

**ESPECIFICACIONES PARTICULARES PARA EL DISEÑO DE
PUESTAS A TIERRA
PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN
DE TENSIÓN NOMINAL ≤ 30 kV**

ESPECIFICACIONES PARTICULARES PARA EL DISEÑO DE PUESTAS A TIERRA PARA CENTROS DE TRANSFORMACIÓN DE TENSIÓN NOMINAL ≤ 30 kV

ÍNDICE

	Página
1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN	3
2 UTILIZACIÓN	3
3 REGLAMENTACIÓN	4
4 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS	4
5 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA.....	4
5.1 Generalidades.....	4
5.2 Elementos de los sistemas de puesta a tierra y condiciones de montaje.....	5
5.3 Dimensionamiento a frecuencia industrial del sistema de puesta a tierra de protección.....	10
5.4 Verificación del diseño del sistema de puesta a tierra de protección	14
6 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN CONTACTO Y DE PASO APLICADA	32
7 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN EN CAMPO DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE CENTROS DE TRANSFORMACIÓN	34
ANEXO 1. TABLAS	45
ANEXO 2. HOJA DE TOMA DE DATOS PARA LA VERIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA	57
ANEXO 3. DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES DESDE EL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA AL EDIFICIO (PARA CTOU O CTCOU)	58
ANEXO 4. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PROCEDIMIENTO	63

1 OBJETO Y CAMPO DE APLICACIÓN

Este documento establece y justifica las configuraciones de electrodos y medidas adoptadas, para las puestas a tierra que han de emplearse en los Centros de Transformación, para las tensiones ≤ 30 kV, que garantizan la seguridad para las personas, atendiendo a las exigencias establecidas en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de Alta Tensión, en adelante RAT. Así mismo se dan los criterios para el diseño, instalación y ensayo de los sistemas de puesta a tierra de manera que sean eficaces en todas las circunstancias y mantengan las tensiones de paso y contacto dentro de niveles aceptables.

Este documento anula y sustituye al MT 2.11.34 “Especificaciones particulares para el diseño de puestas a tierra en Centros de Transformación en Edificios de Otros Usos, de tensión nominal ≤ 30 kV”.

Los documentos informativos recogidos en el Anexo B del MT 2.03.20 no han sido aprobados por la Administración y por tanto tienen únicamente carácter informativo. En todos estos casos podrán utilizarse bien las soluciones propuestas en dichos documentos, o bien otras especificaciones o referencias normativas (normas UNE o equivalentes) justificadas por el proyectista.

2 UTILIZACIÓN

Este documento se utilizará como referencia en los siguientes Proyectos Tipo de Centros de Transformación de i-DE Grupo Iberdrola (en adelante i-DE):

Tabla 1. Descripción de los proyectos tipo y tensión nominal de red en la que se pueden aplicar.

MT	Título	Designación de Envolvente	Tensión (kV)
2.11.01	Proyecto tipo para Centro de Transformación prefabricado de superficie	CTS	≤ 30
2.11.02	Proyecto tipo para Centro de Transformación prefabricado subterráneo	CTPS	≤ 30
2.11.03	Proyecto tipo para Centro de Transformación en edificio de otros usos	CTOU CTCOU	≤ 30 ≤ 20
2.11.05	Proyecto tipo para Centros de Transformación intemperie compacto (CTIC bajo poste)	CTIC	≤ 30
2.11.10	Proyecto Tipo para Centro de Transformación compacto en envolvente prefabricada de superficie	CTC	≤ 20
2.11.20	Proyecto tipo para Centro de Seccionamiento, para conexión de instalaciones particulares	CSI	≤ 30

En este documento se utilizará la “Designación de Envolvente” para referirse a los Centros de Transformación diferentes de cada tipo.

3 REGLAMENTACIÓN

En la redacción de este documento se han tenido en cuenta todas las especificaciones relativas a Centros de Transformación contenidas en el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de Alta Tensión, aprobado por el Real Decreto 337/2014, de 9 de Mayo.

Además se han aplicado los documentos de i-DE que le afectan, y en su defecto las Normas UNE, EN y documentos de armonización HD. Así como cualquier otra reglamentación nacional, autonómica o local vigente y que sea aplicable.

4 PLIEGO DE CONDICIONES TÉCNICAS

La ejecución de las instalaciones a que se refiere el presente Proyecto Tipo de i-DE, se ajustarán a todo lo indicado en el Capítulo IV “Ejecución y Recepción Técnica de las instalaciones”, del MT 2.03.20 “Especificaciones Particulares para las Instalaciones de Alta Tensión (hasta 30 kV) y Baja Tensión”.

5 SISTEMA DE PUESTA A TIERRA

5.1 Generalidades

Los sistemas de puesta a tierra especificados en este Manual Técnico, cumplen los requisitos siguientes:

1. Resistir los esfuerzos mecánicos y la corrosión.
2. Resistir, desde un punto de vista térmico, la corriente de falta más elevada determinada en el cálculo.
3. Garantizar la seguridad de las personas con respecto a tensiones que aparezcan durante una falta a tierra en los sistemas de puesta a tierra.
4. Proteger de daños a propiedades y equipos y garantizar la fiabilidad del centro de transformación.

Estos requisitos dependen fundamentalmente de:

- 1.- Método de puesta a tierra del neutro de la red: neutro aislado, neutro puesto a tierra mediante impedancia o neutro rígido a tierra.
- 2.- Del tipo de Centro de Transformación según los Proyectos Tipo indicados en la tabla 1.
- 3.- Conexión del sistema de puesta a tierra a través de las pantallas de cables. Se pueden distinguir 2 casos:

- Centro de Transformación al que se conectan al menos una línea subterránea cuyas pantallas estén conectadas a tierra en el otro extremo (otro Centro de Transformación, subestación o apoyo con puesta a tierra). En adelante este caso se referirá como Centro de Transformación con **pantallas conectadas**.
- Cualquier otra situación que no se ajuste al primer caso. En adelante este caso se referirá como Centro de Transformación con **pantallas desconectadas**.

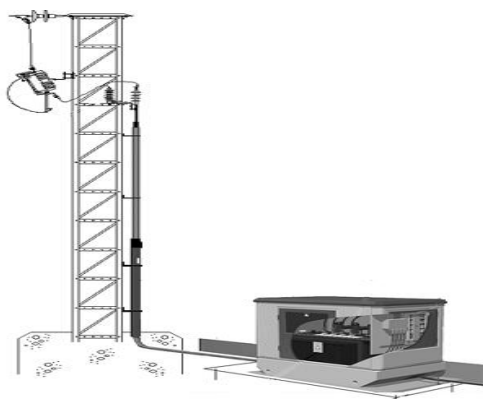


Figura 1. Ejemplo de un Centro de Transformación con pantallas desconectadas.

En todo Centro de Transformación cabe distinguir dos sistemas de puesta a tierra:

- Sistema de puesta a tierra de protección, constituido por las líneas de tierra (interior del CT) y los correspondientes electrodos de puesta a tierra (enterrado) que conexian directamente a tierra las partes conductoras de los elementos de la instalación no sometidos normalmente a tensión eléctrica, pero que pudieran ser puestos en tensión por averías o contactos accidentales, a fin de proteger a las personas contra contactos con tensiones peligrosas.
- Sistema de puesta a tierra de servicio, constituido por la línea de tierra (interior del CT) y los correspondientes electrodos de puesta a tierra (enterrado) que conexian directamente a tierra el neutro de Baja Tensión.

5.2 Elementos de los sistemas de puesta a tierra y condiciones de montaje

5.2.1 Generalidades

Un sistema de puesta a tierra, de forma general, está constituido por uno o varios electrodos de puesta a tierra enterrados en el suelo y por las líneas (líneas de enlace con el electrodo de puesta a tierra y líneas de tierra) que conectan dichos electrodos a los elementos que deban quedar puestos a tierra.

Los electrodos de puesta a tierra empleados son de material, diseño, dimensiones, colocación en el terreno y número apropiados para la naturaleza y condiciones del terreno, de modo que garanticen una tensión de contacto dentro de los niveles aceptables.

El tipo o modelo, dimensiones y colocación (bajo la superficie del terreno) de los electrodos de puesta a tierra, que se incluyen en el presente documento, figurarán claramente en un plano que

formará parte del Manual Técnico de ejecución del Centro de Transformación, de modo que pueda ser aprobado por el órgano competente de la Administración.

5.2.2 Electrodo de puesta a tierra

Los electrodos de puesta a tierra se dispondrán de las siguientes formas, combinándolas entre ellas si es necesario:

- a) Electrodos horizontales de puesta a tierra constituidos por cables enterrados, desnudos, de cobre de 50 mm², según documento informativo NI 54.10.01 “Especificación Particular - Conductores desnudos de cobre para líneas eléctricas aéreas y subestaciones de Alta Tensión”.
- b) Picas de tierra verticales, de acero cobrizado de 14 mm de diámetro, y de 2 metros de longitud, del tipo PL 14-2000. Puede tomarse como referencia para las mismas el documento informativo NI 50.26.01 “Picas cilíndricas de acero-cobre”, que podrán estar formadas por elementos empalmables, u otras referencias o especificaciones normativas (normas UNE o equivalentes) justificadas por el proyectista.

5.2.2.1 Instalación de electrodos horizontales de puesta a tierra

El electrodo de puesta a tierra estará situado a una profundidad suficiente para evitar el efecto de la congelación del agua ocluida en el terreno. Los electrodos horizontales de puesta a tierra se situarán a una profundidad mínima de 0,5 m, salvo en los Centro de Transformación Prefabricados Subterráneos (CTPS), que se situarán a 1 m. Esta medida garantiza una cierta protección mecánica.

Los electrodos horizontales de puesta a tierra se colocarán en el fondo de una zanja de forma que:

- a) Se rodeen con tierra ligeramente apisonada.
- b) Las piedras o grava no estén directamente en contacto con los electrodos de puesta a tierra enterrados.
- c) Cuando el suelo natural sea corrosivo para el tipo de metal que constituye el electrodo, el suelo se reemplace por un relleno adecuado.

5.2.2.2 Instalación de picas de tierra verticales

Las picas verticales son particularmente ventajosas cuando la resistividad del suelo decrece mucho con la profundidad. Se clavarán en el suelo empleando herramientas apropiadas para evitar que los electrodos se dañen durante su hincado.

La parte superior de cada pica siempre quedará situada debajo del nivel de tierra a 0,5 m, como mínimo, salvo en los CTPS, que quedará situada a 1 m.

5.2.2.3 Unión de los electrodos de puesta a tierra

Las uniones utilizadas para conectar las partes conductoras de una red de tierras, con los electrodos de puesta a tierra dentro de la propia red, tendrán las dimensiones adecuadas para asegurar una conducción eléctrica y un esfuerzo térmico y mecánico equivalente a los de los propios electrodos.

Los electrodos de puesta a tierra serán resistentes a la corrosión y no deben ser susceptibles de crear pares galvánicos.

Las uniones usadas para el ensamblaje de picas deben tener el mismo esfuerzo mecánico que las picas mismas y deben resistir fatigas mecánicas durante su colocación. Cuando se tengan que conectar metales diferentes, que creen pares galvánicos, pudiendo causar una corrosión galvánica, las uniones se realizarán mediante piezas de conexión bimetálica apropiadas para limitar estos efectos.

5.2.3 Líneas de tierra y líneas de enlace con el electrodo de puesta a tierra

Las líneas de puesta a tierra están constituidas por conductores con una resistencia mecánica adecuada y ofrecerán una elevada resistencia a la corrosión.

Para las líneas de tierra pertenecientes al sistema de puesta a tierra de protección, se podrán emplear conductores de cobre o aluminio (según se especifique en cada proyecto tipo indicado en la Tabla 1), con las siguientes características:

- Conductor de cobre de 50 mm² de sección según documento informativo NI 54.10.01 “Especificación Particular - Conductores desnudos de cobre para líneas eléctricas aéreas y subestaciones de Alta Tensión”.
- Conductor de aluminio-acero tipo 47-AL1/8-ST1A para instalaciones con tensiones de red menor o igual a 20 kV, y tipo 100-AL1/17-ST1A para tensiones menores o iguales a 30 kV, especificados en el documento NI 54.63.01 “Especificación Particular - Conductores desnudos de aluminio-acero para líneas eléctricas de Alta Tensión”, hasta la caja de seccionamiento de tierra de protección.
- Conductor de aleación de aluminio tipo D 56 para instalaciones con tensiones de red menor o igual a 20 kV, y tipo D 110 para tensiones menores o iguales a 30 kV, especificados en el documento NI 54.66.01 “Especificación Particular - Conductores desnudos de aleación de aluminio para líneas eléctricas aéreas de Alta Tensión”, hasta la caja de seccionamiento de tierra de protección.

Para las líneas de tierra pertenecientes al sistema de puesta a tierra de servicio, se podrán emplear los siguientes conductores (según se especifique en cada proyecto tipo indicado en la Tabla 1), con las siguientes características:

- Cables unipolares de cobre, aislados, de 50 mm² de sección.
- Cables unipolares de aluminio, aislados, de 50 mm² de sección, tipo XZ1 0,6/1 kV, especificado en el documento NI 56.37.01 “Especificación Particular - Cables unipolares XZ1-Al con conductores de aluminio para redes subterráneas de Baja Tensión 0,6/1 kV”.

5.2.3.1 Instalación

Los conductores de las líneas de tierra deberán instalarse procurando que su recorrido sea lo más corto posible, evitando trazados tortuosos y curvas de poco radio. Con carácter general los conductores serán desnudos instalados al exterior de forma visible. Caso de que fuese conveniente realizar la instalación de forma cubierta, deberá serlo de forma que pueda comprobarse el mantenimiento de sus características.

Conviene prestar especial atención para evitar la corrosión donde los conductores desnudos de las líneas de enlace con el electrodo de puesta a tierra entran en el suelo o en el hormigón. En este sentido, cuando bajo el Centro de Transformación exista macizo de hormigón, el conductor no debe tenderse por encima de él sino atravesarlo, protegido con un tubo aislante o similar.

Se cuidará la protección de los conductores de las líneas de tierra en las zonas inmediatamente superior e inferior al terreno, de modo que queden defendidos contra golpes, etc.

En las líneas de tierra no se insertarán fusibles ni interruptores.

5.2.3.2 Conexiones

Las conexiones deben tener una buena continuidad eléctrica, para prevenir cualquier aumento de temperatura inaceptable bajo condiciones de corriente de falta.

Las piezas de conexión serán de las siguientes características:

- Conexión conductor-conductor: Grapa de latón tipo GCP/C16 o GCPD/C16 para conductor de cobre y grapa de aleación de aluminio GCPD/A16 para conductor de aluminio. Puede tomarse como referencia para la misma el documento informativo NI 58.26.04 “Herraje y accesorios para líneas de Alta Tensión. Grapa de conexión paralela y sencilla”, u otras referencias o especificaciones normativas (normas UNE o equivalentes) justificadas por el proyectista.
- Conexión Conductor-Pica: Grapa de conexión para pica cilíndrica de acero cobrizado, tipo GC-P 14,6/C-50. Puede tomarse como referencia para la misma el documento informativo NI 58.26.03 “Grapa de conexión para pica cilíndrica acero-cobre”, u otras referencias o especificaciones normativas (normas UNE o equivalentes) justificadas por el proyectista.

Las uniones no deberán poder soltarse y estarán protegidas contra la corrosión. Cuando se tengan que conectar metales diferentes que creen pares galvánicos, pudiendo causar una corrosión galvánica, las uniones se realizarán mediante piezas de conexión bimetálicas apropiadas para limitar estos efectos.

Deben utilizarse los elementos apropiados para conectar los conductores de las líneas de tierra al electrodo de puesta a tierra, al terminal principal de tierra y a cualquier parte metálica. En el caso de utilizarse línea de tierra de aluminio, la conexión de dicha línea con cualquier elemento de cobre de los equipos se realizará mediante los terminales especificados en el documento informativo NI 58.51.11 “Terminales a compresión, de aluminio estañado, para conductores de aluminio y aluminio-acero”, u otras referencias o especificaciones normativas (normas UNE o equivalentes) justificadas por el proyectista.

Deberá ser imposible desmontar las uniones sin herramientas.

La línea de tierra perteneciente al sistema de puesta a tierra de Protección deberá conectar los siguientes elementos:

- Cuba del transformador/res.
- Envolvente metálica del cuadro BT.
- Envolventes de las celdas de Alta Tensión (en dos puntos).
- Puertas o tapas metálicas de acceso y rejillas metálicas accesibles del centro de transformación, excepto para el Centro de Transformación en Edificio de Otros Usos (CTOU) o Centro de Transformación Compacto en Edificio de Otros Usos (CTCOU).
- Pantallas del cable (extremos de líneas de llegada y líneas de salida de celdas y ambos extremos de línea de conexión al transformador).
- Pantallas de los cables correspondientes al paso aéreo-subterráneo en el caso de que el Centro de Transformación se alimente desde una línea aérea.
- Cualquier armario metálico instalado en el Centro de Transformación, así como los armarios de telegestión y comunicaciones.

En el caso del CTOU o CTCOU, las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro estarán aisladas, no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión.

La salida del neutro del cuadro de Baja Tensión se conectará a la línea de tierra de la puesta a tierra de servicio (neutro).

5.2.3.3 Cajas de seccionamiento

Cada uno de los dos sistemas de puesta a tierra estará conectado a una caja de seccionamiento independiente. En el caso de que haya dos transformadores, cada neutro del cuadro de Baja Tensión se conectará a su correspondiente caja de seccionamiento.

Las cajas de seccionamiento de tierras de servicio y tierras de protección se componen de una envolvente y contienen en su interior un puente de tierras fabricado con pletinas de cobre o aluminio, según proceda, de 20x3 mm. Las cajas dispondrán de una pletina seccionable accionada por dos tornillos. El citado puente de tierra descansará en un zócalo aislante de poliéster con fibra de vidrio. La tapa será transparente. El conjunto deberá poseer un grado de protección IP 54 e IK 08, según las Normas UNE-EN 60529 y UNE EN 50 102 respectivamente y deberá soportar el siguiente ensayo:

- Nivel de aislamiento: 20 kV cresta a onda de impulso tipo rayo y 10 kV eficaces en ensayo de corta duración a frecuencia industrial, en posición de montaje.

La caja de seccionamiento de tierra de protección se colocará de tal forma que el recorrido de la línea de tierra desde la caja de seccionamiento al electrodo de puesta a tierra sea lo más corta posible.

Además, se instalará una caja de unión de tierras, que permita unir o separar los electrodos de protección y servicio y señalizar la posición habitual. El esquema de interconexión de la caja de unión de tierras, se da en la figura 2.

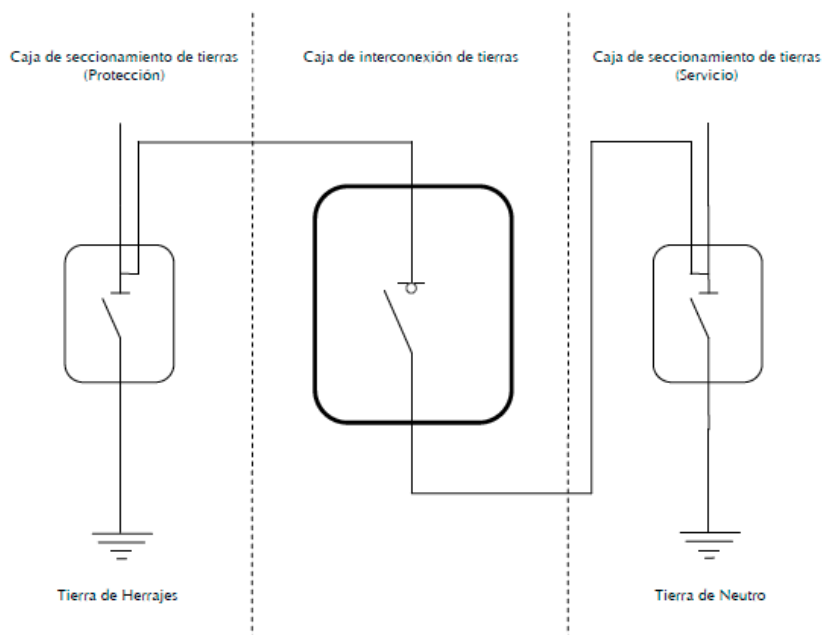


Figura 2. Esquema de interconexión de la caja de unión de tierras

En la caja de unión de tierras se deberá reflejar de forma permanente la situación de explotación normal de tierras de protección y servicio del Centro de Transformación (unidas o separadas), según lo que se determine en el proyecto.

Para unir los dos sistemas de puesta a tierra con la caja de unión de tierras, se emplearán cables unipolares de cobre o aluminio, aislados, de 16 mm² de sección como mínimo.

El conjunto de cajas de seccionamiento de tierra (protección-servicio) y caja de interconexión de tierras antes descrito, podrá ir ubicado en una única envolvente, conteniendo dos o las tres partes del conjunto, en función de las características de la instalación. El conjunto cumplirá las mismas características eléctricas y mecánicas que a nivel individual y las especificaciones necesarias para las instalaciones de i-DE.

5.3 Dimensionamiento a frecuencia industrial del sistema de puesta a tierra de protección

5.3.1 Generalidades

Los parámetros pertinentes para el dimensionamiento de los sistemas de puesta a tierra son:

- a) Valor de la corriente de falta.
- b) Duración de la falta.

Estos dos parámetros dependen principalmente del método de la puesta a tierra del neutro de la red.

- c) Características del suelo.
- d) Tensión soportada a frecuencia industrial por las instalaciones de Baja Tensión del interior del Centro de Transformación (por ejemplo, para el cuadro de BT, sería la tensión soportada a frecuencia industrial entre las partes activas y su envolvente).

5.3.2 Dimensionamiento con respecto a la corrosión y a la resistencia mecánica

Para el dimensionamiento con respecto a la corrosión y a la resistencia mecánica de los electrodos se seguirán los criterios indicados en el apartado 3 de la ITC-RAT 13.

Los electrodos de tierra que están directamente en contacto con el suelo (cables desnudos de cobre y picas de acero cobrizado) serán de materiales capaces de resistir, de forma general, la corrosión (ataque químico o biológico, oxidación, formación de un par electrolítico, electrólisis, etc.). Así mismo resistirán, generalmente, las tensiones mecánicas durante su instalación, así como aquellas que ocurren durante el servicio normal.

5.3.3 Dimensionamiento con respecto a la resistencia térmica

Para el dimensionamiento con respecto a la resistencia térmica de los electrodos se seguirán los criterios indicados en el apartado 3 de la ITC-RAT 13.

5.3.3.1 Generalidades

La máxima intensidad de corriente de defecto a tierra depende de la red eléctrica. Sus valores máximos son los proporcionados en el apartado 5.4.3 de este documento.

