

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)

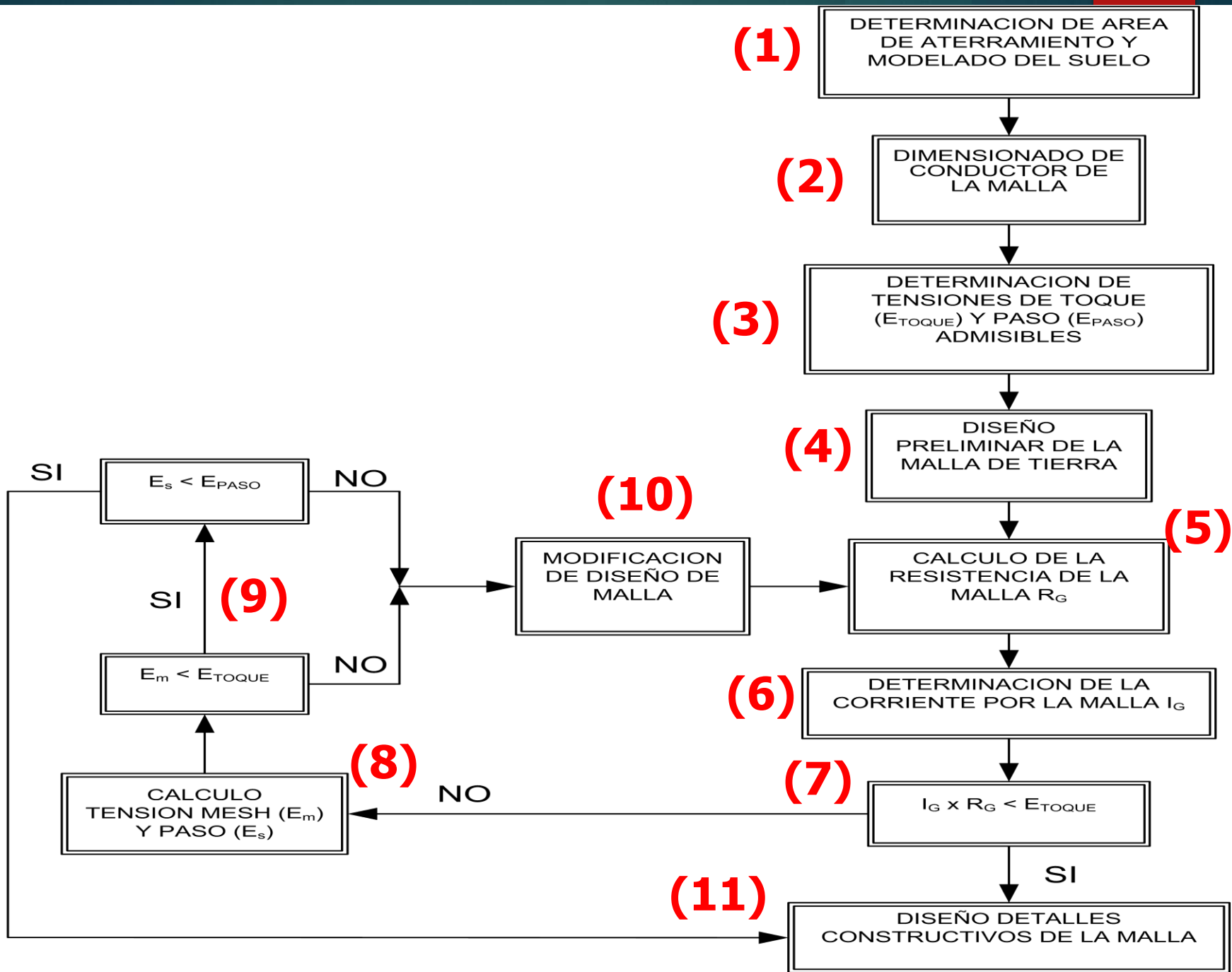
▶ $Z_{TR} (13kV) = 0.034 + 1.014 j \Omega$

Datos de diseño

3

SUBESTACIONES EN MT

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

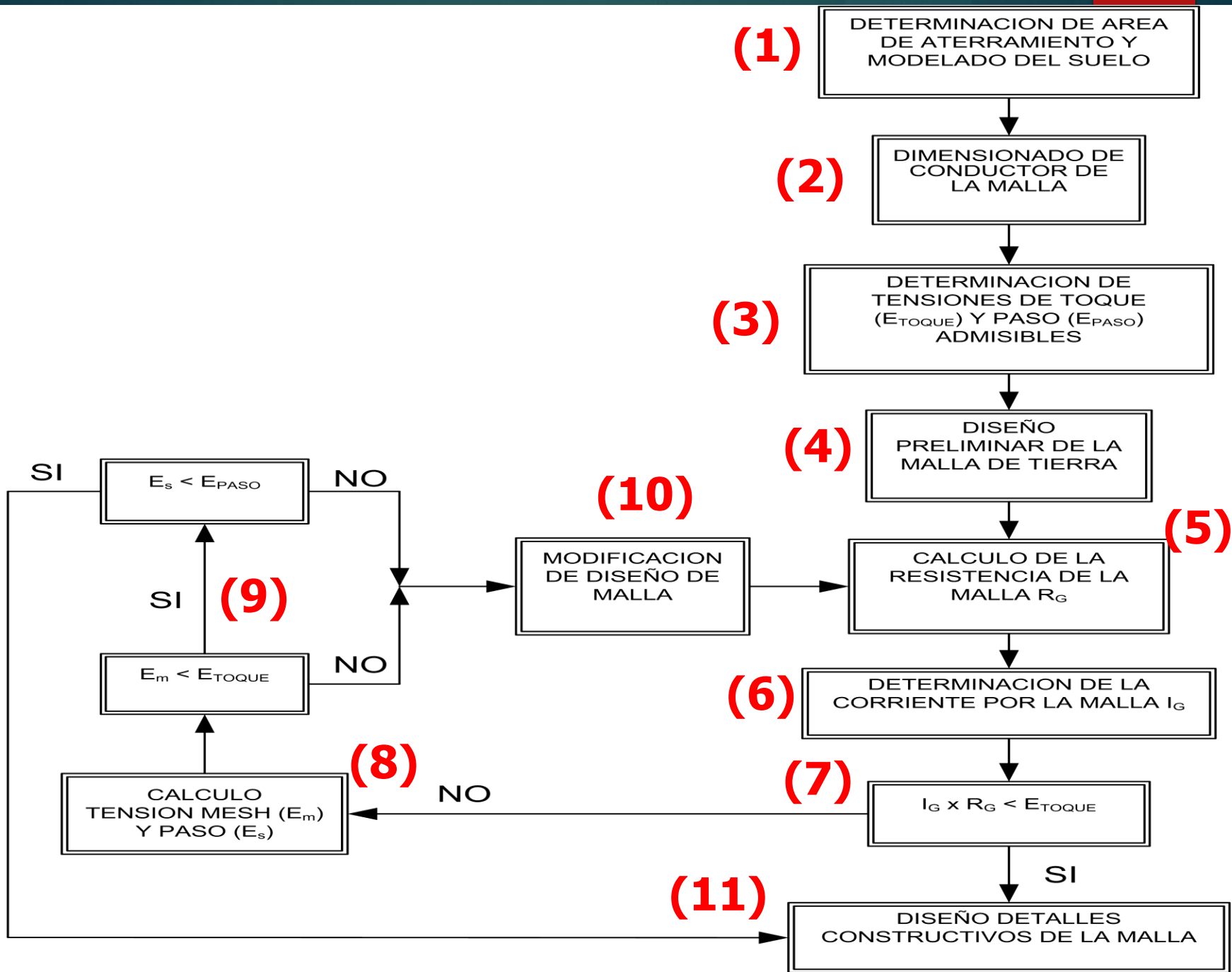


Desarrollo de los cálculos

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:

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

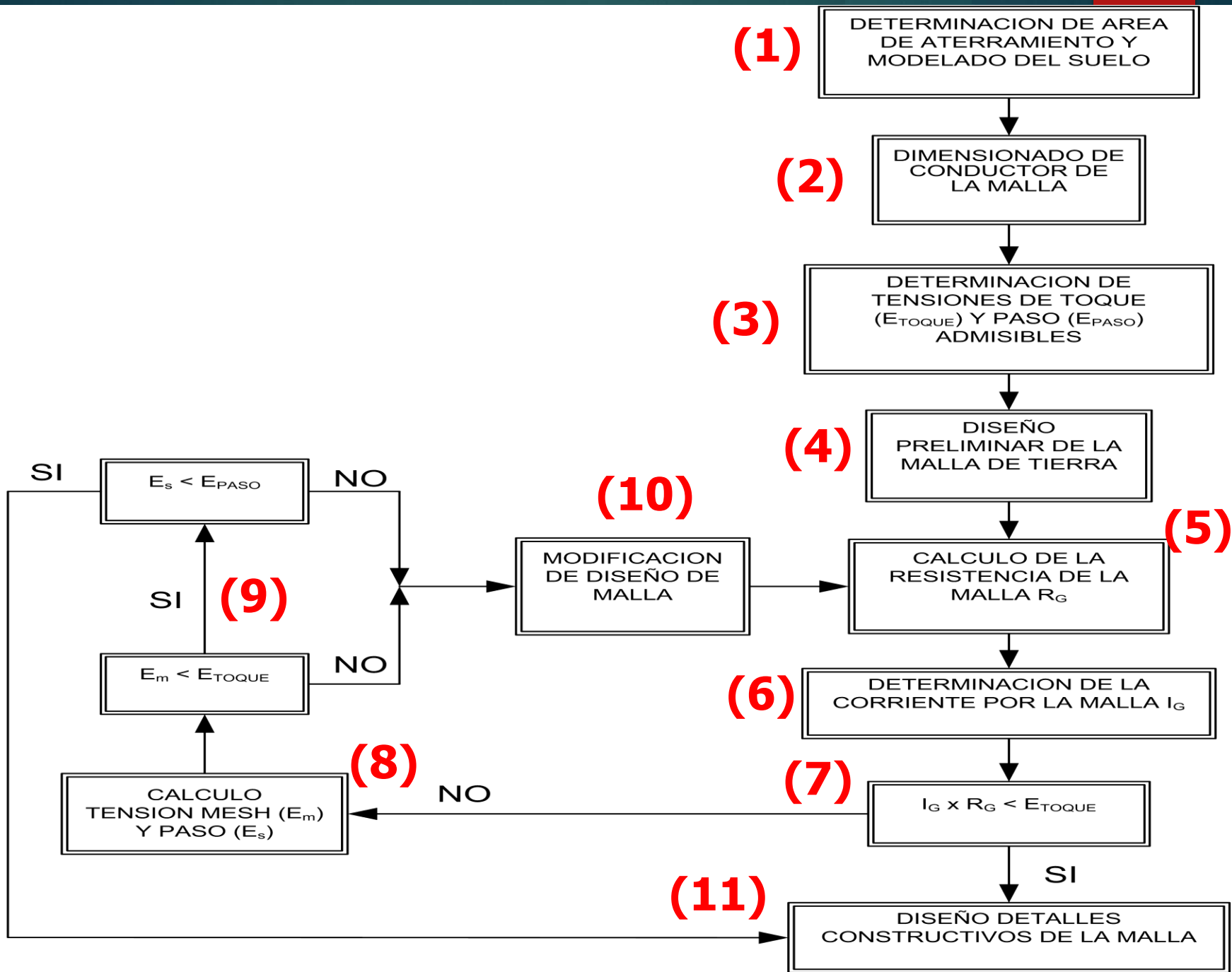
X/R = 16.2

Desarrollo de los cálculos

- ▶ **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 50mm^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

