

PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE ALTA TENSIÓN

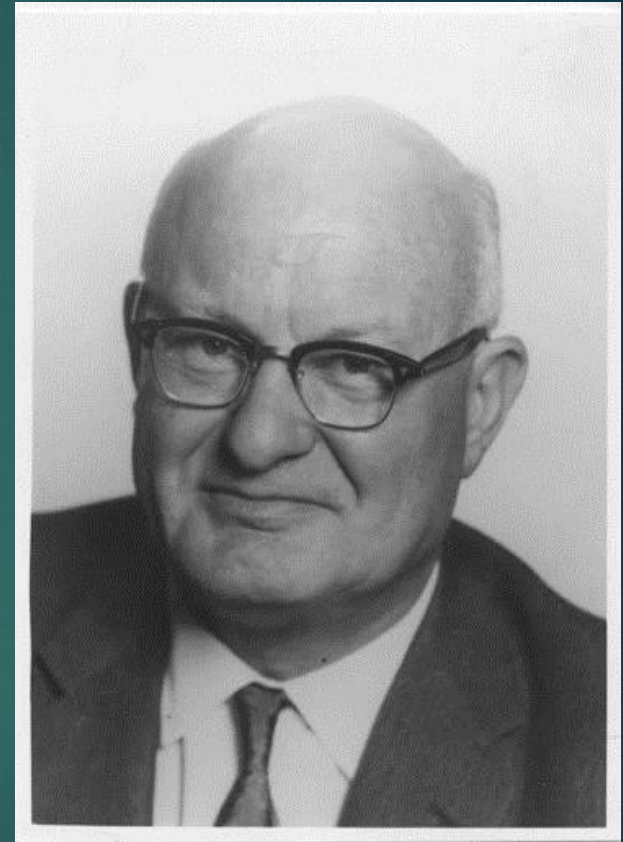
Parte 4 – Efecto de la corriente en el ser humano

FERNANDO BERRUTTI

AÑO 2015

Introducción

- ▶ **Charles Dalziel:** Precursor en el estudio de los efectos de la corriente sobre el cuerpo humano.
- ▶ Décadas de estudio: 1940 y 1950.
- ▶ Dos series de experimentos:
 - 1) “Let-go currents” sobre seres humanos (asistencia médica).
 - 2) Fibrilación ventricular sobre animales (gatos, perros, ovejas, novillos, chanchos, cobayas).



Charles F. Dalziel
(1904-1986)

Let-go currents

- ▶ Experimentos realizados en conjunto con la Facultad de Medicina de la Universidad de California.
- ▶ “Perfil” de los individuos estudiados:
 - 1) Mayores de 18 años.
 - 2) Buen estado físico, sin enfermedades.
 - 3) Presión arterial dentro de límites normales.
 - 4) Condición cardíaca saludable chequeada por electrocardiograma.
- ▶ **Todos los experimentos fueron realizados en áreas de contacto con piel en buen estado.**

Let-go currents (50-60Hz)

4

► Desarrollo y resultado de los experimentos:

- Hombres: 16mA
- Mujeres: 10mA

Factores decisivos para la diferencia:

- Desarrollo muscular.
- Sensibilidad del sistema nervioso.

