

Proyecto de Instalaciones Eléctricas de la Estación de Anoeta

Anejo 3 Cálculo de sistemas eléctricos de potencia

TTE-IS-23001-PWS-IEE-ANX-0003
V1



We Make
Your Way Easier

Preparado para:



Nombre: Euskal Trenbide Sarea
Dirección: San Vicente 8, Edificio
Albia I. Planta 14. Bilbao.
CP: 48001

Preparado por:



Nombre: CAF Turnkey
& Engineering
Dirección: Laida Bidea,
Edificio 205,Zamudio
CP: 48170

Proyecto de Instalaciones Eléctricas de la Estación de Anoeta

Anejo 3 Cálculo de sistemas eléctricos de potencia

TTE-IS-23001-PWS-IEE-ANX-0003

V1

Revisión del documento		
Revisión	Fecha	Objetivo de la revisión
1	13/03/2023	Versión Inicial

<i>Preparado por</i>	SLV	<i>Revisado por</i>	APC	<i>Aprobado por</i>	IAA
Nombre	Sofía Le Maitre Villadiego	Nombre	Ander Pérez Caro	Nombre	Iker Aizpuru Aragón
Firma		Firma		Firma	
Fecha:	13/03/2023	Fecha:	13/03/2023	Fecha:	13/03/2023

Índice de Contenidos

1. Objeto	4
2. Datos de partida.....	4
2.1. Emplazamiento y Titularidad	4
2.2. Balance de Cargas	4
2.3. Cuadro General de la Estación de Anoeta	5
3. Dimensionamiento red 13,2 kV.....	6
3.1. Balance carga de la red.....	6
3.2. Línea	6
3.3. Conductor.....	6
3.4. Puesta a tierra conductor	8
3.5. Intensidad de Servicio	9
3.6. Potencia a transportar	9
3.7. Caída de tensión	10
3.8. Intensidad de cortocircuito red 13,2 kV	10
4. Dimensionamiento cables secundario del transformador	11
4.1. Cálculo por intensidad de cortocircuito admisible.....	11
4.2. Cálculo por intensidad máxima permanente admisible	11
4.3. Cálculo por caída de tensión	11
4.4. Elección del conductor	12
5. Instalaciones de puesta a tierra	12
5.1. Datos de partida	12
5.2. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra 13,2 kV	13
5.3. Sección cable puesta a tierra	14
5.4. Cálculo de las tensiones en el exterior de la instalación	14
5.5. Cálculo de las tensiones en el interior de la instalación	15
5.6. Cálculo de las tensiones aplicadas	15
5.7. Medidas de seguridad adicionales para evitar tensiones de contacto.....	16
5.8. Corrección y ajuste del diseño inicial	16
6. Distancia entre sistemas de puesta a tierra de protección y servicio	16

1. Objeto

Este proyecto tiene por objeto definir las características de la línea subterránea particular en simple circuito a 13,2 kV para alimentación del nuevo Centro de Transformación destinado al suministro de energía eléctrica de la Estación de Anoeta, en el término municipal de Donostia (Gipuzkoa), y justificar y valorar los materiales empleados en el mismo.

2. Datos de partida

La alimentación eléctrica general propuesta tiene las siguientes características:

Corriente eléctrica:	Alterna Trifásica
Frecuencia:	50 Hz
Tensión:	13.200 V
Puesta a Tierra:	Neutro a tierra

Para la energización del nuevo vestíbulo y el actual de la Estación de Anoeta, la corriente será Alterna, Monofásica a 230/242 V o Trifásica 400/420 V, por lo que debe de realizarse una transformación de tensión.

2.1. Emplazamiento y Titularidad

Las actuaciones se enmarcan en la Estación de Anoeta, situada en la Plaza Aita Donostia, junto al Estadio de Anoeta, barrio de Amara en el término municipal de Donostia.

La titularidad de las instalaciones corresponde a la compañía Euskal Trenbide Sarea (ETS).

2.2. Balance de Cargas

En la Estación de Anoeta todas las cargas estarán alimentadas a una tensión de 400/230 V. En todas ellas, la distribución eléctrica a los equipos se realizará desde los Cuadros Generales de Distribución en Baja Tensión (CGBT 1 y CGBT 2), cuadros auxiliares (CA-1 y CA-2) y cuadros de control (CGC 1 y CGC 2) ubicados en el cuarto de baja tensión de cada vestíbulo..

El CGBT 1 tendrá un embarrado normal desde el que alimentar a los distintos equipos de estación. Este embarrado normal EN es alimentado por la Red propia de ETS en 13,2 kV, previamente transformada a 400/230 V.

