



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA NACIONAL

REDES DE DISTRIBUCIÓN E INSTALACIONES ELÉCTRICAS

PROFESOR: ING. ELVIO DANIEL ANTON

AUX: ING. DIEGO SALINAS

**MÉTODO DE CÁLCULO DE
INSTALACIONES DE
PUESTA A TIERRA PARA
CENTROS DE
TRANSFORMACIÓN**

OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Con el fin de facilitar a todos los proyectistas los cálculos pertinentes a **instalaciones de puesta a tierra** se expone un método de cálculo basado en **electrodos de configuración geométrica tipo.**

El proceso de diseño es el siguiente:

PROCESO DE DISEÑO



I

PROYECTO

Utilizando electrodo tipo

II

CONSTRUCCIÓN

Con la configuración elegida

III

COMPROBACIÓN

Mediante medidas

OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

En los C.T. cuyos electrodos de p.a.t. respondan a las configuraciones tipo, se omite la medición de las tensiones de paso y contacto y se las sustituye por las **mediciones del valor óhmico de la resistencia de p.a.t.**

CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DE ELECTRODOS TIPO

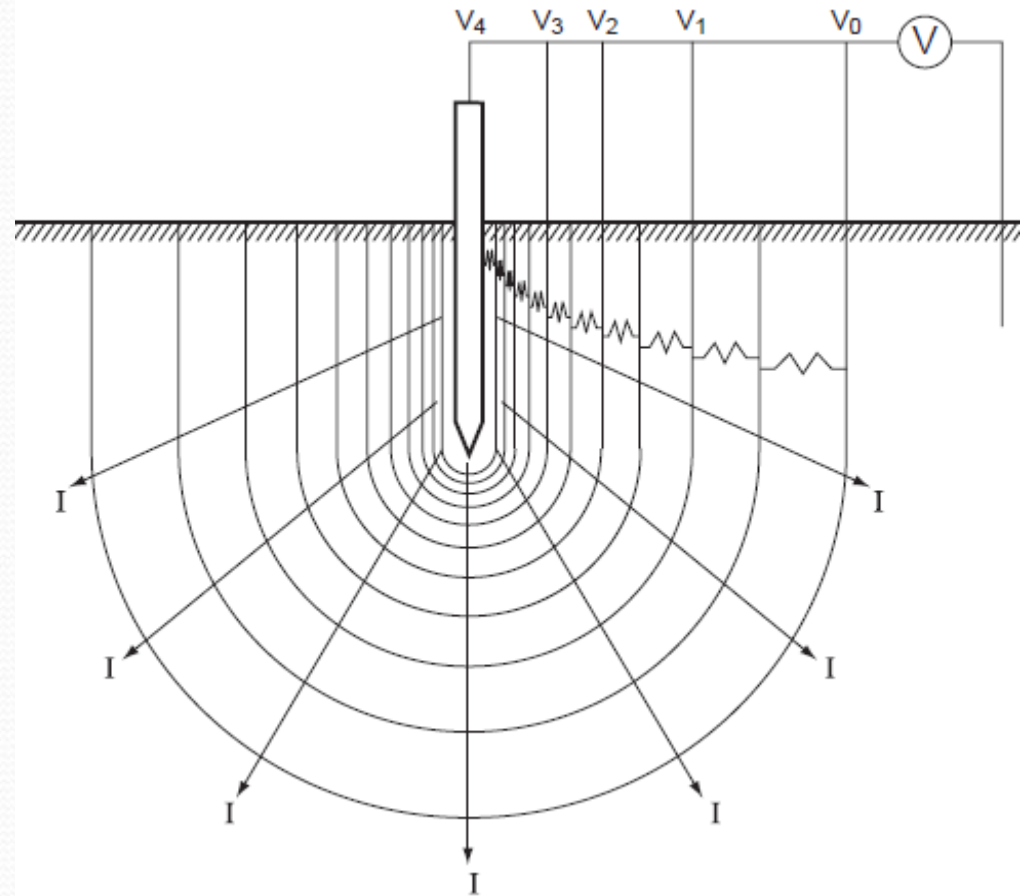
Para la obtención de la resistencia de p.a.t. y tensiones de paso y de contacto se utilizan métodos de cálculo en **extremo laboriosos**, donde necesitamos conocer tensión de servicio, tiempo de actuación de protecciones, impedancia de p.a.t. del neutro y resistividad del terreno.

CONSIDERACIONES SOBRE EL USO DE ELECTRODOS TIPO

Con este método y por medio de programas informáticos, se obtuvieron una serie de tablas que **en función de su configuración y cualquier resistividad del terreno**, con cálculos sencillos se obtienen los valores de resistencia de p.a.t. en ohmios y de tensiones de paso y contacto en voltios.

