



ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

ET N°1.1.1 050

**CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA
DE PUESTA A TIERRA EN
INSTALACIONES AT**



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
2 de 39

1. INDICE

1.	INDICE.....	2
2.	HISTORICO DE MODIFICACIONES.....	4
3.	GENERALIDADES.....	5
3.1.	OBJETO DE LA ESPECIFICACIÓN	5
3.2.	ALCANCE.....	5
3.3.	NORMAS Y ESPECIFICACIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS.....	5
4.	CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES	7
4.1.	RED DE 132 kV.....	7
4.2.	CARACTERÍSTICAS DE LAS LÍNEAS Y CABLES DE 132kV.....	7
4.3.	DESCRIPCIÓN DE LA RED DE M.T.	7
4.4.	DESCRIPCIÓN DE LAS SUBESTACIONES	8
4.5.	DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA DE PROTECCIONES	8
5.	FUNCIÓN DEL SISTEMA DE P.A.T ÚNICA	8
6.	FALLAS DETERMINANTES EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE P.A.T.	9
6.1.	INTRODUCCIÓN	9
6.2.	FALLA EXTERIOR A LA S.E.	11
6.2.1.	Cable o línea de A.T.....	11
	Cable o línea de M.T.	11
6.3.	FALLA INTERIOR A LA S.E.	11
6.3.1.	Falla en A.T.....	11
6.3.2.	Falla en Media Tensión.....	12
7.	DEFINICIONES	12
	CRITERIOS DE SEGURIDAD	14
8.1.	CIRCUNSTANCIAS QUE POSIBILITAN UN ACCIDENTE ELÉCTRICO	14
8.2.	GRADIENTE DE POTENCIAL EN EL CERCO PERIFÉRICO, INTEGRADO A LA RED DE PAT:	15
8.2.1.	Cerco dentro del área de la red de PAT.....	16
8.2.2.	Cerco exterior al área de la red de PAT.....	16
8.3.	VERIFICACIÓN DE LOS CABLES QUE CONFORMAN LA RED DE PAT.	18
8.4.	FUNCIÓN Y CARACTERÍSTICAS DE LOS ELECTRODOS DE PAT.	21
8.5.	RECORRIDOS DE LA CORRIENTE A TRAVÉS DE LA TIERRA	21
8.6.	COMPORTAMIENTO FRENTE A DESCARGAS ATMOSFÉRICAS	24
9.	PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO	25
9.1.	SECUENCIA DE CÁLCULO.	25
9.2.	MODELADO DE LAS VÍAS DE CIRCULACIÓN DE LA CORRIENTE	28

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
3 de 39

9.3.	VERIFICACIÓN DE LOS VALORES DE TENSIONES PELIGROSAS	31
10.	EJEMPLO DE CALCULO.....	33
10.1.	DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN.....	33
10.2.	CÁLCULOS PRELIMINARES.....	33
10.3.	DETERMINACIÓN DE LA CORRIENTE A DERIVAR POR LA RED DE P.A.T.....	34
10.3.1.	<i>Hilos de guardia.....</i>	<i>34</i>
10.3.2.	<i>Pantallas de los cables de M.T.....</i>	<i>35</i>
10.4.	DETERMINACIÓN DE LAS TENSIONES DE CONTACTO Y DE PASO.....	35
10.4.1.	<i>Tensión de contacto que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla</i>	<i>36</i>
10.4.2.	<i>Tensión de paso que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla</i>	<i>36</i>
10.5.	SECCIÓN MÍNIMA DEL CONDUCTOR.....	37
10.6.	CÁLCULO DE LAS TENSIONES ADMISIBLES DE CONTACTO Y DE PASO DE ACUERDO CON LA NORMA IEEE 80. (COMPARATIVO).....	37
10.7.	SENSIBILIDAD DE LA METODOLOGÍA DE LA VERIFICACIÓN DE LA RED DE P.A.T.	38

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
4 de 39

2. HISTORICO DE MODIFICACIONES

FECHA	REVISION	MOTIVO	FECHA APROBACION
04/2004		Emisión	05/2004

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielewsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



3. GENERALIDADES

3.1. Objeto de la Especificación

La presente especificación se refiere al cálculo relacionado con el diseño de la Red de Puesta a Tierra (RPT) de una Subestación de Alta Tensión y a sus elementos y materiales asociados.

3.2. Alcance

La presente Especificación de Diseño de las redes de Puesta a Tierra se refiere a las instalaciones de transformación, seccionamiento, medición y/o facturación en la red de A.T. de Edenor S.A.

Se aplica exclusivamente a la concepción y desarrollo de un sistema integrado de puesta a tierra única para las corrientes de frecuencia industrial y los transitorios que aparecen durante la operación normal de un sistema, incluyendo las sobretensiones atmosféricas y de maniobra.

3.3. Normas y Especificaciones Técnicas Complementarias

Para procedimientos de ejecución de las conexiones remitirse a:

E.T. 4.1.1 050: "EJECUCIÓN DE CONEXIONES DE PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES DE AT".

Para detalles teóricos y de cálculo no expresamente contemplados en esta especificación se deberá utilizar como referencia las siguientes normas:

1. IEEE Std 80 (2000): "IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding"
2. IEEE Recommended Practice for Determining the Electric Power Station Ground Potential Rise and Induced Voltages From a Power Fault, IEEE Std. 367-1996.
3. Background and methodology for analyzing step and touch potential near transmission structures. IEEE Transactions April 1986.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
6 de 39

Adicionalmente, y siempre que no entren en contradicción con las normas anteriores, se deberán utilizar como referencia las siguientes normas, con el orden de preeminencia siguiente:

1. IRAM 2281-1: "Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos - Consideraciones Generales - Código de Práctica"
2. IRAM 2281-3: "Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos Instalaciones Industriales y Domiciliarias (Inmuebles) y Redes de Baja Tensión - Código de Práctica"
3. IRAM 2281-PARTE IV: "Puesta a Tierra – Sistemas Eléctricos, Centrales, Subestaciones y Redes – Código de Práctica"
4. IRAM 2281-5: "Código de Práctica Puesta a Tierra de Sistemas Eléctricos – Puesta a Tierra de Sistemas de Telecomunicaciones (telefonía, telemedición, y equipos de procesamiento de datos)"
5. Norma VDE 0141/1989. Puesta a tierra en instalaciones superiores de tensiones mayores a 1 kV.
6. Comentarios y normas sobre la PAT única de SS EE de 132kV y 220 kV. Iº Juan C Arcioni.
7. Especificación Técnica N° 75 para construcción de sistemas de P.a.T. en estaciones transformadoras de A.T. Ay E.E.
8. Valores básicos de cálculo para sistemas de A.T.H. Langrehr. AEG-TELEFUNKEN.

Para aspectos de cálculo y diseño relacionados con el sistema de protección contra descargas atmosféricas de los edificios deben considerarse:

1. IEC 61024-1: "Protection of structures against lightning – General principles".
2. IEC 61024-1-2: "Protection of structures against lightning – General principles – Design, installation, maintenance and inspection of lightning protection systems".

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



4. CARACTERÍSTICAS DE LAS INSTALACIONES

4.1. Red de 132 kV.

La red de 132 kV se caracteriza por la puesta a tierra rígida de los neutros de los transformadores de potencia. El valor de la potencia de cortocircuito de diseño es 5000 MVA , lo que implica una corriente simétrica de 22kA. Por las características particulares del sistema el valor límite queda establecido por la falla bifásica con contacto a tierra que corresponde a 26 kA. Por la alta improbabilidad de ocurrencia de este tipo de falla, la corriente a considerar en el dimensionamiento de la red de puesta a tierra es la monofásica a tierra, cuyo valor límite es 22 kA.

4.2. Características de las líneas y cables de 132kV

Las líneas aéreas actuales de la red tienen conductores de Al/Ac de 240/40 mm² e hilo de guardia de acero galvanizado de 50 mm². Las estructuras para doble terna urbana tienen dos hilos de guardia y vanos de 120m. Las estructuras para simple terna urbana tienen un cable de guardia y vanos de 95 m.

El valor especificado para la puesta a tierra de cada poste es de 5Ω.

Los cables aislados para 132kV son actualmente del tipo O.F y las secciones en uso son de 350 y 500mm². Están provistos con una pantalla de plomo con una sección de 278 mm² y 344 mm², respectivamente.

Sin embargo la tendencia es al uso de cable seco que se está especificando en este momento. La sección de la pantalla, de plomo o de cobre, equivaldrá aproximadamente a 110 mm² de cobre.

4.3. Descripción de la red de M.T.

La red de 13.2 kV tiene una potencia de cortocircuito de 300 MVA y la corriente correspondiente es de 13.2kA.

Las salidas de M.T asociadas a la S.E consisten en 8 ó 16 cables de 13.2kV, unipolares de aislación seca de 185 mm² de sección de cobre, apantallados con una vaina de cobre de 70 mm². Estos cables se convierten en línea aérea sin hilo de guardia a 250m de promedio de la S.E.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



4.4. Descripción de las subestaciones

Las SS EE que estamos considerando son todas las de la red de 132 kV, con acometidas en línea aérea o cables de 132 kV. Pueden, o nó, tener barra de de AT y cuentan con un tablero de MT del orden de 16 salidas.

