

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

Diseño de centro de transformación móvil de 630  
kVA para red de 10 kV

Autor: Andrés Ruiz Parets

Tutor: Pedro L. Cruz Romero

Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2022





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de Tecnologías Industriales

# **Diseño de centro de transformación móvil de 630 kVA para red de 10 kV**

Autor:  
Andrés Ruiz Parets

Tutor:  
Pedro L. Cruz Romero  
Profesor Titular

Dpto. Ingeniería Eléctrica  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Trabajo Fin de Grado: Diseño de centro de transformación móvil de 630 kVA para red de 10 kV

Autor: Andrés Ruiz Parets

Tutor: Pedro L. Cruz Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mi familia y amigos por el apoyo emocional y al profesorado por el apoyo académico.*

# Resumen

---

Este trabajo de fin de grado trata sobre el diseño desde una perspectiva académica de un centro de transformación de 630 kVA que reduce la tensión de 10 kV a 420 V. Es un diseño móvil con la idea de que se comporte como una maquina eléctrica independiente para que se pueda transportar e instalar de una manera práctica y rápida cubriendo posibles averías o nuevas instalaciones sin apenas obras. Sus parámetros concuerdan con los establecidos en la ciudad autónoma de Melilla. Es un territorio extrapeninsular situado en el norte de África con un sistema eléctrico propio aislado del sistema peninsular. Tiene unas características propias que influyen en el diseño como son un solo punto de generación con una distribución a media tensión de 10 kV de neutro aislado. Esto hace que la fiabilidad del sistema eléctrico melillense sea baja al solo tener una planta de generadora para asegurar el suministro, por tanto, es importante mantener las instalaciones al máximo rendimiento con un buen mantenimiento y con la posibilidad de reparaciones e instalaciones rápidas. Teniendo en cuenta las condiciones medioambientales que estamos viviendo, el diseño busca la utilización de materiales no contaminantes y que se puedan reutilizar o reciclar.

# Abstract

---

This final degree work deals with the design from an academic perspective of a 630 kVA transformer station that reduces the voltage from 10 kV to 420 V. It is a mobile design with the idea that it behaves as an independent electrical machine so that it can be transported and installed in a practical and fast way covering possible breakdowns or new installations with hardly any works. Its parameters are in accordance with those established in the autonomous city of Melilla. It is an extra-peninsular territory located in the north of Africa with its own electrical system isolated from the peninsular system. It has its own characteristics that influence the design, such as a single generation point with a medium voltage distribution of 10 kV with isolated neutral. This means that the reliability of Melilla's electrical system is low as it only has one generating plant to ensure supply, therefore, it is important to maintain the facilities at maximum performance with good maintenance and the possibility of quick repairs and installations. Taking into account the environmental conditions we are experiencing, the design seeks the use of non-polluting materials that can be reused or recycled.

# Índice

---

<b>Resumen</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract</b>	<b>viii</b>
<b>Índice</b>	<b>ix</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xi</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xii</b>
<b>Normativas</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>17</b>
<b>2 Características del sistema eléctrico de Melilla</b>	<b>18</b>
<b>3 Estimación de datos de partida</b>	<b>21</b>
<b>4 Distribución de los componentes</b>	<b>26</b>
<b>5 Descripción de los circuitos</b>	<b>30</b>
<b>6 Cálculos eléctricos para el dimensionado de la aparamenta</b>	<b>34</b>
<b>7 Descripción de la aparamenta</b>	<b>39</b>
<b>8 Sistemas de control y telemando</b>	<b>44</b>
<b>9 Método de refrigeración</b>	<b>50</b>
<b>10 Estudio de contaminación acústica</b>	<b>52</b>
<b>11 Estudio del campo magnético</b>	<b>56</b>
<b>12 Elementos de seguridad</b>	<b>61</b>
<b>13 Transporte e instalación</b>	<b>63</b>
<b>14 Elementos del diseño respetuoso con el medio ambiente</b>	<b>66</b>
<b>15 Conclusiones</b>	<b>67</b>
<b>Referencias</b>	<b>68</b>
<b>Anexo I. Esquemas Eléctricos</b>	<b>69</b>
<b>Anexo II. Planos</b>	<b>71</b>



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 1. Ventajas y desventajas del sistema de neutro aislado.	18
Tabla 2. Descripción de los sistemas de generación.	19
Tabla 3. Cables normalizados por la compañía distribuidora.	20
Tabla 4. Reactancia, capacidad y resistencia de los cables normalizados.	20
Tabla 5. Tensiones de contacto (ITC-RAT 13).	35
Tabla 6. Parámetros característicos de electrodos de puesta tierra (UNESA).	36
Tabla 7. Resumen de datos calculados.	38
Tabla 8. Ventajas y desventajas del transformador seco.	40
Tabla 9. Características PIAs (ITC-BT-25).	42
Tabla 10. Desglose del consumo en el control.	45
Tabla 11. Comparación de altura de desnivel con superficie de los respiradores.	50
Tabla 12. Pérdidas, niveles acústicos e impedancias de cortocircuito (UNE-EN 50708-2-1:2021).	52
Tabla 13. Valores de presión acústica según valores en octavas de frecuencia.	53
Tabla 14. Valores de la interpolación.	53
Tabla 15. Valores de ruido que absorben cada elemento y del total.	54
Tabla 16. Índice de ruidos en espacios críticos según tipo de recinto y horarios (R.D. 1367/2007).	55
Tabla 17. Coordenadas de conductores e intensidades por tramos.	58
Tabla 18. Dimensiones del contenedor.	63
Tabla 19. Estimación de peso del CT Móvil.	63

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 1. Ciudad autónoma de Melilla (Google Maps).	17
Figura 2. Esquema del sistema eléctrico de Melilla.	19
Figura 3. Estructura del cable.	20
Figura 4. Esquema simplificado del sistema eléctrico de Melilla.	21
Figura 5. Ilustración del efecto capacitivo.	22
Figura 6. Esquema cortocircuito monofásico a tierra en un sistema IT.	23
Figura 7. Esquema para el cálculo con circuito de secuencia	24
Figura 8. Circuitos para el cálculo de tenciones de secuencias.	24
Figura 9. Circuito para el cálculo de intensidades de secuencias.	24
Figura 10. Terminal recto deslizable.	26
Figura 11. Esquema de tolerancias para giro de un cable de media tensión.	27
Figura 12. Esquema de la distribución de celdas de media tensión.	27
Figura 13. Conexiones interior y exterior.	28
Figura 14. Esquema del interior de una celda de media tensión.	28
Figura 15. Diferenciación bastidor-chasis en automóvil.	29
Figura 16. Esquema de entradas y salidas del centro de transformador.	30
Figura 17. Tipos de alimentación en distribuciones de media tensión.	30
Figura 18. Esquema de los elementos principales del circuito PAT.	32
Figura 19. Esquema del comportamiento del cuerpo humano ante el contacto con una falta.	35
Figura 20. Celda de media tensión PREMSET de Schneider Electric.	39
Figura 21. Transformador seco TRIHAL TRI063017K2A3YEB1.	40
Figura 22. Cuadro de baja tensión Ormazábal.	41
Figura 23. Cuadro auxiliar de baja tensión.	42
Figura 24. Pequeño interruptor automático (PIA), Schneider Electric.	42
Figura 25. Transformador de aislamiento Manumang serie TA.	43
Figura 26. Esquema del sistema de control de media tensión.	44
Figura 27. Unidad compacta de telemando.	45
Figura 28. Ejemplo de tarjeta de comunicaciones por ethernet.	46
Figura 29. RGDAT Tesmec A70.	47
Figura 30. Esquema del funcionamiento de la bobina Rogowski.	47
Figura 31. Esquema de posicionamiento del captador de intensidad.	47
Figura 32. Esquema simplificado de un divisor capacitivo.	48
Figura 33. Mecanismo de rearme y motor de 380 W.	48
Figura 34. Disparador de 50 W.	48
Figura 35. Analizador de redes Circutor CVB-150.	49
Figura 36. Esquema de la refrigeración del CT.	51

Figura 37. Esquema del sistema de coordenadas.	56
Figura 38. Planos de situación de conductores (unidades en m).	57
Figura 39. Denominación de los tramos.	57
Figura 40. Planta del contorno con los tramos para calcular el campomagnetico.	58
Figura 41. Campo magnético en tramo horizontal H1.	59
Figura 42. Campo magnético en tramo horizontal H2.	59
Figura 43. Campos magnéticos en tramo vertical V1.	59
Figura 44. Campos magnéticos en tramo vertical V2.	60
Figura 45. Banqueta aislante.	61
Figura 46. Pértiga y guantes aislantes de Alta Tensión.	62
Figura 47. Plataforma de transporte ISO 20 Flat Rack.	63
Figura 48. Esquema de instalación provisional.	64
Figura 49. Esquema de instalación provisional prolongada.	64
Figura 50. Esquema de instalación permanente.	65



# NORMATIVAS

---

Reglamento de Alta Tensión (RAT) con las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC).

Reglamento Baja Tensión (RBT) con las Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC).

Unidad Eléctrica S.A ,UNESA (asociación de las principales empresas eléctricas españolas).

UNE-EN 50708-2-1:2021, requisitos generales para transformadores de media potencia.

Normas técnicas particulares de la compañía melillense de Gas y Electricidad S.A. de alta tensión.

R.D. 1367/2007, para límites de ruido.

ISO-668, para los contenedores de transporte.



# 1 INTRODUCCIÓN

---

El centro de transformación, CT está compuesto fundamentalmente por elementos de maniobras como son los interruptores y un convertidor de tensión como es el transformador.

Su función principal es reducir de media tensión, MT a 10 kV, a baja tensión, BT a 420 V. Es un elemento frontera dentro del circuito de distribución en la red.

Se realizan estimaciones y cálculos de tensiones e intensidades para dimensionar la aparenta y estudios como los de ruido y campo magnético emitidos para cumplir las normas establecidas en el entorno.

Al ser un conjunto móvil, se ha diseñado como una maquina eléctrica que se puede desconectar y conectar fácilmente para transportar de un punto a otro. Por tanto, facilitar el transporte es un elemento importante en el diseño con la distribución de los elementos.

Teniendo en cuenta aspectos medioambientales, se intenta diseñar utilizando elementos lo menos contaminantes posible y que puedan ser reutilizados.

La instalación pertenece al sistema eléctrico de la ciudad autónoma de Melilla cuyas características principales se destacan en el capítulo siguiente.



Figura 1. Ciudad autónoma de Melilla (Google Maps).

## 2 CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE MELILLA

En estos momentos la población de Melilla está aislada eléctricamente de la península, por tanto, tiene un sistema eléctrico propio. Se caracteriza por tener una tensión de distribución de media tensión de **10 kV** con una instalación de **neutro aislado (IT)** y una generación eléctrica obtenida principalmente por la combustión de gas y diésel. Tiene una potencia instalada de **87 MW** para abastecer una demanda anual media de **205 GWh**. [1]

A continuación, se describen las partes más importantes del sistema eléctrico.

### Sistema de neutro aislado (IT) en MT, puesto a tierra directamente (TT) en BT.

El sistema de neutro aislado utilizado se caracteriza por operar sin una conexión a tierra intencionada. Sin embargo, se tienen que tener en cuenta las capacidades de los elementos creadas por la diferencia de tensiones entre los cables y el terreno. Este efecto capacitivo hace que su uso este limitado a sistemas de distribución de media tensión y de longitudes relativamente pequeñas. [2]

En la tabla 1 se describe las ventaja y desventajas del sistema IT.

<b>Ventajas</b>
Menor coste en la instalación al carecer de puesta de tierra en MT.
El sistema puede seguir operando con una falta a tierra.
Bajos valores de intensidad de falta en el primer defecto.
<b>Desventajas</b>
Las sobretensiones causadas por alguna falta hace aumentar la tensión de aislamiento, lo que conlleva un aumento del coste de los sistemas.
El sistema de detección y localización de la primera falta es más complejo por el bajo valor de la corriente de falta.
Al ser difícil de detectar una falta, hay más posibilidades de una segunda falta con la que se puede alcanzar elevadas intensidades al comportarse como un sistema rígidamente puesto a tierra en el punto de la primera falta.

