

# PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN

## Parte 7 – Ejemplo de cálculo

FERNANDO BERRUTTI

AÑO 2015

# Datos de diseño

2

CALCULO DE LA MALLA SUPONIENDO FALTA 1FT  
**DENTRO** DE LA ESTACION.

- Caso típico de una instalación industrial.
- No es aplicable a una red de distribución pública.

▶ Transformador 115/13.8kV – Dyn

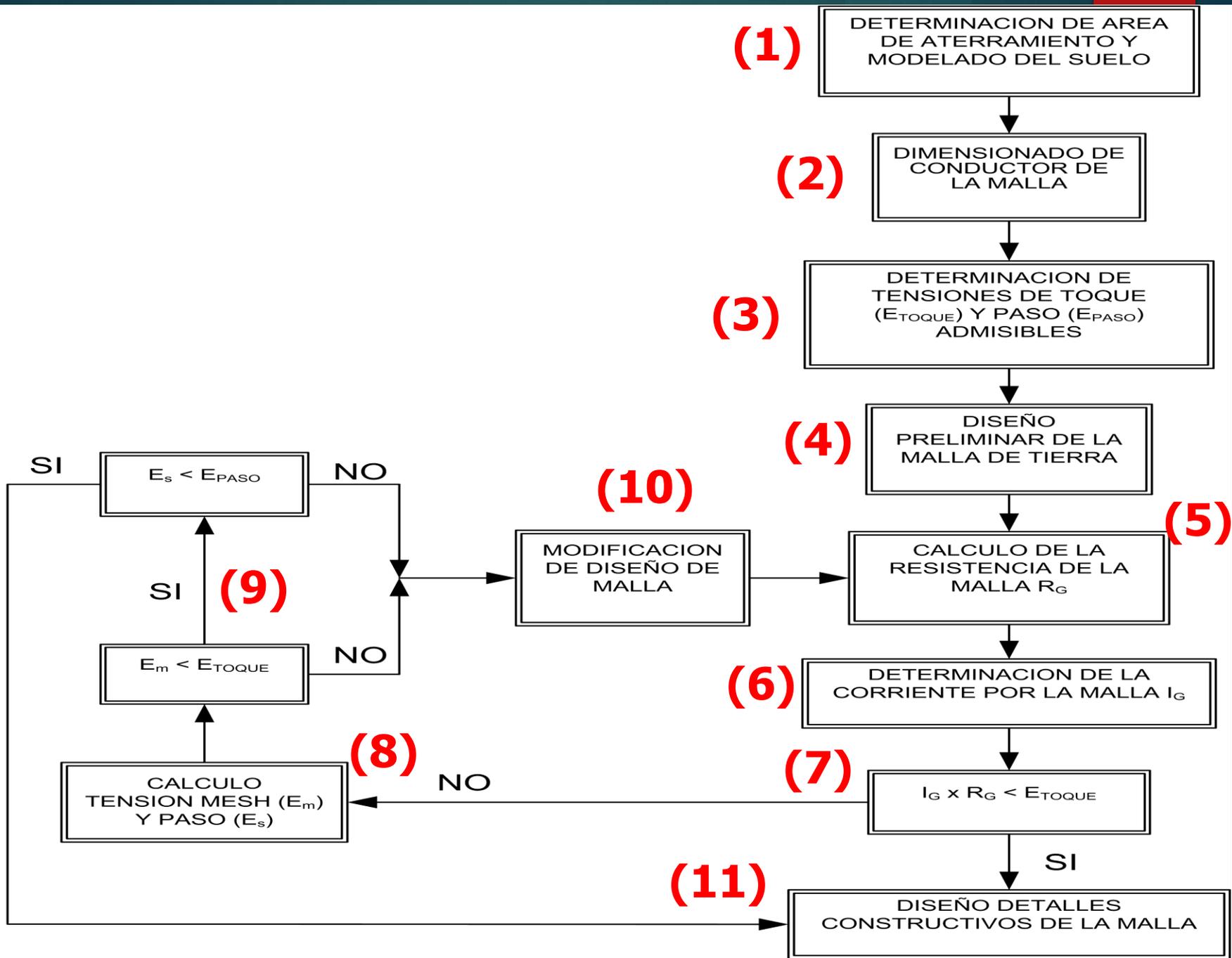
▶  $Z_1 = Z_2 = 4 + 10j \Omega$  (115kV)

▶  $Z_0 = 10 + 40j \Omega$  (115kV)

▶  $Z_{TR} (13kV) = 0.034 + 1.014 j \Omega$

# Datos de diseño

- ▶  $t_f = 0.5 \text{ seg.}$
- ▶  $S_f = 0.6$
- ▶  $\rho = 400 \text{ } \Omega.\text{m}$
- ▶  $\rho_s = 2500 \text{ } \Omega.\text{m}$
- ▶  $h_s = 10 \text{ cm}$
- ▶  $h = 50 \text{ cm}$
- ▶  $A = 70 \times 70 \text{ m}$
- ▶  $T_a = 40^\circ\text{C}$

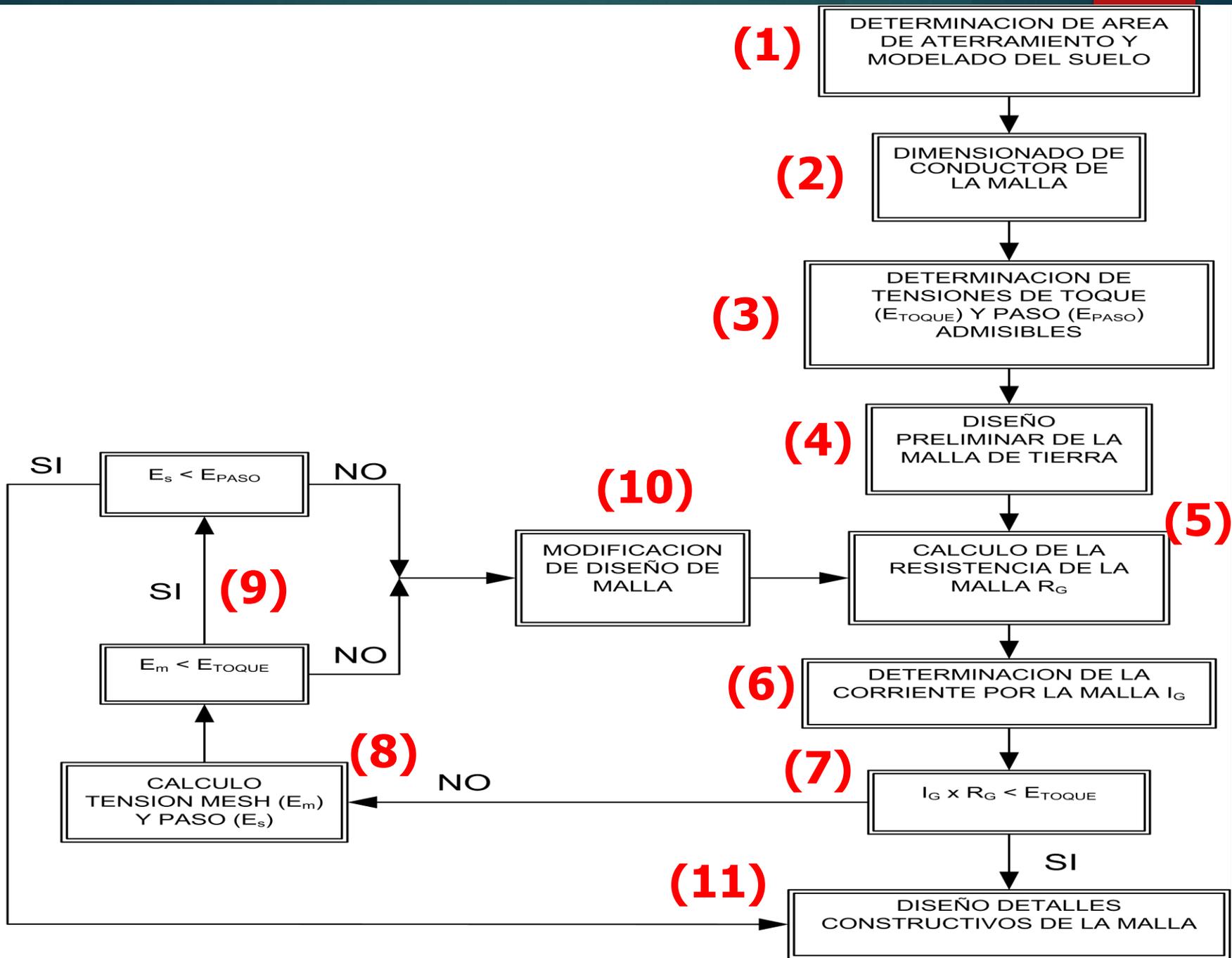


# Desarrollo de los cálculos

5

- ▶ **Primer punto:** modelado del terreno.
- ▶  $\rho = 400 \Omega.m$
- ▶  $A = 70 \times 70m$

En un caso genérico habría que hacer el análisis de datos a partir del método de Wenner.