El CGBT 2 tendrá un embarrado de emergencia EE, alimentado normalmente por el embarrado normal EN pero conmutable, mediante transferencia automática, con una acometida complementaria local de la red de I-DE REDES ELECTRICAS INTELIGENTES, S.A.U a una tensión de 400/230 V.

El nuevo Centro de Transformación de Anoeta se conectará a la red de media tensión a 13,2 kV del sistema global de Metro Donostialdea que se alimenta de las subestaciones colaterales de Bentaberri y Loiola.

En la siguiente tabla se resumen los centros de transformación implicados:

LOCALIZACIÓN	P.K.	ACOMETIDA ACTUAL	POTENCIA INSTALADA (KVA)
SUBESTACIÓN BENTABERRI (existente)	106+660 (aprox.)	Red 13,2 kV de ETS	1 x 2500
Estación Bentaberri	106+905	Red 13,2 kV de ETS	2 x 1000
S.E. de Pío Baroja	107+905	Red 13,2 kV de ETS	1 x 630
Estación de Concha	108+950	Red 13,2 kV de ETS	2 x 1000
Estación de Easo	000+300	Red 13,2 kV de ETS	2 x 1000
Estación de Anoeta	001+945	Red 13,2 kV de ETS	1 x 315
Estación de Loiola	003+000	Red 13,2 kV de ETS	1 x 100
SUBESTACIÓN LOIOLA (existente)	003+500 (aprox.)	Red 13,2 kV de ETS	1 x 2500

2.3. Cuadro General de la Estación de Anoeta

De este Centro, se cargan las instalaciones propias de la estación de Anoeta, andenes y vestíbulo actual, así como el nuevo vestíbulo proyectado (alumbrados, tomas de fuerza, bombas, ascensores, puertas y persianas, sistema de detección y extinción de incendios).

En la tabla inferior se muestra el balance general de cargas para la Estación de Anoeta. El número total de cargas y su detalle puede ser consultado en el anejo 05, "Cálculo de Instalaciones Auxiliares".

Receptor	NORMAL (EN)			EMERGENCIA (EE)			TOTALES		
	P. Inst [kW]	Fs	P. Serv.[kW]	P. Inst [kW]	Fs	P. Serv.[kW]	P. Inst [kW]	Fs	P. Serv.[kW]
CGBT 1	144	0,3	43,2				144	0,3	43,2
CGBT 2				1,6	1	1,6	1,6	1	1,6
CA 1				40	0,85	34	40	0,85	34
CA 2				80	0,85	68	80	0,85	68
CGC 1				12	0,85	10,2	12	0,85	10,2
CGC 2				12	0,85	10,2	12	0,85	10,2
TOTALES	144		43,2	145,6		124	289,6		167,2

Se precisa el suministro de energía a una tensión de 420 V, con una potencia instalada de 290 kW para la Estación de Anoeta. Para atender a las necesidades indicadas, se considera un transformador de potencia normalizada de 315 kVA.

3. Dimensionamiento red 13,2 kV

3.1. Balance carga de la red

La alimentación del nuevo Centro de Transformación de Anoeta se realizará a través de la Red propia de ETS (13,2 kV) que se alimenta desde las subestaciones de tracción dispuestas de Bentaberri y Loiola, cada una de ellas dispone de un transformador de 30/13,2 kV y 2.500 kVA.

De acuerdo con el Balance de cargas de la Estación de Anoeta, se preverá un transformador de las siguientes características:

- / Relación de transformación: 13,2/0,42 kV
- / Potencia: 315 kVA
- / Tensión de cortocircuito: 6 %

En la Estación de Anoeta se dispondrá de una acometida complementaria en 400/230 V desde la red local de I-DE REDES ELÉCTRICA INTELIGENTE, S.A.U. para poder alimentar el embarrado de Emergencia en caso de fallo de la red de 13,2 kV de los servicios previstos como prioritarios.

De acuerdo con el Balance de cargas, la acometida local de I-DE para el suministro de emergencia, será de 100kW, a una tensión de 400/230 Vca.

Independientemente de las acometidas anteriores y para la alimentación de servicios esenciales, control, incendios y alumbrado de escaleras se ha previsto la instalación de un SAI de Energía.

La estación de Anoeta se alimentará desde las Subestaciones de Tracción de Bentaberri y de Loiola. Teniendo en cuenta un criterio conservador y el escenario degradado más crítico, se considera que una de las subestaciones quede fuera de servicio y por tanto la restante es la que deberá aportar energía a toda la Red propia de ETS en 13,2 kV.

