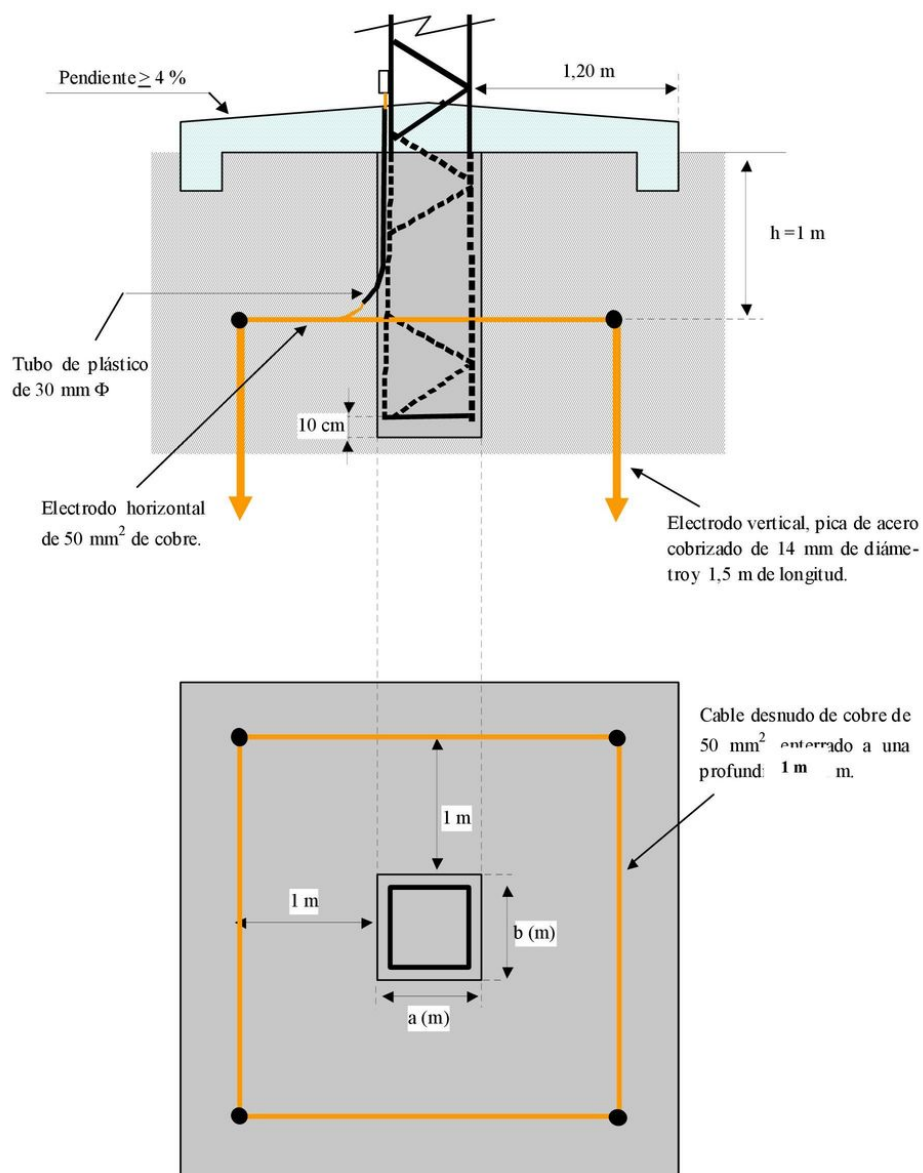


# Resumen puesta a tierra de apoyos

MakerGarage

Abril 2021



# 1. Pasos a seguir

$Z_{1A}$  Impedancia secuencia directa de la subestación A  
 $Z_{2A}$  Impedancia secuencia inversa de la subestación A  
 $Z_{0A}$  Impedancia secuencia homopolar de la subestación A  
 $Z_{EA}$  Impedancia a tierra de la subestación A  
 $Z_{1L}$  Impedancia directa de la línea  
 $Z_{2L}$  Impedancia inversa de la línea  
 $Z_{WL}$   
 $Z_{WW0}$

En este tipo de problemas buscamos calcular la intensidad de defecto que circula por nuestra pica de tierra  $I_T$ , una vez tengamos conocido este valor procedemos a comprobar si cumple los criterios que iremos viendo a continuación.