# Desarrollo de los cálculos

- ▶ **Segundo punto:** dimensionado de los conductores de la malla de tierra.

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c a_r \rho_r 10^4}{\text{TCAP}}}{\text{Ln} \left[ 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

- ▶ Se debe calcular la corriente de cortocircuito máximo para determinar la sección de conductor.

# Desarrollo de los cálculos

- ▶ Cálculo de cortocircuito en 115kV:

$$I_{FT} = \frac{3E}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{3 \times 115 / \sqrt{3}}{(4 + 4 + 10) + j(10 + 10 + 40)} = 3180A$$

X/R = 3.33

- ▶ Cálculo de cortocircuito en 13kV:

$$I_{FT} = \frac{3E}{\bar{Z}_1 + \bar{Z}_2 + \bar{Z}_0} = \frac{3 \times 13 / \sqrt{3}}{(2 \times 0.085 + 0.034) + j(2 \times 1.142 + 1.014)} = 6814A$$

X/R = 16.2

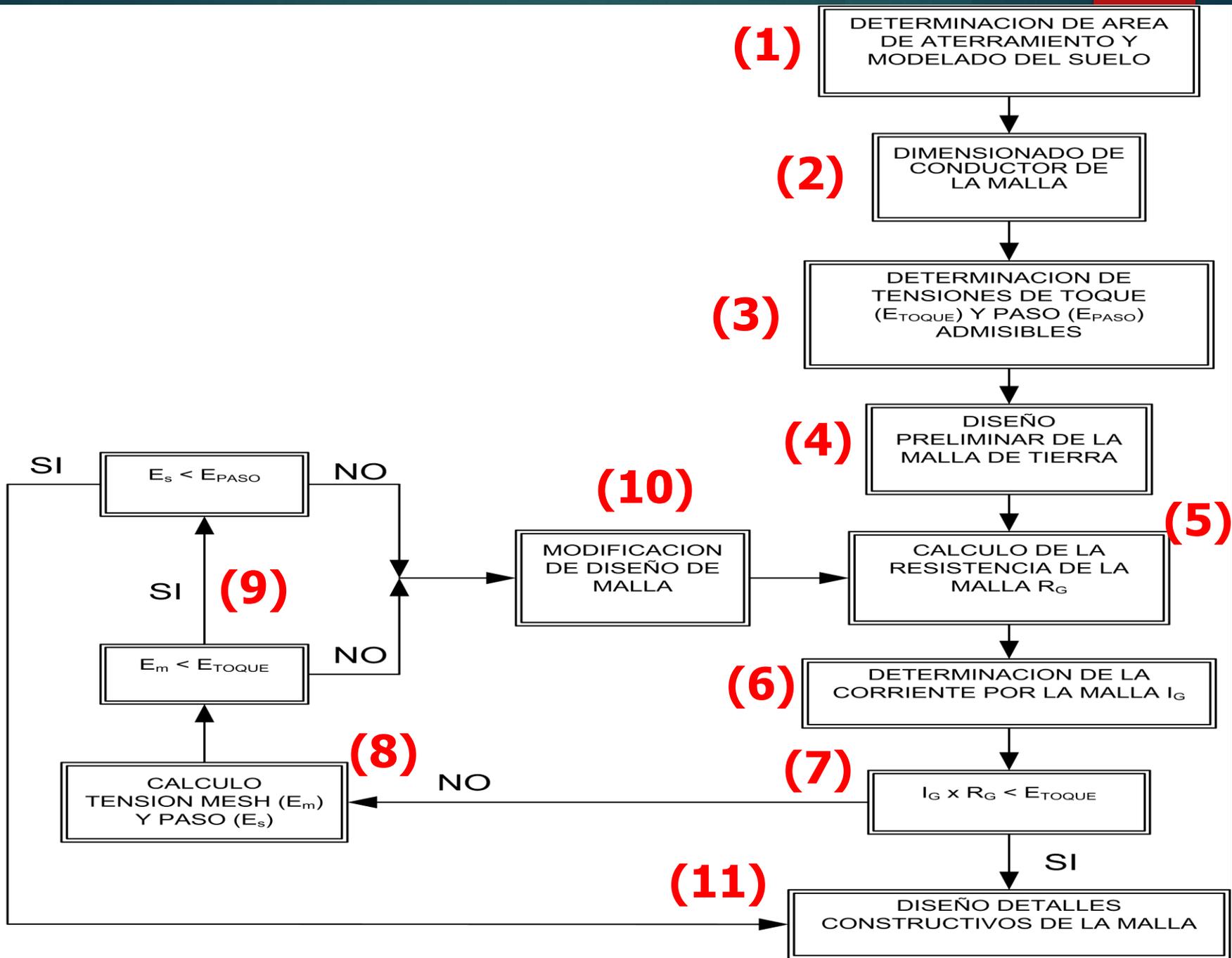
# Desarrollo de los cálculos

9

- ▶ **Segundo punto:** dimensionado de los conductores de la malla de tierra.

$$A_{\text{mm}^2} = I \sqrt{\frac{\frac{t_c a_r \rho_r 10^4}{\text{TCAP}}}{\text{Ln} \left[ 1 + \left( \frac{T_m - T_a}{K_0 + T_a} \right) \right]}}$$

- ▶ Se toma el peor cortocircuito:  $I = 6814\text{A}$ .
- ▶ Tomando  $T_m = 700^\circ\text{C}$ .
- ▶  $A > 33.4 \text{ mm}^2 \rightarrow$  Conductor  $50\text{mm}^2$ .



# Desarrollo de los cálculos

11

- ▶ **Tercer punto:** cálculo de corrientes admisibles.

$$C_s \approx 1 - \frac{0.09 \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09}$$

$$E_{\text{toque\_adm}} = (1000 + 1.5C_s\rho_s) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{\text{paso\_adm}} = (1000 + 6C_s\rho_s) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

k = 0.116 peso 50kg

k = 0.157 peso 70kg

# Desarrollo de los cálculos

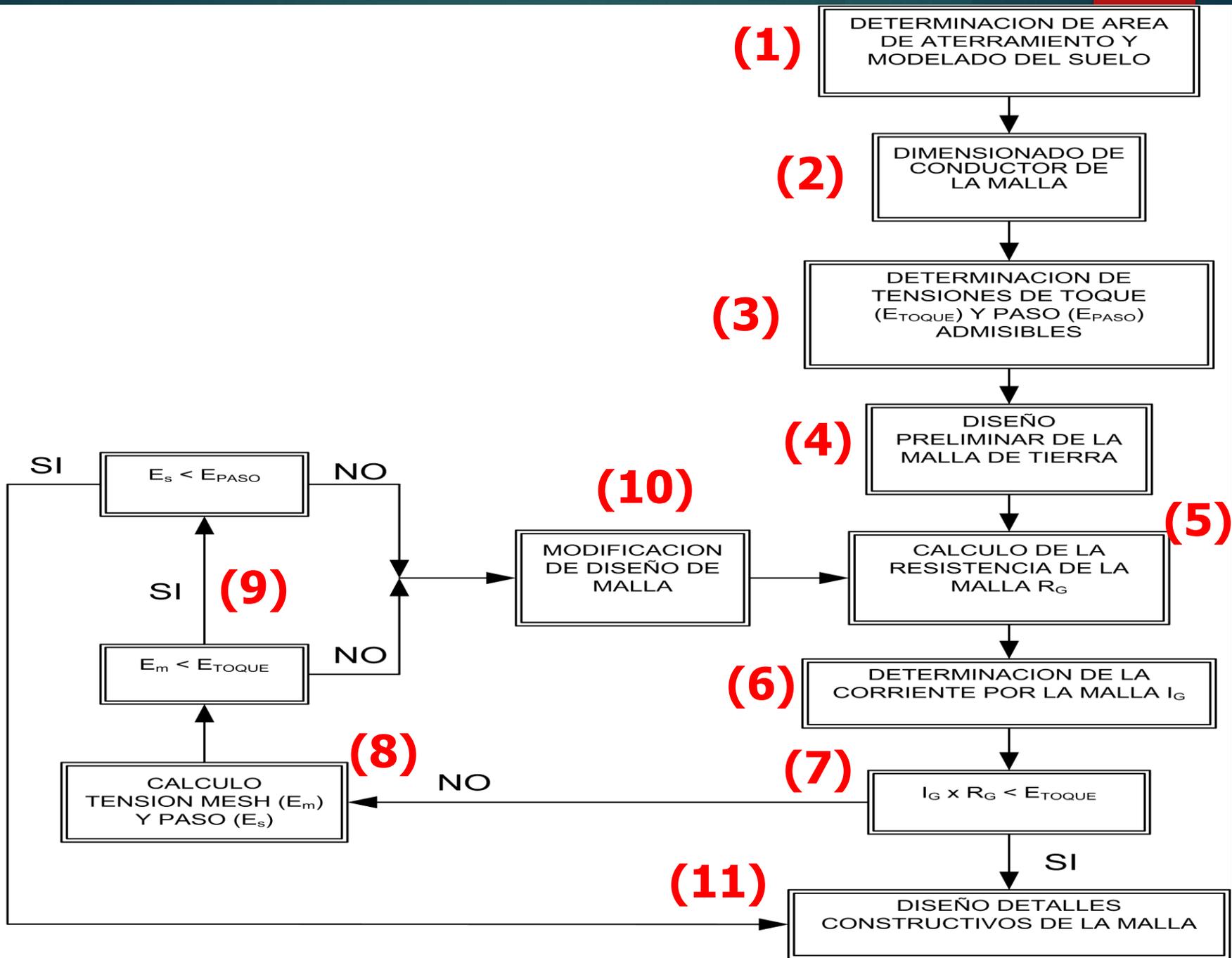
12

- ▶ **Tercer punto:** cálculo de corrientes admisibles. Ejemplo con 70kg, k=0.157.