5.3.3.2 Cálculo de la corriente

El cálculo de la sección de los electrodos de puesta a tierra depende del valor y la duración de la corriente de falta, por lo que tendrán una sección tal que puedan soportar, sin un calentamiento peligroso, la máxima corriente de fallo a tierra prevista, durante un tiempo de un segundo, no pudiendo superar para el cobre los 160 A/mm² o para el aluminio los 100 A/mm².

Se respetarán las dimensiones y secciones mínimas indicadas en el apartado 5.2.2.

5.3.4 Dimensionamiento con respecto a la seguridad de las personas

5.3.4.1 Valores admisibles de la tensión de contacto aplicada

Cuando se produce una falta a tierra, partes de la instalación se pueden poner en tensión, y en el caso de que una persona o animal estuviese tocándolas, podría circular a través de él una corriente peligrosa.

Los valores admisibles de la tensión de contacto aplicada, U_{ca} , a la que puede estar sometido el cuerpo humano entre la mano y los pies, en función de la duración de la corriente de falta, se dan en la figura 3:

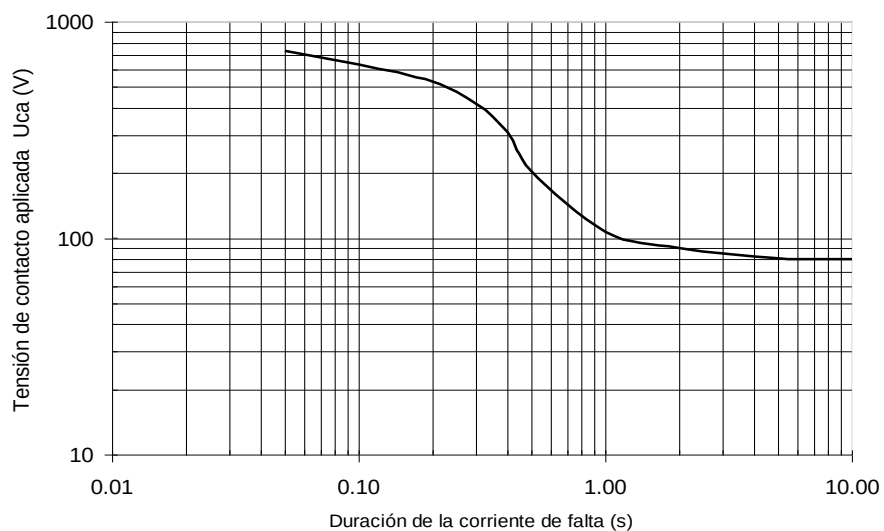


Figura 3. Valores admisibles de la tensión de contacto aplicada U_{ca} en función de la duración de la corriente de falta.

En la tabla 2 se muestran valores de algunos de los puntos de la curva anterior:

Tabla 2. Valores admisibles de la tensión de contacto aplicada U_{ca} en función de la duración de la corriente de falta t_F

Duración de la corriente de falta, t_F (s)	Tensión de contacto aplicada admisible, U_{ca} (V)
0.05	735
0.10	633
0.20	528
0.30	420
0.40	310
0.50	204
0.60	185
0.70	165
0.80	146
0.9	126
1.00	107
2.00	90
5.00	81
10.00	80
> 10.00	50

Salvo casos excepcionales justificados, no se considerarán tiempos de duración de la corriente de falta inferiores a 0,1 segundos.

Para las tensiones de paso no es necesario definir valores admisibles, ya que los valores admisibles de las tensiones de paso aplicadas son mayores que los valores admisibles en las tensiones de contacto aplicadas. Cuando las tensiones de contacto calculadas sean superiores a los valores máximos admisibles, se recurrirá al empleo de medidas adicionales de seguridad a fin de reducir el riesgo de las personas y de los bienes, en cuyo caso será necesario cumplir los valores máximos admisibles de las tensiones de paso aplicadas.

Los valores admisibles de la tensión de paso aplicada entre los dos pies de una persona, considerando únicamente la propia impedancia del cuerpo humano sin resistencias adicionales, como las de contacto con el terreno o las del calzado, se define como diez veces el valor admisible de la tensión de contacto aplicada.

$$U_{pa} = 10.U_{ca}$$

5.3.4.2 Valores de las tensiones máximas de contacto y, en su caso, de paso, admisibles para la instalación

El apartado 1.1 de la ITC-RAT 13 establece las máximas tensiones de contacto y de paso admisibles en la instalación, U_c y U_p respectivamente.

Para determinar las máximas tensiones de contacto admisibles en la instalación, U_c , se emplea la siguiente expresión:

$$U_c = U_{ca} \left[1 + \frac{R_{a1} + R_{a2}}{2.Z_B} \right] \quad (V)$$

donde:

U_c , es la máxima tensión de contacto admisible en la instalación en V.

U_{ca} , es la tensión de contacto aplicada admisible, tensión a la que puede estar sometido el cuerpo humano entre una mano y los pies (tabla 2).

R_{a1} , es la resistencia equivalente del calzado de un pie cuya suela sea aislante. Se puede emplear como valor 2000Ω .

R_{a2} , es la resistencia a tierra del punto de contacto con el terreno de un pie. $R_{a2} = 3.\rho_s$, siendo ρ_s la resistividad del suelo cerca de la superficie.

Z_B = Impedancia del cuerpo humano. Se considerará un valor de 1000Ω .

Para determinar las máximas tensiones de paso admisibles en la instalación, U_p , se emplea la siguiente expresión:

$$U_p = U_{pa} \cdot \left[1 + \frac{2R_{a1} + 2R_{a2}}{Z_b} \right] \quad (V)$$

En el caso de que una persona pudiera estar pisando zonas de diferentes resistividades con cada pie, por ejemplo, en el caso de un Centro de Transformación con acera perimetral, con un pie en la acera y otro en el terreno, la tensión de paso de acceso máxima admisible tiene como valor:

$$U_{p,acceso} = U_{pa} \left[1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b} \right] (V)$$

donde:

ρ_s^* , es la resistividad de la capa superficial (material constituyente de la acera perimetral, normalmente de hormigón). El valor considerado para el hormigón es de 3000 Ωm .

5.4 Verificación del diseño del sistema de puesta a tierra de protección

La verificación de los sistemas de puesta a tierra, sigue el procedimiento que se describe a continuación:

5.4.1 Establecimiento de las características del suelo

El establecimiento de las características del suelo significa obtener la resistividad del terreno. Este valor puede ser obtenido de dos formas:

- Según se especifica en la ITC-RAT 13, en función de la naturaleza del terreno, para el caso de instalaciones de tercera categoría y de intensidad de cortocircuito a tierra inferior o igual a 1000 A.
- Utilizando alguno de los métodos sancionados por la práctica para su medida, como es el método de Wenner.

El valor máximo de resistividad del terreno considerado para los diferentes sistemas de puesta a tierra propuestos en el presente documento es de 1000 Ωm .

5.4.2 Elección del sistema de puesta a tierra, cálculo de la separación entre los electrodos de tierra y cálculo de la resistencia de tierra

En los Centros de Transformación que puedan ubicarse en entornos urbanos, con redes de distribución en Media Tensión con cables apantallados subterráneos, puede presentarse una topología de red en la que todas las pantallas de los cables de Alta Tensión de interconexión entre los diferentes centros estén conectadas a la tierra de protección de los Centros de Transformación y a la puesta a tierra de la subestación, donde la resistencia de difusión a tierra global (PaT subestación + pantallas de cables + PaT de protección de Centro de Transformación) alcance valores muy pequeños.

En entornos rurales o pequeñas poblaciones, la distribución en Media Tensión, suele ser aérea en parte de su recorrido, en cuyo caso, los valores de la resistencia, anteriormente mencionada, son más elevados.

Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el exterior y en el interior del Centro de Transformación, se tomarán las medidas adicionales que se indican en el apartado 5.4.5.

El electrodo principal de tierra para los Centros de Transformación (excepto CTOU y CTCOU) se realizará mediante un anillo, formando un bucle perimetral, a una distancia de 1 m alrededor de la envolvente del Centro de Transformación, formado por conductor de cobre de 50 mm² de sección, enterrado como mínimo a 0,5 m de profundidad, salvo el caso del CTPS que estará a 1 m, al que se conectarán en sus vértices y en el centro de cada lado, ocho picas de acero cobrizado de 2 m de longitud, de 14 mm de diámetro (véanse figuras 4, 5, 6 y 7).

El electrodo correspondiente al sistema de puesta a tierra de protección para el CTOU y CTCOU se realizará mediante 5 picas (en caso de tensión nominal de la red ≤ 20 kV) u 8 picas (en caso de tensión nominal de la red, 30 kV) de acero cobrizado de 14 mm de diámetro y 2 metros de longitud, unidas por cable de cobre desnudo de cobre de 50 mm², siendo la distancia entre picas de 3 m. La parte superior de las picas y el cable estarán enterrados a una profundidad de 0,5 m como mínimo (para tensión nominal de red ≤ 20 kV) o 0,8 m como mínimo (para tensión nominal de red 30 kV). La conexión entre el electrodo de puesta a tierra de protección y el punto de puesta a tierra del Centro de Transformación se efectuará con cable de cobre de 50 mm², aislado a 0,6/ 1 kV. La primera pica se colocará en el comienzo del cable desnudo de cobre (véase figura 8 y 9).

En ambos casos, el emplazamiento de dicho electrodo se realizará en el exterior del edificio de otros usos que contiene al Centro de Transformación, aprovechando para su instalación, las zanjas de la red de distribución de Alta Tensión que acometen al edificio, y deberá estar lo más alejado posible de vallas, farolas, señales de tráfico, o cualquier elemento metálico que este clavado en el suelo.

En todo caso la resistencia de puesta a tierra presentada por el electrodo, en ningún caso debe ser superior a los valores indicados en la tabla 4. En algunos casos, donde la resistividad del terreno sea elevada, junto con unas corrientes de puesta a tierra elevadas, para cumplir bien con la resistencia de puesta a tierra o con los requisitos de tensión de paso, puede ser necesario conectar al anillo picas en hilera (flagelo) separadas 3 m entre sí.

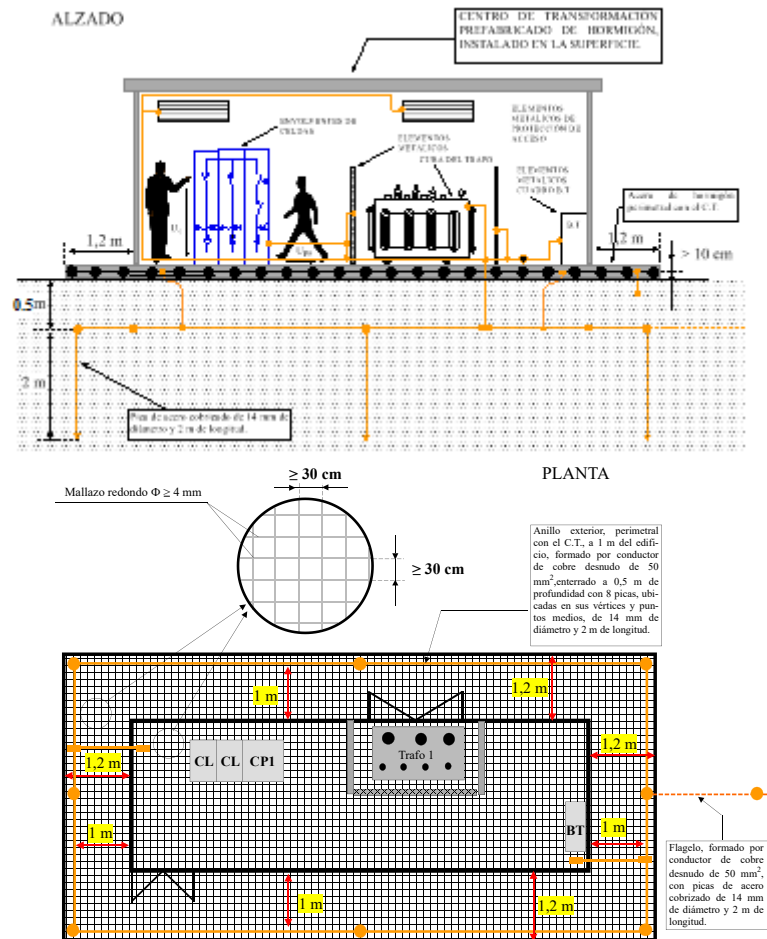


Figura 4.- Electrodo de puesta a tierra del CTS

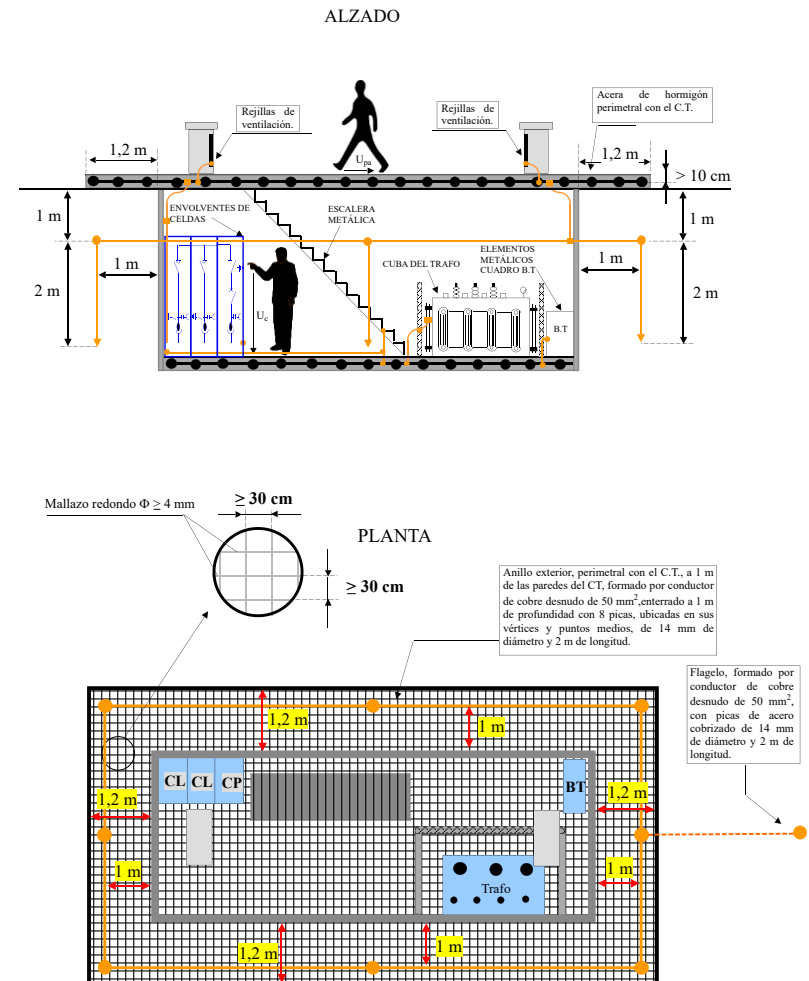


Figura 5.- Electrodo de puesta a tierra del CTPS

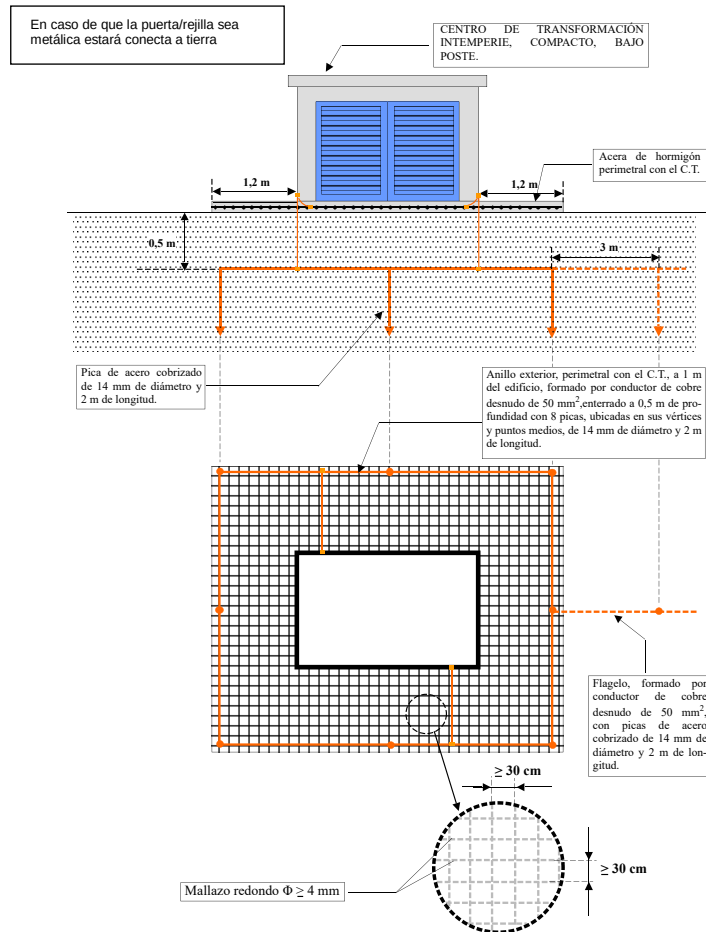


Figura 6.- Electrodo de puesta a tierra del CTIC

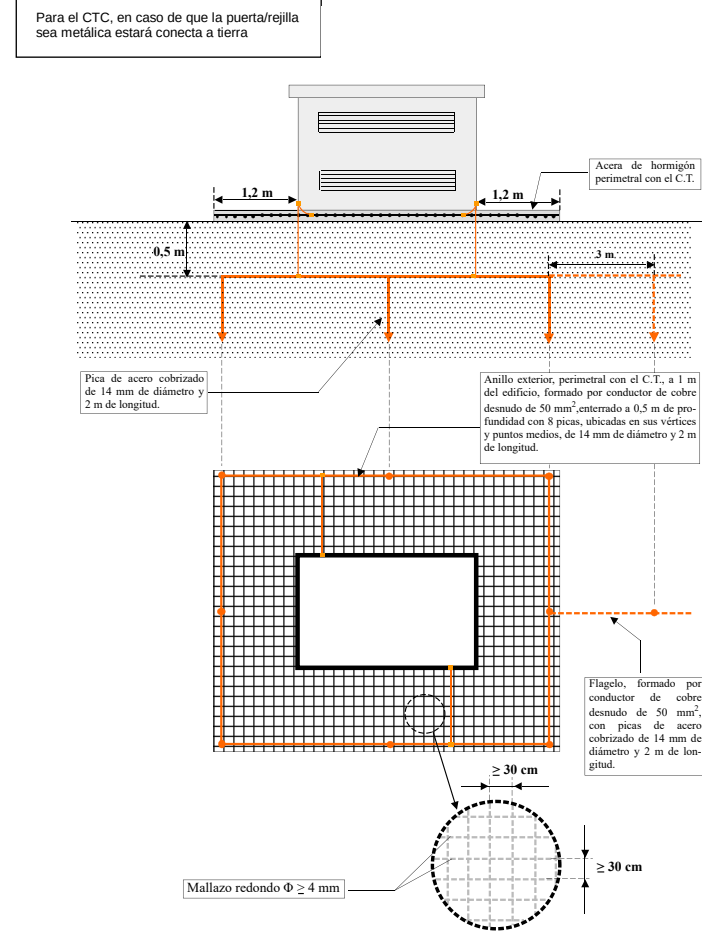


Figura 7.- Electrodo de puesta a tierra del CTC

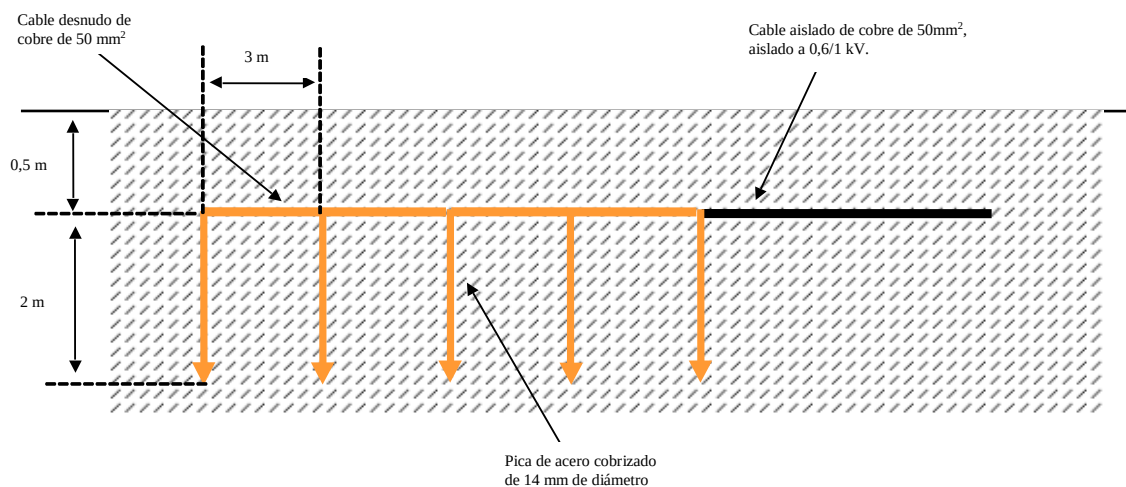


Figura 8.- Configuración CPT – CTL – 5P2, ($U_n \leq 20$ kV) del CTOU o CTCOU

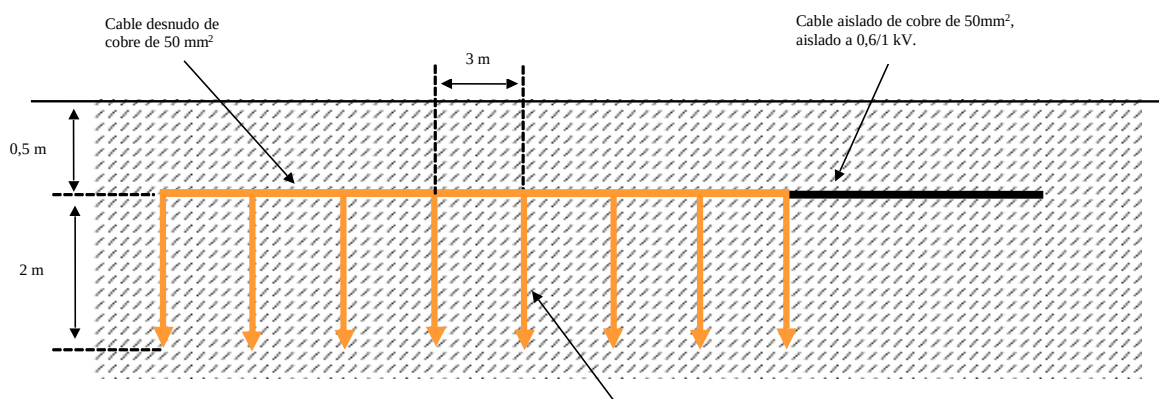


Figura 9.- Configuración CPT – CTL – 8P2, ($U_n = 30$ kV) el CTOU

En el presente documento se indica el procedimiento a seguir para la justificación del cumplimiento de los electrodos indicado anteriormente con el RAT.

