



3. INTALACIÓN ELÉCTRICA DE MEDIA TENSIÓN

3.1. INTENSIDADES NOMINALES

3.1.1. En el lado de alta

La intensidad primaria en un sistema trifásico está dada por la expresión:

$$I_p = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_p}$$

Donde:

I_p = Intensidad primaria, en A.

P = Potencia en kVA de los transformadores.

U_p = Tensión primaria, en kV.

La potencia total instalada en este centro de transformación es de **3.600 kVA**, y la tensión de alimentación es de **20 kV**, por lo que, la intensidad en el lado de alta será de **103.92 A**.

3.1.2. En el lado de baja

La intensidad en el secundario de un transformador trifásico viene dada por la siguiente expresión:



$$I_s = \frac{P - W_{fe} - W_{cu}}{\sqrt{3} \cdot U_s}$$

Donde:

I_s	=	Intensidad secundaria, en A.
P	=	Potencia del transformador, en kVA
W_{fe}	=	Pérdidas en el hierro, en kW
W_{cu}	=	Pérdidas en el cobre, en kW
U_s	=	Tensión en el secundario, en kV

El centro de transformación consta de 3 transformadores:

Trafo 1: La potencia es de **1.000 kVA** y las pérdidas son de **1.700 W** en el núcleo y **10.500 W** en los arrollamientos. La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que podrá circular una intensidad nominal de hasta **1.420 A**.

Trafo 2: La potencia es de **1.000 kVA** y las pérdidas son de **1.700 W** en el núcleo y **10.500 W** en los arrollamientos. La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que podrá circular una intensidad nominal de hasta **1.420 A**.

Trafo 3: La potencia es de **1.600 kVA** y las pérdidas son de **2.720 W** en el núcleo y **16.800 W** en los arrollamientos. La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que podrá circular una intensidad nominal de hasta **2.280 A**.



3.2. INTENSIDADES DE CORTOCIRCUITO

3.2.1. En el lado de alta

Determinamos el valor de Intensidad de cortocircuito en el lado de alta según la siguiente expresión:

$$I_{ccp} = \frac{P_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

Donde:

I_{ccp} = Intensidad de cortocircuito, en kA.

P_{cc} = Potencia de cortocircuito de la red, en MVA.

U_n = Tensión nominal en el lado de alta, en kV.

La tensión de alimentación al centro de transformación es de **20 kV**, y la potencia de cortocircuito, según datos de la compañía, es de **500 MVA**, por lo que, en caso de cortocircuito, circulará una intensidad de **14,43 kA**.

3.2.2. En el lado de baja

La intensidad de cortocircuito en el secundario de un transformador trifásico viene determinada por la siguiente expresión:

$$I_{ccs} = \frac{P}{\sqrt{3} \frac{U_{cc}}{100} \cdot U_s}$$

Donde:



I_{ccs} = Intensidad de cortocircuito secundaria, en kA.

P = Potencia del transformador, en kVA.

U_{cc} = Tensión de cortocircuito del transformador, en %.

U_s = Tensión secundaria, en V.

El centro de transformación consta de 3 transformadores:

Trafo 1: La potencia es de **1.000 kVA** y la tensión de cortocircuito del **6,0 %**.
La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que circulará una intensidad en caso de cortocircuito de **24,06 kA**.

Trafo 2: La potencia es de **1.000 kVA** y la tensión de cortocircuito del **6,0 %**.
La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que circulará una intensidad en caso de cortocircuito de **24,06 kA**.

Trafo 3: La potencia es de **1.600 kVA** y la tensión de cortocircuito del **6,0 %**.
La tensión en el secundario es de **400 V**, por lo que circulará una intensidad en caso de cortocircuito de **38.49 kA**.

3.3. DIMENSIONADO DEL EMBARRADO

No será necesario realizar los cálculos teóricos ni las hipótesis de comportamiento de las celdas, pues éstas son sometidas a ensayos en fábrica que certifican los valores indicados en las placas de características.