Tabla 1. Ventajas y desventajas del sistema de neutro aislado.

Aguas abajo de los centros de transformación, en la distribución de corriente a 400 V, el sistema aterriza a partir del neutro del lado de baja del CT hasta llegar a los consumidores como muestra la figura 2. Es el sistema más habitual en España en el régimen de baja tensión.

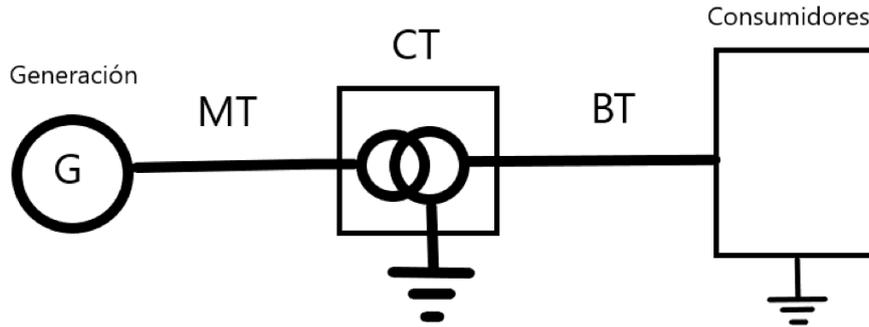


Figura 2. Esquema del sistema eléctrico de Melilla.

### Generación y Demanda.

Como en cualquier sistema eléctrico, se busca un equilibrio entre la generación y la demanda para mantener la estabilidad del sistema, tanto en tensión como en frecuencia. Al ser un sistema aislado con un solo punto de generación, mantener el servicio de una manera continuada es más complicado por lo que requiere disponer de unas instalaciones con un buen mantenimiento y el mayor telecontrol posible, objetivo de este proyecto.

Para la producción de energía eléctrica en Melilla se utilizan centrales térmicas de gas o diésel y una central incineradora de residuos. Esta información queda desglosada en la tabla 2.

Motores diésel	2 x 5,76 MW
Turbina de gas	14,7 MW
Motores diésel	9,3 MW
Motores diésel	12,2 MW
Motores diésel	2 x 12,6 MW
Grupos Electrógenos	12 x 1 MW
Central incineradora de residuos	2 MW
Potencia total	86,92 MW

Tabla 2. Descripción de los sistemas de generación. [3]

La demanda de energía en Melilla durante 2021 fue de unos 205 GWh. Estos datos nos dan una idea del reducido tamaño de la instalación si lo comparamos con los de la península, con una potencia instalada de aproximadamente 110.000 MW y un consumo en el mismo periodo de unos 260.000 GWh. [1]

**Distribución.**

Para el transporte de la energía se usan cables subterráneos de media tensión de 10 kV. Son cables unipolares, con conductores de aluminio, de aislamiento HEPR. La empresa distribuidora tiene normalizada la **sección de 150 mm<sup>2</sup>**.

En este caso son de distribución ya que alimenta a cargas situadas en las proximidades de la central. Su tensión no es muy elevada al tener que cubrir un espacio relativamente pequeño (12,3 km<sup>2</sup>), no es necesario elevar la tensión mucho para reducir las pérdidas por transporte de energía.

En la figura 3 y las tablas 3 y 4 se muestran las características principales del cable empleado en la distribución.



Figura 3. Estructura del cable. [4]

Tipo constructivo	Tensión Nominal kV	Sección Conductor mm <sup>2</sup>	Naturaleza del conductor	Sección Pantalla mm <sup>2</sup>	Naturaleza de la Pantalla
HEPRZ1	12/20	95	Al	16	Cu
		150	Al	16	Cu
		240	Al	16	Cu
		400	Al	16	Cu

Tabla 3. Cables normalizados por la compañía distribuidora. [4]

Tipo constructivo	Tensión Nominal kV	Sección conductor mm <sup>2</sup>	Reactancia por fase Ω/km.	Capacidad Máx. μF/km	Resistencia Máx. a 105° C Ω/km.
HEPRZ1	12/20	95 Al	0,118	0,283	0,430
		150 Al	0,109	0,336	0,277
		240 Al	0,103	0,421	0,170
		400 Al	0,095	0,499	0,108

Tabla 4. Reactancia, capacidad y resistencia de los cables normalizados. [4]

### 3 ESTIMACIÓN DE DATOS DE PARTIDA

En todo diseño existen unos valores iniciales definidos por el contorno que sirven como punto de partida. En este caso, al ser un elemento que irá conectado a un sistema eléctrico son necesarios datos como la tensión de distribución o el tipo de red. La mayoría son datos públicos, en cambios otros se obtienen por una estimación.

Se estima la potencia del transformador, la intensidad máxima de cortocircuito en el punto de la red de conexión y la intensidad de cortocircuito fase-tierra para dimensionar la aparamenta e instalaciones del CT.

#### Potencia del transformador.

Las potencias normalizadas en kVA son: 10, 25, 50, 75, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1.000, 1.250, 1.600, 2.000 y 2.500.

UNESA, en la recomendación RU-5201D simplifica la lista para estandarizar aún más los CT públicos a: 50, 100, 160, 250, 400, 630 y 1.000 kVA. Para satisfacer más potencia se ponen transformadores en paralelo.

Teniendo en cuenta los valores anteriores y la potencia de los centros de transformación ya instalados en la ciudad autónoma se optará por **630 kVA**.

#### Intensidad máxima de cortocircuito

La intensidad máxima de cortocircuito en un sistema eléctrico se produce con una falta rígida trifásica equilibrada en el punto más cercano a la generación. Es una consecuencia de la ley de Ohm, a menor impedancia por ser menor el cable y no existir en el punto de falta, mayor es el valor de la intensidad.

Para el diseño supondremos **100 metros de cable** al existir la posibilidad de instalación muy próxima a la central generadora. Lo modelaremos con una central con una fuente de tensión con una reactancia subtransitoria en serie y un cable con una reactancia inductiva y una resistencia conectadas en serie a la central como muestra la figura 4.

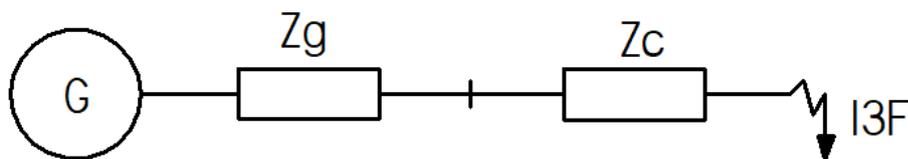


Figura 4. Esquema simplificado del sistema eléctrico de Melilla.

- Tensión de línea,  $U_1 = 10 \text{ kV}$
- Reactancia subtransitoria de la generación,  $X_g'' = 0,24 \Omega$
- Resistencia del cable,  $R_c = 0,227 \Omega/\text{km}$
- Reactancia inductiva del cable,  $X_{cl} = 0,109 \Omega/\text{km}$
- Longitud del cable,  $l = 0,1 \text{ km}$

- Impedancia de la generación  $Z_g = i X_g'' = i 0,24 \Omega$ .
- Impedancia del cable  $Z_c = R_c \cdot l + i X_{cl} \cdot l = 0,0227 + i 0,0109$ .

Intensidad de cortocircuito Trifásico,  $I_{k3f}$ :

$$1) I_{k3f} = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot |Z_g + Z_c|} = 22,78 \text{ kA.}$$

La potencia de cortocircuito,  $S_{cc}$ , es un valor directamente proporcional a la intensidad calculada anteriormente como se observa y define en la expresión 2:

$$2) S_{cc} = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_{k3f} = 396,16 \text{ MVA.}$$

### Intensidad de cortocircuito monofásico fase-tierra.

En este caso se tiene que tener en cuenta que es un cortocircuito a tierra en un sistema con neutro aislado, la intensidad retorna a la red por el efecto capacitivo del cable.



Figura 5. Ilustración del efecto capacitivo. [6]

Este efecto hace que consideremos, contrariamente al caso anterior, lo más desfavorable el punto más lejano a la central al aumentar la capacidad con la longitud del cable. Como el perímetro de la ciudad autónoma es de **20 Km**, tomaremos este valor para la estimación.

En el cortocircuito, la fase en falta se pone en contacto directo a tierra, por lo que no circula corriente capacitiva y su tensión se cero. Por las fases sanas retornará la corriente de cortocircuito a través de la capacidad de cada fase con la tierra como muestra la figura 6.

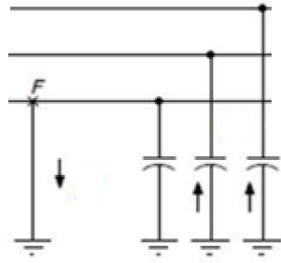


Figura 6. Esquema cortocircuito monofásico a tierra en un sistema IT.

El efecto capacitivo es mucho mayor en un cable subterráneo que en una línea aérea, del orden de 50 veces como indica los siguientes valores típicos:

- Líneas aéreas: 5 nF/km.
- Cables subterráneos: 250 nF/km.

También como muestran los siguientes datos:

- Reactancia inductiva del cable,  $X_{cl} = 0,109 \cdot l = 2,18 \Omega$ .
- Capacidad del cable,  $C = 0,336 \cdot 10^{-6} \text{ F/km}$ .
- Reactancia capacitiva del cable,  $X_{cc} = 1/(2\pi fCl) = 473,68 \Omega$ .

La reactancia capacitiva del cable es mucho mayor que la inductiva, por tanto, esta puede ser despreciada. La impedancia del cable queda simplificada usando solo la parte capacitiva.

Al ser un cortocircuito asimétrico, se utilizan los circuitos de secuencias para resolverlo con las componentes directa, inversa y homopolar. Se pasa al circuito monofásico de cada secuencia que luego se simplifica agrupándolas a impedancia equivalentes. A continuación, se incluyen en único circuito para calcular la intensidad y luego se calcula las tensiones de cortocircuito de secuencia. Por último, se vuelve a pasar a valores de fase con la matriz de transformación.

Se realizan las siguientes consideraciones para realizar los cálculos:

- La impedancia de falta no se considera para calcular la máxima intensidad posible.
- Las impedancias del cable de secuencias se consideran iguales al tomarse el valor de máximo de la capacidad indicada por la compañía de distribución de la tabla 4 como referencia. Como resultado da un valor de impedancia más bajo y por tanto el cálculo de la intensidad más desfavorable.

A continuación, se muestran los pasos más significativos para realizar el cálculo del cortocircuito monofásico a tierra.

En la obtención de las impedancias de secuencias equivalentes del circuito, se suman en paralelo las impedancias del generador y la del cable cuando proceda. En la parte homopolar no se incluye al no estar conectado generador a tierra. En la figura 7 se observa como esta desconectado la parte homopolar del generador.

$$3) Z(1) = Z_g(1) // Z_c(1) = \frac{Z_g(1) \cdot Z_c(1)}{Z_g(1) + Z_c(1)} = i 0,2401 \Omega.$$

$$4) Z(2) = Z(1).$$

$$5) Z(0) = Z_c(0) = i 473,68 \Omega.$$

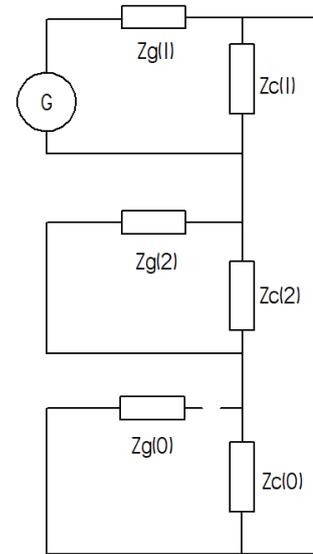


Figura 7. Esquema para el cálculo con circuito de secuencia

Cálculos de intensidades de secuencia con impedancias equivalentes usando el circuito de la figura 9:

$$6) I(0) = I(1) = I(2) = \frac{U_1}{\sqrt{3}(2 \cdot Z(1) + Z(0))} = i 12,20 \text{ A.}$$

Cálculos de tensiones de secuencia con impedancias equivalentes usando los circuitos de la figura 8:

$$7) U(0) = -Z(0) \cdot I(0) = -5,78 \text{ kV.}$$

$$8) U(1) = \frac{U_1}{\sqrt{3}} - Z(1) \cdot I(1) = 5,78 \text{ kV.}$$

$$9) U(2) = -Z(2) \cdot I(2) = -2,93 \text{ V.}$$

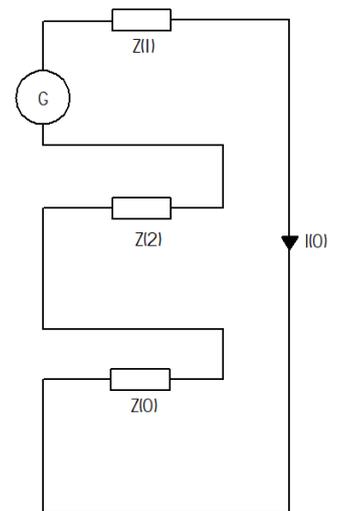


Figura 9. Circuito para el cálculo de intensidades de secuencias.