La red de 13,2 kV se dimensionará en la situación más desfavorable, que toda la red se alimente desde la subestación de Loiola o desde la subestación de Bentaberri.

3.2. Línea

Clase de corriente	Alterna trifásica
Frecuencia	50 Hz
Tensión nominal	13,2 kV.
Tensión más elevada para el material	24 kV.
Categoría de la red	Según UNE 211435 Categoría A

El tendido subterráneo simple circuito de 13,2 kV tendrá aproximadamente una longitud de **1900 m** en el tramo Easo-Anoeta y **1250 m** en el tramo Anoeta-Loiola.

3.3. Conductor

Como conductor de esta instalación se utilizará cable **AL ALFUMEX H** de Aluminio de 3(1x150) mm² de sección. El simple circuito subterráneo a 13,2 kV está proyectado con cable unipolar, siendo sus características principales:

Tipo.....	AL AFUMEX H
Sección.....	150 mm ²

Tensión nominal..... 12/20 kV
 Norma: IEC 60502
 Análisis: 20000. 171
 Cable no propagador del incendio

Tipos Constructivos	Tensión Nominal kV	Sección conductor mm ²	Sección pantalla mm ²
AL ALFUMEX H	12/20	150	16

En la tabla se indican las intensidades máximas permanentes admisibles en los diferentes tipos de cables para canalizaciones enterradas directamente o entubadas:

Tensión nominal U0/U kV	Sección (mm ²)	Intensidad (A)
		3 unipolares
	50	135
12/20	150	255
	240	335

Intensidad máxima admisible, en amperios, en servicio permanente y con corriente alterna, de los cables con conductores de aluminio con aislamiento Etileno-propileno (EPR).

Características constructivas:

- Conductor: Cuerda redonda compacta de hilos de aluminio según UNE 21.022, clase. Diámetro 14 mm.
- Semiconductora interna: Capa extrusionada de material conductor.
- Aislamiento: Etileno – propileno (EPR), espesor nominal 5,5 mm.
- Semiconductora externa: Capa extrusionada de material conductor separable en frío
- Pantalla metálica: Corona de hilos de cobre más cinta de cobre en hélice con sobreposición. Sección nominal = 16 mm²
- Cubierta exterior: Material libre de halógenos ignifugado AFUMEX Z1. Espesor 3 mm
- Peso aproximado del cable: 1.520 kg/km

Características eléctricas:

- / Resistencia eléctrica del conductor a 20°C: 0,206 Ω/km
- / Reactancia inductiva, X: 0,117 Ω/km

- / Capacidad nominal: 0,303 $\mu\text{F}/\text{km}$
- / Tensión simple, U_0 : 12 KV
- / Tensión máxima entre fases, U_m : 24 KV
- / Tensión de impulso, U_p : 125 KV
- / Temperatura máxima admisible en el conductor:
 - En servicio permanente: 90°C
 - En régimen de cortocircuito $t < 5\text{s}$: 250°C
- / Intensidad máxima de cortocircuito durante 1 seg:
 - En el conductor: 13,9 KA
 - En la pantalla: 3,1 KA

Normas aplicables relativas al fuego:

- / No propagación de la llama. UNE EN 60332– 1 –2
- / No propagación del incendio. UNE EN 50266 – 2 - 4
- / Reducida emisión de halógenos. UNE EN 50267 – 2 - 1. Cero halógenos, < 0,5%
- / Baja corrosividad. de los gases emitidos. UNE EN 50267 –2 – 3.
- / Índice de toxicidad NES-713, NFC-20454. IT 1,5
- / Baja emisión de humos opacos. UNE EN 61034-1

Ensayos:

- / Ensayos establecidos en la norma CEI 60502-2.
- / Ensayos Individuales.
- / Medida de la resistencia eléctrica del conductor.
- / Ensayo de tensión del aislamiento.
- / Ensayo de descargas parciales.
- / Ensayo de tensión de la cubierta exterior, (Spark-Test).

Ensayos Especiales (sobre una muestra)

- / Examen del conductor
- / Control dimensional

3.4. Puesta a tierra conductor

PUESTA A TIERRA DE CUBIERTAS METÁLICAS

Se conectarán a tierra las pantallas y armaduras de todas las fases en cada uno de los extremos y en puntos intermedios. Esto garantiza que no existan tensiones inducidas en las cubiertas metálicas.

PANTALLAS

Tanto en el caso de pantallas de cables unipolares como de cables bipolares se conectarán las pantallas a tierra en ambos extremos.