4.5. Descripción del sistema de protecciones

En las SS EE cabeceras los electroductos de 132 kV que alimentan las SS EE de subtransmisión se protegen mediante protecciones de impedancia de varias etapas. La primera etapa cubre el 75/80% de la longitud en instantáneo y llega hasta las barras de 132 kV; el tiempo de eliminación de la falla es del orden de 100 ms.

El segundo escalón tiene un tiempo de eliminación de falla de 250/ 300 ms y llega a los bornes de AT del transformador de potencia.

Los escalones adicionales configuran reservas de las instalaciones de MT y/o están direccionados para el lado de las barras de AT de la SS EE cabecera.

La protección de reserva es reserva absoluta; esto es, cubre las mismas fallas en los mismos los tiempos. (Aunque puede darse la circunstancia que relés de distintas generaciones tengan ligeras diferencias de temporizados). Hay una tendencia a la reducción de estos tiempos aprovechando la tecnología digital moderna.

La zona diferencial del transformador de potencia se inicia en el pasatapas de 132 kV y alcanza la celda de transformador en el tablero de MT. Cualquier falla en este tramo es eliminada en instantáneo (100 ms).

Las salidas de cables de MT están protegidas con relés de máxima corriente que eliminan en instantáneo fallas mayores a 600A.

Por lo tanto, desde el punto de vista del dimensionamiento de la red de PAT se considera un tiempo de eliminación de falla de 300ms.

5. FUNCIÓN DEL SISTEMA DE P.A.T ÚNICA

Las tomas de tierra en las instalaciones eléctricas cumplen una función de operación, de seguridad y contra descargas atmosféricas.

La función de **operación** corresponde a la necesidad de obtener un camino de baja impedancia para asegurar la puesta a tierra del neutro del sistema. El

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielewsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
9 de 39

potencial del neutro queda así referido al valor del potencial de tierra. En esta condición cualquier vinculación de una fase con la tierra es un cortocircuito monofásico que debe proceder a la operación de los relevadores de protección y los interruptores asociados en forma rápida y segura para no comprometer la estabilidad del sistema ni producir daños en el material.

La función de **seguridad** se refiere a la necesidad de garantizar que durante la ocurrencia de fallas que provoquen la circulación de corriente por la malla de puesta a tierra, las tensiones de paso y de contacto no alcancen valores peligrosos para las personas

La puesta a tierra **contra descargas atmosféricas** cumple la función de derivar a tierra las corrientes asociadas a descargas atmosféricas, minimizando la aparición de sobretensiones.

Unificar las tomas de tierra de operación, de seguridad y de descargas atmosféricas responde, por un lado, a obtener una baja resistencia de toma de tierra, teniendo en cuenta que el conjunto de las resistencias es menor que el de cada una. Por otro lado es relativamente inviable conseguir en una instalación de dimensiones limitadas resistencias de tierra absolutamente independientes y evitar la aparición de peligrosas diferencias de potencial entre sistemas diferentes.

6. FALLAS DETERMINANTES EN EL DIMENSIONAMIENTO DE LA RED DE P.A.T.

6.1. Introducción

Las fallas que producen circulación de corrientes homopolares son el cortocircuito bifásico a tierra y el monofásico a tierra. Limitaremos el estudio a este en tanto tiene más probabilidad de ocurrencia que el anterior.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

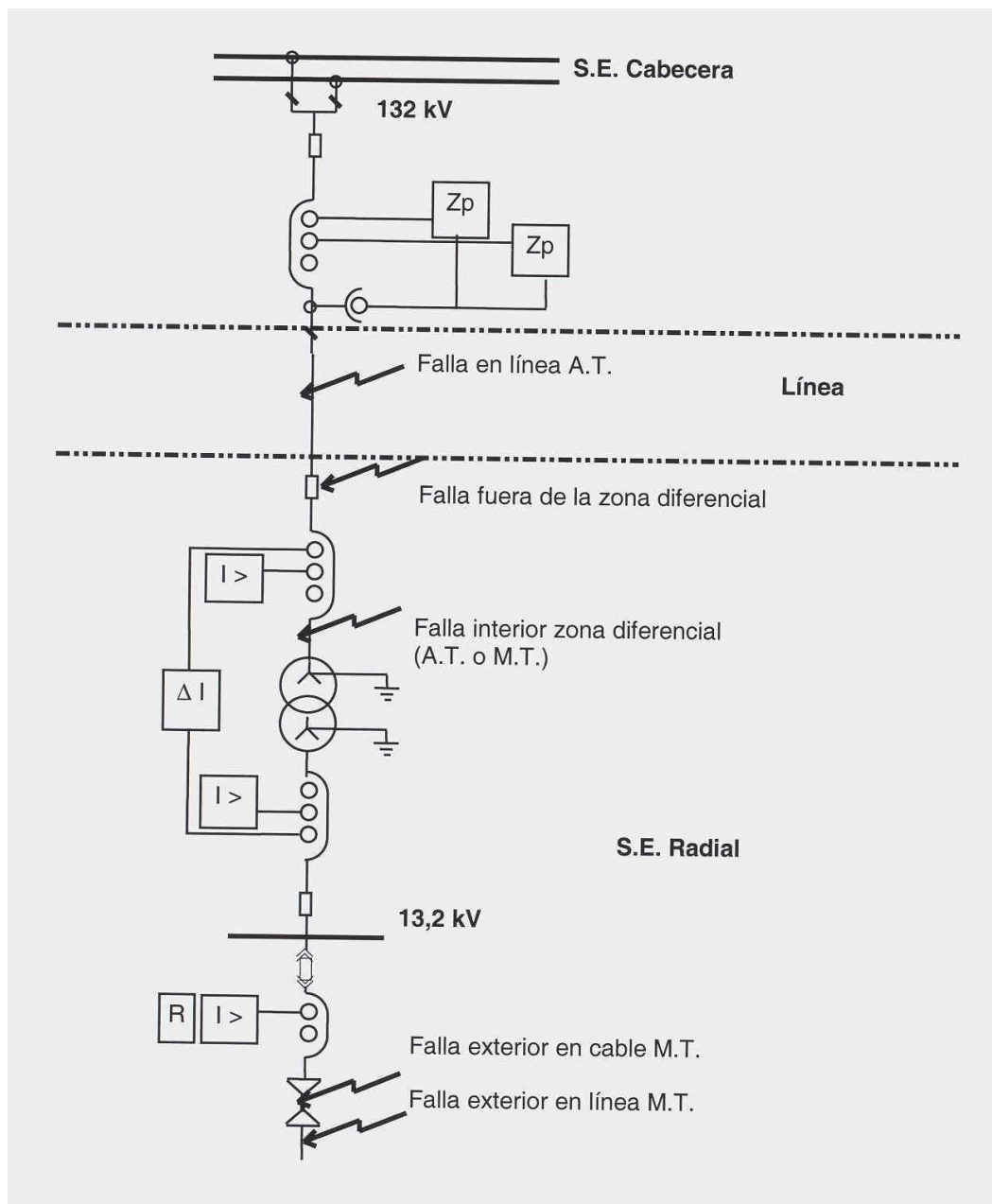


Figura 1. Ubicación relativa de las fallas

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado: Ing. Kisielevsky	Supervisado: Ing. Alaniz/ Ing. Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



6.2. Falla exterior a la S.E.

6.2.1. Cable o línea de A.T.

Una falla exterior a la S.E, en una línea o cable de 132 kV circulará por la tierra, el hilo de guardia y/o la pantalla del cable hasta la red de P.A.T de la subestación donde eleva el potencial hasta un valor proporcional a la corriente de falla. La magnitud de esta corriente será tanto más reducida cuanto más lejos de la S.E cabecera se produzca la falla. Por otra parte la probabilidad de aparición de una falla crece con la extensión de la línea.

En forma conservadora consideramos los 22 kA de diseño de la red (mencionados en 3.1).

Por otra parte esta falla es eliminada en instantáneo(100ms) en el 80% del recorrido de la línea por las protecciones de la cabecera.

6.2.2. Cable o línea de M.T.

Si la falla ocurre en una línea de MT esto significa un recorrido de cable previo no menor a los 250 m. El nivel de corriente de cortocircuito correspondiente es de alrededor de 100 MVA y la corriente (4,8kA) regresa casi totalmente a la S.E por la pantalla del cable. Esta falla es eliminada en instantáneo por el interruptor de la S.E si su valor es del orden de 1kA o mayor. La falla en el cable es poco probable y tiene valores de corriente (hasta 13.2 kA, que es el valor que corresponde a la potencia de cortocircuito de 300 MVA en 13.2 kV) que producen la actuación de las protecciones en instantáneo.

6.3. Falla interior a la S.E.

6.3.1. Falla en A.T.

a) Falla fuera de la zona diferencial.

Es la falla a tierra más comprometida. Generalmente se debe a: Descargas en las cadenas de aisladores de retención., Puesta a tierra franca por errores de maniobra, Caída de una rienda de conexión de aparato de AT, etc.