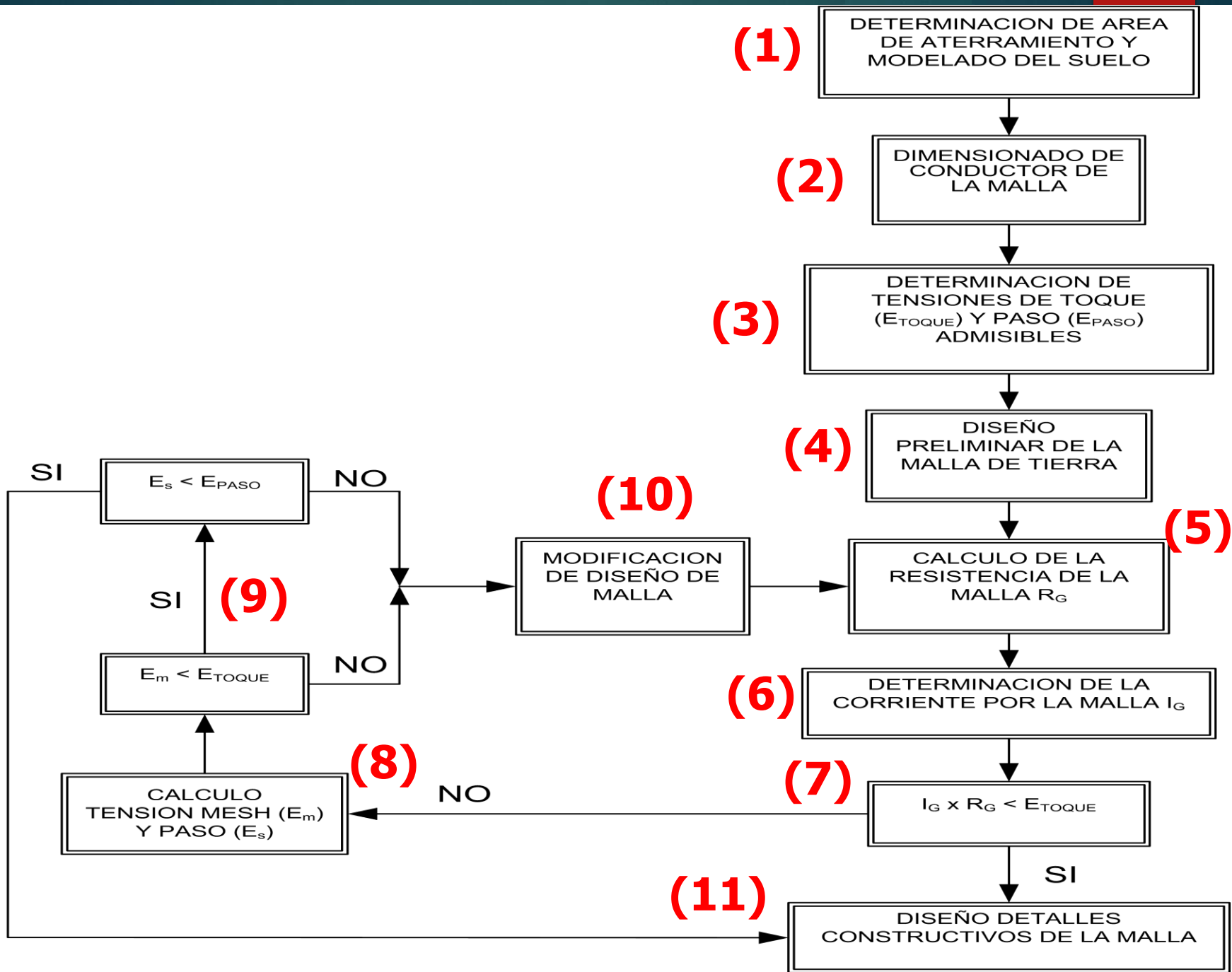
12

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

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

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

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

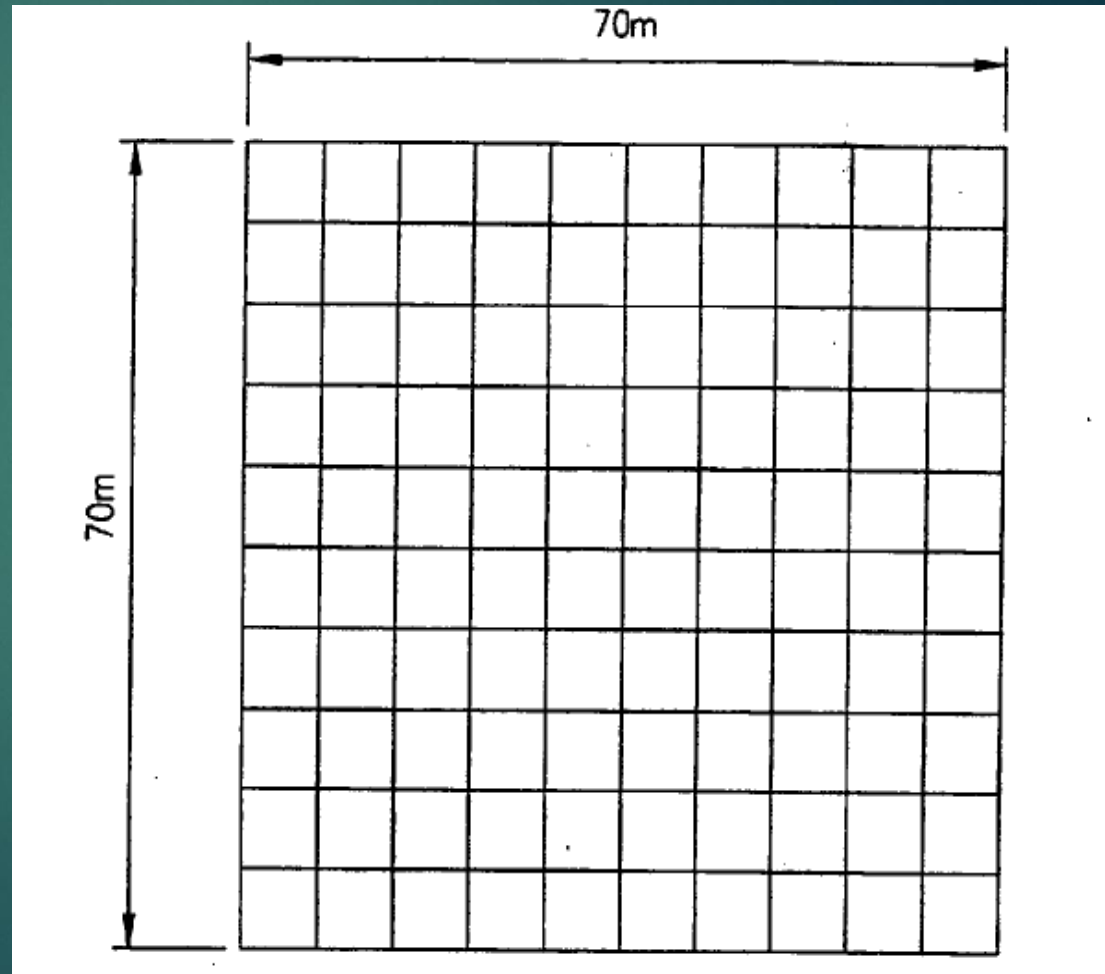


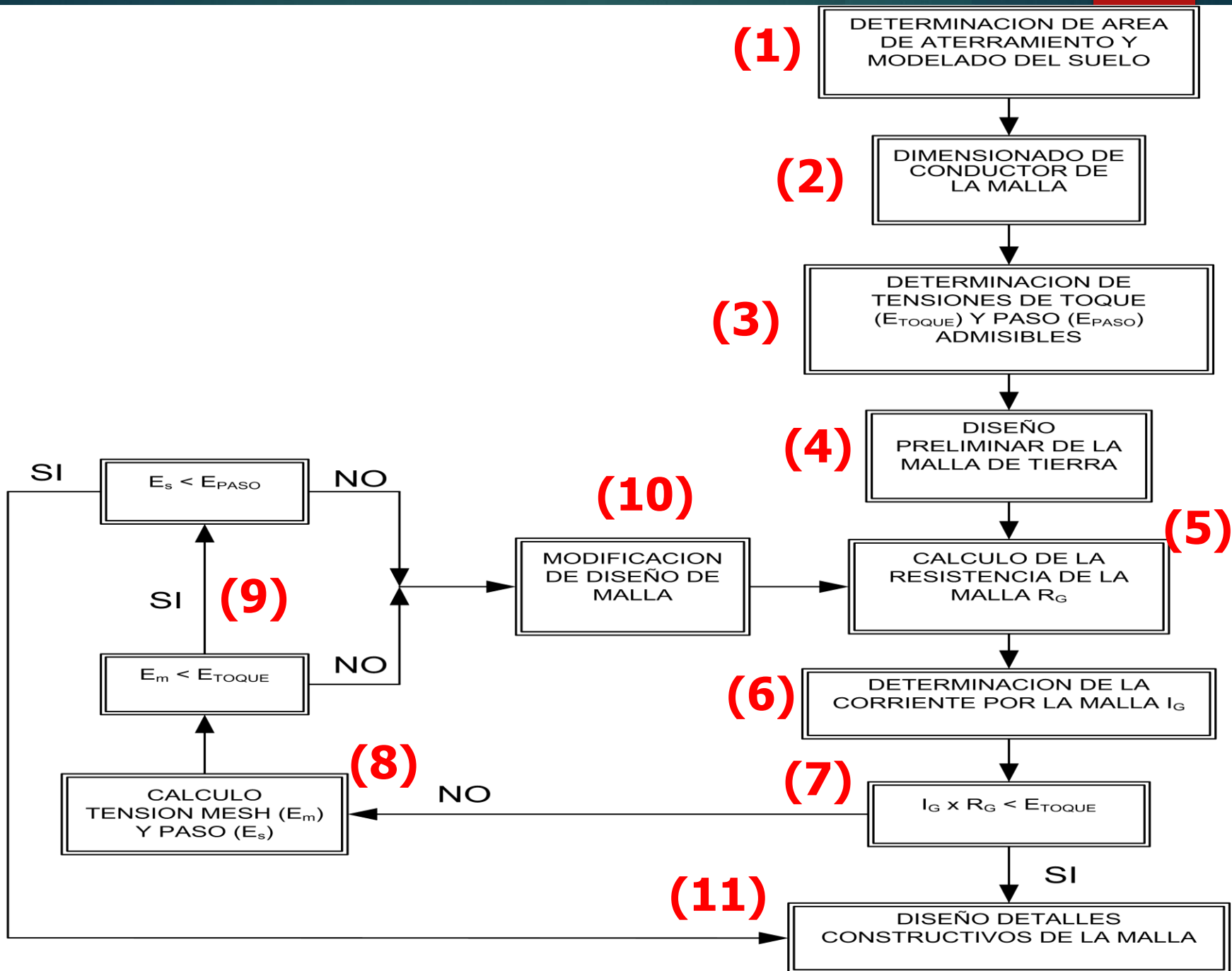
Desarrollo de los cálculos

14