ARMADURAS

Se conectarán a tierra en los dos extremos, con el fin de evitar que una tensión pueda provocar una perforación entre armadura y tierra, bandejas y soportes, en el caso de instalación en galería, con destrucción de la cubierta de protección, o entre armadura y pantalla con posible corrosión de alguna de ellas. Desde el punto de vista de seguridad, posible contacto con el cable, la conexión a tierra en los dos extremos es la mejor solución.

3.5. Intensidad de Servicio

La fórmula es:

$$I = \frac{W}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi}$$

$$I_{ter} = \frac{630}{\sqrt{3} \times 13,2 \times 0,9} = 30,62A$$

Estos valores son aplicables bajo unas condiciones tipo de instalación y, en los casos en los que las condiciones de instalación difieran éstas, se deberán aplicar factores de corrección: por temperatura del terreno, por resistividad del terreno, por distancia entre ternos de cables unipolares agrupados y por profundidad de los cables en la zanja.

Los cálculos eléctricos según la ITC-LAT 06, indican la necesidad de aplicar los coeficientes de corrección de intensidad y tomaremos nuestra canalización con tubos de gran longitud:

POR TEMPERATURA DEL TERRENO

Se supone que el terreno está a una temperatura de 25°C y no varía prácticamente esta temperatura durante todo el año por lo que el factor de corrección aplicable según la tabla 7 de la ITC-LAT 06 es 1,00.

POR RESISTIVIDAD TERMICA DEL TERRENO

El tipo de terreno en el que se proyecta la instalación es de tipo seco, por lo que según la tabla 8 de la ITC-LAT 06 se adoptará una resistividad térmica del terreno de 1,5 k.m/W, siendo de este modo el factor de corrección a aplicar según la tabla 8 de 1,00.

POR DISTANCIA ENTRE TERNOS DE CABLES UNIPOLARES AGRUPADOS

Se instalarán una única terna de cable unipolar en canalización bajo tubo. Para realizar los cálculos se consideran dos ternas separadas 0,2m, aplicando un factor de corrección según la tabla 10 de la ITC-LAT 06 para este caso, es de 0,83.

POR PROFUNDIDAD DE LOS CABLES EN LA ZANJA

Los cables estarán instalados bajo tubo de 160mm de diámetro a una profundidad de 0,6 m, por lo que el factor de corrección obtenido de la tabla 11 de la ITC-LAT 06 será de 1,04

En resumen, cotejados todos los factores de corrección, se calcula la intensidad máxima admisible, en servicio permanente y con corriente alterna:

$$I_{max} = 255 A \times 1,0 \times 1,0 \times 0,83 \times 1,04 = \mathbf{220,11 A}$$

La Intensidad admisible del cable seleccionado es superior a la Intensidad de servicio:

$$I_{max LSAT} = 220,11 A > I_{LSMT} = \mathbf{30,62 A}$$

3.6. Potencia a transportar

La potencia que puede transportar la línea está limitada por la intensidad máxima admisible determinada anteriormente y por la caída de tensión, que no deberá exceder del 5%.

La máxima potencia a transportar limitada por la intensidad máxima es:

$$P_{\text{máx}} = \sqrt{3} \times U \times I_{\text{máx}} \times \cos\varphi = \sqrt{3} \times 13,2 \times 220,11 \times 0,9 = 4.529,27 \text{ kW/circuito}$$

3.7. Caída de tensión

La caída de tensión por resistencia y reactancia de una línea (despreciando la influencia de la capacidad y la perditancia) viene dada por la fórmula:

$$\Delta U \% = \frac{(P_{\text{máx}} \times L) \times (R + X \tan \varphi)}{10 \times U^2}$$

Donde:

- / ΔU : Caída de tensión compuesta, en V.
- / $P_{\text{máx}}$: Potencia máxima transportada, en kW.
- / L : Longitud de la línea, en km.
- / R : Resistencia, en ohmios por km.
- / X : Reactancia, en ohmios por km.
- / φ . Angulo de desfase (25.84).
- / U : Tensión compuesta en kV.