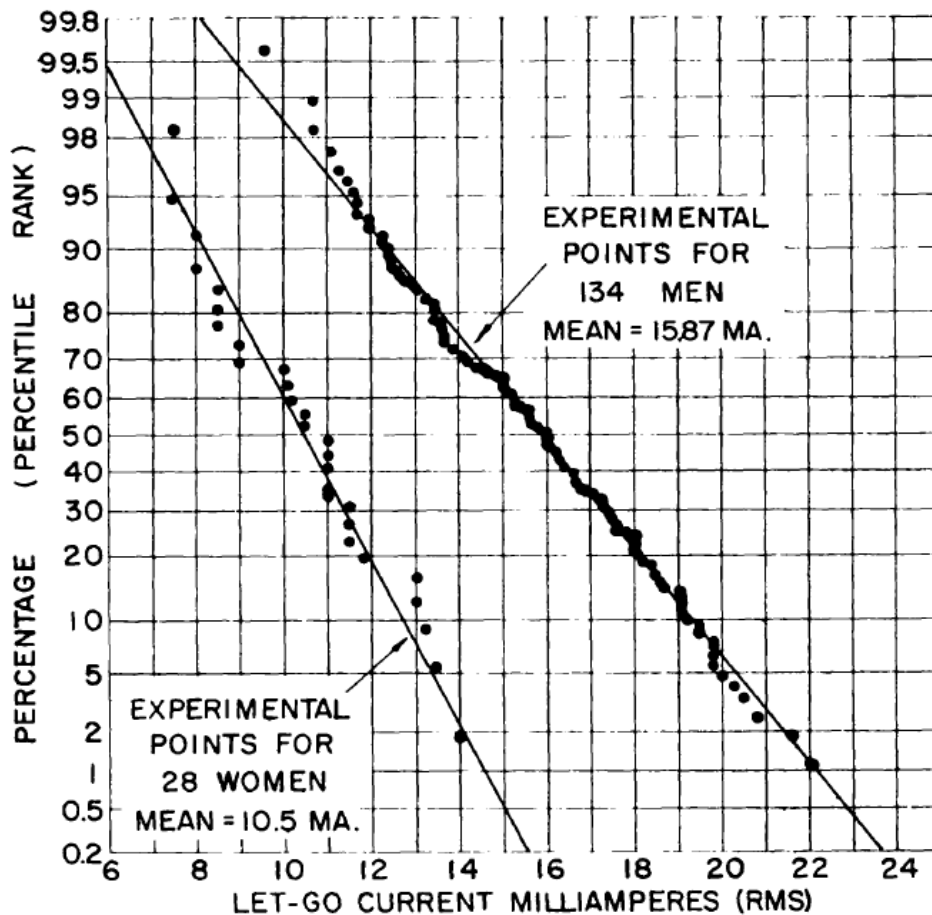
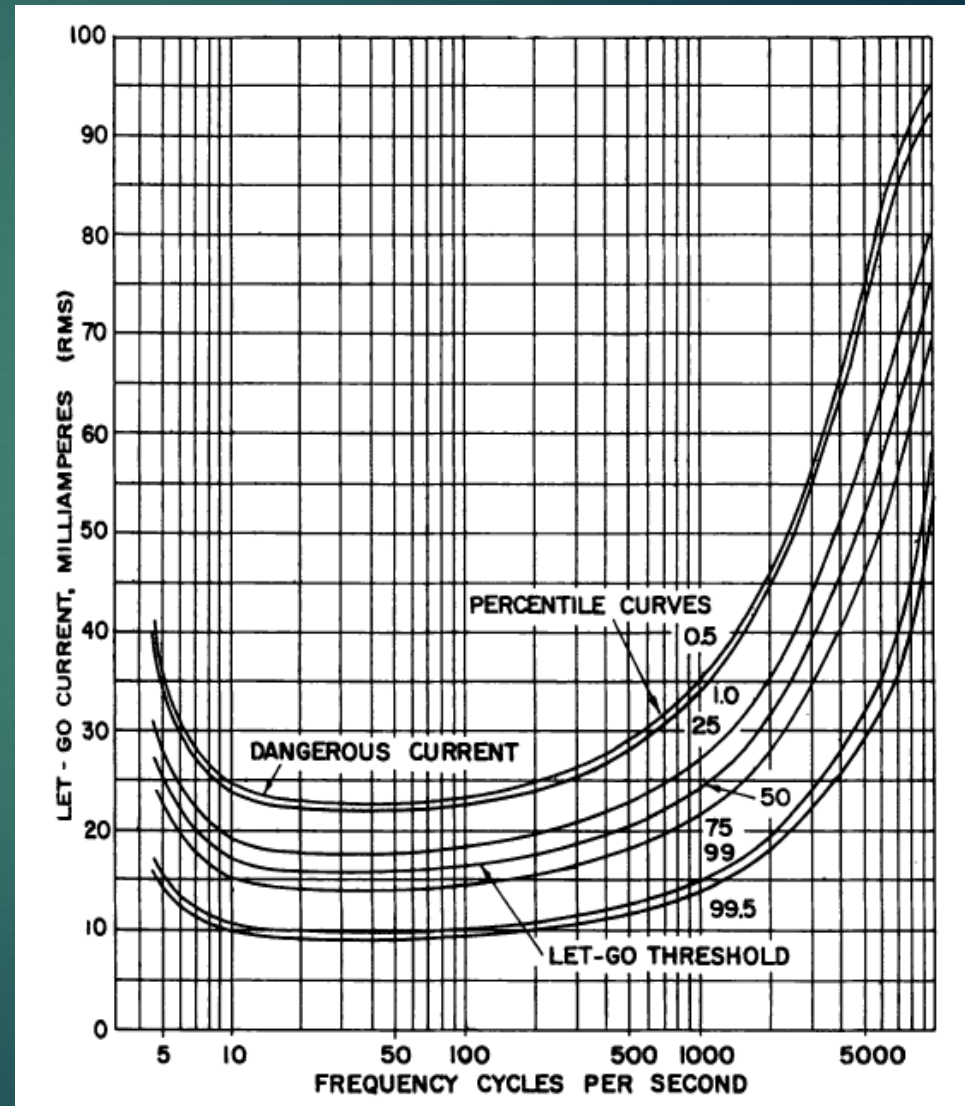


Fig. 1 (left). 60-cycle let-go current distribution curves for men and women

Let-go currents (0-10kHz)

- ▶ Los límites 50-60Hz son los más restrictivos de todos.



Let-go currents: Resumen

- ▶ Para 50-60Hz la corriente de “let-go” media considerada para un individuo en condiciones físicas sanas es de 10mA. Para DC, el límite es mayor.
- ▶ Por encima de ese valor, es dificultoso o imposible “despegarse” y la integridad del individuo dependiente de la correcta actuación de las protecciones.

¿Qué restricción deben cumplir las protecciones?