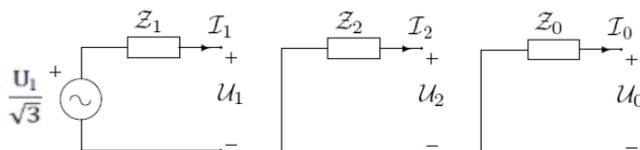


Figura 8. Circuitos para el cálculo de tensiones de secuencias.

Paso de valores de secuencia a fase a través de la matriz de transformación A:

$$10) A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix}; \text{ siendo } a = -\frac{1}{2} + i\frac{\sqrt{3}}{2}.$$

Cálculo de intensidades y tensiones de fase:

$$11) \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} I(0) \\ I(1) \\ I(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -36,6 \angle -90^\circ \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \text{ A.}$$

$$12) \begin{bmatrix} U_a \\ U_b \\ U_c \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{pmatrix} \begin{bmatrix} U(0) \\ U(1) \\ U(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 10,008 \angle -150,02^\circ \\ 10,008 \angle 150,02^\circ \end{bmatrix} \text{ kV.}$$

### Cálculo de sobretensiones por método de factor de defecto a tierra.

El factor de defecto a tierra es un valor que depende de la configuración la red obtenido por UNESA para la simplificación de cálculo. En este caso se usan como método alternativo para confirmar los valores de cálculos realizados previamente con los circuitos de secuencias. Al ser  $Z_1 = Z_2$  los valores de los factores resultan iguales como los de las tensiones eficaces de las fases sanas.

$$13) K_b = a^2 - \frac{(|Z_0| + a^2|Z_1| + a|Z_2|)}{(|Z_0| + |Z_1| + |Z_2|)} = -1,4985 - i 0,8660.$$

$$14) K_c = a - \frac{(|Z_0| + a|Z_1| + a^2|Z_2|)}{(|Z_0| + |Z_1| + |Z_2|)} = -1,4985 - i 0,8660.$$

$$15) U_b = U_c = |K_b| \frac{U_1}{\sqrt{3}} = 9,99 \text{ kV.}$$

Se observa valores muy similares en ambos métodos, en una falta fase-tierra la tensión de fase se sitúa a un valor similar a la tensión de línea previa a la falta de 10 kV.

## 4 DISTRIBUCIÓN DE LOS COMPONENTES

La distribución de componentes y espacios es un elemento importante dentro del diseño al tratarse de un centro de transformación móvil. Dentro de este apartado se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- Logística.

Es un conjunto de elementos que se tendrá que desplazar desde el punto de fabricación hasta los puntos de instalación por tierra, mar y aire. Esto conlleva una repartición de peso lo más homogénea posible teniendo en cuenta el centro de gravedad de la carga y reducir en lo posible volúmenes y masas dentro del diseño.

- Separación entre media y baja tensión.

Existen elementos con tensiones muy diferentes, esto hace que se separen en dos zonas claramente diferenciadas colocando en medio el transformador y un tabique que separa la zona de baja tensión del resto.

- Facilidad en el mantenimiento e instalación interior.

La disposición en el interior del CT facilita el mantenimiento y la maniobra de sus componentes a través de pasillos. Esto significa que se pueda reparar o cambiar un elemento como el transformador, equipo de MT o de BT sin tener que mover los restantes elementos y haya espacio para que pueda operar los operarios.

- Normativa.

Debe de cumplir los requisitos legales descritos en la norma ITC- RAT 14.

Para la descripción de espacios, se hace un recorrido desde la acometida de media tensión hasta la salida de baja tensión.

Las acometidas de media tensión se establecen por el extremo del foso eléctrico más próximo a las celdas de media tensión mediante terminales rectos deslizables.

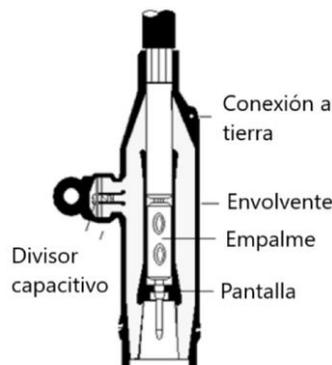


Figura 10. Terminal recto deslizable.

El foso o sótano eléctrico es una estructura hueca que actúa como soporte de la estructura y como canalizaciones de los conductores para las conexiones interiores y exteriores. Tiene la altura mínima para que permita la curvatura de los cables y labores de instalación y mantenimiento.

Cuando un cable de MT realiza cambios de dirección, debe tener una radio de curvatura alrededor de 10 veces el diámetro total del cable. Como se observa en la figura 11, para girar un cable 90° necesitaría un margen de 11 veces su diámetro. Suponiendo un cable de MT de 150 mm<sup>2</sup>, se traduce en unos 7 mm de radio o 14 mm de diámetro. Si doblamos este valor para incluir la envolvente del conductor y multiplicamos por 11 resulta que necesitamos un margen para hacer un giro de 308 mm. Contando con esto y con dejar margen para la inspección la altura del foso eléctrico será de 0,5 m.

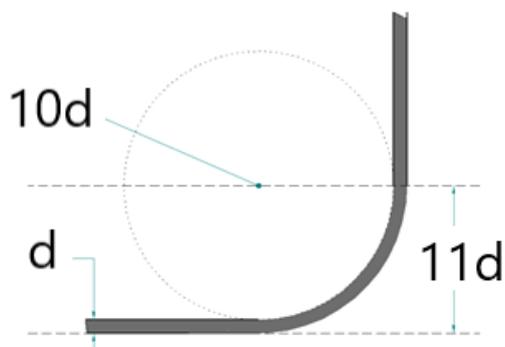


Figura 11. Esquema de tolerancias para giro de un cable de media tensión.

A continuación, se comunican por las canalizaciones del foso eléctrico hasta las celdas de media tensión.

La aparatenta de control y maniobra de MT está ubicada dentro de distintas envolventes metálicas denominadas celdas o cabinas prefabricadas. Están conectadas entre sí por barras rígidas conductoras y debidamente aislada, enlazando las distintas celdas mecánica y eléctricamente formando una especie de mecano.

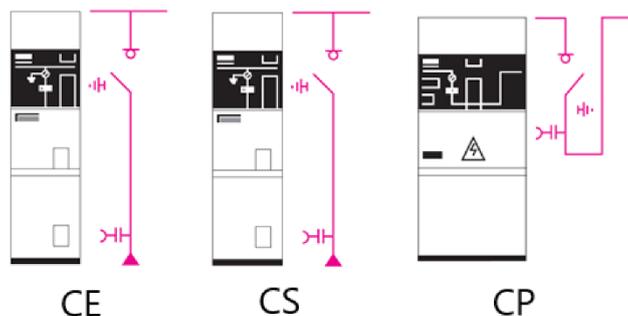


Figura 12. Esquema de la distribución de celdas de media tensión.

Al igual que las conexiones internas, para seguir el circuito hacia el exterior de las celdas se realizan a través de conectores que facilitará la continuidad de la instalación como refleja la figura 13.



Figura 13. Conexiones interior y exterior

Cada celda de MT se subdivide en los siguientes cuatro espacios, como ilustra la figura 14:

- Compartimento con los terminales para conexión hacia el interior, entrada.
- Compartimento del mecanismo del interruptor automático, IA.
- Compartimento con los terminales para conexión hacia exterior, salida.
- Compartimentos para elementos o aparatos auxiliares como el display, panel de estado y control o sensores.

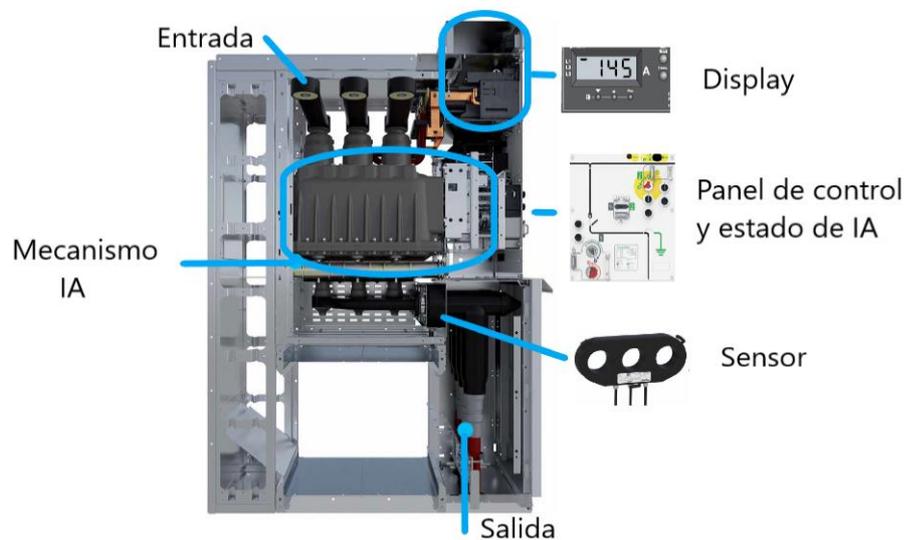


Figura 14. Esquema del interior de una celda de media tensión.

A continuación, se enlazan las celdas de media tensión con el transformador mediante el cableado debidamente encapsulado por la parte superior. El trafo al ser de aislamiento seco también se encapsula en una jaula metálica para evitar un contacto directo y facilitar su refrigeración.

Del transformador pasa a la zona de baja tensión por el mismo sistema que el lado de media tensión.

La zona de baja tensión está separada del resto por un tabique para diferenciar físicamente los elementos de baja tensión. Los módulos de control y los cuadros de baja tensión están situados en la zona de baja tensión por seguridad para la manipulación de ingenieros y técnicos. También se eligió la separación de elementos según su tensión en dos zonas opuestas con el transformador en medio para mantener un equilibrio de masas dentro de la distribución de espacios.

Las cuatro salidas de BT hacia el exterior están en el extremo opuesto del foso eléctrico a las conexiones exteriores de MT con las mismas conexiones rápidas.

Para facilitar la inspección y los diferentes mantenimientos, el CT dispondrá de las siguientes condiciones de anchura y alturas para los pasillos:

- Pasillos de maniobra con elementos en alta tensión a un solo lado, ancho de 1 m.
- Pasillos de inspección con elementos en alta tensión a ambos lados, ancho de 1 m.
- Pasillos libres de obstáculo a una altura de 2,30 m.

En una descripción general del conjunto del CT, se puede hacer un símil con la estructura de un autobús o de un coche antiguo. El denominado foso eléctrico estará construido de acero y se comporta como un bastidor, mantiene la rigidez de la estructura y soporta el peso de los componentes del CT. La envolvente que aísla y protege de los elementos externos (techo y paredes), serán de un material resistente pero liviano comportándose como un chasis.



