - 2R_m} \quad (\Omega)$$

Resistencia de tierra de la malla (R1):
$$R_1 = \frac{\rho}{\pi \cdot L_m} \cdot \left[\ln \left(\frac{2L_m}{a'} \right) + \frac{K_1 \cdot L_m}{\sqrt{A}} - K_2 \right] \quad (\Omega)$$

Resistencia de tierra de las picas (R2):
$$R_2 = \frac{\rho}{2\pi \cdot n_p \cdot L_p} \cdot \left[\ln \left(\frac{4L_p}{b} \right) - 1 + \frac{2K_1 \cdot L_p}{\sqrt{A}} \cdot (\sqrt{n_p} - 1)^2 \right] \quad (\Omega)$$

Resistencia mutua (Rm):
$$R_m = \frac{\rho}{\pi \cdot L_m} \cdot \left[\ln \left(\frac{2L_m}{L_p} \right) + \frac{K_1 \cdot L_m}{\sqrt{A}} - K_2 + 1 \right] \quad (\Omega)$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.7. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE DEFECTO (para el cálculo de las tensiones de Paso y Contacto)

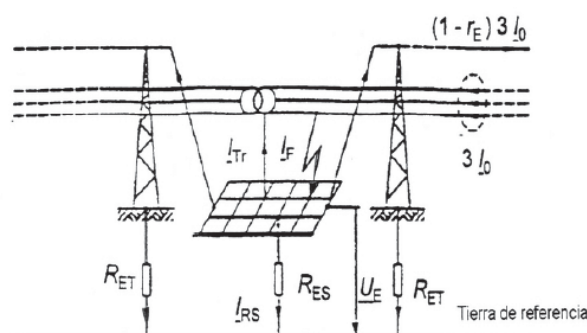
Es necesario conocer datos de Potencias de cortocircuito o Intensidades de cortocircuito, y valores de impedancias características de las líneas. (aportado por REE)

MIE.RAT-13 (5)

Para el cálculo de las corrientes de defecto y de puesta a tierra, se ha de tener en cuenta la forma de conexión del neutro a tierra, así como la configuración y características de la red durante el periodo subtransitorio.

Es necesario conocer los valores de las impedancias equivalentes de los cables de tierra de las líneas aéreas y/o de las pantallas de los cables subterráneos.

En el caso de redes con neutro a tierra (rígido o a través de impedancia), se considera el valor de la **Intensidad de la corriente de puesta a tierra (I_E)** que provoca la elevación del potencia de la instalación a tierra



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

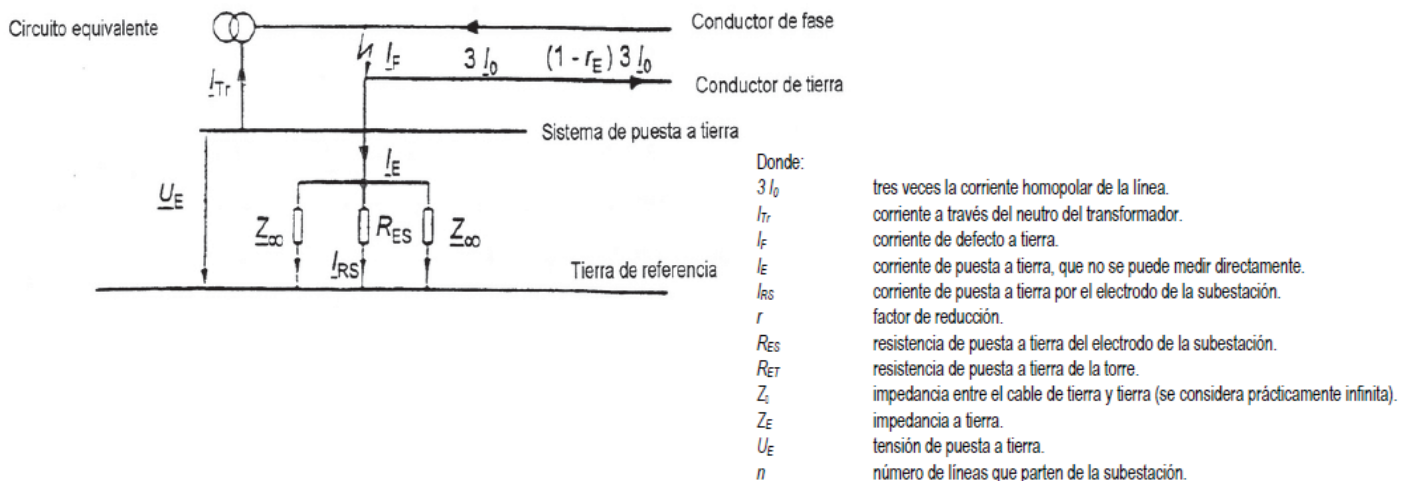
11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.7. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE DEFECTO (para el cálculo de las tensiones de Paso y Contacto)