3.3.1. Comprobación por densidad de corriente.

La comprobación por densidad de corriente tiene como objeto verificar que no se supera la máxima densidad de corriente admisible por el elemento conductor cuando por el circule una corriente igual a la corriente nominal máxima.

Para las celdas modelo SM6 seleccionadas para este proyecto se ha obtenido la correspondiente certificación que garantiza cumple con la especificación citada mediante el protocolo de ensayo 51249139XA realizado por VOLTA.

3.3.2. Comprobación por sollicitación electrodinámica.

La comprobación por sollicitación electrodinámica tiene como objeto verificar que los elementos conductores de las celdas incluidas en este proyecto son capaces de soportar el esfuerzo mecánico derivado de un defecto de cortocircuito entre fase.

Para las celdas modelo SM6 seleccionadas para este proyecto se ha obtenido la correspondiente certificación que garantiza cumple con la especificación citada mediante el protocolo de ensayo 51249068XA realizado por VOLTA.

El ensayo garantiza una resistencia electrodinámica de 40kA.

3.3.3. Comprobación por sollicitación térmica. Sobreintensidad térmica admisible.



La comprobación por sollicitación térmica tiene como objeto comprobar que por motivo de la aparición de un defecto o cortocircuito no se producirá un calentamiento excesivo del elemento conductor principal de las celdas que pudiera así dañarlo.

Para las celdas modelo SM6 seleccionadas para este proyecto se ha obtenido la correspondiente certificación que garantiza cumple con la especificación citada mediante el protocolo de ensayo 51249068XA realizado por VOLTA.

El ensayo garantiza una resistencia térmica de 16kA 1 segundo.

Según cálculos justificados en esta memoria, el cortocircuito en las celdas podría llegar a ser de 14,43 kA eficaces y 39,08 kA cresta. Dadas estas condiciones, las celdas seleccionadas para este centro de transformación satisfacen las características exigidas:

- Intensidad nominal: 400 A.
- Límite térmico 1 s.: 16 kA eficaces.
- Límite electrodinámico: 40 kA cresta.

3.4. PROTECCIÓN DE LAS INSTALACIONES

3.4.1. Protección en el lado de alta



En los siguientes apartados se justifica la elección de los diferentes dispositivos de protección que llevarán instaladas las celdas del centro de transformación.

3.4.1.1.- PROTECCIÓN GENERAL

Esta celda incorporará un interruptor automático que proporcionará protección ante sobrecargas, faltas a tierra, y cortocircuitos. El poder de corte será tal que permita cortar el circuito ante un eventual cortocircuito, es decir, será de un valor superior a la intensidad de cortocircuito calculada.

En este caso, dada una tensión de 20 kV, y una intensidad de cortocircuito de 14,43 kA, las características del interruptor automático serán las siguientes:

Tensión nominal: 24 kV.

Intensidad nominal: 400 A.

Poder de corte: 16 kA.

Poder de cierre: 40 kA.

3.4.1.2.- PROTECCIÓN TRAFO 1

Esta celda incorporará tres fusibles del alto poder de ruptura, y baja disipación térmica, para protección contra eventuales cortocircuitos. Estos fusibles se seleccionarán para asegurar un funcionamiento continuado a la intensidad de servicio, evitar el disparo durante el arranque en vacío de los transformadores, o cuando se produzcan sobreintensidades de 10 a 20 veces la nominal durante un periodo de tiempo muy corto.



En este caso, dada una tensión de servicio de 20 kV, y una intensidad de servicio de 28,87 A, los fusibles a instalar en esta celda tendrán una tensión nominal de **24 kV**, y un calibre de **63 A**.

