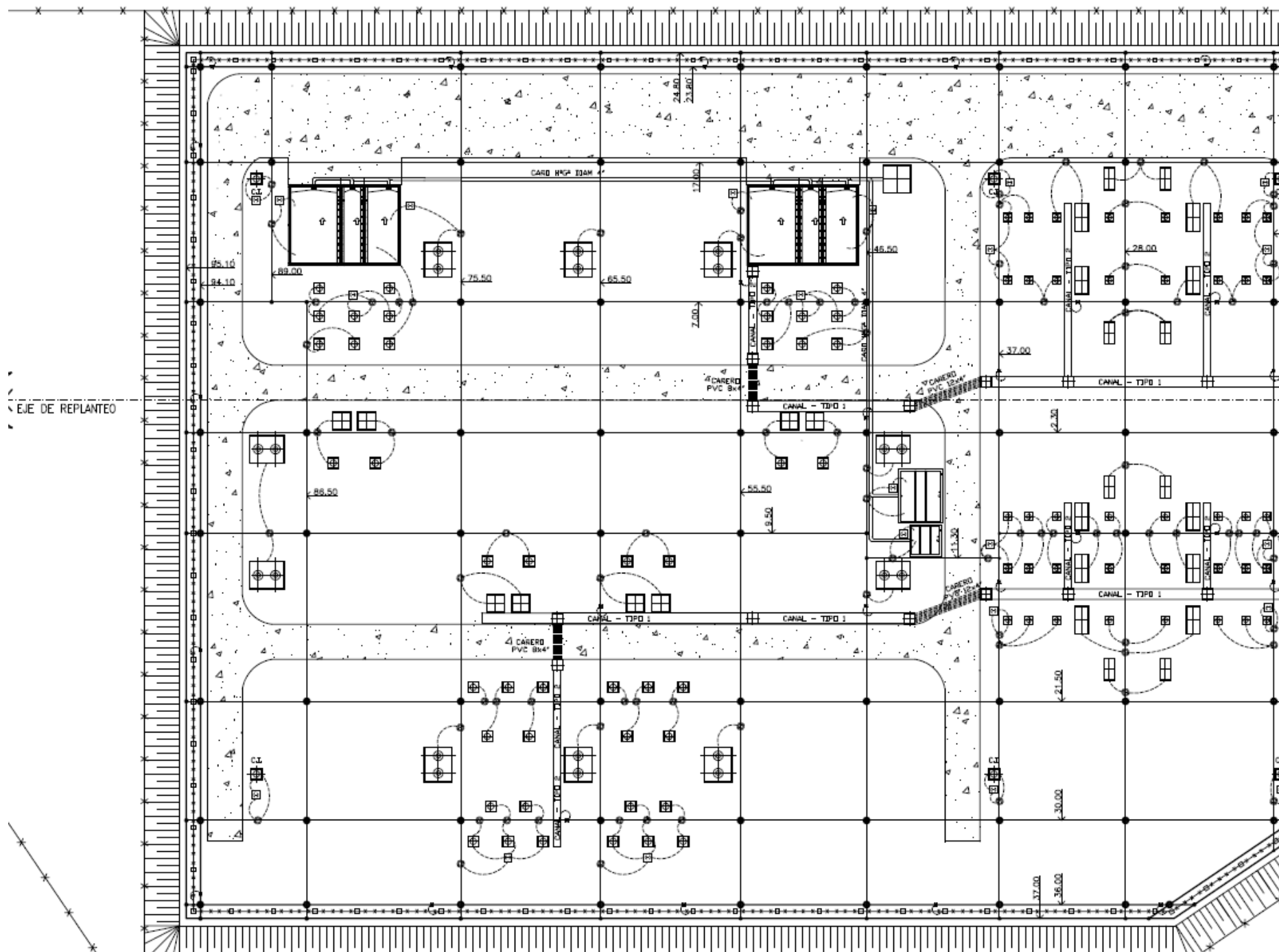


CALCULO MALLA DE PUESTA A TIERRA EN ET SEGÚN IEEE 80

DESARROLLO DE CALCULO



DESARROLLO DE CALCULO

Paso 1:

- Se proporcionan los datos del terreno de la estación en estudio. Estos son: las dimensiones del terreno que cubrirá la Malla de Puesta a Tierra; y la resistividad del suelo (considerando que se comporta como homogéneo).