Es necesario conocer datos de Potencias de cortocircuito o Intensidades de cortocircuito, y valores de impedancias características de las líneas. (aportado por REE)

MIE.RAT-13 (5)

En el caso de redes con neutro a tierra (rígido o a través de impedancia), se considera el valor de la **Intensidad de la corriente de puesta a tierra (I_E)** que provoca la elevación del potencia de la instalación a tierra



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.7. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE DEFECTO (para el cálculo de las tensiones de Paso y Contacto)

- En caso de falta, no toda la corriente de defecto se deriva a tierra.
- Una parte circula por la malla de puesta a tierra y otra puede hacerlo confinada en los hilos de guarda ($3 \cdot I_0$) y pantallas de cables subterráneos.
- Son necesarias para la determinación de las Tensiones de paso y contacto.
- Los cálculos se realizarán mediante las prescripciones del MIE.RAT-13 (*metodología de UNE, IEEE Std 80-2000*).

I_F : Corriente de defecto a tierra

$$I_F = 3 \cdot I_0 + I_{Tr} \quad (A)$$

I_E : Corriente de puesta a tierra

$$I_E = r \cdot (I_F - I_{Tr}) = r \cdot 3 \cdot I_0 \quad (A)$$

r : Factor de reducción (para neutro rígido a tierra)

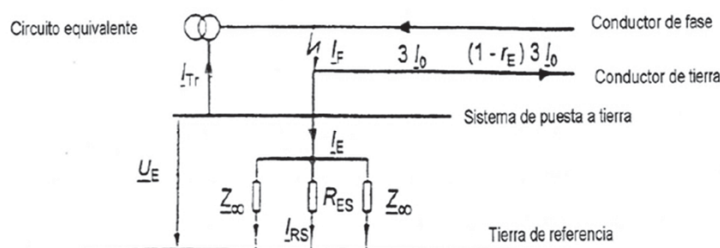
$$r = 0,7 \text{ para } U_n > 100 \text{ KV}$$

$$r = 1 \text{ para } U_n < 100 \text{ KV}$$

Pueden adoptarse valores típicos de los factores de reducción, según la UNE EN 50522.2010

U_E : Tensión de puesta a tierra

$$U_E = I_E \cdot Z_E \quad (V)$$

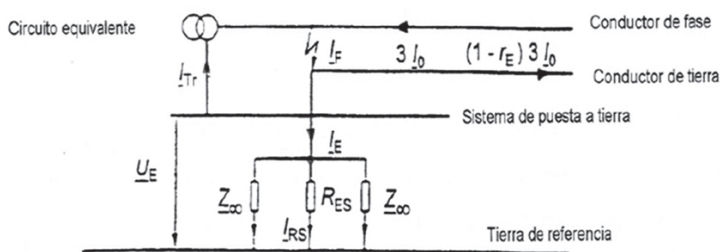


Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.7. CÁLCULO DE LAS CORRIENTES DE DEFECTO (para el cálculo de las tensiones de Paso y Contacto)

Impedancias de Puesta a Tierra:



Z_E : Impedancia de puesta a tierra del sistema:

Se supone que las impedancias entre el cable de tierra y la tierra de referencia es igual para todas las torres.

n : Número de líneas

$$Z_E = \frac{1}{\frac{1}{R_{ES}} + \frac{n}{Z_{\infty}}} \quad (\Omega)$$

R_{ES} : Resistencia de puesta a tierra del electrodo de la subestación:

$$R_{MIE.RAT-13} = R_{ES} = \frac{\rho}{4 \cdot r} + \frac{\rho}{L} \quad (\Omega)$$

Z_{∞} : Impedancia entre el cable de tierra y tierra; Impedancia en cadena (se considera prácticamente infinita):

$$Z_{\infty} = \frac{1}{\sum \frac{1}{Z_{eq.Li}}} \quad (\Omega)$$

$Z_{eq.Li}$: Impedancias equivalentes (Thevenin) de los cables de tierra de las líneas aéreas y/o de las pantallas de los cables subterráneos.

