ANEJO 10: CÁLCULOS INSTALACIONES EN ALTA TENSIÓN

ÍNDICE

1	**INTRODUCCIÓN**	**4**
2	**JUSTIFICACIÓN DE LA POTENCIA**	**4**
3	**FÓRMULAS**	**4**
3.1	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE	4
3.2	INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO	4
3.3	POTENCIA A TRANSPORTAR	6
3.4	PÉRDIDA DE POTENCIA	6
3.5	CAÍDA DE TENSIÓN	7
3.6	RESISTENCIA MECÁNICA	7
3.7	VENTILACIÓN DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN	7
3.8	CAMPO MAGNÉTICO	8
3.9	PUESTA A TIERRA	9
4	**CÁLCULO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA**	**11**
5	**CÁLCULOS ELÉCTRICOS DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN**	**11**
6	**CÁLCULO DE EMBARRADO Y PROTECCIONES EN CT**	**16**
6.1	COMPROBACIÓN POR DENSIDAD DE CORRIENTE	16
6.2	COMPROBACIÓN POR SOLICITACIÓN ELECTRODINÁMICA	16
6.3	COMPROBACIÓN POR SOLICITACIÓN TÉRMICA A CORTOCIRCUITO	17
6.4	SELECCIÓN DE LAS PROTECCIONES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN	17
7	**DIMENSIONADO DE LA VENTILACIÓN Y POZO APAGAFUEGOS**	**17**
8	**CÁLCULO DE OBRA CIVIL**	**18**
8.1	ENVOLVENTE PREFABRICADA	18
8.2	ZANJAS PARA CABLEADO DE ALTA TENSIÓN	19
9	**CÁLCULO DE CAMPOS MAGNÉTICOS**	**21**
10	**CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA INSTALACIÓN INTERIOR**	**23**

10.1 CELDAS DE ALTA TENSIÓN 23

10.1.1 Celda de línea con aislamiento y corte en SF6 23

10.1.2 Celda de protección con interruptor automático con aislamiento en SF6 y corte en vacío 25

10.2 TRANSFORMADORES DE MEDIDA CON DOBLE SECUNDARIO 28

11 CÁLCULO DE PUESTA A TIERRA 30

11.1 DETERMINACIÓN DE LAS CORRIENTES MÁXIMAS DE PUESTA A TIERRA Y DEL TIEMPO MÁXIMO CORRESPONDIENTE A LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO 30

11.2 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE TIERRA 30

11.2.1 Tierra de protección 30

11.2.2 Tierra de servicio 31

11.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRA 31

11.3.1 Tierra de protección 31

11.3.2 Tierra de servicio 32

11.4 CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN EL EXTERIOR DE LA INSTALACIÓN 33

11.5 CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN EL INTERIOR DE LA INSTALACIÓN 33

11.6 CÁLCULO DE LAS TENSIONES APLICADAS. 34

11.7 INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSFERIBLES AL EXTERIOR 34

1 INTRODUCCIÓN

En este anejo se recopila toda la información relacionada con la instalación del centro de transformación prefabricado para la planta solar fotovoltaica flotante y sobre las líneas subterráneas de alta tensión para interconectar la misma planta con la red de la propia Comunidad de Regantes.

2 JUSTIFICACIÓN DE LA POTENCIA

La potencia que afecta al diseño de transformadores, cableado y demás aparellaje está determinada por la instalación solar fotovoltaica. La planta está compuesta por 3.200 paneles de 550 Wp haciendo un total de 1.760 kWp.

Por otro lado, la planta está compuesta por 8 inversores de 175 kW. Esto haría un total de 1.400 kW en el lado de la corriente alterna.

3 FÓRMULAS

Para el cálculo de las instalaciones de alta tensión se ha hecho uso del software de cálculos eléctricos DMELECT que diseña las instalaciones acorde al Reglamento de Alta Tensión, Reglamento para Líneas eléctricas de Alta Tensión y el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión.

3.1 INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE

La intensidad máxima admisible en los lados de alta y baja tensión dentro de un transformador se calcula con la siguiente expresión:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U}$$

Donde:

$S(kVA)$: Potencia del transformador

$I(A)$: Intensidad máxima

$U(kV)$: Tensión nominal del primario o secundario del transformador

3.2 INTENSIDAD DE CORTOCIRCUITO

La intensidad de cortocircuito en el lado de alta tensión de un transformador es la siguiente:

$$I_{ccp} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U}$$

Donde:

$S_{cc}(MVA)$: Potencia de cortocircuito en la red

$I_{ccp}(kA)$: Intensidad de cortocircuito primaria

$U(kV)$: Tensión primaria

Por otro lado, la intensidad de cortocircuito en el lado de baja tensión de un transformador se calcula conservadoramente, suponiendo infinita la potencia de cortocircuito en el lado de alta tensión del transformador siendo:

$$I_{ccs} = I_{ns} \cdot \frac{100}{U_{cc}}$$

Donde:

$I_{ns}(A)$: Intensidad nominal secundaria

$I_{ccp}(kA)$: Intensidad de cortocircuito secundaria

$U_{cc}(\%)$: Tensión de cortocircuito del transformador

La intensidad de cortocircuito máxima admisible para un conductor de material aluminio con aislamiento XLPE se calcula con la siguiente expresión:

$$I_{cc} \cdot t = K^2 \cdot S^2 \cdot \ln\left(\frac{\theta_f + \beta}{\theta_i + \beta}\right)$$

Donde:

$I_{cc}(kA)$: Intensidad eficaz máxima de cortocircuito

$t(s)$: Duración del cortocircuito

$S(mm^2)$: Sección nominal

$K(As^{1/2}/mm^2)$: Constante que depende del material del conductor

$\beta(K^{\circ}C)$: Inversa del coeficiente de variación de resistencia con la temperatura del material conductor

$\theta_i(^{\circ}C)$: Temperatura inicial

$\theta_f(ºC)$: Temperatura final

$I_{ccp}(kA)$: Intensidad de cortocircuito secundaria

$U_{cc}(\%)$: Tensión de cortocircuito del transformador

3.3 POTENCIA A TRANSPORTAR

La potencia máxima a transportar por una línea de alta tensión tanto subterránea como aérea es determinada por la siguiente fórmula:

$$P_{max} = \sqrt{3} \cdot U \cdot I_{max} \cdot \cos\varphi$$

Donde:

$P_{max}(kW)$: Potencia máxima a transportar

$U(kV)$: Tensión compuesta de la línea

$I_{max}(A)$: Intensidad máxima real de la instalación

$\cos\varphi$: Factor de potencia

3.4 PÉRDIDA DE POTENCIA

La pérdida de potencia producida en un conductor en una instalación de alta tensión de tipo subterránea o aérea se determina por:

$$\Delta P = 3 \cdot R \cdot L \cdot I_{max}^2$$

Donde:

$\Delta P(W)$: Pérdida de potencia

$I_{max}(A)$: Intensidad máxima real de la instalación

$L\ (km)$: Longitud de la línea

$\cos\varphi$: Factor de potencia

3.5 CAÍDA DE TENSIÓN

Para el cálculo de la caída de tensión que se produce entre dos puntos de un conductor de alta tensión en instalación de tipo aéreo o subterráneo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I_{max} \cdot (R \cdot \cos\varphi + X \cdot \sin\varphi) \cdot L$$

Donde:

$\Delta U(V)$: Caída de tensión compuesta

$I_{max}(A)$: Intensidad máxima real de la instalación

$X\ (\Omega/km)$: Reactancia inductiva por fase

$R\ (\Omega/km)$: Resistencia por fase máximo a 90ºC

φ: Ángulo de fase

$L\ (km)$: Longitud de la línea

3.6 RESISTENCIA MECÁNICA

La resistencia mecánica de los conductores deberá verificar, en caso de cortocircuito que:

$$\sigma_{max} \geq \frac{I_{ccp}^2 \cdot L^2}{60 \cdot d \cdot W}$$

Donde:

$\sigma_{max}\ (kg/cm^2)$: Valor de la carga de rotura de tracción del material conductor

$I_{ccp}(kA)$: Intensidad permanente de cortocircuito trifásico

$L\ (cm)$: Longitud entre apoyos

$d\ (cm)$: Separación entre fases

$W\ (cm^3)$: Módulo resistente de los conductores

3.7 VENTILACIÓN DE CENTRO DE TRANSFORMACIÓN

Para el cálculo de la superficie mínima de las rejillas de entrada de aire en el edificio del centro de transformación, se utiliza la siguiente expresión:

$$S_e = \frac{W_{cu} + W_{fe}}{0{,}24 \cdot k \cdot \sqrt{h \cdot \Delta T^3}}$$

Donde:

S_e (m^2): Superficie mínima de la rejilla de entrada de ventilación del transformador

W_{cu} (kW): Pérdidas en el cobre del transformador

W_{fe} (kW): Pérdidas en el hierro del transformador

k: Coeficiente en función de la forma de las rejillas de entrada de aire

h (m): Distancia vertical entre centros de las rejillas de entrada y salida

ΔT $(ºC)$: Diferencia de temperatura entre el aire de salida y el de entrada

Para el cálculo de la superficie mínima de las rejillas de salida de aire en el edificio del centro de transformación, se utiliza la siguiente expresión:

$$S_s = 1{,}10 \cdot S_e$$

Donde:

S_e (m^2): Superficie mínima de la rejilla de entrada de ventilación del transformador

3.8 CAMPO MAGNÉTICO

El campo magnético (B) generado en el Punto P, será consecuencia del sumatorio de campos magnéticos generados por cada una de las fases del cableado:

$$B_P = \sum B_{P_i} = B_{P_R} + B_{P_S} + B_{P_T}$$

Suponiendo que la corriente está concentrada en el centro del cableado, para cada fase se tiene:

$$B_{P_R} = \mu \cdot \frac{i_R}{2 \cdot \pi \cdot r}$$
$$B_{P_S} = \mu \cdot \frac{i_S}{2 \cdot \pi \cdot d} = \mu \cdot \frac{-i_R}{4 \cdot \pi \cdot d}$$
$$B_{P_T} = \mu \cdot \frac{i_T}{2 \cdot \pi \cdot d} = \mu \cdot \frac{-i_R}{4 \cdot \pi \cdot d}$$

Donde:

$\mu(Tm/A)$: Permeabilidad magnética del vacío $(4 \cdot \pi \cdot 10^{-7})$

$r\ (m)$: Radio de la fase R

$d\ (m)$: Distancia entre el centro de las fases S y T con respecto a P

3.9 PUESTA A TIERRA

La resistencia de puesta a tierra se recoge con la siguiente expresión:

$$R_t = \rho \cdot K_r$$

Donde:

$R_t(\Omega)$: Resistencia de puesta a tierra

$\rho\ (\Omega\mathrm{m})$: Resistividad del terreno

$K_r\ (\Omega/\Omega\mathrm{m})$: Resistencia

La reactancia capacitiva de puesta a tierra se recoge con la siguiente expresión:

$$X_c = \frac{1}{3 \cdot C \cdot w}$$

Donde:

$X_c\ (\Omega)$: Reactancia capacitiva de puesta a tierra

$\omega\ (\mathrm{rad/s})$: Pulsación de la corriente alterna $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$

$C(F)$: Capacidad $C(\mu F) = 0{,}006 \cdot L_a + 0{,}25 \cdot L_b$

Siendo:

$L_a\ (\mathrm{km})$: Longitud de la línea aérea de AT

$L_b\ (\mathrm{km})$: Longitud de la línea subterránea de AT

La intensidad máxima de defecto a tierra se calcula con la siguiente fórmula:

$$I_d = \frac{V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{R_t^2 + X_c^2}}$$

Donde:

I_d (A): Intensidad máxima de defecto a tierra

V (V): Tensión de servicio de la red

R_t (Ω): Resistencia de puesta a tierra

X_c (Ω): Reactancia capacitiva de puesta a tierra

La tensión de defecto se calcula con la siguiente expresión:

$$V_d = I_d \cdot R_t$$

Donde:

V_d (V): Tensión de defecto

I_d (A): Intensidad máxima de defecto a tierra

R_t (Ω): Resistencia de puesta a tierra

Los valores máximos admisibles de la tensión de paso exterior y en el acceso se obtienen con:

$$V_p = 10 \cdot V_{ca} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{ac} + 6 \cdot \rho_S \cdot C_S}{1000}\right)$$
$$U_p^{acc} = 10 \cdot V_{ca} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot R_{ac} + 3 \cdot \rho_S \cdot C_S + 3 \cdot \rho_H \cdot C_H}{1000}\right)$$
$$C_S = 1 - 0{,}106 \cdot \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_S}}{2 \cdot h_s + 0{,}106}$$
$$C_H = 1 - 0{,}106 \cdot \frac{1 - \frac{\rho}{\rho_H}}{2 \cdot h_H + 0{,}106}$$
$$t = t' + t''$$

Donde:

U_p (V): Tensión de paso admisible en el exterior

U_p^{acc} (V): Tensión en el acceso admisible

U_{ca} (V): Tensión de contacto aplicada admisible según ITC-RAT 13 (Tabla 1)

R_{ac} (Ω): Resistencias adicionales, como calzado, aislamiento de la torre, etc

C_s: Coeficiente reductor de la resistencia superficial del suelo

C_H: Coeficiente reductor de la resistencia del hormigón

h_s (m): Espesor de la capa superficial del terreno

h_H (m): Espesor de la capa de hormigón

ρ (Ωm): Resistividad natural del terreno

ρ_S (Ωm): Resistividad superficial del suelo

ρ_H (Ωm): Resistividad del hormigón

t (s): Tiempo de duración de la falta

t' (s): Tiempo de desconexión inicial

t'' (s): Tiempo de la segunda desconexión

4 CÁLCULO DE TRANSFORMADORES DE POTENCIA

Como se ha mencionado anteriormente, los 8 inversores tienen una potencia de 175 kW (Potencia máxima de 185 kVA). Siendo esta la potencia máxima que puede suministrar la planta fotovoltaica a la red.

De cara a seleccionar un transformador para el centro de transformación de la planta fotovoltaica, buscamos que tenga un valor normalizado de potencia para asegurar:

- Precio más competitivo respecto a potencias no normalizadas
- Plazo de entrega más ajustado al poder haber existencias en stock
- Costes de operación y mantenimiento más reducidos al ser de un valor normalizado

Es por ello que, con la premisa anterior y dejando una reserva para futuras ampliaciones de potencia de la planta fotovoltaica, se determina una potencia del transformador de 2.000 kVA.

5 CÁLCULOS ELÉCTRICOS DE LAS LÍNEAS ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN

Desde el centro de transformación de la planta solar fotovoltaica flotante discurrirán dos líneas de alta tensión hasta la arqueta de derivación con el centro de transformación de la estación de bombeo 2. Una de las líneas es la conexión de ambos centros de transformación (línea de entrada) y la otra es la línea de alimentación a la estación de bombeo 1 (línea de salida).