Figura 15. Diferenciación bastidor-chasis en automóvil. [8]

**Consúltense los planos del anexo II.**

# 5 DESCRIPCIÓN DE LOS CIRCUITOS

La descripción de la instalación eléctrica define como se transporta y controla la energía dentro de la instalación. Si observamos el CT como una maquina eléctrica independiente podemos distinguir tres partes: las conexiones de entradas y salidas y los circuitos internos.

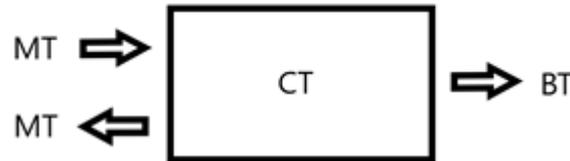


Figura 16. Esquema de entradas y salidas del centro de transformador.

La alimentación se realiza a través conectores rápidos de MT que llevarán la corriente hasta las celdas de entrada. En las conexiones de salida se pueden encontrar dos niveles de tensión posibles, de MT desde la celda de salida y de BT desde el cuadro de BT. Las celdas de entrada o salida pueden intercambiar sus papeles o desconectarse una de ellas, dependiendo del estado de la alimentación en la distribución.

## Tipos de alimentación

En la figura 17 se puede diferenciar dos métodos para la alimentación del CT:

- El esquema radial o en antena donde solo llega una línea de alimentación al CT, característicos de sistemas radiales.
- El esquema de bucle abierto o en anillo donde le llegan dos líneas de MT. Es el sistema es el que más garantiza el suministro al tener dos alternativas de alimentación.

En el diseño, al contarse con una celda de entrada y otra de salida, el CT puede ser alimentados con ambos métodos. Con el radial solo se necesitará operativa unas de las celdas de línea.

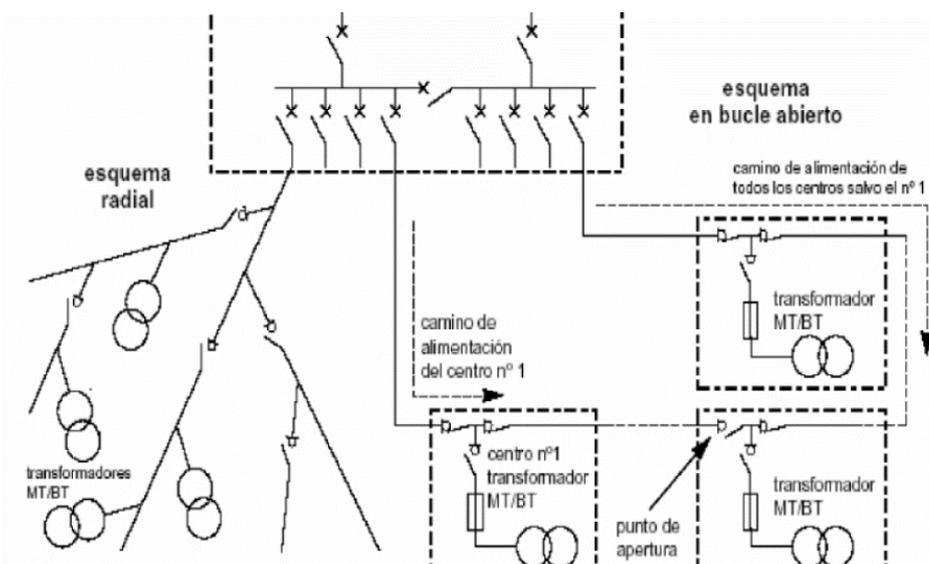


Figura 17. Tipos de alimentación en distribuciones de media tensión. [7]

Dentro de los circuitos internos diferenciaremos tres tipos: circuito principal, circuito de puesta a tierra y circuitos auxiliares.

### **Circuito principal**

Es el conjunto de partes conductoras que transporta la energía eléctrica para cubrir la demanda. Está compuesto por los dos niveles de tensión separados por el transformador.

En el nivel de media tensión circula corriente a 10 kV. Está compuesto por tres elementos de maniobra y protección denominados interruptor automático con seccionador a tierra. Los dos primeros se encargan de la alimentación, pudiendo operar según los sistemas descritos anteriormente. El tercero se encarga de asistir al transformador.

El transformador es de grupo de conexión del tipo **Dyn11**, con primario MT en triángulo y secundario BT en estrella con borne de neutro accesible. El 11 del tipo indica que el desfase entre tensiones primaria y secundaria es de 330°, es decir si dividimos como si fuera un reloj un círculo en partes de 30°, las 11 marcaran 330°. Tiene como principales ventajas los siguientes dos puntos:

- Si se produce una asimetría en la carga o falta en el lado de baja tensión, quedaría aislada del lado de media tensión al producirse un reparto entre las tres columnas del primario.
- Al tener un neutro accesible, permite poner a tierra las protecciones de la instalación de baja tensión y poder alimentar las cargas a las dos tensiones diferentes, trifásica a 400 V y monofásica a 230 V.

En el nivel de baja tensión circula corriente a 400 voltios entre fases y 230 voltios entre cada fase y el neutro. A partir de aquí el sistema eléctrico incluye el neutro en sus líneas y el sistema deja de ser de neutro aislado al aterrizar los enrollamientos del secundario del transformador a tierra.

Se compone por un fider con cuatro salidas protegidas por fusibles seleccionador de cuatro terminales (tres fases y el neutro) para satisfacer la demanda y otra salida de dos terminales (fases y neutro) que alimentara un subcuadros para satisfacer necesidades del propio centro de transformación.

### **Circuito de puesta a tierra, PAT**

Para simplificar el diseño, la tierra de protección y la de servicio están unificadas. La de servicio va conectada al lado de baja tensión a través del neutro, en cambio, la de protección se conecta a piezas conductoras que no forman parte del circuito activo. Esto se hace para proteger a las personas contra tensiones de contacto peligrosas que se pueden quedar energizadas cuando se produzca alguna falta. En ella se conecta:

- La pantalla de los cables de Media Tensión.
- El neutro del trafo.
- Todas las envolventes metálicas de las celdas.
- El seccionamiento de media tensión.
- Carcasa de los transformadores.
- Carcasas de los cuadros de Baja Tensión.

No se conecta las partes metálicas que puedan ser tocadas desde el exterior del CT como puede ser las puertas del Centro de Transformación o las rejillas ventilación.

A continuación, en la figura 18 se muestran las distintas partes del circuito de puesta tierra y los elementos más significadamente conectados a ella.

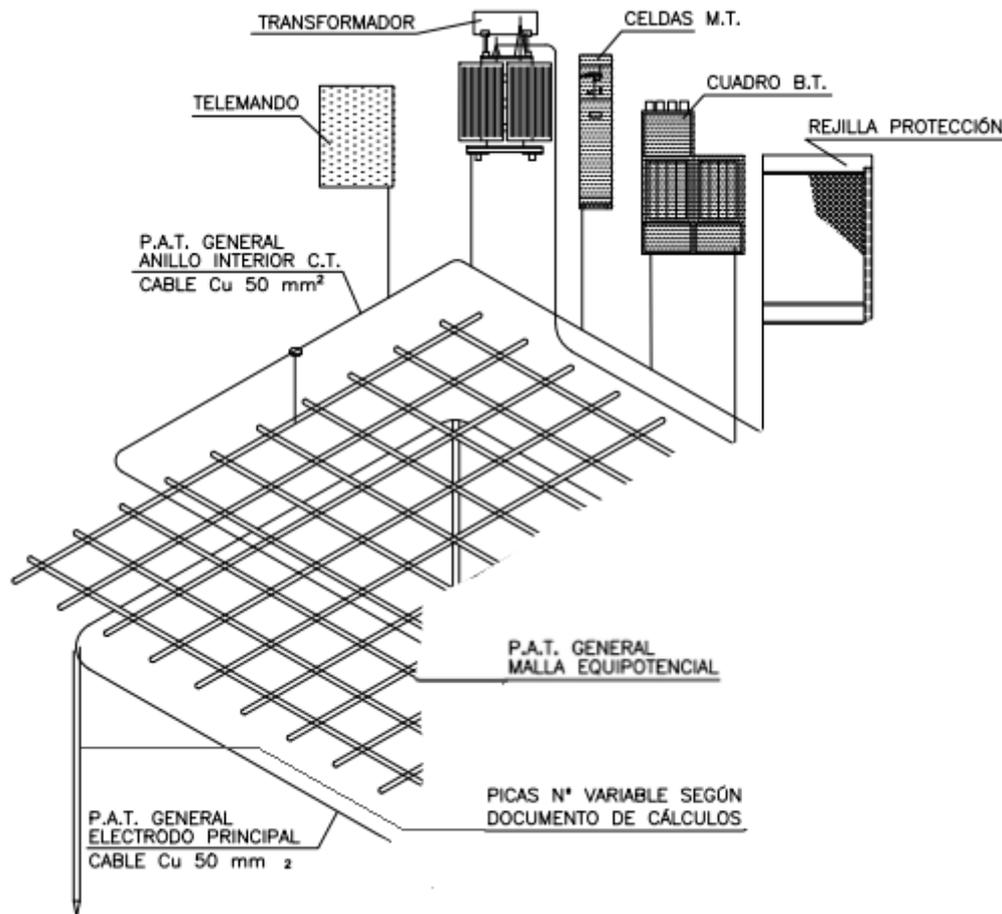


Figura 18. Esquema de los elementos principales del circuito PAT.

El circuito está diferenciado en tres partes conectadas entre sí:

- Un anillo formado por un cable de cobre de 50 mm<sup>2</sup> dispuesto en el interior del CT donde se conecta a los elementos del CT mencionados anteriormente.
- Una estructura formada por un mallado de retículas de 0,5 m x 0,5 m instalada en el foso eléctrico a una profundidad mayor a 0,1 metros denominada malla equipotencial.
- Una malla enterrada bajo tierra a 0,5 metros de profundidad abarcando una superficie de 20 m<sup>2</sup> (5 m x 4 m) de cobre electrolítico desnudo de 50 mm<sup>2</sup> de sección. Los vértices del rectángulo se unen a 4 picas con recubrimiento de cobre de 14 mm de diámetro y 2 m de longitud.

Las dos primeras partes descritas anteriormente, están instaladas en el foso eléctrico y pertenecen al conjunto móvil. Deben estar siempre instaladas justo debajo de los elementos del CT para que la tensión de contacto ( $U_{ca}$ ) y de paso ( $U_{pa}$ ) dentro del CT sean nulas al producir dos puntos equipotenciales.

### Circuitos auxiliares

Los circuitos auxiliares están encargados del mando, medida, control, señalización, iluminación y toma de corriente para asistir al propio centro de transformador. Empieza en un subcuadro

denominado cuadro auxiliar de baja tensión (CABT) conectado a una derivación de unas de las fases y el neutro del cuadro de baja tensión. El CABT reparte corriente a los siguientes circuitos protegidos por pequeños interruptores automáticos:

- Circuito de control y telemando.
- Circuito de iluminación.
- Circuito para toma de corriente.

#### **Circuito de control y telemando.**

Alimenta a los sistemas de control del CT de media y baja tensión. Para su protección se instalará un transformador de aislamientos 230 V/230 V en el mismo cuadro de circuito auxiliares.

#### **Circuito de iluminación**

La iluminación está compuesta por una instalación con conductores tipo HO7V-K de sección 1,5 mm<sup>2</sup> con tres puntos de led para iluminar las dos áreas de BT y MT y la zona del transformador. Los conmutadores estarán situados en la proximidad de las puertas de acceso.

Se toma como referencia la indicación de talleres de montajes de piezas medianas de 350 a 1000 lux, escogiendo **500 lux**. Se traduce el dato de intensidad lumínica a potencia eléctrica para dar una idea del bajo consumo que proporciona la tecnología led con la fórmula 16.

$$16) P = \frac{l_x \cdot A}{\eta} = 66,67 \text{ W}$$

- Potencia de consumo eléctrico, P.
- Luminosidad,  $l_x = 500 \text{ lux}$ .
- Área iluminada,  $A = 2 \cdot 6 = 12 \text{ m}^2$ .
- Rendimiento de la tecnología led,  $\eta = 90 \%$ .