En la tabla 3 se muestran los electrodos que se deben emplear dependiendo del tipo de Centro de Transformación, la tensión nominal y las pantallas de los cables.

Tabla 3. Electrodo a emplear dependiendo de la tensión nominal, pantallas de los cables y la accesibilidad.

Designación Envolverte	Electrodo a utilizar			
	≤ 20 kV		30 kV**	
	Pantallas conectadas	Pantallas desconectadas	Pantallas conectadas	Pantallas desconectadas
CTS	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=1000$ Ωm)	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=500$ - $1000 \Omega\text{m}$)*	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=600$ - $1000 \Omega\text{m}$)*	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=300$ - $500 \Omega\text{m}$)*
CSI				
CTPS	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=1000$ Ωm)	-----	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=900$ - $1000 \Omega\text{m}$)*	-----
CTIC	-----	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=500$ - 600 Ωm)*	-----	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=300$ - $400 \Omega\text{m}$)*
CTC	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=1000$ Ωm)	CPT-CT-A- (XxY)-8P2 ($\rho_{\max}=500$ - 600 Ωm)*	-----	
CTOU	CPT-CTL- 5P2 ($\rho_{\max}=1000$ Ωm)	-----	CPT-CTL- 8P2 ($\rho_{\max}=600$ Ωm)	-----
CTCOU	CPT-CTL- 5P2 ($\rho_{\max}=1000$ Ωm)	-----	-----	-----

*: La resistividad máxima para la cual es válido el electrodo depende de las dimensiones del anillo.

**Para tensiones de alimentación de 30 kV, este electrodo no será válido para Centros de transformación instalados en lugares tales como jardines, piscinas, campings, y áreas recreativas, donde las personas no van calzadas, salvo para el caso del CTPS, que si será válido. Para los casos en los que este electrodo no sea valido el proyectista deberá realizar el cálculo o justificación correspondiente.

Donde:

- CPT: Configuración de Puesta a Tierra
- CT: Centro de transformación
- CTL: Centro de transformación tipo Lonja
- A: Anillo formado por conductor de cobre de 50 mm^2
- (XxY): Dimensiones del anillo (A 1 m del perímetro de la envolverte del Centro de Transformación)
- 5/8P2: Número de picas (5 u 8) y longitud de las picas (2 m)

Las configuraciones de los diferentes tipos de electrodos utilizados en este documento, para su empleo en redes de distribución ≤ 30 kV, se indican en el Anexo 1.

Para los Centros de transformación correspondientes a este documento, el valor máximo de la resistencia de puesta a tierra, en función de la tensión de red y del tipo de conexión de las pantallas del Centro de Transformación, será la indicada en la tabla 4.

Tabla 4. Valores máximos de la resistencia a tierra en Centros de Transformación.

Tensión nominal de la red U_n (kV)	Conexión de las pantallas	Máximo valor de la resistencia de puesta a tierra (Ω)
≤ 20 kV	Desconectado	50
	Conectado	100
30 kV	Desconectado	30
	Conectado	60

Los valores de resistencia indicados anteriormente deben de confirmarse con medidas en el terreno sin recurrir a rellenos diferentes del propio terreno.

Los valores de la resistencia de puesta a tierra, correspondientes a las configuraciones tipo establecidas en el presente documento, se pueden obtener multiplicando el coeficiente K_r por el valor de la resistividad del terreno en Ωm .

Para cada configuración, el valor de K_r se indica en el Anexo 1.

El electrodo correspondiente a la puesta a tierra de servicio se unirá al electrodo de la puesta a tierra de protección cuando el potencial absoluto del electrodo de puesta a tierra de protección, al ser atravesado por la máxima corriente de falta a tierra, adquiera un valor inferior o igual a 1000 V.

La separación D , en metros, entre el electrodo de puesta a tierra de protección y el de servicio, que garantiza que no se induzcan tensiones en el electrodo de puesta a tierra de servicio mayores de 1000 V, cuando circula por el electrodo de puesta a tierra de protección, la intensidad I_E , en amperios, viene dado por la relación siguiente:

$$D \geq \frac{\rho \cdot I_E}{2000 \cdot \pi} \quad (m)$$

la distancia D , se ha establecido considerando que el electrodo de puesta a tierra de protección puede asimilarse a una semiesfera. Dicha consideración ha sido validada obteniendo los potenciales por el método de Howe y verificando dicha distancia. El valor de D , es válido únicamente en el caso de que la configuración del electrodo no lleve flagelo. Cuando la configuración del electrodo contenga flagelo se deberá calcular el valor de la anterior distancia, según considere el autor del proyecto.

Para el CTOU y CTCOU, las distancias mínimas de separación entre los sistemas de puesta a tierra de protección, de las masas de utilización de BT del edificio, y la PaT de servicio, se indican en las tablas del Anexo 3, en función de la resistividad superficial del terreno, para el 50 % de circulación de la corriente de falta a tierra por las pantallas de los cables de Alta Tensión, de acuerdo al apartado 11 del RBT (ITC 18).

El cálculo de dichas distancias se ha efectuado considerando que:

- El edificio donde se va a ubicar el Centro de Transformación, tiene unas dimensiones mínimas de 15 m de largo por 15 metros de ancho y que dicho edificio, tal como describe la ITC-BT-26 del REBT, cumple con lo descrito en el apartado 3 de la ITC-BT-26, donde se indica que *“En toda nueva edificación se establecerá una toma de tierra de protección, según el siguiente sistema: Instalando en el fondo de las zanjas de cimentación de los edificios, y antes de empezar ésta, un cable rígido de cobre desnudo de una sección mínima según se indica en la ITC-BT-18, formando un anillo cerrado que interese a todo el perímetro del edificio.”*
- La superficie del terreno, formada por una franja perimetral de al menos 1 metro de anchura alrededor del edificio, tendrá una resistividad superficial, ρ_s de 3000 Ωm .

Para el cálculo de las tensiones de paso en los extremos del electrodo (flagelo), se ha considerado que el electrodo está enterrado en un terreno de resistividad propia y superficial hasta 1000 Ωm .

En cualquier caso se podrá aplicar directamente el criterio establecido en el apartado 11 del RBT (ITC 18).

Para garantizar que los sistemas de puesta a tierra de protección y masas de usuarios de BT, son independientes, se cumplirán las condiciones siguientes:

- No existirá canalización metálica conductora (cubierta metálica de cable no aislada especialmente, canalización de agua, gas, etc.) que una la zona de tierras del Centro de Transformación con la zona en donde se encuentran los aparatos de utilización externos al Centro de Transformación.
- El Centro de Transformación estará situado en un recinto aislado de los locales de utilización o bien, si está contiguo a los locales de utilización, o en el interior de los mismos, se establecerá de tal manera que sus elementos metálicos no estén unidos eléctricamente a los elementos metálicos constructivos de los locales de utilización.

5.4.3 Cálculo de las intensidades máximas de corriente de defecto a tierra

Para el cálculo de las intensidades máximas de corriente de defecto a tierra se tiene en cuenta que el tipo de defecto a tierra es monofásico, tomando las intensidades máximas en los distintos niveles de tensión existentes en la instalación.

La intensidad de defecto a tierra depende, entre otros parámetros, de:

- La impedancia de puesta a tierra de servicio de la subestación (en adelante ST).
- La tolerancia de la impedancia de puesta a tierra de servicio de la ST.
- La impedancia del transformador de la ST.
- La tensión más elevada para cada nivel de tensión nominal.
- La propia impedancia de puesta a tierra de protección en el Centro de Transformación.
- La corriente que se deriva por las pantallas de los cables subterráneos.

Para el diseño de la instalación de puesta a tierra de un Centro de Transformación, se parte de la intensidad máxima de defecto a tierra, sin considerar el valor de la impedancia de la puesta a tierra de protección, puesto que, inicialmente, se desconoce.

Para calcular la intensidad máxima de defecto a tierra, teniendo en cuenta la impedancia de puesta a tierra de servicio de la subestación y del Centro de Transformación, es necesario conocer el equivalente Thévenin para fallo monofásico de la red.

Se considerará que:

- a) **Centro de Transformación con pantallas de cables desconectadas:** la corriente de puesta a tierra es igual a la corriente de defecto, es decir, toda la corriente de defecto circula por el electrodo de puesta a tierra, despreciando la corriente que se deriva por las pantallas de los cables o los hilos de guarda, si estos existieran.
- b) **Centro de Transformación con pantallas de cables conectadas en los extremos de los cables de alimentación (al menos dos):** la corriente de puesta a tierra es igual a la corriente de defecto multiplicada por el factor r_E , relación entre la corriente que circula por el electrodo y la corriente de defecto a tierra.

Equivalentes Thévenin para fallo monofásico a tierra

Los distintos sistemas de puesta a tierra de servicio en la red de distribución de Media Tensión de i-DE, dan lugar a un circuito equivalente Thévenin para el fallo monofásico. A continuación se representan los circuitos trifilares y los circuitos equivalentes Thévenin.

El circuito trifilar del lado de Media Tensión del transformador de la ST para los distintos sistemas de puesta a tierra de i-DE se puede unificar en el representado en la figura 10.

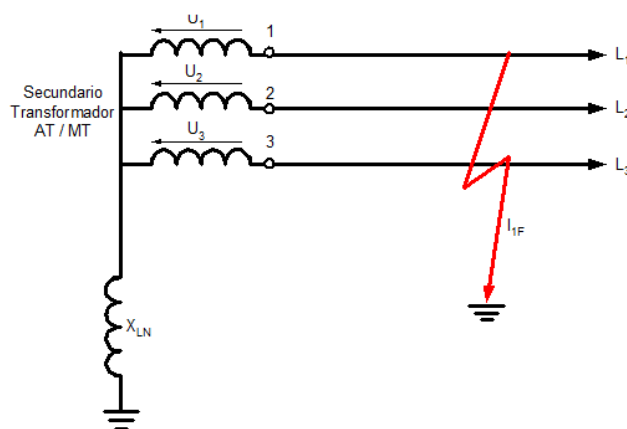


Figura 10.- Esquema trifilar con estrella puesta a tierra por reactancia, lado de MT de ST.

El equivalente Thévenin correspondiente a un fallo monofásico se representa en la figura 11. Se considera el factor de tensión $c = 1,1$, según Norma UNE-EN 60909-1. Este factor tiene en cuenta:

- La variación de la tensión en el espacio y en el tiempo.
- Tolerancia “negativa” de la impedancia de puesta a tierra, etc.
- Los cambios eventuales en las conexiones de los transformadores.
- El comportamiento subtransitorio de los alternadores y motores.

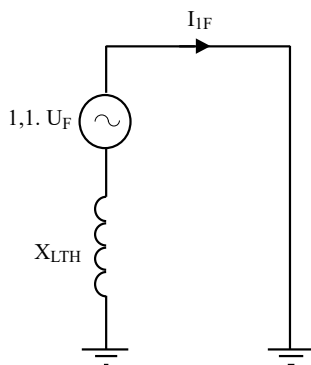


Figura 11.- Equivalente Thévenin para el cálculo de la intensidad de falta a tierra máxima con neutro puesto a tierra por reactancia.

A continuación se define, en la tabla 5, para el sistema de puesta a tierra adoptado por i-DE en las subestaciones, el valor adoptado para la corriente máxima de defecto a tierra, empleado para la verificación de las configuraciones tipo de los sistemas de puesta a tierra descritos anteriormente.

Tabla 5. Intensidades máximas de puesta a tierra e impedancias equivalentes para cada nivel de tensión y tipo de puesta a tierra de la ST.

Tensión nominal de la red U_n (kV)	Tipo de puesta a tierra **	Reactancia equivalente X_{LTH} (Ω)	Intensidad máxima de corriente de defecto a tierra * (A)
13,2	Rígido	1,863	4500
13,2	Reactancia 4 Ω	4,5	1863
15	Rígido	2,117	4500
15	Reactancia 4 Ω	4,5	2117
20	Zig-Zag 500A	25,4	500
20	Zig-Zag 1000A	12,7	1000
20	Reactancia 5,2 Ω	5,7	2228
30	Zig-Zag 1000 A	2,117	9000

* Intensidades máximas que se pueden dar en la red. Los diseños de puesta a tierra descritos en este documento son válidos para la mayoría de las situaciones descritas en la tabla 1. No obstante, en algunos casos en los que se den una o varias de las condiciones siguientes, intensidades de defecto a tierra elevadas, resistividades del terreno altas o un número pequeño de Centros de Transformación conectados a través de las pantallas de los cables subterráneos, pueden ser necesarios diseños específicos para la configuración de los electrodos. Para concretar estas situaciones véase el Anexo 1.

** Pueden existir otros tipos de puesta a tierra en subestaciones de i-DE, tales como puestas a tierra mediante resistencias, que en cualquier caso suponen valores de intensidades defecto a tierra iguales o inferiores a los indicados en la Tabla.

5.4.4 Cálculo de la intensidad de la corriente de puesta a tierra en el Centro de Transformación

Para el cálculo de las intensidades de las corrientes de defecto a tierra y de puesta a tierra, se ha de tener en cuenta la forma de conexión del neutro a tierra en la ST, la configuración y

características de la red durante el período subtransitorio, la resistencia de puesta a tierra del electrodo considerado, R_T , y la resistencia de puesta a tierra de las pantallas de los cables subterráneos de Alta Tensión y de sus puestas a tierra, R_{pant} , si ha lugar. La R_{pant} variará dependiendo del número (N) de Centros de Transformación conectados a través de las pantallas de los cables. Véanse figuras 12 y 13.

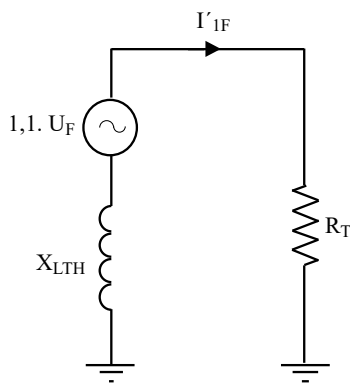


Figura 12.- Equivalente Thévenin para el cálculo de la intensidad máxima de defecto a tierra en redes con puesta a tierra por reactancia, teniendo en cuenta la resistencia de puesta a tierra de protección del Centro de Transformación R_T .

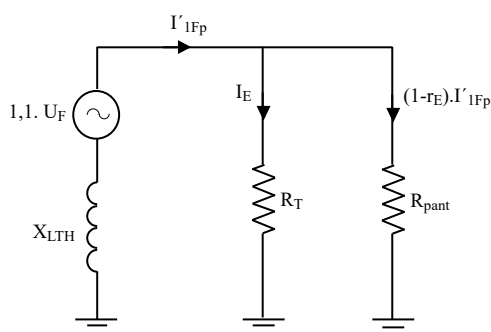


Figura 13.- Equivalente Thévenin para el cálculo de la intensidad máxima de defecto a tierra en redes con puesta a tierra por reactancia, teniendo en cuenta la resistencia de puesta a tierra de protección del Centro de Transformación R_T , y la resistencia equivalente de las pantallas de los cables subterráneos de Alta Tensión y de sus puestas a tierra, R_{pant}

Siendo

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T}$$

Donde R_{TOT} es el paralelo de las resistencias del Centro de Transformación y del resto de Centros de Transformación conectados a través de las pantallas de los cables.

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}}$$

Se ha considerado como caso más desfavorable, que no existe continuidad entre las pantallas de los cables y la malla de la subestación, por lo que no se tiene en cuenta la parte de la corriente que retorna por las pantallas de los cables hasta la malla de la subestación.

La característica de actuación de las protecciones, para el caso de faltas a tierra, para las instalaciones de i-DE con tensiones nominales ≤ 30 kV, cumple con las relaciones indicadas en la tabla 6.

Tabla 6. Característica de actuación de las protecciones en caso de defecto a tierra.

Característica de actuación de las protecciones	U_n (kV)
$I'_{1F} \cdot t = 400$	≤ 20 kV
$I'_{1Fp} \cdot t = 400$	
$I'_{1F} \cdot t = 2200$	30 kV
$I'_{1Fp} \cdot t = 2200$	

Siendo:

- I'_{1F} , la intensidad de la corriente de defecto a tierra, en el caso de no considerar conexiones de pantalla, en amperios y t , el tiempo de actuación de las protecciones en segundos, siendo

$$I'_{1F} = \frac{1,1 U_n}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + X_{LTH}^2}} \quad (A)$$

En caso de que la tierra del Centro de Transformación esté unida a través de las pantallas a la tierra del apoyo, se aplicará la fórmula del punto siguiente considerando la puesta a tierra del apoyo.

Para las tablas del Anexo 1 se ha considerado que la tierra del Centro de Transformación se conecta a la tierra del apoyo a través de las pantallas de los cables.

- I'_{1Fp} , la intensidad de la corriente de defecto a tierra, en el caso de considerar conexiones de pantalla, en amperios y t , el tiempo de actuación de las protecciones en segundos, siendo

$$I'_{1Fp} = \frac{1,1 U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E} \right)^2}} \quad (A)$$

Siendo r_E , la relación entre la corriente que circula por el electrodo y la corriente de defecto a tierra. Nótese que de forma simplificada el valor de r_E se considerará como un número real.

5.4.5 Consideraciones sobre la tensión de contacto máxima aplicada para las personas

Para cumplir con el requisito de la tensión de contacto aplicada a las personas, establecidas en la ITC-RAT 13, se adoptarán las medidas adicionales siguientes, que hacen que dicha tensión de contacto sea cero.

Para Centros de Transformación distintos del CTOU o CTCOU:

- Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el exterior del Centro de Transformación, se emplazará una acera perimetral de hormigón a 1,2 m de las paredes del mismo. Embebido en el interior de dicho hormigón se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,3 x 0,3 m, a una profundidad de al menos 0,1 m. Este mallazo se conectará a un punto de la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación mediante soldadura por fusión aluminotérmica C50-Fe 4 mm $\varnothing$ (véanse figuras 4, 5, 6 y 7). Las conexiones del mallazo electrosoldado a la línea de tierra de protección se realizarán de tal forma que garanticen su continuidad en el tiempo, y posibiliten la comprobación de su equipotencialidad.
- Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el interior, en la envolvente de hormigón (piso, techo y paredes laterales) del Centro de Transformación se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos, preferentemente opuestos, a la puesta a tierra de protección del centro. Con esta disposición se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, esté en contacto con una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo inherente a la tensión de contacto y de paso interior.
- Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el interior de los Centros de Transformación de maniobra interior (CTS y CTPS), en caso de que haya un suelo técnico elevado sobre la base del centro de transformación, este deberá ser una superficie aislante o bien estar equipotenciada y conectada a la puesta a tierra de protección del centro.
- Las paredes, tapas, puertas y rejillas que den al exterior del centro, se conectarán a la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación.

Para Centro de Transformación de tipo CTOU o CTCOU:

- Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro estarán aisladas, no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión, debido a defectos o averías.
- En el piso del Centro de Transformación se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos preferentemente opuestos a la puesta a tierra de protección del centro. Con esta disposición se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, esté sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo

inherente a la tensión de contacto y de paso interior. Este mallazo se cubrirá con una capa de hormigón de 10 cm de espesor como mínimo. Véase figura 14.

- No deberá haber partes metálicas puestas a tierra dentro del Centro de Transformación, que se puedan tocar teniendo los pies en el exterior del centro.
- Para Centros de Transformación, alimentados por una red de 30 kV, el primer metro de suelo dentro del Centro de Transformación, deberá ser aislante, para evitar la consideración de tensión de paso en el acceso.

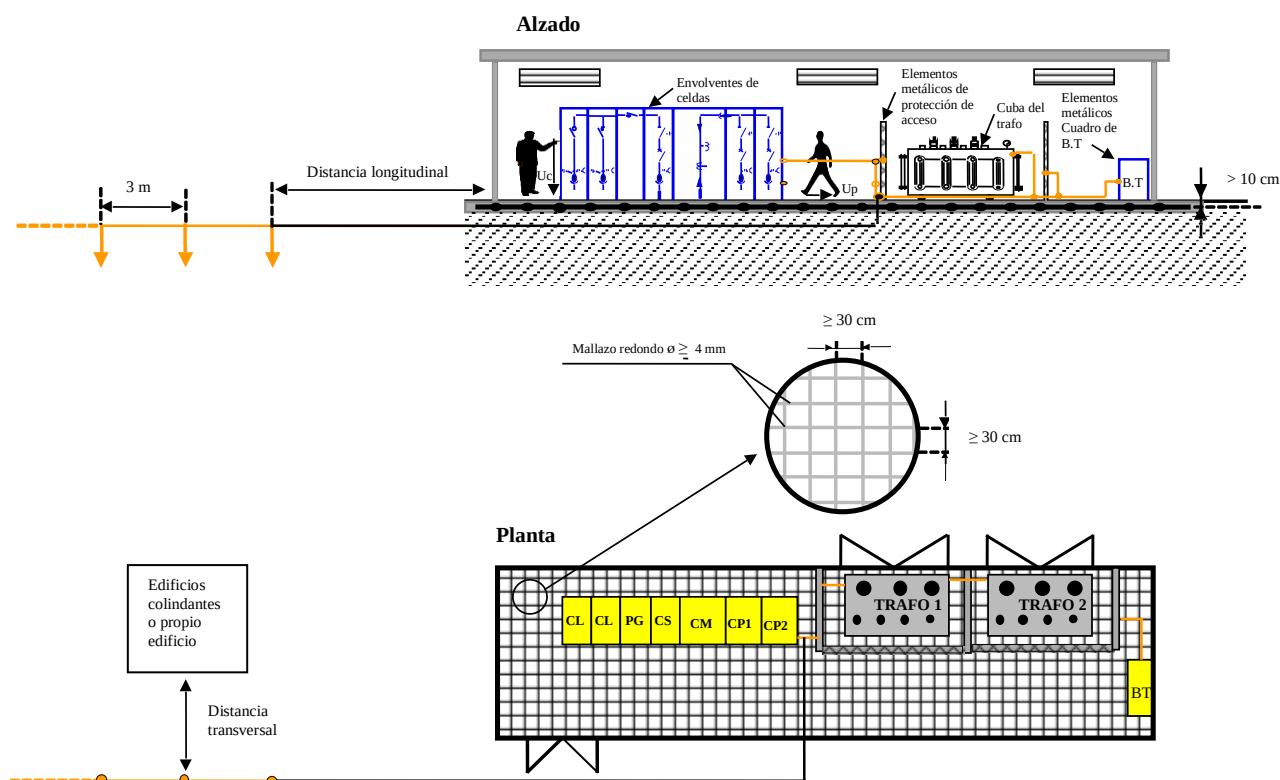


Figura 14.-Detalle de superficie equipotencial en el interior del Centro de Transformación

5.4.6 Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones) que garantiza el cumplimiento de la ITC-RAT 13, para la tensión de contacto

Se han adoptado las medidas de seguridad establecidas en el apartado 5.4.5, y se realizarán las mediciones indicadas en el apartado 6 y medidas correctoras en su caso, por lo tanto no es necesario determinar el tiempo de actuación de las protecciones ya que las medidas de seguridad evitan el riesgo por tensión de contacto.