$$C_s \approx 1 - \frac{0.09 \times \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right)}{2h_s + 0.09} = 1 - \frac{0.09 \times \left(1 - \frac{400}{2500}\right)}{2 \times 0.10 + 0.09} = 0.74$$

$$E_{\text{toque\_adm}} = (1000 + 1.5 C_s \rho_s) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}} = 838V$$

$$E_{\text{paso\_adm}} = (1000 + 6 C_s \rho_s) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}} = 2687V$$

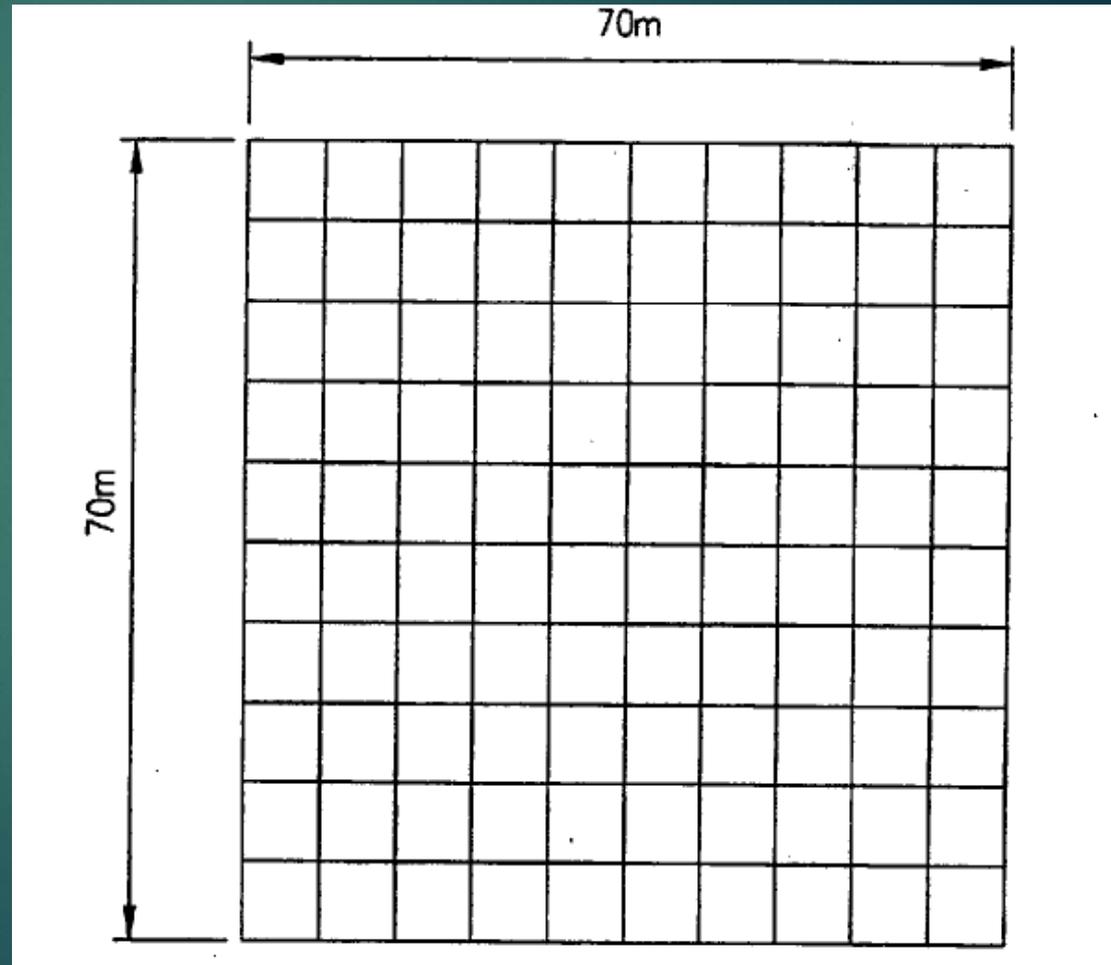


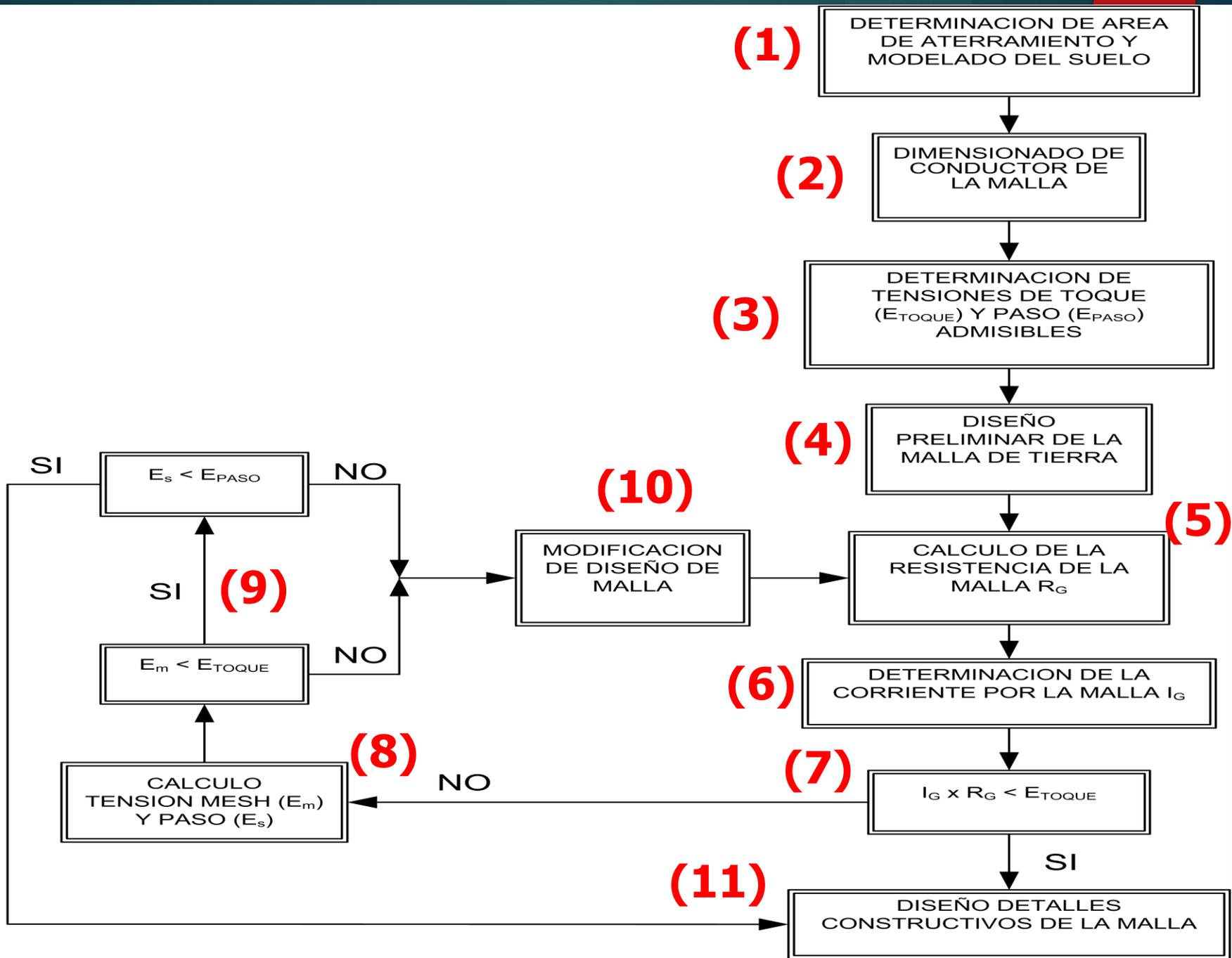
# Desarrollo de los cálculos

14

▶ **Cuarto punto:** diseño físico de la malla

- ▶ Malla 70m x 70m.
- ▶  $D=7m$
- ▶ Sin jabalinas.