En la arqueta de derivación se dividen ambas líneas, la primera va a entroncar a la celda de línea en el centro de transformación de la estación de bombeo 2. Gracias a esta conectamos la planta fotovoltaica con el resto de la red de alta tensión de la comunidad de regantes.

La segunda línea continua paralela al vallado hasta buscar la línea subterránea existente que une el centro de transformación del bombeo 2 con la estación de bombeo 1 que discurre en línea subterránea. En el punto de encuentro de instalará una arqueta de empalme donde se unirán ambas líneas para dar servicio desde la planta fotovoltaica al bombeo 1.

El cableado seleccionado presenta las siguientes características:

DATOS TÉCNICOS

CARACTERÍSTICAS DIMESIONALES

1 x SECCIÓN CONDUCTOR (Al) / SECCIÓN PANTALLA (Cu) (mm²)	Ø NOMINAL AISLAMIENTO* (mm)	ESPESOR AISLAMIENTO* (mm)	Ø NOMINAL EXTERIOR* (mm)	ESPESOR CUBIERTA* (mm)	PESO* (kg/km)	RADIO DE CURVATURA ESTÁTICO (POSICIÓN FINAL) (mm)	RADIO DE CURVATURA DINÁMICO (DURANTE TENDIDO) (mm)
12/20 kV							
1 x 95/16	23,3	5,5	31	2,5	1020	465	620
1 x 150/16	26,2	5,5	34	2,5	1250	510	680
1 x 240/16	30,4	5,5	38	2,5	1620	570	760
1 x 400/16	35,6	5,5	4,3	2,5	2200	650	866
12/20 kV							
1 x 95/16	28,3	8,0	36	2,5	1270	540	720
1 x 150/16	31,2	8,0	39	2,5	1500	585	780
1 x 240/16	35,4	8,0	43	2,5	1910	645	860
1 x 400/16	40,6	8,0	48,3	2,5	2510	725	966

(*) Valores aproximados (sujetos a tolerancias propias de fabricación).

CARACTERÍSTICAS DIMESIONALES

	12/20 kV	18/30 kV
Tensión nominal simple, Uo (kV)	12	18
Tensión nominal entre fases, U (kV)	20	30
Tensión máxima entre fases, Um (kV)	24	36
Tensión a impulsos, Up (kV)	125	170
Temperatura máxima admisible en el conductor en servicio permanente (°C)	90	
Temperatura máxima admisible en el conductor en régimen de cortocircuito (°C)	250	

1 x SECCIÓN CONDUCTOR (Al) / SECCIÓN PANTALLA (Cu) (mm²)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE BAJO TUBO Y ENTERRADO* (A)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE DIRECTAMENTE ENTERRADO* (A)	INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE AL AIRE** (A)	INTENSIDAD MÁXIMA DE CORTOCIRCUITO EN EL CONDUCTOR DURANTE 1 s (A)	INTENSIDAD MÁXIMA DE CORTOCIRCUITO EN LA PANTALLA DURANTE 1 s*** (A)
	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV	12/20 kV y 18/30 kV (pant, 16 mm²)
1 x 95/16	190	205	255	8930	3130
1 x 150/16	245	260	335	14100	3130
1 x 240/16	320	345	455	22560	3130
1 x 400/16	415	445	610	37600	3130

(*) Condiciones de instalación: una terna de cables enterrado a 1 m de profundidad, temperatura de terreno 25 °C y resistividad térmica 1,5 K-m/W.
(**) Condiciones de instalación: una terna de cables al aire (a la sombra) a 40 °C.
(***) Calculado de acuerdo con la norma IEC 60949.

Las condiciones generales de la red empleadas para el diseño eléctrico de alta tensión son:

Tensión de línea	20.000 V
Caída de tensión máxima	5 %
Factor de potencia	0,8
Coeficiente de simultaneidad	1

Para el cálculo de los cables a instalar hay que cumplir con el Reglamento de Líneas eléctricas de Alta Tensión donde se especifica la caída máxima de tensión, intensidad máxima admisible del conductor e intensidad de cortocircuito.

El resultado de cálculo para las diferentes ramas y nudos son:

Nudo Orig.	Nudo Dest.	Long. (m)	Metal/ Xu (mΩ/m)	Canal.	Designación	Polar.	I. Cálculo (A)	Sección (mm2)	D.tubo (mm)	I. Admisi. (A)/Fci
CT FV	Arqueta de empalme	247	Al/0,15	En.B.Tu.	RHZ1 12/20 H16	Unip.	57,74	3x150	175	196/0,8
CT FV	CT EB2	173	Al/0,15	En.B.Tu.	RHZ1 12/20 H16	Unip.	36,08	3x150	175	196/0,8

Nudo	C.d.t. (V)	Tensión Nudo (V)	C.d.t. (%)	Carga Nudo
CT FV	0	20.000	0	93,819 A(3.250 kVA)
Arqueta de empalme	6,106	19.993,895	0,031*	-57,735 A(-2.000 KVA)

CT EB2	2,65	19.997,35	0,013	-36,084 A(-1.250 KVA)

NOTA:

- * Nudo de mayor c.d.t.

Caída de tensión total en los distintos itinerarios:

CT FV-Arqueta de empalme = 0.03 %

CT FV-CT EB2 = 0.01 %

Las pérdidas de potencia activa son:

Linea	Nudo Orig.	Nudo Dest.	Pérdida Potencia Activa Rama.3RI²(kW)	Pérdida Potencia Activa Total Itinerario.3RI²(kW)
1	CT FV	Arqueta de empalme	0,485	0,485
2	CT FV	CT EB2	0,131	0,131

Según la configuración de la red, se obtienen los siguientes resultados del cálculo a cortocircuito. En ausencia de datos sobre la potencia de cortocircuito presente en la instalación existente, se ha considerado un valor conservador de modo que no se vea comprometida la solución técnica:

Scc = 500 MVA.

U = 20 kV.

tcc = 0,5 s.

IpccM = 14.433,76 A.

Linea	Nudo Orig.	Nudo Dest.	Sección (mm2)	Icccs (A)
1	CT FV	Arqueta de empalme	3x150	19.940,41
2	CT FV	CT EB2	3x150	19.940,41

Cálculo de Cortocircuito en Pantallas:

Datos generales:

Ipcc en la pantalla = 1.000 A.

Tiempo de duración c.c. en la pantalla = 1 s.