5.4.7 Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones) que garantiza el cumplimiento de la ITC-RAT 13, para la tensión de paso en las proximidades del electrodo

Aplicando el método de Howe, se determina la tensión de paso máxima que aparece en la instalación.

En caso de Centros de Transformación distintos del CTOU o CTCOU se determinarán dos valores de la tensión de paso:

- Tensión de paso máxima en las proximidades del electrodo, con los dos pies en el terreno. En las figuras 15 y 16 se indican los puntos donde se deben de obtener los valores de la tensión de paso, seleccionando posteriormente el valor máximo de los obtenidos.

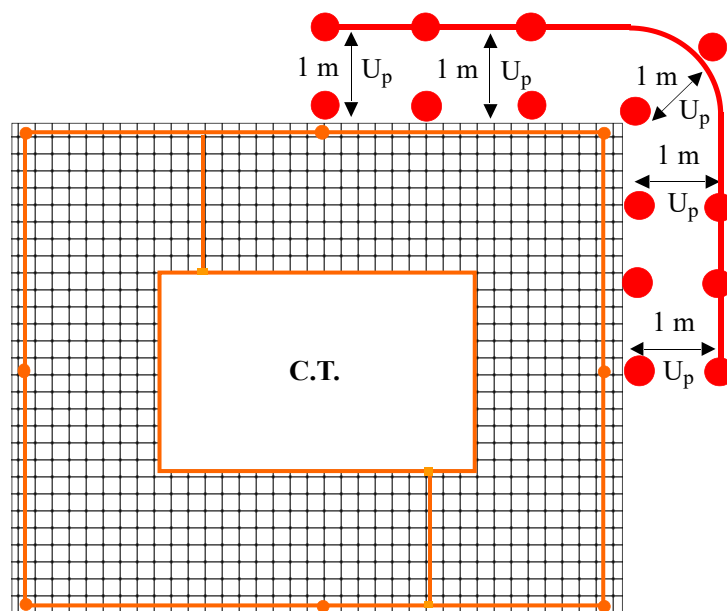


Figura 15.- Puntos donde se obtiene el valor máximo de la tensión de paso (CTS, CTIC, o CTC)

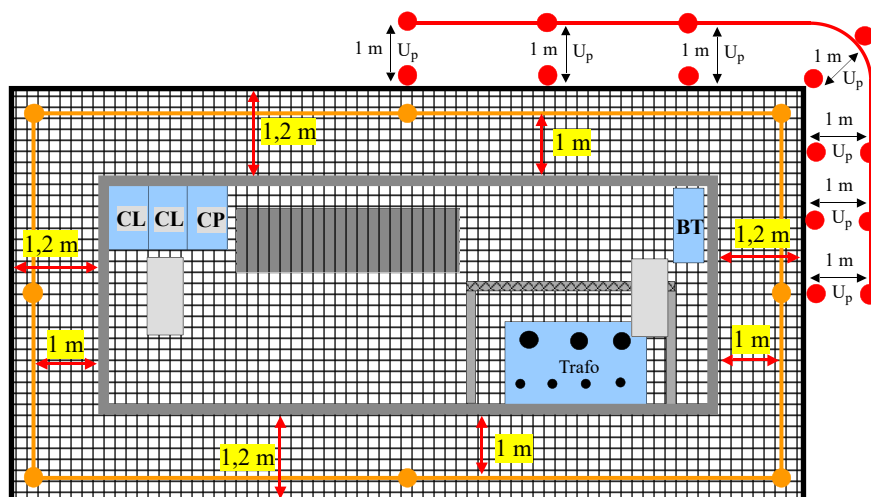


Figura 16.- Puntos donde se obtiene el valor máximo de la tensión de paso (CTPS)

Los valores máximos de la tensión de paso, en voltios, con los dos pies en el terreno, para cada una de las configuraciones tipo para estos Centros de Transformación, se pueden obtener multiplicando el coeficiente $K_{p,t-b}$, indicado en el Anexo 1 por el valor de la resistividad del terreno en $\Omega.m$ y por el valor de la intensidad de puesta a tierra I_E , que circule por el electrodo, en amperios.

$$U'_{p,1} = K_{p,t-t} \cdot I_E \cdot \rho_s$$

El valor de I_E , viene dado por:

- $I_E = I'_{1Fp} \cdot r_E$, en el caso de un Centro de Transformación con pantallas conectadas a tierra en el otro extremo, siendo r_E , la relación entre la corriente que circula por el electrodo y la corriente de defecto a tierra. El valor de r_E se estimará según lo indicado en el apartado 5.4.3.
- $I_E = I'_{1F}$, en el caso de un Centro de Transformación con pantallas desconectadas.

b. Tensión de paso con un pie en la acera y otro en el terreno.

El valor de la tensión de paso con un pie en la acera y otro en el terreno coincide con la tensión de paso de acceso, de forma que un pie estaría a la tensión de puesta a tierra del Centro de Transformación y el otro pie sobre el terreno a 1 m de distancia de la acera.

Los valores máximos de la tensión de paso, en voltios, con un pie en la acera y otro en el terreno, para cada una de las configuraciones tipo para este tipo de Centro de Transformación, se pueden obtener multiplicando el coeficiente $K_{p,a-t}$, indicado en el Anexo 1, por el valor de la resistividad del terreno en Ωm y por el valor de la intensidad de puesta a tierra I_E , que circule por el electrodo, en amperios.

$$U'_{p2} = K_{p,a-t} \cdot I_E \cdot \rho_s$$

En función de los valores de U'_{p1} y U'_{p2} obtenidos, se puede calcular la duración máxima admisible de la falta, t , utilizando para ello la curva U_{pa} en función del tiempo.

Para el caso de CTOU o CTCOU, se determinará el valor de la tensión de paso máxima en la prolongación del electrodo, con los pies separados 1 m.

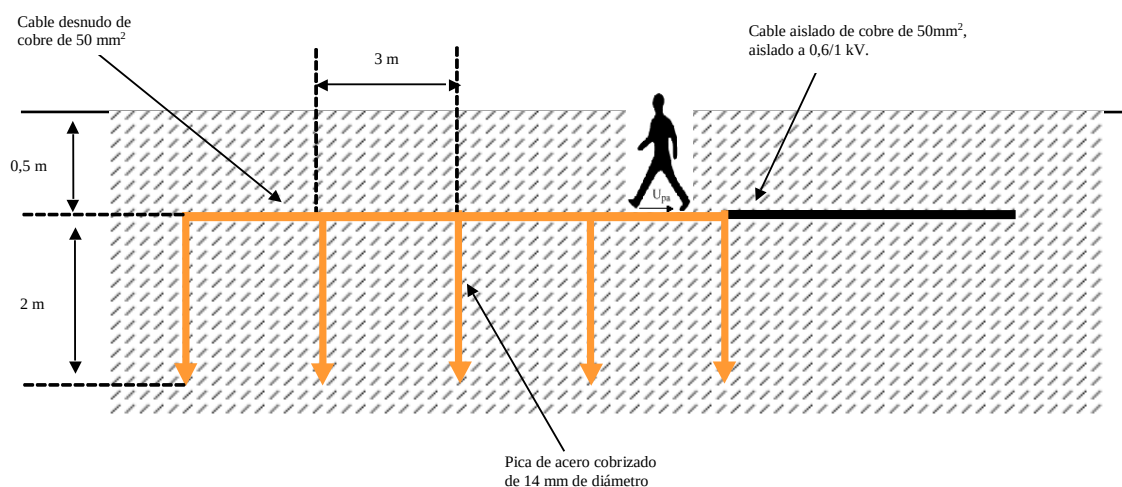


Figura 17.-Detalle donde se obtiene la tensión de paso máxima

El valor máximo de la tensión de paso, en voltios, para la configuración establecida en este MT, se puede obtener multiplicando el coeficiente K_p , indicado en la tabla 7, por el valor de la resistividad del terreno en Ωm y por el valor de la intensidad de defecto a tierra, I_E , que circule por el electrodo, en amperios.

$$U_{p.m\acute{a}x} = K_p \cdot I_E \cdot \rho_s$$

El valor de I_E , viene dado por la relación:

$$I_E = I'_{1Fp} \cdot r_E$$

El valor de r_E se estimará según lo indicado en el apartado 5.3.4

Tabla 7.- Coeficiente de la tensión de paso, K_p , para los electrodos de puesta a tierra de CTOU y CTCOU

Designación del electrodo	K_p $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$
CPT-CTL-5P2	0,01455
CPT-CTL-8P2	0,00621

5.4.8 Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones) que garantiza el cumplimiento de la tensión de paso

Para Centros de Transformación distintos del CTOU o CTCOU, la determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones en caso de falta a tierra), que garantiza el cumplimiento de la tensión de paso, es función de la tensión máxima de paso aplicada. El valor de dicha tensión se obtiene de las expresiones 5 y 6, siendo su valor:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p.1}}{1 + \frac{2.R_{a1} + 6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p.2}}{1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

Los valores de U'_{p1} y U'_{p2} se obtienen de las formulas del punto 5.4.7, para tensiones de paso con dos pies en el terreno o un pie en el terreno y el otro sobre la plataforma equipotencial (acera), respectivamente.

En función de los valores de U'_{pa1} y U'_{pa2} obtenidos, se puede calcular la duración máxima admisible de la falta, t , utilizando para ello la expresión (1) del apartado 5.3.4.1.

- Para Centros de Transformación de tipo CTOU o CTCOU, al ser el piso del Centro de Transformación de hormigón, con mallazo equipotencial, unido al sistema de puesta a tierra de protección, y el piso de la zona exterior de dicho centro, también de hormigón al acceder una persona al Centro de Transformación, aparecerá una tensión de paso entre sus pies, al estar un pie al potencial del electrodo, y en el caso más desfavorable, el otro pie a potencial cero. En el caso de red de 30 kV el primer metro de suelo dentro del Centro de Transformación, deberá ser aislante, por lo que se puede omitir el cálculo de tensión de paso en el acceso.

La tensión máxima, de paso de acceso, en este caso, viene dada por la expresión:

$$U_{p.máx,acc} = I_E \cdot R_T$$

siendo I_E , el valor de la corriente de falta a tierra que discurre por el electrodo, cuyo valor es:

$$I_E = I'_{1Fp} \cdot r_E$$

La determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones en caso de falta a tierra), que garantiza el cumplimiento de la tensión de paso, en el acceso, es función de la tensión máxima de paso aplicada, según indica la ITC-RAT 13 del RAT, siendo su valor:

$$U'_{pa} = \frac{U_{p.máx,acc}}{1 + \frac{3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

En función del valor de U'_{pa} , $U'_{pa} = 10 U_{ca}$ se puede calcular la duración máxima admisible de la falta, t , utilizando para ello la curva U'_{pa} en función del tiempo.

5.4.9 Determinación de la distancia entre el electrodo de la puesta a tierra de protección y los elementos conectados a la puesta a tierra de las masas de utilización (edificio) en CTOU y CTCOU

Para el caso de falta a tierra en el lado de Alta Tensión del Centro de Transformación, el electrodo de puesta a tierra de protección, debe situarse a una distancia de las masas metálicas enterradas conectadas a la puesta a tierra de utilización, de modo que, cualquiera de las masas metálicas, accesibles desde el exterior del edificio, conectadas a dicha puesta a tierra, no pueden estar a un potencial más elevado que la tensión de contacto admisible en la instalación.

En las tablas del Anexo 3 se indican los valores de las distancias longitudinales y transversales desde el electrodo de puesta a tierra de protección, al edificio situado en las proximidades del electrodo de puesta a tierra de protección, que cumplen con los requisitos anteriores. En cualquier caso, se podrá verificar según el criterio establecido en el apartado 11 del RBT (ITC 18).

5.4.10 Verificación del nivel de aislamiento de los materiales de BT

Se verificará que la tensión que aparece en la instalación en caso de falta sea inferior a la tensión de aislamiento de los cuadros de BT del Centro de Transformación, en este caso 10 kV.

$$V = I'_{1FP} \cdot R_{TOT} \quad \text{Siendo;} \quad I'_{1FP} = \frac{1,1 \cdot U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E} \right)^2}}$$

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}} \quad r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T} \quad R_T = \rho \cdot K_r \quad R_{pant} = \frac{\rho \cdot K_{r'}}{N}$$

Donde $K_{r'}$ es el coeficiente de resistencia de puesta a tierra más desfavorable de los Centros de Transformación adicionales conectados a través de las pantallas, y N el número de Centros de Transformación adicionales.

5.4.11 Verificación del sistema de puesta a tierra elegido

El sistema de puesta a tierra elegido, será válido siempre y cuando el tiempo de actuación de las protecciones instaladas en la red de distribución, para el caso de faltas a tierra, sea inferior al tiempo obtenido en el punto 5.4.8.

La característica de actuación de las protecciones, para el caso de faltas a tierra, para las instalaciones de i-DE con tensiones nominales ≤ 30 kV, cumplen las relaciones indicadas en la tabla 6.

Las configuraciones adoptadas en el presente documento, para las condiciones de red (intensidad máxima de falta a tierra y tiempo) y resistividades del terreno especificadas, cumplen, adoptando las medidas descritas en el punto 5.4.5, con los requisitos establecidos en la ITC-RAT 13. Cuando las condiciones no fueran las que figuran en el presente documento, el proyectista deberá realizar el cálculo o justificación correspondiente.

6 MEDICIÓN DE LA TENSIÓN CONTACTO Y DE PASO APLICADA

Para la medición de la tensión de contacto y de paso aplicada deberá usarse un método por inyección de corriente, debiendo medir en distintos puntos de la envolvente donde va alojado el centro de transformación, incluyendo los más alejados al Centro de Transformación y en elementos metálicos que estén en la proximidad del electrodo.

Se emplearán fuentes de alimentación de potencia adecuada para simular el defecto, de forma que la corriente inyectada sea suficientemente alta, a fin de evitar que las medidas queden falseadas como consecuencia de corrientes vagabundas o parásitas circulantes por el terreno.

Consecuentemente, y a menos que se emplee un método de ensayo que elimine el efecto de

dichas corrientes parásitas, por ejemplo, método de inversión de la polaridad, la intensidad inyectada no será inferior a 5 A.

Los cálculos se harán suponiendo que para determinar las tensiones de paso y de contacto posibles máximas existe proporcionalidad entre la intensidad inyectada y la intensidad de puesta a tierra.

Los electrodos de medición para la simulación de los pies, con una resistencia a tierra del punto de contacto con el terreno de cada pié de valor $R_{a2}=3\rho_s$, donde ρ_s es la resistividad superficial del suelo, deberán tener cada uno un área de 200 cm² y estarán presionando sobre la tierra con una fuerza mínima de 250 N.

- Para la medición de la tensión de contacto en cualquier parte de la instalación, los electrodos deberán estar situados juntos y a una distancia de un metro de la parte expuesta de la instalación. Para la simulación de la mano se empleará un electrodo capaz de perforar el recubrimiento de las partes metálicas para que no actúe como aislante.
- Para la medición de la tensión de paso en cualquier parte de la instalación, los electrodos deberán estar situados, sobre el terreno, a una distancia de un metro.

En ambos casos, para suelo seco u hormigón conviene colocar entre el suelo y los electrodos un paño húmedo o una película de agua.

Las mediciones se realizarán en general con un voltímetro de resistencia interna 1000Ω, que representa la impedancia del cuerpo humano, Z_B .

- Para la medida de la tensión de contacto aplicada, un terminal del voltímetro será conectado al electrodo que simula la mano y el otro terminal a los electrodos que simulan los pies. De esta forma, el voltímetro indicará directamente el valor de la medición de la tensión de contacto aplicada. $U'_{ca} = U_{Voltmetro}$, siempre que la intensidad inyectada sea igual a la intensidad de puesta a tierra. Para obtener la tensión de contacto aplicada, en el caso de considerarse calzado, se insertarán en el circuito de medida resistencias en serie que sumen 1000 Ω, que simulará la resistencia del calzado de los pies de la persona. Para obtener la tensión de contacto aplicada, en el caso de no considerarse calzado, no será necesaria la inserción de la mencionada resistencia.
- Para la medida de la tensión de paso aplicada, un terminal del voltímetro será conectado a un electrodo que simula un pié y el otro terminal al electrodo que simula el otro pié. De esta forma, el voltímetro indicará directamente el valor de la medición de la tensión de paso aplicada. $U'_{pa} = U_{Voltmetro}$, siempre que la intensidad inyectada sea igual a la intensidad de puesta a tierra. Para obtener la tensión de paso aplicada, en el caso de considerarse calzado, se insertarán en el circuito de medida resistencias en serie que sumen 4000 Ω, que simulará la resistencia del calzado de los pies de la persona. Para obtener la tensión de paso

aplicada, en el caso de no considerarse calzado, no será necesaria la inserción de la mencionada resistencia.

En el caso de utilizar un voltímetro cuya resistencia interna incluya la resistencia del calzado, el valor de la medición de la tensión aplicada, vendrá determinado por:

- Para la medida de la tensión de contacto aplicada, con resistencia interna de 2000 Ω :

$$U_{cam} = \frac{U_{Voltmetro}}{2}$$

- Para la medida de la tensión de paso aplicada, con resistencia interna de 5000 Ω :

$$U_{pam} = \frac{U_{Voltmetro}}{5}$$

En caso de que los valores medidos estén por encima de los límites admisibles, se tomarán las medidas correctoras necesarias hasta que se verifique con nuevas mediciones el cumplimiento de los límites admisibles.

En caso de que haya elementos, tales como vallas, farolas, señales de tráfico, o cualquier elemento metálico que este clavado en el suelo, se deberán tener en cuenta en las mediciones de tensiones de paso y contacto, incluyendo la posibilidad de que pueda haber tensiones de contacto mano/mano.

7 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN EN CAMPO DE LAS MEDIDAS REALIZADAS EN LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA DE CENTROS DE TRANSFORMACIÓN

- 1) Se comprobará que la tensión de contacto exterior es prácticamente nula y en cualquier caso inferior a 50 V.

Para ello, se realizará la medida de la tensión de contacto entre las partes metálicas accesibles desde el exterior al Centro de Transformación y la acera perimetral existente (o plataforma equipotencial en el CTPS o el suelo en el CTOU), véanse figuras 18, 19 y 20. Caso de no ser nula, el diseño de la puesta a tierra del Centro de Transformación no es adecuado.

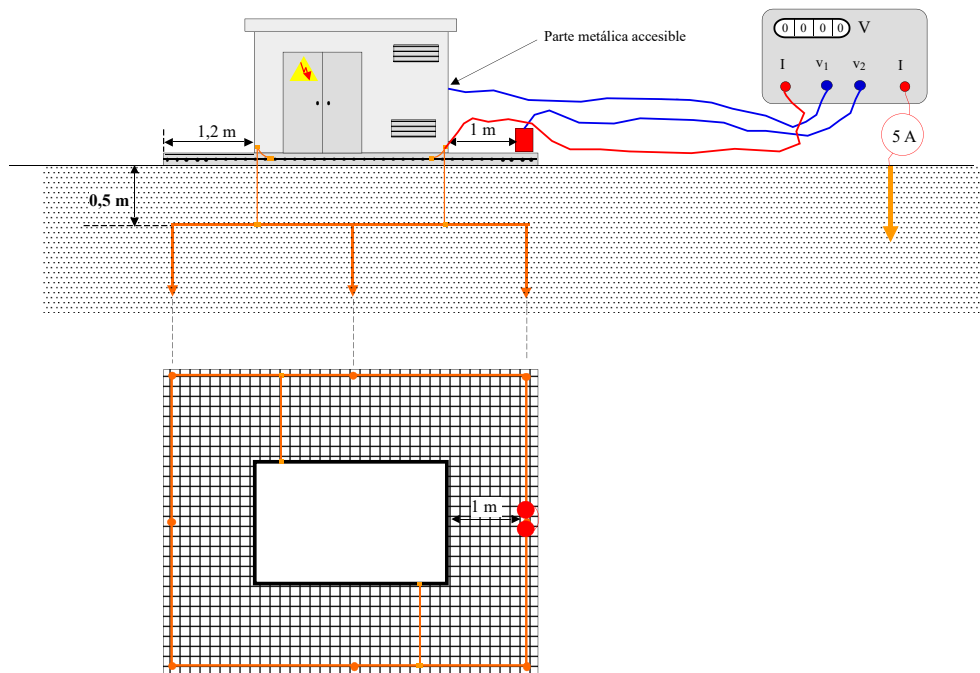


Figura 18.- Medida de la tensión de contacto en la instalación del CTS, CTIC, o CTC

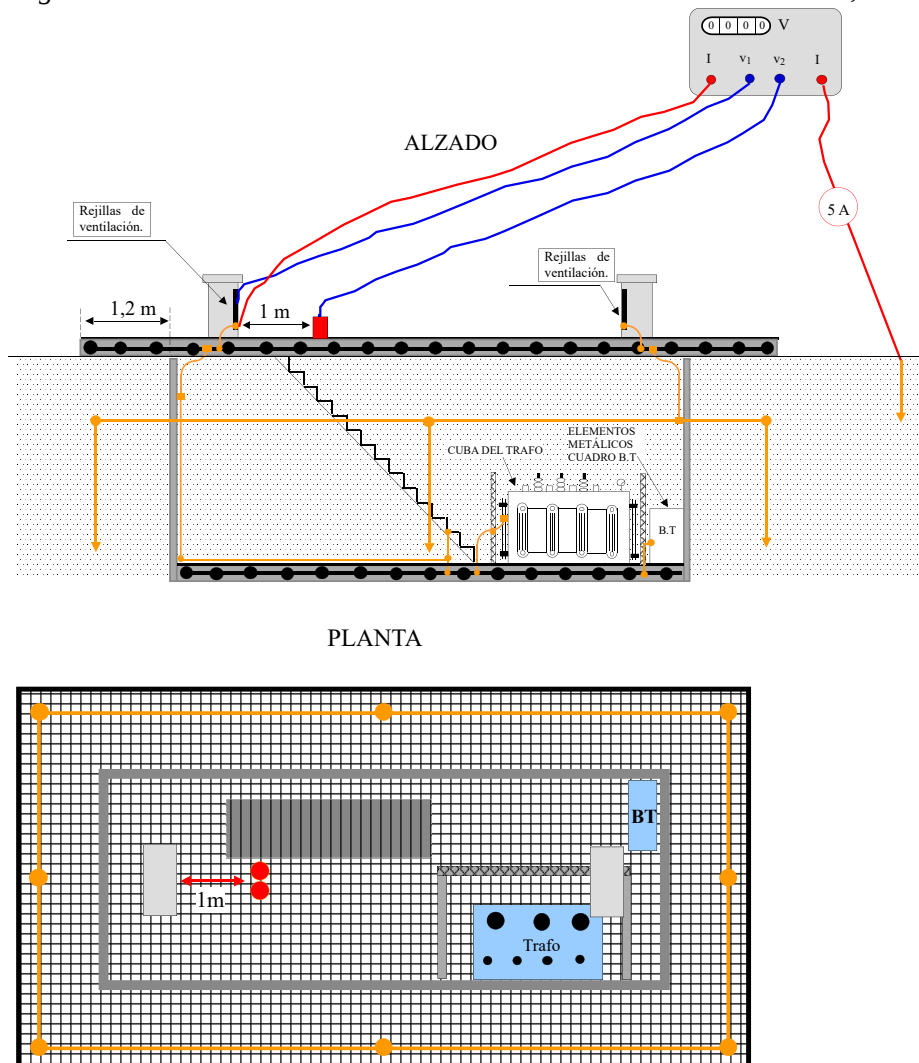


Figura 19.- Medida de la tensión de contacto en la instalación del CTPS.