• Paso 2:

- Se determina la sección mínima necesaria para que el conductor a utilizar en el sistema de Puesta a Tierra soporte térmicamente la máxima falla posible en la instalación, según la Ecuación 40 de la Norma.

• Paso 3:

- Se determinan las máximas tensiones de contacto y de paso admisibles por las personas, según las Ecuaciones 29-30-32-33 de la Norma.

• Paso 4:

- Se efectúa un diseño preliminar de la Malla de Puesta a Tierra que consta de: un conductor perimetral que rodea el área cubierta por la Malla; y varios conductores cruzados que forman una cuadrícula dentro del área.

• Paso 5:

- Se efectúa un cálculo preliminar de la resistencia del sistema de Puesta a Tierra según la Ecuación 52 de la Norma.

DESARROLLO DEL CALCULO

- **Paso 6:**

- Se determina la máxima corriente que drena por el sistema de Puesta a Tierra (durante una falla monofásica) según la Ecuación 64 de la Norma.

- **Paso 7:**

- Se calcula el Potencial que alcanza la Malla ante una falla (GPR). Si éste resulta inferior a la máxima tensión de contacto admisible no son necesarios más cálculos ya que verifica. Solo faltaría agregar los “chicotes” que conectan las estructuras de los equipos con la Malla de Puesta a Tierra.

- **Paso 8:**

- Se efectúa un cálculo aproximado de las tensiones de contacto y de paso máximas presentes en la estación, según se indican en las Ecuaciones 80-92 de la Norma.