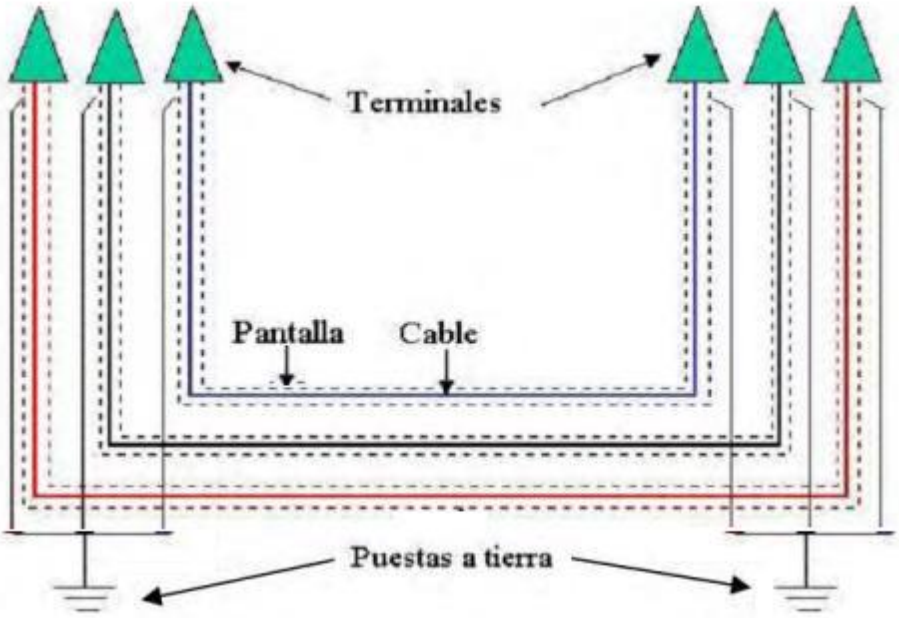
Resultados:

Sección pantalla = 16 mm².

Icc admisible en pantalla = 3.130 A.

Conexionado de las pantallas para el cableado de alta tensión:

Las pantallas de los cables de alta tensión se conectarán directamente a tierra en sus extremos (solid bonding), como se indica en la siguiente figura.



6 CÁLCULO DE EMBARRADO Y PROTECCIONES EN CT

Las características del embarrado seleccionado son:

Intensidad asignada: 400 A

Límite térmico (1 s): 12.5 kA eficaces

Límite electrodinámico: 31.25 kA cresta

Por lo tanto, dicho embarrado debe soportar la intensidad nominal sin superar la temperatura de régimen permanente (comprobación por densidad de corriente), así como los esfuerzos electrodinámicos y térmicos que se produzcan durante un cortocircuito.

6.1 COMPROBACIÓN POR DENSIDAD DE CORRIENTE

La comprobación por densidad de corriente tiene por objeto verificar que el conductor que constituye el embarrado es capaz de conducir la corriente nominal máxima sin sobrepasar la densidad de corriente máxima en régimen permanente. Dado que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas conforme a la normativa vigente, se garantiza lo indicado para la intensidad asignada de 400 A.

6.2 COMPROBACIÓN POR SOLICITACIÓN ELECTRODINÁMICA

Dado que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas conforme a la normativa vigente se garantiza el cumplimiento de la expresión anterior.

6.3 COMPROBACIÓN POR SOLICITACIÓN TÉRMICA A CORTOCIRCUITO

Puesto que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas conforme a la normativa vigente, se garantiza que:

$$I_{th} \geq 12{,}5\ kA\ durante\ 1s$$

6.4 SELECCIÓN DE LAS PROTECCIONES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN

Los transformadores están protegidos tanto en AT como en BT. En alta tensión, la protección la efectúan las celdas asociadas a esos transformadores, y en baja tensión la protección se incorpora en los cuadros de BT.

La protección del transformador en AT de este CT se realiza utilizando una celda de interruptor automático dotado de relé electrónico con captadores toroidales de intensidad por fase y rodeando las tres fases, cuya señal alimentará a un disparador electromecánico liberando el dispositivo de retención del interruptor y así efectuar la protección a sobrecargas, cortocircuito y homopolar. Asimismo, contará con señal externa de un termómetro para protección propia por elevación de temperatura.

En el circuito de baja tensión del transformador según RU6302 se instalará un Cuadro de Distribución de 8 salidas con posibilidad de extensionamiento. Se instalarán interruptores generales automáticos con diferencial en todas las salidas, con una intensidad nominal igual al valor de la intensidad exigida a esa salida, y un poder de corte mayor o igual a la corriente de cortocircuito en el lado de baja tensión.

La descarga del trafo al cuadro de Baja Tensión se realizará con conductores XLPE 0,6/1kV 240 mm2 Al unipolares instalados al aire cuya intensidad admisible a 40ºC de temperatura ambiente es de 390 A.

Para el trafo, cuya potencia es de 2000 kVA se emplearán 4 conductores por fase.

7 DIMENSIONADO DE LA VENTILACIÓN Y POZO APAGAFUEGOS

Para la renovación del aire en el interior del CT, se establecen huecos de ventilación (Rejillas) que permitan la admisión de aire frío del exterior, situándose estos en la parte inferior. La evacuación del aire caliente, (en virtud de su menor densidad) se efectuará mediante salidas situadas en la parte superior del CT.

En el apartado 3 se describen las fórmulas necesarias para calcular la sección mínima de la rejilla de ventilación de entrada y de salida. Siendo cada uno de los parámetros:

$W_{cu}\ (kW)$: Pérdidas en el cobre del transformador = 15 kW

$W_{fe}\ (kW)$: Pérdidas en el hierro del transformador = 1,305 kW

k: Coeficiente en función de la forma de las rejillas de entrada de aire = 0.5

$h\ (m)$: Distancia vertical entre centros de las rejillas de entrada y salida = 1 m

$\Delta T\ (^{\circ}C)$: Diferencia de temperatura entre el aire de salida y el de entrada = 15ºC

Dando como resultado de superficie mínima de la rejilla de entrada de ventilación del transformador:

$$S_e = 2{,}34\ m^2$$

Puesto que se utiliza un edificio prefabricado en este proyecto que ha sufrido ensayos de homologación en cuanto al dimensionado de la ventilación forzada del centro de transformación, se consideran correctas para la potencia instalada.

La ventilación es de tipo forzada con extractor interior y rejillas. Las rejillas de ventilación están formadas por lamas en forma de "V" invertida, diseñadas para formar un laberinto que evita la entrada de agua de lluvia en el Centro de Transformación y se complementa cada rejilla interiormente con una malla mosquitera.

La envolvente estará provista de un sistema de recogida de los aceites que, eventualmente, pueda escapar del transformador. Se habilitará en el fondo un espacio capaz de alojar el volumen total del líquido dieléctrico del transformador. Dicho foso dispondrá de un sistema cortafuegos compuesto por un lecho de gijarros.

El transformador proyectado de 2.000 kVA tiene un volumen máximo de líquido dieléctrico de 1.208 L. Por otro lado, el depósito existente en el centro prefabricado proyectado tiene un volumen de 645 L por lo que podrá alojar perfectamente el lecho de gijarros y la totalidad del volumen del líquido dieléctrico.

8 CÁLCULO DE OBRA CIVIL

8.1 ENVOLVENTE PREFABRICADA

La obra civil necesaria para la instalación de la envolvente prefabricada del centro de transformación consiste en la excavación de un foso que permita su estabilidad y nivelación sobre el terreno.

Al existir un terreno con una dureza inferior a 1 kg/cm^2, en la base del foso es necesario disponer una placa de hormigón armado con un espesor mínimo de 100 mm, sobre la que se debe distribuir homogéneamente a regla, una capa de arena de 50 mm de espesor.