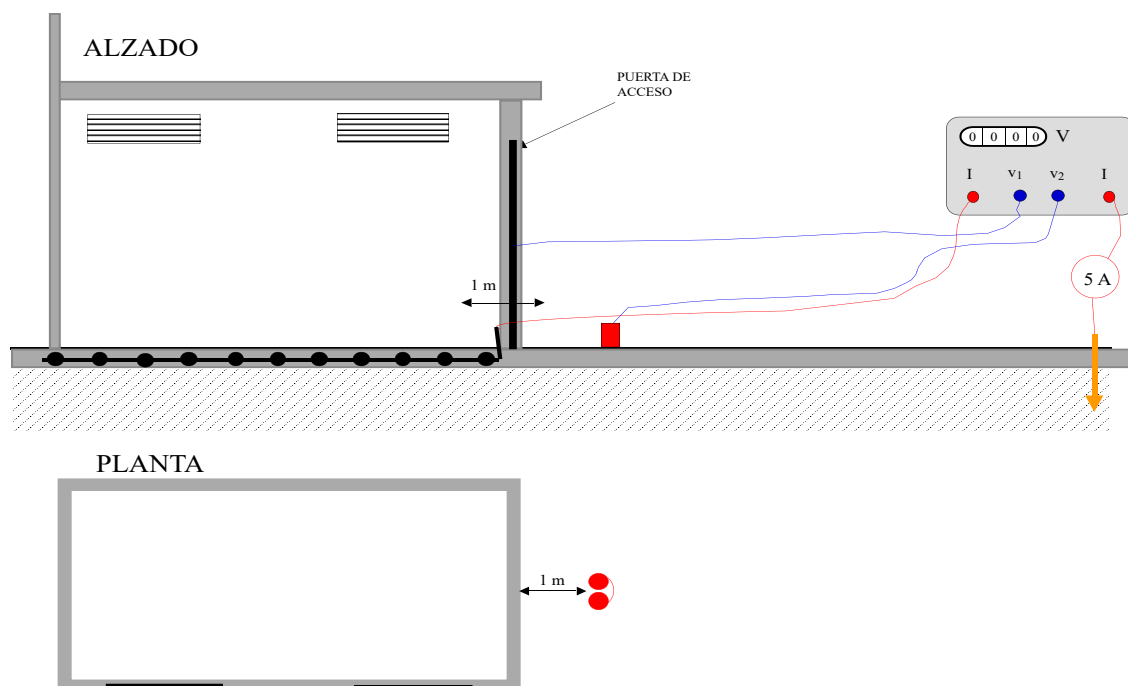


Figura 20.- Medida de la tensión de contacto exterior del CTOU o CTCOU.

Los electrodos de medición para la simulación de los pies con una resistencia a tierra del punto de contacto con el terreno de valor $R_{a2}=1,5\rho_s$, donde ρ_s es la resistividad superficial del suelo, deberán tener cada uno un área de 200 cm² y estarán presionando sobre el suelo con una fuerza mínima de 250 N. Para la medición de la tensión de contacto en cualquier parte de la instalación, dichos electrodos, situados en el suelo, deberán estar juntos y eléctricamente unidos entre sí. Para suelo seco u hormigón conviene colocar entre el suelo y los electrodos un paño húmedo o una película de agua.

Las mediciones se realizarán con un voltímetro con resistencias que representen la impedancia del cuerpo humano, y en su caso del calzado.

La tensión de contacto aplicada será:

$$U_{cam} = U_{Voltimetro}$$

Siempre que la intensidad inyectada, I_m , sea igual a la intensidad de puesta a tierra, I_E .

Cuando la intensidad inyectada, I_m , sea sólo una fracción de la intensidad de puesta a tierra, I_E , la tensión de contacto aplicada se calculará como:

$$U_{cam} = U_{Voltimetro} \frac{I_E}{I_m}$$

La mayoría de los medidores de tensiones de contacto aplicada indican la tensión corregida según la fórmula anterior, es decir multiplicando la tensión de medida con el voltímetro por el factor, I_E/I_m . Para ello el valor de I_E , se debe de introducir mediante el teclado en la memoria del medidor de tensión de contacto.

Para obtener la tensión de contacto aplicada, en el caso de considerarse calzado, utilizando un voltímetro de resistencia interna 2000Ω , el valor de la medición de la tensión de contacto aplicada, U_{ca} , vendrá determinado por:

$$U_{cam} = \frac{U_{Voltmetro}}{2}$$

En este último caso, si además la intensidad inyectada, I_m , es sólo una fracción de la intensidad de puesta a tierra, I_E , la tensión de contacto aplicada se calculará como:

$$U_{cam} = \frac{U_{Voltmetro}}{2} \cdot \frac{I_E}{I_m}$$

El valor de $I_E = r_E \cdot I'_{1F}$, se puede determinar obteniendo el valor de r_E , por la relación:

- $r_E = 1$, para Centros de Transformación con pantallas desconectadas
- $r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T}$, para Centros de Transformación con pantallas conectadas

Siendo $R_T (\Omega)$, el valor medido de la resistencia de puesta a tierra de protección, habiendo desconectado las pantallas de los cables subterráneos de AT.

- 2) Se medirá la resistencia del sistema de puesta a tierra de protección, $R_{TOT} (\Omega)$, incluida la pantalla de los cables subterráneos. En caso de no poder realizarse esta medición, se considerará que la intensidad máxima de defecto a tierra no se reparte a través de las pantallas, siendo R_{TOT} y R_T iguales.
- 3) Se medirá la resistencia del sistema de puesta a tierra de protección, $R_T (\Omega)$, desconectado del centro de transformación.
- 4) Se calculará el valor de r_E .

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T}$$

- 5) Se calculará el valor de la intensidad de defecto a tierra existente en la instalación, mediante la expresión:

$$I'_{1F} = \frac{1,1 U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E} \right)^2}}$$

Siendo los valores de U_n y X_{LTH} , los indicados en la tabla 5.

- 6) Se calculará el tiempo de actuación de las protecciones en caso de defecto a tierra mediante las expresiones:

$$t = \frac{400}{I'_{1F}} \quad (\text{s}), \quad \text{para } U_n \leq 20 \text{ kV}$$

$$t = \frac{2200}{I'_{1F}} \quad (\text{s}), \quad \text{para } U_n = 30 \text{ kV}$$

- 7) Se determinará el valor máximo de la tensión de contacto aplicada (para CTOU y CTCOU) y de paso aplicada a la persona, en función del tiempo t .
- 8) Para el caso de CTOU o CTCOU, se medirá la tensión de contacto en el exterior del edificio (U_{cam}), sobre las partes metálicas del edificio destinado a otros usos (puertas, rejas, vallas, etc.), incluso sobre las que se encuentren más alejadas del Centro de Transformación (véase figura 20).

Para ello, con el equipo de medida correspondiente, se inyectará una intensidad de valor I_m (A), preferentemente de 5 A. Se anotará el valor de la intensidad inyectada I_m , en amperios.

La medida de la tensión de contacto exterior, (U_{cam}) (V), se efectuará entre una parte metálica accesible en el exterior del edificio y entre los electrodos del equipo de medida que simulan los pies de la persona, colocados juntos encima de la acera perimetral del edificio (Véase figura 21).

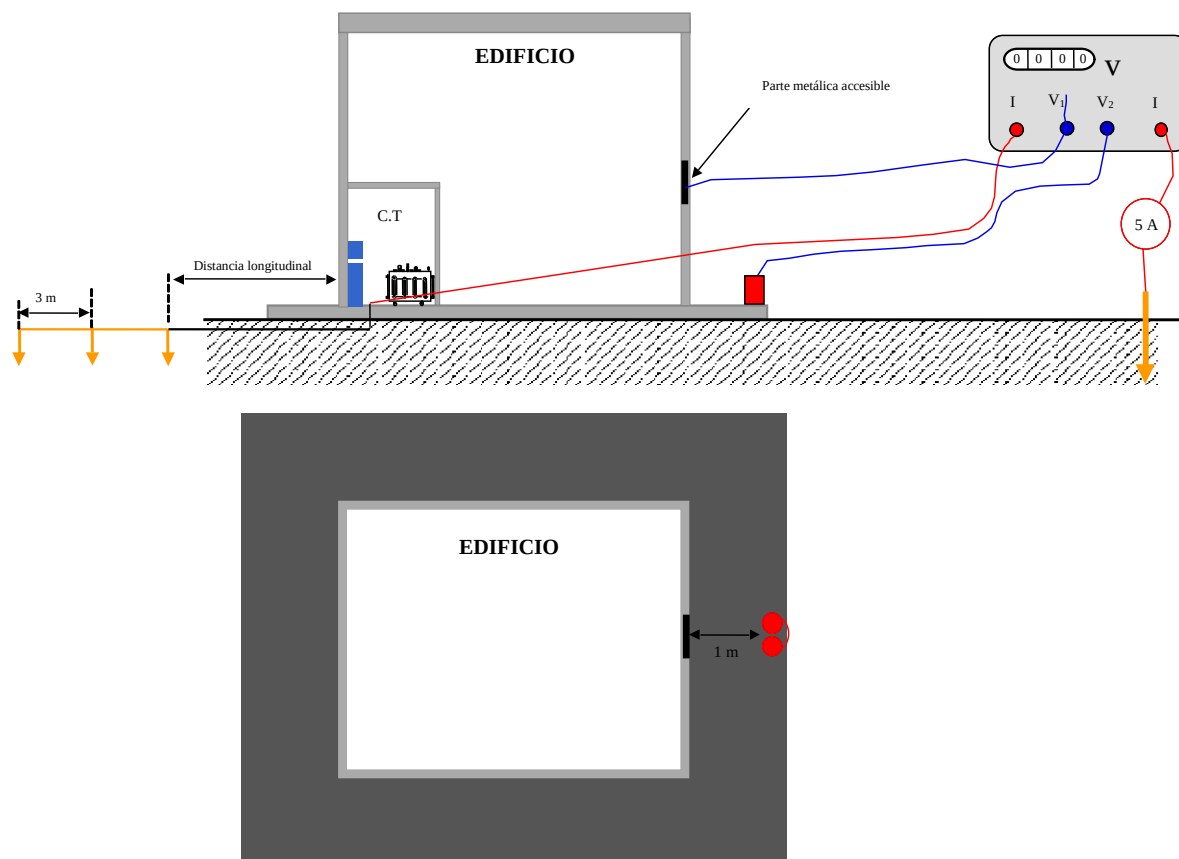


Figura 21.- Medida de la tensión de contacto exterior para CTOU o CTCOU, U_{cam}

- 9) Se medirán las tensiones de paso.

En el caso de centros distintos del CTOU o CTCOU, se medirán valores de la tensión de paso, con los dos pies en el terreno, U_{pam1} (V) y con un pie en la acera y otro en el terreno, U_{pam2} (V).

En el caso del CTOU o CTCOU, se medirán las tensiones de paso en las proximidades del electrodo (U_{pam}) y de paso en el acceso (U_{paccm}).

Para ello, con el equipo de medida correspondiente, se inyectará una intensidad de valor I_m (A), preferentemente de 5 A. Se anotará el valor de la intensidad inyectada I_m , en amperios.

La medida de la tensión de paso, U_{pam1} (V), se efectuará sobre los electrodos del equipo de medida, que simulan los pies de la persona, distanciados a 1 m y colocados en el exterior del Centro de Transformación, preferentemente, con uno de los electrodos situado próximo a la acera del Centro de Transformación (Véanse figuras 22 y 23).

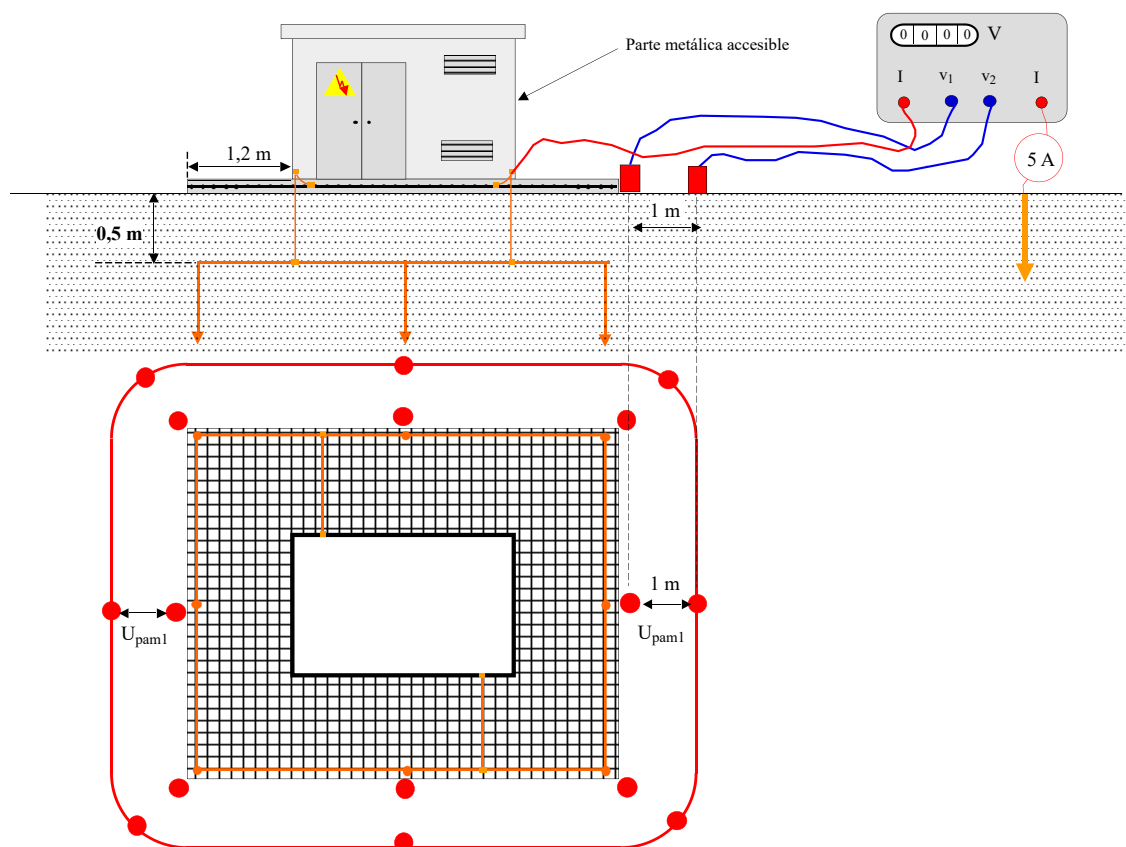


Figura 22.- Medida de la tensión de paso, U_{pam1} , con los dos pies en el terreno del CTS, CTIC, o CTC).

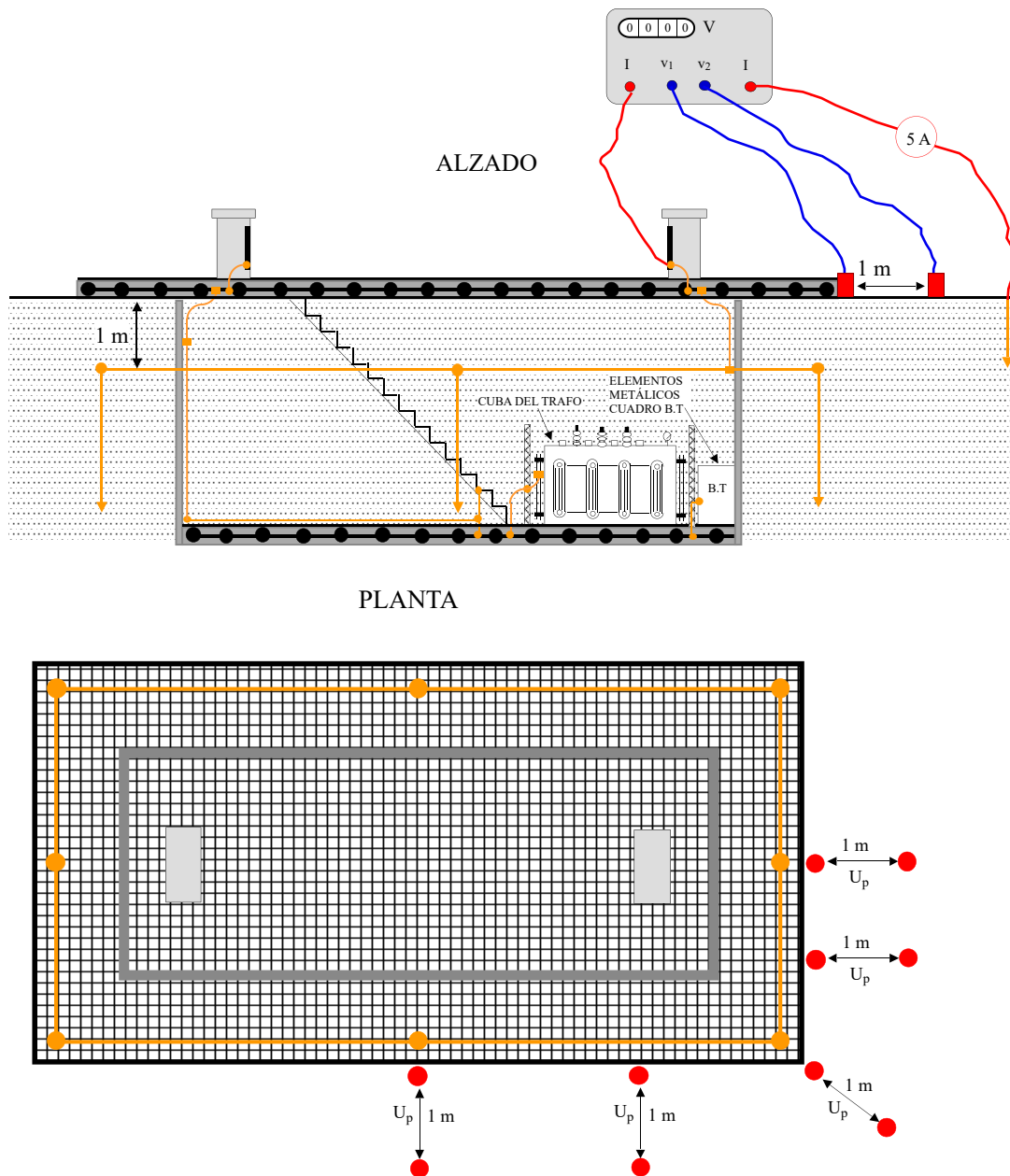


Figura 23.- Medida de la tensión de paso, U_{pam1} , con los dos pies en el terreno del CTPS.

En el caso de CTOU o CTCOU, la medida de la tensión de paso, U_{pam} (V), se efectuará sobre el terreno situado encima del electrodo de puesta a tierra, colocando los electrodos que simulan los pies de la persona, distanciados a 1 m (véase figura 24).

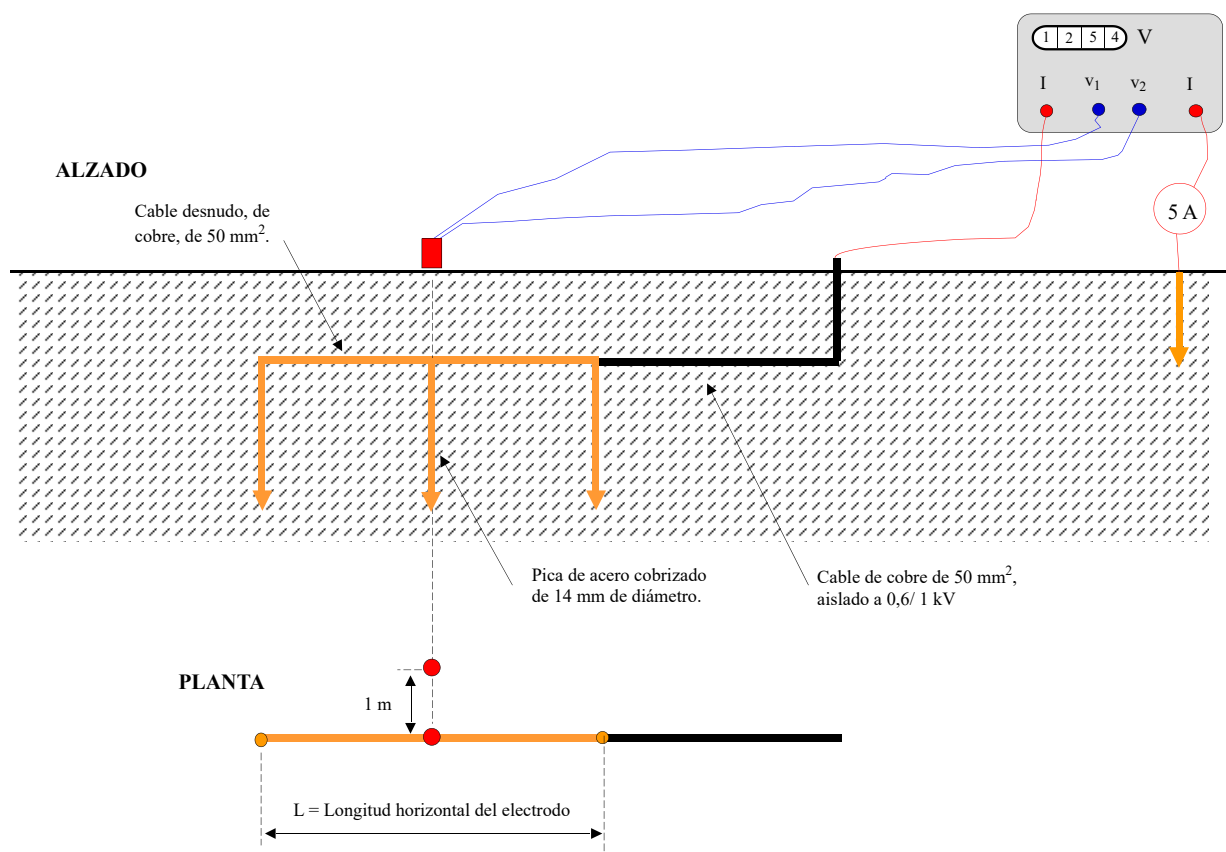


Figura 24.- Medida de la tensión de paso, U_{pam} , con los dos pies en el terreno, CTOU o CTCOU

La tensión de paso medida será igual a la tensión del voltímetro ($U_{voltmetro}$) siempre que la intensidad inyectada, I_m , sea igual a la intensidad de puesta a tierra, I_E .