CONCEPTOS PRELIMINARES

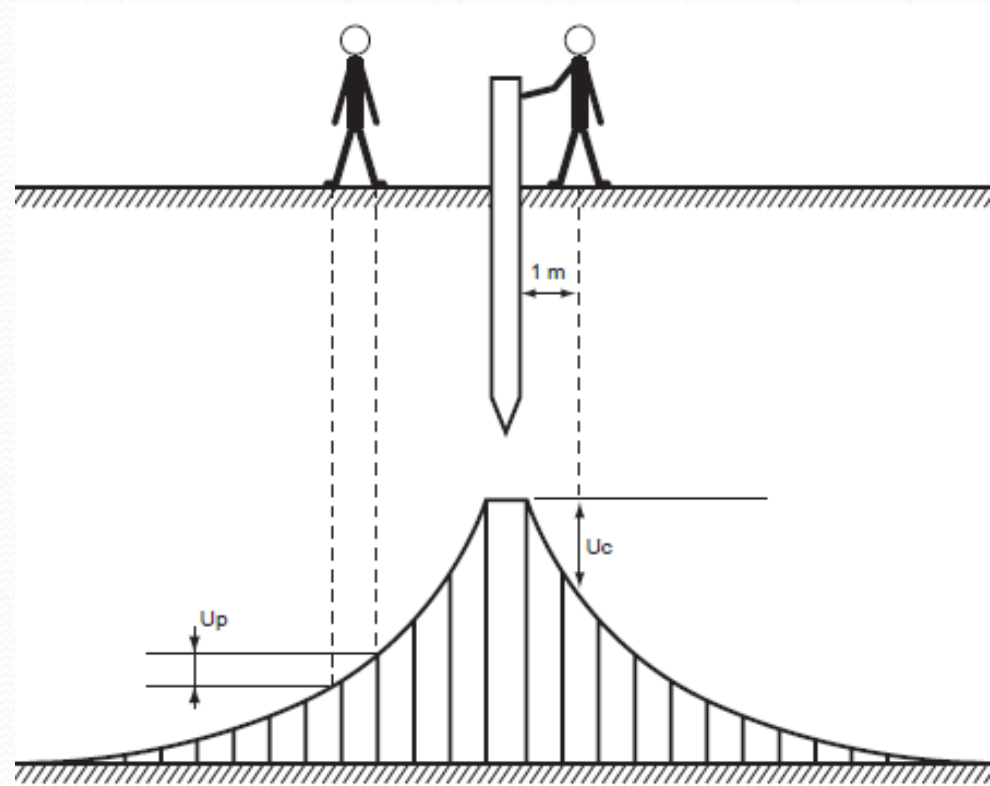
La **corriente pasa al terreno** repartiéndose por todos los puntos de la superficie del electrodo en contacto con la tierra, por tanto, en todas las direcciones a partir del mismo.



En la figura se representa este paso, en el caso de una jabalina vertical.

CONCEPTOS PRELIMINARES

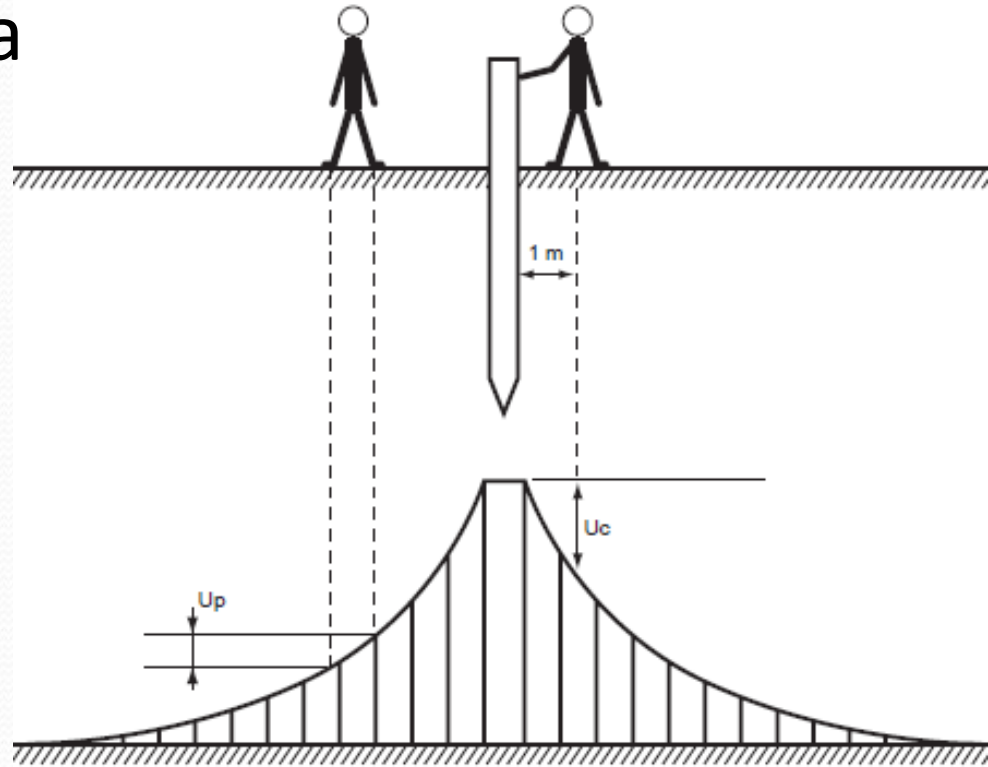
El valor de la **tensión** en cada punto del terreno en función de su **distancia del electrodo** será según la curva representada en la figura, válida para todas las direcciones con origen en el electrodo.



En los sistemas de MT, ésta tensión suele hacerse **prácticamente cero** a una distancia del electrodo de unos 20 a 30 m.

CONCEPTOS PRELIMINARES

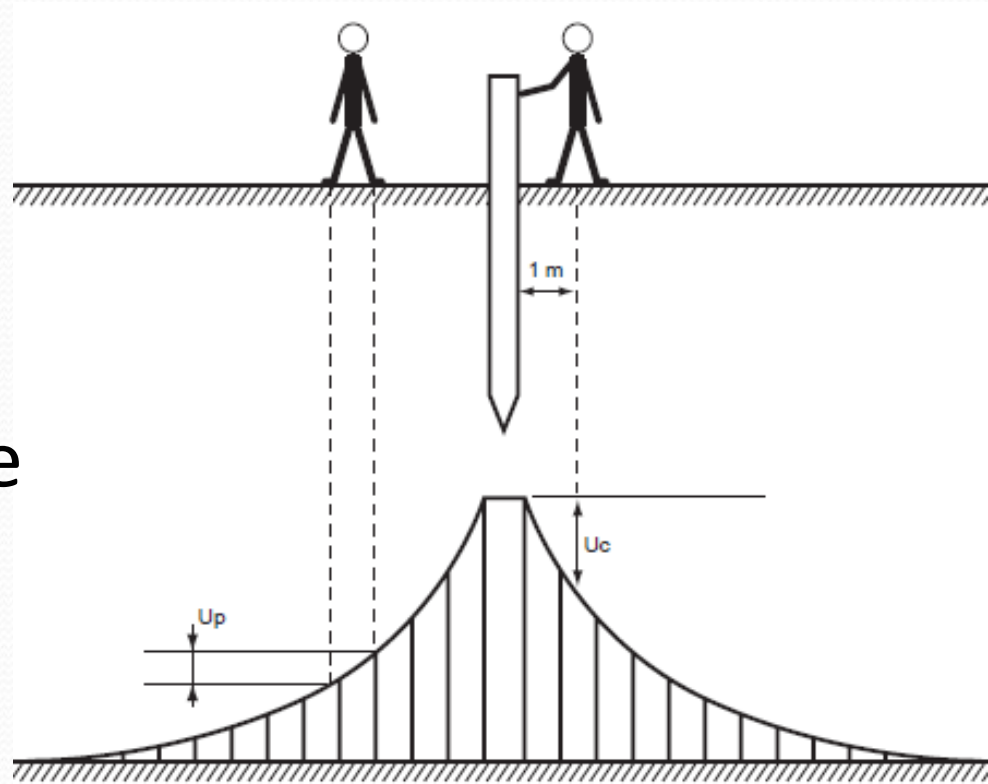
Tensión de paso Up, es la que puede quedar aplicada **entre los dos pies separados** de una persona que se encuentre pisando el terreno.