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

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





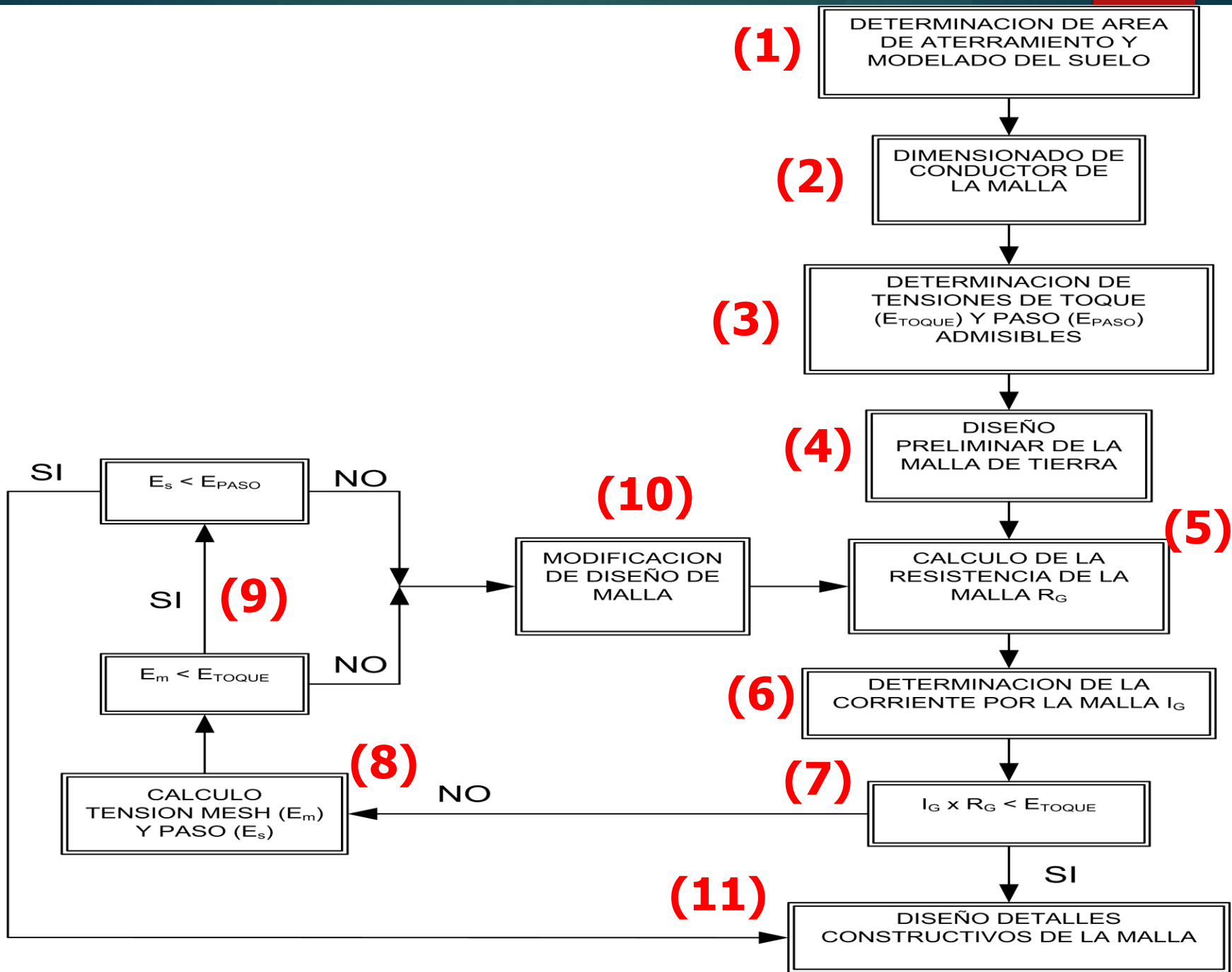
Desarrollo de los cálculos

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.

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

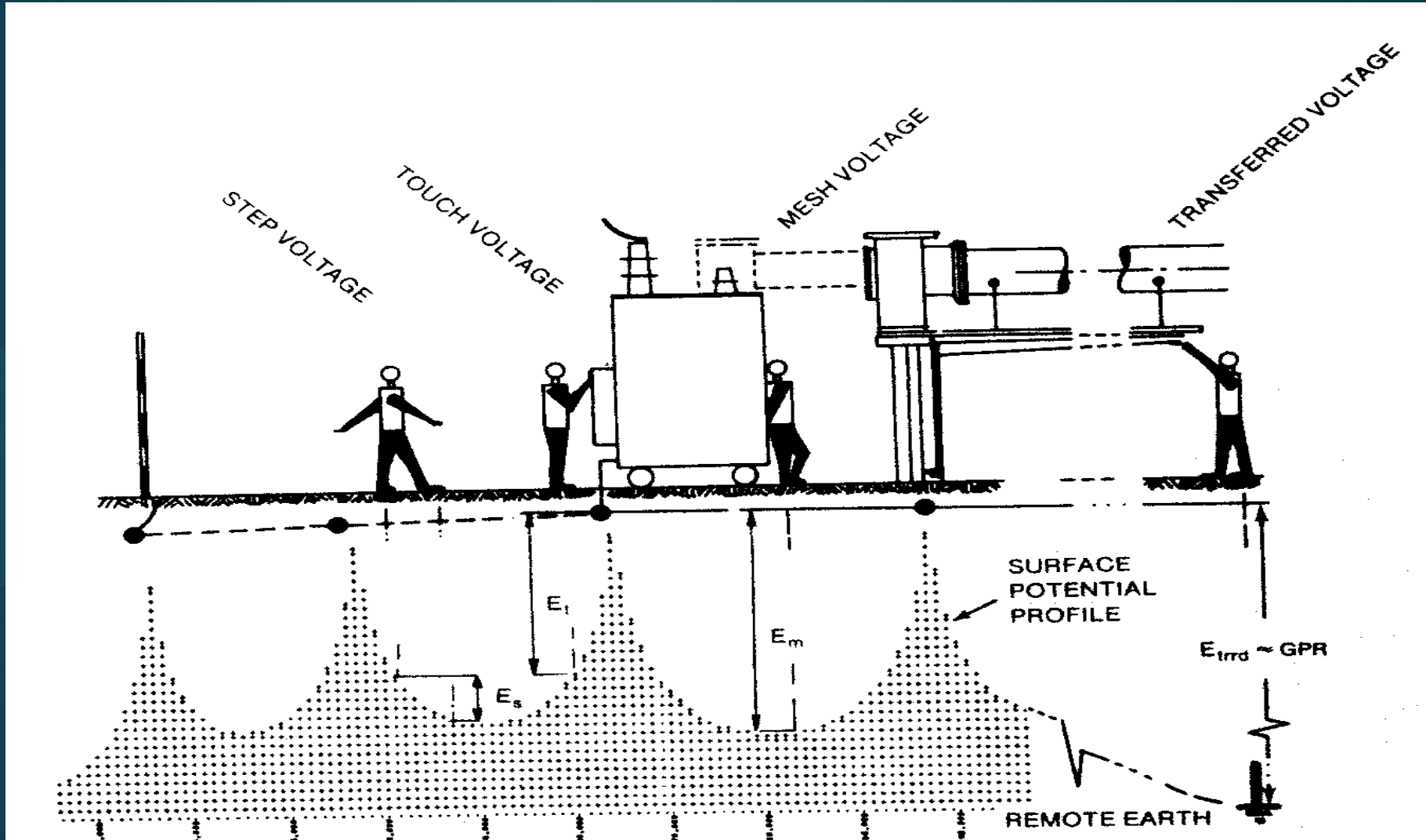
$$\text{GPR} = 2.78 \times 1908 = 5304\text{V}$$