Cuando la intensidad inyectada, I_m , sea sólo una fracción de la intensidad de puesta a tierra, I_E , la tensión de paso aplicada se calculará como:

$$U_{paml} = U_{Voltmetro} \frac{I_E}{I_m}$$

La mayoría de los medidores de tensiones de paso aplicada indican la tensión corregida según la fórmula anterior, es decir multiplicando la tensión de medida con el voltímetro por el factor, I_E/I_m . Para ello el valor de I_E , se debe de introducir mediante el teclado en la memoria del medidor de tensión de paso.

Para obtener la tensión de paso aplicada, en el caso de considerarse calzado, utilizando un voltímetro de resistencia interna 5000 Ω , el valor de la medición de la tensión de paso aplicada, U_{pa} , vendrá determinado por:

$$U_{paml} = \frac{U_{Voltmetro}}{5}$$

En este último caso, si además la intensidad inyectada, I_m , es sólo una fracción de la intensidad de puesta a tierra, I_E , la tensión de contacto aplicada se calculará como:

$$U_{paml} = \frac{U_{Voltmetro}}{5} \cdot \frac{I_E}{I_m}$$

El valor de $I_E = r_E \cdot I'_F$, se puede determinar obteniendo el valor de r_E , por la relación:

- $r_E = 1$, para Centros de Transformación con pantallas desconectadas.
- $r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T}$, para Centros de Transformación con pantallas conectadas

Siendo R_T (Ω), el valor medido de la resistencia de puesta a tierra de protección, habiendo desconectado las pantallas de los cables subterráneos de AT.

La medida de la tensión de paso, U_{pam2} (V), para Centro de Transformación distinto de CTOU o CTCOU, se efectuará sobre los electrodos del equipo de medida, que simulan los pies de la persona, distanciados a 1 m y colocados en el exterior del Centro de Transformación, con uno de los electrodos situado encima de la acera equipotencial del Centro de Transformación (Véanse figuras 25 y 26), y se procederá de la misma forma que en el caso anterior.

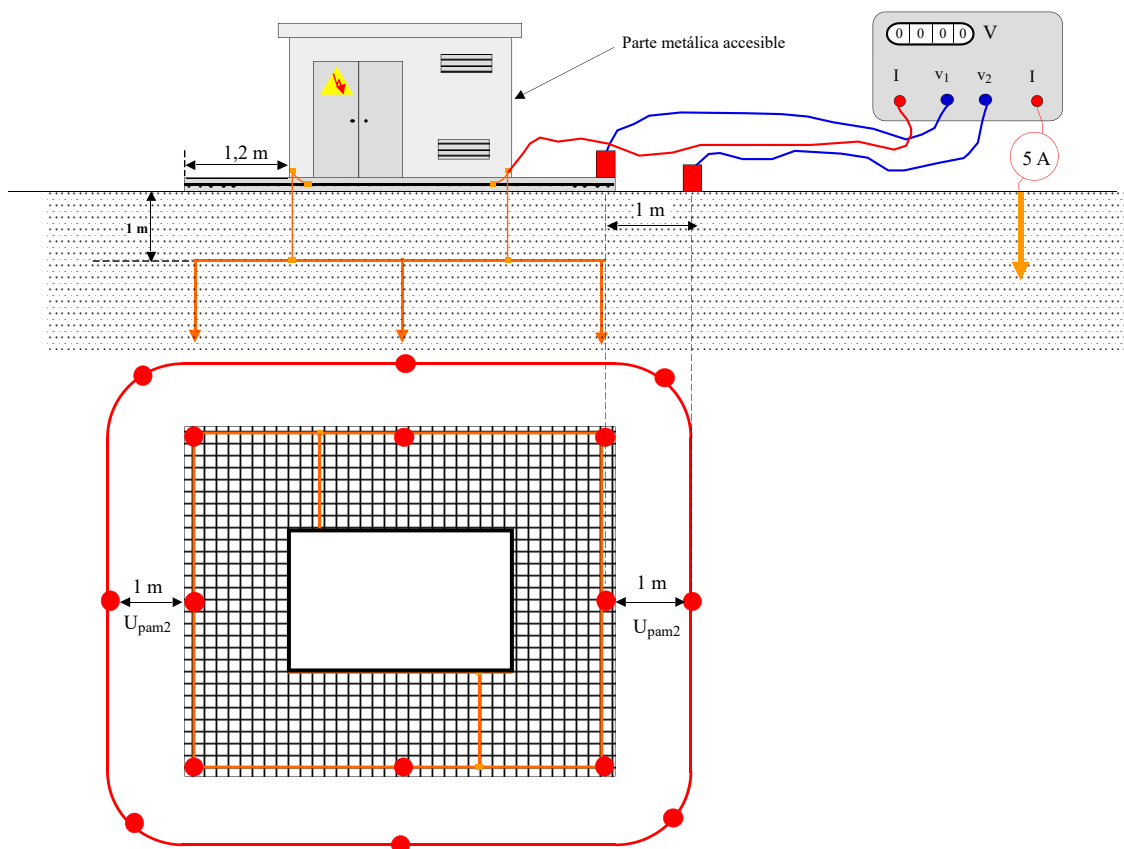


Figura 25.- Medida de la tensión de paso, U_{pam2} , con un pie en la acera y otro en el terreno del CTS, CTIC, o CTC).

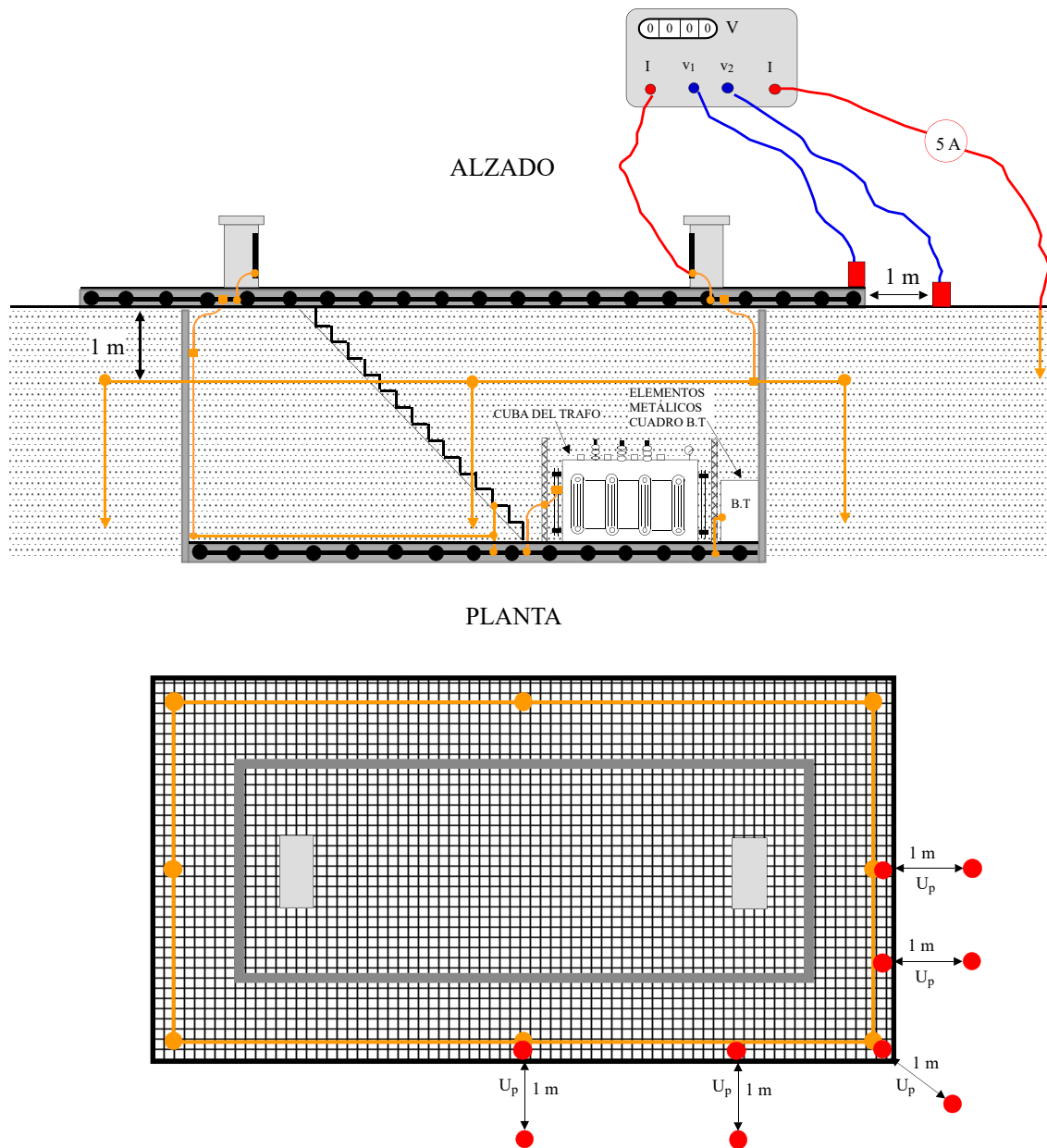


Figura 26.- Medida de la tensión de paso, U_{pam2} , con un pie en la acera y otro en el terreno del CTPS.

Para CTOU, la medida de la tensión de paso en el acceso, U_{paccm} (V), para centros de transformación conectados a una red de tensión nominal ≤ 30 kV, se efectuará colocando los electrodos que simulan los pies de la persona distanciados a 1 m, uno dentro del Centro de Transformación y otro fuera del mismo (Véase figura 27).

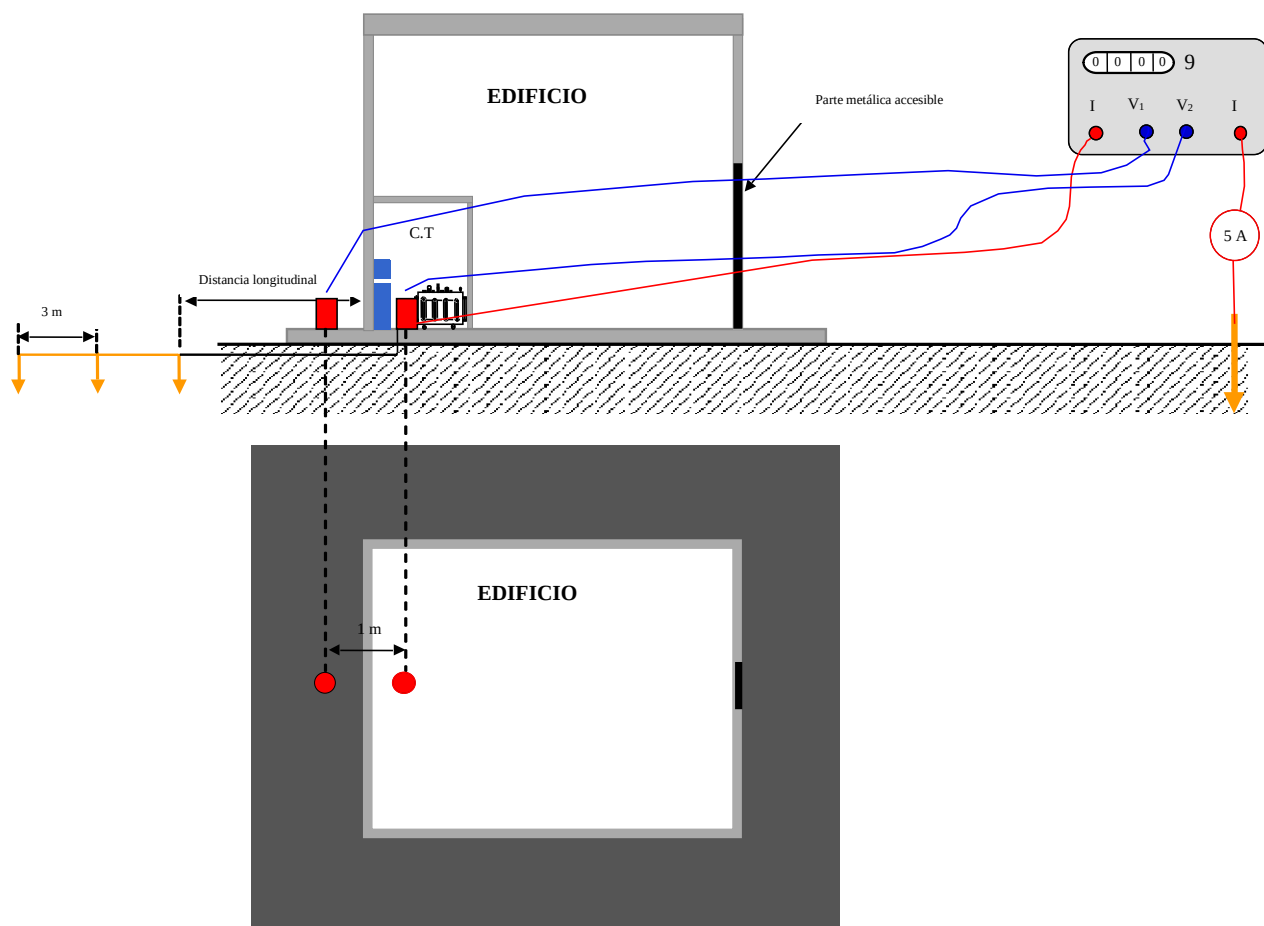


Figura 27.- Medida de la tensión de paso en el acceso, $U_{pacc.m.}$ para CTOU en 30kV

- 10) Si el mayor valor de entre los obtenidos para U_{pam1} y U_{pam2} es menor o igual que el valor admisible de la tensión de paso aplicada calculada en el punto 7, $V_{máx.pa}$, el diseño de la puesta a tierra del Centro de Transformación es adecuado, cumpliendo con los requisitos establecidos en la ITC- RAT 13.

En el caso de CTOU o CTCOU, si el valor obtenido para U_{cam} , U_{pam} , U_{pacm} , es menor o igual que el valor admisible de la tensión de contacto aplicada, $U_{máx.ca}$, paso aplicada, $U_{máx.pa}$ o paso en el acceso aplicada, $U_{máx.pacc}$ respectivamente, calculada en el punto 7, el diseño de la puesta a tierra del Centro de Transformación es adecuado, cumpliendo con los requisitos establecidos en la ITC- RAT 13.

- 11) Adicionalmente, se deberá calcular la elevación de tensión de la tierra de protección, para el caso de defectos a tierra en la parte de Alta Tensión del Centro de Transformación. Para ello se multiplicará el valor medido de R_{TOT} por la intensidad de defecto a tierra I'_{1F} calculada en el apartado 5. Si la tensión obtenida es menor de 1000 V, se dejarán las dos tierras conectadas en la caja de unión de tierras y se marcará esta posición como habitual en dicha caja. En caso de que sea igual o superior a 1000 V, se dejarán desconectadas, y se marcará esta posición como habitual en la caja de unión de tierras.

ANEXO 1. TABLAS

En las siguientes tablas se muestran los electrodos para cada tipo de Centro de Transformación, nivel de tensión, con las pantallas de los cables conectadas o desconectadas en los extremos y tipo de acceso (con calzado y sin calzado), mostrando en cada columna:

- Designación de electrodo: CPT-CT-A-(XxY) + 8P2

Donde:

CPT: Configuración de Puesta a Tierra.

CT: Centro de Transformación.

A: Anillo formado por conductor de cobre de 50 mm².

(XxY): Dimensiones del anillo (A 1 m del perímetro del Centro de Transformación).

5/8P2: Número de picas (5 u 8) y longitud de las picas (2 m) del anillo.

- $\rho_{\max}$: resistividad del terreno máxima para la cual es válido y se puede utilizar cada electrodo. Para resistividades mayores a las indicadas en las tablas se añadirá flagelo.

- N: Mínimo número de Centros de Transformación adicionales conectados a través de las pantallas.

- Kr: coeficiente de resistencia de puesta a tierra.

- Kr': coeficiente de resistencia de puesta a tierra más desfavorable de los Centros de Transformación adicionales conectados a través de las pantallas $(0,088 \frac{\Omega}{\Omega.m})$ o coeficiente de resistencia de puesta a tierra más desfavorable del apoyo para el caso de pantallas desconectadas $(0,128 \frac{\Omega}{\Omega.m})$

Para Centros de Transformación con pantallas desconectadas (alimentado por líneas aéreas) se ha considerado que la tierra del Centro de Transformación se conecta a la tierra del apoyo a través de las pantallas de los cables.

- Kp: coeficiente de tensión de paso.

- Kp.t-t: coeficiente de tensión de paso con los dos pies en el terreno.

- Kp.a-t: coeficiente de tensión de paso con un pie en la acera y otro en el terreno.

Para la red de 30 kV se ha considerado una Intensidad máxima de falta a tierra de 5000 A.

Para instalaciones cuya intensidad de falta puedan ser superiores a 5000 A será necesario un proyecto específico para calcular el electrodo necesario.

La tensión que aparece en la instalación debe ser menor a 10 kV.

A1.1. CENTRO DE TRANSFORMACIÓN DE SUPERFICIE (CTS) Y CENTRO DE SECCIONAMIENTO INDEPENDIENTE (CSI)

Tabla A1.1.1 Centros de Transformación prefabricados de hormigón de superficie (CTS) y Centros de Seccionamiento independientes (CSI).
Tensión nominal ≤ 20 kV. Pantallas de los cables: conectado. Accesibilidad: con calzado y sin calzado.

Designación del electrodo	ρ max (Ω.m)												Kr $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	Kp.t-t $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	Kp.a-t $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	pantallas conectadas a un apoyo			pantallas conectadas a un CT											
				20 kV con I'1Fp=2228 A			20 kV con I'1Fp=1000 A			20 kV con I'1Fp=500 A		<20 kV N=1			
	20 kV con I'1Fp=2228 A	20 kV con I'1Fp=1000 A	<20 kV o 20 kV con I'1Fp=500 A	N=2	N=4	N=8	N=1	N=2	N=4	N=1	N=2				
CPT-CT-A-(3x4)+8P2	100	300	500	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08800	0,01943	0,04414
CPT-CT-A-(3x4.5)+8P2	100	300	500	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08491	0,01859	0,04241
CPT-CT-A-(3x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08210	0,01784	0,04085
CPT-CT-A-(3x5.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07952	0,01717	0,03942
CPT-CT-A-(3x6)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07714	0,01656	0,03811
CPT-CT-A-(3x6.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07494	0,01600	0,03690
CPT-CT-A-(3x7)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07288	0,01549	0,03578
CPT-CT-A-(3.5x4)+8P2	100	300	500	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08465	0,01843	0,04224
CPT-CT-A-(3.5x4.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08175	0,01764	0,04063
CPT-CT-A-(3.5x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07911	0,01695	0,03917
CPT-CT-A-(3.5x5.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07669	0,01633	0,03784
CPT-CT-A-(3.5x6)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07445	0,01576	0,03661
CPT-CT-A-(3.5x6.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07237	0,01524	0,03547
CPT-CT-A-(3.5x7)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07043	0,01476	0,03441
CPT-CT-A-(4x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07643	0,01613	0,03768
CPT-CT-A-(4x5.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07414	0,01555	0,03643
CPT-CT-A-(4x6)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07202	0,01502	0,03527
CPT-CT-A-(4x6.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,07005	0,01454	0,03420

Designación del electrodo	ρ max (Ω.m)												Kr $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	Kp.t-t $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	Kp.a-t $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	pantallas conectadas a un apoyo			pantallas conectadas a un CT											
				20 kV con I'1Fp=2228 A			20 kV con I'1Fp=1000 A			20 kV con I'1Fp=500 A		<20 kV N=1			
	20 kV con I'1Fp=2228 A	20 kV con I'1Fp=1000 A	<20 kV o 20 kV con I'1Fp=500 A	N=2	N=4	N=8	N=1	N=2	N=4	N=1	N=2				
CPT-CT-A-(4x7)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06822	0,01409	0,03320
CPT-CT-A-(4x7.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06650	0,01368	0,03227
CPT-CT-A-(4x8)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06488	0,01329	0,03140
CPT-CT-A-(4x8.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06336	0,01293	0,03058
CPT-CT-A-(4x9)+8P2	100	300	800	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06192	0,01260	0,02980
CPT-CT-A-(4.5x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07399	0,01537	0,03634
CPT-CT-A-(4.5x5.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07182	0,01482	0,03516
CPT-CT-A-(4.5x6)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06981	0,01433	0,03407
CPT-CT-A-(4.5x6.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06795	0,01388	0,03305
CPT-CT-A-(4.5x7)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06620	0,01346	0,03211
CPT-CT-A-(4.5x7.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06457	0,01307	0,03122
CPT-CT-A-(4.5x8)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06303	0,01271	0,03040
CPT-CT-A-(4.5x8.5)+8P2	100	300	800	200	400	700	400	600	1000	800	1000	1000	0,06158	0,01238	0,02962
CPT-CT-A-(4.5x9)+8P2	100	300	800	200	400	700	400	600	1000	800	1000	1000	0,06021	0,01206	0,02888
CPT-CT-A-(5x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07175	0,01466	0,03512
CPT-CT-A-(5x5.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06969	0,01414	0,03400
CPT-CT-A-(5x6)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06779	0,01368	0,03297
CPT-CT-A-(5x6.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06601	0,01325	0,03201
CPT-CT-A-(5x7)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06435	0,01286	0,03111
CPT-CT-A-(5x7.5)+8P2	100	300	700	200	400	700	400	600	900	800	1000	1000	0,06279	0,01250	0,03027
CPT-CT-A-(5x8)+8P2	100	300	800	200	400	700	400	600	1000	800	1000	1000	0,06133	0,01216	0,02948
CPT-CT-A-(5x8.5)+8P2	100	300	800	200	400	700	400	600	1000	800	1000	1000	0,05994	0,01185	0,02874
CPT-CT-A-(5x9)+8P2	100	400	800	200	400	700	400	600	1000	800	1000	1000	0,05863	0,01155	0,02804

Tabla A1.1.2 Centros de Transformación prefabricados de hormigón de superficie (CTS) y Centros de Seccionamiento independientes (CSI). Tensión nominal 30 kV. $I_{1Fp} < 5000$ A. Pantallas de los cables: conectado a un Centro de Transformación. Accesibilidad: con calzado.