(Datos de partida)

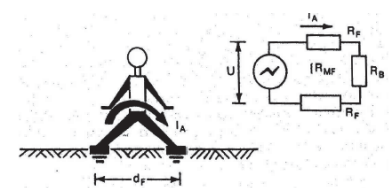
Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11.8. CÁLCULO DE LAS TENSIONES MÁXIMAS ADMISIBLES DE PASO Y CONTACTO

Tensión de Paso (V_p):

- Una persona al pisar puntos del terreno ($d = 1,0$ m), que al circular una corriente de falta se encuentran a distinto potencial, queda sometida entre sus pies a una ddp.

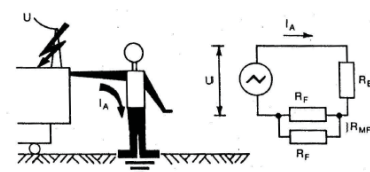


$$\begin{aligned} d_F &= 1 \text{ m} \\ R_A &= R_B + 2R_F - 2R_{MF} \\ I_A &= U/R_A \\ R_B &= 1000 \Omega \end{aligned}$$

Circuito equivalente Tensión de Paso

Tensión de Contacto (V_c):

- Si una persona situada a una distancia "A máx = 1,0 m" de un electrodo, establece contacto entre la mano y una masa por la que circula una corriente de defecto, la mano está a potencial del electrodo y los pies están a una ddp entre el potencial A y el suelo



$$R_A = R_B + \frac{1}{2}(R_F + R_{MF})$$

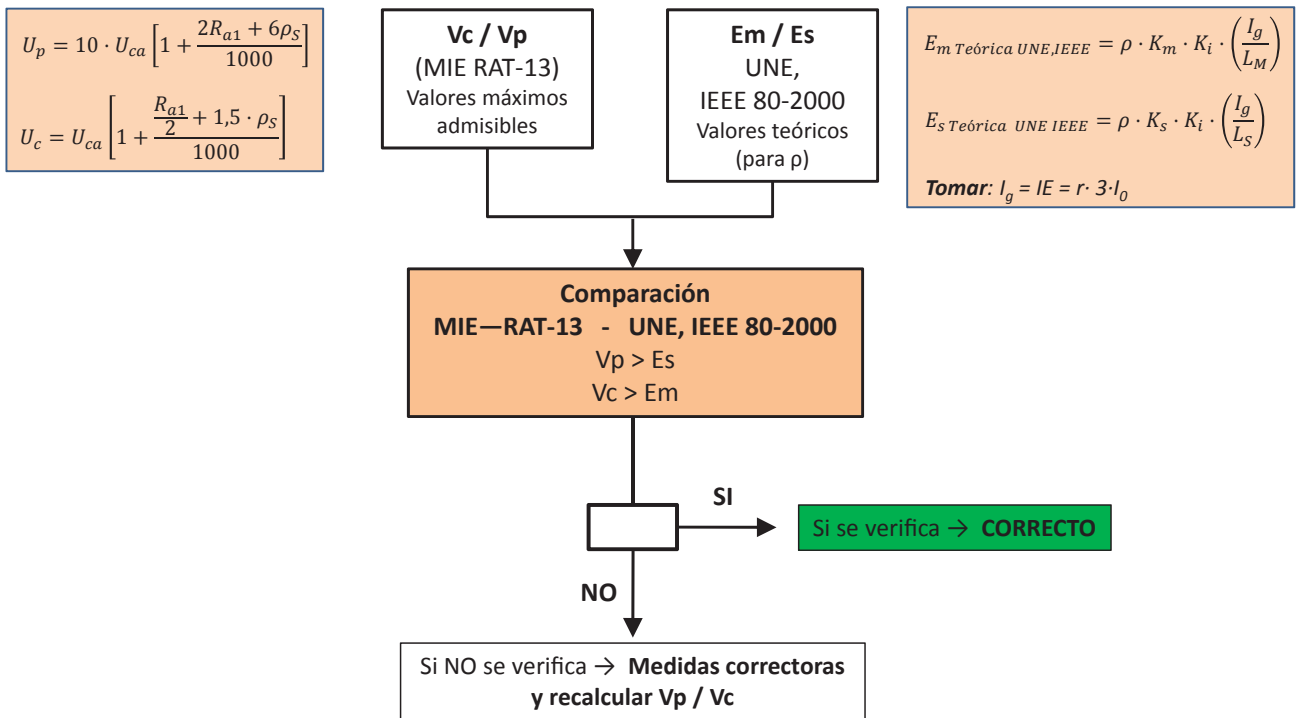
Donde:
 I_A = Corriente del circuito accidental.
 R_A = Resistencia total del circuito accidental.