Se expresa para una **separación de 1m** entre los dos pies, y puede llegar a ser peligrosa.

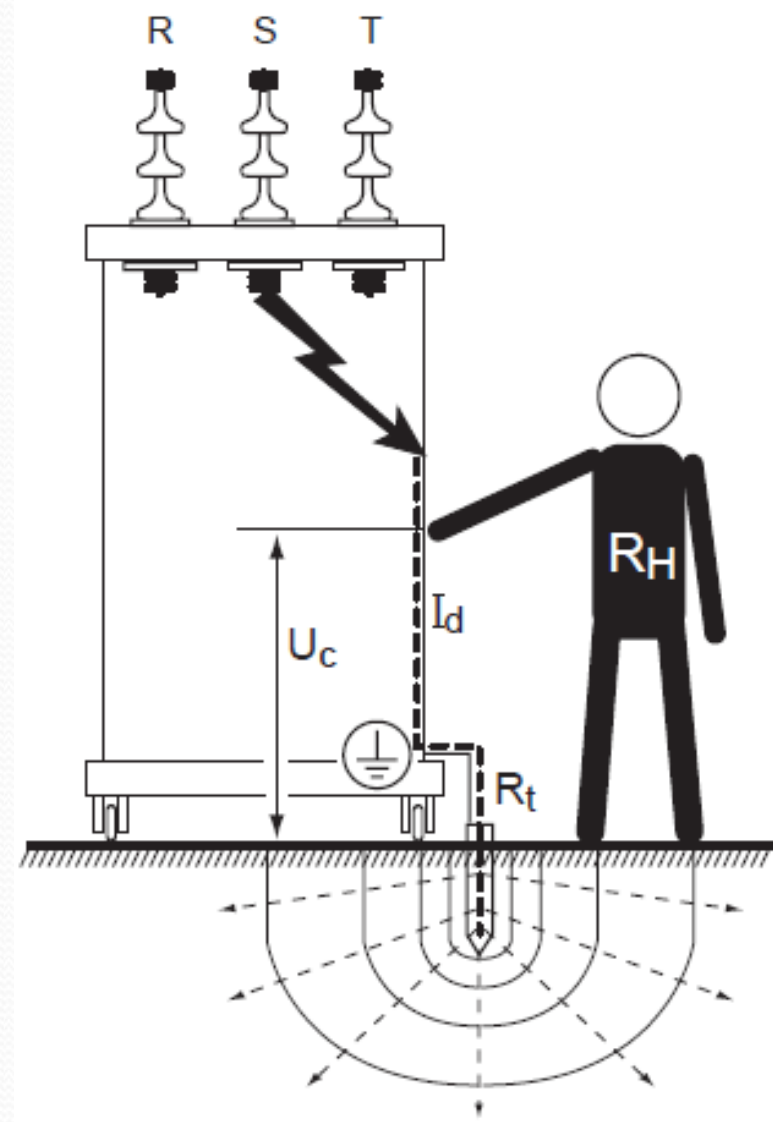
CONCEPTOS PRELIMINARES

Tensión de contacto U_c , es la diferencia de tensión que puede resultar aplicada entre **los dos pies juntos** sobre el terreno, **y otro punto del cuerpo humano** (en la práctica lo más probable es que sea una mano).



SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

La **peligrosidad de la tensión de contacto es superior a la de la tensión de paso**, pues si bien ambas pueden producir un paso de corriente por la persona, el debido a **la tensión de contacto** tiene un recorrido por el organismo que **puede afectar órganos más vitales**. Por ejemplo, un recorrido mano-pies puede afectar al corazón, pulmones, extensa parte del tejido nervioso, etc.



SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

Por este motivo, las **tensiones de contacto máximas admisibles** en función del tiempo, son **diez veces inferiores** que las de paso.

Las **tensiones máximas aplicables al cuerpo humano** son las siguientes:

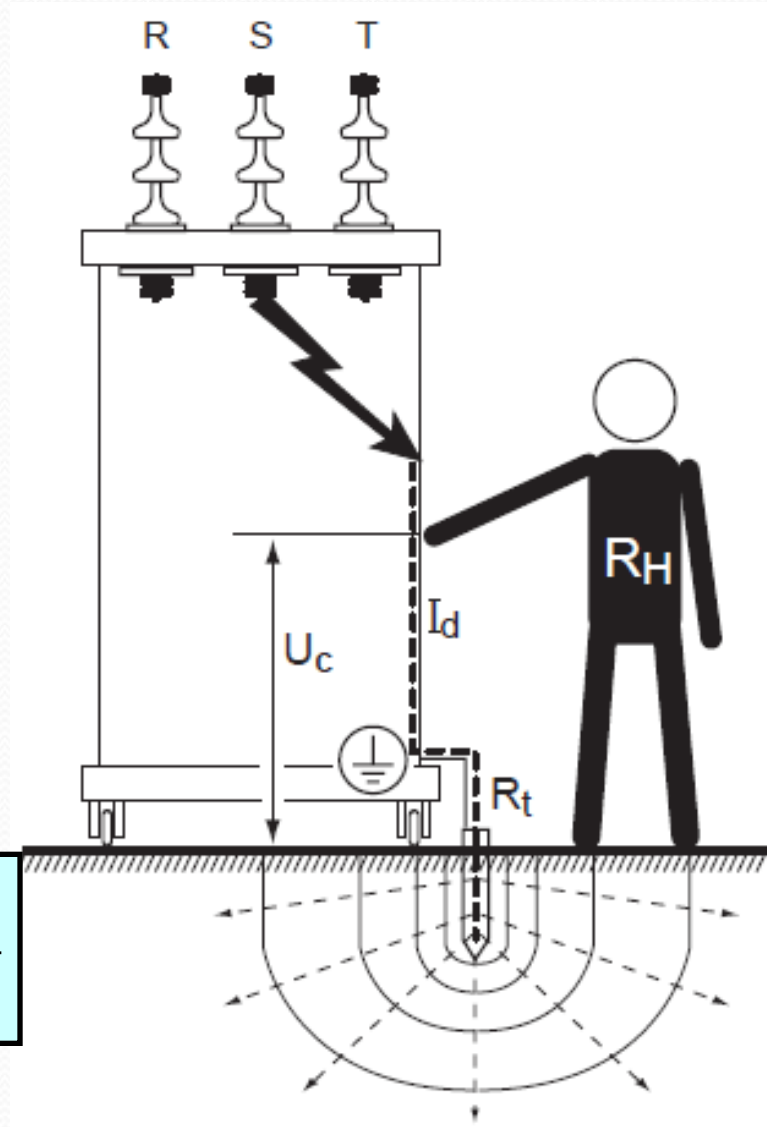
Tensión de contacto
máx. aplicable

$$U_{c.a.} = \frac{K}{t^n}$$

Tensión de paso
máx. aplicable

$$U_{p.a.} = 10 \frac{K}{t^n}$$

K y **n** son constantes en función del tiempo.

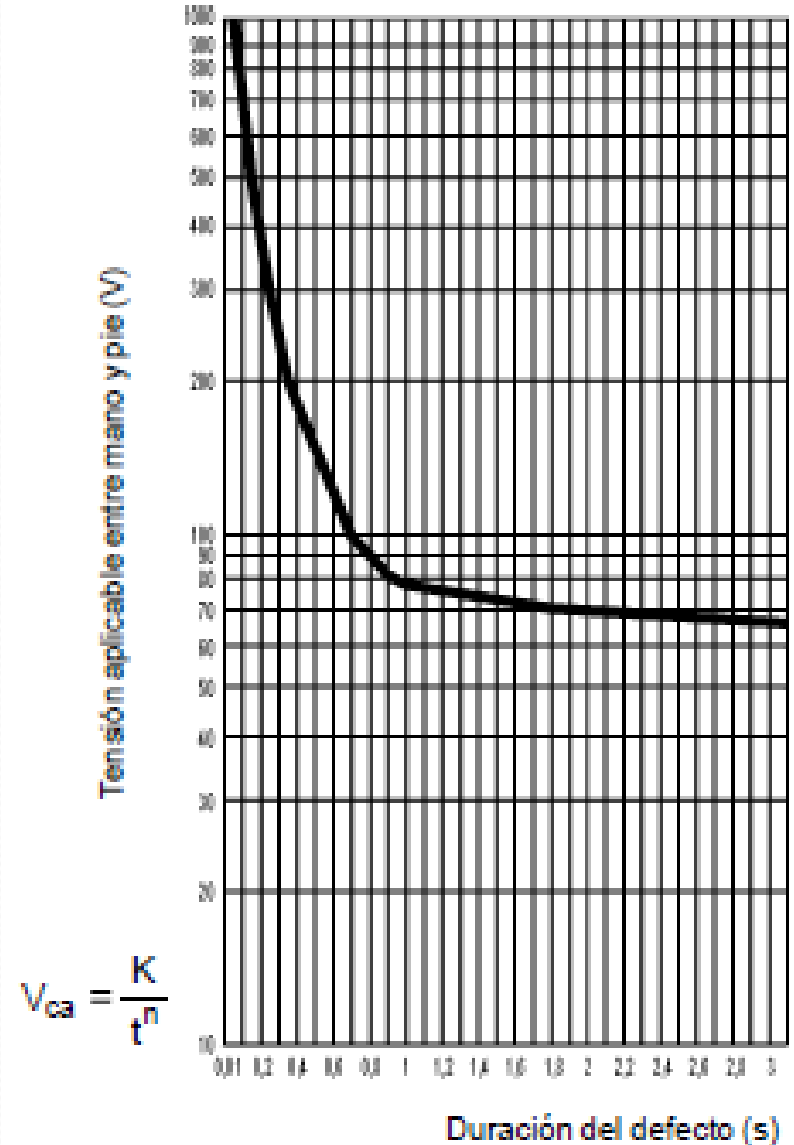


SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

$$U_{c.a.} = \frac{K}{t^n}$$

$$U_{p.a.} = 10 \frac{K}{t^n}$$

$0,9s \geq t \geq 0,1s$	$K=72$	$n=1$
$3s \geq t \geq 0,9s$	$K=78,5$	$n=0,18$
$5s \geq t \geq 3s$	$U_{ca} = 64 \text{ V}$	
$\geq 5 \text{ s}$	$U_{ca} = 50 \text{ V}$	



SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

Todas las ecuaciones responden a las siguientes simplificaciones:

- **Resistencia del cuerpo humano** $R_H = 1000 \Omega$, se desprecia la resistencia del calzado.
- **Cada pie humano se ha asimilado a un electrodo** en forma de placa metálica de 200 cm^2 , que ejerce sobre el terreno una fuerza mínima de 250 N , lo que representa una resistencia de contacto con el suelo evaluada en $3 \rho_s$, o sea $R_s = 3 \rho_s$ (R_s en Ω).

SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

Hay que distinguir entre :

- **Valores máximos** aplicables al cuerpo humano **Uca** y **Upa**.
- Tensiones que **pueden aparecer** en el terreno **Uc** y **Up**.