La eliminación de esta falla corresponde a la operación de los interruptores de la SE cabecera, cuyos relés asociados actúan en tiempo de segunda etapa.(250/300 ms).

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



Consideramos un valor de corriente de falla de 22 kA. Esta es la situación mas exigente para la red de PAT.

b) Falla dentro de la zona de protección diferencial del transformador.
Se elimina en instantáneo. La magnitud de la corriente de falla correspondiente no puede exceder los 22 kA de diseño de la red.

6.3.2. Falla en Media Tensión

Una falla interior, aún por afuera de la zona diferencial, arranca de valores nominales más bajos que en el caso anterior con tiempos de eliminación de fallas del mismo orden o menores.

Conclusión: La falla más crítica, considerando la magnitud de la corriente de falla y el tiempo que esta persiste, es la falla en AT interior a la S.E por afuera de la zona diferencial.

7. DEFINICIONES

1. Resistencia de dispersión " R_A ". Es la resistencia entre el electrodo de tierra y la tierra de referencia.
2. Impedancia de P.A.T " Z_E ". Es la impedancia de corrientes de frecuencia industrial entre una instalación de P.A.T y la tierra de referencia. Es el resultado de la conexión en paralelo de las resistencias de dispersión de los electrodos de tierra y las impedancias características de la red de tierra de las líneas conectadas.
3. Tierra de referencia. Es una superficie de terreno lo suficientemente alejada de la red de P.A.T como para que no existan diferencias de potencial apreciables entre distintos puntos dentro de esta zona.
4. Tiempo de eliminación de falla " T_F ". Es el tiempo en que una corriente de falla se puede mantener hasta que la actuación de las protecciones y el interruptor la eliminan. Para los alcances de esta norma se establece en 0.3 seg (Tiempo de segunda etapa en AT).
5. Corriente máxima en la red de P.A.T " I_M ". Es el valor de corriente de falla en kA que circula por la red de P.A.T en condiciones de cortocircuito a tierra.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielewsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
13 de 39

6. Tensión de P.A.T “ U_E ”. Es la que se produce entre una instalación de P.A.T y la tierra de referencia.

7. Tensión de paso “ U_P ”. Es la diferencia de potencial a la que puede quedar sometida una persona entre dos puntos separados la distancia de un paso normal (1 m). No debe exceder los 250 V para una duración de la exposición de 0,3 seg.de acuerdo con la Norma VDE 0141.

8. Tensión de contacto “ U_C ”. Es la diferencia de potencial a la que puede quedar sometida una persona entre dos puntos extremos de su anatomía (mano y mano o mano y pie), uno de los cuales tiene contacto con un elemento al potencial de la red de tierra de la S.E.

9. Corresponde a 1 m de distancia horizontal. No debe exceder los 250 V para una duración de la exposición de 0.3 seg.de acuerdo con la Norma VDE 0141.

10.Tensión de transferencia “ U_T ”. Es la diferencia de potencial a la que queda sometida una persona que toca, dentro de la S.E, una estructura metálica puesta a tierra en un extremo alejado cuando ocurre una falla (o viceversa). Corresponde considerar el valor admisible de la tensión de contacto.

11.Resistividad del terreno δ_E . Es la resistencia eléctrica específica de la tierra y equivale a la resistencia de un cubo de 1 m de arista medida entre dos caras opuestas. Se suele expresar en $\Omega \cdot m$ y, si no se indica otra cosa, se refiere al valor del terreno a la profundidad de tendido del electrodo superficial.

12.Electrodo de tierra superficial. Es el electrodo dispensor tendido horizontalmente a una profundidad no menor a 0,80 m.

13.Electrodo de tierra profundo o jabalina. Es el electrodo vertical que penetra en el terreno por hincado o perforación previa. Para los alcances de esta Norma se consideran que alcanzan la segunda napa freática.

14.Red de puesta a tierra. Es el conjunto de los electrodos superficiales vinculados galvánicamente entre sí y conectados mediante uniones desmontable a los electrodos profundos.

15.Colector general de P.A.T. Son los conductores de cobre que se tienden por los canales de cables, bandejas y soportes de cables para la puesta a tierra de

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielewsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



elementos cercanos. Cada uno de ellos debe ser P.A.T en no menos de dos puntos de su recorrido.

16. Cámara de inspección. Es una pequeña cámara de mampostería al nivel del terreno en la que se vincula el electrodo de tierra profundo a través de un puente desmontable con los electrodos dispersores horizontales. Permite la medición independiente de cada jabalina.

8. CRITERIOS DE SEGURIDAD

8.1. Circunstancias que posibilitan un accidente eléctrico

La probabilidad de un accidente debido al contacto con partes vivas de la instalación o a la aparición de tensiones peligrosas sobre el cuerpo humano como consecuencia de la distribución de potencial que genera en el terreno una descarga a tierra depende de:

La magnitud de la corriente de falla y el tamaño y la resistencia de la red de PAT

- La resistividad del suelo y la distribución de las corrientes de falla que puedan producir gradientes peligrosos en puntos de la superficie.
- La presencia de un individuo en ese punto, en ese momento y ubicado de modo que esté puenteando lugares que configuren circuitos de elevada diferencia de potencial (DDP).
- La resistencia eléctrica que representa una persona en esa situación crítica. Eso es función de su tamaño, su calzado, la resistividad superficial del terreno, condiciones de humedad de los puntos de contacto etc.
- La duración de la falla y, por lo tanto, la persistencia de la corriente circulando por ese circuito accidental.

La baja probabilidad de ocurrencia de este tipo de accidentes se debe a la baja probabilidad de coincidencia de los factores mencionados. Se trata, por lo tanto, de reducir tanto como sea posible esta probabilidad.

La norma VDE 0141.1989 establece los valores máximos de tensión de contacto en función del tiempo de falla para instalaciones de tensiones mayores a 1kV.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

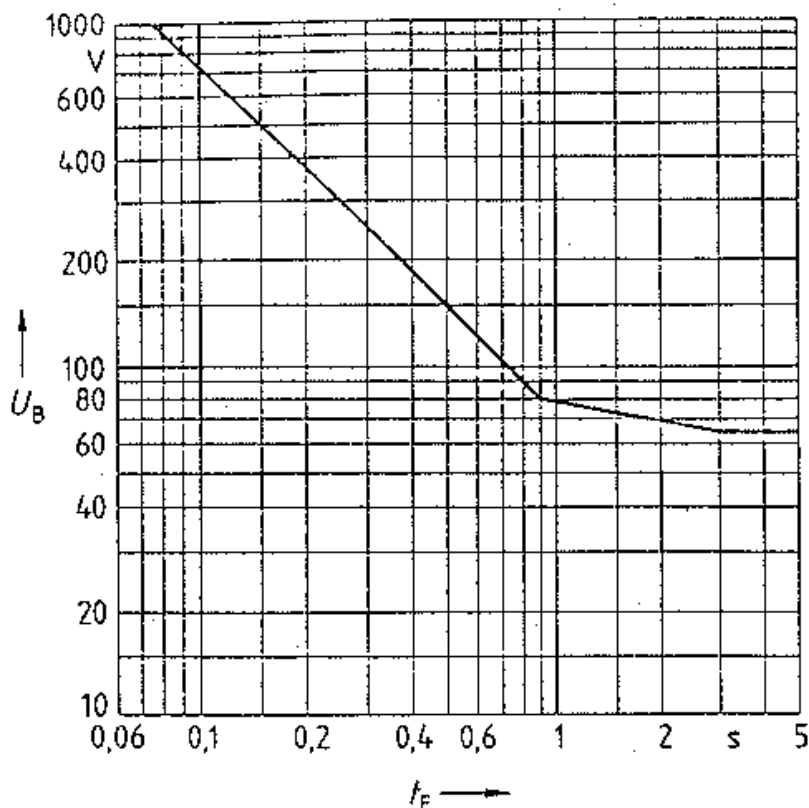


Figura 2. Tensión de contacto en función del tiempo.(Norma VDE 0141.89).

8.2. Gradiente de potencial en el cerco periférico, integrado a la red de PAT:

La importancia del problema de la puesta a tierra de los cercos se vincula a la aparición eventual de tensiones de **contacto** peligrosas. El lado exterior es accesible al público.

Además, la periferia de la red de puesta a tierra y el cerco perimetral suelen ser las zonas de más elevados gradientes.

Hay dos criterios generales de tratar el problema del cerco:

- (1) Incluir el cerco dentro del área de la red de PAT.

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



(2) Ubicar el cerco por afuera de este área, uniéndolo o no a una tierra adyacente tendida en toda su longitud, sin unión metálica con la red de PAT.

8.2.1. Cerco dentro del área de la red de PAT.

En este caso se incrementa el área cubierta por la red de PAT y esto lleva a una disminución de la resistencia de tierra y a una reducción de la elevación del potencial de tierra. El cerco participa de las elevaciones del potencial como cualquier otro elemento metálico de la instalación. Si los gradientes periféricos están por debajo de las tensiones toleradas la situación es la misma que en el interior de la subestación.

Con este criterio, el conductor perimetral de la red sigue la línea del cerco por debajo de él o a una corta distancia por afuera.(0,5 a 1,5m) y se une galvánicamente a él.