3.4.1.3.- PROTECCIÓN TRAFO 2

Esta celda incorporará tres fusibles del alto poder de ruptura, y baja disipación térmica, para protección contra eventuales cortocircuitos. Estos fusibles se seleccionarán para asegurar un funcionamiento continuado a la intensidad de servicio, evitar el disparo durante el arranque en vacío de los transformadores, o cuando se produzcan sobreintensidades de 10 a 20 veces la nominal durante un periodo de tiempo muy corto.

En este caso, dada una tensión de servicio de 20 kV, y una intensidad de servicio de 28,87 A, los fusibles a instalar en esta celda tendrán una tensión nominal de **24 kV**, y un calibre de **63 A**.

3.4.1.4.- PROTECCIÓN TRAFO 3

Esta celda incorporará tres fusibles del alto poder de ruptura, y baja disipación térmica, para protección contra eventuales cortocircuitos. Estos fusibles se seleccionarán para asegurar un funcionamiento continuado a la intensidad de servicio, evitar el disparo durante el arranque en vacío de los transformadores, o cuando se produzcan sobreintensidades de 10 a 20 veces la nominal durante un periodo de tiempo muy corto.

En este caso, dada una tensión de servicio de 20 kV, y una intensidad de servicio de 46,24 A, los fusibles a instalar en esta celda tendrán una tensión nominal de **24 kV**, y un calibre de **80 A**.



3.4.2. Protección general en el cuadro de baja tensión

Cada línea de salida en baja tensión estará protegida por un interruptor automático de calibre suficiente para conducir la intensidad nominal, y de poder de corte superior a la intensidad de cortocircuito.

El centro de transformación consta de 3 transformadores:

Trafo 1: La tensión en el secundario será de 400 V, la intensidad nominal de 1.426,2 A, y la intensidad de cortocircuito de 24,06 kA. Dadas estas condiciones, se instalará un interruptor automático de **400 V, 1.600 A y 25 kA** de poder de corte.

Trafo 2: La tensión en el secundario será de 400 V, la intensidad nominal de 1.426,2 A, y la intensidad de cortocircuito de 24,06 kA. Dadas estas condiciones, se instalará un interruptor automático de **400 V, 1.600 A y 25 kA** de poder de corte.

Trafo 3: La tensión en el secundario será de 400 V, la intensidad nominal de 2.280 A, y la intensidad de cortocircuito de 38.49 kA. Dadas estas condiciones, se instalará un interruptor automático de **400 V, 2.580 A y 40 kA** de poder de corte.



3.5. VENTILACIÓN

El centro de transformación dispondrá de rejillas de entrada y salida para la renovación del aire por ventilación natural. Para calcular la superficie total de las rejillas de entrada de aire tomaremos la siguiente expresión:

$$S = 1,1 \cdot \frac{6,3 \cdot W_p}{\sqrt{h \cdot \Delta T^3}} m^2$$

Donde:

S = Superficie útil del orificio de entrada, en m².

W_p = Pérdidas totales de los transformadores, en kW.

ΔT = Diferencia de temperatura de entrada y salida del aire, en °C (valores normales entre 10 y 15°C).

h = Distancia vertical entre el centro del orificio de salida de aire al centro del transformador, en m.

En nuestro caso, tendremos unas pérdidas totales de 36.600 W en los transformadores, y tomaremos 1,0 metros como distancia vertical entre el centro del orificio de salida y el centro del transformador, y 10°C de diferencia entre las temperaturas de salida y entrada. Dadas estas circunstancias, obtendremos una superficie para las rejillas de entrada de **7,29 m²**.

Las rejillas de salida tendrán una superficie total de un 10% mayor que las de entrada, por lo que su valor será de **8,02 m²**



Cuando sea necesario utilizar la extracción forzada, se hará hacia una zona de servicio, mediante un extractor que no rebase los 35 dB. de nivel de ruido. El extractor se parará automáticamente en el caso de incendio, para lo cual se instalará un detector autónomo de incendios, o se hará a través de la central de incendios general del edificio. El caudal de aire necesario por segundo para absorber las pérdidas de los transformadores, será:

$$Q = \frac{860 \cdot W_p}{0,3 \cdot \Delta T} \text{ m}^3/\text{h} \approx \frac{W_p}{116 \cdot \Delta T} \text{ m}^3/\text{s}$$

Donde:

Q = Caudal de aire a renovar.