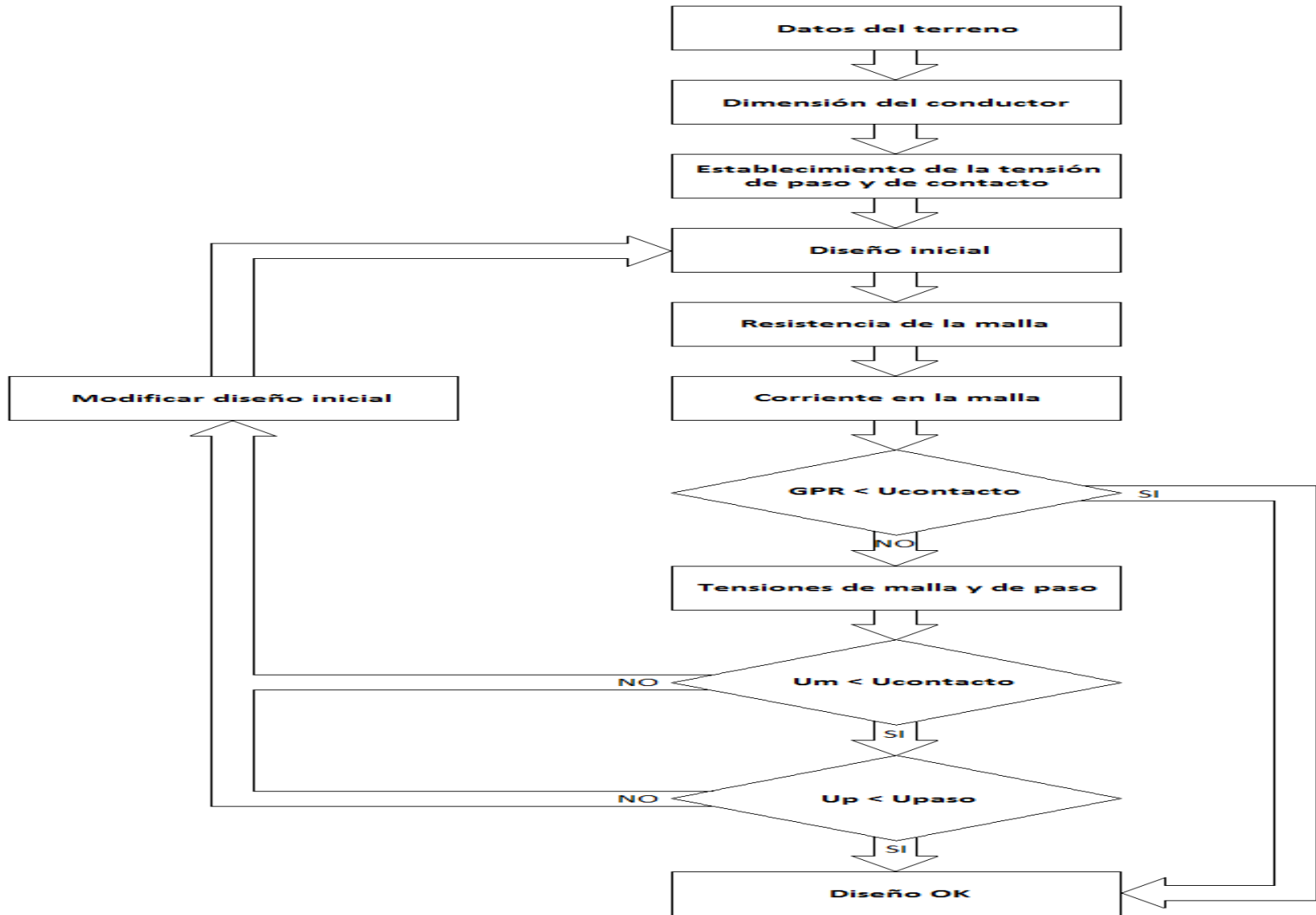
- Paso 9:**

- Si la máxima tensión de malla presente se encuentra por debajo del valor admisible, se considera que el diseño está completo. En caso de no ser así, el diseño preliminar del sistema de Puesta a Tierra deberá ser revisado (ver Paso 11).

DESARROLLO DE CALCULO

- **Paso 10:**
- Si la máxima tensión de paso y de contacto presentes se encuentra por debajo de los valores admisibles, se considera que el diseño está completo. En caso de no ser así, el diseño preliminar del sistema de Puesta a Tierra deberá ser revisado (ver Paso 11).
- **Paso 11:**
- En caso de que los límites de tensión de paso y de contacto sean superados, es necesaria una revisión del sistema de Puesta a Tierra. Para mejorar el comportamiento del sistema se puede: disminuir la distancia entre los conductores cruzados; agregar electrodos verticales; etc. Esto depende de cual sea la mejor solución técnico-económica para cada caso.
- **Paso 12:**
- Luego de obtener valores de tensión de paso y de contacto inferiores a los admisibles se procede a determinar los “chicotes” que serán necesarios para vincular las estructuras de los equipos con la Malla de Puesta a Tierra. También se deberán instalar electrodos profundos en la base de los Descargadores y Transformadores (Neutro).
- A continuación se presenta el diagrama de flujos del método de diseño descrito en los pasos antes desarrollados:

Diagrama de flujo del metodo



DESARROLLO DE CALCULO

- **Paso 1:** Determinación del área cubierta y la resistividad del suelo
- **Paso 2:** Cálculo de la mínima sección del conductor de la Malla de P.A.T.
Ecuación para el cálculo de la sección mínima
- La sección mínima necesaria (por cuestiones térmicas) para el conductor de la Malla de Puesta a Tierra medida en mm^2 , se calcula a partir de la siguiente ecuación:

DESARROLLO DE CALCULO

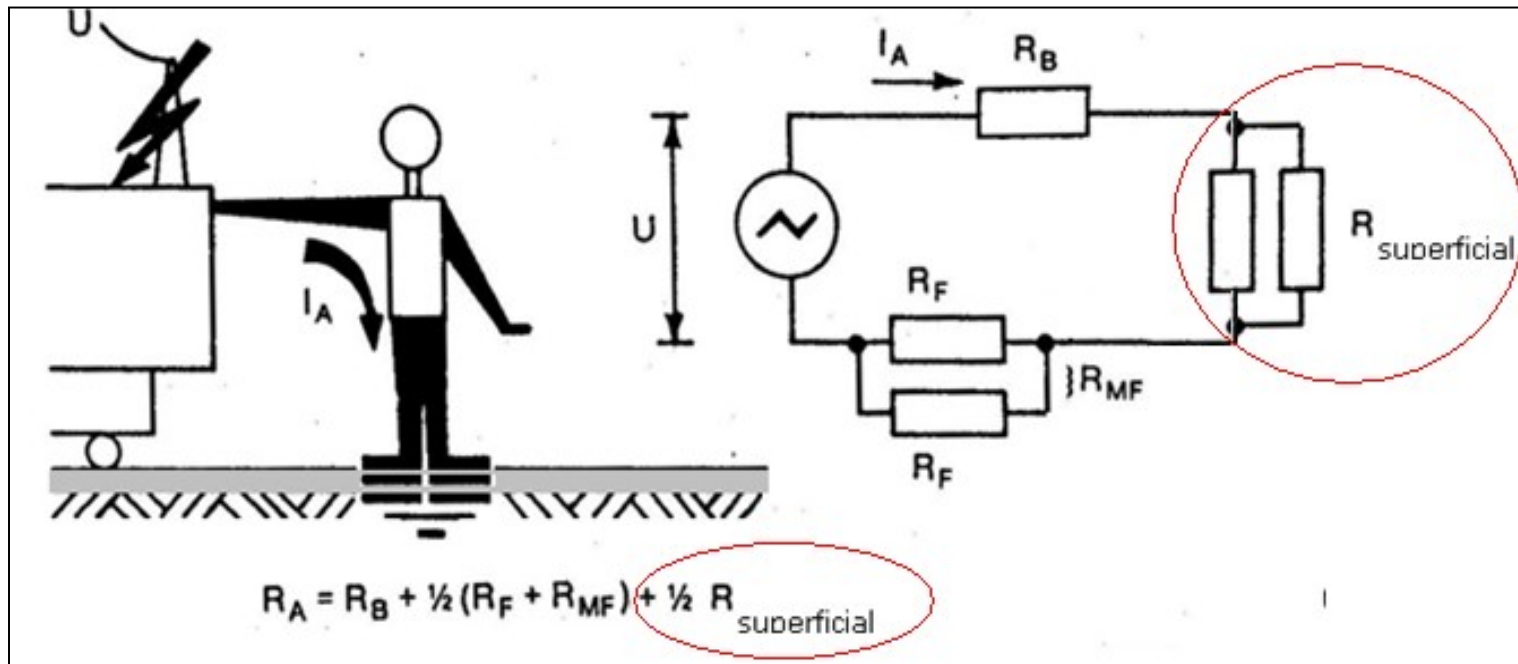
EJEMPLO DE APLICACIÓN

$$A(mm^2) = I \frac{1}{\sqrt{\left(\frac{TCAP \cdot 10^{-4}}{t_c \cdot \alpha_r \cdot \rho_r}\right) \cdot \ln\left(\frac{K_o + T_m}{K_o + T_a}\right)}}$$

- Dónde:
- I es la corriente de cortocircuito trifásica en kA
- TCAP es la capacidad térmica por unidad de volumen (según Tabla 1)
- t_c es la duración de la corriente de falla en segundos
- α_r es el coeficiente térmico de resistividad a una temperatura de referencia t_r en $1/^\circ\text{C}$ (según Tabla 1)
- ρ_r es la resistividad del conductor de la Malla de Puesta a Tierra a una temperatura de referencia t_r en $\Omega\text{-cm}$ (según Tabla 1)
- K_o es la inversa del coeficiente térmico de resistividad a 0°C en $^\circ\text{C}$ (según Tabla 1)
- T_m es la máxima temperatura admisible en $^\circ\text{C}$
- T_a es la temperatura ambiente en $^\circ\text{C}$

PASO 3 TENSIONES PELIGROSAS

Circuito equivalente de **Tensión de Contacto**:



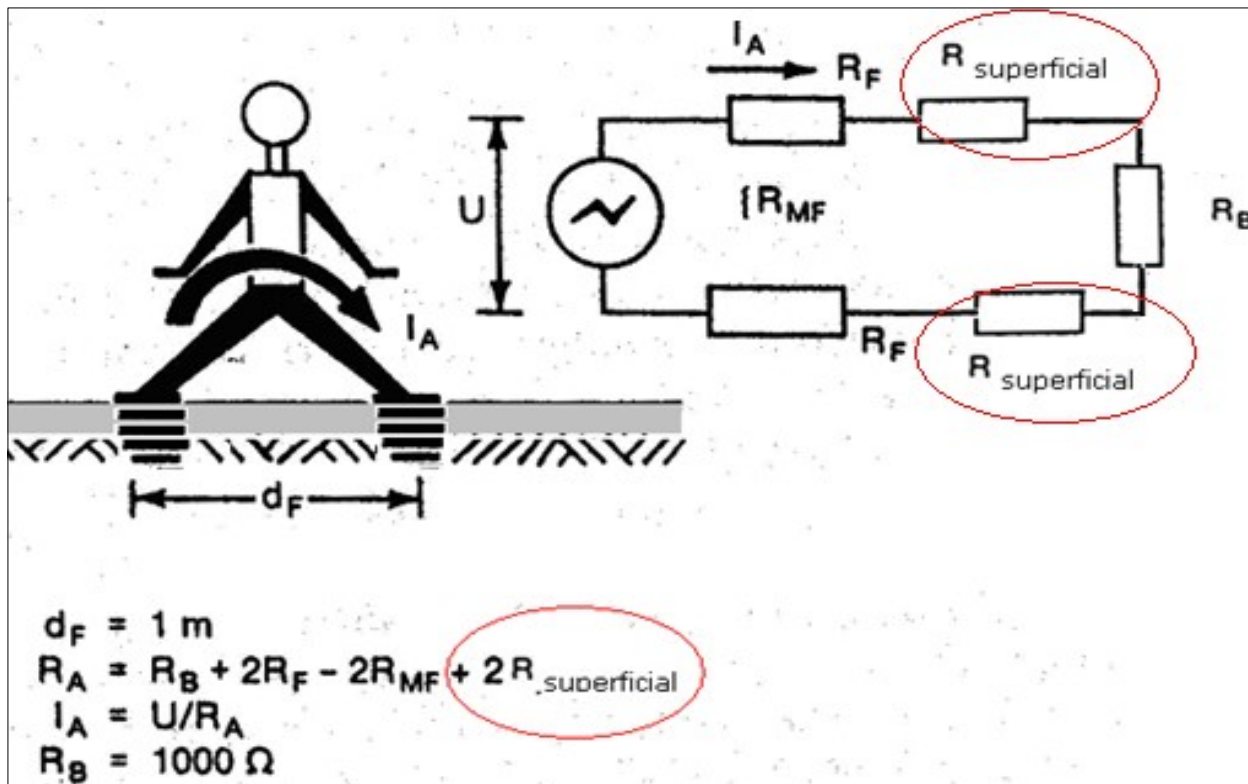
I_A : Corriente del circuito accidental.

R_A : Resistencia total del circuito accidental.

R_B : Resistencia del cuerpo humano, tanto entre mano-ambos pies como mano-mano y pie-pie (se representa con un valor de 1000 ohm.)

R_F : Resistencia de contacto pie-suelo.

Circuito equivalente de Tensión de Paso:



I_A : Corriente del circuito accidental.

R_A : Resistencia total del circuito accidental.

R_B : Resistencia del cuerpo humano, tanto entre mano-ambos pies como mano-mano y pie-pie (se representa con un valor de 1000 ohm.)

R_F : Resistencia de contacto pie-suelo.

DESARROLLO DE CALCULO

- **Paso 3:**

- **Ecuaciones:**

- Tensión de paso admisible

- La tensión de paso admisible para una persona de 50 Kg. de peso se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{step50} = (R_b + 6 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

- Y para el caso de una persona de 70 Kg. se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{step70} = (R_b + 6 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- Tensión de contacto admisible:

$$E_{touch50} = (R_b + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.116}{\sqrt{t_s}}$$

- La tensión de contacto admisible para una persona de 50 Kg. de peso se calcula a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{touch70} = (R_b + 1.5 C_s \rho_s) \frac{0.157}{\sqrt{t_s}}$$

- Y para el caso de una persona de 70 Kg. se calcula a partir de la siguiente ecuación:

DESARROLLO DE CALCULO

Paso 4:

- El diseño preliminar del Sistema de Puesta a Tierra consta de:
 - - Un conductor perimetral que rodea el área cubierta por la Malla
 - - Varios conductores cruzados que forman una cuadrícula dentro del área de la Malla de Puesta a Tierra. Los cuadrados formados tendrán un valor tentativo de 7x7 m, pero se debe modificar el trayecto de algunos conductores debido a que en algunas ocasiones pasan por las bases de los equipos de la estación.. La profundidad de enterrado de la Malla de Puesta a Tierra se realizará entre 0,8 y 1 metro.
 - - electrodos profundos (jabalinas superan los 6 metros de profundidad) cercano a cada transformador para asegurar que el neutro del mismo este rígidamente puesto a tierra.