La ubicación del conductor perimetral en línea con el cerco evita el inconveniente de solicitar permisos para tender en la propiedad adyacente.

Por otra parte, la ubicación externa del conductor reduce las tensiones de contacto a que puede verse sometida una persona afuera de la instalación.

Si suponemos un conductor tendido un metro por afuera del cerco y un hombre parado sobre este conductor tocando el cerco la tensión que podría sufrir es proporcional a $\delta \cdot i$, esto es, la diferencia de potencial vertical entre el conductor de la red donde el hombre está parado y la superficie de terreno encima del conductor.

Si el cerco está sobre el conductor periférico y el hombre a un metro afuera, la diferencia de potencial es la suma de la componente vertical anterior más una componente horizontal sobre un metro de terreno.

8.2.2. Cerco exterior al área de la red de PAT.

Con referencia a la segunda situación (la puesta a tierra independiente del cerco) es necesario evaluar cuidadosamente algunas situaciones de riesgo:

Las líneas aéreas que acometen a una S.E pueden caer sobre el cerco perimetral y este puede ser la única derivación a tierra de la corriente de falla. Pueden aparecer sobre el cerco potenciales peligrosos debidos a la intersección del cerco con contornos equipotenciales normales.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



No es posible, a menudo, asegurar una completa aislación galvánica entre el cerco exterior y las estructuras metálicas de la instalación.

De la evaluación de las condiciones antes expuestas surge como conveniente la vinculación del cerco perimetral a la red de P.A.T. Para la ejecución de la misma véase la ET 2.1.1 050

Se trata de evaluar, ahora, como influir sobre los parámetros de diseño para reducir **adicionalmente** los valores de tensiones de contacto sobre el cerco. El cerco periférico puede ser, básicamente, de dos tipos:

- Mampostería.
- Alambre metálico.

La mampostería con cemento sin armar se comporta como un aislante y no es necesaria su conexión a tierra.

Por otra parte la superficie del terreno periférico exterior responde generalmente a la situación de instalaciones desarrolladas en esquina donde dos lados se cubren con vereda y los dos lados interiores quedan con la tierra natural.

La situación más beneficiosa que podemos encontrar es pared de mampostería sin armar con vereda o pavimento de alta resistividad. La menos beneficiosa, cerco metálico con terreno natural. Optar por una u otra combinación ayudará en situaciones críticas.

Se indica a continuación el análisis para una instalación típica:

La longitud del conductor enterrado en una subestación para ejecutar de modo seguro la conexión de todos los aparatos, es tan grande que se comporta casi como una placa sólida, al menos desde el punto de vista de la distribución del potencial y los problemas de gradiente asociados.

En el caso que estamos analizando podemos estimar que, desde el punto de vista del conductor enterrado, la elevación del potencial de la red es:

$$U_e = \rho \cdot I / L = 50 \cdot 2184A / 800m = 136V$$

donde:

ρ : es la resistividad del terreno (Ω -m)

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



I : es la corriente que se dispersa a tierra por los conductores de la red (A)
L : es la longitud de conductor enterrado (m)

Son estos valores de $\rho * I / L$ los que hacen seguro el control del gradiente y justifican la conexión del cerco al cable de tierra periférico.

La expresión para el cálculo del gradiente en la periferia exterior la encontramos en la referencia 4:

$$\varphi_x \approx I * \rho / (2 * \pi * x)$$

donde x(m) es un punto exterior a la periferia.

8.3.Verificación de los cables que conforman la red de PAT.

Cada elemento conductor de la red de PAT debe estar diseñado para que:

- 1)Tenga la suficiente conductividad para no provocar diferencias de potencial sustanciales.
- 2) Resista la fusión y el daño mecánico bajo las mas adversas corrientes y duración de las fallas.
- 3) Tenga una buena estabilidad frente a la corrosión.

El conductor de tierra más comúnmente utilizado, que cumple con las dos primeras condiciones expuestas, es el cable de cobre desnudo.

De todas maneras, debe tenerse en cuenta que una red de PAT de cobre forma una celda galvánica con las estructuras de acero enterradas, cañerías y pantallas de los cables, cuando estas tienen un contenido de plomo.

Para dimensionar la sección del conductor de tierra se considera el calentamiento producido por la circulación de la corriente de cortocircuito durante el tiempo que persista la falla.

Se consideran dos hipótesis que simplifican el cálculo:

La transformación es adiabática. (Todo el calor generado por efecto Joule queda retenido en el conductor en el proceso de calentamiento).

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
19 de 39

El producto del calor específico por el peso específico es aproximadamente constante, en tanto el calor específico se incrementa con la misma velocidad con que el peso específico disminuye.

La figura que sigue permite obtener las densidades admisibles de corriente para diversos materiales y uniones, considerando los siguientes parámetros de diseño:

- (1) Temperatura ambiente inicial 40° C.
- (2) Temperatura de fusión del material. (Se indican distintos materiales).
- (3) Temperatura máxima admisible para juntas soldadas de cobre de 450°C.
- (4) Temperatura máxima admisible para juntas abulonadas y cables críticos de 250°C.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielewsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

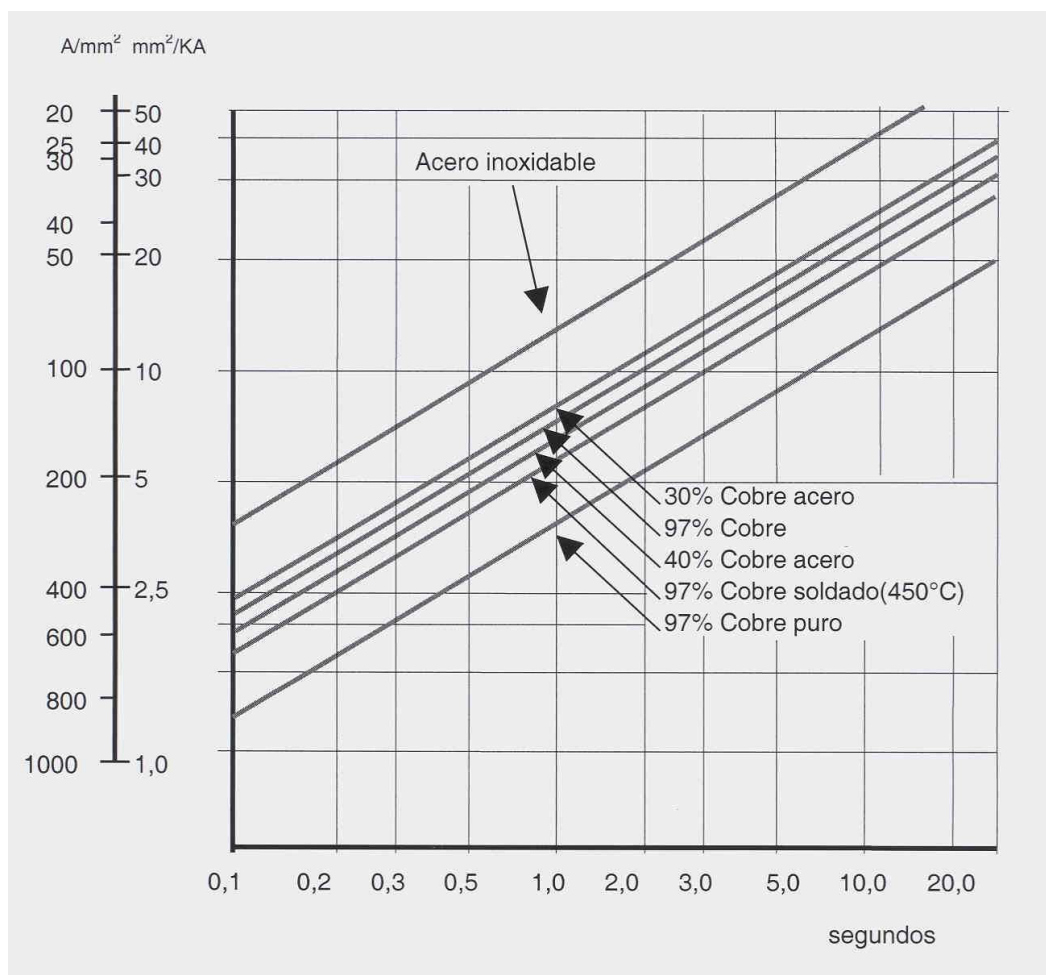


Figura 3. Nomograma para el dimensionamiento térmico del conductor

Debe considerarse el efecto electrodinámico de las corrientes de cortocircuito donde los esfuerzos que se producen pueden ser severos. En ensayos de cables de cobre con corrientes de cortocircuito se observa estricción cuando la temperatura se acerca a la de fusión.

Un cable de la red de PAT sufre en su vida útil una gran cantidad de fallas que producen un deterioro acumulativo; por otra parte la rotura de uno de estos cables altera significativamente la probabilidad de ocurrencia de un accidente

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
21 de 39

eléctrico. Básicamente por razones de seguridad es necesario tener en cuenta este hecho de manera de proveer un dimensionamiento realista del conductor.