Corrientes letales

- ▶ La definición de corriente letal está unida a los siguientes factores:
 - 1) Camino de la corriente en el cuerpo.
 - 2) Condición física de la víctima.
 - 3) Amplitud de la corriente.
 - 4) Duración del shock.
 - 5) Frecuencia.
 - 6) Forma de onda.
 - 7) Fase del latido de corazón al momento de producirse el shock.

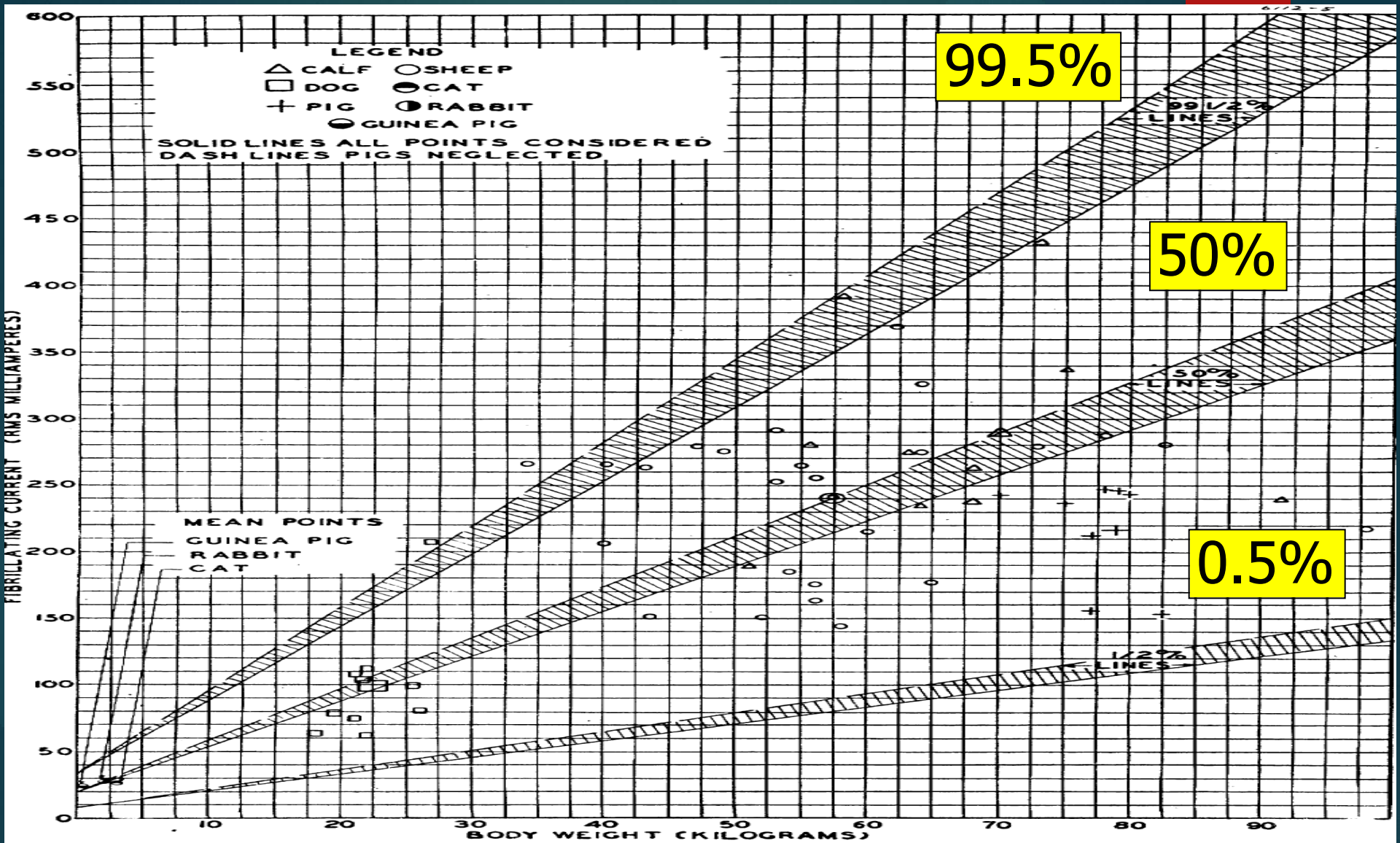
Corrientes letales

- ▶ Efecto de la corriente sobre el cuerpo humano depende de cómo éste “cierre” el circuito eléctrico, y qué parte del sistema nervioso se encuentre afectado.
- ▶ El caso más letal se da cuando el circuito se cierra sobre el corazón:
 - 1) Entre brazos.
 - 2) Entre mano izq. (der) y pie der. (izq.).