#### **Circuito para toma de corriente**

La instalación dispone de una toma de corriente situada en el cuadro auxiliar de baja tensión a disposición de posibles tareas de mantenimiento. Su conductor es del tipo HO7V-K de 2,5 mm<sup>2</sup> para alimentar un posible consumo de 16 A o 3.450 W indicada en tomas de uso general en el ITC-BT-25 suficiente para alimentar el equipamiento de los operarios.

**Consúltense los esquemas eléctricos en el anexo I.**

## 6 CÁLCULOS ELÉCTRICOS PARA EL DIMENSIONADO DE LA APARAMENTA

El centro de transformación tiene componentes que trabajan a tensiones diferentes, lo que conlleva también intensidades diferentes. Ambas magnitudes siempre están ligadas de una manera inversamente proporcional, por tanto, en el lado de alta tensión circula menor corriente que en el lado de baja tensión.

La intensidad en el primario del transformador,  $I_p = 36,37$  A.

$$17) I_p = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_p}$$

- Potencia del transformador,  $S = 630$  kVA.
- Tensión primaria,  $U_p = 10$  kV.

Intensidad en el secundario del transformador,  $I_s = 0,87$  kA.

$$18) I_s = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U_s}$$

- Potencia del transformador,  $S = 630$  kVA.
- Tensión en el secundario,  $U_s = 0,42$  kV.

Intensidad de cortocircuito del primario del transformador,  $I_{ccp} = 22,87$  kA.

$$19) I_{ccp} = \frac{S_{cc}}{\sqrt{3} \cdot U_p}$$

- Potencia de cortocircuito de la red,  $S_{cc} = 396.000$  kVA.
- Tensión primaria,  $U_p = 10$  kV.

Intensidad de cortocircuito del secundario del transformador,  $I_{ccs} = 14,4$  kA.

$$20) I_{ccs} = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot E_{cc} \cdot U_s}$$

- Potencia de transformador,  $S = 630$  kVA.
- Tensión de cortocircuito del transformador,  $E_{cc} = 0,06$  pu.
- Tensión en el secundario  $U_s = 0,42$  kV.

Intensidad dinámica de cortocircuito,  $I_{ccd} = 57,18$  kA.

$$21) I_{ccd} = 2,5 \cdot I_{ccp}$$

## Cálculos puesta tierra, PAT

La puesta tierra tiene la misión de garantizar la seguridad de las personas y proteger al equipamiento del CT con respecto a tensiones que aparezcan durante una derivación de corriente.

### Cálculos de tensiones admisible teniendo en cuenta los valores límites para el cuerpo humano.

Las tensiones de contacto y de paso interiores producidas dentro del CT no se tienen en cuenta en los cálculos al instalarse la malla equipotencial justo debajo del CT. Esta asegura una diferencia de potencial cero dentro de la instalación. Se calcularán las tensiones de contacto y paso exterior.

En primer lugar, se obtienen las admisibles por el ser humano y a continuación las de diseño. Al final, ambas se compararán para comprobar la fiabilidad del diseño.

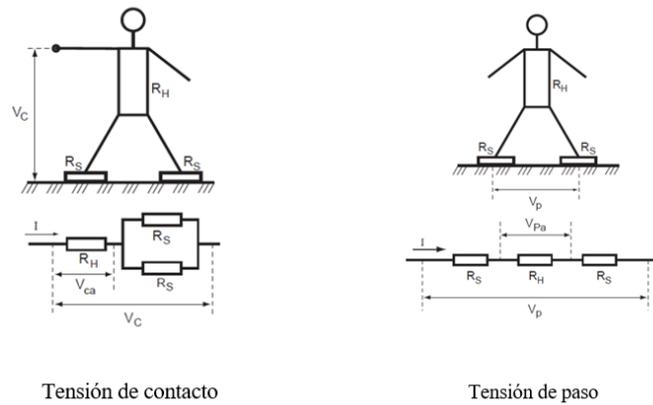


Figura 19. Esquema del comportamiento del cuerpo humano ante el contacto con una falta. [7]

Duración de la corriente de falta, $t_f$ (s)	Tensión de contacto aplicada admisible, (V)
0.05	735
0.10	633
0.20	528
0.30	420
0.40	310
0.50	204
1.00	107
2.00	90
5.00	81
10.00	80
> 10.00	50

Tabla 5. Tensiones de contacto (ITC-RAT 13).

- Tensión de contacto con duración de la falta de un 1 segundo,  $U_{ca} = 107$  V (tabla 5).
- Resistencia del cuerpo humano despreciando la resistencia del calzado:  $1.000 \Omega$ .
- Resistividad del hormigón,  $\rho_h = 3.000 \Omega \cdot m$ .
- Resistividad del terreno,  $\rho_t = 200 \Omega \cdot m$ .

- Cálculo de la tensión admisible de paso exterior:

$$22) U_{p\_ad} = 10 \cdot U_{ca} \left( 1 + \frac{6\rho_t}{1000} \right) = 2.354 \text{ V.}$$

- Cálculo de la tensión admisible de paso de acceso y contacto exterior:

$$23) U_{p(acc)\_ad} = 10 \cdot U_{ca} \left( 1 + \frac{3\rho_t + 3\rho_h}{1000} \right) = 11.342 \text{ V.}$$

**Cálculo de las tensiones según configuraciones del diseño:**

- Diámetro picas,  $D_p = 0,014 \text{ m.}$
- Longitud picas,  $L_p = 2 \text{ m.}$
- Profundidad =  $0,5 \text{ m.}$

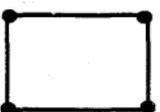
CONFIGURACION	$L_p$ (m)	RESISTENCIA $K_r$	TENSION DE PASO $K_p$	TENSION DE CONTACTO EXT $K_c = K_p(acc)$	CODIGO DE LA CONFIGURACION
Sin picas	-	0.111	0.0225	0.0670	50-40/5/00
4 picas 	2	0.086	0.0192	0.0421	50-40/5/42
	4	0.071	0.0153	0.0307	50-40/5/44
	6	0.061	0.0126	0.0239	50-40/5/46
	8	0.053	0.0107	0.0194	50-40/5/48

Tabla 6. Parámetros característicos de electrodos de puesta tierra (UNESA).

Parámetros sacados de la tabla 6:

- Resistencia,  $K_r = 0,086.$
- Parámetro tensión de paso,  $K_p = 0,0192.$
- Parámetro tensión de contacto exterior,  $K_c = K_p(acc) = 0,0421.$
- Código de la configuración 50-40/5/42.

- Cálculo de la resistencia del electrodo:

$$24) R_t = K_r \cdot \rho_t = 17,2 \Omega.$$

- Cálculo de la intensidad de defecto:

Por método por resolución por circuito de secuencia:

$$25) I_d = \frac{U_1}{\sqrt{3} \cdot |2 \cdot Z(1) + Z(0) + 3R_t|} = 36,39 \text{ A.}$$

Por método UNESA:

$$26) I_d = \frac{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot w \cdot c \cdot l}{\sqrt{1 + (w \cdot c \cdot l)^2 (3R_t)^2}} = 36,35 \text{ A.}$$

- Cálculo de la tensión de defecto:

$$27) U_d = I_d \cdot R_t = 625,87 \text{ V.}$$

- Cálculo de la tensión de paso exterior:

$$28) U_p = k_p \cdot \rho_t \cdot I_d = 139,73 \text{ V.}$$

- Cálculo de la tensión de paso de acceso y contacto exterior:

- Caso de instalación fija con picas justo debajo del CT

$$29) U_{p(\text{acc})} = K_{p(\text{acc})} \cdot \rho_t \cdot I_d = 306,38 \text{ V}$$

- Caso de instalación provisional con picas alejadas del CT

$$30) U_{p(\text{acc})} = U_d = R_t \cdot I_d = 625,87 \text{ V}$$

En un sistema único de protección y de servicio, el neutro de BT del transformador queda conectado al electrodo de protección. Esto limita la tensión de defecto por reglamento a no poder superar los 1000 V dando lugar a la siguiente inecuación:

$$31) U_d = I_d \cdot R_t < 1.000; R_t < \frac{1.000}{I_d}$$

También se puede considerar que, al estar los CT conectados con los cables subterráneos a través de las pantallas formando como una especie de red de PAT, los electrodos de puesta a tierra de los distintos CT quedan conectados en paralelo reduciéndose el valor de la resistencia. Esto da aún más margen de error en los cálculos de la puesta a tierra.

### Verificaciones:

- Comprobación de que estos valores de diseño son iguales o inferiores a los admisibles por el ser humano.

- Caso con instalación propia de picas justo debajo del CT:

$$U_{p(\text{acc})} = 306,38 \text{ V} < 11.342 \text{ V.}$$

$$U_p = 139,73 \text{ V} < 2.354 \text{ V.}$$

- Caso con instalación de picas alejada del CT

$$U_{p(\text{acc})} = U_d = 625,86 \text{ V} < 11.342 \text{ V.}$$

$$U_p = 139,73 \text{ V} < 2.354 \text{ V.}$$

- Comprobación de que el valor de la tensión de defecto  $U_d$  es igual o inferior al nivel de aislamiento del equipo de BT del CT a la tensión recomendada de 1.000 V.

$$U_d = 625,87 \text{ V} < 1.000 \text{ V.}$$

Tensión de aislamiento de fase	10,008 kV
Intensidad en el primario del transformador, $I_p$	36,37 A
Intensidad en el secundario del transformador, $I_s$	0,87 kA
Intensidad de cortocircuito del primario del transformador, $I_{ccp}$	22,87 kA
Intensidad de cortocircuito del secundario del transformador, $I_{ccs}$	14,4 kA
Intensidad dinámica de cortocircuito, $I_{ccd}$	57,18 kA

Tabla 7. Resumen de datos calculados.

# 7 DESCRIPCIÓN DE LA APARAMENTA

La aparamenta principal del CT es el transformador, que esta asistido con elementos de maniobra y protección. Estos elementos son interruptores que tienen una complejidad según su nivel de tensión e intensidad. El equipamiento del CT se diferencia en tres grupos: equipos de MT, transformador y equipos de BT.

## Equipos de media tensión

La celda de MT tiene como elemento principal el interruptor Automático (IA) cuya función es detener el suministro eléctrico cuando haya alguna anomalía o cambio en la distribución y volverlo a conectar cuando proceda. Dispone de tres posiciones:

- Conectado facilitando la continuidad del corriente.
- Abierto para impedir el paso de la corriente.
- Abierto puesto a tierra a través de los seccionadores para impedir el paso de corriente y derivándola a tierra por seguridad.

La capacidad de corte y renganche la facilita la cámara de vacío que evita salto por arco de chispa producidas por altas intensidades en cortocircuitos.



Figura 20. Celda de media tensión PREMSET de Schneider Electric.

Características eléctricas:

- Tensión asignada: 17,5 kV
- Intensidad asignada: 630 A
- Intensidad de corta duración (1 s), eficaz: 25 kA
- Intensidad de corta duración (1 s), cresta: 40 kA
- Nivel de aislamiento a Frecuencia industrial (1 min):
  - Entre tierra y fases: 50 kV.
  - Entre fases: 50 kV.

El transformador trifásico tiene la función de reducir la tensión de 10 kV a 420 V. Dispone de neutro accesible en el secundario y de refrigeración natural seco. Sus arrollamientos están encapsulados dentro resina epoxi. En la tabla 10 se reflejan las ventajas y desventajas con respecto a uno refrigerado por aceite.

<b>Ventajas</b>
Menor coste de instalación al no necesitar instalación de refrigeración por aceite
Menor riesgo de incendio al ser construido materiales autoextinguibles.
<b>Desventajas</b>
Mayor coste de fabricación, del orden del doble a uno de aceite.
Mayor nivel de ruido, medición a 48 dB a 1 m.
Menor resistencia a las sobretensiones.
Mayores pérdidas en vacío.
Menor seguridad al no tener la protección de caja metálica conectada a tierra de uno de aceite.