Medida	Identificador	Valor
Losa de hormigón	1	100 mm
Capa de arena de nivelación	2	50 mm

Longitud de excavación	a	6.880 mm
Profundidad de excavación	b	560 mm
Espesor de la capa de arena	c	50 mm

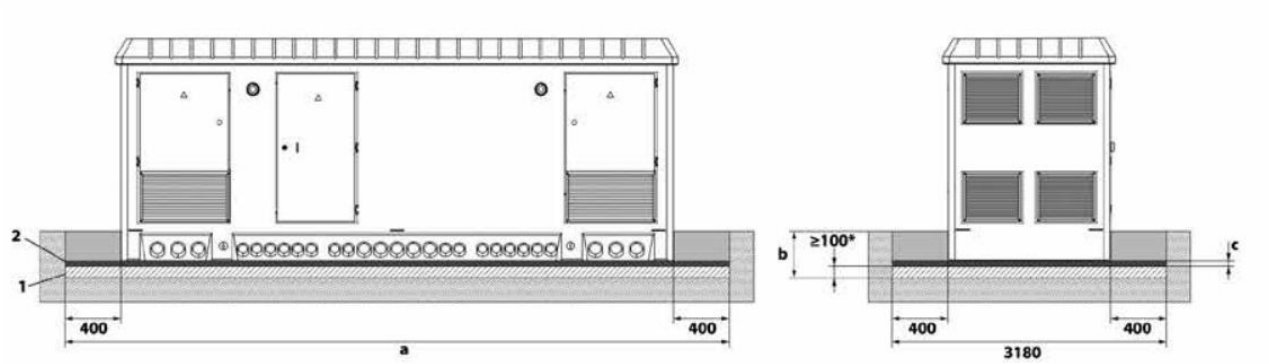


Ilustración 1: Dimensiones de excavación de envolvente prefabricada

8.2 ZANJAS PARA CABLEADO DE ALTA TENSIÓN

Para la distribución del cableado de alta tensión desde el centro de transformación de la planta fotovoltaica se hace uso de instalación enterrada bajo tubo. Según el diámetro y la cantidad de cables que se plantea trasladar, se seleccionan unos diámetros de tubo y zanjas diferentes. En todas las situaciones se ha reservado un tubo extra para futuras ampliaciones de la planta fotovoltaica.

Para la distribución del cableado desde el centro de transformación hasta la arqueta de derivación con el centro de transformación EB2 y la línea subterránea de alta tensión de la EB1, se hace uso de la zanja tipo 4.

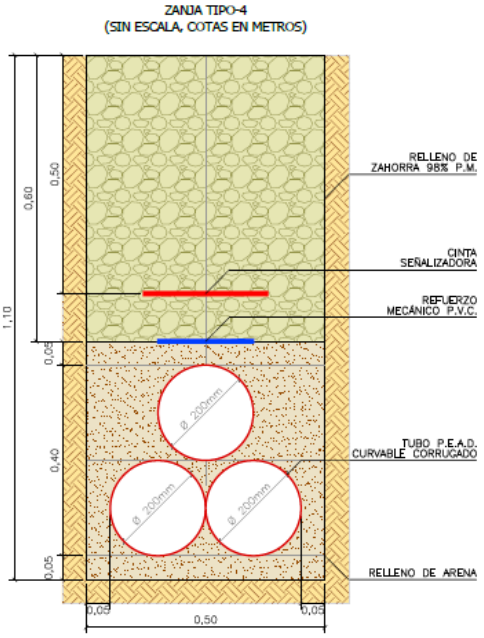


Ilustración 2: Zanja tipo 4

Para la distribución del cableado de alta tensión desde la arqueta de distribución hasta el centro de transformación EB2 y hasta la arqueta de empalme con la línea subterránea de alta tensión existente que va a EB1, hacemos uso de la zanja tipo 5.

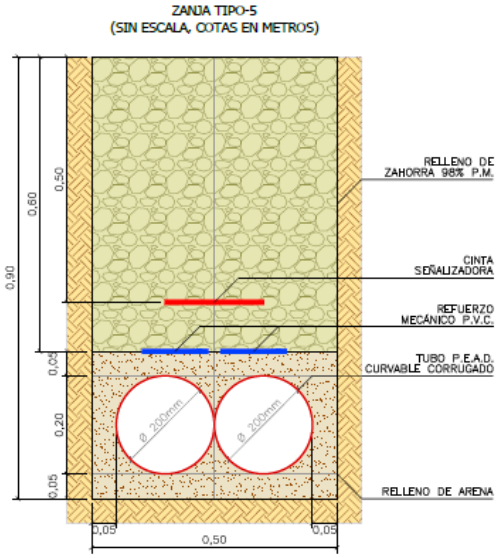


Ilustración 3: Zanja tipo 5

9 CÁLCULO DE CAMPOS MAGNÉTICOS

El campo magnético generado por las diferentes corrientes eléctricas depende de la intensidad que discurre por los diferentes tipos de cableado.

El Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre, por el que se aprueba el Reglamento que establece condiciones de protección del dominio público radioeléctrico, restricciones a las emisiones radioeléctricas y medidas de protección sanitaria frente a emisiones radioeléctricas regula los niveles de campos magnéticos permitidos.

En el Anexo II, apartado 3.1 se recogen los límites de campos magnéticos admitido. Para una frecuencia de 50 Hz, el límite de campo es de 100 µT.

Gama de frecuencia	Intensidad de campo E (V/m)	Intensidad de campo H (A/m)	Campo B (µT)	Densidad de potencia equivalente de onda plana (W/m²)
0-1 Hz		$3{,}2 \times 10^4$	4×10^4	
1-8 Hz	10.000	$3{,}2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^4/f^2$	
8-25 Hz	10.000	4.000/f	5.000/f	
0,025-0,8 kHz	250/f	4/f	5/f	
0,8-3 kHz	250/f	5	6,25	
3-150 kHz	87	5	6,25	
0,15-1 MHz	87	0,73/f	0,92/f	
1-10 MHz	$87/f^{1/2}$	0,73/f	0,92/f	
10-400 MHz	28	0,073	0,092	2
400-2.000 MHz	$1{,}375\ f^{1/2}$	$0{,}0037\ f^{1/2}$	$0{,}0046\ f^{1/2}$	f/200
2-300 GHz	61	0,16	0,20	10

El puente de cables de baja tensión del transformador tiene la siguientes características:

- Tipo: 4(3x240)/2(240) mm2 Al XLPE 0,6/1 kV
- Nº de ternas: 1 (cable por fase)
- Intensidad máxima del cable: 390 A
- Diámetro del cable: 28,3 mm

El campo magnético producido por la fase R es:

$$B_{P_R} = \mu \cdot \frac{i_R}{2 \cdot \pi \cdot r} = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \cdot \frac{390}{2 \cdot \pi \cdot 0{,}0141} = 5.531{,}91\ \mu T$$

Para el cálculo de los campos magnéticos producidos por la fase S y T hay que calcular la distancia entre el punto P y el centro del conductor de cada fase. Haciendo trigonometría, el resultado es:

$$d = \sqrt{\left(\sqrt{D^2 - r^2} + r\right)^2 + r^2} = 0{,}0417\ m$$

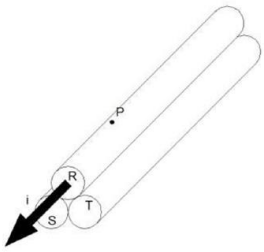


Ilustración 4: Campo magnético en el punto P

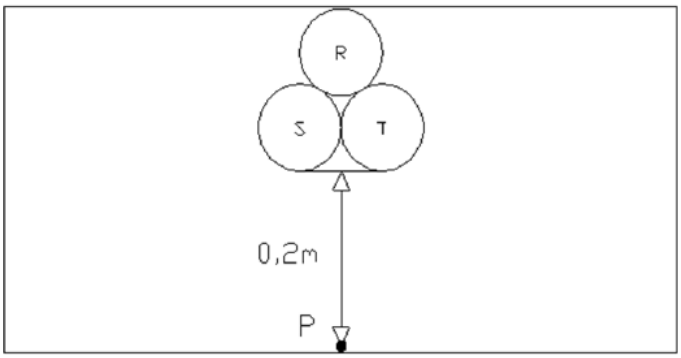
El resultado del campo magnético es:

$$B_{P_S} = B_{P_T} = \mu \cdot \frac{-i_R}{4 \cdot \pi \cdot d} = -935.25\ \mu T$$

El campo magnético total es:

$$B_P = \sum B_{P_i} = 3.661{,}41\ \mu T$$

Este campo magnético es superior al máximo permitido de $100\ \mu T$. Ahora probamos a calcular el campo magnético a una distancia de 0,2 metros.