W_p = Pérdidas totales de los transformadores, en kW.

ΔT = Aumento de temperatura admitido en el aire (máximo 20°C).

Las pérdidas totales en los transformadores ascenderán a 36.600 W, y consideraremos una diferencia de temperatura de 10°C, por lo que resultará un caudal de **10.492,0 m³/h** = **2,914 m³/s**.



3.6. POZO APAGAFUEGOS

Al utilizar técnica de transformador encapsulado en resina epoxy, no es necesario disponer de un foso para la recogida de aceite, al no existir éste.

3.7. CÁLCULO DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.

3.7.1. Investigación de las características del suelo.

Según la investigación previa del terreno donde se instalará este Centro de Transformación, se determina una resistividad media superficial = 50 ohm/m.

3.7.2. Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y tiempo máximo correspondiente de eliminación de defecto.

Según los datos de la red proporcionados por la compañía suministradora (Compañía Sevillana de Electricidad (C.S.E.)), el tiempo máximo de eliminación del defecto es de 1 s. Los valores de K y n para calcular la tensión máxima de contacto aplicada según MIE-RAT 13 en el tiempo de defecto proporcionado por la Compañía son:

$$K = 78.5 \text{ y } n = 0.18.$$



Por otra parte, los valores de la impedancia de puesta a tierra del neutro, corresponden a:

$$R_n = 40 \, \Omega \text{ y } X_n = 0 \, \Omega. \text{ con}$$

$$|Z_n| = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}$$

La intensidad máxima de defecto se producirá en el caso hipotético de que la resistencia de puesta a tierra del Centro de Transformación sea nula. Dicha intensidad será, por tanto igual a:

$$I_d(\text{máx}) = \frac{U_{s\text{max}}}{\sqrt{3} * Z_n}$$

donde $U_{s\text{max}} = 20000 \text{ V}$

con lo que el valor obtenido es $I_d = 288.68 \text{ A}$, valor que la Compañía redondea a 300 A .

3.7.3. Diseño preliminar de la instalación de tierra.

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 carcasas de los transformadores.



Para los cálculos a realizar emplearemos las expresiones y procedimientos según el "Método de cálculo y proyecto de instalaciones de puesta a tierra para centros de transformación de tercera categoría", editado por UNESA, conforme a las características del centro de transformación objeto del presente cálculo, siendo, entre otras, las siguientes:

Para la tierra de protección optaremos por un sistema de las características que se indican a continuación:

- Identificación: código 5/32 del método de cálculo de tierras de UNESA.

- Parámetros característicos:

$$K_r = 0.135 \frac{\Omega}{(\Omega \cdot m)}.$$

$$K_p = 0.0252 \frac{V}{(\Omega \cdot m \cdot A)}.$$

- Descripción:

Estará constituida por 3 picas en hilera unidas por un conductor horizontal de cobre desnudo de 50 mm² de sección.

Las picas tendrán un diámetro de 14 mm. y una longitud de 2.00 m. Se enterrarán verticalmente a una profundidad de 0.5 m. y la separación entre cada pica y la siguiente será de 3.00 m. Con esta configuración, la longitud de conductor desde la primera pica a la última será de 6 m., dimensión que tendrá que haber disponible en el terreno.

Nota: se pueden utilizar otras configuraciones siempre y cuando los parámetros K_r y K_p de la configuración escogida sean inferiores o iguales a los indicados en el párrafo anterior.



La conexión desde el Centro hasta la primera pica se realizará con cable de cobre aislado de 0.6/1 kV protegido contra daños mecánicos.