Cabe destacar que podemos distinguir varias categorías:

- 3ª Categoría (Alimentada por 1 subestación y sin cable de tierra)
- 2ª Categoría (Alimentada por 1 subestación y sin cable de tierra)
- 2ª Categoría (Alimentada por 2 subestaciones y sin cable de tierra)  $\rightarrow I_E = I_{F1} + I_{F2}$
- 2ª Categoría (Alimentada por 2 subestaciones y con cable de tierra)

Una vez hemos conseguido calcular la  $I_E$  que circula por nuestro electrodo de puesta a tierra tenemos que comprobar que cumple siguiendo el siguiente esquema.

1. Comprobamos que  $V_E < 2 \cdot V_C$
  - $\Downarrow$  No cumplimos
  2. Comprobamos que  $V'_C < V_C$
- $\Downarrow$  No cumplimos (Aplicamos medidas adicionales)
3. Comprobamos que  $V'_P < V_P$  y  $V'_{P_{acceso}} < V_{P_{acceso}}$

Diferencias a la hora de calcular la  $I_E$  en función del circuito:

- 3ª Categoría (Alimentada por 1 subestación y sin cable de tierra)
  - Neutro conectado

$$|I_F| \simeq \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{X_n^2 + (R_n + R)^2}}$$

$c = 1'1$

$U_n$  = Tensión de la línea

$R$  = Resistencia de puesta a tierra del apoyo

$X_n$  = Impedancia del neutro

$R_n$  = Resistencia del neutro

- Neutro aislado

$$|I_F| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)^2 \cdot (3R)^2}}$$

$c = 1'1$

$U_n$  = Tensión de la línea

$R$  = Resistencia de puesta a tierra del apoyo

$C_a$  = Capacidad de las líneas aéreas =  $0'006 \mu F/Km$

$C_c$  = Capacidad de las líneas subterráneas =  $0'25 \mu F/Km$

$L_a$  = Longitud de las líneas aéreas en km

$L_c$  = Longitud de las líneas subterráneas en km

- 2ª Categoría (Alimentada por 1 subestación y sin cable de tierra)

Se calcula igual que una de 3ª Categoría (Alimentada por 1 subestación y sin cable de tierra)

- 2ª Categoría (Alimentada por 2 subestaciones y sin cable de tierra)

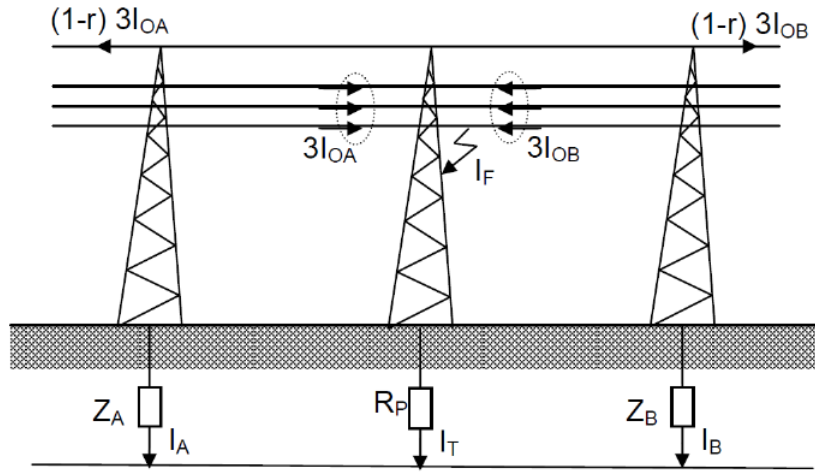
$$I_{F1} + I_{F2} = I_E = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \vec{U}_n}{2 \cdot \vec{Z}_1 + \vec{Z}_{0,sc} + 3 \cdot R}$$

$$\vec{Z}_1 = \vec{Z}_2 = \frac{1}{\frac{1}{\vec{Z}_{1A} + \vec{Z}_{1L} \cdot l_a} + \frac{1}{\vec{Z}_{1B} + \vec{Z}_{1L} \cdot l_b}}$$

$$\vec{Z}_{0,sc} = \frac{1}{\frac{1}{3 \cdot \vec{Z}_{EA} + \vec{Z}_{0A} + \vec{Z}_{0L,sc} \cdot l_a} + \frac{1}{3 \cdot \vec{Z}_{EB} + \vec{Z}_{0B} + \vec{Z}_{0L,sc} \cdot l_b}}$$