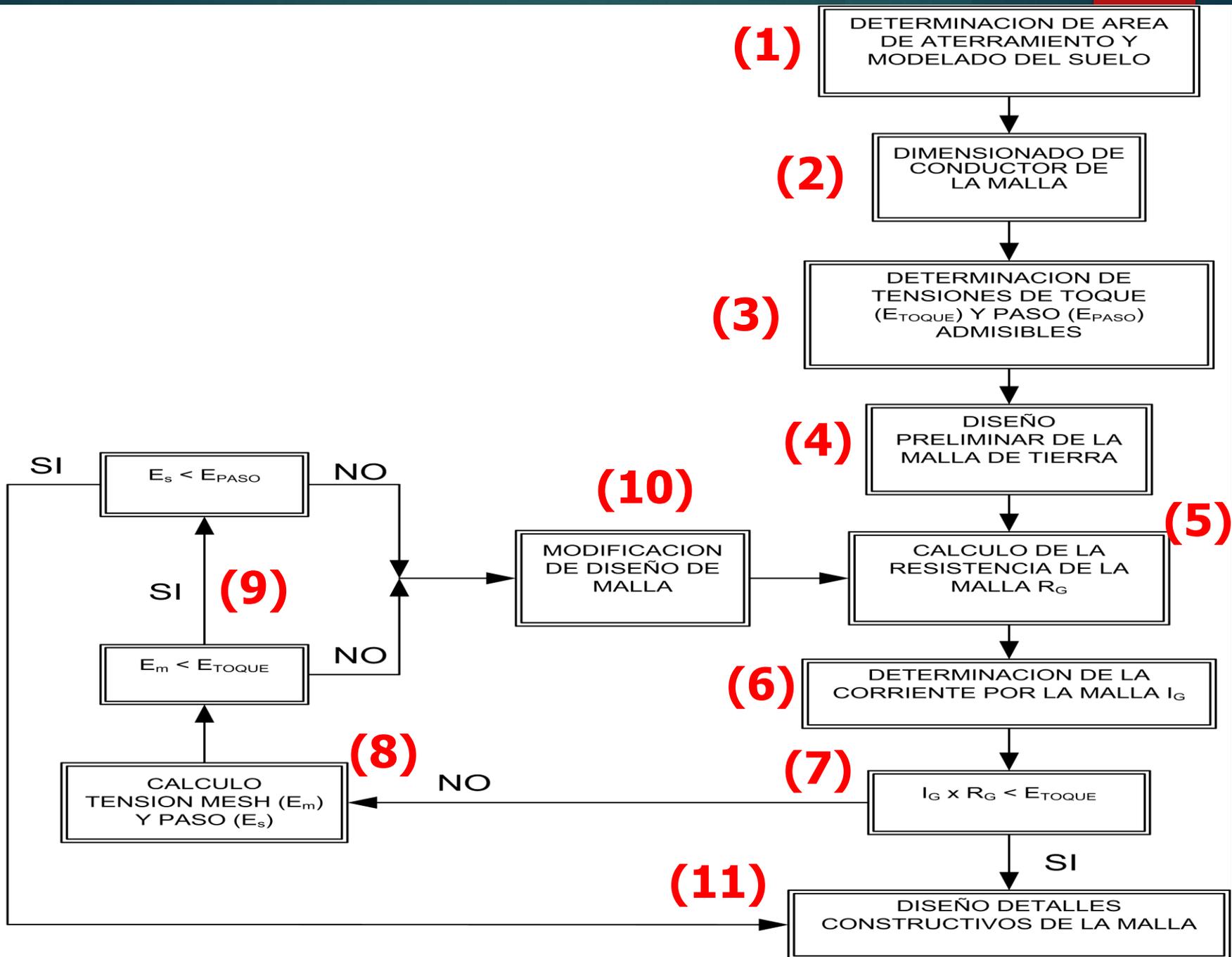
# Desarrollo de los cálculos

16

## ▶ Quinto paso: Cálculo resistencia

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] = 2.78\Omega$$

- ▶  $\rho = 400 \Omega.m$
- ▶  $h = 0.50 \text{ m}$
- ▶  $A = 70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$
- ▶  $L = 1540 \text{ m}$



# Desarrollo de los cálculos

18

## ► Sexto punto:

### Cálculo de corriente por la malla $I_G$ .

Cortocircuito en 13kV: 6814A.

Cortocircuito en 115kV: 3180A.

- En este caso se toma 3180 A ya que se supone que la falla se produce dentro de la estación:

$$I_G = C_p \times S_f \times D_f \times I_f = 1 \times 1 \times 0.6 \times 3180 = 1908A$$

# Desarrollo de los cálculos

19

## ► Séptimo punto: Cálculo de GPR.

$$\text{GPR} = R_g \times I_G < E_{\text{toque\_adm}}$$

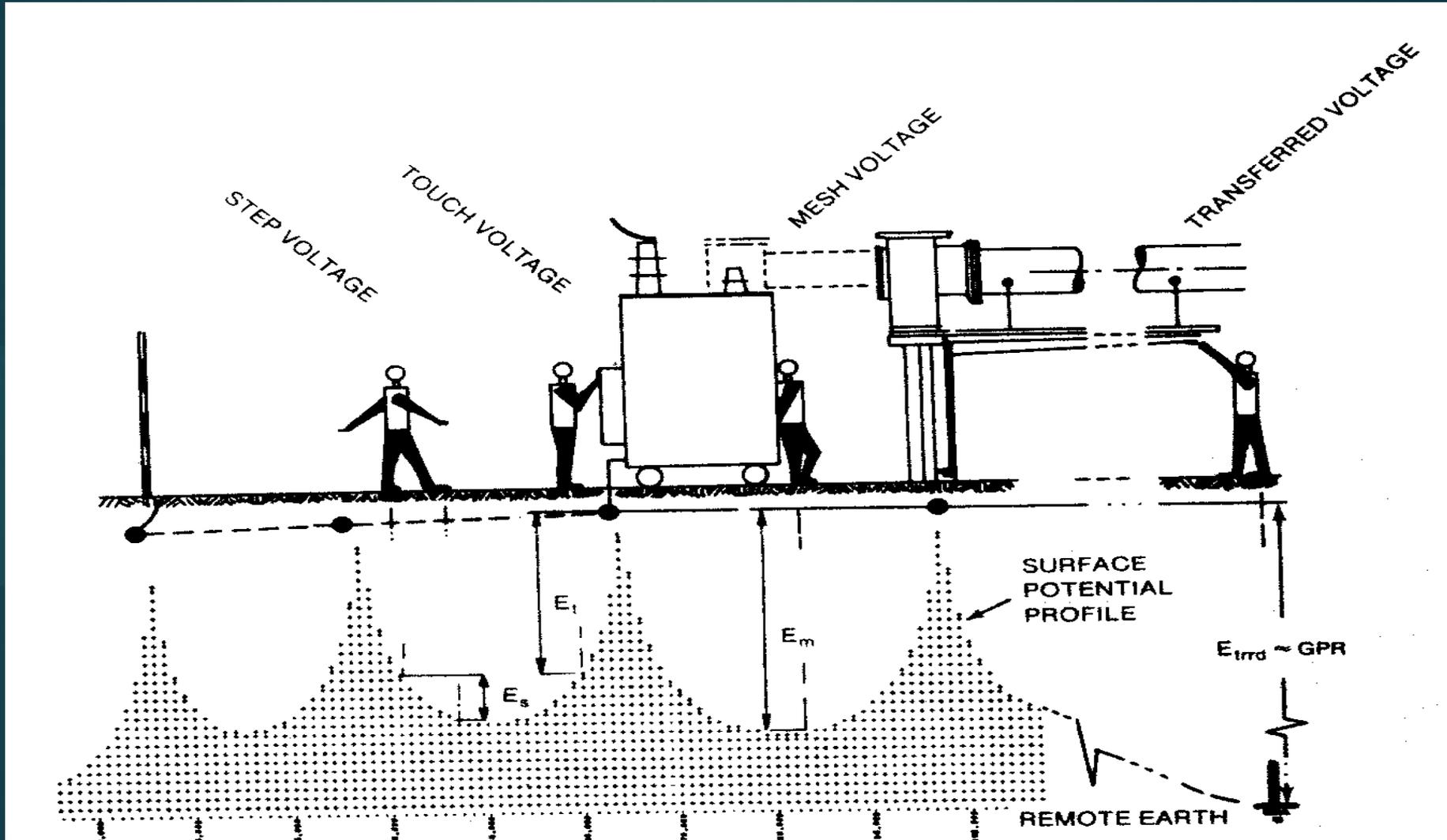
$$\text{GPR} = 2.78 \times 1908 = 5304\text{V}$$