Sustituyendo valores resulta:

TRAMO EASO-ANOETA:

$$\Delta U \% = \frac{(4529,27 \times 1,90) \times (0,206 + 0,117 \times 0,484)}{(10 \times 13,2^2)} = 1,30 \%$$

Siendo la caída de tensión para los 1900 metros de línea en el tramo entre las Estaciones de Easo y de Anoeta:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{3} \times I \times L \times (R \cos \phi + X \sin \phi) \\ &= \sqrt{3} \times 220,11 \times 1,90 \times (0,206 \times 0,9 + 0,117 \times 0,436) = 171,25 \text{ V} \end{aligned}$$

TRAMO ANOETA-LOIOLA:

$$\Delta U \% = \frac{(4529,27 \times 1,25) \times (0,206 + 0,117 \times 0,484)}{(10 \times 13,2^2)} = 0,85 \%$$

Siendo la caída de tensión para los 1250 metros de línea en el tramo entre las Estaciones de Anoeta y de Loiola:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \sqrt{3} \times I \times L \times (R \cos \phi + X \sin \phi) \\ &= \sqrt{3} \times 220,11 \times 1,25 \times (0,206 \times 0,9 + 0,117 \times 0,436) = 112,67 \text{ V} \end{aligned}$$

3.8. Intensidad de cortocircuito red 13,2 kV

La intensidad de cortocircuito suministrada por ETS corresponde a la Estación de Bentaberri. Se trata del dato más desfavorable del análisis intensidades de cortocircuito realizado en estaciones de esta red 13,2kV y se hará bajo un criterio homogeneizador, de tal forma que se hará el cálculo de manera conservadora.

Corriente de cortocircuito fase – tierra: $I_{\text{ft}} = 2,032 \text{ A}$

La intensidad de cortocircuito admisible para el cable seleccionado en un cortocircuito de 0,5 s es de 133 A/mm², según la tabla 26 de la ITC-LAT06:

Ahora tomando el valor de la tabla 26 (133 A/mm²) no tendremos más que multiplicarlo por la sección del conductor y sabremos que cortocircuito máximo soporta el cable en el tiempo de disparo de las protecciones (0,5 s).

$I_{cc} (150\text{mm}^2) = 133 \text{ A/mm}^2 \times 150 \text{ mm}^2 = 19.950 \text{ A} > 2.032 \text{ A}$

La intensidad de cortocircuito es inferior a la admitida por el cable seleccionado.

4. Dimensionamiento cables secundario del transformador

4.1. Cálculo por intensidad de cortocircuito admisible

Los datos de partida utilizados para el cálculo son:

Conductor: Cobre

Aislamiento: Polietileno reticulado (XLPE)

Tiempo de duración de falta: 0,5 segundos

Intensidad de cortocircuito trifásica: 22,442 kA

4.2. Cálculo por intensidad máxima permanente admisible

La intensidad máxima en régimen permanente, dada la carga a la que está sometida este transformados (poco variable), se considera la nominal del equipo, por lo que la intensidad en la línea de alimentación al cuadro de servicios auxiliares será:

$$I = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{315\text{kVA}}{\sqrt{3} \cdot 0,4\text{kV}} = 454,66\text{A}$$

Los factores de corrección utilizados según UNE-211435:2007 y UNE 21144 son:

/ Por disposición de los cables en las bandejas:

- Número máximo de bandejas: 3
- Número máximo de ternas o cables: 9
- Coeficiente de corrección: $C_1 = 0,67$

/ Por variación de temperatura:

- Temperatura máxima: 40°C
- Coeficiente de corrección: $C_2 = 1$

En base a estos coeficientes, la intensidad corregida será:

$$I_c = \frac{I}{C_1 \cdot C_2} = 678,60\text{A}$$

La sección mínima de cable necesaria para la circulación de esta intensidad, según REBT – ITC—BT-07 (Tabla 12), es 1 x 400 mm² de cobre, con una capacidad de 720 A que se considera suficiente. Se instalarán dos conductores de 1 x 240 mm² cuya corriente máxima es 980 A.

Para el conductor de neutro se considera una sección de cobre igual a la sección de fase, dos cables unipolares de 240 mm² cada uno.

4.3. Cálculo por caída de tensión

Los datos de partida considerados son:

- / Temperatura ambiente: 40°C
- / Longitud: 15 m

- / Intensidad: 2 x 490 A (980 A)
- / $\cos\phi$: 0,9
- / Línea:
 - Composición: 2 x 3 [(1 x 240 mm²)] + 2 x (1 x 240 mm²)
 - Tipo: XLPE
 - Tensión: 0,6/1 kV
- / Temperatura máxima del conductor: 90°C
- / Límite caída de tensión: 1,5% (entre secundario de transformador y CGBT)

En base a datos de tablas de fabricante de reconocido prestigio, la caída de tensión con las consideraciones marcadas en los puntos anteriores, dan lugar a una caída de tensión de 0,22 V por amperio y kilómetro de cable por fase de 240 mm² definido.