- 2ª Categoría (Alimentada por 2 subestaciones y con cable de tierra)

En este caso tenemos una parte de la corriente que se va a disipar por nuestro apoyo  $I_T$  y por los apoyos colindantes  $I_A + I_B$  y el resto de la corriente retorna a la subestación  $(1 - r) \cdot 3 \cdot I_{OA}$



En este caso tenemos que  $I_E = I_A + I_B + I_T$  siendo  $I_T$  la corriente que queremos obtener, los pasos a seguir son los siguientes:

1. Saco  $I_F$  la cual depende de  $Z_1$  y  $Z_0$

$$\vec{I}_F = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot \vec{U}_n}{2 \cdot \vec{Z}_1 + \vec{Z}_0}$$

$c = 1'1$

$\vec{U}_n$  = Tensión de la línea en Voltios

$$\vec{Z}_1 = \vec{Z}_2 = \frac{1}{\frac{1}{\vec{Z}_{1A} + \vec{Z}_{1L} \cdot l_a} + \frac{1}{\vec{Z}_{1B} + \vec{Z}_{1L} \cdot l_b}}$$

$Z_A$  = Impedancia de la subestación A ← Dato

$Z_B$  = Impedancia de la subestación B ← Dato

$Z_{1L}$  = Impedancia directa

$l_a$  = Longitud del apoyo hasta la subestación A [km]

$l_b$  = Longitud del apoyo hasta la subestación B [km]

$$\vec{Z}_0 = \frac{1}{\frac{1}{\vec{Z}_{0A} + \vec{Z}_{0L} \cdot l_a} + \frac{1}{\vec{Z}_{0B} + \vec{Z}_{0L} \cdot l_b}}$$

$Z_{0A}$  = Impedancia homopolar de la subestación A

$Z_{0B}$  = Impedancia homopolar de la subestación B

$Z_{0L}$  = Impedancia homopolar del CT con cable de tierra

$l_a$  = Longitud del apoyo hasta la subestación A

$l_b$  = Longitud del apoyo hasta la subestación B

2. Calculo r (factor de reducción) el cual depende de  $Z_{WL}$  y  $Z_{ww0}$  que a su vez dependen de  $\delta$  y de r nos quedamos con el módulo

$$\vec{r} = 1 - \frac{\vec{Z}_{WL}}{\vec{Z}_{ww0}}$$

$$\vec{Z}_{WL} = \left[ \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \ln \frac{\delta}{D_{WL}} \right] \cdot 10^3 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

$$w = 2 \cdot \pi \cdot 50$$

$$\mu_0 = \text{Permeabilidad del vacio} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$D_{WL} = \text{Distancia media geométrica entre el cable de tierra y conductores [m]}$$

$$\vec{Z}_{ww0} = \frac{R_w}{n} + \left[ \omega \cdot \frac{\mu_0}{8} + j \cdot \omega \cdot \frac{\mu_0}{2 \cdot \pi} \cdot \left[ \ln \frac{\delta}{r_{ww}} + \frac{\mu_r}{4 \cdot n} \right] \right] \cdot 10^3 \left[ \frac{\Omega}{km} \right]$$

$$\mu_0 = \text{Permeabilidad en el vacío} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}$$

$$r_{ww} = \text{Radio equivalente de los cables de tierra (debe de ir en metros) (diámetro/2)}$$

$$n = \text{Número de cables de tierra}$$

$$R_w = \text{Resistencia por unidad de longitud del cable de tierra } R_w = \frac{\rho_w}{S}$$

$$\delta = \frac{1,85}{\sqrt{\frac{\omega \cdot \mu_0}{\rho}}} [m]$$

$$\rho \text{ densidad del terreno en } \frac{\omega}{m}$$

$$\delta = \text{Profundidad media de las líneas de intensidad de corriente que retornan por el terreno}$$

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Permeabilidad en el vacío}$$

$$\text{Una vez tengo } I_F \text{ y r puedo calcular } I_E$$

$$I_E = |\vec{r}| \cdot |\vec{I}_F|$$

3. Saco  $Z_A$  y  $Z_B$  y con ellas saco  $Z_E$

Es importante destacar que  $Z_A$  y  $Z_B$  se refieren a la impedancia de los apoyos a un lado y otro del apoyo de estudio, son diferentes a las  $Z_A$  y  $Z_B$  que empleamos para sacar las cuales se refieren a la impedancia de la subestación correspondiente.