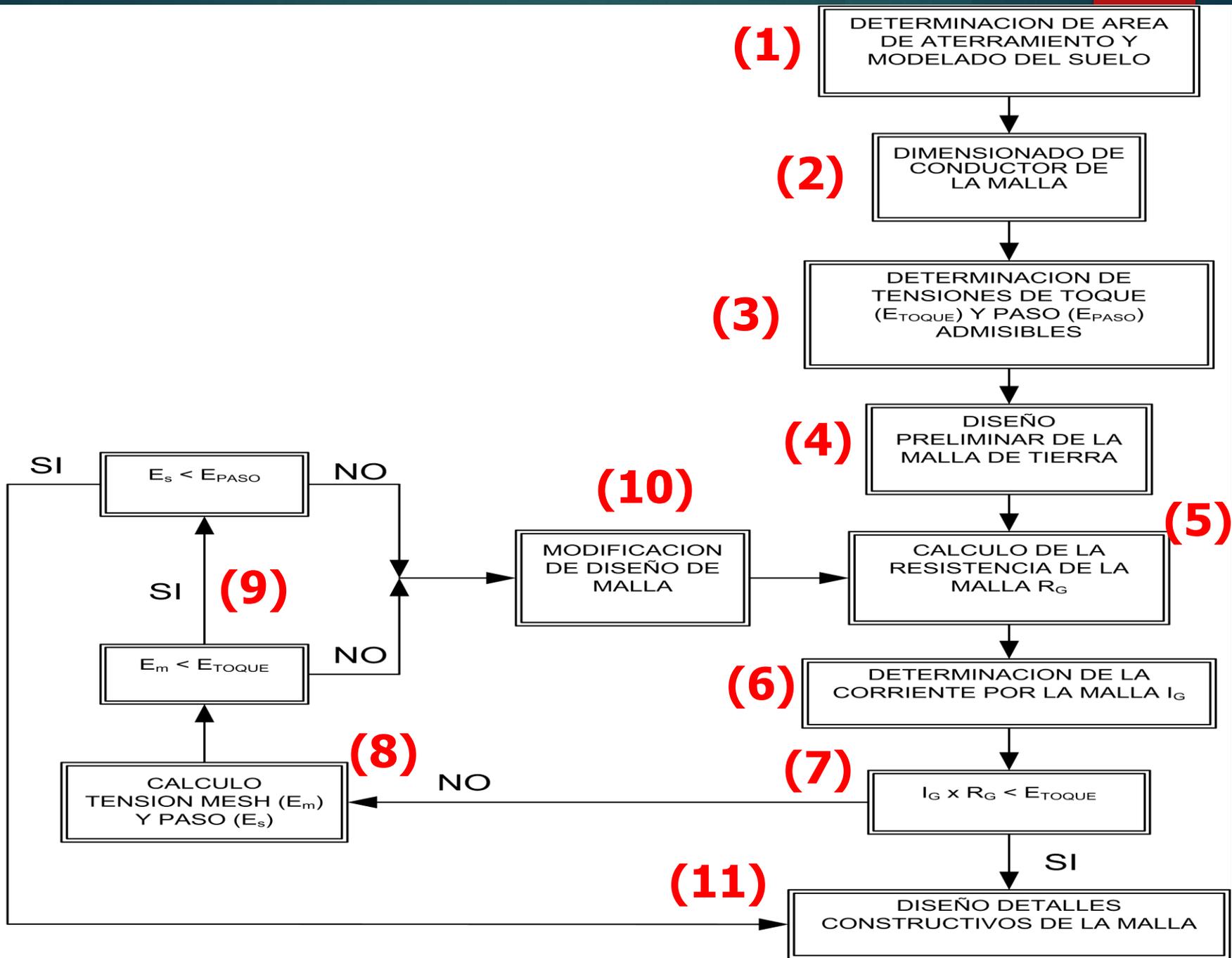
$$E_{\text{toque\_adm}} = 838\text{V}$$

- No se cumple la desigualdad, por lo tanto, habrá que evaluar los máximos gradientes de potencial en la malla.

# Gradientes de potencial

20





# Evaluación de tensiones de paso y toque.

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} < E_{\text{toque\_max}} = 838V$$

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S} < E_{\text{paso\_max}} = 2687V$$

# Tensión de toque

23

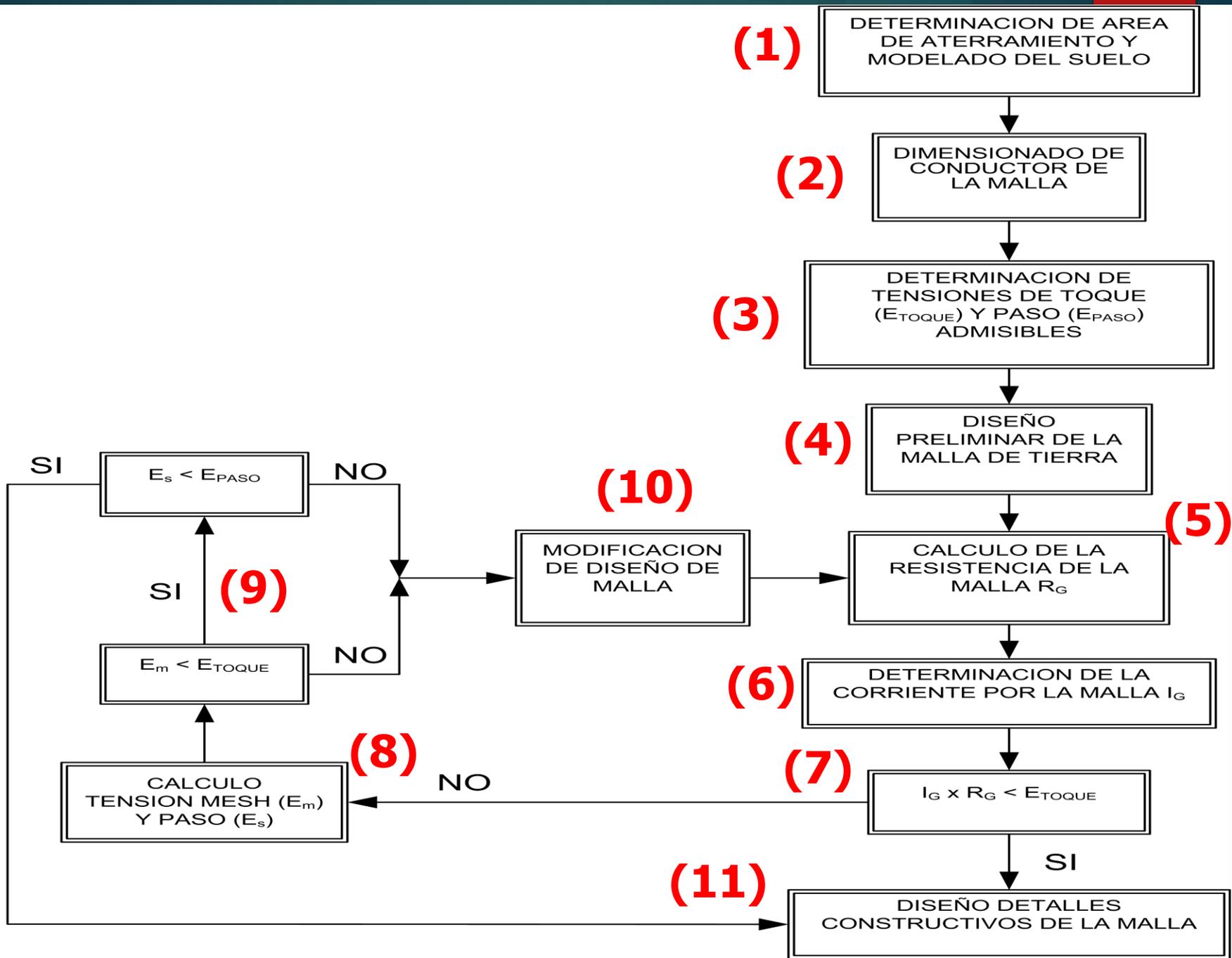
$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} = \frac{400 \times 0.89 \times 2.272 \times 1908}{1540} = 1002V$$

$$E_{\text{toque\_adm}} = 838V$$

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \left[ \text{Ln} \left( \frac{D^2}{16hd} + \frac{(D+2h)^2}{8Dd} - \frac{h}{4d} \right) + \frac{K_{ii}}{K_h} \text{Ln} \frac{8}{\pi(2n-1)} \right] \approx 0.89$$

$$K_i = 0.644 + 0.148 \times n = 2.272$$

$$K_{ii} = \frac{1}{(2n)^{2/n}} = 0.57 \quad K_h = \sqrt{1 + \frac{h}{h_0}} = 1.225$$



# Replanteo de la malla

25

- ▶ **Décimo paso:** Modificación del diseño
- ▶ No se cumple el criterio de toque.
- ▶ Medidas a tomar:
  - ▶ Reducir corriente de falla.
  - ▶ Reducir tiempo de protecciones.
  - ▶ Redimensionar la malla de tierra.