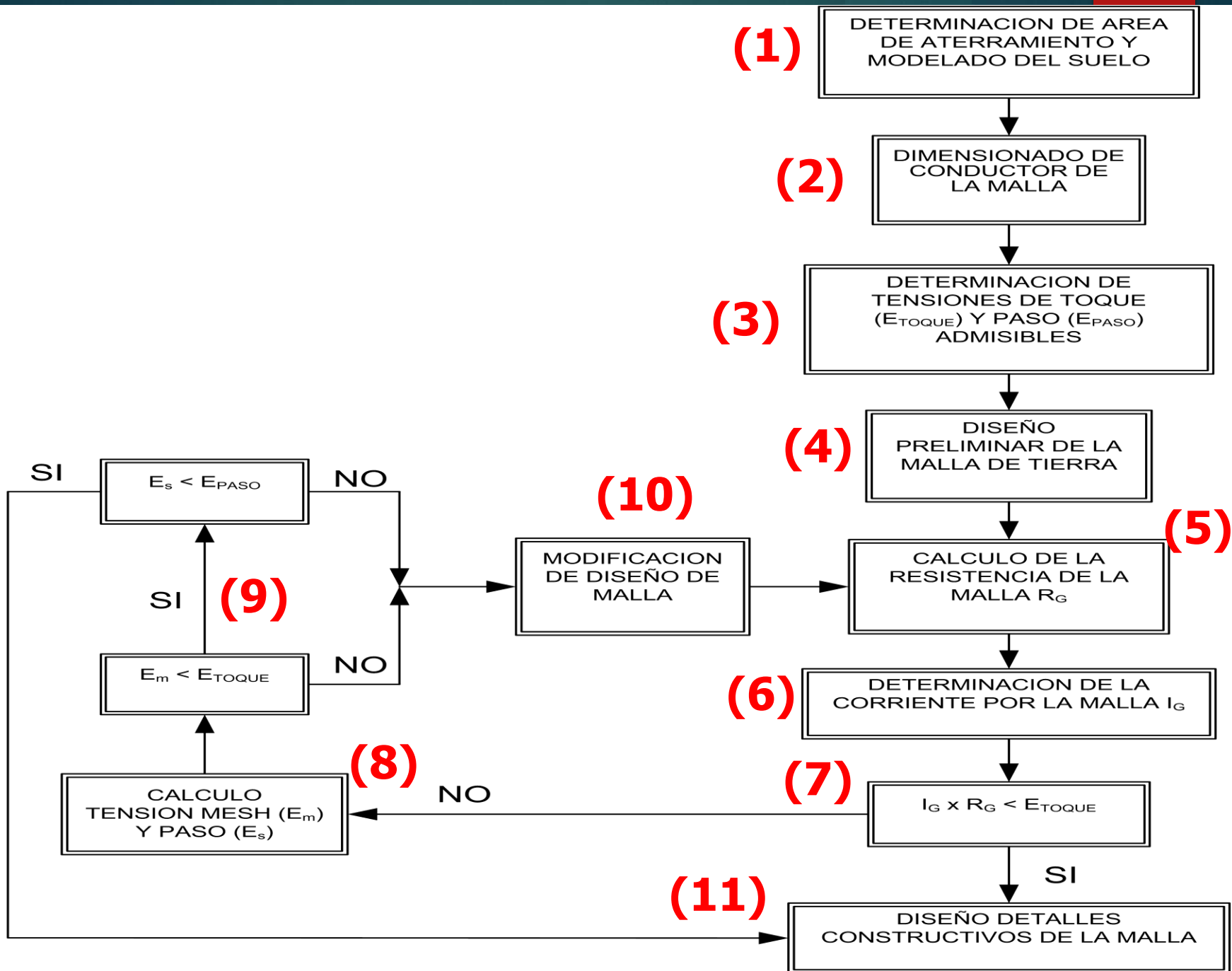
$$E_{\text{toque_adm}} = 838\text{V}$$

- 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

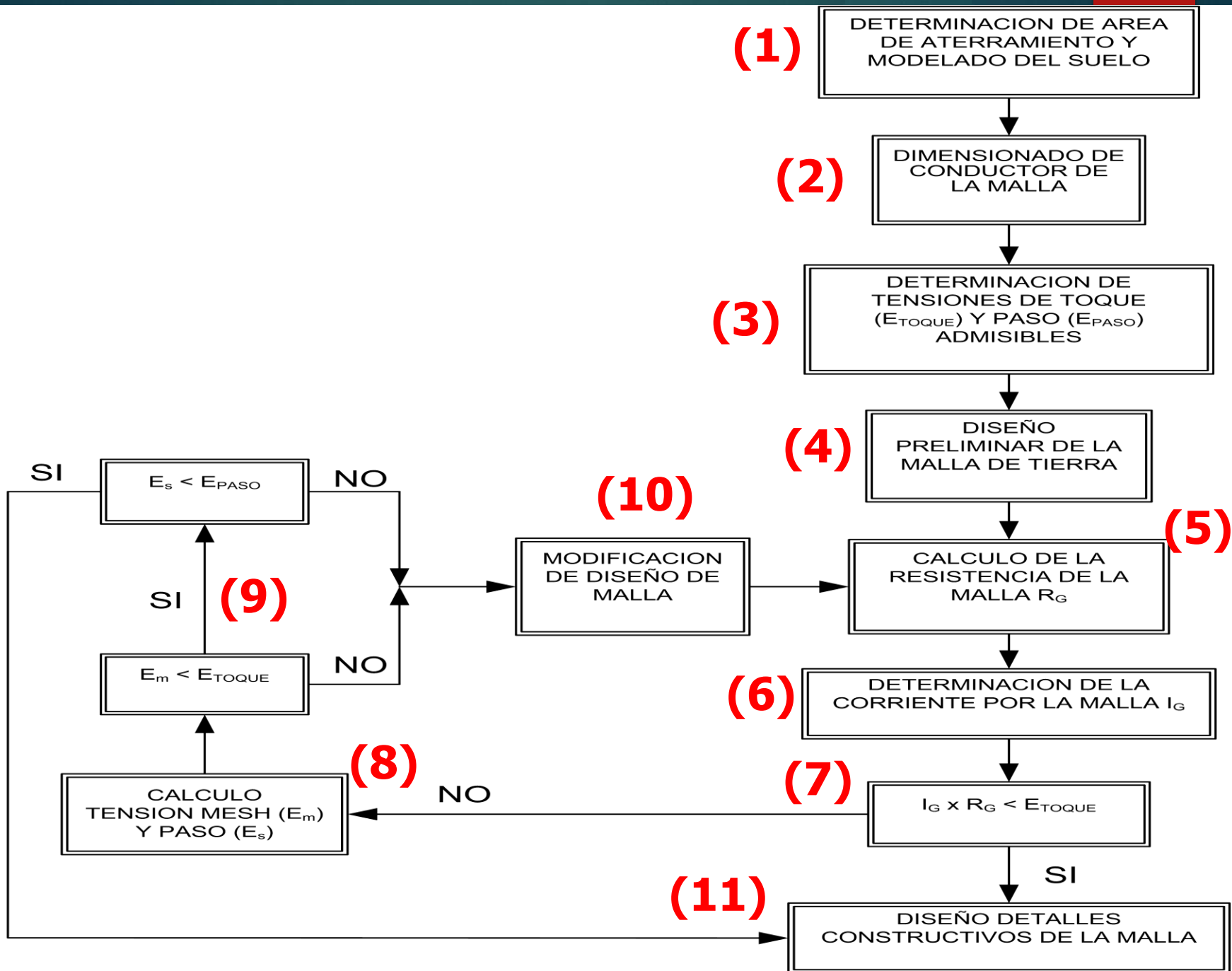
$$E_m = \frac{\rho I_G K_m K_i}{L_M} = \frac{400 \times 0.89 \times 2.272 \times 1908}{1540} = 1002V$$

$$E_{\text{toque_adm}} = 838V$$

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

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

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



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.