FIBRILACION VENTRICULAR

Corrientes letales

- ▶ Experimentos con diversos animales, incluyendo: ovejas, terneros, cerdos, perros, gatos y cobayas.
- ▶ Criterio similar al utilizado para el estudio de “let-go currents”, ahora sobre animales y sin posibilidad de evitar la fibrilación...
- ▶ Pruebas realizadas con shocks que van desde los 30ms y 3s a frecuencia de 60Hz.



$$I(0.5\%) = 1.26W + 7.4 \text{ [mA]} \quad \text{Shock de 3 seg.}$$

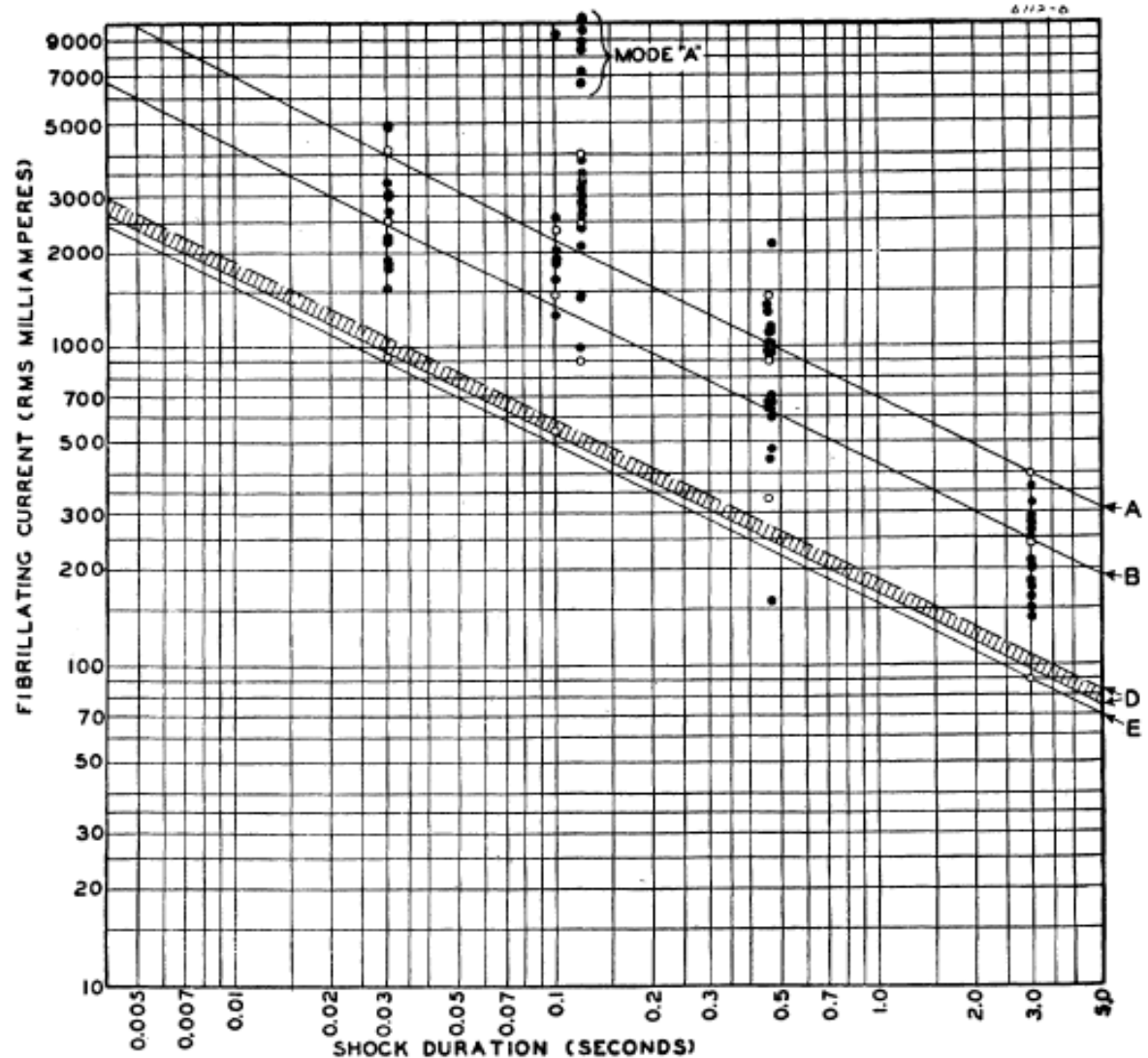
Corrientes letales

11

- ▶ Ovejas con $W=57.4\text{kg}$.
- ▶ Shocks de 30ms, 100ms, 470ms, 3s.

$$I(A) = \frac{K}{\sqrt{t(\text{seg})}}$$

- ▶ En este caso, $K=0.138$.



Corrientes letales

- ▶ A partir de estos experimentos se llega a que la corriente letal (fibrilación ventricular) será para los seres humanos de:

$$I(A) = \frac{0.116}{\sqrt{t(\text{seg})}} \quad \text{para personas de 50kg}$$

$$I(A) = \frac{0.157}{\sqrt{t(\text{seg})}} \quad \text{para personas de 70kg}$$

- ▶ Probabilidad de tolerar esta corriente es 99.5%, bajo la suposición que el individuo que sufre el accidente se encuentra en condiciones físicas adecuadas.