Estas tensiones **Uca y Upa** son la parte de **Uc y Up** que resultan aplicadas al cuerpo humano y que no deben sobrepasar los valores máximos antes indicados. Se calculan con las fórmulas siguientes:

Tensión de contacto

$$U_c = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5\rho_s}{1.000} \right)$$

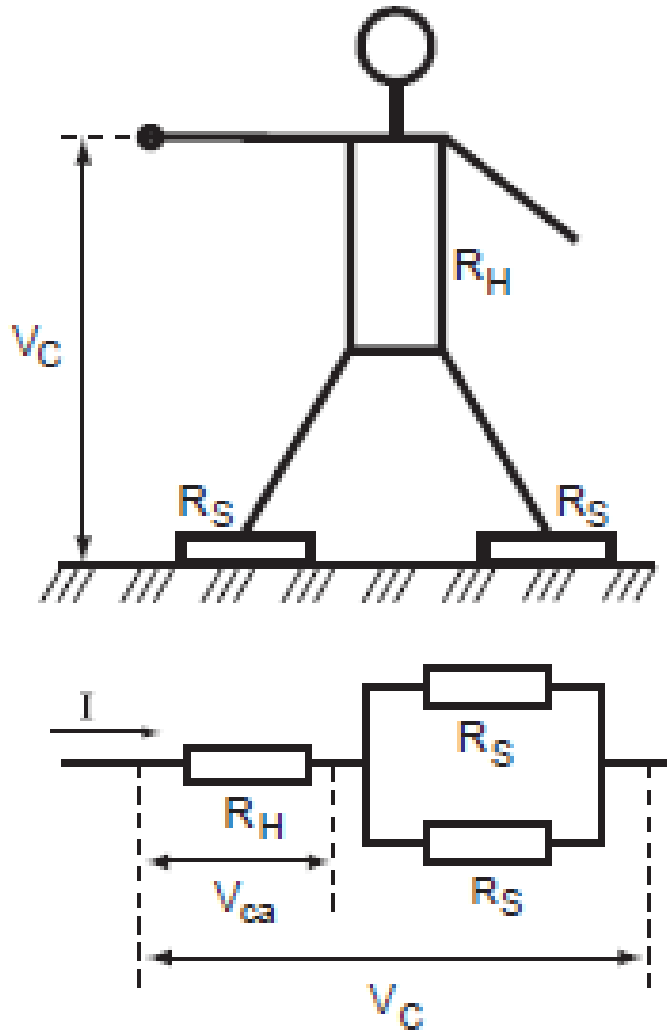
Tensión de paso

$$U_p = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1.000} \right)$$

K y **n** son constantes en función del tiempo.

SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

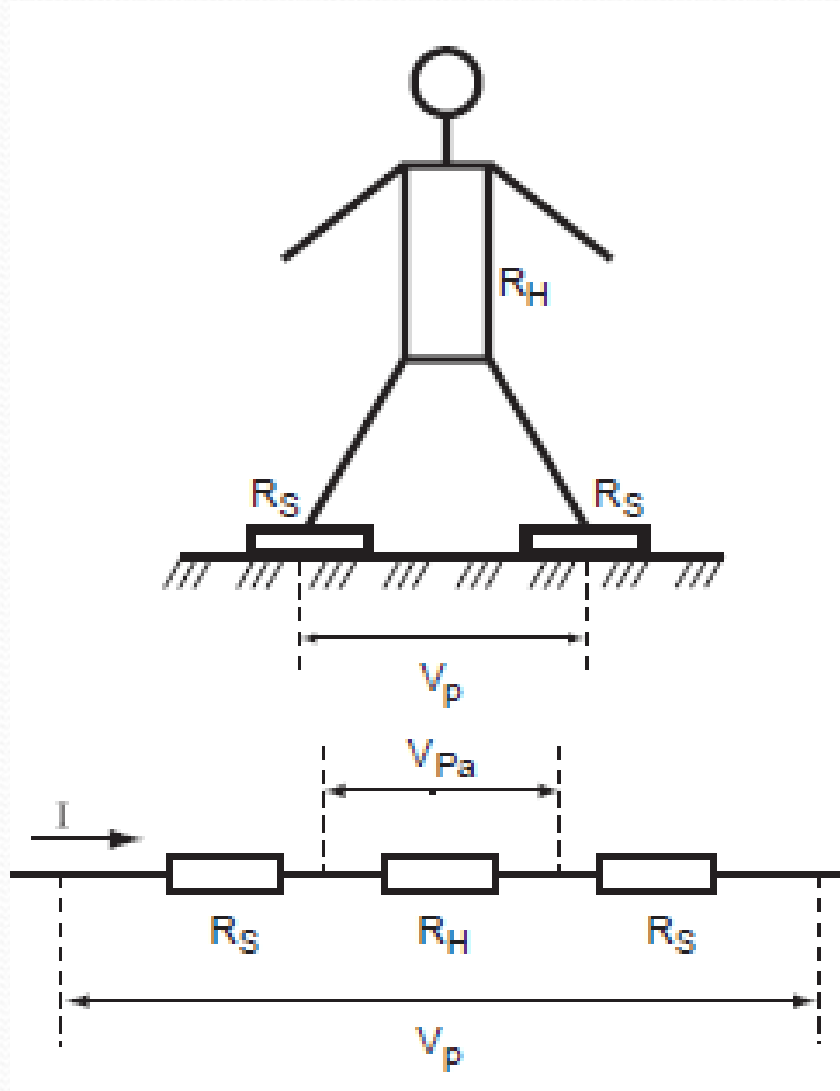
Tensión de contacto



$$I = \frac{V_{ca}}{R_H} = \frac{V_C}{R_H + \frac{R_S}{2}}$$

$$V_C = V_{ca} \frac{R_H + \frac{R_S}{2}}{R_H} = \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{1,5P_s}{1000} \right)$$

SEGURIDAD DE LAS PERSONAS



Tensión de paso

$$I = \frac{V_{pa}}{R_H} = \frac{V_p}{R_S + R_H + R_S}$$

$$V_p = V_{pa} \frac{R_H + 2R_S}{R_H} = \frac{10K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1000} \right)$$

SEGURIDAD DE LAS PERSONAS

En el caso de la tensión de paso, puede suceder que la resistividad superficial sea diferente para cada pie. Esto es habitual **en el acceso a un CT** cuando un pie está en el pavimento del umbral y el otro en el terreno sin edificar.