Designación del electrodo	$\rho \text{ max } (\Omega.m)$				K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m} \right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$
	N=3	N=7	N=14	N=22			
CPT-CT-A-(3x4)+8P2	100	200	400	600	0,08800	0,01943	0,04414
CPT-CT-A-(3x4.5)+8P2	100	200	400	600	0,08491	0,01859	0,04241
CPT-CT-A-(3x5)+8P2	100	200	400	600	0,08210	0,01784	0,04085
CPT-CT-A-(3x5.5)+8P2	100	200	400	600	0,07952	0,01717	0,03942
CPT-CT-A-(3x6)+8P2	100	200	400	600	0,07714	0,01656	0,03811
CPT-CT-A-(3x6.5)+8P2	100	200	400	600	0,07494	0,01600	0,03690
CPT-CT-A-(3x7)+8P2	100	200	400	600	0,07288	0,01549	0,03578
CPT-CT-A-(3.5x4)+8P2	100	200	400	600	0,08465	0,01843	0,04224
CPT-CT-A-(3.5x4.5)+8P2	100	200	400	600	0,08175	0,01764	0,04063
CPT-CT-A-(3.5x5)+8P2	100	200	400	600	0,07911	0,01695	0,03917
CPT-CT-A-(3.5x5.5)+8P2	100	200	400	600	0,07669	0,01633	0,03784
CPT-CT-A-(3.5x6)+8P2	100	200	400	600	0,07445	0,01576	0,03661
CPT-CT-A-(3.5x6.5)+8P2	100	200	400	600	0,07237	0,01524	0,03547
CPT-CT-A-(3.5x7)+8P2	100	200	400	600	0,07043	0,01476	0,03441
CPT-CT-A-(4x5)+8P2	100	200	400	600	0,07643	0,01613	0,03768
CPT-CT-A-(4x5.5)+8P2	100	200	400	600	0,07414	0,01555	0,03643
CPT-CT-A-(4x6)+8P2	100	200	400	600	0,07202	0,01502	0,03527
CPT-CT-A-(4x6.5)+8P2	100	200	400	600	0,07005	0,01454	0,03420
CPT-CT-A-(4x7)+8P2	100	200	400	600	0,06822	0,01409	0,03320
CPT-CT-A-(4x7.5)+8P2	100	200	400	600	0,06650	0,01368	0,03227

Designación del electrodo	$\rho \text{ max } (\Omega.m)$				K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m} \right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$
	N=3	N=7	N=14	N=22			
CPT-CT-A-(4x8)+8P2	100	200	400	600	0,06488	0,01329	0,03140
CPT-CT-A-(4x8.5)+8P2	100	200	400	600	0,06336	0,01293	0,03058
CPT-CT-A-(4x9)+8P2	100	200	400	600	0,06192	0,01260	0,02980
CPT-CT-A-(4.5x5)+8P2	100	200	400	600	0,07399	0,01537	0,03634
CPT-CT-A-(4.5x5.5)+8P2	100	200	400	600	0,07182	0,01482	0,03516
CPT-CT-A-(4.5x6)+8P2	100	200	400	600	0,06981	0,01433	0,03407
CPT-CT-A-(4.5x6.5)+8P2	100	200	400	600	0,06795	0,01388	0,03305
CPT-CT-A-(4.5x7)+8P2	100	200	400	600	0,06620	0,01346	0,03211
CPT-CT-A-(4.5x7.5)+8P2	100	200	400	600	0,06457	0,01307	0,03122
CPT-CT-A-(4.5x8)+8P2	100	200	400	600	0,06303	0,01271	0,03040
CPT-CT-A-(4.5x8.5)+8P2	100	200	400	600	0,06158	0,01238	0,02962
CPT-CT-A-(4.5x9)+8P2	100	200	400	600	0,06021	0,01206	0,02888
CPT-CT-A-(5x5)+8P2	100	200	400	600	0,07175	0,01466	0,03512
CPT-CT-A-(5x5.5)+8P2	100	200	400	600	0,06969	0,01414	0,03400
CPT-CT-A-(5x6)+8P2	100	200	400	600	0,06779	0,01368	0,03297
CPT-CT-A-(5x6.5)+8P2	100	200	400	600	0,06601	0,01325	0,03201
CPT-CT-A-(5x7)+8P2	100	200	400	600	0,06435	0,01286	0,03111
CPT-CT-A-(5x7.5)+8P2	100	200	400	600	0,06279	0,01250	0,03027
CPT-CT-A-(5x8)+8P2	100	200	400	600	0,06133	0,01216	0,02948
CPT-CT-A-(5x8.5)+8P2	100	200	400	600	0,05994	0,01185	0,02874
CPT-CT-A-(5x9)+8P2	100	200	400	600	0,05863	0,01155	0,02804

A 1.2. CENTRO DE TRANSFORMACIÓN PREFABRICADO SUBTERRANEO (CTPS)

Tabla A1.2.1 Centros de Transformación prefabricados de hormigón subterráneos (CTPS).**Tensión nominal ≤ 20 kV. Pantallas de los cables: conectado a un Centro de Transformación. Accesibilidad: con calzado y sin calzado.**

Designación del electrodo	$\rho_{\max}$ ($\Omega.m$)							K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	<20 kV o 20 kV con $I'_{1Fp}=500$ A N=1	20 kV con $I'_{1Fp}=1000$ A		20 kV con $I'_{1Fp}=2228$ A						
		N=1	N=3	N=1	N=2	N=4	N=8			
CPT-CT-A-(4,5x6,5)+8P2	800	400	800	100	200	400	700	0,06437	0,00847	0,03137
CPT-CT-A-(4,5x7)+8P2	800	400	800	100	200	400	700	0,06276	0,00821	0,03049
CPT-CT-A-(4,5x7,5)+8P2	800	400	800	200	200	400	700	0,06124	0,00796	0,02967
CPT-CT-A-(4,5x8)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05982	0,00773	0,0289
CPT-CT-A-(4,5x8,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05847	0,00752	0,02817
CPT-CT-A-(4,5x9)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05719	0,00732	0,02749
CPT-CT-A-(5x6,5)+8P2	800	400	800	100	200	400	700	0,06259	0,00814	0,0304
CPT-CT-A-(5x7)+8P2	800	400	800	200	200	400	700	0,06106	0,00788	0,02957
CPT-CT-A-(5x7,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05961	0,00765	0,02879
CPT-CT-A-(5x8)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05825	0,00744	0,02806
CPT-CT-A-(5x8,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05697	0,00724	0,02736
CPT-CT-A-(5x9)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05575	0,00705	0,02671
CPT-CT-A-(5x9,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05459	0,00687	0,02609
CPT-CT-A-(5x10)+8P2	900	400	800	200	300	400	700	0,05349	0,00671	0,0255
CPT-CT-A-(5,5x6,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,06095	0,00784	0,02952
CPT-CT-A-(5,5x7)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05949	0,0076	0,02872

Designación del electrodo	$\rho_{\max}$ ($\Omega.m$)							K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	<20 kV o 20 kV con $I'_{IFp}=500$ A N=1	20 kV con $I'_{IFp}=1000$ A		20 kV con $I'_{IFp}=2228$ A						
		N=1	N=3	N=1	N=2	N=4	N=8			
CPT-CT-A-(5,5x7,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,0581	0,00738	0,02798
CPT-CT-A-(5,5x8)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,0568	0,00717	0,02728
CPT-CT-A-(5,5x8,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05557	0,00698	0,02662
CPT-CT-A-(5,5x9)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,0544	0,0068	0,02599
CPT-CT-A-(5,5x9,5)+8P2	900	400	800	200	300	400	700	0,05329	0,00664	0,0254
CPT-CT-A-(5,5x10)+8P2	900	400	800	200	300	400	800	0,05223	0,00648	0,02484
CPT-CT-A-(6x6,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05942	0,00756	0,02869
CPT-CT-A-(6x7)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05802	0,00734	0,02794
CPT-CT-A-(6x7,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,0567	0,00713	0,02723
CPT-CT-A-(6x8)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05545	0,00693	0,02656
CPT-CT-A-(6x8,5)+8P2	900	400	800	200	200	400	700	0,05427	0,00675	0,02593
CPT-CT-A-(6x9)+8P2	900	400	800	200	300	400	700	0,05314	0,00658	0,02533
CPT-CT-A-(6x9,5)+8P2	900	400	800	200	300	400	800	0,05208	0,00642	0,02476
CPT-CT-A-(6x10)+8P2	1000	500	800	200	300	400	800	0,05106	0,00627	0,02422

Tabla A1.2.2 Centros de Transformación prefabricados de hormigón subterráneos (CTPS).**Tensión nominal 30 kV. $I_{1Fp} < 5000$ A. Pantallas de los cables: conectado a un Centro de Transformación. Accesibilidad: con calzado y sin calzado.**

Designación del electrodo	$\rho_{\max}$ ($\Omega.m$)				K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	N=3	N=7	N=14	N=22			
CPT-CT-A-(4,5x6,5)+8P2	100	200	400	600	0,06437	0,00847	0,03137
CPT-CT-A-(4,5x7)+8P2	100	200	400	600	0,06276	0,00821	0,03049
CPT-CT-A-(4,5x7,5)+8P2	100	200	400	600	0,06124	0,00796	0,02967
CPT-CT-A-(4,5x8)+8P2	100	200	400	600	0,05982	0,00773	0,0289
CPT-CT-A-(4,5x8,5)+8P2	100	200	400	600	0,05847	0,00752	0,02817
CPT-CT-A-(4,5x9)+8P2	100	200	400	600	0,05719	0,00732	0,02749
CPT-CT-A-(5x6,5)+8P2	100	200	400	600	0,06259	0,00814	0,0304
CPT-CT-A-(5x7)+8P2	100	200	400	600	0,06106	0,00788	0,02957
CPT-CT-A-(5x7,5)+8P2	100	200	400	600	0,05961	0,00765	0,02879
CPT-CT-A-(5x8)+8P2	100	200	400	600	0,05825	0,00744	0,02806
CPT-CT-A-(5x8,5)+8P2	100	200	400	600	0,05697	0,00724	0,02736
CPT-CT-A-(5x9)+8P2	100	200	400	600	0,05575	0,00705	0,02671
CPT-CT-A-(5x9,5)+8P2	100	200	400	600	0,05459	0,00687	0,02609
CPT-CT-A-(5x10)+8P2	100	200	400	600	0,05349	0,00671	0,0255
CPT-CT-A-(5,5x6,5)+8P2	100	200	400	600	0,06095	0,00784	0,02952
CPT-CT-A-(5,5x7)+8P2	100	200	400	600	0,05949	0,0076	0,02872
CPT-CT-A-(5,5x7,5)+8P2	100	200	400	600	0,0581	0,00738	0,02798
CPT-CT-A-(5,5x8)+8P2	100	200	400	600	0,0568	0,00717	0,02728
CPT-CT-A-(5,5x8,5)+8P2	100	200	400	600	0,05557	0,00698	0,02662
CPT-CT-A-(5,5x9)+8P2	100	200	400	600	0,0544	0,0068	0,02599

Designación del electrodo	$\rho_{\max}$ ($\Omega.m$)				K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	N=3	N=7	N=14	N=22			
CPT-CT-A-(5,5x9,5)+8P2	100	200	400	600	0,05329	0,00664	0,0254
CPT-CT-A-(5,5x10)+8P2	100	200	400	600	0,05223	0,00648	0,02484
CPT-CT-A-(6x6,5)+8P2	100	200	400	600	0,05942	0,00756	0,02869
CPT-CT-A-(6x7)+8P2	100	200	400	600	0,05802	0,00734	0,02794
CPT-CT-A-(6x7,5)+8P2	100	200	400	600	0,0567	0,00713	0,02723
CPT-CT-A-(6x8)+8P2	100	200	400	600	0,05545	0,00693	0,02656
CPT-CT-A-(6x8,5)+8P2	100	200	400	600	0,05427	0,00675	0,02593
CPT-CT-A-(6x9)+8P2	100	200	400	600	0,05314	0,00658	0,02533
CPT-CT-A-(6x9,5)+8P2	100	200	400	600	0,05208	0,00642	0,02476
CPT-CT-A-(6x10)+8P2	100	200	400	600	0,05106	0,00627	0,02422

A 1.3 CENTROS DE TRANSFORMACIÓN INTEMPERIE COMPACTO (CTIC)

Tabla A1.3.1 Centros de Transformación de intemperie compactos (CTIC).
Tensión nominal ≤ 20 kV. Pantallas de los cables: conectado a un apoyo. Accesibilidad: con calzado y sin calzado.

Designación del electrodo	$\rho_{\max}^{(*)}$ ($\Omega.m$)			K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m} \right)$	$K_{p,t-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$	$K_{p,a-t}$ $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A} \right)$
	20 kV con $I'_{IFP}=2228$ A	20 kV con $I'_{IFP}=1000$ A	<20 kV o 20 kV con $I'_{IFP}=500$ A			
CPT-CT-A-(3x4)+8P2	100	300	500	0,08800	0,01943	0,04414
CPT-CT-A-(3x4.5)+8P2	100	300	500	0,08491	0,01859	0,04241
CPT-CT-A-(3x5)+8P2	100	300	600	0,08210	0,01784	0,04085
CPT-CT-A-(3.5x4)+8P2	100	300	500	0,08465	0,01843	0,04224
CPT-CT-A-(3.5x4.5)+8P2	100	300	600	0,08175	0,01764	0,04063
CPT-CT-A-(3,5x5)+8P2	100	300	600	0,07911	0,01695	0,03917
CPT-CT-A-(4x4)+8P2	100	300	600	0,08164	0,01751	0,04056
CPT-CT-A-(4x4.5)+8P2	100	300	600	0,07892	0,01678	0,03905
CPT-CT-A-(4x5)+8P2	100	300	600	0,07643	0,01613	0,03768
CPT-CT-A-(4.5x4.5)+8P2	100	300	600	0,07634	0,01598	0,03763
CPT-CT-A-(4,5x5)+8P2	100	300	600	0,07399	0,01537	0,03634

* Se considerará la puesta a tierra del apoyo para el peor caso, entre un apoyo con una resistencia de puesta a tierra según MT 2.23.35 o una resistencia de puesta a tierra de 20Ω

A 1.4 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN COMPACTO EN EDIFICIO PREFABRICADO DE SUPERFICIE (CTC)

Tabla A1.4.1 Centros de Transformación compactos en edificios prefabricados de superficie (CTC).
Tensión nominal 20 kV. Pantalla de los cables: Conectado. Accesibilidad: con calzado y sin calzado.

Designación del electrodo	ρ max (Ω.m)												$\left(\frac{K_r}{\frac{\Omega}{\Omega.m}}\right)$	$\left(\frac{Kp.t-t}{\left(\frac{V}{(\Omega.m)}.A\right)}\right)$	$\left(\frac{Kp.a-t}{\left(\frac{V}{(\Omega.m)}.A\right)}\right)$
	pantallas conectadas a un apoyo			pantallas conectadas a un CT											
				20 kV con I´1Fp=2228 A			20 kV con I´1Fp=1000 A			20 kV con I´1Fp=500 A		<20 kV			
	20 kV con I´1Fp=2228 A	20 kV con I´1Fp=1000 A	<20 kV o 20 kV con I´1Fp=500 A	N=2	N=4	N=8	N=1	N=2	N=4	N=1	N=2				
CPT-CT-A-(3.5x3.5)+8P2	100	300	500	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08784	0,01932	0,04403
CPT-CT-A-(3.5x4)+8P2	100	300	500	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08465	0,01843	0,04224
CPT-CT-A-(3.5x4.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08175	0,01764	0,04063
CPT-CT-A-(3.5x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07911	0,01695	0,03917
CPT-CT-A-(4x4)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,08164	0,01751	0,04056
CPT-CT-A-(4x4.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07892	0,01678	0,03905
CPT-CT-A-(4x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07643	0,01613	0,03768
CPT-CT-A-(4.5x4.5)+8P2	100	300	600	200	400	700	300	500	900	700	1000	1000	0,07634	0,01598	0,03763
CPT-CT-A-(4,5x5)+8P2	100	300	600	200	400	700	400	500	900	800	1000	1000	0,07399	0,01537	0,03634

A 1.5 CENTRO DE TRANSFORMACIÓN EN EDIFICIO DE OTROS USOS (CTOU Y CTCOU)

Tabla A1.5.1 Centros de Transformación en edificio de otros usos (CTOU) y Centros de Transformación compacto en edificios de otros usos (CTCOU).
Tensión nominal ≤ 20 kV. Pantalla de los cables: Conectado.

Designación del electrodo	$\rho^{\max}$ ($\Omega.m$)								<20 kV N=1	K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	K_p $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	20 kV con $I'_{1Fp}=2228$ A			20 kV con $I'_{1Fp}=1000$ A			20 kV con $I'_{1Fp}=500$ A				
	N=2	N=4	N=10	N=1	N=2	N=4	N=1	N=2			
CPT-CTL-5P2	200	400	900	300	500	900	700	1000	1000	0,0852	0,01455

Tabla A1.5.2 Centros de Transformación en edificio de otros usos (CTOU).
Tensión nominal 30kV. Pantalla de los cables: Conectado. $I'_{1Fp} < 5000$ A.

Designación del electrodo	$\rho_{\max}$ ($\Omega.m$)				K_r $\left(\frac{\Omega}{\Omega.m}\right)$	K_p $\left(\frac{V}{(\Omega.m).A}\right)$
	N=3	N=6	N=14	N=21		
CPT-CTL-8P2	100	200	400	600	0,0556	0,00621

ANEXO 2. HOJA DE TOMA DE DATOS PARA LA VERIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS DE PUESTA A TIERRA

CENTRO DE TRANSFORMACIÓN Nº	Valor medido de la resistencia de puesta a tierra con pantallas $R_{TOT}(\Omega)$	Valor medido de la resistencia de puesta a tierra sin pantallas $R_T(\Omega)$	$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T}$ (1)	Tensión nominal de la red $U_n(V)$	Valor considerado de la reactancia $X_{LTH}(\Omega)$	Intensidad calculada de defecto a tierra $I'_{1F}(A)$	Tiempo calculado de actuación de la protección $t(s)$	Intensidad calculada de puesta a tierra $I_E(A)$ (1)

Valor de la tensión de contacto aplicada admisible $U_{m\acute{a}x.ca}(V)$	Intensidad inyectada con el medidor $I_m(A)$	Valor medido de la tensión de contacto aplicada $U_{cam}(V)$	Valor de la tensión de contacto obtenida, corregida (2) $U_{ca} = U_{cam} \cdot \frac{I_E}{I_m}(V)$	$U_{ca} \leq U_{m\acute{a}x.ca}$ SI --- CUMPLE NO—NO CUMPLE

Valor de la tensión de paso aplicada admisible $U_{m\acute{a}x.pa}(V)$	Intensidad inyectada con el medidor $I_m(A)$	Valor medido de la tensión de paso aplicada $U_{pam1}(V)$	Valor mayor de la tensión de paso obtenida, corregida (2) $U_{pa} = U_{pam1} \cdot \frac{I_E}{I_m}(V)$	$U_{pa} \leq U_{m\acute{a}x.pa}$ SI --- CUMPLE NO—NO CUMPLE

Valor de la tensión de paso en el acceso aplicada admisible $U_{m\acute{a}x.pacc}(V)$	Intensidad inyectada con el medidor $I_m(A)$	Valor medido de la tensión de paso en el acceso aplicada $U_{pam2}(V)$	Valor mayor de la tensión de paso obtenida, corregida (2) $U_{pacc} = U_{pam2} \cdot \frac{I_E}{I_m}(V)$	$U_{pacc} \leq U_{m\acute{a}x.pacc}$ SI --- CUMPLE NO—NO CUMPLE

(1) En caso de Centro de Transformación con pantallas desconectadas, no es necesaria la medida de R_{TOT} , siendo el valor de $r_E = 1$, y por tanto $I_E = I'_{1F}$.

(2) Las formulas representadas corresponden al voltímetro de resistencia interna de 1000Ω . En caso de utilizar voltímetros cuya resistencia interna incluya la resistencia del calzado, se aplicarán las formulas descritas en el apartado 6

ANEXO 3. DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES Y TRANSVERSALES DESDE EL ELECTRODO DE PUESTA A TIERRA AL EDIFICIO (PARA CTOU O CTCOU)

Nota: para calcular estas distancias se ha considerado una r_E de 0.5

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistivida d del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
≤ 20	5	3000 (*)	50	15	200	15	15	15	14,4
					300	15		15	16,3
					400	15		15,5	17,1
					500	15		18,1	17,5
					600	15,7		20,5	17,8
					700	17,1		21,9	17,9
					800	17,5		22,3	18,0
					900	17,8		22,6	18,1
					1000	18,1		23,0	18,1

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
≤ 20	5	3000 (*)	50	20	200	15	20	15	14,4
					300	15		15	16,3
					400	15		17,0	17,1
					500	15,2		19,9	17,5
					600	17,7		22,6	17,8
					700	19,3		24,2	17,9
					800	19,7		24,7	18,0
					900	20,1		25,1	18,1
					1000	20,4		25,4	18,1

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
≤ 20	5	3000 (*)	50	25	200	15	25	15	14,4
					300	15		15	16,3
					400	15		18,2	17,1
					500	16,6		21,4	17,5
					600	19,4		24,3	17,8
					700	21,1		26,2	17,9
					800	21,6		26,6	18,0
					900	22,0		27,1	18,1
					1000	22,4		27,5	18,1

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
≤ 20	5	3000 (*)	50	100	200	15	100	15	14,4
					300	15		19,7	16,3
					400	20,2		25,3	17,1
					500	25,3		30,5	17,5
					600	30,1		35,4	17,8
					700	33,1		38,5	17,9
					800	33,9		39,3	18,0
					900	34,6		40,1	18,1
					1000	35,3		40,7	18,1

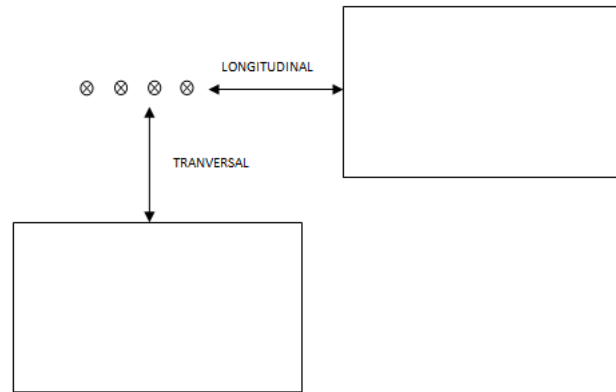
U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
30	8	3000 (*)	50	15	200	21,6	15	29,6	41,3
					300	27,8		36,2	43,1
					400	29,2		37,6	43,8
					500	30,2		38,7	44,2
					600	31,0		39,5	44,4
					700	31,7		40,2	44,5
					800	32,3		40,8	44,6
					900	32,8		41,4	44,6
					1000	33,1		41,7	44,6

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanziata a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
30	8	3000 (*)	50	20	200	24,8	20	33,1	41,3
					300	32,0		40,6	43,1
					400	33,5		42,2	43,8
					500	34,7		43,4	44,2
					600	35,6		44,4	44,4
					700	36,4		45,2	44,5
					800	37,0		45,9	44,6
					900	37,6		46,5	44,6
					1000	38,0		46,8	44,6

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanciada a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia mínima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
30	8	3000 (*)	50	25	200	27,5	25	36,0	41,3
					300	35,5		44,3	43,1
					400	37,2		46,1	43,8
					500	38,5		47,4	44,2
					600	39,5		48,4	44,4
					700	40,4		49,3	44,5
					800	41,1		50,1	44,6
					900	41,8		50,8	44,6
					1000	42,2		51,2	44,6

U_n (kV)	Nº picas de 2 m	Resistividad superficial del suelo en la superficie perimetral, distanciada a 1m del edificio ρ_s (Ω .m)	(%) de circulación de corriente de falta a tierra por las pantallas	DISTANCIAS MÍNIMAS LONGITUDINALES			DISTANCIAS MÍNIMAS TRANSVERSALES		Distancia máxima entre electrodo (flagelo) y tierra de servicio (m)
				Largo del edificio (m)	Resistividad del terreno ρ (Ω .m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	Ancho del edificio (m)	Separación del electrodo (flagelo) al edificio (m)	
30	8	3000 (*)	50	100	200	46,9	100	56,2	41,3
					300	61,7		71,3	43,1
					400	64,9		74,5	43,8
					500	67,3		76,9	44,2
					600	69,3		78,9	44,4
					700	70,9		80,5	44,5
					800	72,3		81,9	44,6
					900	73,5		83,2	44,6
					1000	74,3		84,0	44,6

(*) Esta consideración es para suponer que la persona cuando toca algún elemento metálico del edificio, se encuentra (sin calzado como contempla el RAT) pisando sobre un suelo de baldosa, adoquín, hormigón, etc., suelo típico urbano tanto fuera como dentro del edificio.