Tiempos de despeje

13

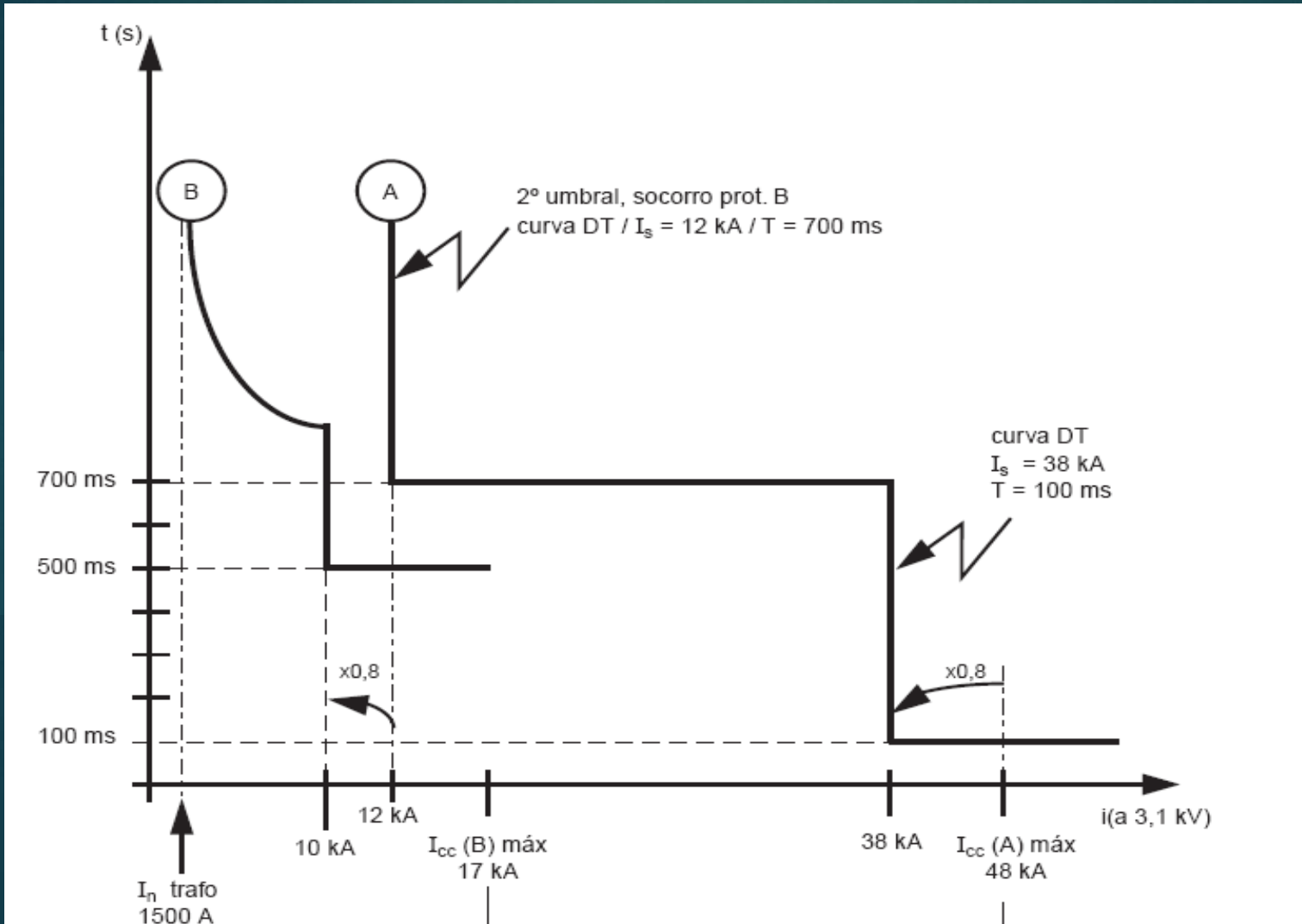
- ▶ El tiempo de despeje que se recomienda para el cálculo de la corriente admisible para un ser humano en el diseño de estaciones de MT/AT es de **$t = 1$ seg.**

- 1) Respaldo de protecciones.
- 2) Ciclos de reconexión.