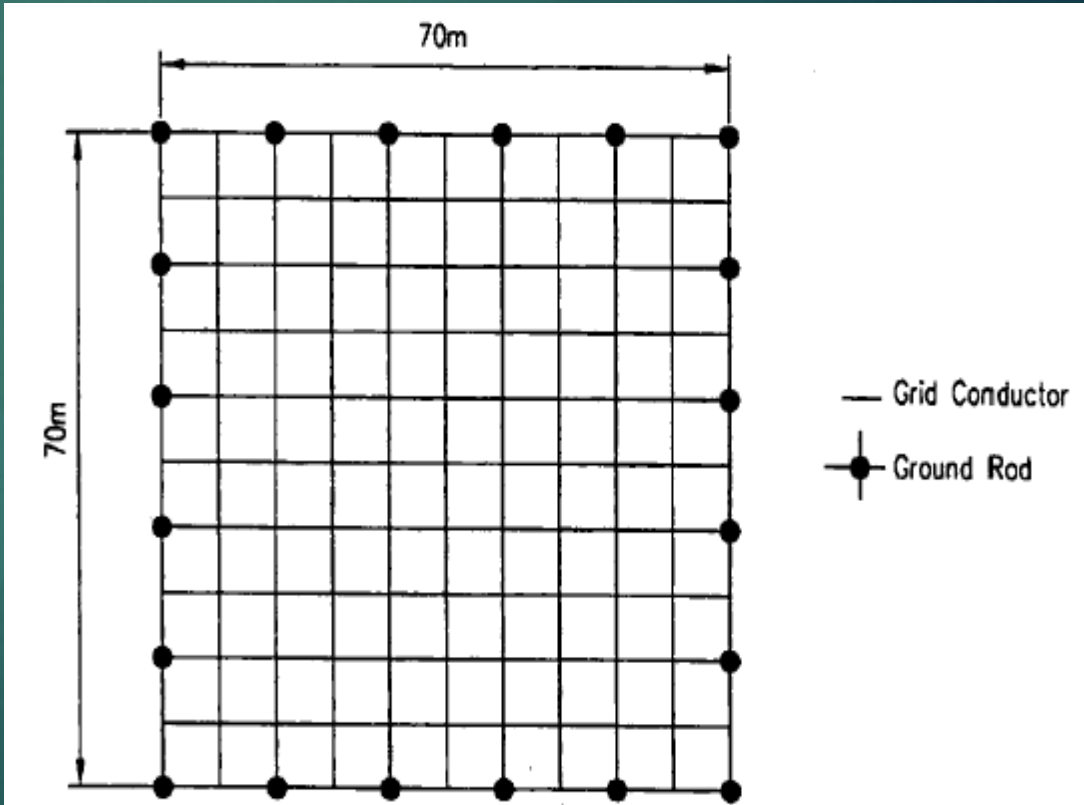
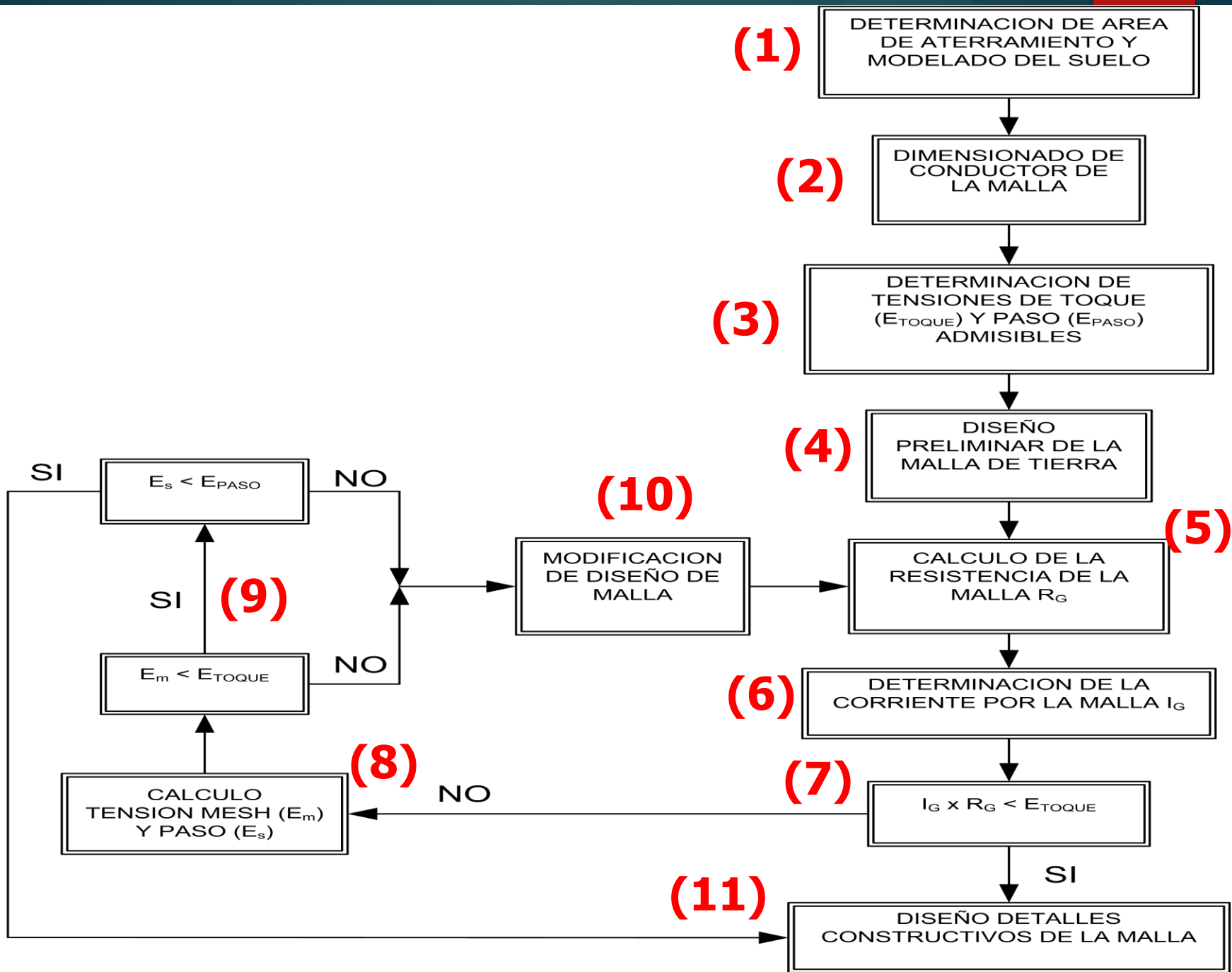