Tabla 8. Ventajas y desventajas del transformador seco.



Figura 21. Transformador seco TRIHAL TRI063017K2A3YEB1.

Características eléctricas del transformador:

- Potencia: 630 kVA
- Tensión primaria: 10 kV

- Tensión secundaria: 420 V.
- Regulación manual en el primario:  $\pm 4 \times 2.5 \%$
- Tensión de cortocircuito, Ecc: 6%
- Grupo de conexión: Dyn11.
- Pérdidas en carga: 7.100 W a 120 °C.

### Equipo de baja tensión:

El Cuadro de Baja Tensión (CBT) es un módulo que tiene la función de recibir el circuito principal de BT procedente del transformador y distribuirlo a cuatro circuitos individuales de 4 terminales (3 fases y neutro) para alimentar a los posibles abonados. Estos circuitos están protegidos por el interruptor-seccionador fusible que permite visualmente ver el estado de los fusibles y medir sin interrupción de servicio. Su coste es notablemente inferior al IA de media tensión y sus intensidades normalizadas son de 400, 500 y 630 A.



Figura 22. Cuadro de baja tensión Ormazábal.

### Características eléctricas:

- Tensión asignada: 440 V
- Intensidad nominal: 1.600 A
- Nivel de aislamiento a Frecuencia industrial (1 min):
  - Entre tierra y fases: 10 kV.
  - Entre fases: 25 kV.

El cuadro auxiliar de baja tensión (CABT) es un subconjunto del cuadro de baja de tensión encargado de asistir y proteger el circuito auxiliar para las necesidades propias del CT.

Lo componen los siguientes elementos:

- 3 unidades de protección (PIA).
- Un enchufe bipolar con toma de tierra de 16 A/ 250 V.
- Un trafo de aislamiento monofásico "230 V/230 V"

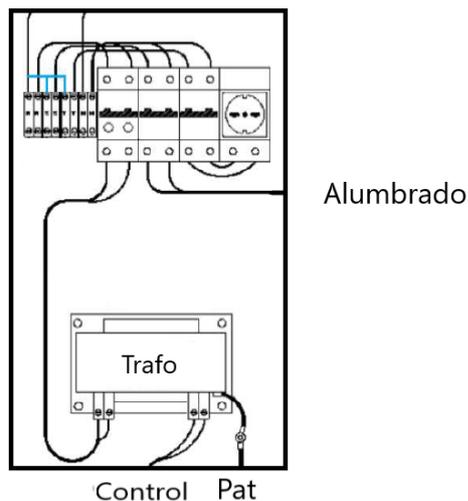


Figura 23. Cuadro auxiliar de baja tensión.

El pequeño interruptor automático o magnetotérmico tiene como función la protección contra sobrecargas y cortocircuitos de los circuitos auxiliares. Son de clase C1 de 10 A para la iluminación y control y de clase C2 de 16 A para la toma de corriente. En la tabla 9 se reflejan los distintos tipos según reglamento de baja tensión, REBT.



Figura 24. Pequeño interruptor automático (PIA), Schneider Electric

Circuito de utilización	Potencia prevista por toma (W)	Factor simultaneidad $F_s$	Factor utilización $F_u$	Tipo de toma <sup>(7)</sup>	Interruptor Automático (A)	Máximo nº de puntos de utilización o tomas por circuito	Conductores sección mínima $\text{mm}^2$ <sup>(8)</sup>	Tubo o conducto Diámetro $\text{mm}$ <sup>(3)</sup>
C <sub>1</sub> Iluminación	200	0,75	0,5	Punto de luz <sup>(9)</sup>	10	30	1,5	16
C <sub>2</sub> Tomas de uso general	3.450	0,2	0,25	Base 16A 2p+T	16	20	2,5	20
C <sub>3</sub> Cocina y horno	5.400	0,5	0,75	Base 25 A 2p+T	25	2	6	25
C <sub>4</sub> Lavadora, lavavajillas y termo eléctrico	3.450	0,66	0,75	Base 16A 2p+T combinadas con fusibles o interruptores automáticos de 16 A <sup>(8)</sup>	20	3	4 <sup>(6)</sup>	20
C <sub>5</sub> Baño, cuarto de cocina	3.450	0,4	0,5	Base 16A 2p+T	16	6	2,5	20
C <sub>8</sub> Calefacción	<sup>(2)</sup>	---	---	---	25	---	6	25
C <sub>9</sub> Aire acondicionado	<sup>(2)</sup>	---	---	---	25	---	6	25
C <sub>10</sub> Secadora	3.450	1	0,75	Base 16A 2p+T	16	1	2,5	20
C <sub>11</sub> Automatización	<sup>(4)</sup>	---	---	---	10	---	1,5	16

Tabla 9. Características PIAs (ITC-BT-25).

El transformador de aislamiento de 230 V/ 230 V produce una separación galvánica del resto de la instalación y la desconexión a tierra evitando una conexión involuntaria a la misma. Su misión es proteger al circuito de control del CT que tienen los consumidores más sensibles a variaciones de la red como son las unidades de procesamiento.



Figura 25. Transformador de aislamiento Manumang serie TA.

Características eléctricas y constructivas:

- Potencia: 2.000 VA.
- Medida: 150x165x145 mm.
- Peso: 14 kg.
- Clase de aislamiento: T40/B.
- Rigidez dieléctrica: 3.500 V (entre primario y secundario), 800 V (entre primario y masa).

## 8 SISTEMAS DE CONTROL Y TELEMANDO

El sistema de control y telemando se utiliza para controlar en tiempo real el estado del CT en particular y de la red en general, con objeto de mantener el suministro con eficiencia y proporcionar tensión entre unos valores admisibles. Es compatible con el medio de comunicación de la compañía distribuidora para mantener su control a distancia desde el centro que gestione la red.

Hay dos tipos de sistemas diferenciados por los dos niveles de tensión que existe en el CT: control y telemando de MT y el analizador de BT.

### Control y telemando de la media tensión.

El sistema opera en las celdas de línea y de protección para gestionar la distribución en MT. Las unidades de procesamientos de datos reciben información a través de los sensores de medida de tensión e intensidad y operan con actuadores en los interruptores. La unidad RGDAT (relé detector de paso de falta) informa de las posibles faltas a la UCT (Unidad Compacta de Telemando) que por automatismo u orden desde el centro de control opera en el CT. En la figura 26 se muestra con un diagrama la estructura principal del sistema de telemando. [5]

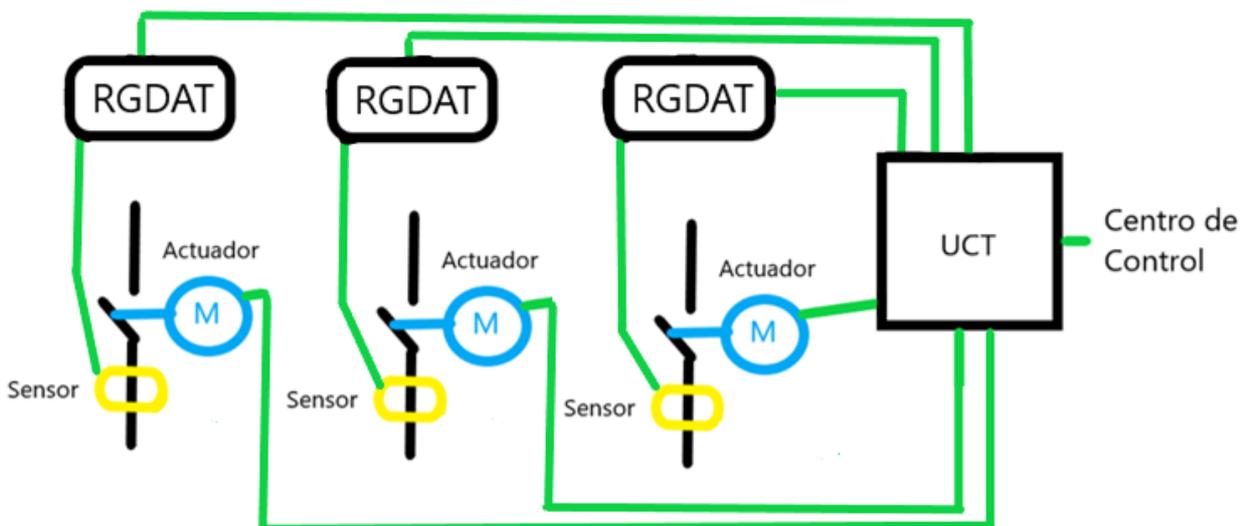


Figura 26. Esquema del sistema de control de media tensión.

A continuación, se describe los elementos principales que componen el sistema.

### Unidad Compacta de Telemando, UCT

Esta unidad se subdivide en los siguientes componentes que se encargan del procesamiento de datos, la alimentación y las comunicaciones:

- **Unidad de procesamiento, UE.**

Es el cerebro del sistema. Denominado UE8 porque tiene capacidad para gestionar hasta 8 interruptores, está en conexión con las celdas, con la RGDAT y con el centro de control para realizar las siguientes tareas:

- Comunicación con centro de control de operación de la red.
- Reporte de pasos de falta.
- Reporte de medidas.
- Control de interruptores de las celdas.

- Automatismo local para aislamiento instantáneo en caso defecto crítico.
- Autodiagnóstico.
- Registro de eventos.
- Configuración y actualización de firmware, local y a distancia.

- **Fuente de alimentación/cargador de baterías, PSBC.**

Se compone de un rectificador de corriente para pasar de una tensión alterna de 230 voltios a continua de 24 voltios. Alimenta las diferentes unidades y mantiene cargadas dos baterías colocadas en serie de 12V de 25Ah para asegurar la continuidad del servicio de control del CT en caso de apagón. En la tabla 10 se establece el consumo máximo del control de la MT para determinar la duración de las baterías en caso de un cero en la instalación.

Mecanismo de rearme y motor	$3 \cdot 380 = 840 \text{ W}$
Disparador	$3 \cdot 50 = 150 \text{ W}$
Unidad de procesamiento, UE	400 W
RGDAT	$3 \cdot 2 = 6 \text{ W}$
Total	1.396 W

Tabla 10. Desglose del consumo en el control.

Las descargas completas no son recomendables para ningún tipo de batería. En una batería de plomo se establece que no se extraiga más del 50% de su carga para que se degrade menos y alargue su vida útil. Con la fórmula 32 se calcula la intensidad y con la fórmula 33 la capacidad mínima óptima de las baterías.

$$32) P = I \cdot V; I = \frac{1.400}{24} = 58,33 \text{ A.}$$

$$33) C = 50 \cdot 0,5 = 25 \text{ Ah.}$$

Como resultado final se calcula el tiempo en hora dividiendo la capacidad entre la intensidad con la fórmula 34 dando resultado una autonomía de 25 min al sistema de control de MT.

$$34) t = \frac{C}{I} = 0,428 \text{ horas.}$$

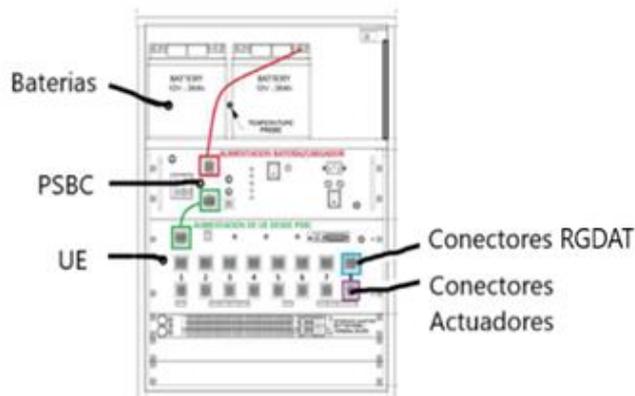


Figura 27. Unidad compacta de telemando.

- **Comunicaciones entre el Centro de Control y el CT.**

El sistema ethernet es el utilizado por la compañía distribuidora en Melilla. Es una red de ámbito local (LAN) que transmite los datos por un medio físico utilizando un puerto Ethernet RJ45.