TIERRA DE SERVICIO.

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

Las características de las picas serán las mismas que las indicadas para la tierra de protección. La configuración escogida se describe a continuación:

- Identificación: código 5/32 del método de cálculo de tierras de UNESA.

- Parámetros característicos:

$$K_r = 0.135 \, \Omega / (\Omega \cdot m).$$

$$K_p = 0.0252 \, V / (\Omega \cdot m \cdot A).$$

- Descripción:

Estará constituida por 3 picas en hilera unidas por un conductor horizontal de cobre desnudo de 50 mm² de sección.

Las picas tendrán un diámetro de 14 mm. y una longitud de 2.00 m. Se enterrarán verticalmente a una profundidad de 0.5 m. y la separación entre cada pica y la siguiente



será de 3.00 m. Con esta configuración, la longitud de conductor desde la primera pica a la última será de 6 m., dimensión que tendrá que haber disponible en el terreno.

Nota: se pueden utilizar otras configuraciones siempre y cuando los parámetros K_r y K_p de la configuración escogida sean inferiores o iguales a los indicados en el párrafo anterior.

La conexión desde el Centro hasta la primera pica se realizará con cable de cobre aislado de 0.6/1 kV protegido contra daños mecánicos.

El valor de la resistencia de puesta a tierra de este electrodo deberá ser inferior a 37 ohm. Con este criterio se consigue que un defecto a tierra en una instalación de Baja Tensión protegida contra contactos indirectos por un interruptor diferencial de sensibilidad 650 mA., no ocasione en el electrodo de puesta a tierra una tensión superior a 24 Voltios ($=37 \times 0,650$).

Existirá una separación mínima entre las picas de la tierra de protección y las picas de la tierra de servicio a fin de evitar la posible transferencia de tensiones elevadas a la red de Baja Tensión. Dicha separación está calculada en el apartado 2.8.8.

3.7.4. Cálculo de la resistencia del sistema de tierras.

TIERRA DE PROTECCIÓN.



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

- Resistencia del sistema de puesta a tierra, R_t :

$$R_t = K_r \cdot \rho .$$

- Intensidad de defecto, I_d :

$$I_d = \frac{U_{\max} V}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{(R_n + R_t)^2 + X_n^2}}$$

donde $U_{\max} = 20000$

- Tensión de defecto, U_d :

$$U_d = I_d \cdot R_t .$$

Siendo:

$$\rho = 50 \, \Omega \cdot \text{m}.$$

$$K_r = 0.135 \, \Omega / (\Omega \cdot \text{m}).$$

se obtienen los siguientes resultados:

$$R_t = 6.8 \, \Omega$$

$$I_d = 246.99 \, \text{A}.$$



$$U_d = 1667.2 \text{ V.}$$

El aislamiento de las instalaciones de baja tensión del C.T. deberá ser mayor o igual que la tensión máxima de defecto calculada (U_d), por lo que deberá ser como mínimo de 2000 Voltios.

De esta manera se evitará que las sobretensiones que aparezcan al producirse un defecto en la parte de Alta Tensión deterioren los elementos de Baja Tensión del centro, y por ende no afecten a la red de Baja Tensión.

Comprobamos asimismo que la intensidad de defecto calculada es superior a 100 Amperios, lo que permitirá que pueda ser detectada por las protecciones normales.

TIERRA DE SERVICIO.

$$R_t = K_r * \square = 0.135 * 50 = 6.8 \square.$$

que vemos que es inferior a 37 \square .

3.7.5. 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 de ventilación 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.

Los muros, entre sus paramentos tendrán una resistencia de 100.000 ohmios como mínimo (al mes de su realización).

Con estas medidas de seguridad, no será necesario calcular las tensiones de contacto en el exterior, ya que éstas serán prácticamente nulas.