8.4. Función y características de los electrodos de PAT.

Las principales funciones de los electrodos de tierra garantizar que se cumplan las condiciones para la seguridad de las personas y la protección de las instalaciones.

El sistema de puesta a tierra es el conjunto de elementos interconectados mediante impedancias despreciables, de manera que un contacto accidental signifique un cortocircuito que produzca la rápida eliminación de la corriente circulante.

Los electrodos que se indican son de sección cilíndrica y se clasifican según su disposición en:

- Electrodos dispersores horizontales, constituidos por cables de cobre enterrados.
- Electrodos verticales profundos o jabalinas
- Electrodos verticales no profundos o jabalina

No consideramos como electrodos las barras de cobre de sección rectangular para la PAT del neutro de los transformadores, de los tableros etc.

8.5. Recorridos de la corriente a través de la tierra

Una corriente que penetra desde el conductor a la tierra debe, obviamente, retornar a la red. Este retorno podría tomar lugar a través de neutros dispuestos para este propósito o a través de las capacidades distribuidas entre las fases sanas y tierra. La impedancia del sistema de retorno se agrega a la impedancia de entrada de la conexión a tierra y a la impedancia longitudinal de la red para limitar la corriente que circula a tierra.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

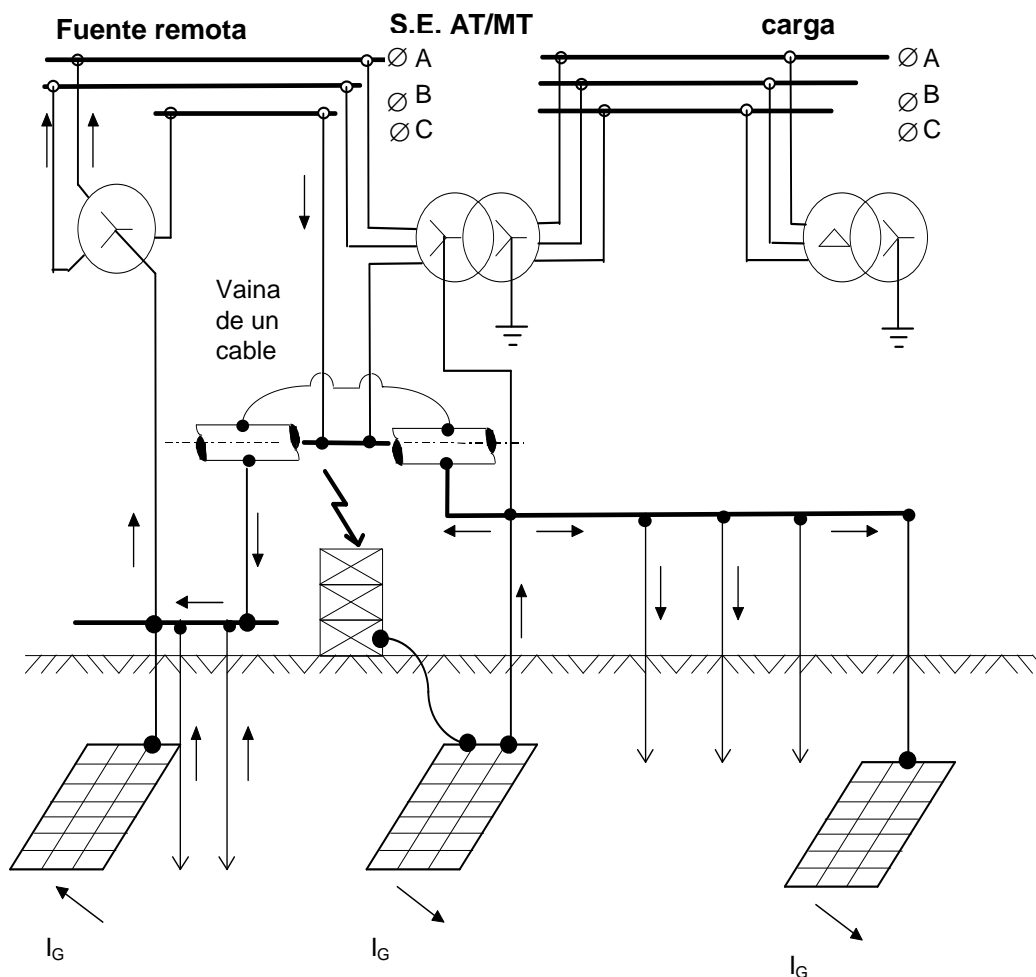


Figura 4. Ejemplo de circulación de corriente de falla por las mallas de puesta a tierra.

A menudo ocurre que la corriente tiene varios caminos de retorno, algunos concentrados y otros distribuidos. La corriente que ingresa a tierra a través de un electrodo se esparce alrededor de él. Cada recorrido de la corriente tiende a buscar otras conexiones de tierra que la reingresen al sistema o bien la zona donde se produce el retorno a través de las capacidades distribuidas.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
23 de 39

En principio, si bien la distribución de estas corrientes tiene una extensión infinita, en la práctica la densidad de corriente y los gradientes de potencial solo se perciben en áreas limitadas. Como regla general que constituye una importante simplificación, consideramos que la entrada y salida de corriente de electrodos de tierra suficientemente alejados no se afectan entre sí. La corriente que penetra por un electrodo a la tierra comienza a esparcirse vagamente en todas direcciones hasta una considerable distancia, comparada con las dimensiones de este electrodo, pero consideramos que este electrodo presenta la misma impedancia si el electrodo de retorno se esparciera hasta el infinito en todas direcciones. La segunda etapa es la circulación de la corriente por tierra, del área de entrada a la de salida. La última etapa es el drenaje a la red.

Todas estas consideraciones llevan a la idea de “impedancia natural de un electrodo de tierra” considerado independientemente del circuito de retorno.

No es usualmente necesario considerar esta impedancia debido a que, por lo común, se calcula la impedancia homopolar de la línea. Puntualizamos que la tendencia de las corrientes de retorno a seguir la traza de las líneas se puede ver falseada si encuentran caminos de baja impedancia como cañerías, vainas de cables etc. Esto puede acarrear inconvenientes cuando la continuidad eléctrica de estas vías no está asegurada o su conexión con electrodos vecinos está mal dispuesta.

El comportamiento de las corrientes depende esencialmente de la resistividad del suelo y este es un valor absolutamente variable que depende de:

- a) La naturaleza del terreno en cada lugar y su contenido de humedad.
- b) La resistividad del terreno, a menudo, no es uniforme y varía en forma vertical y horizontal.
- c) La resistividad de los niveles superiores varía con la estacionalidad (heladas, nieve, lluvias). El efecto se extiende hasta profundidades del orden de 1 a 2 m.
- d) Por lo general no se conocen valores firmes de la resistividad hasta el comienzo de la obra y suele ocurrir que la resistividad en las capas profundas se conozca recién al instalar los electrodos.

Para cálculos preliminares en terrenos del Gran Buenos Aires es usual considerar una resistividad a nivel de la superficie del orden de 20 a 50 Ω -m.

Como regla general podemos decir que la resistencia de tierra de un electrodo no varía con la magnitud de la corriente descargada por el. Sin embargo señalamos algunas excepciones:

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



Corrientes altas producen calor y subsecuente secado de la tierra vecina. Esto aumenta la resistividad.

Contactos imperfectos entre el metal y la tierra suelen significar pequeñas capas de aire que aíslan las pequeñas tensiones asociadas a corrientes débiles, pero que descargan y conducen ante tensiones mayores.

La tierra se comporta como un aislador imperfecto. Ciertos suelos resisten hasta 200kV/m. Por lo tanto, en particular con corrientes fuertes, no puede haber gradientes elevados en la vecindad del electrodo sin elevar las descargas internas que incrementan las dimensiones aparentes del electrodo y reintegran al gradiente el valor límite. El resultado de esto es que, independientemente de las pequeñas dimensiones originales del electrodo, la resistencia no puede exceder un cierto valor tan bajo cuanto más elevada es la tensión.

La resistencia tiene un valor aproximado de $R = U/K$. La constante K es de alrededor de 3000 Ω -kV para suelos de resistividad 100 Ω -m.

Esta “ruptura dieléctrica” del suelo no ocurre a tensiones de servicio y pueden ser características en algunos suelos para descargas atmosféricas de mucha intensidad.

8.6. Comportamiento frente a descargas atmosféricas

Se trata de establecer cuan rápidamente la corriente en un electrodo y la tierra que lo circundan pueden seguir las variaciones de tensión. Para establecer esto es necesario trabajar con las constantes de tiempo del sistema y la frecuencia natural de oscilación del fenómeno. Sin desarrollar esta situación es experiencia difundida en Argentina el buen comportamiento de la jabalinas frente a descargas atmosféricas, que son las que determinan el nivel de aislación en estas instalaciones.

Podemos decir que las jabalinas tienen buenas características de descarga:

- a frecuencia industrial
- con altas tensiones y altas frecuencias
- con ultra altas frecuencias.