Figura 28. Ejemplo de tarjeta de comunicaciones por ethernet.

También se podría acoplar los siguientes sistemas que no necesitan un soporte físico:

- **TETRA:**

Protocolo de radio digital que opera en una banda de 380 MHz a 470 MHz para usuarios profesionales que requieren comunicaciones seguras.

- **DMR:**

Digital Mobile Radio permite que diferentes tipos de fabricantes trabajen en una misma red.

- **GPRS:**

Servicio general de paquetes vía radio permite transmitir todo tipo de información.

- **VSAT:**

Red privada de comunicación de datos vía satélite para transmitir información.

### **Relé detector de paso de falta, RGDAT**

El relé detector de paso de falta proporciona información de posibles cortocircuitos en la red de MT para facilitar la localización de la misma. Tiene un consumo medio de 2 W, unas dimensiones de 240x170x30 mm y se configura y calibra mediante el software específico.

Cada equipo monitoriza una celda del CT y se comunica con los demás elementos de la siguiente manera:

- La conexión del RGDAT con la UCT se realiza con un cableado con un bornero de 10 pines que realiza las siguientes funciones:
  - Alimentar al equipo RGDAT a 24V DC.
  - Entrada digital para activación de función de inversión de dirección de vigilancia (una celda puede cambiar de función de entrada a salida de corriente o viceversa).
  - Salidas digitales de señalización de falta y presencia tensión.
  - Salida analógica de medida de corriente.
- La conexión del RGDAT con las celdas de MT se realiza a través de un cableado con un bornero de 8 pines para acometer lo siguiente:
  - Medir corriente mediante bobinas Rogowski.
  - Detector de tensión mediante divisores de tensión capacitivos.



Figura 29. RGDAT Tesmec A70.

### Sensores

La bobina Rogowski basa su funcionamiento en que la corriente del conductor crea un campo magnético que induce un voltaje entre los terminales de la bobina de Rogowski. Es parecido al comportamiento de un transformador tradicional. En este caso el primario es el propio cable, no existe núcleo de hierro (es el aire) y el secundario es la bobina Rogowski. La salida de las bobinas Rogowski está conectada a un circuito integrador que traduce un voltaje proporcional a la señal de corriente de entrada como muestra la figura 30.

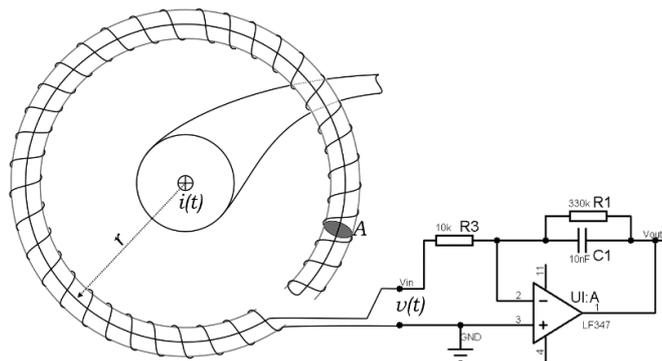


Figura 30. Esquema del funcionamiento de la bobina Rogowski.

Tiene las siguientes ventajas con respecto al transformador de intensidad:

- Fácil instalación, no hace falta desconectar la línea.
- Reducidas dimensiones y bajo peso, carece de núcleo de hierro.
- Amplitud de rango de medida, no satura.
- Menor coste económico

La precisión de medida depende de la posición de captador como la siguiente imagen de la figura 31.

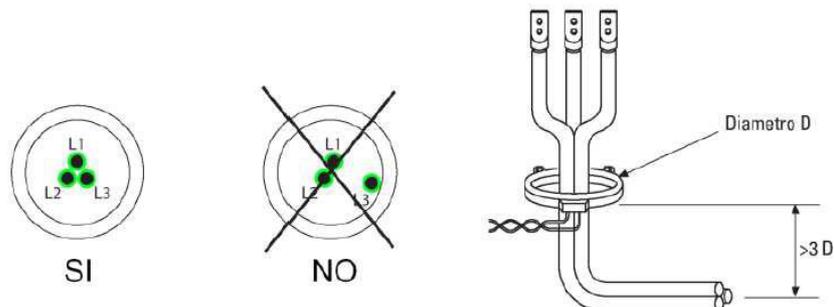


Figura 31. Esquema de posicionamiento del captador de intensidad.

El detector de tensión capacitivo se basa en la repartición de la tensión entre varias capacidades para reducir su valor y poder detectarla. El voltaje más alto se acumulará en el condensador más pequeño al ser la impedancia inversamente proporcional a la capacidad ( $X_c = 1/2\pi fC$ ). Esto producirá mayor reducción de su valor si lo colocamos el de menos capacidad próximo al lado de alta tensión.

Tiene las siguientes ventajas respecto otros sistemas convencionales de medida como los transformadores de tensión:

- Reducido en peso y tamaño.
- No es saturable.
- Es ecológico al necesitar menos material para su construcción.

$$V_{out} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} * V_{in}$$

Siendo  $C_1 < C_2$

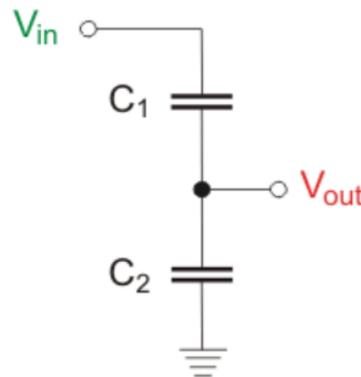


Figura 32. Esquema simplificado de un divisor capacitivo.

### Actuadores

El mecanismo que actúa en los interruptores automáticos debe asegurar que la apertura o el cierre del mismo sea muy rápido. El interruptor se mantiene cerrado o abierto con un rearme efectuado por engranajes que tensan a unos muelles accionados por un motor (figura 33). Para cambiar de estado, se libera con el disparador (figura 34) al rearme quedando los muelles en estado de reposo. Por tanto, se asegura la rapidez de movimiento con ese doble mecanismo de cierre y apertura.

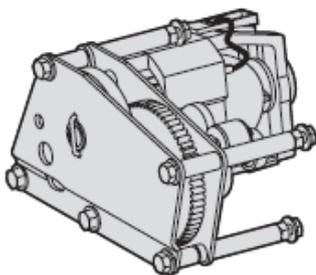


Figura 33. Mecanismo de rearme y motor de 380 W.

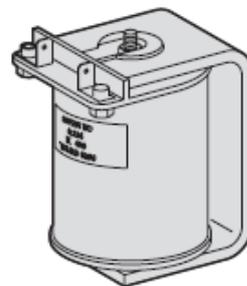


Figura 34. Disparador de 50 W.

### Analizador de la baja tensión, ABT

El control del cuadro de baja tensión lo realiza el analizador de redes (figura 35) también compatible con las comunicaciones ethernet del sistema. Se conectará entre la salida de Baja Tensión y el transformador. Exporta todas las magnitudes eléctricas medidas y los mostrara en el mismo CT a través de un display. Tiene unas dimensiones de 150 x 150 mm, se alimentación a 230 V AC y consume unos 15 W.

Dispone de softwares y una memoria interna para analizar y almacenar los siguientes parámetros:

- El valor eficaz de corriente y de tensión.
- La potencia y el factor de potencia.
- Variación rápida de tensión denominadas flickers.
- Distorsión total armónica, THD.

Su instalación proporciona las siguientes ventajas para la realización de posibles mantenimientos y mejorar en calidad y eficiencia la red de BT:

- Descubrir y evitar excesos de los consumidores.
- Análisis de la demanda energética.
- Detección de necesidades en la instalación como pueden ser la compensación de reactiva con batería de condensadores.
- Al identificar los armónicos, se podrá diseñar filtros activos y pasivos para disiparlos.

A diferencia del de MT no contiene actuadores telemandados, dispone de sensores para captar información, procesarla, enviarla y estudiarla en el centro de control.

Para medir la intensidad se utilizan cuatro transformadores de intensidad parecidos al sistema anterior, tres para las fases y una para el neutro.

Para las medidas de tensiones, se conectará al embarrado protegidos con fusibles a sensores instalados en el propio modulo.



Figura 35. Analizador de redes Circutor CVB-150.

## 9 MÉTODO DE REFRIGERACIÓN

La función principal de la refrigeración es disipar las pérdidas magnéticas y por efecto Joule en los arrollamientos del transformador. UNESA recomienda que la diferencia de temperatura entre el aire del interior y del exterior no debe sobrepasar los 15 grado centígrados.

Como método de refrigeración se aprovecha su situación exterior para renovar el aire por convección natural. Cuando el aire se calienta baja su peso específico y sube hacia arriba lo que produce una renovación de aire natural colocando aberturas hacia el exterior de distintas alturas en paredes opuestas. Esas aberturas deben tener un diseño que impidan la entrada de agentes externos como pequeños seres vivos o la entrada de agua cuando llueva.

El cálculo del área de las rejillas de ventilación depende de las propiedades termodinámicas del aire y de la potencia calorífica que equivale a las pérdidas del transformador. Esta como hemos descritos al principio es igual a la suma de las pérdidas en el hierro (PFe) y las pérdidas en el cobre (PCu) del transformador a plena carga como indica la expresión 35.

$$35) P = P_{Fe} + P_{Cu}$$

Para relacionar las superficies de entrada y salida con la convención, se utilizan las expresiones 36 y 37:

$$36) S_E = \frac{P}{0,24 \cdot \lambda \cdot \sqrt{H(t_i - t_e)^3}}$$

$$37) S_E = 0,73 \cdot S_S$$

Siendo:

- Potencia calorífica evacuada o perdidas del transformador en carga,  $P = 7,1$  kW.
- Coeficiente de forma de las rejillas de ventilación,  $\lambda$  (se toma  $\lambda = 0,5$ ).
- Superficie del hueco de entrada de aire,  $S_E$  (m<sup>2</sup>).
- Superficie del hueco de salida de aire,  $S_S$  (m<sup>2</sup>).
- Distancia vertical entre los centros geométricos de la entrada y salida de aire,  $H$  (m).
- Temperatura en el interior del recinto,  $t_i$  (°C) y exterior,  $t_e$  (°C) (se toma  $t_i - t_e = 15$  °C por UNESA).

Introduciendo los datos ya conocidos se llega a dos ecuaciones con dos incógnitas y a la tabla 11 que fija valores de  $H$  para obtener las superficies:

$$38) S_E = \frac{7,1}{0,12 \sqrt{H \cdot 15^3}} = 0,73 \cdot S_S$$

<b>H (m )</b>	<b>S<sub>E</sub> (m<sup>2</sup> )</b>	<b>S<sub>S</sub> (m<sup>2</sup> )</b>
0,8	1,14	1,559
0,9	1,074	1,47
1	1,018	1,395
1,1	0,971	1,33
1,2	0,929	1,273

Tabla 11. Comparación de altura de desnivel con superficie de los respiradores.

Se llega a la conclusión de que, a mayor desnivel de altura, menor superficie de respiraderos hay que poner para realizar la misma convención fijando una diferencia de 15 grados centígrados entre el interior y el exterior del CT recomendada en la norma.