Paso 5:

- ***Ecuación para el cálculo de la Resistencia de Puesta a Tierra***
- El valor aproximado de la resistencia del sistema de Puesta a Tierra se puede calcular mediante la siguiente expresión:

DESARROLLO DE CALCULO

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Dónde:
- R_b : es la resistencia del cuerpo humano medida en Ω
- C_s : es el factor que evalúa el efecto de una capa superficial
- ρ_s : es la resistividad del material de la capa superficial medida en $\Omega.m$
- t_s : es la duración de la corriente de falla medida en segundos
- **Datos:**
- El IEEE Std. 80-2000 asume una resistencia del cuerpo humano (R_b) de 1000Ω .
- No se considera una capa superficial en la estación, es decir, se considera que la resistividad del suelo es homogénea, por lo tanto:
- $C_s = 1$ y $\rho_s = \rho$
- Por último, se considera como máximo tiempo de actuación de las protecciones (máximo tiempo de duración de la falla) 0,5 segundo (t_s).

DESARROLLO DE CALCULO

EJEMPLO DE APLICACION

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

- R_g : es la resistencia del Sistema de Puesta a Tierra medida en Ω
- ρ : es la resistividad del suelo medida en $\Omega.m$
- L_T : es la longitud total de los conductores medida en metros
- A : es el área cubierta por la Malla de Puesta a Tierra medida en m^2
- h : es la profundidad de la Malla medida en metros

DESARROLLO DEL CALCULO

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- **Paso 6:**

- ***Ecuación para la máxima corriente que drena por el sistema de Puesta a Tierra***

- Se debe calcular que parte de la corriente de falla producida efectivamente drena a tierra (I_G), ya que el sistema de Puesta a Tierra se encuentra vinculado galvánicamente con los hilos de guardia de las líneas que llegan a la estación, y por lo tanto, el resto de la corriente de falla se deriva por los mismos. Además, se debe tener en cuenta el efecto de la componente de corriente continua en la falla mediante un factor de decremento (D_f) que depende de la relación X/R del sistema. Para calcular esta corriente I_G se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$I_g = S_f \cdot I_f$$

$$I_G = D_f \cdot I_g$$

- Dónde:

- I_f : es la máxima corriente de falla medida en A
- S_f : es factor de división de la corriente de falla (adimensional)
- I_g : es la máxima corriente simétrica de Malla medida en A
- D_f : es el factor de decremento
- I_G : es la máxima corriente de Malla medida en A
-

2.1.1 Corriente máxima a disipar por la malla (I_G):

El valor máximo de diseño de la corriente de falla a tierra que fluye a través de la malla de la subestación hasta la tierra circundante está dado por:

$$I_G = I_F * D_f * S_f * C_p \quad (10)$$

Donde:

$I_F = 3I_O \rightarrow$ Corriente simétrica de falla a tierra en A.

$D_f \rightarrow$ Factor de decremento para tener en cuenta la componente DC.

$S_f \rightarrow$ Factor de división de corriente.

$C_p \rightarrow$ Factor de crecimiento futuro de la subestación, considera el incremento futuro de la corriente de falla.

2.1.2 Corriente simétrica de falla a tierra (I_F)

Por razones prácticas, se recomienda hallar los siguientes tipos de falla:

a) Falla línea – línea – tierra, ignorando la resistencia de la falla y la resistencia de puesta a tierra de la subestación:

$$(I_F)_{L-L-T} = 3.I_O = \frac{3.E.Z_2}{Z_1.(Z_O + Z_2) + Z_2.Z_O} \quad (11)$$

2.1.3 Factor de decremento (D_f)

En el diseño de la malla a tierra, se debe considerar la corriente asimétrica de falla, la cual resulta de multiplicar la corriente simétrica de falla por el factor de decremento, que a su vez está dado por:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_a}{t_f} \left(1 - e^{-\frac{2t_f}{T_a}}\right)} \quad (13)$$

Donde:

$t_f \rightarrow$ Duración de la falla en s.

$T_a \rightarrow$ Constante de tiempo de la componente DC.

$$T_a = \frac{X}{\omega R} = \frac{X}{R} * \frac{1}{2\pi f} \quad (14)$$

$X, R \rightarrow$ Componentes de la impedancia subtransitoria de falla que se usan para determinar la relación X/R .

2.1.4 Factor de crecimiento (C_p)

Si la malla de puesta a tierra se construye teniendo en cuenta la capacidad total de la subestación, y no se consideran aumentos futuros de carga ni de alimentadores, $C_p = 1$.