Este comportamiento de presentar bajas impedancias a las descargas de alta tensión y alta frecuencia, es el que determina su ubicación en nuestras redes

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



cercanas a los hilos de guardia, a las antenas de radio enlace (que tienen una alta probabilidad de recibir descargas atmosféricas por su elevada altura) y a los descargadores de sobretensión.

El hecho de que constituyan en sí medios seguros de vinculación a la red de PAT hace que se instale por lo menos una en la vecindad de los neutros de los transformadores, cuya conexión no se debe perder en ninguna circunstancia.

9. PROCEDIMIENTO DE CÁLCULO

9.1. Secuencia de cálculo.

1. - Determinación de la topología de la red de PAT. Separación entre conductores de acuerdo con las dimensiones de la instalación (Figuras 4 y 5 o Tabla I). Profundidad de tendido aproximadamente 0,80m.
2. - Determinación de la longitud de conductor enterrado.
3. - Determinación de la resistencia de los electrodos horizontales.
4. - Determinación de la cantidad y la resistencia de las jabalinas. Cálculo de la resistencia del conjunto R_t .
5. - Determinación de la corriente de falla a derivar por la red (I_m) , por las pantallas de los cables de MT (I_{pc}) y por los hilos de guardia (I_{hg}).
6. - Determinación de la elevación del potencial de la red de PAT " U_e ".
7. - Si $U_e <$ tensión de contacto admisible de la VDE la red de PAT está totalmente verificada. Si $U_e > U_{adm}$ se debe determinar la tensión de paso y de contacto.
8. - La tensión de contacto U_{MC} se calcula como un porcentaje de la tensión en la red considerando la distribución irregular de la corriente en la red, mediante las figuras que siguen:

$$U_{MC} = \%U_e$$
$$U_s = \%U_e$$

Si los valores de tensión de paso y de contacto son inferiores al valor establecido por VDE, la verificación está concluida.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

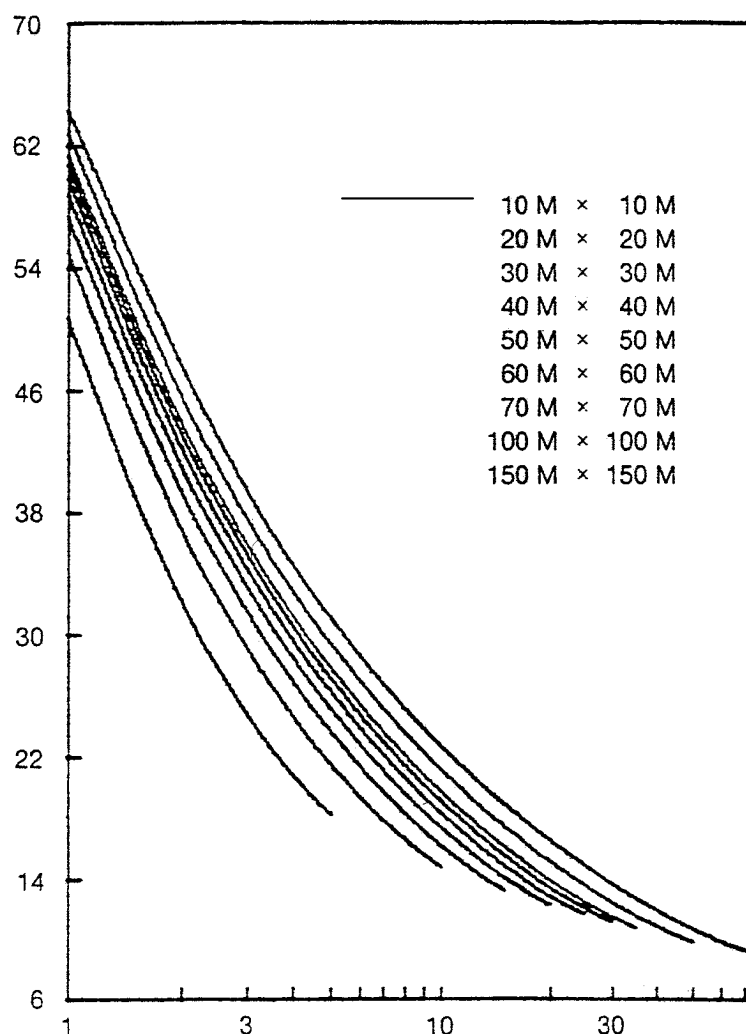


Figura 5. Tensión en una esquina de la malla como % de la tensión de malla U_e para distintas dimensiones de la red.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielesky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano

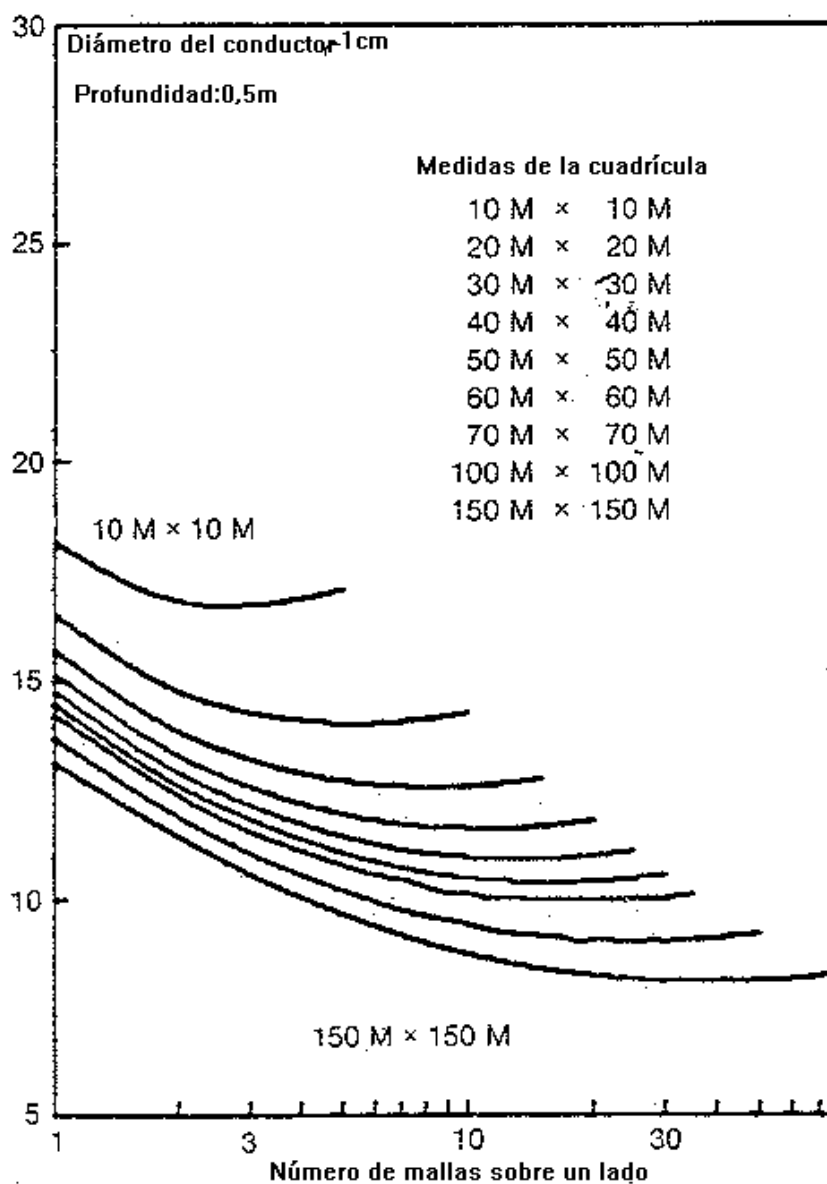
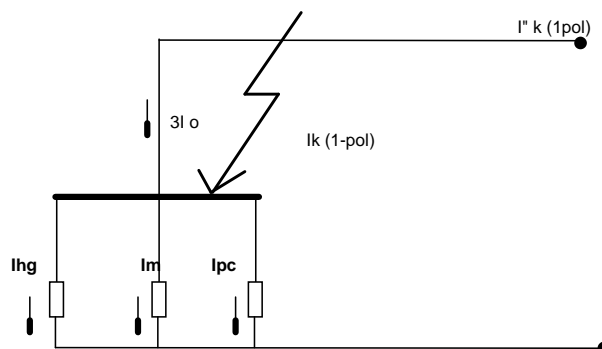
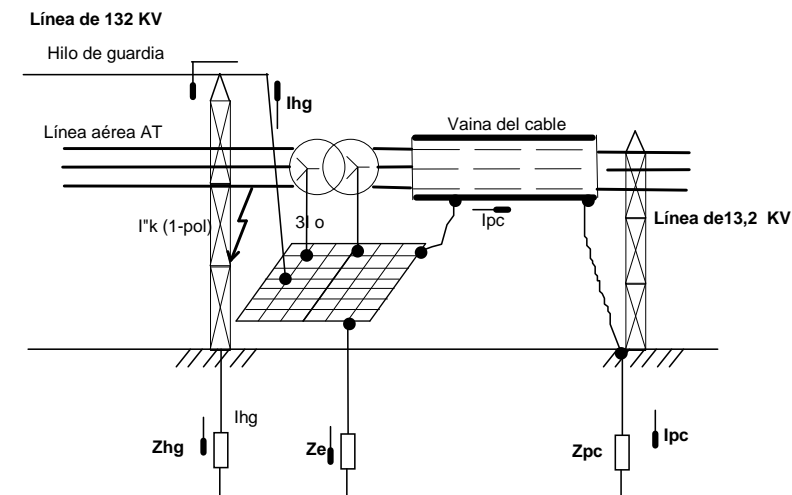


Figura 6. Tensión de paso en una esquina de la malla como
 % de la tensión de malla
 Ue para distintas dimensiones de la red.