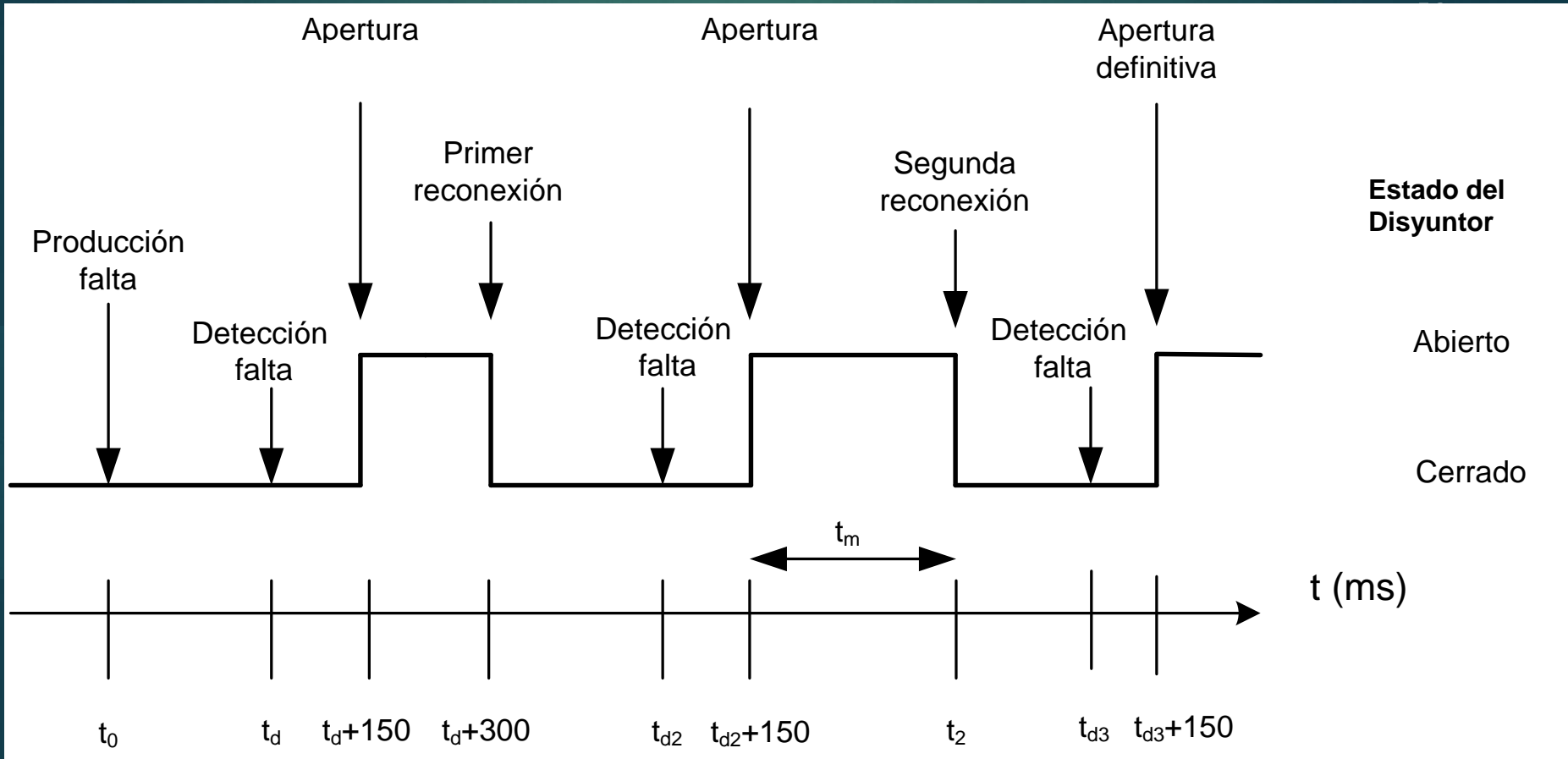
Respaldo de protecciones

14

SUBESTACIONES EN MT



Ciclos de reconexión



Control del circuito accidental de falla

► Conociendo :

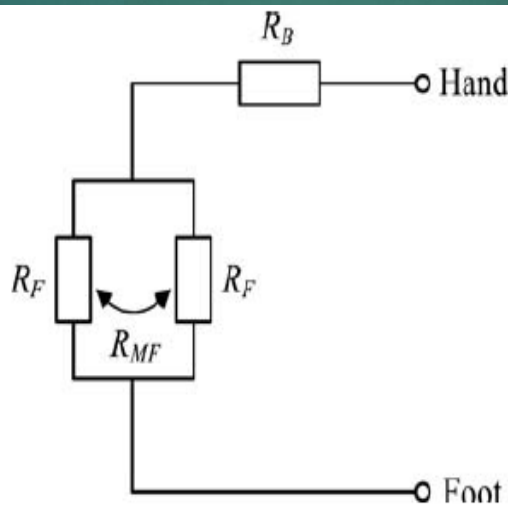
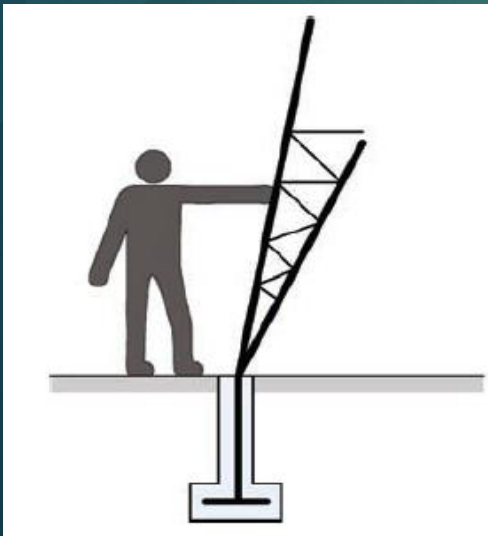
- 1) La máxima corriente de cortocircuito presunta en una instalación.
- 2) La corriente admisible para un determinado tiempo presunto de shock.

¿Cómo se puede controlar que la corriente que circule por el cuerpo sea menor a la admisible durante el tiempo de shock presunto?