Las nuevas distancias desde el punto P de medida hasta el centro de cada conductor son:

$$d_R = \sqrt{D^2 - r^2} + r + 0{,}2 = 0{,}239\ m$$
$$d_S = \sqrt{(0{,}2 + r)^2 + r^2} = 0{,}2146\ m$$
$$d_S = \sqrt{(0{,}2 + r)^2 + r^2} = 0{,}2146\ m$$

Resultando ser los campos magnéticos:

$$B_{P_R} = 326{,}3\ \mu T$$
$$B_{P_S} = -181{,}73\ \mu T$$
$$B_{P_T} = -181{,}73\ \mu T$$

Resultando un campo magnético total de:

$$B_P = \sum B_{P_i} = -37{,}16\ \mu T$$

Resulta ser menor al límite de 100 µT por lo que cumple el Real Decreto 1066/2001, de 28 de septiembre.

10 CÁLCULO ELÉCTRICO DE LA INSTALACIÓN INTERIOR

10.1 CELDAS DE ALTA TENSIÓN

En el interior del centro de transformación se ubican las celdas de alta tensión que realizan la protección y maniobra de conexión entre la red de la Comunidad de Regantes y el transformador de la planta fotovoltaica.

En total hay ubicadas dos celdas de línea y una celda de protección. Las celdas de línea realizan la conexión del centro de transformación de la fotovoltaica con el centro de transformación de la estación de bombeo 2 y con la línea subterránea de alta tensión. Por otro lado, la celda de protección se encarga de proteger el transformador de 2.000 kVA de la planta fotovoltaica.

10.1.1 Celda de línea con aislamiento y corte en SF6

La celda de Alta Tensión modular de entrada/salida de cables tiene las siguientes características particulares:

Tensión asignada (Ur)	24 kV
Intensidad asignada	400 A
Intensidad de corta duración (Ik)	16 kA eficaz / 40 kA cresta 1s
Clase IAC AF/AFL	16 kA 1s

A nivel constructivo, presenta compartimentos individuales con separación metálica de embarrado – interruptor, de conexión de cables con pasatapas frontales con las 3 fases a la misma altura, mecanismo de maniobras, con esquema sinóptico del circuito principal en la cubierta, y expansión de gases inferior trasera.

Interruptor trifásico categoría E3 (5 CC) según norma IEC 60265-1 de corte en gas SF6 de 3 posiciones conectado – seccionado – puesto a tierra con seccionador de puesta a tierra categoría E2 (5 CC) de capacidad de cierre sobre cortocircuito según norma IEC 62271-102. Ambas secuencias, interruptor y seccionador, ensayadas sobre un mismo elemento.

Mecanismo de maniobra operado mediante palanca, velocidad de accionamiento independiente del operador, manual tipo B con endurancia para el interruptor de clase M1, 1000 maniobras, según norma IEC / UNE-EN 60265-1. Intercambiable en obra en cualquier posición del interruptor sin necesidad de cortar servicio, incorporando elemento de sujeción del interruptor con el mecanismo retirado condenable por candado.

Indicación de posición segura del interruptor (ensayo de cadena cinemática según IEC 62271-102).

3 Pasatapas de 630 A, tipo C, según norma EN 50181 para conexión mediante terminales atornillables.

Conjunto de Unión formado por 3 adaptadores elastoméricos con control del campo eléctrico.

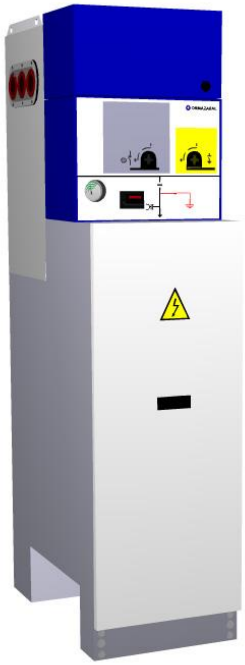


Ilustración 5: Celda de línea

A nivel de seguridad presenta los siguientes sistemas:

- Indicador luminoso autoalimentado de presencia de tensión ekorVPIS de acuerdo a norma IEC 61958.
- Alarma sonora autoalimentada de prevención de puesta a tierra ekorSAS que se activa cuando habiendo tensión eléctrica en la acometida de Alta Tensión, se introduce la palanca en el acceso al eje de accionamiento del seccionador de puesta a tierra. Rango de funcionamiento de acuerdo a IEC 61958.
- Protección de personas y bienes ante los efectos de un arco interno, según los criterios del Anexo A de la norma IEC 62271-200 en todos los compartimentos clase IAC AFL.

Sus características físicas son:

Dimensiones (AltoxAnchoxFondo)	1.740x365x735 mm
Peso	100 kg

10.1.2 Celda de protección con interruptor automático con aislamiento en SF6 y corte en vacío

Celda de Alta Tensión modular de interruptor automático con las siguientes características particulares:

Tensión asignada (Ur)	24 kV
Intensidad asignada	400 A
Intensidad de corta duración (Ik)	16 kA eficaz / 40 kA cresta 1s

A nivel constructivo, presenta compartimentos individuales con separación metálica de embarrado – seccionador / interruptor automático, de conexión de cables con pasatapas frontales con las 3 fases a la misma altura, mecanismo de maniobras, con esquema sinóptico del circuito principal en la cubierta, y expansión de gases inferior trasera. Seccionador de puesta a tierra categoría E2 (5 CC) de capacidad de cierre sobre cortocircuito según norma IEC 62271-102.

Interruptor automático trifásico de corte en vacio según norma IEC 62271-100, secuencia nominal CO - 15 s – CO. Endurancia eléctrica a intensidad asignada de 2000 maniobras y 30 CC (50% DC).

Mecanismo de maniobra de seccionador operado mediante palanca, velocidad de accionamiento independiente del operador, manual tipo B con endurancia para el seccionador de 2000 maniobras, según norma IEC 62271-102. Intercambiable en obra en cualquier posición sin necesidad de cortar servicio, incorporando elemento de sujeción del seccionador con el mecanismo retirado condenable por candado.

Mecanismo de maniobra de interruptor automático accionado por resortes operado mediante botonera frontal y carga de muelles mediante palanca, manual tipo AV con bobinas de apertura y cierre. Endurancia M1, 2000 maniobras, según norma IEC / UNE-EN 62271-100.

Ilustración 6: Celda de protección

Unidad de protección integrada en la celda ekorRPG con display digital para tarado / consulta local y comunicable (RS232 para configuración local, RS485 y fibra óptica opcional). Funciones de protección 50/51 + 50N/51N y disparo mediante señal externa. Incluye captadores de intensidad instalados en los pasatapas de la celda.

Indicación de posición segura (ensayo de cadena cinemática según IEC 62271-102). 3 Pasatapas apantallados tipo C, según norma EN 50181 para conexión mediante terminales atornillables. Conjunto de Unión formado por 3 adaptadores elastoméricos con control del campo eléctrico.