Figure B.2—Square grid with 20 7.5 m rods



Desarrollo de los cálculos

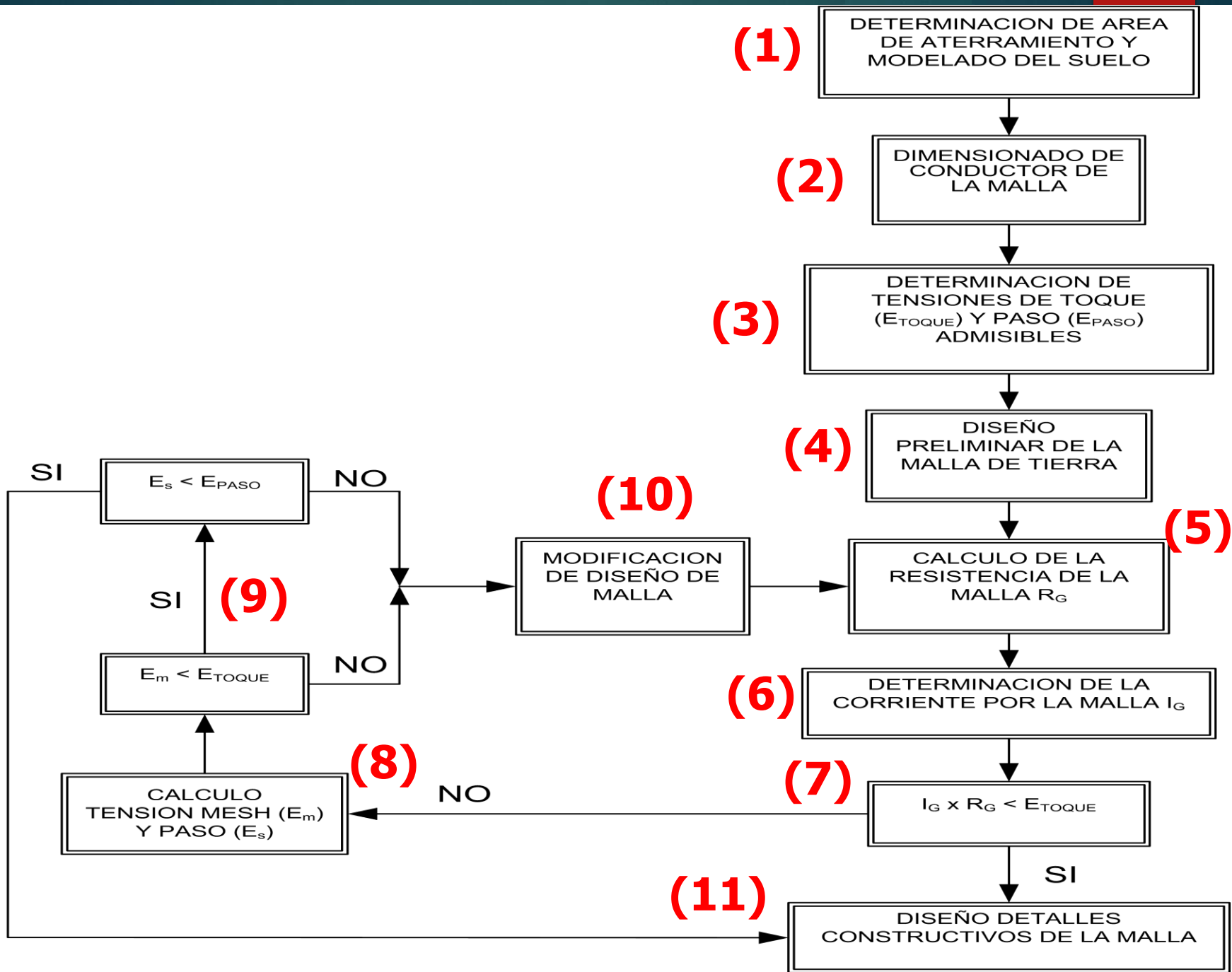
28

▶ 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.