En este caso, la fórmula de la tensión de paso es:

Tensión de paso acceso

$$U_{pacc} = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho_s + 3\rho'_s}{1.000} \right)$$

ρ_s y ρ'_s son las resistividades del terreno en cada pie.

K y n son constantes en función del tiempo.

SOBRETENSIONES ADMISIBLES PARA LAS INSTALACIONES DE BAJA TENSIÓN DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Con objeto de evitar que un defecto de aislamiento en el lado de A.T. deteriore los elementos de B.T. del C.T. la p.a.t. debe tener un efecto limitador de forma que la **Tensión de defecto U'_d** sea inferior a la que soportan dichos elementos **U_{BT}** .

$$U'_d = R_t \cdot I'_d \quad I'_d : \text{corriente de defecto}$$

R_t : resistencia de p.a.t.

$$U_{BT} \geq U'_d$$

$I'_d >$ valor de arranque de las protecciones

Valores usuales de U'_d

4.000 - 6.000 - 8.000 - 10.000 V

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA CONFIGURACIÓN TIPO

Son los denominados **valores unitarios**, a continuación analizamos el caso de una jabalina:

$$R_t = \frac{\rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \left(\frac{4 \cdot L}{d} \right) \rightarrow R_t = \rho \cdot K_r$$

K_r es función de la longitud **L** y del diámetro **d** de la jabalina.

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA CONFIGURACIÓN TIPO

Son los denominados **valores unitarios**, a continuación analizamos el caso de una jabalina:

$$U_x = \frac{I'_d \cdot \rho}{2 \cdot \pi \cdot L} \ln \left(\frac{L + \sqrt{X^2 + L^2}}{X} \right) \rightarrow U_x = \rho \cdot I'_d \cdot K_x$$

K_x es función de la longitud **L** y de la distancia **X** a la jabalina.

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA CONFIGURACIÓN TIPO

Con lo cual, para una longitud y diámetro de jabalina concretos y un punto a la distancia “X” fijo, **Kr** y **Kx** son **parámetros constantes**.

Se determinan las tensiones de paso y contacto de la siguiente forma:

$$U'_p = U_{X1} - U_{X2} = \rho \cdot I'_d \cdot K_{X1} - \rho \cdot I'_d \cdot K_{X2} = \rho \cdot I'_d \cdot K_p$$

$$U'_c = R_t \cdot I'_d - U_{X1} = \rho \cdot I'_d \cdot K_r - \rho \cdot I'_d \cdot K_{X1} = \rho \cdot I'_d \cdot K_c$$

PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE LA CONFIGURACIÓN TIPO

$$U'_p = \rho \cdot I'_d \cdot K_p$$

$$U'_c = \rho \cdot I'_d \cdot K_c$$


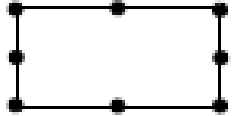

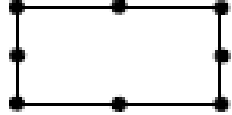
Para el caso de electrodos más complicados se llega igualmente a expresiones de **Kr**, **Kp** y **Kc** para cada geometría definida.

$$K_p = \textit{tensión unitaria de paso en } \frac{V}{(\Omega \cdot m) \cdot A}$$

$$K_c = \textit{tensión unitaria de contacto en } \frac{V}{(\Omega \cdot m) \cdot A}$$

Cuadrado de 4,0 x 4,0 m

Sección conductor = 50 mm²; diámetro picas = 14 mm; L_P = longitud de la pica en m;
 K_r: en Ω/Ω.m; K_p, K_c = K_{p(acc)}: en V/(Ω.m)(A)

Configuración	LP (m)	Resistencia K _r	Tensión de paso K _p	Tensión de contacto ext. K _c = K _{p(acc)}	Código de la configuración	
Profundidad = 0,5 m	Sin picas	-	0,123	0,0252	0,0753	40-40/5/00
	4 picas 	2	0,092	0,0210	0,0461	40-40/5/42
		4	0,075	0,0164	0,0330	40-40/5/44
		6	0,064	0,0134	0,0254	40-40/5/46
		8	0,056	0,0113	0,0205	40-40/5/48
	8 picas 	2	0,082	0,0181	0,0371	40-40/5/82
		4	0,063	0,0132	0,0237	40-40/5/84
		6	0,053	0,0103	0,0170	40-40/5/86
		8	0,045	0,0084	0,0131	40-40/5/88
	Profundidad = 0,8 m	Sin picas	-	0,117	0,0176	0,0717
4 picas 		2	0,089	0,0144	0,0447	40-40/8/42
		4	0,073	0,0114	0,0323	40-40/8/44
		6	0,062	0,0094	0,0250	40-40/8/46
		8	0,054	0,0079	0,0203	40-40/8/48
8 picas 		2	0,079	0,0130	0,0359	40-40/8/82
		4	0,061	0,0096	0,0233	40-40/8/84
		6	0,051	0,0075	0,0169	40-40/8/86
		8	0,044	0,0062	0,0131	40-40/8/88

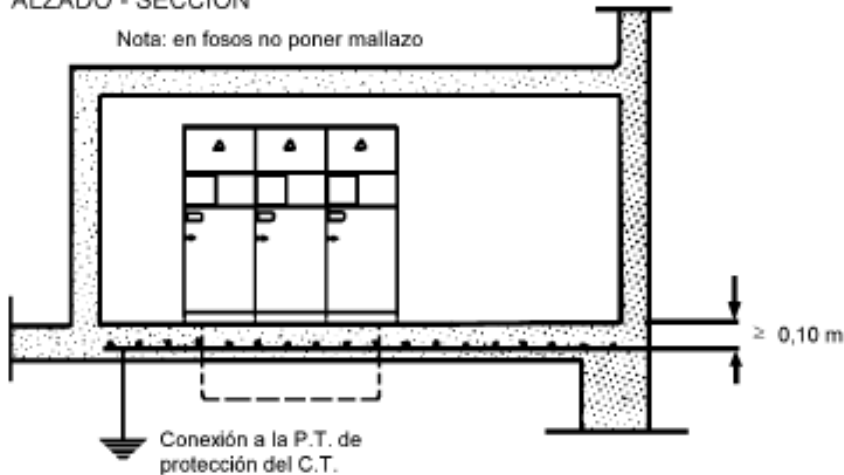
MEDIDAS ADICIONALES DE SEGURIDAD

Se utilizan **medidas adicionales** a fin de reducir los riesgos de las personas, entre las medidas aceptadas se encuentran:

- 1- Disponer de **suelos, pavimentos y pinturas** que aíslen suficientemente de tierra las zonas peligrosas.
- 2- Establecer **conexiones equipotenciales** entre la zona de acceso para el personal y todos los elementos conductores accesibles.

MEDIDAS ADICIONALES DE SEGURIDAD

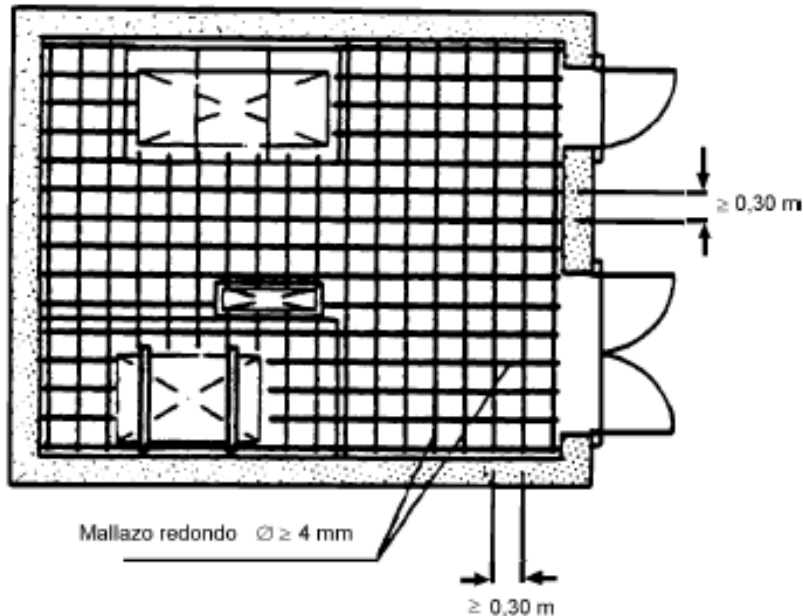
ALZADO - SECCIÓN



Importante!

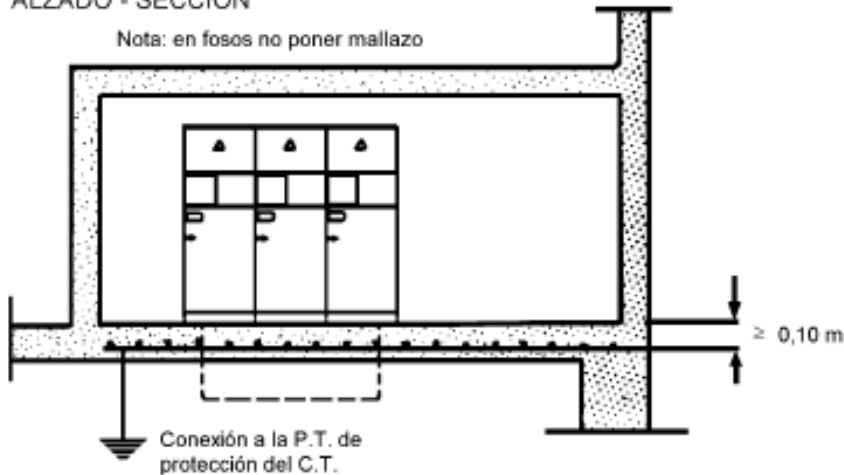
Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior **no tendrán** contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión debido a defectos. Por tanto, **no se conectarán** a este mallado interior.

PLANTA

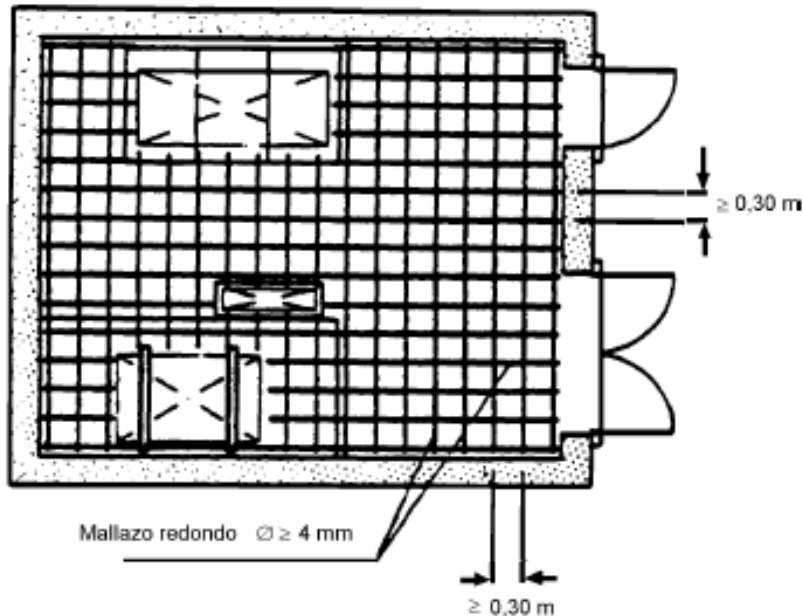


MEDIDAS ADICIONALES DE SEGURIDAD

ALZADO - SECCIÓN



PLANTA



Con estas medidas se consigue que la persona que deba acceder a una parte que, de forma eventual, pueda ponerse en tensión, esté situada sobre una **superficie equipotencial**, con lo que desaparece el riesgo inherente a la **tensión de contacto y de paso interior**.

SEPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Puesta a tierra de protección

Se conectan a esta toma de tierra las partes metálicas interiores del CT que normalmente están sin tensión, pero que pueden estarlo a consecuencia de averías, accidentes, descargas atmosféricas o sobretensiones.

- las carcasas de los transformadores,
- los chasis y bastidores de los aparatos de maniobra,
- las envolventes y armazones de conjuntos de MT (cabinas, celdas),
- los tableros con aparatos y elementos de BT,
- las pantallas y/o blindajes de los cables MT.

En general pues, todos aquellos elementos metálicos que contengan y/o soporten partes en tensión, las cuales, por un fallo o contorneo de su aislamiento, a masa, puedan transmitirles tensión.

SEPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Puesta a tierra de protección

Importante!

Se exceptúan de conectar a esta toma de tierra de protección, los elementos metálicos del CT accesibles desde el exterior, y que no contienen ni soportan partes en tensión. Por tanto, las puertas y sus marcos, las persianas con sus rejillas, para la entrada y la salida del aire de ventilación, etc.

SEPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Puesta a tierra de servicio

Se conectan a esta puesta a tierra, puntos o elementos que forman parte de los circuitos eléctricos de MT y de BT.

Concretamente:

En los transformadores, **el punto neutro del secundario BT**, **directamente** cuando se trata de distribuciones con régimen de neutro TN o TT, **o a través de una impedancia** cuando son con régimen IT.

SEPARACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

Si se verifica que:

$$U'_d = R_t \cdot I'_d \leq 1.200 \text{ V}$$

Se podría disponer de una puesta a tierra única para protección y servicio.

Si no se cumple esta condición deberán separarse una distancia:

$$D \geq \frac{\rho \cdot I'_d}{2 \cdot \pi \cdot 1.200}$$

Más allá de que el resultado puede ser válido, se respetará la normativa **AEA 95401** “Reglamentación sobre Centros de Transformación y Suministro en Media Tensión” que establece que la primera jabalina se instalará a una distancia igual o mayor a **20 metros del CT**.

ORDEN DE LOS CÁLCULOS

1

- Investigación de las características del terreno.

2

- Cálculo de corrientes máx de p.a.t. y tiempo de defecto

3

- Diseño preliminar con configuración tipo

4

- Cálculo de resistencia de p.a.t.

5

- Cálculo de las **tensiones admisibles** U_p , U_c , U_{acc}

6

- A partir de los **valores unitarios** calcular U'_p y U'_c (U'_{acc})

7

- Comprobación de que U_p y $U_{acc} \geq U'_p$ y U'_c (U'_{acc})

8

- Comprobación de que U_d es igual o inferior a U_{BT}

9

- Si alguna **no** se cumple elegir una **nueva configuración**

EJEMPLO DE CÁLCULO

- Tensión de alimentación red **$U = 20 \text{ kV}$**
- Neutro red puesto a tierra a través de impedancia **$Z_n \approx X_n = j25 \Omega$**
- Duración máxima paso corriente falla **$t = 0,5 \text{ seg}$**
- Intensidad de arranque de las protecciones = **50 A**
- Nivel de aislamiento **$U_{BT} = 10 \text{ kV}$**
- Intensidad de defecto a tierra (máxima) **$I_d = 500 \text{ A}$**
- Resistividad del terreno **$\rho = 200 \Omega \cdot \text{m}$**
- Resistividad del hormigón **$r_h = 3000 \Omega \cdot \text{m}$**

EJEMPLO DE CÁLCULO

1- Cálculo de la resistencia máxima de las masas.

$$R_t = \frac{U_{BT}}{I_d} = \frac{10000}{500} = 20\Omega$$

EJEMPLO DE CÁLCULO

2- Selección de configuración tipo.

$$K_r = \frac{R_t}{\rho} = \frac{20}{200} = 0,100 \frac{\Omega}{\Omega \cdot m}$$

Configuración del sistema de tierra (con margen de seguridad)

- Código de la configuración (UNESA) = **40-30/8/82**
- Geometría del sistema = rectángulo **4 x 3 m**
- Sección del conductor = **50 mm²**
- Profundidad = **0,8 m**
- Número de jabalinas = **8**
- Longitud de las jabalinas LP = **2 m**
- Diámetro de las jabalinas = **14,6 mm**
- Resistencia **Kr = 0,084 $\Omega/\Omega \cdot m$**
- Coef. tensión de paso **Kp = 0,0143 V/(($\Omega \cdot m$)).A**
- Coef. tensión de contacto exterior **Kc = Kp (acc) = 0,0389 V/(($\Omega \cdot m$)).A**

EJEMPLO DE CÁLCULO

Resistencia de p.a.t.

$$R'_t = \rho \cdot K_r = 200 \cdot 0,084 = 16,8 \Omega$$

Intensidad de defecto

$$I'_d = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(Rn + Rt)^2 + Xn^2}} = \frac{U}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(0 + 16,8)^2 + 25^2}} = 384 \text{ A}$$

Tensiones de paso exterior y contacto exterior (acceso)

$$U'_p = \rho \cdot I'_d \cdot K_p = 200 \cdot 384 \cdot 0,0143 = 1.098 \text{ V}$$

$$U'_{pacc} = \rho \cdot I'_d \cdot K_c = 200 \cdot 384 \cdot 0,0389 = 2.987 \text{ V}$$

EJEMPLO DE CÁLCULO

Tensión de defecto

$$U'_d = R'_t \cdot I'_d = 16,8 \cdot 384 = 6.451 \text{ V}$$

Tensiones admisibles

$$U_p = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6\rho_s}{1.000} \right) = 3.168 \text{ V}$$

$$U_{pacc} = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{3\rho_s + 3\rho'_s}{1.000} \right) = 15.264 \text{ V}$$

EJEMPLO DE CÁLCULO

CONCEPTO	VALOR CALCULADO	CONDICIÓN	VALOR ADMISIBLE
TENSIÓN DE PASO EN EL EXTERIOR	1.098	\leq	3.168
TENSION DE CONTACTO	2.987	\leq	15.264
TENSION DE DEFECTO	6.451	\leq	10.000