A nivel de seguridad presenta los siguientes sistemas:

- Cerradura de enclavamiento en seccionador de p.a.t. en cerrado
- Indicador luminoso autoalimentado de presencia de tensión ekorVPIS de acuerdo a norma IEC 61958
- Protección de personas y bienes ante los efectos de un arco interno, según los criterios del Anexo A de la norma IEC 62271-200 en todos los compartimentos clase IAC AFL.

Sus características físicas son:

Dimensiones (AltoxAnchoxFondo)	1.740x480x845 mm
Peso	240 kg

La unidad de Protección ekorRPG, incluída en celda de automático está desarrollada para su aplicación en la función de protección general o transformadores de gran potencia. Aporta a la protección de fusibles protección contra sobrecargas y defectos fase-tierra de bajo valor. Es autoalimentado a partir de 5 A a través de transformadores de intensidad toroidales, comunicable y configurable por software con histórico de disparos.

Sus características son:

- Rango de potencias: hasta 15000 kVA
- Funciones de Protección:
- Sobreintensidad
- Fases (3 x 50/51)
- Neutro (50N / 51N)
- Neutro Sensible (50Ns / 51Ns) (s/modelo)
- Disparo exterior: Función de protección (49T)
- Detección de faltas a tierra desde 0,5 A
- Posibilidad de pruebas por primario y secundario
- Configurable por software (RS-232) y comunicable (RS-485)
- Histórico de disparos
- Medidas de intensidad: I1, I2, I3 e Io
- Contacto de salida para Test

Los elementos que incluye son:

- Relé electrónico que dispone en su carátula frontal de teclas y display digital para realizar el ajuste y visualizar los parámetros de protección, medida y control. Para la comunicación dipone de un puerto frontal RS232 y en la parte trasera un puerto RS485 protocolo MODBUS (5 kV).
- Los sensores de intensidad son transformadores toroidales que tienen una relación de 1000 A / 1 A ó 300 A / 1 A. Para la opción de protección homopolar ultrasensible se coloca un toroidal adicional que abarca las tres fases. En el caso de que el equipo sea autoalimentado (desde 5 A por fase) se debe colocar 1 sensor adicional por fase.
- La tarjeta de de alimentación acondiciona la señal de los transformadores de autoalimentación y la convierte en una señal de CC para alimentar el relé de forma segura. Dispone de una entrada de 230 Vca para alimentación auxiliar exterior con un nivel de aislamiento de 10 kV.
- El disparador biestable es un actuador electromecánico de bajo consumo integrado en el mecanismo de maniobra del interruptor.

Así mismo este producto cumple con la directiva de la Unión Europea sobre compatibilidad electromagnética 89/336/EEC y con la CEI 60255. Esta conformidad es resultado de un ensayo realizado según el artículo 10 de la directiva, y recogido en el protocolo B131-01-69-EE acorde a las normas genéricas EN 50081 y EN 50082.

10.2 TRANSFORMADORES DE MEDIDA CON DOBLE SECUNDARIO

Los transformadores de tensión y de intensidad empleado en instalaciones de alta tensión se encargan de reducir los valores de tensión y de intensidad del punto de la red a los que están conectados a valores proporcionables y manejables para los equipos de medida. También permite separar el circuito de alta tensión de los instrumentos a los que estén conectados.

Ilustración 7: Transformadores de tensión y de intensidad

El sistema antivertido de la planta fotovoltaica proyectada se plantea con medidas en las celdas de medida del centro de transformación existente junto a la balsa nº 2. Esto permitirá conocer la transferencia de energía que existe por las dos líneas aéreas que conectar el centro de seccionamiento con la Comunidad de Regantes.

Para permitir este sistema se plantea la sustitución de los tres transformadores de tensión y de los tres de intensidad de cada una de las dos celdas de medida. El nuevo equipo incluye doble secundario para poder permitir la conexión de los vatímetros del sistema antivertido a los transformadores.

Las características del nuevo transformador de tensión con doble secundario son:

Tensión nominal	24 kV

Relación de transformación	22000:√3 / 110:√3 -110:3
Potencia y clase de precisión para medida	30 VA – 50 VA cl. 0.5
Potencia y clase de precisión para protección	50 VA 3P

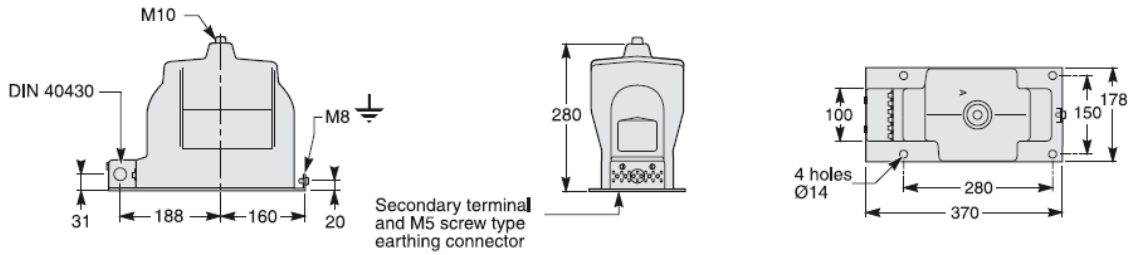


Ilustración 8: Medidas del transformador de tensión

Las características del nuevo transformador de intensidad con doble secundario son:

Relación de transformación	400 / 5-5
Corriente térmica de corta duración	40
Potencia/Precisión/Seguridad para medida	15 VA cl. 0.5 Fs < 10
Potencia/Precisión para protección	15 VA 5P10 - 7.5 VA 5P20

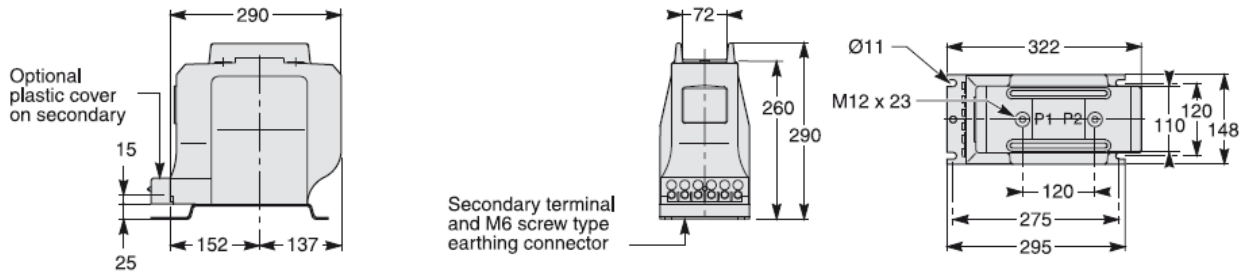


Ilustración 9: Medidas del transformador de intensidad

11 CÁLCULO DE PUESTA A TIERRA

11.1 DETERMINACIÓN DE LAS CORRIENTES MÁXIMAS DE PUESTA A TIERRA Y DEL TIEMPO MÁXIMO CORRESPONDIENTE A LA ELIMINACIÓN DEL DEFECTO

En instalaciones de Alta Tensión de tercera categoría los parámetros de la red que intervienen en los cálculos de faltas a tierras son:

Tipo de neutro

El neutro de la red puede estar aislado, rígidamente unido a tierra, o a través de impedancia (resistencia o reactancia), lo cual producirá una limitación de las corrientes de falta a tierra.