Por tanto, para una intensidad nominal de 490 A y una longitud de circuito desde el secundario del transformador del que parte hasta la protección general situada en el cuadro de baja tensión (cuadro de servicios auxiliares) sería de:

$0,015 \text{ Km} \times 490 \text{ A} \times 0,22 \text{ V}/(\text{A.Km}) = 1,617 \text{ V}$, lo que en 400 V representa un 0,404 % a plena carga.

4.4. Elección del conductor

En consecuencia, con los cálculos realizados, el tipo de cable elegido para la acometida al CGBT, determinado por la intensidad máxima admisible en régimen permanente será:

3x[2x (1 x 240 mm²) + 2 x (1x 240 mm²)] Cu XLPE 0,6/1kV

5. Instalaciones de puesta a tierra

5.1. Datos de partida

La red de puesta a tierra de la estación soterrada de Anoeta estará formada por dos (2) sistemas independientes entre sí:

- / Red de tierras de protección.
- / Red de tierras de servicio para puesta a tierra del neutro del transformador.

Con lo indicado anteriormente, se pretende garantizar que el sistema de p.a.t. de servicio, no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de baja tensión en el momento en el que se esté disipando un defecto por el sistema de protección.

La difusión de la corriente de puesta a tierra se realizará a través de electrodos situados en el exterior de la estación.

La composición del terreno corresponde a margas calcáreas, con una resistividad, medida por el procedimiento Wenner de $\rho = 150 \Omega.m$.

El diseño preliminar de la instalación de puesta a tierra se realizará basándose en las configuraciones tipo del método de cálculo de instalaciones de puesta a tierra de UNESA, que esté de acuerdo con la forma y dimensiones del Centro de Transformación, según el método de cálculo desarrollado por este organismo.

- / TIERRA DE PROTECCIÓN.

Se conectarán a este sistema las partes metálicas de la instalación que no estén en tensión normalmente pero puedan estarlo a consecuencia de averías o causas fortuitas,

tales como los chasis y los bastidores de los aparatos de maniobra, envolventes metálicas de las cabinas prefabricadas y carcasa del transformador.

/ TIERRA DE SERVICIO.

Se conectará a este sistema el neutro del transformador.

Para mantener los sistemas de puesta a tierra de protección y servicio independientes, aparte de la separación de electrodos, la conexión a los mismos se efectuará con cable aislado de 95 mm² de sección.

Toda la instalación de puesta a tierra estará de acuerdo con el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en Centrales Eléctricas, Subestaciones y Centros de Transformación, Instrucciones técnicas complementarias MIE-RAT 13 y con el Reglamento de Baja Tensión ITC-BT-18.

5.2. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra 13,2 kV

Características de la red de alimentación:

- /** Tensión de servicio: $U_r = 13,2 \text{ kV}$
- /** Intensidad máxima de defecto a tierra, $I_{d\text{máx}}$ (A): 2032 A (Dato aportado más desfavorable en la Estación Bentaberri).
- /** Tiempo máximo de eliminación del defecto (s): 0.5.

Características del terreno:

- /** Resistencia de tierra $R_o = 150 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$.
- /** Resistencia del hormigón $R'o = 3000 \text{ Ohm}$.

TIERRAS DE PROTECCIÓN

Para el cálculo de la resistencia de la puesta a tierra de las masas (R_t), la intensidad y tensión de defecto (I_d , U_d), se utilizarán las siguientes fórmulas:

- /** Resistencia del sistema de puesta a tierra, R_t :

$$R_t = K_r \cdot \rho \ (\Omega)$$

- Intensidad de defecto, I_d :
- Reactancia equivalente de la subestación:

$$X_{LTH} = \frac{1,1 \cdot V}{1,73 \cdot I_{d \text{ máx}}} = \frac{1,1 \cdot 13200}{1,73 \cdot 2032} = 4,13 \ \Omega$$

- Tensión de defecto, U_d :

$$U_d = R_t \cdot I_d \ (V)$$

$$I_d = \frac{1,1 \cdot V}{1,73 \sqrt{R_t^2 + X_{LTH}^2}}$$

El electrodo adecuado para este caso tiene las siguientes propiedades:

- Configuración seleccionada: 8/42
- Geometría: Picas alineadas.
- Profundidad del electrodo (m): 0.8.
- Número de picas: 4.
- Longitud de las picas (m): 2.