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado: Ing. Kisielesky	Supervisado: Ing. Alaniz/ Ing. Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano

9.2. Modelado de las vías de circulación de la corriente

Esquema de la distribución de las corrientes



REFERENCIAS:

- $I''k (1-pol)$ Corriente de falla monofásica.
- Z_{hg} Impedancia equivalente del hilo de guardia.
- Z_{pc} Impedancia de la pantalla de los cables.
- Z_e Impedancia de la red de PAT (// entre 6 jabalinas y cuadrícula).

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado: Ing. Kisielevsky	Supervisado: Ing. Alaniz/ Ing. Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano

Para establecer la corriente de tierra que se deriva efectivamente por la red de PAT seguimos las recomendaciones de la Norma IEEE-80.

Consideramos que la corriente de falla monofásica a tierra se deriva por tres caminos diferentes:

- 1) La red de PAT de la SE (I_m)
- 2) Los hilos de guardia (I_{hg})
- 3) Las pantallas de los cables de AT y MT (I_{pc})

Se establece por lo tanto, un circuito equivalente de la forma:

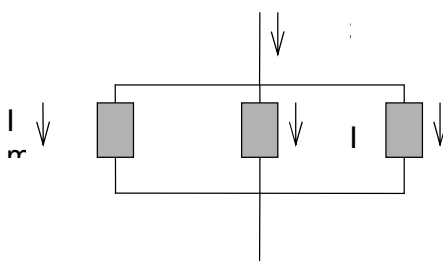


Figura 7. Reparto de las corrientes de tierra entre la red, las pantallas y las jabalinas

La impedancia de la red de PAT se estima rápidamente en base a las dimensiones de la instalación y la cantidad de jabalinas.

La impedancia del hilo de guardia se obtiene considerando que se comporta como una impedancia longitudinal Zl y una conductancia transversal $1/R_2$.

Consideramos para el hilo de guardia de Acero 50 (132kV) una impedancia longitudinal de $2\Omega/\text{km}$. Las líneas aéreas tienen dos hilos de guardia cada una en la acometida a la S.E y para 1km de línea corresponden 10 tomas de tierra si los vanos son del orden de los 100 m. El valor especificado en los pliegos de licitación es de $<5\Omega$ para cada torre. Tomamos 5Ω en forma conservadora. Además, la IEEE determina que en 1,5 km se termina el drenaje de corriente por el hilo de guardia. Tomamos este efecto sobre 1 km.

- a) Cable de acero de 50mm^2 . $Zl = 2\Omega/\text{km}$.
- b) Resistencia de puesta a tierra equivalente $R_e = 5\Omega/10 \text{ torres} = 0,5\Omega$
- c) Impedancia equivalente del hilo de guardia $Z_{hg}=1\Omega$

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



La impedancia del hilo de guardia por línea que acomete a la S.E es de 1 Ω .

La impedancia de las pantallas de los cables se calcula de manera similar; es una resistencia longitudinal que pondera el pasaje de corriente a través de la pantalla y una impedancia transversal que se establece entre la pantalla y el terreno anexo.

En los cortos tramos de cable de MT hay una conducción directa por la vaina de cobre que se pone a tierra adentro y afuera de la S.E mediante una jabalina de 1 Ω , cuando comienza la línea aérea.

La mínima cantidad de cables salientes de MT en una S.E es de 8. La impedancia equivalente de las pantallas de estos cable es 1 Ω /8cables= 0,125 Ω . Una vez determinada la impedancia equivalente Z_e entre estos tres circuitos de circulación de la corriente, se calcula la corriente en la red de PAT:

$$I_m = I_f \cdot \frac{Z_e}{Z_{red}}$$

El tamaño de estas mallas (la separación entre conductores) se obtiene en función de la superficie cubierta por la instalación. (Tabla I)

TABLA I

<i>Superficie de la red(m)</i>	<i>Lado de la cuadrícula(m)</i>
150x150	8
100x100	6
70x70	6
60x60	5
50x50	5
40x40	5
30x30	4
20x20	3

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielewsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



9.3. Verificación de los valores de tensiones peligrosas

El contratista debe presentar a Edenor S.A antes de comenzar la obra, una memoria de cálculo de acuerdo con las directivas que se indican a continuación para establecer los valores máximos de la tensión de puesta a tierra, de paso y de contacto.

- 1) Determinación de la resistencia de los electrodos dispersores horizontales:

$$R_g = \rho / 4 * \sqrt{\pi / A}$$

- 2) La resistencia de cada jabalinas debe ser $\leq 1\Omega$.

- 3) La resistencia aproximada del conjunto se calcula mediante:

$$R_t = (R_g * R_m) / (R_g + R_m)$$

- 4) Corriente de falla que circula por la red de PAT.

Se calcula la parte de la corriente de falla a drenar por la S.E considerando que se reparte en tres ramas:

- * Red de PAT propiamente dicha.
- * Pantallas y vainas de los cables de AT y MT.
- * Hilos de guardia de líneas aéreas.

- 5) Tensión de PAT

$$U_e = R_t * I_F$$

- 6) Tensión de contacto admisible $U_{c \text{ adm}} = 250V$.

- 7) Tensión de paso admisible $U_{p \text{ adm}} = 250V$.

- 8) Tensión de contacto que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
32 de 39

Se calcula con el coeficiente de la tabla que se anexa.

<i>Superficie de la red (m)</i>	<i>Lado de la cuadrícula(m)</i>	<i>Nº de mallas por lado</i>	<i>% U_E</i>
150x150	8	18	18
100x100	6	15	18
70x70	6	12	18
60x60	5	12	18
50x50	5	10	18
40x40	5	8	18
30x30	4	8	18
20x20	3	7	18

$U_{MC} = \% * U_E =$ Si es $< 250V$. **Verifica la tensión de contacto.**

- 9) Tensión de paso que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla.

Se calcula con el coeficiente de la tabla que se anexa.

<i>Superficie de la red(m)</i>	<i>Lado de la cuadrícula(m)</i>	<i>Nº de mallas por lado</i>	<i>% U_E</i>
150x150	8	18	7
100x100	6	15	8
70x70	6	12	10
60x60	5	12	11
50x50	5	10	12
40x40	5	8	12
30x30	4	8	13
20x20	3	7	13

$U_{MS} = \% * U_e$ si es $U_{MS} < 250V$. Verifica la tensión de paso.

Si estos valores no se obtienen, los medios aceptados para disminuirlos son:

- 1) Instalación de tantas jabalinas como sean precisas para reducir la impedancia de PAT " Z_E ".

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielewsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



2) Aumentar la resistencia superficial esparciendo grava o roca molida con espesor no menor a 0.10m.(Ver Punto 1.1).

3) Disminuir la separación entre conductores horizontales.

4) Se admite el uso de mejoradores de suelo no corrosivos, debiendo en este caso repetir la medición a los 60 días.

Finalizada la obra el Contratista presentará a la Inspección de Edenor la documentación conforme a obra (Planillas de cálculo, plano de planta de la instalación y planos de detalle).

10. EJEMPLO DE CALCULO

10.1. Descripción de la instalación.

Consideramos una subestación de 2x40MVA, desarrollada sobre un terreno de 1600m² (40x40) para la que corresponde una cuadrícula de 5m de lado y con una resistividad uniforme de $\rho = 50\Omega/\text{m}$. La acometida es por dos líneas aéreas con hilo de guardia y el tablero de media tensión es de 16 cables de salida.

10.2. Cálculos preliminares.

Como una primera evaluación de la resistencia utilizamos la expresión.

$$R_m = \rho / 4 * \sqrt{\pi / A} + \rho / L = 50 / 4 * (3.14 / 1600)^{0.5} + 50/800 = 12.5 * 0.044 + 0.0625 = 0.60\Omega$$

donde:

L es la longitud del conductor enterrado, en metros. Se calcula de las dimensiones del terreno.

A es el área cubierta por la instalación, en m².

Además, las 6 jabalinas de 1 Ω cada una que se instalan en la S.E representan aproximadamente 0,166 Ω , despreciando las influencias mutuas.

La resistencia aproximada del conjunto es:

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado:Ing. Kisielevsky	Supervisado:Ing. Alaniz/ Ing.Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
34 de 39

$$R_t = R_m * R_j / (R_m + R_j) = 0.60 * 0.166 / (0.600 + 0.166) = \mathbf{0.131 \Omega}$$

Este valor es menor que el exigido que es de 0,300Ω.