Control del circuito accidental de falla

- Situaciones en las que se puede generar un accidente eléctrico: **TENSION DE TOQUE**

$$E_{\text{toque_adm}} = \left(R_B + \frac{R_F}{2} \right) \times I_{\text{adm}} = \left(R_B + \frac{R_F}{2} \right) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$



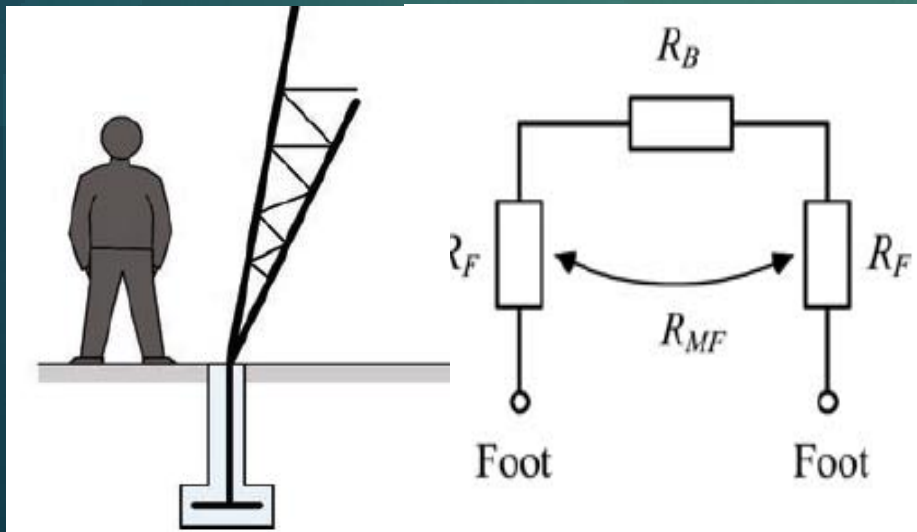
$k = 0.116$ peso 50kg

$k = 0.157$ peso 70kg

Control del circuito accidental de falla

- Situaciones en las que se puede generar un accidente eléctrico: **TENSION DE PASO**

$$E_{\text{paso_adm}} = (R_B + 2R_F) \times I_{\text{adm}} = (R_B + 2R_F) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$



$$k = 0.116 \text{ peso } 50\text{kg}$$

$$k = 0.157 \text{ peso } 70\text{kg}$$

Control del circuito accidental de falla

► TENSIONES DE CONTACTO Y PASO ADMISIBLES:

$$E_{\text{toque_adm}} = \left(R_B + \frac{R_F}{2} \right) \times I_{\text{adm}} = \left(R_B + \frac{R_F}{2} \right) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

$$E_{\text{paso_adm}} = (R_B + 2R_F) \times I_{\text{adm}} = (R_B + 2R_F) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

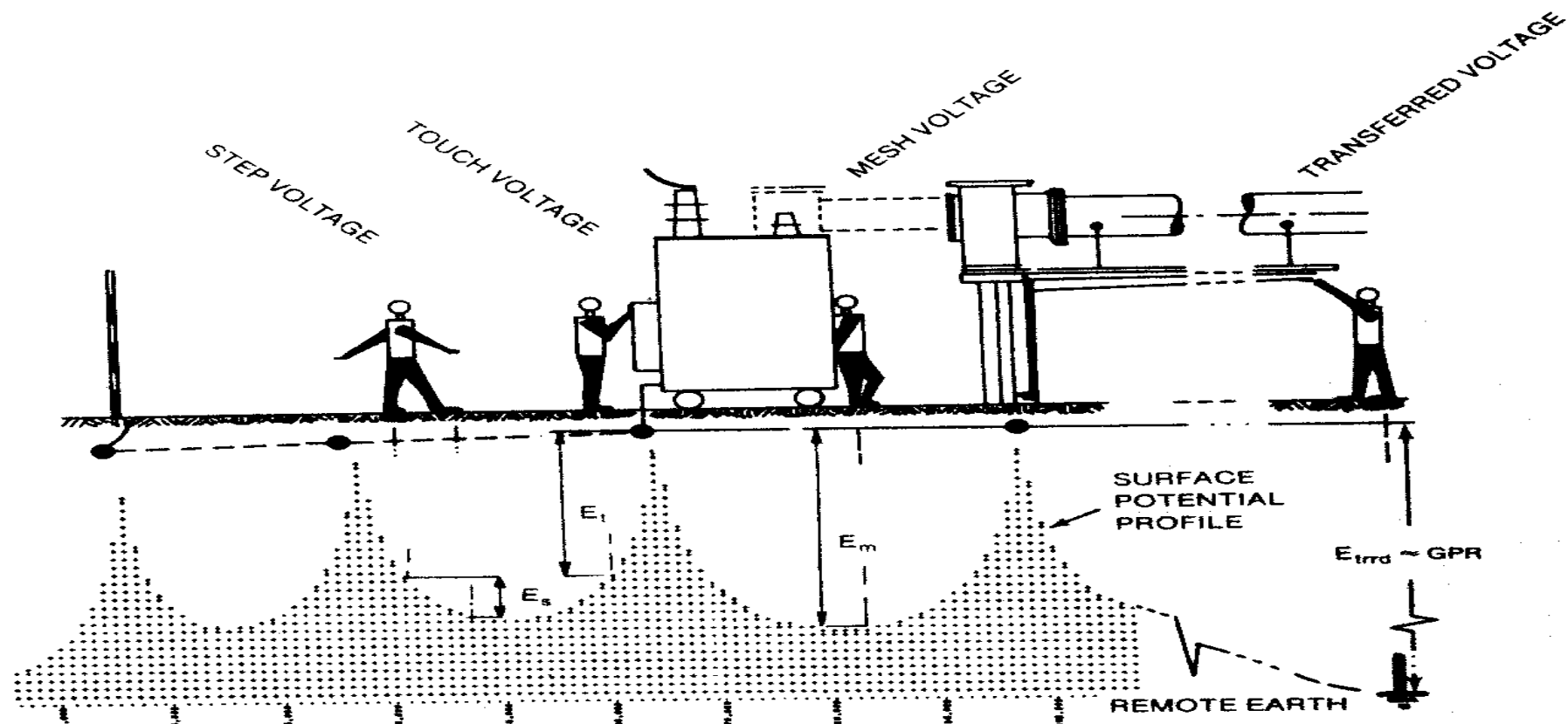
- No importa cuál es la corriente de falla, las diferencias de potencial de toque y paso admisibles están prestablecidas por la resistencia del cuerpo (R_B), los pies (R_F) y la corriente admisible.