Por otra parte, la tensión de paso en el exterior vendrá determinada por las características del electrodo y de la resistividad del terreno, por la expresión:

$$U_p = K_p \cdot \rho \cdot I_d = 0.0252 \cdot 50 \cdot 246.99 = 311.2 \text{ V.}$$

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

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



En el caso de existir en el paramento interior una armadura metálica, ésta estará unida a la estructura metálica del piso.

Así pues, no será necesario el cálculo de las tensiones de paso y contacto en el interior de la instalación, puesto que su valor será prácticamente nulo.

No obstante, y según el método de cálculo empleado, la existencia de una malla equipotencial conectada al electrodo de tierra implica que la tensión de paso de acceso es equivalente al valor de la tensión de defecto, que se obtiene mediante la expresión:

$$U_p \text{ acceso} = U_d = R_t * I_d = 6.8 * 246.99 = 1667.2 \text{ V.}$$

3.7.7. Cálculo de las tensiones aplicadas.

La tensión máxima de contacto aplicada, en voltios, que se puede aceptar, según el reglamento MIE-RAT, será:

$$U_{ca} = \frac{K}{t^n}$$

Siendo:

U_{ca} = Tensión máxima de contacto aplicada en Voltios.

$K = 78.5.$



$$n = 0.18.$$

$$t = \text{Duración de la falta en segundos: } 1 \text{ s}$$

obtenemos el siguiente resultado:

$$U_{ca} = 78.5 \text{ V}$$

Para la determinación de los valores máximos admisibles de la tensión de paso en el exterior, y en el acceso al Centro, emplearemos las siguientes expresiones:

$$U_{p(\text{exterior})} = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{6 * \sigma}{1.000} \right)$$

$$U_{p(\text{acceso})} = 10 \frac{K}{t^n} \left(1 + \frac{3 * \sigma + 3 * \sigma h}{1.000} \right)$$

Siendo:

U_p = Tensiones de paso en Voltios.

$$K = 78.5.$$

$$n = 0.18.$$

$$t = \text{Duración de la falta en segundos: } 1 \text{ s}$$

\square = Resistividad del terreno.

$\square h$ = Resistividad del hormigón = 3.000 $\square.m$

obtenemos los siguientes resultados:

$$U_{p(\text{exterior})} = 1020.5 \text{ V}$$

$$U_{p(\text{acceso})} = 7967.8 \text{ V}$$



Así pues, comprobamos que los valores calculados son inferiores a los máximos admisibles:

- en el exterior:

$$U_p = 311.2 \text{ V.} < U_{p(\text{exterior})} = 1020.5 \text{ V.}$$

- en el acceso al C.T.:

$$U_d = 1667.2 \text{ V.} < U_{p(\text{acceso})} = 7967.8 \text{ V.}$$

3.7.8. Investigación de tensiones transferibles al exterior.

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

No obstante, con el objeto de garantizar que el sistema de puesta a tierra de servicio no alcance tensiones elevadas cuando se produce un defecto, existirá una distancia de separación mínima $D_{\text{mín}}$, entre los electrodos de los sistemas de puesta a tierra de protección y de servicio, determinada por la expresión:

$$D_{\text{mín}} = \frac{\sigma * I_d}{2.000 * \pi}$$

con:

$$\sigma = 50 \text{ } \Omega \cdot \text{m.}$$

$$I_d = 246.99 \text{ A.}$$



obtenemos el valor de dicha distancia:

$$D_{\min} = 1.97 \text{ m.}$$

3.7.9. Corrección y ajuste del diseño inicial estableciendo el definitivo.

No se considera necesario la corrección del sistema proyectado. No obstante, si el valor medido de las tomas de tierra resultara elevado y pudiera dar lugar a tensiones de paso o contacto excesivas, se corregirían estas mediante la disposición de una alfombra aislante en el suelo del Centro, o cualquier otro medio que asegure la no peligrosidad de estas tensiones.