# ANEXO DE CALCULOS

## Centro de Transformación interior de Abonado - Aulario Jerez

**ÍNDICE**


1. INTENSIDAD EN ALTA TENSIÓN.

2. INTENSIDAD EN BAJA TENSIÓN.

3. CORTOCIRCUITOS.

    3.1. Observaciones.
    3.2. Cálculo de corrientes de cortocircuito.
    3.3. Cortocircuito en el lado de alta tensión.
    3.4. Cortocircuito en el lado de baja tensión.

4. DIMENSIONADO DEL EMBARRADO.

    4.1. Comprobación por densidad de corriente.
    4.2. Comprobación por solicitación electrodinámica.
    4.3. Comprobación por solicitación térmica a cortocircuito.

5. SELECCIÓN DE LAS PROTECCIONES DE ALTA Y BAJA TENSIÓN.

6. DIMENSIONADO DE LA VENTILACIÓN DEL CENTRO DE TRANSFORMACIÓN.

7. DIMENSIONADO DEL POZO APAGAFUEGOS.

8. CÁLCULO DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.

    8.1. Investigación de las características del suelo.
    8.2. Determinación de las corrientes máximas de puesta a tierra y del tiempo máximo correspondiente a la eliminación del defecto.
    8.3. Diseño de la instalación de tierra.
    8.4. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.
    8.5. Cálculo de las tensiones en el exterior de la instalación.
    8.6. Cálculo de las tensiones en el interior de la instalación.
    8.7. Cálculo de las tensiones aplicadas.
    8.8. Investigación de las tensiones transferibles al exterior.
    8.9. Corrección del diseño inicial.

Se seguirá el índice general establecido:

**1. INTENSIDAD EN ALTA TENSIÓN.**

En un transformador trifásico la intensidad del circuito primario Ip viene dada por la expresión:

$$Ip = S / (1{,}732 \cdot Up) \quad ; \quad \text{siendo:}$$

S = Potencia del transformador en kVA.
Up = Tensión compuesta primaria en kV.
Ip = Intensidad primaria en A.

Sustituyendo valores:

| Transformador | Potencia (kVA) | Up (kV) | Ip (A) |
|---|---|---|---|
| trafo 1 | 1000 | 20 | 28.87 |

**2. INTENSIDAD EN BAJA TENSIÓN.**

En un transformador trifásico la intensidad del circuito secundario Is viene dada por la expresión:

$$Is = (S \cdot 1000) / (1{,}732 \cdot Us) \quad ; \quad \text{siendo:}$$

S = Potencia del transformador en kVA.
Us = Tensión compuesta secundaria en V.
Is = Intensidad secundaria en A.

Sustituyendo valores:

| Transformador | Potencia (kVA) | Us (V) | Is (A) |
|---|---|---|---|
| trafo 1 | 1000 | 400 | 1443.42 |

**3. CORTOCIRCUITOS.**

**3.1. Observaciones.**

Para el cálculo de la intensidad primaria de cortocircuito se tendrá en cuenta una potencia de cortocircuito de 500 MVA en la red de distribución, dato proporcionado por la Cía suministradora.

**3.2. Cálculo de corrientes de cortocircuito.**

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito utilizaremos las siguientes expresiones:

- Intensidad primaria para cortocircuito en el lado de Alta Tensión:

$$Iccp = Scc / (1{,}732 \cdot Up) \quad ; \quad \text{siendo:}$$

Scc = Potencia de cortocircuito de la red en MVA.
Up = Tensión compuesta primaria en kV.
Iccp = Intensidad de cortocircuito primaria en kA.

- Intensidad secundaria para cortocircuito en el lado de Baja Tensión (despreciando la impedancia de la red de Alta Tensión):

$$Iccs = (100 \cdot S) / (1{,}732 \cdot Ucc\,(\%) \cdot Us) \quad ; \quad \text{siendo:}$$

S = Potencia del transformador en kVA.
Ucc (%) = Tensión de cortocircuito en % del transformador.
Us = Tensión compuesta en carga en el secundario en V.
Iccs = Intensidad de cortocircuito secundaria en kA.