Circuito equivalente Tensión de Contacto

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 8. CÁLCULO DE LAS TENSIONES MÁXIMAS ADMISIBLES DE PASO Y CONTACTO



Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 9. CÁLCULO DE LOS VALORES TEÓRICOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Comprobación de los resultados

Se seguirá la metodología de la norma UNE, IEEE Std 80-2000

Tensión de Paso teórica (Es):

$$E_{s\text{ teórica UNE, IEEE}} = \rho \cdot K_s \cdot K_i \cdot \left(\frac{I_g}{L_M} \right) \text{ (V)}$$

Tensión de Contacto teórica (Em):

$$E_{m\text{ teórica UNE, IEEE}} = \rho \cdot K_m \cdot K_i \cdot \left(\frac{I_g}{L_S} \right) \text{ (V)}$$

Para malla sin picas o con picas no situadas en las esquinas o perímetro (para calcular la tensión de contacto):

$$L_M = L_C + L_R \text{ (m)}$$

Para malla con picas en las esquinas o repartidas por el perímetro (para calcular la tensión de contacto):

$$L_M = L_C + L_R \cdot \left[1,55 + 1,22 \cdot \left(\frac{L_r}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}} \right) \right] \text{ (m)}$$

Para mallas con o sin picas de tierra (para calcular la tensión de paso):

$$L_S = 0,75 \cdot L_C + 0,85 \cdot L_R \text{ (m)}$$

Comprobación de los resultados:

Verificar que se cumple

$$E_m < V_c$$

$$E_s < V_p$$

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 9. CÁLCULO DE LOS VALORES TEÓRICOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Comprobación de los resultados

Se seguirá la metodología de la norma UNE, IEEE Std 80-2000

- Factor de espaciamiento de la malla (para Vc):

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

n: Nº de conductores equivalentes en una dirección

$$n = \sqrt{n^{\circ} \text{ cond eje } X \cdot n^{\circ} \text{ cond eje } Y}$$

h: Profundidad de soterramiento de la red mallada

d: Diámetro del electrodo enterrado

D: Separación media entre conductores paralelos

K_{ii}: Factor de ubicación de los electrodos pica:

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

K_{ii} = 1; Para mallas con picas a lo largo de todo el perímetro o en las esquinas o además repartidas por toda la malla

K_h: Factor de profundidad de soterramiento:

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

h₀: Profundidad de la malla de referencia; h₀ = 1 m

Práctica: SISTEMA DE PUESTA A TIERRA EN SUBESTACIONES ELÉCTRICAS

11. PROCEDIMIENTO DE DISEÑO

11. 9. CÁLCULO DE LOS VALORES TEÓRICOS DE LAS TENSIONES DE PASO Y CONTACTO

Comprobación de los resultados

Se seguirá la metodología de la norma UNE, IEEE Std 80-2000

- Factor de Geometría de la malla: (Irregularidad del flujo de corriente del conductor de tierra)

$$K_i = 0,644 + 0,148 \cdot n$$

Nº de conductores equivalentes en una dirección: $n = \sqrt{n^{\circ} \text{ cond eje } X \cdot n^{\circ} \text{ cond eje } Y}$

- Factor de espaciamiento de la malla (para Vp):

$$K_s = \frac{1}{\pi} \cdot \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} \cdot (1 - 0,5^{n-2}) \right]$$

12. INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSFERIBLES

Se investigarán las tensiones transferibles al exterior por tuberías, railes, vallas, conductores de neutro, blindajes de cables de circuitos de comunicaciones y señalización y de los puntos especialmente peligrosos, y el estudio de las formas de reducción o eliminación (MIE.RAT-13 (8))

13. CORRECCIÓN Y AJUSTE DEL DISEÑO INICIAL

En caso necesario se adoptarán las siguientes medidas correctoras:

- Incrementar el espesor de la capa superficial.
- Dotar de suelos o pavimentos aislantes.
- Ampliación de la malla de PaT con electrodos más profundos.
- Establecer conexiones equipotenciales.
- Mejora de la conductividad
- Inaccesibilidad a zonas peligrosas.
- Aislamiento de las partes metálicas y los conductores de tierra.