$$Z_E = \frac{Z_A * Z_B}{Z_A + Z_B}$$

$$Z_A = Z_B = \frac{1}{2} \left( Z_S + \sqrt{Z_S \cdot (4 \cdot R_t + Z_S)} \right)$$

$$R_t = \text{Resistencia de los apoyos colindantes}$$

$$Z_S = \vec{Z}_{ww0} \cdot a_m$$

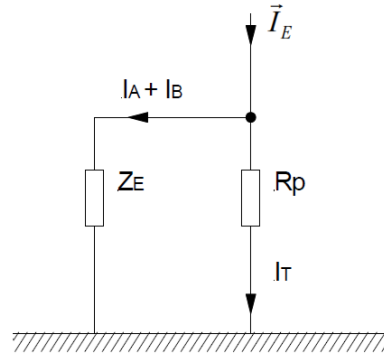
$$a_m \text{ longitud media de los vanos en km}$$

$$\vec{Z}_{ww0} \text{ calculada antes}$$

Es importante recordar que la raíz de un vector se calcula como:

$$\sqrt{\vec{Z}_s} = \sqrt{|\vec{Z}_s|} \angle \frac{\text{ángulo}}{2}$$

4. Por ultimo calculo la  $I_T$



Para calcular  $R_p$  tenemos que elegir un electrodo (UNESA) o una pica y calcularlo como  $R_p = K_r \cdot \rho$

$$\vec{Z}_{\text{total}} = \frac{\vec{Z}_E \cdot R_p}{\vec{Z}_E + R_p}$$

$$\vec{U}_E = \vec{Z}_{\text{total}} \cdot \vec{I}_E$$

$$\vec{U}_E = \vec{Z}_{\text{total}} \cdot \vec{r} \cdot \vec{I}_F$$

$$I_T = \frac{U_E}{R_p}$$

## 2. Apoyo no frecuentado 3 categoría

Nos encontramos en una línea de 3 categoría por tanto no disponemos de conductor de tierra.

Al ser apoyo no frecuentado, solamente debe cumplir que las protecciones actúen Pasos a seguir:

- Calcular la resistencia del electrodo
- Calcular la intensidad de defecto
- Calcular el tiempo de desconexión

Comenzamos:

- Calcular la resistencia del electrodo

- En el caso de ser una sola pica

$$R = \frac{\rho}{L}$$

$\rho = \text{Resistividad del terreno } [\Omega \cdot m]$   $L = \text{Longitud de la pica [m]}$

- En el caso de ser un electrodo (UNESA)

$$\left. \begin{array}{l} \circ K_r \\ \circ K_p \\ \circ K_c = K_{p_{acceso}} \end{array} \right\} R = K_r \cdot \rho$$

- Calcular la intensidad de defecto

- Neutro conectado

$$|I_F| \simeq \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{X_n^2 + (R_n + R)^2}}$$

$c = 1'1$

$U_n = \text{Tensión de la línea [V]}$

$R = \text{Resistencia de puesta a tierra del apoyo}$

$X_n = \text{Impedancia del neutro}$

$R_n = \text{Resistencia del neutro}$

- Neutro aislado

$$|I_F| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)^2 \cdot (3R)^2}}$$

$c = 1'1$

$U_n = \text{Tensión de la línea [V]}$

$R = \text{Resistencia de puesta a tierra del apoyo}$

$C_a = \text{Capacidad de las líneas aéreas} = 0'006 \mu F/Km[F]$

$C_c = \text{Capacidad de las líneas subterráneas} = 0'25 \mu F/Km$

$L_a = \text{Longitud de las líneas aéreas en km}$

$L_c = \text{Longitud de las líneas subterráneas en km}$

- Calcular tiempo de desconexión

La curva de actuación de las protecciones nos dicen que es

$$t = \frac{400}{I_F} < 10$$

### 3. Apoyo frecuentado 3 categoría

Nos encontramos en una línea de 3 categoría por tanto no disponemos de conductor de tierra.