**3.3. Cortocircuito en el lado de Alta Tensión.**

Utilizando las expresiones del apartado 3.2.

| Scc (MVA) | Up (kV) | Iccp (kA) |
|---|---|---|
| 500 | 20 | 14.43 |

**3.4. Cortocircuito en el lado de Baja Tensión.**

Utilizando las expresiones del apartado 3.2.

| Transformador | Potencia (kVA) | Us (V) | Ucc (%) | Iccs (kA) |
|---|---|---|---|---|
| trafo 1 | 1000 | 400 | 6 | 24.06 |

**4. DIMENSIONADO DEL EMBARRADO.**

Las características del embarrado son:
Intensidad asignada : 400 A.
Límite térmico, 1 s. : 16 kA eficaces.
Límite electrodinámico : 40 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.

**4.1. 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 por Orma-SF6 conforme a la normativa vigente, se garantiza lo indicado para la intensidad asignada de 400 A.

**4.2. Comprobación por solicitación electrodinámica.**

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

$$\sigma máx \geq ( Iccp^2 \cdot L^2 ) / ( 60 \cdot d \cdot W ), \quad \text{siendo:}$$

$\sigma máx$ = Valor de la carga de rotura de tracción del material de los conductores. Para cobre semiduro 2800 Kg / $cm^2$.
Iccp = Intensidad permanente de cortocircuito trifásico, en kA.
L = Separación longitudinal entre apoyos, en cm.
d = Separación entre fases, en cm.
W = Módulo resistente de los conductores, en $cm^3$.

Dado que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas por Orma-SF6 conforme a la normativa vigente se garantiza el cumplimiento de la expresión anterior.

**4.3. Comprobación por solicitación térmica a cortocircuito.**

La sobreintensidad máxima admisible en cortocircuito para el embarrado se determina:

$$Ith = \alpha \cdot S \cdot \sqrt{(\Delta T / t)}, \quad \text{siendo:}$$

Ith = Intensidad eficaz, en A.
$\alpha$ = 13 para el Cu.
S = Sección del embarrado, en $mm^2$.
$\Delta T$ = Elevación o incremento máximo de temperatura, 150ºC para Cu.
t = Tiempo de duración del cortocircuito, en s.

Puesto que se utilizan celdas bajo envolvente metálica fabricadas por Orma-SF6 conforme a la normativa vigente, se garantiza que:

$Ith \geq 16$ kA durante 1 s.

**5. 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.

**Protección general en AT.**

La protección general 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 tripolar (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, cortocircuitos y homopolar.

**Protección en Baja Tensión.**

El Cuadro General de Baja Tensión albergará un interruptor automático magnetotérmico en la llegada del trafo al cuadro, del tipo extraíble de bastidor abierto de 1600A.

La descarga del trafo al cuadro de Baja Tensión se realizará con conductores XLPE 0,6/1kV 240 $mm^2$ Cu unipolares instalados al aire cuya intensidad admisible a 40ºC de temperatura ambiente es de 390 A.

Para el trafo 1, cuya potencia es de 1000 kVA y cuya intensidad en Baja Tensión se ha calculado en el apartado 2, se emplearán 4 conductores por fase y 2 para el neutro.

## 6. DIMENSIONADO DE LA VENTILACIÓN DEL 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:

$$Sr = ( Wcu + Wfe ) / ( 0{,}24 \cdot k \cdot \sqrt{( h \cdot \Delta T^3 )} ), \quad \text{siendo:}$$

Wcu = Pérdidas en el cobre del transformador, en kW.
Wfe = Pérdidas en el hierro del transformador, en kW.
k = Coeficiente en función de la forma de las rejillas de entrada de aire, 0,5.
h = Distancia vertical entre centros de las rejillas de entrada y salida, 1.7 m.
$\Delta T$ = Diferencia de temperatura entre el aire de salida y el de entrada, 15ºC.
Sr = Superficie mínima de la rejilla de entrada de ventilación del transformador, en $m^2$.