Tipo de protecciones en el origen de la línea

Cuando se produce un defecto, éste es eliminado mediante la apertura de un elemento de corte que actúa por indicación de un relé de intensidad, el cual puede actuar en un tiempo fijo (relé a tiempo independiente), o según una curva de tipo inverso (relé a tiempo dependiente).

Asimismo, pueden existir reenganches posteriores al primer disparo que sólo influirán en los cálculos si se producen en un tiempo inferior a 0,5 s.

Según los datos de la red proporcionados por la compañía suministradora, se tiene:

- Intensidad máxima de defecto a tierra (Inicial), Idmáx (A): 300.
- Duración de la falta.

Desconexión inicial:

Tiempo máximo de eliminación del defecto (s): 0.7.

11.2 DISEÑO DE LA INSTALACIÓN DE TIERRA

Para los cálculos a realizar se emplearán los procedimientos del "Método de cálculo y proyecto de instalaciones de puesta a tierra para centros de transformación de tercera categoría", editado por UNESA.

11.2.1 Tierra de protección

Se conectarán a este sistema las partes metálicas de la instalación que no estén en tensión normalmente, pero pueden estarlo por defectos de aislamiento, averías o causas fortuitas, tales como chasis y bastidores

de los aparatos de maniobra, envolventes metálicas de las cabinas prefabricadas y carcasas de los transformadores.

11.2.2 Tierra de servicio

Se conectarán a este sistema el neutro del transformador y la tierra de los secundarios de los transformadores de tensión e intensidad de la celda de medida.

Para la puesta a tierra de servicio se utilizarán picas en hilera de diámetro 14 mm. y longitud 2 m., unidas mediante conductor desnudo de Cu de 50 mm2 de sección. El valor de la resistencia de puesta a tierra de este electrodo deberá ser inferior a 37 Ω.

La conexión desde el centro hasta la primera pica del electrodo se realizará con cable de Cu de 50 mm2, aislado de 0,6/1 kV bajo tubo plástico con grado de protección al impacto mecánico de 7 como mínimo.

11.3 CÁLCULO DE LA RESISTENCIA DEL SISTEMA DE TIERRA

Las características de la red de alimentación son:

Tensión de servicio (U)	20.000 V
Nivel de aislamiento de las instalaciones de Baja Tensión (Ubt)	10.000 V
Resistividad del terreno	150 Ωm
Resistividad del hormigón	3.000 Ωm

11.3.1 Tierra de protección

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 0,30x0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos opuestos a la tierra de protección del centro.

Dicho mallazo estará cubierto por una capa de hormigón de 10 cm como mínimo. Las puertas y rejillas metálicas que dan al exterior del centro no tendrán contacto eléctrico alguno con masa conductoras que, a causa de defectos o averías, sean susceptibles de quedar sometidas a tensión.

El electrodo adecuado para este caso tiene las siguientes propiedades:

Configuración seleccionada	70-30/5/42
Geometría	Anillo
Dimensiones	7x3 m
Profundidad del electrodo	0.5 m
Número de picas	4
Longitud de picas	2 m

Los parámetros característicos del electrodo son:

· De la resistencia, Kr (Ω/ Ω xm) = 0.081.

· De la tensión de paso, Kp (V/((Ω xm)A)) = 0.0178.

· De la tensión de contacto exterior, Kc (V/((Ω xm)A)) = 0.0391.

Sustituyendo valores en las expresiones anteriores, se tiene:

$Rt = Kr \cdot \rho = 0.081 \cdot 150 = 12.15\ \Omega$.

$Id = Idmáx = 300$ A.

$UE = Rt \cdot Id = 12.15 \cdot 300 = 3645$ V.

11.3.2 Tierra de servicio

El electrodo adecuado para este caso tiene las siguientes propiedades:

Configuración seleccionada	5/32
Geometría	Picas en hilera
Profundidad del electrodo	0,5 m
Número de picas	3

Longitud de picas	2 m
Separación entre picas	3 m

Los parámetros característicos del electrodo son:

$$K_r = 0{,}135\ \Omega/\Omega m$$
$$R_{t_{Neutro}} = K_r \cdot \rho = 0{,}135 \cdot 150 = 20{,}25\ \Omega$$

11.4 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:

$$V_p' = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0{,}0178 \cdot 150 \cdot 300 = 801\ V$$

11.5 CÁLCULO DE LAS TENSIONES EN EL INTERIOR DE LA INSTALACIÓN

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 0,30x0,30 m. Este mallazo se conectará como mínimo en dos puntos opuestos de la puesta a tierra de protección del Centro. Dicho mallazo estará cubierto por una capa de hormigón de 10 cm. como mínimo.

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 contacto exterior.

$$V_p'(acc) = K_c \cdot \rho \cdot I_d = 0{,}0391 \cdot 150 \cdot 300 = 1759{,}5\ V$$

11.6 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 expresiones definidas en el apartado de fórmulas.

Up = 10 · Uca · (1 + (2 · Rac + 6 · ρs · Cs) / 1000) = 10 · 165.2 · (1 + (2 · 2000 + 6 · 150 · 1) / 1000) = 9746.8 V.

Up (acc) = 10 · Uca · (1 + (2 · Rac + 3 · ρs · Cs + 3 · ρH · CH) / 1000) =10 · 165.2 · (1 + (2 · 2000 + 3 · 150 · 1 + 3 · 3000 · 0.67) / 1000) = 18978.56 V.

Cs = 1 - 0,106 · [(1 - ρ / ρs) / (2 · hs + 0,106)] = 1 - 0,106 · [(1 - 150 / 150) / (2 · 0.1 + 0,106)] = 1

CH = 1 - 0,106 · [(1 - ρ / ρH) / (2 · hH + 0,106)] = 1 - 0,106 · [(1 - 150 / 3000) / (2 · 0.1 + 0,106)] = 0.67

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 = 801 V.	≤	Up = 9746.8 V.
Tensión de paso en el acceso	U'p (acc) = 1759.5 V.	≤	Up (acc) = 18978.56 V.

Tensión e intensidad de defecto

Concepto	Valor calculado	Condición	Valor admisible
Aumento del potencial de tierra	U_E = 3645 V.	≤	Ubt = 10000 V.
Intensidad de defecto	Id = 300 A.	>	

11.7 INVESTIGACIÓN DE LAS TENSIONES TRANSFERIBLES AL EXTERIOR

Al no existir medios de transferencia de tensiones al exterior no se considera necesario un estudio para su reducción o eliminación.

No obstante, para garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio (u otras puestas a tierra para instalaciones en baja tensión) no alcance tensiones elevadas cuando se produce un defecto, existirá una distancia de separación mínima (Dn-p), entre los electrodos de los sistemas de puesta a tierra de protección y de servicio.

$$D_n \cdot p \geq \frac{\rho \cdot I_d}{2000 \cdot \pi} = \frac{150 \cdot 300}{2000 \cdot \pi} = 7{,}16\ m$$

La conexión desde el centro hasta la primera pica del electrodo de servicio se realizará con cable de Cu de 50 mm2, aislado de 0,6/1 kV bajo tubo plástico con grado de protección al impacto mecánico de 7 como mínimo.

Albacete, septiembre de 2022.

MARTINEZ CORCOLES JESUS JOSE - 44379469A

Firmado digitalmente por MARTINEZ CORCOLES JESUS JOSE - 44379469A
Fecha: 2022.09.29 16:36:44 +02'00'

El Ingeniero Técnico Industrial

Jesús J. Martínez Córcoles

Colegiado nº 545-AB