Al ser apoyo frecuentado, aparte de cumplir que las protecciones actúen, tenemos que verificar que cumple por tensiones de contacto, en caso de no cumplir, se tomaran medidas adicionales y comprobaremos tensiones de paso que deben cumplir obligatoriamente.

Pasos a seguir:

- Calcular la resistencia del electrodo
  - Calcular la intensidad de defecto
  - Calcular el tiempo de desconexión
  - Comprobar tensiones de contacto
  - Comprobar tensiones de paso (en el caso de no cumplir las de contacto)
- } Siempre
- } Apoyo Frecuentado

Comenzamos:

- Calcular la resistencia del electrodo

- En el caso de ser una sola pica

$$R = \frac{\rho}{L}$$

$\rho = \text{Resistividad del terreno } [\Omega \cdot m]$

- En el caso de ser un electrodo (UNESA)

$$\left. \begin{array}{l} \circ K_r \\ \circ K_p \\ \circ K_c = K_{p_{acceso}} \end{array} \right\} R = K_r \cdot \rho$$

- Calcular la intensidad de defecto

- Neutro conectado

$$|I_F| \simeq \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{X_n^2 + (R_n + R)^2}}$$

$c = 1'$

$U_n =$  Tensión de la línea

$R =$  Resistencia de puesta a tierra del apoyo

$X_n =$  Impedancia del neutro

$R_n =$  Resistencia del neutro

- Neutro aislado

$$|I_F| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n \cdot (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)}{\sqrt{1 + (\omega \cdot C_a \cdot 10^{-6} \cdot L_a + \omega \cdot C_c \cdot 10^{-6} \cdot L_c)^2 \cdot (3R)^2}}$$

$c = 1'$

$U_n =$  Tensión de la línea

$R =$  Resistencia de puesta a tierra del apoyo

$C_a =$  Capacidad de las líneas aéreas =  $0'006 \mu F/Km$

$C_c =$  Capacidad de las líneas subterráneas =  $0'25 \mu F/Km$

$L_a =$  Longitud de las líneas aéreas en km

$L_c =$  Longitud de las líneas subterráneas en km



- Calcular tiempo de desconexión

La curva de actuación de las protecciones nos dicen que es

$$t = \frac{400}{I_F} < 10$$

- Comprobar tensiones de contacto

$$V_e = R \cdot I_F$$

$R$  = Resistencia del electrodo

Comprobamos si cumplimos que

$$V_e < 2 \cdot V_c$$

Si cumplimos hemos terminado, en caso de no cumplir verificamos si cumple que  $V'_c < V_c$

$$V_c = V_{ca} \cdot \left[ 1 + \frac{R_{a1} + R_{a2}}{2 \cdot Z_B} \right]$$

$R_{a1}$  = Resistencia del calzado (2000 por defecto)

$R_{a2}$  = Resistencia del terreno =  $3 \cdot \rho_s$

$Z_B$  = Impedancia del cuerpo (1000 por defecto)

$V_{ca}$  = Tensión de contacto aplicada admisible (Se mira en tabla con el  $t$  calculado)

$$V'_c = K_c \cdot \rho \cdot I_E$$

$I_E = I_F$  calculada anteriormente

Verificamos

$$V'_c < V_c$$

Si cumple hemos terminado, en caso de no cumplir, tenemos que adoptar medidas adicionales (peana de hormigón con mallado electrosoldado para conexión equipotencial) y comprobamos tensiones de paso

- Comprobar tensiones de paso (en el caso de no cumplir las de contacto)

$$V_p = 10 \cdot V_{ca} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot R_{a1} + 6 \cdot \rho}{1000} \right]$$

$R_{a1}$  = Resistividad del calzado

$\rho$  = Resistividad del terreno

$$V_{p_{acceso}} = 10 \cdot V_{ca} \cdot \left[ 1 + \frac{2 \cdot R_{a1} + 3 \cdot \rho + 3 \cdot \rho^*}{1000} \right]$$

$R_{a1}$  = Resistividad del calzado

$\rho$  = Resistividad del terreno

$\rho^*$  = Resistividad del hormigón (3000) o de la superficie que sea

$$V'_p = K_p \cdot \rho \cdot I_F$$

$$V'_{p, acceso} = K_{p, acceso} \cdot \rho \cdot I_F$$

Verifico que cumplen tanto

$$V'_p < V_p$$

$$V'_{p, acceso} < V_{p, acceso}$$