Sustituyendo valores para cada transformador tendremos:

| Transformador | Potencia (kVA) | Perdidas Wcu+Wfe (kW) | Sr ($m^2$) |
|---|---|---|---|
| trafo 1 | 1000 | 9.94 | 1.09 |
| trafo 2 (Reserva) | 1000 | 9.94 | 1.09 |

## 7. DIMENSIONADO DEL POZO APAGAFUEGOS.

El pozo de recogida del ester vegetal será capaz de alojar la totalidad del volumen que contiene el transformador, así pues debajo de cada transformador se construirá un pozo de dimensiones en planta, en cm, 160x130 y profundidad no inferior a 30 cm, para recogida de eventuales pérdidas de líquido refrigerante y que en ningún caso debe estar conectado al alcantarillado.

## 8. CÁLCULO DE LAS INSTALACIONES DE PUESTA A TIERRA.

### 8.1. 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 de 100 $\Omega$xm.

### 8.2. 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): 1000.
- Duración de la falta.
Desconexión inicial:
Tiempo máximo de eliminación del defecto (s): 1.

### 8.3. 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.

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.

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 $mm^2$ de sección. El valor de la resistencia de puesta a tierra de este electrodo deberá ser inferior a 37 $\Omega$. La conexión desde el centro hasta la primera pica del electrodo se realizará con cable de Cu de 50 $mm^2$, aislado de 0,6/1 kV bajo tubo plástico con grado de protección al impacto mecánico de 7 como mínimo.

**8.4. Cálculo de la resistencia del sistema de tierra.**

Las características de la red de alimentación son:

· Tensión de servicio, U = 20000 V.
· Puesta a tierra del neutro:
  - Desconocida.
· Nivel de aislamiento de las instalaciones de Baja Tensión, Ubt = 10000 V.
· Características del terreno:
  · $\rho$ terreno ($\Omega$xm): 100.
  · $\rho_H$ hormigón ($\Omega$xm): 3000.

TIERRA DE PROTECCIÓN.

Para el cálculo de la resistencia de la puesta a tierra de las masas (Rt), la intensidad y tensión de defecto (Id, $U_E$), se utilizarán las siguientes fórmulas:

· Resistencia del sistema de puesta a tierra, Rt:

$$Rt = Kr \cdot \rho \ (\Omega)$$

· Intensidad de defecto, Id:

$$Id = Idmáx \quad (A)$$

· Aumento del potencial de tierra, $U_E$:

$$U_E = Rt \cdot Id \quad (V)$$

El electrodo adecuado para este caso tiene las siguientes propiedades:

· Configuración seleccionada: 5/62.
· Geometría: Picas en hilera.
· Profundidad del electrodo (m): 0.5.
· Número de picas: 6.
· Longitud de las picas (m): 2.
· Separación entre picas (m): 3.

Los parámetros característicos del electrodo son:

· De la resistencia, Kr ($\Omega/\Omega$xm) = 0.073.
· De la tensión de paso, Kp (V/(($\Omega$xm)A)) = 0.012.

Sustituyendo valores en las expresiones anteriores, se tiene:

$$Rt = Kr \cdot \rho = 0.073 \cdot 100 = 7.3 \ \Omega.$$

$$Id = Idmáx = 1000 \ A.$$

$$U_E = Rt \cdot Id = 7.3 \cdot 1000 = 7300 \ V.$$

TIERRA DE SERVICIO.

El electrodo adecuado para este caso tiene las siguientes propiedades:

· Configuración seleccionada: 5/32.
· Geometría: Picas en hilera.

· Profundidad del electrodo (m): 0.5.
· Número de picas: 3.
· Longitud de las picas (m): 2.
· Separación entre picas (m): 3.

Los parámetros característicos del electrodo son:

· De la resistencia, Kr ($\Omega/\Omega$xm) = 0.135.

Sustituyendo valores:

$Rt_{NEUTRO}$ = Kr · $\rho$= 0.135 · 100 = 13.5 $\Omega$.