Los parámetros característicos del electrodo son:

- De la resistencia, $K_r (\Omega/\Omega\text{m}) = 0,100$.
- De la tensión de paso, $K_p (V/((\Omega\text{m})A)) = 0,0127$.
- De la tensión de contacto exterior, $K_c (V/((\Omega\text{m})A)) = 0$

Para que no aparezcan tensiones de contacto exteriores ni interiores, se adaptan las siguientes medidas de seguridad:

- / Las puertas y rejillas metálicas que dan al exterior del Edificio/s no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar a tensión debido a defectos o averías.
- / En el piso del Centro de Transformación se instalará un mallazo cubierto por una capa de hormigón de 10 cm, conectado a la puesta a tierra del mismo.
- / En el caso de instalar las picas en hilera, se dispondrán alineadas con el frente del edificio.

Sustituyendo valores en las expresiones anteriores, se tiene:

$$R_t = K_r \cdot \rho = 0,100 \cdot 150 = 15 \Omega$$

$$I_d = \frac{1,1 \cdot 13200}{1,73 \sqrt{15^2 + 4,13^2}} = 539,47 \text{ A}$$

$$U_d = R_t \cdot I_d = 15 \cdot 539,47 = 8.092,14 \text{ V}$$

TIERRAS DE SERVICIO

El electrodo adecuado para este CTC tendrá las siguientes propiedades:

- Configuración seleccionada: 5/42.
- Geometría: Picas en hilera.
- Profundidad del electrodo (m): 0.5.
- Número de picas: 4.
- Longitud de las picas (m): 2.
- Separación entre picas (m): 3.
- Los parámetros característicos del electrodo son:
- De la resistencia, $K_r (\Omega/\Omega\text{m}) = 0.104$.

Sustituyendo valores:

$$R_{t\text{NEUTRO}} = K_r \cdot \rho = 0.104 \cdot 150 = 15.6 \Omega.$$

5.3. Sección cable puesta a tierra

Dimensionamos el cable de tierra según RAT-13 apartado 3.1. Según este apartado no se deberá superar la densidad de corriente de 160 A/mm², no adoptándose en ningún caso valores inferiores a 25 mm².

$$S = \frac{2032}{160} = 12,70 \text{ mm}^2$$

Tomamos como sección para el cable de tierras 95 mm² de Cu, por seguir estándar de ETS y además estar del lado de la seguridad.

5.4. Cálculo de las tensiones en el exterior de la instalación

Con el fin de evitar la aparición de tensiones de contacto elevadas en el exterior de la instalación, las puertas y rejillas metálicas que dan al exterior del centro no tendrán contacto eléctrico alguno con masas conductoras que, a causa de defectos o averías, sean susceptibles de quedar sometidas a tensión.

Con estas medidas de seguridad, no será necesario calcular las tensiones de contacto en el exterior, ya que estas serán prácticamente nulas. Por otra parte, la tensión de paso en el exterior vendrá dada por las características del electrodo y la resistividad del terreno según la expresión:

$$U_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0.0127 \cdot 150 \cdot 539,47 = 1.027,69 \text{ V.}$$

5.5. Cálculo de las tensiones en el interior de la instalación

Como medidas complementarias de seguridad y formando una malla equipotencial en el piso del Centro de Transformación, se instalará un mallazo electrosoldado compuesto por redondos de diámetro 5 mm formando una retícula de 150x150 mm y se conectará mediante soldaduras aluminotérmicas a la red de tierras del centro en cuatro puntos, preferiblemente opuestos, cubriéndose con una capa de hormigón de 10 cm como mínimo. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos opuestos de la puesta a tierra de protección del Centro.

Con esta medida se consigue que la persona que deba acceder a una parte que pueda quedar en tensión, de forma eventual, estará sobre una superficie equipotencial, con lo que desaparece el riesgo de la tensión de contacto y de paso interior.

De esta forma no será necesario el cálculo de las tensiones de contacto y de paso en el interior, ya que su valor será prácticamente cero.

Asimismo, la existencia de una superficie equipotencial conectada al electrodo de tierra, hace que la tensión de paso en el acceso sea equivalente al valor de la tensión de defecto.

$$U_p (\text{acc}) = U_d = R_t \cdot I_d = 15 \cdot 539,47 = 8.092,05 \text{ V}$$

5.6. Cálculo de las tensiones aplicadas

Para la obtención de los valores máximos admisibles de la tensión de paso exterior y en el acceso, se utilizan las siguientes expresiones:

$$U_{pa} = 10 \cdot k / t_n \cdot (1 + 6 \cdot \rho / 1000) \text{ V.}$$

$$U_{pa} (\text{acc}) = 10 \cdot k / t_n \cdot (1 + (3 \cdot \rho + 3 \cdot \rho_H) / 1000) \text{ V.}$$

$$t = t' + t'' \text{ s.}$$

Siendo:

- / U_{pa} = Tensión de paso admisible en el exterior, en voltios.
- / $U_{pa} (\text{acc})$ = Tensión en el acceso admisible, en voltios.
- / k, n = Constantes según MIERAT 13, dependen de t .
- / $k=72$ y $n=1$ para tiempos inferiores a 0.9 segundos.
- / t = Tiempo de duración de la falta, en segundos.
- / t' = Tiempo de desconexión inicial, en segundos.
- / t'' = Tiempo de la segunda desconexión, en segundos.
- / ρ = Resistividad del terreno, en Ωm .
- / ρ_H = Resistividad del hormigón, 3000 Ωm .
- / El tiempo de duración de la falta es:
 - $t' = 0,5 \text{ s.}$
 - $t = t' = 0,5 \text{ s.}$

Sustituyendo valores:

$$U_{pa} = 10 \cdot k / t_n \cdot (1 + 6\rho / 1000) = 10 \cdot 72 / 0,51 \cdot (1 + 6 \cdot 150 / 1000) = 1296 \text{ V.}$$

$$U_{pa} (\text{acc}) = 10 \cdot k / t_n \cdot (1 + (3\rho + 3\rho H) / 1000) = 10 \cdot 72 / 0,51 \cdot (1 + (3 \cdot 150 + 3 \cdot 3000) / 1000) = 15.048 \text{ V.}$$

Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente tabla:

Tensión de paso en el exterior y de paso en el acceso

Concepto	Valor calculado	Condición	Valor admisible
Tensión de paso en el exterior	$U_p = 1.027,69 \text{ V.}$	<	$U_{pa} = 1296 \text{ V}$
Tensión de paso en el acceso	$U_p (\text{acc}) = 8.092,05 \text{ V}$	<	$U_{pa} (\text{acc}) = 15.048 \text{ V}$

5.7. Medidas de seguridad adicionales para evitar tensiones de contacto

Para que no aparezcan tensiones de contacto exteriores ni interiores, se adaptan las siguientes medidas de seguridad:

- / Las puertas y rejillas metálicas que dan al exterior del Edificio no tendrán contacto eléctrico con masas conductoras susceptibles de quedar a tensión debido a defectos o averías.
- / En el piso del Centro de Transformación se instalará un mallazo cubierto por una capa de hormigón de 10 cm, conectado a la puesta a tierra del mismo.
- / Cuando con la utilización de un electrodo normalizado, la tensión de paso y contacto resultante sea superior a la tensión de paso y contacto admisible por el ser humano, es preciso recurrir al empleo de medidas adicionales de seguridad como el Sistema de acera perimetral, cuyo objetivo es garantizar que la tensión de paso y contacto admisible sea superior a las resultantes. Es una capa de hormigón seco ($s = 3000 \text{ Ohm.m}$) que se colocará como acera en todo el frontal del Centro de Transformación, con una anchura de 1 m. y un espesor de 10 cms.

5.8. Corrección y ajuste del diseño inicial

Según el proceso de justificación del electrodo de puesta a tierra seleccionado, no se considera necesaria la corrección del sistema proyectado.

No obstante, se puede ejecutar cualquier configuración con características de protección mejores que las calculadas, es decir, atendiendo a las tablas adjuntas al Método de Cálculo de Tierras de UNESA, con valores de "Kr" inferiores a los calculados, sin necesidad de repetir los cálculos, independientemente de que se cambie la profundidad de enterramiento, geometría de la red de tierra de protección, dimensiones, número de picas o longitud de éstas, ya que los valores de tensión serán inferiores a los calculados en este caso.

6. Distancia entre sistemas de puesta a tierra de protección y servicio

Para garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio (neutro) no alcance tensiones elevadas que puedan afectar a las instalaciones de los usuarios, en el

momento en que se esté disipando un defecto por el sistema de protección de tierra (malla de tierra), debe establecerse una separación mínima entre los electrodos más próximos de ambos sistemas, que será función de la resistividad del terreno ($\rho = \text{Ohmios.metro}$) y de la intensidad de defecto (I_d).

$$Dn - p \geq \frac{\rho \cdot I_d}{2000 \cdot \pi} = \frac{150 \cdot 539,47}{2000 \cdot \pi} = 12,88 \text{ m}$$

Siendo:

ρ = Resistividad del terreno en Ωm .

I_d = Intensidad de defecto en A.

Para mantener los sistemas de puesta a tierra de protección y de servicio independientes, la puesta a tierra del neutro se realizará con cable aislado de cobre de 95 mm² 0,6/1 kV, protegido con tubo de PVC de grado de protección 7, como mínimo, contra daños metálicos.