# Desarrollo de los cálculos

26

- ▶ **Cuarto punto:** diseño físico de la malla
- ▶ Malla 70x70m.
- ▶  $D=7m$
- ▶ 20 Jabalinas en el perímetro.

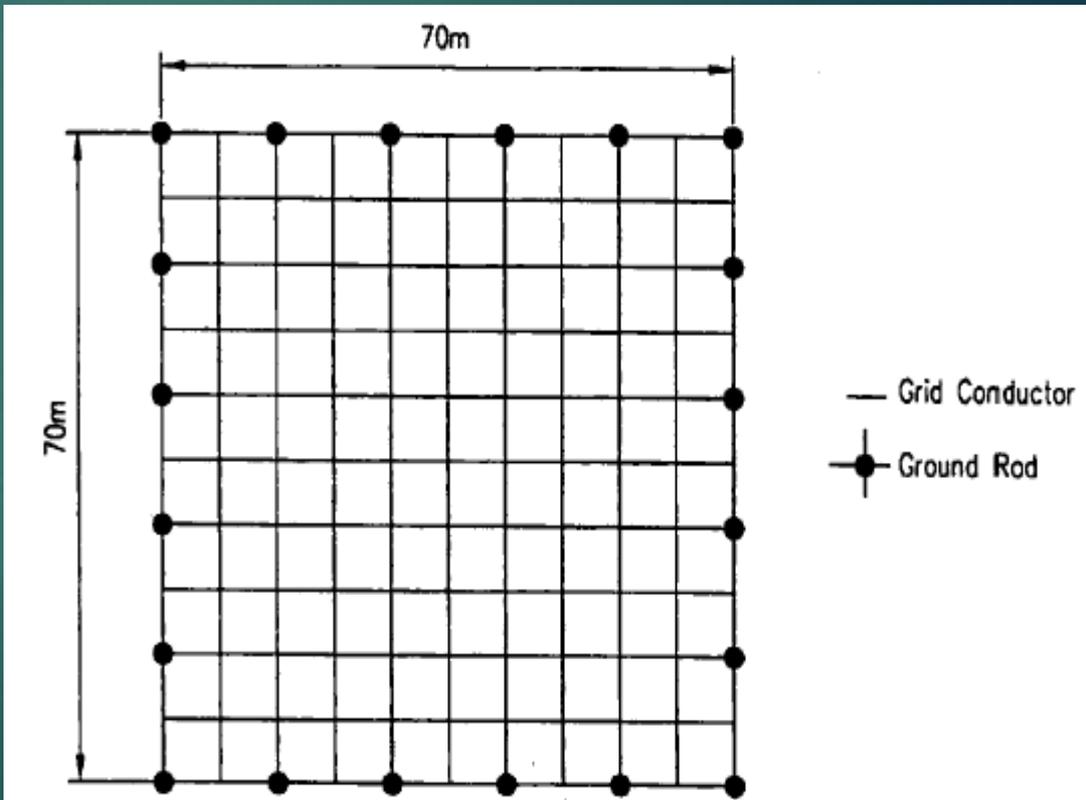
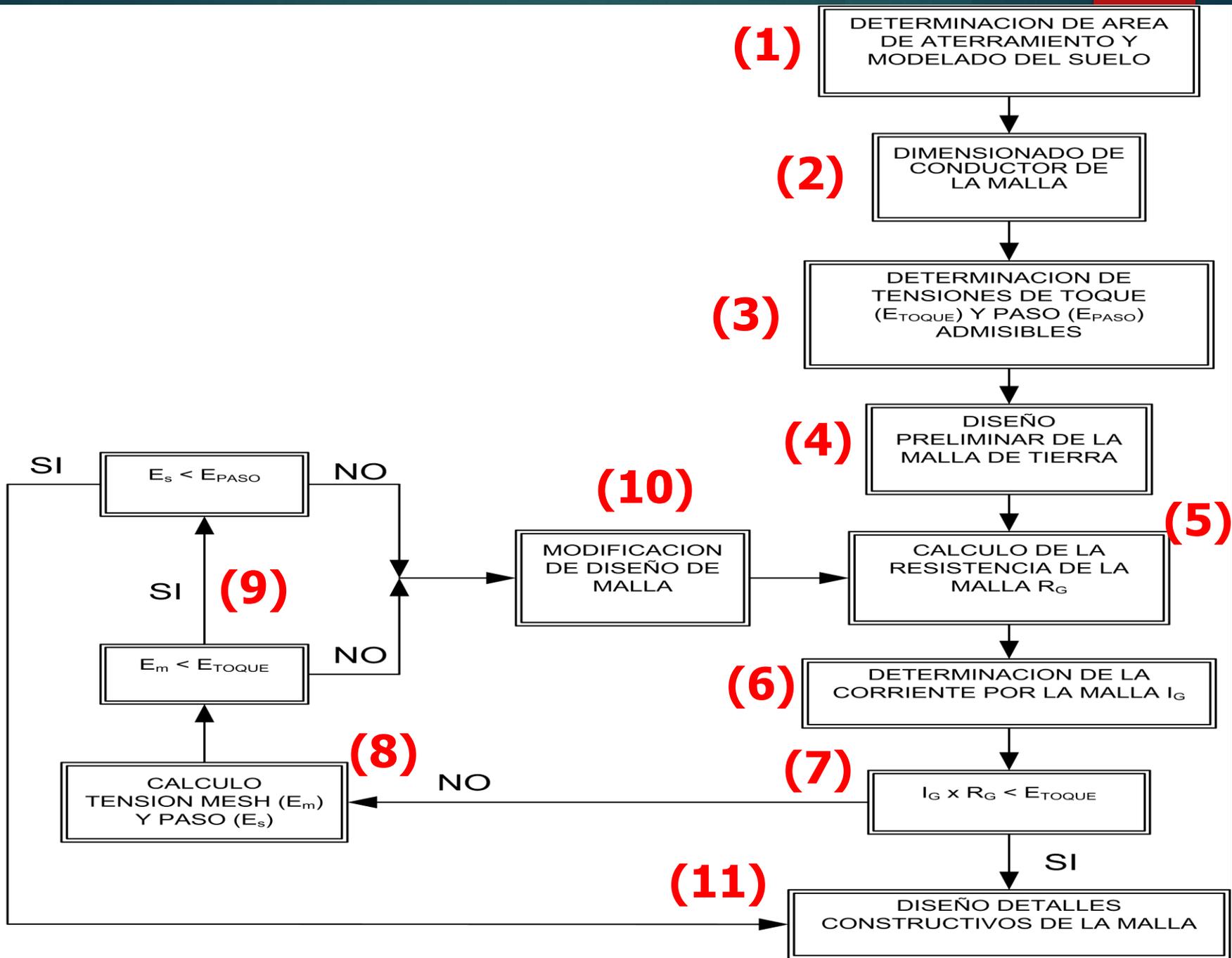