**8.5. 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 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:

$$U'p = Kp \cdot \rho \cdot Id = 0.012 \cdot 100 \cdot 1000 = 1200 \text{ V.}$$

**8.6. 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 defecto.

$$U'p\ (acc) = Ud = Rt \cdot Id = 7.3 \cdot 1000 = 7300 \text{ V.}$$

**8.7. 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:

$$Up = 10 \cdot Uca \cdot (1 + (2 \cdot Rac + 6 \cdot \rho_s \cdot Cs) / 1000) \quad V.$$

$$Up\ (acc) = 10 \cdot Uca \cdot (1 + (2 \cdot Rac + 3 \cdot \rho_s \cdot Cs + 3 \cdot \rho_H \cdot C_H) / 1000) \quad V.$$

$$Cs = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - \rho / \rho_s) / (2 \cdot hs + 0{,}106)].$$

$$C_H = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - \rho / \rho_H) / (2 \cdot h_H + 0{,}106)].$$

$$t = t' + t'' \quad s.$$

Siendo:
Up = Tensión de paso admisible en el exterior, en voltios.
Up (acc) = Tensión en el acceso admisible, en voltios.
Uca = Tensión de contacto aplicada admisible según ITC-RAT 13 (Tabla 1), en voltios.
Rac = Resistencias adicionales, como calzado, aislamiento de la torre, etc, en $\Omega$.
Cs = Coeficiente reductor de la resistencia superficial del suelo.
$C_H$ = Coeficiente reductor de la resistencia del hormigón.
hs = Espesor de la capa superficial del terreno, en m.
$h_H$ = Espesor de la capa de hormigón, en m.
$\rho$ = Resistividad natural del terreno, en $\Omega$xm.
$\rho_s$ = Resistividad superficial del suelo, en $\Omega$xm.

$\rho_H$ = Resistividad del hormigón, 3000 Ωxm.
t = Tiempo de duración de la falta, en segundos.
t´ = Tiempo de desconexión inicial, en segundos.
t´´ = Tiempo de la segunda desconexión, en segundos.
Según el punto 8.2. el tiempo de duración de la falta es:

t´ = 1 s.

t = t´ = 1 s.

Sustituyendo valores:

$Up = 10 \cdot Uca \cdot (1 + (2 \cdot Rac + 6 \cdot \rho_s \cdot Cs) / 1000) = 10 \cdot 107 \cdot (1 + (2 \cdot 2000 + 6 \cdot 100 \cdot 1) / 1000) = 5992$ V.

$Up\ (acc) = 10 \cdot Uca \cdot (1 + (2 \cdot Rac + 3 \cdot \rho_s \cdot Cs + 3 \cdot \rho_H \cdot C_H) / 1000) = 10 \cdot 107 \cdot (1 + (2 \cdot 2000 + 3 \cdot 100 \cdot 1 + 3 \cdot 3000 \cdot 0.67) / 1000) = 12076.31$ V.

$Cs = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - \rho / \rho_s) / (2 \cdot hs + 0{,}106)] = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - 100 / 100) / (2 \cdot 0.1 + 0{,}106)] = 1$

$C_H = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - \rho / \rho_H) / (2 \cdot h_H + 0{,}106)] = 1 - 0{,}106 \cdot [(1 - 100 / 3000) / (2 \cdot 0.1 + 0{,}106)] = 0.67$

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 = 1200 V. | ≤ | Up = 5992 V. |
| Tensión de paso en el acceso | U'p (acc) = 7300 V. | ≤ | Up (acc) = 12076.31 V. |

Tensión e intensidad de defecto.

| Concepto | Valor calculado | Condición | Valor admisible |
|---|---|---|---|
| Aumento del potencial de tierra | $U_E$ = 7300 V. | ≤ | Ubt = 10000 V. |
| Intensidad de defecto | Id = 1000 A. | > | |

**8.8. 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 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.

$Dn\text{-}p \geq (\rho \cdot Id) / (2000 \cdot \pi) = (100 \cdot 1000) / (2000 \cdot \pi) = 15.92$ m.

Siendo:
ρ = Resistividad del terreno en Ωxm.
Id = Intensidad de defecto en A.
La conexión desde el centro hasta la primera pica del electrodo de servicio se realizará con cable de Cu de 50 $mm^2$, aislado de 0,6/1 kV bajo tubo plástico con grado de protección al impacto mecánico de 7 como mínimo.

**8.9. Corrección del diseño inicial.**

No se considera necesario la corrección del sistema proyectado según se pone de manifiesto en las tablas del punto 8.7.