ANEXO 4. APLICACIÓN PRÁCTICA DEL PROCEDIMIENTO**A4.1 Centro de Transformación de superficie (CTS)****Datos de la red de distribución y ubicación.**

Diseñar el sistema de puesta a tierra de protección de un Centro de Transformación prefabricado de hormigón, emplazado en la superficie, de dimensiones en planta, 2 m x 3 m.

Datos necesarios:

- Tensión nominal de la línea: $U_n = 20 \text{ kV}$
- Intensidad máxima de falta a tierra: $I_{1F} = 2228 \text{ A}$
- Resistividad del terreno: $\rho = 700 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$
- Características de actuación de las protecciones: $I'_{1F} \cdot t = 400$
- Tipo de pantallas de los cables: Conectada
- Número de Centros de Transformación conectados a través de pantallas: $N=8$

Solución:**1.- Consideración de calzado**

- Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4x5)+8P2

$$K_r = 0,07643 \frac{\Omega}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$K_r' = 0,088 \frac{\Omega}{\Omega \cdot \text{m}}$$

- Resistencia de tierra del CT

$$R_T = K_r \cdot \rho = 0,07643 \cdot 700 = 53,5 \Omega$$

- r_E

$$R_{pant} = \frac{\rho \cdot K_r'}{N} = \frac{700 \cdot 0,088}{8} = 7,7 \Omega$$

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}} = \frac{53,5 \cdot 7,7}{53,5 + 7,7} = 6,73 \Omega$$

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T} = 0,125$$

- Reactancia equivalente de la subestación

$$X_{LTH} = 5,7 \Omega$$

- Cálculo de la intensidad de la corriente de defecto a tierra.

$$I'_{1Fp} = \frac{1,1 \cdot U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E} \right)^2}} = \frac{1,1 \cdot 20000}{0,125 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{53,5^2 + \left(\frac{5,7}{0,125} \right)^2}} = 1443 \text{ A}$$

- Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de contacto.

Con objeto de evitar el riesgo por tensión contacto en el exterior, se emplazará en la superficie, una acera perimetral de hormigón a 1,2 m de las paredes del Centro de Transformación. Embebido en el interior de dicho hormigón se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,3 x 0,3 m, a una profundidad de al menos 0,1 m. Este mallazo se conectará a un punto a la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación (véase figura 4).

Con objeto de evitar el riesgo por tensión de paso y contacto en el interior, en el piso del Centro de Transformación se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos, preferentemente opuestos, a la puesta a tierra de protección del centro. Con esta disposición se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, esté sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo inherente a la tensión de contacto y de paso interior. Este mallazo se cubrirá con una capa de hormigón de 10 cm de espesor como mínimo.

- Determinación de la tensión de paso máxima que aparece en la instalación.

a) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$K_{p.t-t} = 0,01613 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p1} = K_{p.t-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p.t-t} \cdot \rho \cdot r_E \cdot I'_{1Fp} = 0,01613 \cdot 700 \cdot 0,125 \cdot 1443 = 2036 \text{ V}$$

b) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$K_{p.a-t} = 0,03768 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p2} = K_{p.a-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p.a-t} \cdot \rho \cdot r_E \cdot I'_{1Fp} = 0,03768 \cdot 700 \cdot 0,125 \cdot 1443 = 4757 \text{ V}$$

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

c) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{2R_{a1} + 6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa1} = \frac{2036}{1 + \frac{2.2000 + 6.700}{1000}} = 221 \text{ V}$$

d) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{4757}{1 + \frac{2.2000 + 3.700 + 3.3000}{1000}} = 295 \text{ V}$$

- Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones).

$$t = \frac{400}{I'_{1Fp}} = \frac{400}{1443} = 0,27 \text{ s}$$

- Determinación de la tensión de paso admisible establecida por el RAT.

Según la figura 3, como $U_{pa} = 10.U_{ca}$, el valor de la tensión de paso aplicada máxima admisible no será superior a 4520 V, para el tiempo especificado de 0,27 s.

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso.

Como, $U'_{pa1} = 221 \text{ V} < 4520 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 295 \text{ V} < 4520 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2**, **cumple con el requisito reglamentario**. Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor, $R_T = 53,5 \Omega$, valor inferior al exigido, de 100 Ω .

2.- Consideración sin calzado

- Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4x5)+8P2

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

e) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa1} = \frac{2036}{1 + \frac{6.700}{1000}} = 391 \text{ V}$$

f) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{4757}{1 + \frac{3.700 + 3.3000}{1000}} = 393 \text{ V}$$

Como, $U'_{pa1} = 391 \text{ V} < 4520 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 393 \text{ V} < 4520 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2, cumple con el requisito reglamentario.** Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor, $R_T = 53,5 \Omega$, valor inferior al exigido, de 100Ω .

3.- Tensión que aparece en la instalación

$$V = I'_{1Fp} \cdot R_{TOT} = 1443 \cdot 6,7 = 9668 \text{ V}$$

Como, $V = 9668 \text{ V} < 10000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2, cumple con el requisito establecido por i-DE.**

A4.2 Centro de Transformación prefabricado subterráneo (CTPS)**Datos de la red de distribución y ubicación**

Diseñar el sistema de puesta a tierra de protección de un Centro de Transformación Subterráneo, de dimensiones en planta, 2,5 m x 4,5 m.

Datos necesarios:

- Tensión nominal de la línea: $U_n = 30 \text{ kV}$
- Intensidad máxima de falta a tierra: $I_{1F} = 5000 \text{ A}$
- Resistividad del terreno: $\rho = 500 \text{ } \Omega\text{m}$
- Características de actuación de las protecciones: $I'_{1FP} \cdot t = 2200$
- Número de Centros de Transformación conectados a través de pantallas: $N=18$

Solución:**1.- Consideración de calzado**

Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4,5x6,5)+ 8P2

$$K_r = 0,06437 \frac{\Omega}{\Omega\text{m}}$$

$$K_r' = 0,088 \frac{\Omega}{\Omega\text{m}}$$

- Resistencia de tierra del Centro de Transformación

$$R_T = K_r \cdot \rho = 0,06437 \cdot 500 = 32,18 \Omega$$

- r_E

$$R_{pant} = \frac{\rho \cdot K_r'}{N} = \frac{500 \cdot 0,088}{18} = 2,44 \Omega$$

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}} = \frac{32,18 \cdot 2,44}{32,18 + 2,44} = 2,26 \Omega$$

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T} = 0,07$$

- Reactancia equivalente de la subestación

$$X_{LTH} = 3,81 \Omega$$

- Cálculo de la intensidad de la corriente de defecto a tierra.

$$I'_{1Fp} = \frac{1,1.U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E}\right)^2}} = \frac{1,1.30000}{0,07 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{32,18^2 + \left(\frac{3,81}{0,07}\right)^2}} = 4295 \text{ A}$$

- Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de contacto.

Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el exterior, se emplazará en la superficie, una acera perimetral de hormigón a 1,2 m de las paredes del Centro de Transformación. Embebido en el interior de dicho hormigón se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,3 x 0,3 m, a una profundidad de al menos 0,1 m. Este mallazo se conectará a un punto a la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación (véase figura 5).

Con objeto de evitar el riesgo por tensión de contacto en el interior, así como la tensión de paso sobre el techo del Centro de Transformación, tanto en el piso como en el techo del Centro de Transformación se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos, preferentemente opuestos, a la puesta a tierra de protección del centro. Con esta disposición se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, esté sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo inherente a la tensión de contacto y de paso interior, y tensión de paso exterior encima del Centro de Transformación. Este mallazo se cubrirá con una capa de hormigón de 10 cm de espesor como mínimo.

- Determinación de la tensión de paso máxima que aparece en la instalación.

- a) Con los dos pies en el terreno:

$$K_{p,t-t} = 0,00847 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p1} = K_{p,t-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p,t-t} \cdot \rho \cdot r_E \cdot I'_{1Fp} = 0,00847 \cdot 500 \cdot 0,07 \cdot 4295 = 1273 \text{ V}$$

- b) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$K_{p,a-t} = 0,03137 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p2} = K_{p,a-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p,a-t} \cdot \rho \cdot r_E \cdot I'_{1Fp} = 0,03137 \cdot 500 \cdot 0,07 \cdot 4295 = 4715 \text{ V}$$

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

c) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{2R_{a1} + 6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa1} = \frac{1273}{1 + \frac{2.2000 + 6.500}{1000}} = 159 \text{ V}$$

d) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{4715}{1 + \frac{2.2000 + 3.500 + 3.3000}{1000}} = 304 \text{ V}$$

- Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones).

$$t = \frac{2200}{I'_{1Fp}} = \frac{2200}{4295} = 0,51 \text{ s}$$

- Determinación de la tensión de paso admisible establecida por el RAT.

Según la figura 3, como $U_{pa} = 10.U_{ca}$, el valor de la tensión de paso aplicada máxima admisible no será superior a 2000 V, para el tiempo especificado de 0,51 s.

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso.

Como, $U'_{pa1} = 159 \text{ V} < 2000 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 304 \text{ V} < 2000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4,5x6,5)+ 8P2 cumple con el requisito reglamentario**. Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor $R_T = 32,18 \Omega$, valor inferior al exigido, de 60Ω .

2.- Consideración sin calzado

- Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4,5x6,5)+ 8P2

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

e) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa1} = \frac{1273}{1 + \frac{6.500}{1000}} = 318 \text{ V}$$

f) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{4715}{1 + \frac{3.500 + 3.3000}{1000}} = 410 \text{ V}$$

Como, $U'_{pa1} = 318 \text{ V} < 2000 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 410 \text{ V} < 2000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4,5x6,5)+ 8P2, cumple con el requisito reglamentario.** Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor $R_T = 32,18 \Omega$, valor inferior al exigido, de 60Ω .

3.- Tensión que aparece en la instalación

$$V = I'_{1Fp} \cdot R_{TOT} = 4295 \cdot 2,26 = 9706 \text{ V}$$

Como, $V = 9706 \text{ V} < 10000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2, cumple con el requisito establecido por i-DE.**

A4.3 Centro de Transformación de intemperie compacto - bajo poste (CTIC)

Diseñar el sistema de puesta a tierra de protección de un Centro de Transformación Intemperie, Compacto, bajo poste, de dimensiones en planta, 2 m x 3 m.

Datos necesarios:

- Tensión nominal de la red: $U_n = 20 \text{ kV}$
- Intensidad máxima de falta a tierra: $I_{1F} = 2228 \text{ A}$
- Resistividad del terreno: $\rho = 100 \text{ } \Omega \text{m}$
- Características de actuación de las protecciones: $I'_{1F} \cdot t = 400$

Solución:**1.- Consideración de calzado**

- Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4x5)+ 8P2

$$K_r = 0,07643 \frac{\Omega}{\Omega \cdot m}$$

$$K_r' = 0,128 \frac{\Omega}{\Omega \cdot m}$$

- Resistencia de tierra del Centro de Transformación.

$$R_T = K_r \cdot \rho = 0,07643 \cdot 100 = 7,643 \Omega$$

- r_E

En este caso, la R_{pant} será la resistencia de puesta a tierra del apoyo conectado a través de las pantallas.

$R_{pant} = \frac{\rho \cdot K_r'}{N} = \frac{100 \cdot 0,128}{1} = 12,8 \Omega$, como $R_{pant} = 12,8 \Omega < 20 \Omega$, se considera la resistencia de puesta a tierra para el peor caso de 20Ω .

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}} = \frac{7,64 \cdot 20}{7,64 + 20} = 5,52 \Omega$$

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T} = 0,72$$

- Reactancia equivalente de la subestación.

$$X_{LTH} = 5,7 \Omega$$

- Cálculo de la intensidad de la corriente de defecto a tierra.

$$I'_{1Fp} = \frac{1,1.U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E}\right)^2}} = \frac{1,1.20000}{0,72 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{7,64^2 + \left(\frac{5,7}{0,72}\right)^2}} = 1600 \text{ A}$$

- Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de contacto.

Con objeto de que la tensión de contacto en el exterior sea cero, se emplazará una acera perimetral exterior, de hormigón, a 1,2 m de las paredes del centro de transformación. Embebido en el interior de dicho hormigón se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm formando una retícula no superior a 0,3 x 0,3 m, a una profundidad de al menos 0,1 m. Este mallazo se conectará a un punto de la puesta a tierra de protección del Centro de Transformación (véase figura 6).

- Determinación de la tensión de paso máxima que aparece en la instalación.

- a) Con los dos pies en el terreno:

$$K_{p.t-t} = 0,01613 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p1} = K_{p.t-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p.t-t} \cdot \rho \cdot I'_{1F} = 0,01613 \cdot 100 \cdot 1600 = 2580 \text{ V}$$

- b) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$K_{p.a-t} = 0,03768 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U'_{p2} = K_{p.a-t} \cdot \rho \cdot I_E = K_{p.a-t} \cdot \rho \cdot I'_{1F} = 0,03768 \cdot 100 \cdot 1600 = 6028 \text{ V}$$

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

- c) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{2R_{a1} + 6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa1} = \frac{2580}{1 + \frac{2 \cdot 2000 + 6 \cdot 100}{1000}} = 460 \text{ V}$$

- d) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{2R_{a1} + 3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa2} = \frac{6028}{1 + \frac{2 \cdot 2000 + 3 \cdot 100 + 3 \cdot 3000}{1000}} = 421 \text{ V}$$

- Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones).

$$t = \frac{400}{I_{1F}} = \frac{400}{1600} = 0,25 \text{ s}$$

- Determinación de la tensión de paso admisible establecida por el RAT.

Según la figura 3, como $U_{pa} = 10.U_{ca}$, el valor de la tensión de paso aplicada máxima admisible no será superior a 4770 V, para el tiempo especificado de 0,25s.

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso.

Como, $U'_{pa1} = 460 \text{ V} < 4770 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 421 \text{ V} < 4770 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+ 8P2, cumple con el requisito reglamentario**. Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor $R_T = 7,64 \Omega$, valor inferior al exigido, de 50Ω .

2.- Consideración sin calzado

- Electrodo utilizado:

CPT-CT-A-(4x5)+ 8P2

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

e) Con los dos pies en el terreno:

$$U'_{pa1} = \frac{U'_{p1}}{1 + \frac{6\rho_s}{Z_b}} \text{ (V)}$$

$$U'_{pa1} = \frac{2580}{1 + \frac{6.100}{1000}} = 1612 \text{ V}$$

f) Con un pie en la acera y el otro en el terreno:

$$U'_{pa2} = \frac{U'_{p2}}{1 + \frac{3\rho_s + 3\rho_s^*}{Z_b}} \text{ (V)}$$

$$U'_{pa2} = \frac{6028}{1 + \frac{3.100 + 3.3000}{1000}} = 585 \text{ V}$$

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso.

Como, $U'_{pa1} = 1612 \text{ V} < 4770 \text{ V}$ y $U'_{pa2} = 585 \text{ V} < 4770 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2, cumple con el requisito reglamentario**. Además el electrodo seleccionado presenta una resistencia de valor, $R_T = 7,64 \Omega$, valor inferior al exigido, de 50Ω .

3.- Tensión que aparece en la instalación

$$V = I'_{1F} \cdot R_{TOT} = 1600 \cdot 5,52 = 8832 \text{ V}$$

Como, $V = 8832 \text{ V} < 10000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2**, cumple con el requisito establecido por i-DE.

A4.4 Centro de Transformación en edificio de otros usos (CTOU)**Datos de la red de distribución y ubicación**

Diseñar el sistema de puesta a tierra de protección de un Centro de Transformación emplazado en el interior de un edificio.

Datos necesarios:

- Tensión nominal de la línea: $U_n = 20 \text{ kV}$
- Intensidad máxima de falta a tierra: $I_{1F} = 2228 \text{ A}$
- Resistividad del terreno: $\rho = 700 \text{ } \Omega \cdot \text{m}$
- Características de actuación de las protecciones: $I'_{1F} \cdot t = 400$
- Número de Centros de Transformación conectados a través de pantallas: $N=8$

Solución:

- Electrodo utilizado: **CPT-CTL-5P2**

$$K_r = 0,0852 \frac{\Omega}{\Omega \cdot \text{m}}$$

$$K_r' = 0,088 \frac{\Omega}{\Omega \cdot \text{m}}$$

- Resistencia de tierra del Centro de Transformación

$$R_T = K_r \cdot \rho = 0,0852 \cdot 700 = 59,64 \Omega$$

- r_E

$$R_{pant} = \frac{\rho \cdot K_r'}{N} = \frac{700 \cdot 0,088}{8} = 7,7 \Omega$$

$$R_{TOT} = \frac{R_T \cdot R_{pant}}{R_T + R_{pant}} = \frac{59,6 \cdot 7,7}{59,6 + 7,7} = 6,81 \Omega$$

$$r_E = \frac{R_{TOT}}{R_T} = 0,114$$

- Reactancia equivalente de la subestación

$$X_{LTH} = 5,7 \, \Omega$$

- Cálculo de la intensidad de la corriente de defecto a tierra.

$$I'_{1FP} = \frac{1,1 \cdot U_n}{r_E \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{R_T^2 + \left(\frac{X_{LTH}}{r_E} \right)^2}} = \frac{1,1 \cdot 20000}{0,114 \cdot \sqrt{3} \cdot \sqrt{59,64^2 + \left(\frac{5,7}{0,114} \right)^2}} = 1429 \, A$$

c) Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de contacto interior y exterior del propio Centro de Transformación.

- Las puertas y rejillas metálicas que den al exterior del centro estarán aisladas, no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar sometidas a tensión, debido a defectos o averías.
- En el piso del Centro de Transformación se instalará un mallazo electrosoldado con redondos de diámetro no inferior a 4 mm, formando una retícula no superior a 0,30 x 0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos preferentemente opuestos a la puesta a tierra de protección del centro. Con esta disposición se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, esté sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo inherente a la tensión de contacto y de paso interior. Este mallazo se cubrirá con una capa de hormigón de 10 cm de espesor como mínimo. Véase figura 8.
- No deberá haber partes metálicas puestas a tierra dentro del Centro de Transformación, que se puedan tocar teniendo los pies en el exterior del centro.

d) Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de paso.

- Determinación de la tensión de paso máxima que aparece en la instalación.

$$K_p = 0,01455 \frac{V}{A(\Omega.m)}$$

$$U_{pa} = K_p \cdot \rho \cdot I_E = K_p \cdot \rho \cdot r_E \cdot I'_{1FP} = 0,01455 \cdot 700 \cdot 0,114 \cdot 1429 = 1659 \, V$$

- Determinación de la tensión máxima aplicada a la persona.

$$U'_{pa} = \frac{U_{pa}}{1 + \frac{6\rho_s}{Z_b}} \quad (V)$$

$$U'_{pa} = \frac{1659}{1 + \frac{6 \cdot 700}{1000}} = 319 \, V$$

- Determinación de la duración de la corriente de falta (tiempo de actuación de las protecciones).

$$t = \frac{400}{I'_{1F}} = \frac{400}{1429} = 0,28 \text{ s}$$

- Determinación de la tensión de paso admisible establecida por el RAT.

Según la figura 2, como $U_{pa} = 10 \cdot U_{ca}$, el valor de la tensión de paso aplicada máxima admisible no será superior a 4420 V, para el tiempo especificado de 0,28 s.

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso.

Como, $U'_{pa} = 319 \text{ V} < 4420 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CTL-5P2, cumple con el requisito reglamentario.**

- e) Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión de paso en el acceso.

Al ser el piso del Centro de Transformación de hormigón, con mallazo equipotencial, unido al sistema de puesta a tierra de protección, y el piso de la zona exterior de dicho centro, también de hormigón, al acceder una persona al Centro de Transformación, aparecerá una tensión de paso entre sus pies, al estar un pie al potencial del electrodo, y en el caso más desfavorable, el otro pie a potencial cero.

- Determinación de la tensión máxima de paso en acceso que aparece en la instalación.

$$U_{p\text{máx}acc} = I_E \cdot R_T = I'_{1Fp} \cdot r_E \cdot R_T = 1429 \cdot 0,114 \cdot 59,64 = 9715 \text{ V}$$

- Determinación de la tensión máxima de acceso aplicada a la persona.

$$U'_{pa} = \frac{U_{p.\text{máx}acc}}{1 + \frac{6\rho_s^*}{Z_b}} = \frac{9715}{1 + \frac{6 \cdot 3000}{1000}} = 511 \text{ (V)}$$

- Determinación de la tensión de paso admisible establecida por el RAT.

Según la figura 2, como $U_{pa} = 10 \cdot U_{ca}$, el valor de la tensión de paso aplicada máxima admisible no será superior a 4420 V, para el tiempo especificado de 0,28 s.

- Verificación del cumplimiento con la tensión de paso en el acceso.

Como, $U'_{pa} = 511 \text{ V} < 4420 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CTL-5P2, cumple con el requisito reglamentario.**

- f) Cumplimiento del requisito correspondiente a la tensión que aparece en la instalación.

$$V = I'_{1Fp} \cdot R_{TOT} = 1429 \cdot 6,81 = 9731 \text{ V}$$

Como, $V = 9731 \text{ V} < 10000 \text{ V}$ el electrodo considerado, **CPT-CT-A-(4x5)+8P2, cumple con el requisito establecido por i-DE.**