Figure B.2—Square grid with 20 7.5 m rods



# Desarrollo de los cálculos

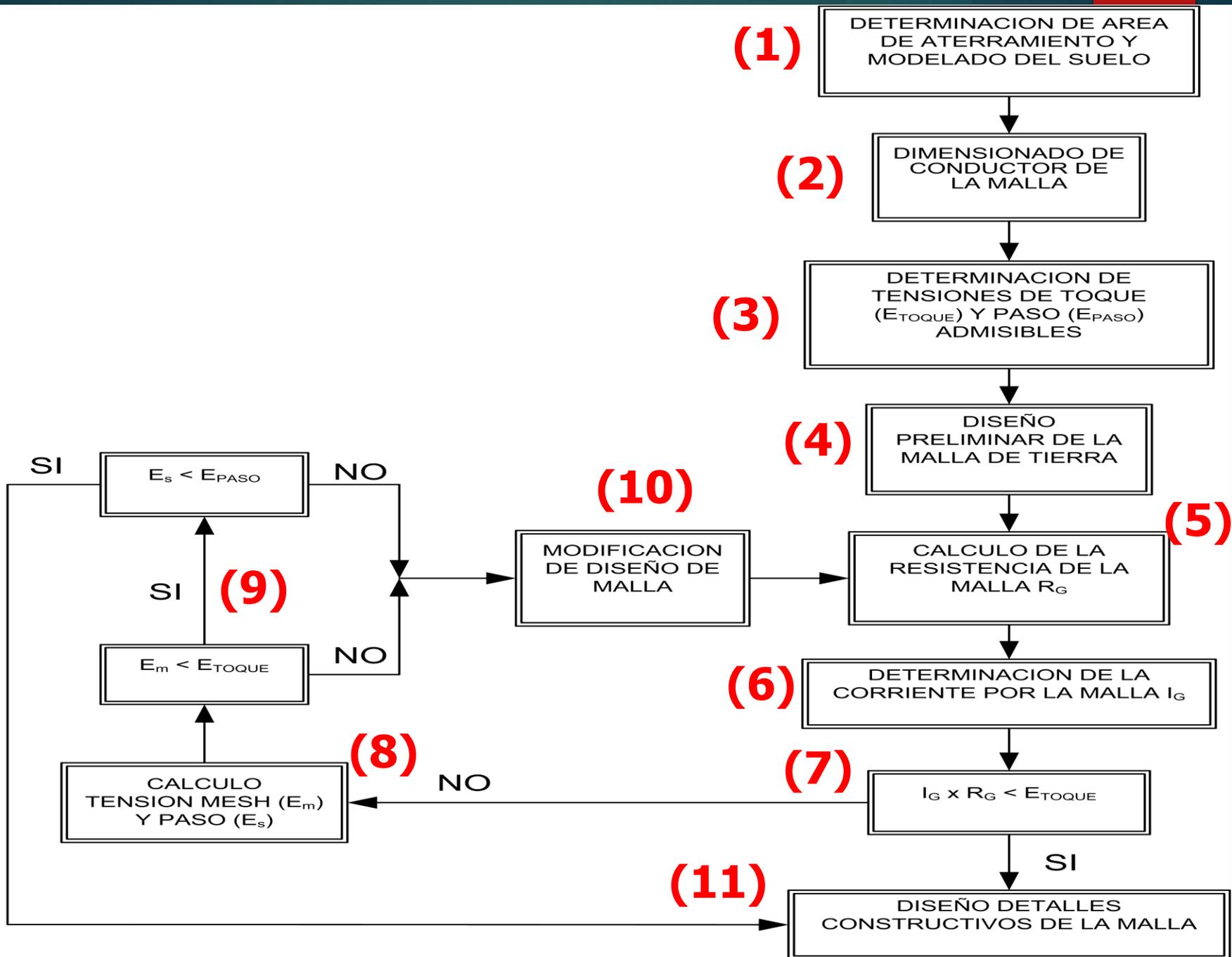
28

## ▶ Quinto paso: Cálculo resistencia

$$R_g = \rho \left[ \frac{1}{L} + \frac{1}{\sqrt{20A}} \left( 1 + \frac{1}{1 + h\sqrt{20/A}} \right) \right] = 2.75\Omega$$

- ▶  $\rho = 400 \Omega.m$
- ▶  $h = 0.50 \text{ m}$
- ▶  $A = 70 \text{ m} \times 70 \text{ m}$
- ▶  $L = 1540 + 20 \times 7.5 = 1690 \text{ m}$

**LA RESISTENCIA PASA DE 2.78Ω A 2.75Ω**



# Desarrollo de los cálculos

30

## ► Sexto punto:

### Cálculo de corriente por la malla $I_G$ .

Cortocircuito en 13kV: 6814A.

Cortocircuito en 115kV: 3180A.

- La corriente de cortocircuito no varía en esta evaluación:

$$I_G = C_p \times S_f \times D_f \times I_f = 1 \times 1 \times 0.6 \times 3180 = 1908A$$