2.2 Cálculo del factor de división de corriente (S_f)

El proceso del cálculo consiste en derivar una representación equivalente de los cables de guarda, neutros, etc. Esto es, conectarlos a la malla en la subestación y luego resolver el equivalente para determinar qué fracción de la corriente total de falla fluye entre la malla y la tierra circundante, y qué fracción fluye a través de los cables de guarda o neutros, hacia las tierras de los pie de torres que entran y sacan líneas de la subestación. S_f depende de:

DESARROLLO DE CALCULO

EJMPLO DE APLICACIÓN

- **Paso 7:**

- Se define el Potencial que alcanza la Malla ante una falla (GPR) como el producto entre la máxima corriente de falla que drena a tierra (I_G) y la resistencia de Puesta a Tierra:

$$GPR = I_G \times R_g$$

- **Paso 8:**

- ***Ecuaciones:***

- **Tensión de Malla:**

- El valor de la tensión de Malla, generado ante una falla en la estación, se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

DESARROLLO DE CALCULO

EJMPLO DE APLICACIÓN

$$E_m = \frac{\rho \times K_m \times K_i \times I_G}{L_M}$$

- Dónde:
- ρ : es la resistividad del suelo medida en $\Omega.m$
- I_G : es la máxima corriente de Malla medida en A
- K_m : es el factor de geometría (adimensional)
- K_i : es el factor de corrección (adimensional)
- L_M : es la longitud efectiva del conductor para la tensión de Malla en metros
- Además;

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

DESARROLLO DE CALCULO EJEMPLO DE APLICACIÓN

$$K_{ii} = \frac{1}{(2 \times n)^{\frac{2}{n}}} \quad K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} \quad K_i = 0.644 + 0.148 n \quad L_M = L_C + L_R$$

- Dónde:
- D: es la distancia entre conductores paralelos medida en metros
- d: es el diámetro del conductor de la Malla medido en metros
- h: es la profundidad de la Malla medida en metros
- h₀: es la profundidad de enterramiento de referencia medida en metros
- L_R: es la longitud total de las jabalinas instaladas medida en metros
- n: es un factor geométrico, y se calcula de la siguiente manera:

$$n = n_a \times n_b \times n_c \times n_d$$

$$n_a = \frac{2 L_C}{L_P}$$

$$n_b = \sqrt{\frac{L_P}{4 \sqrt{A}}}$$

$$n_c = \left(\frac{L_x \times L_y}{A} \right)^{\frac{0.7 \times A}{L_x \times L_y}}$$

$$n_d = \frac{D_m}{\sqrt{L_x^2 + L_y^2}}$$

DESARROLLO DE CALCULO

EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Dónde:
- A: es el área cubierta por la Malla de Puesta a Tierra medida en m²
- L_C: es la longitud total de los conductores de la Malla medida en metros
- L_P: es la longitud total del conductor perimetral de la Malla medida en metros
- L_x: es la máxima longitud de la Malla en la dirección “x” medida en metros
- L_y: es la máxima longitud de la Malla en la dirección “y” medida en metros
- D_m: es la máxima longitud entre dos puntos de la Malla medida en metros
- **Tensión de Paso:**
- El valor de la tensión de Paso, generado ante una falla en la estación, se puede obtener mediante la siguiente ecuación:

$$E_s = \frac{I_g \times R_s \times K_f \times L_C}{L_s}$$

DESARROLLO DE CALCULO EJEMPLO DE APLICACIÓN

- Dónde:
- ρ : es la resistividad del suelo medida en $\Omega.m$
- I_G : es la máxima corriente de Malla medida en A
- K_s : es el factor de geometría (adimensional)
- K_i : es el factor de corrección (adimensional)
- L_s : es la longitud efectiva del conductor para la tensión de

Paso en metros

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

$$L_s = 0.75 \times L_C + 0.85 \times L_R$$

DESARROLLO DE CALCULO DEL EJEMPLO

- **Desarrollo del cálculo:**

- a) Tensión de Malla:

- b) Tensión de Paso:

- Paso 9:**

- Se debe verificar que el valor de la Tensión de Malla se encuentre por debajo de la máxima Tensión de Contacto admisible:

- Paso 10:**

- Se debe verificar que el valor de la Tensión de Paso se encuentre por debajo de la máxima Tensión de Paso admisible:

- **Paso 11:**

- Debido a que el diseño original verifica las exigencias requeridas de los Pasos 9 y 10, no resulta necesario efectuar ninguna modificación al mismo.

- Paso 12:**

- Por último; los “chicotes” que serán necesarios para vincular las estructuras de los equipos con la Malla de Puesta a Tierra, y los electrodos profundos en la base de los Transformadores (Neutro) se encuentran indicados en el Plano N° xxxx.