10.3. Determinación de la corriente a derivar por la red de P.A.T.

Se considera como falla mas exigente para la red de PAT la que se produce dentro de la S.E, fuera de la zona de actuación instantánea de las protecciones. La corriente que corresponde a la potencia de cortocircuito pleno es de 22kA. Parte de esa corriente drena por la red y parte lo hace por los hilos de guardia y las vainas de los cables.

De acuerdo con lo indicado en la IEEE consideramos el aporte de los cables de guardia y de las pantallas de los cables como se indica:

10.3.1. Hilos de guardia

Un hilo de guardia se comporta como una impedancia longitudinal Z_l y una conductancia transversal $1/R_2$. Consideramos para el hilo de guardia de Acero 50 mm² una impedancia longitudinal de 2Ω/km. Las líneas aéreas tienen dos hilos de guardia cada una en la acometida a la S.E y para 1km de línea corresponden 10 tomas de tierra si los vanos son del orden de los 100 m. El valor especificado en los pliegos de licitación es de <5Ω para cada torre. Tomamos 5 Ω en forma conservadora. Además, se determina que en 1,5 Km se termina el drenaje de corriente por el hilo de guardia. Tomamos este efecto sobre 1 km.

a) Cable de acero de 50mm². $Z_l = 2\Omega/\text{km}$.

b) Resistencia de puesta a tierra equivalente $R_e = 5\Omega/10 \text{ torres} = 0,5\Omega$

c) Impedancia equivalente del hilo de guardia $Z_{hg} = \sqrt{2 * 0.5} = 1 \Omega$

Considerando que a esta la instalación acometen dos líneas de A.T tomamos la mitad del valor calculado . **$Z_{hg}=0,5\Omega$**

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielevsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



10.3.2. Pantallas de los cables de M.T.

Las pantallas de los cables conducen corriente de falla al terreno adyacente. Esta conducción depende de la sección y el material de la pantalla y de la resistividad del terreno anexo.

Existe también una conducción galvánica pura debido a que los dos extremos del cable están vinculados a tierra: un extremo a la red de la S.E y el extremo remoto donde el cable se convierte en línea a una jabalina de $Z < 1\Omega$. Vamos a considerar solo esta derivación.

La impedancia equivalente a los 16 cables será:

$$Z_{pc} = 1\Omega / 16 \text{ jabalinas} = 0,0625 \Omega$$

Podemos estimar que la corriente de falla se distribuye en un circuito de tres ramas paralelas de:

Impedancia de dispersión de la red de PAT $Z_t = 0,131\Omega$

Impedancia de los hilos de guardia $Z_{hg} = 0,5 \Omega$

Impedancia de las pantallas $Z_{vc} = 0,0625\Omega$

La impedancia equivalente es $Z_e = 0,039\Omega$

La corriente que drena la red de PAT es $I_m = I_k * Z_e / Z_{pc} = 22000 * 0,039 / 0,131$

$$I_m = 6550 \text{ A}$$

10.4. Determinación de las tensiones de contacto y de paso.

La elevación del potencial que se produce en la red de PAT por la acción de esta corriente es:

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado: Ing. Kisielevsky	Supervisado: Ing. Alaniz/ Ing. Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano

$$U_e = I_m * Z_e = 6550 * 0,131\Omega = 858 \text{ V}$$

La tensión de contacto que no queremos superar es el valor que asigna la norma VDE para una falla de duración hasta 300 ms.

10.4.1. Tensión de contacto que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla

Nos valemos de la siguiente tabla. Esta tabla indica la tensión de malla que se produce en una esquina de la malla para una cuadrícula determinada como porcentual de la tensión en el centro de la malla. A los efectos de las instalaciones que nos ocupan consideramos las siguientes alternativas:

Superficie de la red (m)	Lado de la cuadrícula (m)	Nº de mallas por lado	% U _E
150x150	8	18	18
100x100	6	15	18
70x70	6	12	18
60x60	5	12	18
50x50	5	10	18
40x40	5	8	18
30x30	4	8	18
20x20	3	7	18

$U_{MC} = 0,18 * U_e = 0,18 * 858V = 154 \text{ V} < 250 \text{ V}$. **Verifica la tensión de contacto.**

10.4.2. Tensión de paso que se produce en la esquina de la malla como consecuencia de la acción de la corriente de falla

La siguiente tabla indica la tensión de paso que se produce en una esquina de la malla para una cuadrícula determinada como porcentual del valor en el centro de la malla.

A los efectos de las instalaciones que nos ocupan consideramos las siguientes alternativas:

Fecha de Edición: 05/2004	Fecha de actualización:	Revisión:
Realizado: Ing. Kisielevsky	Supervisado: Ing. Alaniz/ Ing. Perez Casal	Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
37 de 39

Superficie de la red(m)	Lado de la cuadrícula(m)	Nº de mallas por lado	% U _E
150x150	8	18	7
100x100	6	15	8
70x70	6	12	10
60x60	5	12	11
50x50	5	10	12
40x40	5	8	12
30x30	4	8	13
20x20	3	7	13

$$U_{MS} = 0.12 * U_e = 0,12 * 858 \text{ V} = \mathbf{103 \text{ V}} \quad < \mathbf{250V.Verifica .}$$

Los valores que fija la norma VDE 0141.1989 son de 75V para 1seg, 150V para 500ms y **250 V para 300ms.**

El valor que se indica de la resistividad superficial indica una de las maneras posibles de controlar el gradiente, cubriendo la superficie de la instalación con grava de alta resistividad. El otro medio es incrementar la longitud del cable enterrado.

10.5. Sección mínima del conductor.

La norma IEEE 80 establece para una Tª final del cobre de 450°C una densidad de corriente de 200 A/mm². Para los 22kA de la corriente de falla corresponde un cable de cobre de 120 mm².

La norma VDE 0141/1989.Fig7 establece valores similares.

10.6. Cálculo de las tensiones admisibles de contacto y de paso de acuerdo con la norma IEEE 80. (Comparativo).

A título ilustrativo se indican los valores de tensiones admisibles para la norma IEEE considerando resistividad superficial de 50Ω-m.

Tensión de contacto admisible para una persona de 70 kg y un tiempo de exposición de 0,5 seg.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
38 de 39

$$E_{T=}(1000+1,5 * C_s * \rho_s) * 0,157 / \sqrt{T}$$

$$E_{T=}(1000+1,5 * 1 * 50) * 0,157 / \sqrt{0,5} = 238V$$

Tensión de paso admisible para una persona de 70 kg y un tiempo de exposición de 0,5 seg.

$$E_{S=}(1000+6 * C_s * \rho_s) * 0,157 / \sqrt{T}$$

$$E_{S=}(1000+6 * 1 * 50) * 0,157 / \sqrt{0,5} = 288V$$

Los valores de tensión admisible de la Norma IEEE 80 son más elevados que los de la Norma VDE 0141. Hemos adoptado los valores admisibles de esta Norma para ponernos del lado de la seguridad.

10.7. Sensibilidad de la metodología de la verificación de la red de P.a.T.

A continuación tabulamos los valores determinantes de la red de PAT en función de la resistividad del terreno:

Resistividad	20Ω-m	50Ω-m	100Ω-m
Tensión de contacto Uc(V)	141	154	159
Resistencia de PAT Ze(Ω)	0.099	0.131	1,233
Corriente en la red de PAT Im(A)	7898	6559	6055
Gradiente en el cerco Gp (V/m)	1251	2611	4820
Gradiente afuera del cerco Gp (V/m)	1191	2487	4591
Diferencia de potencial en el cerco	60	124	229

El gráfico que sigue ilustra acerca de la variación de las tensiones de contacto y paso en el cerco periférico con la resistividad del terreno. Se indica el valor de la tensión admisible de acuerdo con VDE 0141 (250 V).

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado:Ing.
Kisielevsky

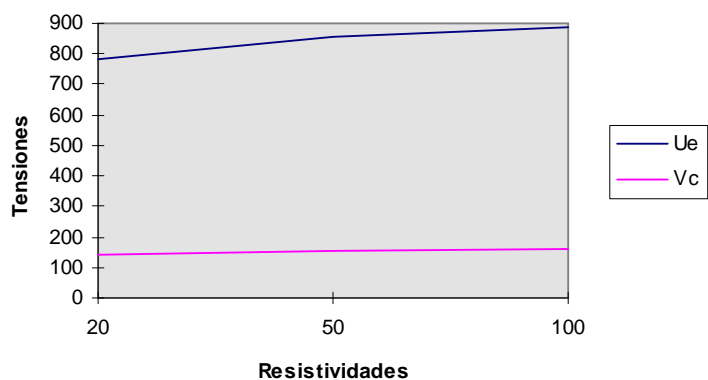
Supervisado:Ing.
Alaniz/ Ing.Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano



ET N°1.1.1 050
CALCULO Y DISEÑO DEL SISTEMA DE
PUESTA A TIERRA EN INSTALACIONES
DE AT

Página
39 de 39



Se observa que los valores de tensión de contacto son seguros para las condiciones de falla que hemos analizado.

Fecha de Edición:
05/2004

Fecha de actualización:

Revisión:

Realizado: Ing.
Kisielewsky

Supervisado: Ing.
Alaniz/ Ing. Perez Casal

Aprobado: Ing. Sericano