Control del circuito accidental de falla

Se deben cumplir dos condiciones:

$$E_{\text{toque_adm}} > E_m > E_t$$

$$E_{\text{paso_adm}} > E_s$$

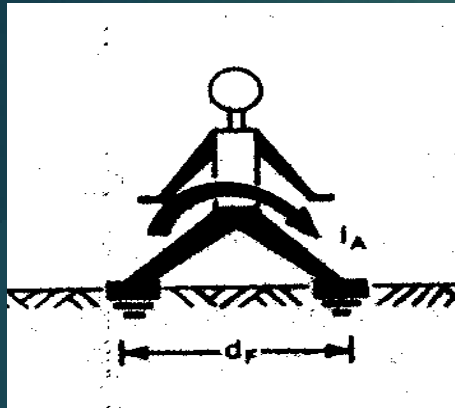


Control del circuito accidental de falla

$k = 0.116$ peso 50kg

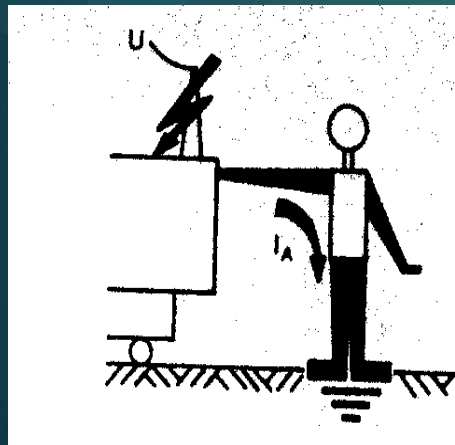
$k = 0.157$ peso 70kg

Si la resistividad aparente del suelo es ρ .



$$R_B + 2R_F = 1000 + 6\rho \quad (\Omega)$$

$$E_{\text{paso_adm}} = (1000 + 6\rho) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$



$$R_B + \frac{R_F}{2} = 1000 + 1.5\rho \quad (\Omega)$$

$$E_{\text{toque_adm}} = (1000 + 1.5\rho) \times \frac{k}{\sqrt{t_s}}$$

Capas superficiales

- ▶ Usualmente, en las instalaciones exteriores se agrega una capa de piedra partida (ρ_s , h_s).
- ▶ $\rho_s = 3000 \Omega.m$; $h_s = 0.10m - 0.20m$
- ▶ El efecto es aumentar la resistencia de contacto entre el pie y el suelo.

$$K = \frac{\rho - \rho_s}{\rho + \rho_s}$$



Capas superficiales

23

- ▶ Resistividad aparente del suelo: ρ .
- ▶ Resistividad de la capa superficial: ρ_s .
- ▶ Espesor de la capa superficial: h_s .

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

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

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

$k = 0.116$ peso 50kg

$k = 0.157$ peso 70kg

Capas superficiales

24



SUBESTACIONES EN MT

Capas superficiales

- ▶ Piedra partida: $2500 \Omega.m - 3000 \Omega.m$
 - ▶ Resistividad prácticamente constante frente a humedad.
 - ▶ Permite drenar agua hacia el suelo, humedeciendo el terreno natural y bajando su resistividad.
- ▶ Hormigón: $10^2 \Omega.m \rightarrow >10^3 \Omega.m$
 - ▶ Altamente dependiente de la humedad.
 - ▶ Dependiente de la composición:
 - ▶ Seco: $> 2000 \Omega.m$
 - ▶ Húmedo: $<100 \Omega.m$

Resistividad del suelo

- ▶ Para poder calcular las tensiones de paso y contacto admisibles, es necesario conocer la resistividad del terreno donde se ejecutará la instalación...

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

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

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

Resistividad del suelo

27

Estabilización de las tensiones admisibles con la utilización de una capa de piedra partida

SUBESTACIONES EN MT