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

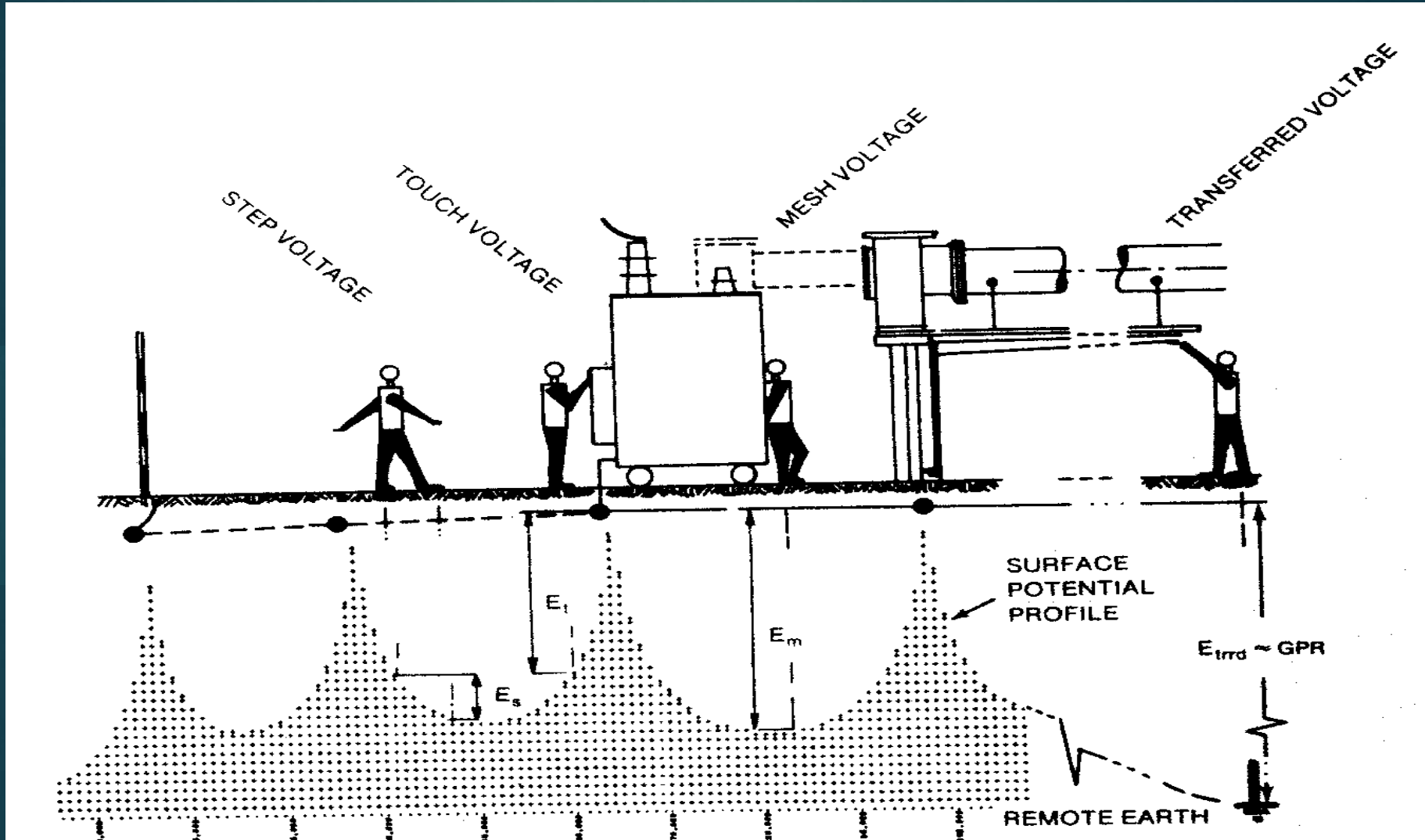
$$GPR = 2.75 \times 1908 = 5247V$$

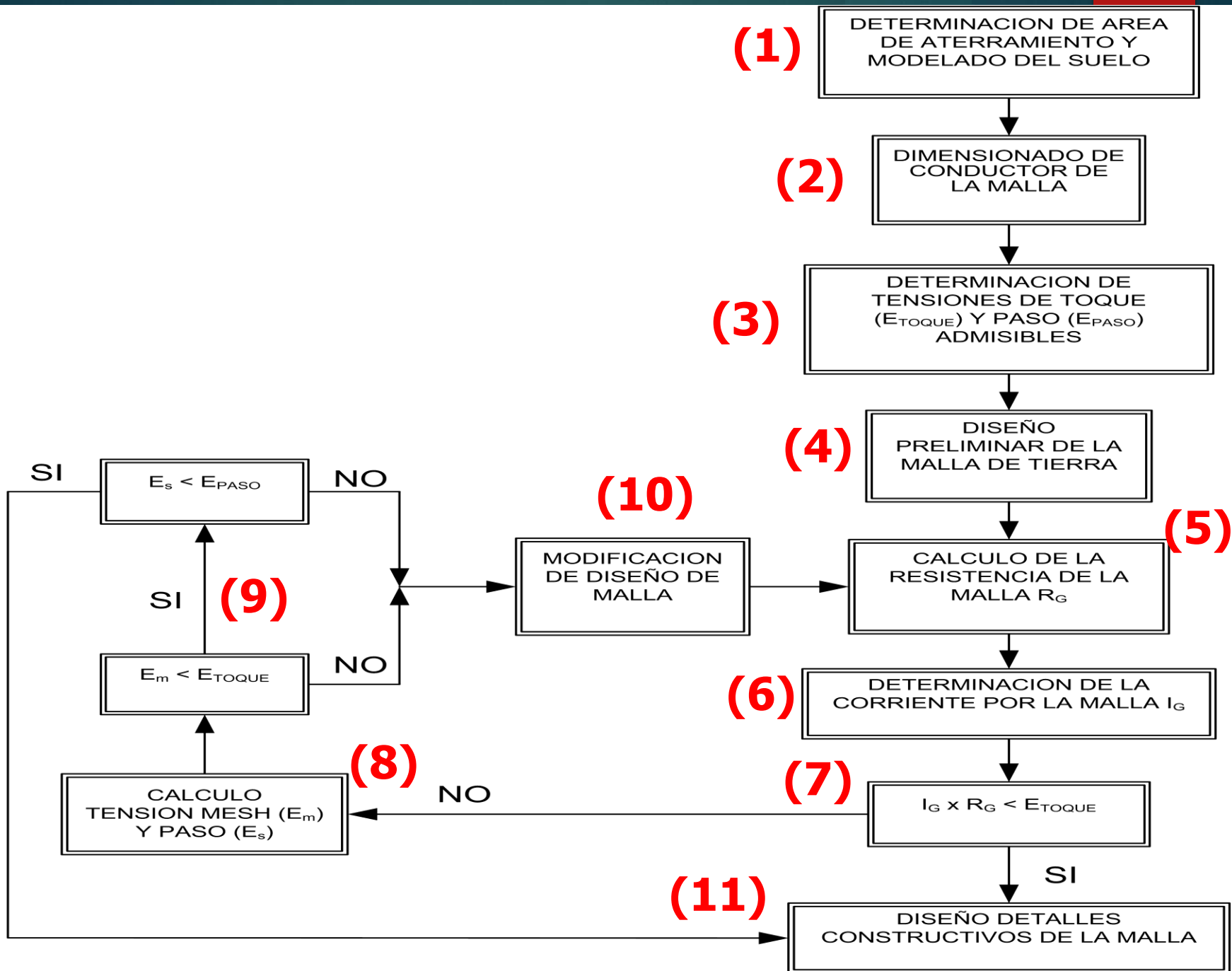
$$E_{\text{toque_adm}} = 838V$$

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

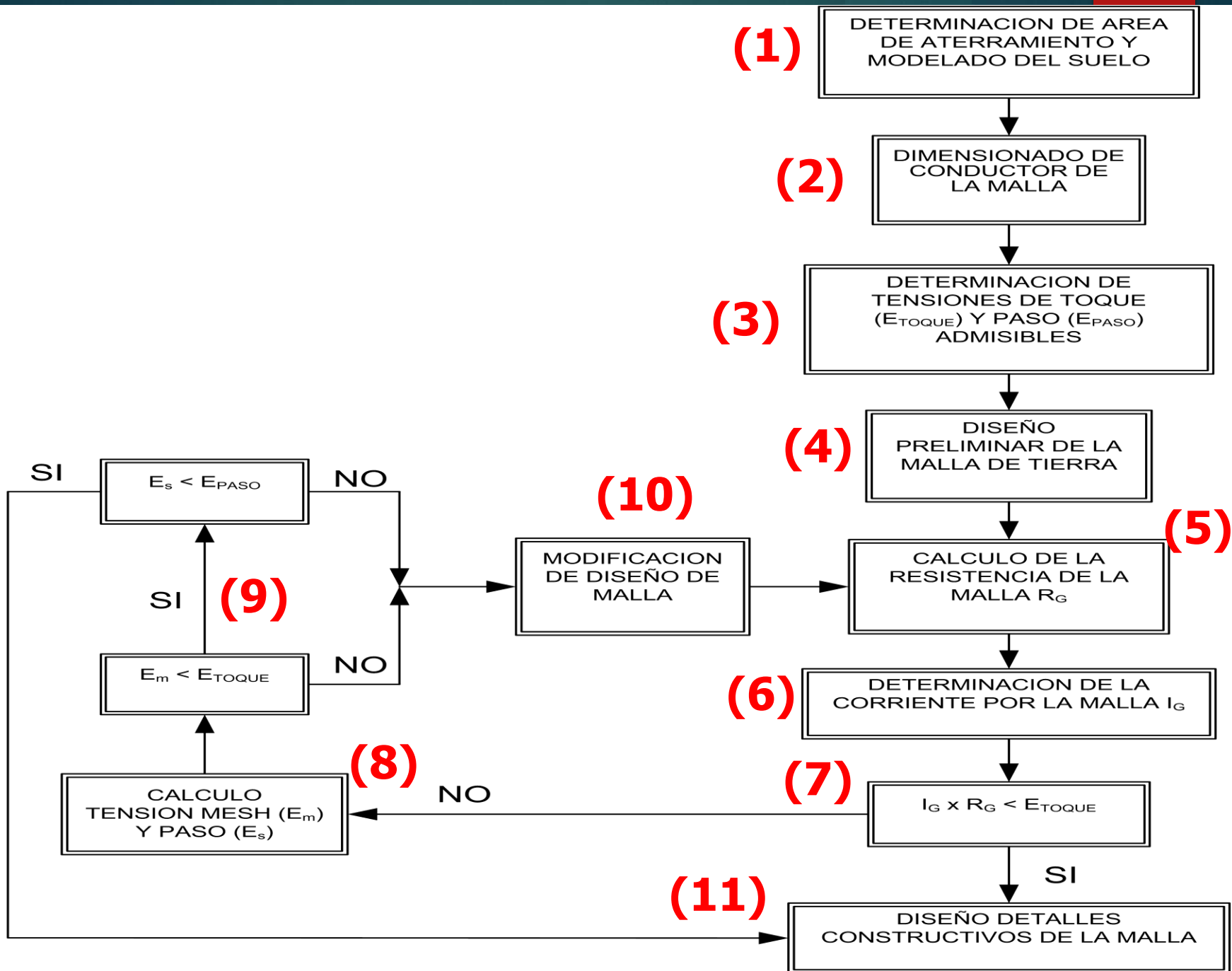
36

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

$$E_{\text{paso_adm}} = 2687 \text{ V}$$

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

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

- ▶ 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.