# Desarrollo de los cálculos

31

## ► Séptimo punto: Cálculo de GPR.

$$GPR = R_g \times I_G < E_{\text{toque\_adm}}$$

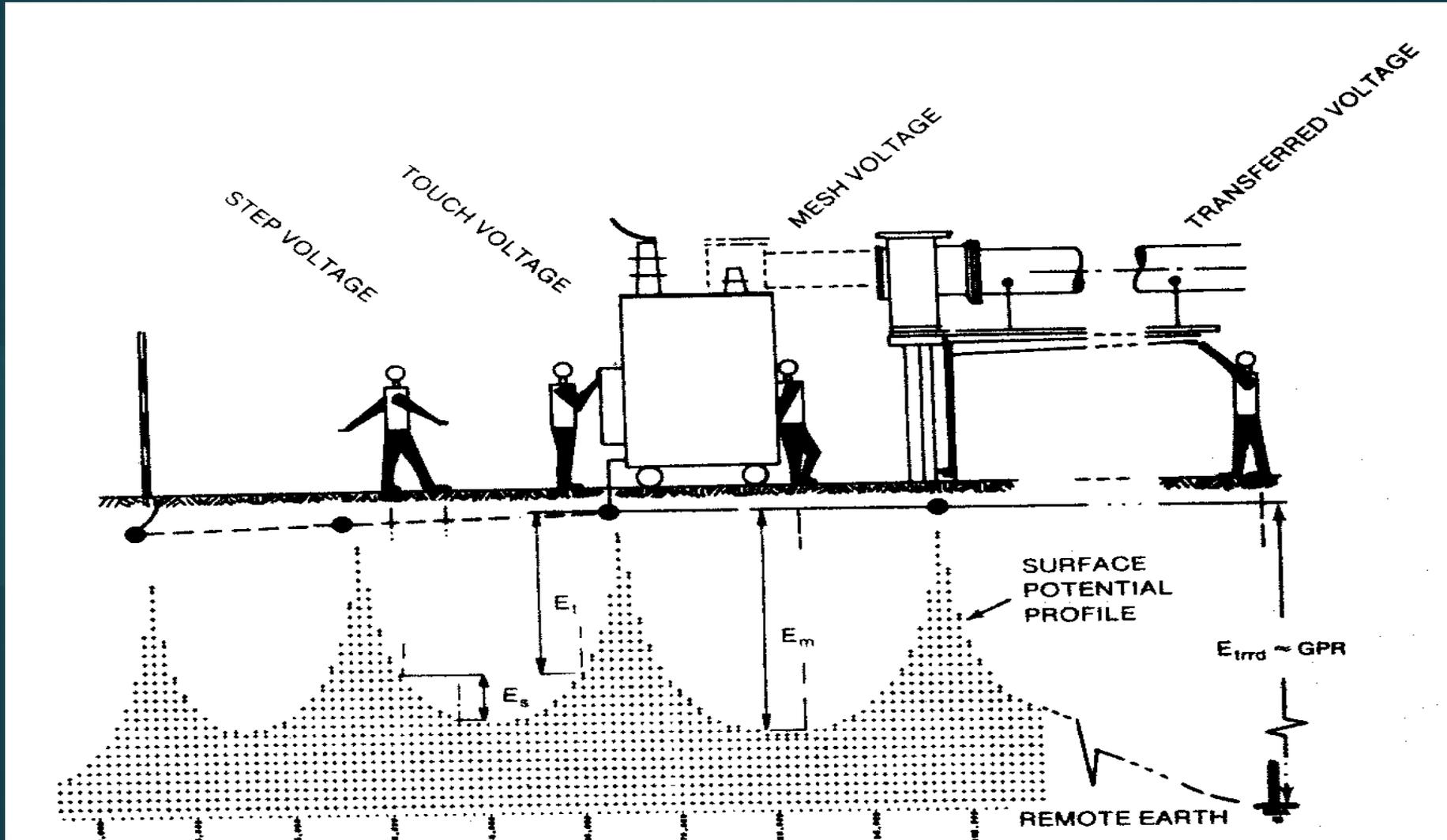
$$GPR = 2.75 \times 1908 = 5247V$$

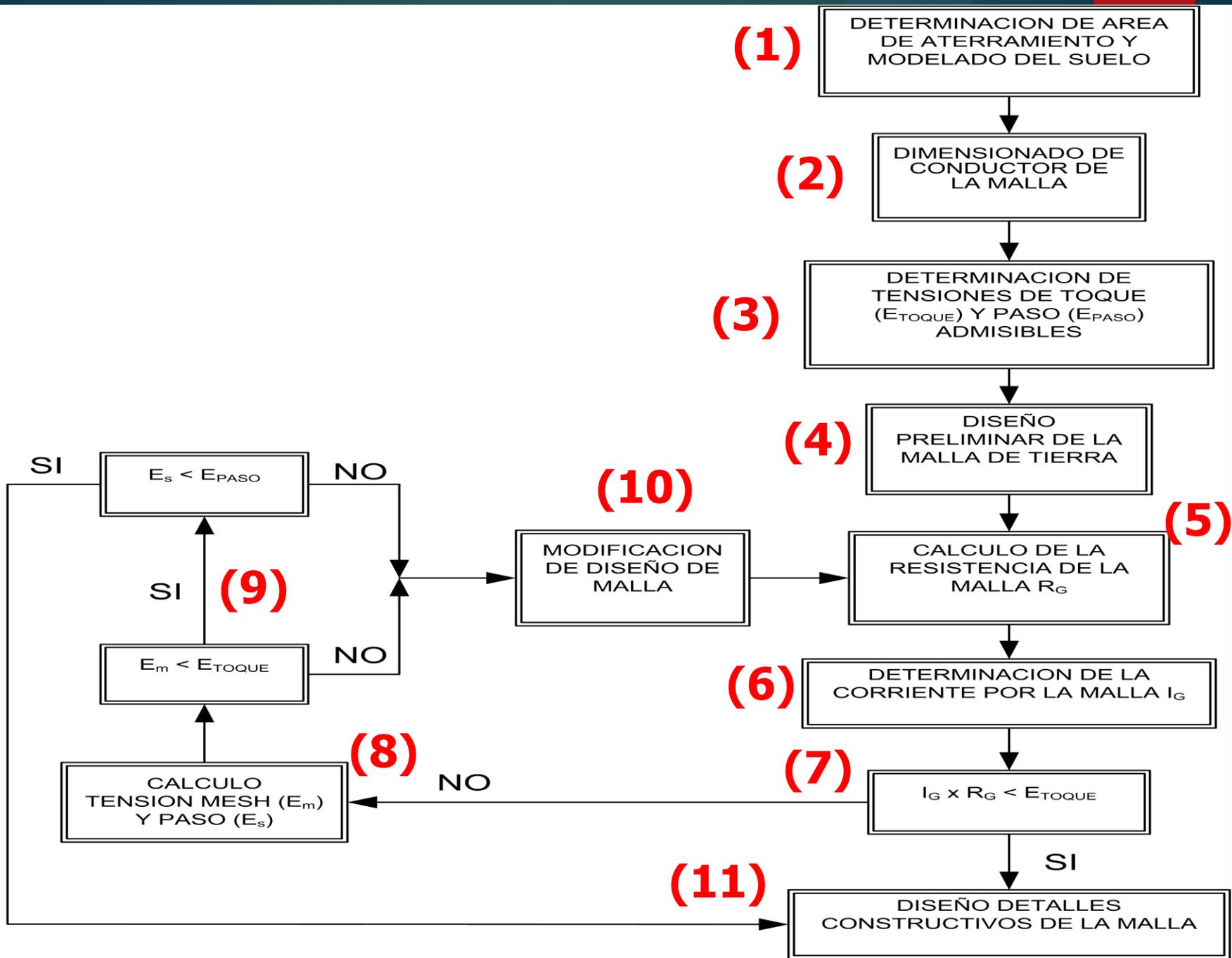
$$E_{\text{toque\_adm}} = 838V$$

Con el diseño sin jabalinas GPR = 5304V

# Gradientes de potencial

32





# Evaluación de tensiones de paso y toque.

34

SUBESTACIONES EN MT

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} < E_{\text{toque\_max}} = 838V$$

$$E_s = \frac{\rho I_G K_s K_i}{L_S} < E_{\text{paso\_max}} = 2687V$$

# Tensión de toque

35

$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} = \frac{400 \times 0.77 \times 2.272 \times 1908}{1540 + \left[ 1.55 + 1.22 \left( \frac{7.5}{\sqrt{70^2 + 70^2}} \right) \right] \times 150} = 747V$$

$$E_{\text{toque\_adm}} = 838V$$

$$E_m = 747V < E_{\text{toque\_adm}} = 838V$$

aceptable, se debe evaluar tensión de paso

- ▶ **Observación 1:** Se reduce  $K_m$ .
- ▶ **Observación 2:** Crece la longitud efectiva.

# Tensión de paso

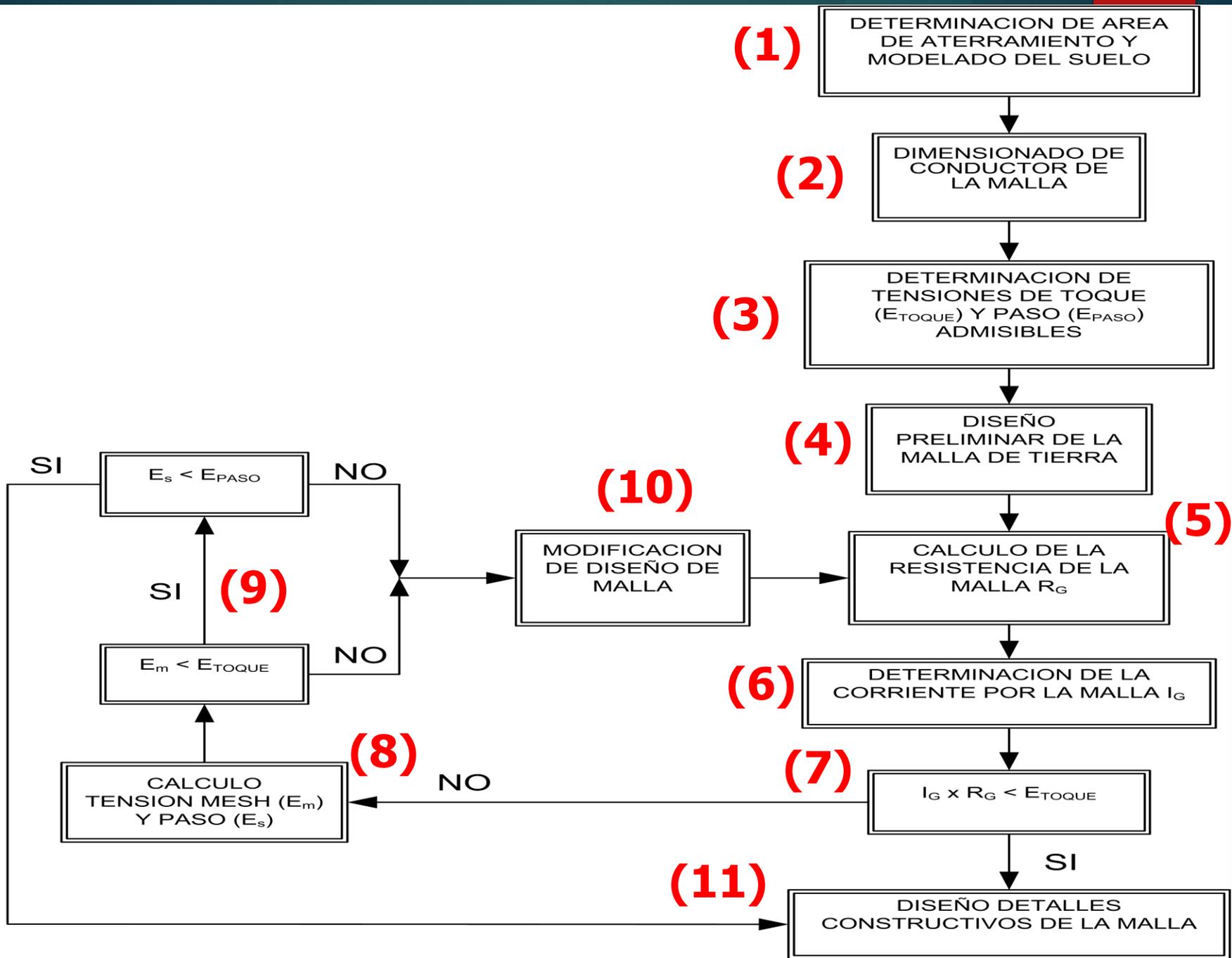
36

$$E_s = \frac{\rho \times K_s \times K_i \times I_G}{L_s} = \frac{400 \times 0.406 \times 2.272 \times 1908}{0.75 \times 1540 + 0.85 \times 7.5 \times 2} = 549 \text{ V}$$

$$E_{\text{paso\_adm}} = 2687 \text{ V}$$

$$E_s = 549 \text{ V} < E_{\text{toque\_adm}} = 2687 \text{ V}$$

aceptable, diseño correcto



# Diseño de detalle

38

- ▶ Detalles constructivos:
  - ▶ Conexión equipos.
- ▶ Jabalinas adicionales para equipos:
  - ▶ Neutros de trafos y generadores.
  - ▶ Neutros de bancos condensadores y reactores.
  - ▶ Descargadores de sobretensión.
- ▶ **Estudio de potenciales de transferencia**

# Observaciones ejemplo

39

SUBESTACIONES EN MT

- ▶ El diseño es válido suponiendo que no existen salidas de 13kV que alimenten consumidores fuera del área de aterramiento de la estación, es decir, todos los defectos se producen **DENTRO DE LA ESTACION ATERRADA**. Esto es válido para plantas de generación y consumidores cuyas mallas de tierra abarquen toda el área de la instalación.
- ▶ En caso que la estación refiriera a una red de distribución pública y tuviera salidas en 13kV debería considerarse la corriente de 6.8kA a los efectos del diseño.