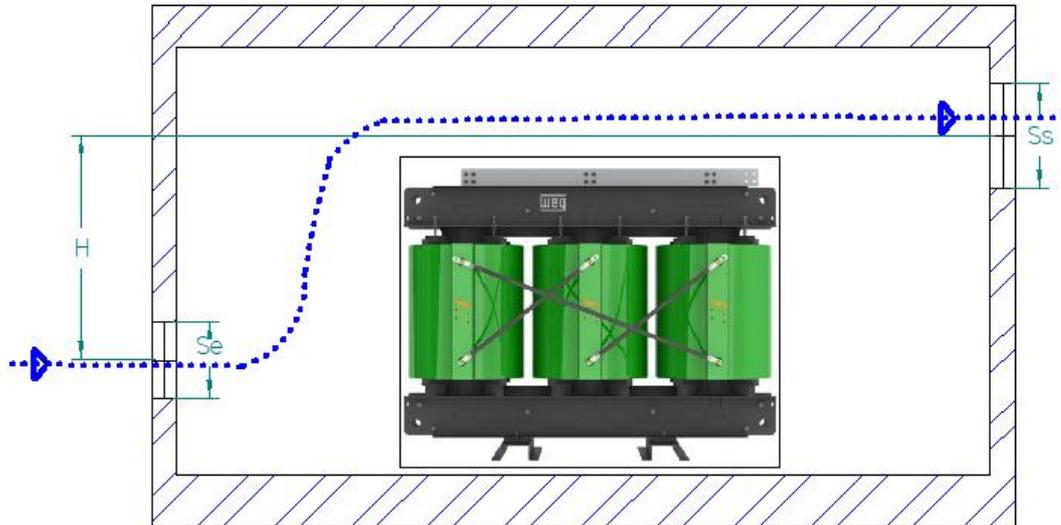


Figura 36. Esquema de la refrigeración del CT.

Se determina para el diseño:

- Un desnivel entre los centros de los respiraderos de 1,2 metros.
- Rejilla de entrada de aire de 1x0,93 m con una superficie,  $S_e=0,93 \text{ m}^2$
- Rejilla de salida de aire de 1x1,27 m con una superficie,  $S_s=1,27 \text{ m}^2$

# 10 ESTUDIO DE CONTAMINACIÓN ACÚSTICA

La contaminación acústica es la presencia en el ambiente de vibraciones que implica riesgo o daño para las personas o que cause efectos significativos sobre el medio ambiente. El ruido es un caso particular dañino de estas vibraciones.

Es una onda que se propaga por el aire y se caracteriza por su frecuencia, su nivel de presión o intensidad sonora y su duración. La unidad de medida es el decibelio, dB.

Este apartado tiene como objeto el cálculo teórico del nivel de ruido que emite el centro de transformación ubicado en el exterior y comparar dicho nivel con los límites reglamentariamente establecidos.

## Estimación del nivel potencia acústica emitida por el transformador.

El elemento que imite ruido principalmente en un CT es el transformador. Para estimar su potencia acústica se utiliza una tabla 12 sacada de la norma UNE-EN 50708-2-1:2021 que establece parámetros según la potencia de cada transformador.

Potencia asignada	TIER1 $P_k$	TIER1 $P_0$	TIER2 $P_k$	TIER2 $P_0$	$L_{WA}$	Impedancia de cortocircuito
kVA	W	W	W	W	db(A)	%
≤ 50	1 700	200	1 500	180	49	6
100	2 050	280	1 800	252	51	6
160	2 900	400	2 600	360	54	6
250	3 800	520	3 400	468	57	6
400	5 500	750	4 500	675	60	6
630	7 600	1 100	7 100	990	62	6
800	8 000	1 300	8 000	1 170	64	6
1 000	9 000	1 550	9 000	1 395	65	6
1 250	11 000	1 800	11 000	1 620	67	6
1 600	13 000	2 200	13 000	1 980	68	6
2 000	16 000	2 600	16 000	2 340	70	6
2 500	19 000	3 100	19 000	2 790	71	6
3 150	22 000	3 800	22 000	3 420	74	6

Tabla 12. Pérdidas, niveles acústicos e impedancias de cortocircuito (UNE-EN 50708-2-1:2021)

A partir de la tabla 12 se saca que la potencia acústica ( $L_{WA}$ ) para un transformador seco de 630 kVA es de 62 db(A) traducida a presión sonora ( $L_p$ ) en función de la distancia a la que se mide el ruido con la ecuación 39 cuyo dato es similar al proporcionado por el fabricante de 48 db.

$$39) L_p = L_{WA} - 20 \cdot \log(d = 1,5) - 10,9 = 47,58 \text{ db}$$

Para la obtención para cada nivel de presión sonora de emisión del transformador, en octavas de frecuencia de los niveles de emisión del transformador, se interpola los valores de la presión acústica indicada en la tabla 13 según el valor calculado anteriormente. Dando como resultados de la interpolando lineal los valores señalados en la tabla 14.

<i>f(Hz)</i>	<i>Presión acústica dB(A)</i>				
	<b>70,9</b>	<b>60,9</b>	<b>50,4</b>	<b>45,8</b>	<b>38,5</b>
100	43,7	33,7	23,2	18,6	11,7
125	39,9	29,9	19,4	14,8	5,7
160	55,4	45,4	34,9	30,3	23,4
200	55,7	45,7	35,2	30,6	23,7
250	68,6	58,6	48,1	43,5	36
315	62,4	52,4	41,9	37,3	30,4
400	52,5	42,5	32	27,4	20,5
500	60,5	50,1	39,6	35	28,1
630	51,9	41,9	31,4	26,8	19,9
800	51,5	41,5	31	26,4	19,5
1000	51,6	41,6	31,1	26,5	19,6
1250	50,1	40,1	29,6	25	18,1
1600	52,4	42,4	31,9	27,3	20,4
2000	55,4	45,4	34,9	30,3	23,4
2500	49,1	39,1	28,6	24	17,1
3150	50,3	40,3	29,8	25,2	18,3
4000	44,5	34,5	24	19,4	12,5
5000	42,5	32,5	22	17,4	10,5

Tabla 13 .Valores de presión acústica según valores en octavas de frecuencia.

<i>f(Hz)</i>	<i>Rglobal (dB(A))</i>	<i>f(Hz)</i>	<i>Rglobal (dB(A))</i>
100	20,4	800	28,2
125	16,6	1000	28,3
160	32,1	1250	26,8
200	32,4	1600	29,1
250	45,3	2000	32,1
315	39,1	2500	25,8
400	29,2	3150	27
500	36,8	4000	21,2
630	28,6	5000	19,2

Tabla 14. Valores de la interpolación.

El valor global de la presión sonora de emisión resulta con el sumatorio de los valores anteriores en la expresión 40:

$$40) \text{Emisión. total} = 10 * \log \left[ \sum 10^{R_{\text{global}}/10} \right] = 47,57 \text{ dB}$$

### Cálculo del ruido absorbido por la envolvente del transformador.

El ruido es atenuado por los elementos que envuelven al transformador limitando su percepción desde el exterior del CT con las paredes, las puertas y las rejillas de ventilación. Los valores de ruido que absorbe son obtenidos mediante tablas según los distintos valores en octavas de frecuencias del sonido como ocurría con la emisión.

Dimensiones de los diferentes elementos que constituyen el CT:

- Superficie ocupada por las puertas (1,3 x 2,2m),  $S_{\text{puertas}} = 2,86 \text{ m}^2$ .
  - Superficie ocupada por la rejilla de ventilación (1 x 0,93),  $S_{\text{ventanas}} = 0,93 \text{ m}^2$ .
  - Superficie de la pared (longitud CT,  $L_{\text{CT}} = 5,9 \text{ m}$ , altura CT,  $H_{\text{CT}} = 2,3 \text{ m}$ ).
- 41)  $S_{\text{pared}} = L_{\text{CT}} \cdot H_{\text{CT}} - S_{\text{puertas}} - S_{\text{ventanas}} = 9,78 \text{ m}^2$ .

Los cálculos de los valores de absorción global, en octavas de frecuencia, se realizan con la fórmula 42 y se ven reflejados en la tabla 15.

$$42) R_{\text{global}} = 10 \cdot \log \left( \frac{S_{\text{pared}} + S_{\text{puerta}} + S_{\text{rejilla}}}{\frac{S_{\text{pared}}}{10^{(0.1 \cdot R_{\text{pared}})}} + \frac{S_{\text{puerta}}}{10^{(0.1 \cdot R_{\text{puerta}})}} + \frac{S_{\text{rejilla}}}{10^{(0.1 \cdot R_{\text{rejilla}})}}} \right)$$

F (Hz)	Rrejillas	Rpuertas	Rparedes	Rglobal
100	2,5	18,3	18,3	12,5852427
125	1,7	14,9	14,9	10,9801548
160	7,1	17,1	17,1	14,8904829
200	8,2	16,3	16,3	14,8321998
250	6,3	17,0	17,0	14,4663457
315	5,3	18,0	18,0	14,3855234
400	2,6	18,6	18,6	12,7340841
500	4,1	19,9	19,9	14,1852427
630	9,2	20,5	20,5	17,6661162
800	16,1	21,4	21,4	20,6958937
1000	20,8	21,9	21,9	21,8087147
1250	28,3	21,7	21,7	21,9575086
1600	37,1	21,8	21,8	22,1222612
2000	33,7	19,9	19,9	20,2180667
2500	37,7	18,2	18,2	18,5285708
3150	35,2	21,0	21,0	21,31933
4000	36,1	22,4	22,4	22,7177323
5000	36,9	23,6	23,6	23,9163154

Tabla 15. Valores de ruido que absorben cada elemento y del total.

Cálculo de la absorción total de la envolvente del transformador:

$$43) \text{Absorción. total} = 10 \cdot \log \left[ \sum 10^{R_{\text{goblar}}/10} \right] = 32 \text{ dB.}$$

La conclusión del estudio del ruido percibido por un receptor a una distancia de metro y medio del centro de transformación es de 12,048 dB (ver formulas 44 y 45).

- *Emission. total* = 47,57 dB.
- Absorción. total = 32,0 dB.

$$44) \text{Inmisión. total} = \text{Emission. total} - \text{Absorción. total} = 15,57 \text{ dB.}$$

$$45) \text{Inmisión. receptor} = \text{Inmisión}_{\text{total}} - 20 \cdot \log(d = 1,5) = 12,048 \text{ dB.}$$

### Comparación del nivel de inmisión con los valores exigidos por la norma.

El R.D. 1367/2007 establece los objetivos de calidad acústica para ruido aplicables a distintos espacios como por ejemplo de usos residenciales, hospitalarios, educativos o culturales de día, tarde o noche.

Viendo los resultados de la percepción del sonido producido por el transformador de **12,048 db** es muy inferior a los índices de ruidos permitidos por la norma en lugares sensibles como puede ser un hospital durante la noche de 30 db, valor sacado de la tabla 16.

Uso del edificio	Tipo de Recinto	Índices de ruido		
		L <sub>d</sub>	L <sub>e</sub>	L <sub>n</sub>
Vivienda o uso residencial	Estancias	45	45	35
	Dormitorios	40	40	30
Hospitalario	Zonas de estancia	45	45	35
	Dormitorios	40	40	30
Educativo o cultural	Aulas	40	40	40
	Salas de lectura	35	35	35

Tabla 16. Índice de ruidos en espacios críticos según tipo de recinto y horarios (R.D. 1367/2007).

En caso de que dichos niveles se hubieran sobrepasados se tomarían las siguientes medidas:

- Aumentar el espesor de las paredes exteriores o los interiores.
- Crear unas cámaras de aire colocando una doble pared con un hueco en medio.
- Emplear amortiguadores para reducir las vibraciones del transformador.

# 11 ESTUDIO DEL CAMPO MAGNÉTICO

El estudio del campo magnético es necesario porque a partir de ciertos niveles son nocivos por una cuestión de salud pública, el ser humano es un organismo bioeléctrico y se ve afectado por el mismo. También influye en el funcionamiento de instalaciones próximas en la electrónica y la electricidad de los sistemas. Su efecto es de poco alcance, se reduce drásticamente a poca distancia del emisor.

Los campos electromagnéticos, en este caso, son generados por el paso de corriente eléctrica a través de un conductor. Se define en la ecuación 46.

$$46) B = \frac{\mu_0 \cdot i}{4\pi} \int \frac{U_t \times U_r}{r^2} dl.$$

- Vector campo magnético existente en un punto P del espacio, B.
- Vector unitario de dirección tangente al circuito,  $U_t$ .
- Vector unitario que señala la posición del punto P respecto al conducto,  $U_r$ .
- Permeabilidad del espacio libre  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Tm/A}$ .

Para simplificar su cálculo, se coloca el eje z paralelo a cada tramo recto como se refleja en la figura 37 para anular la componente z del vector campo magnético dando como resultado la ecuación 47.

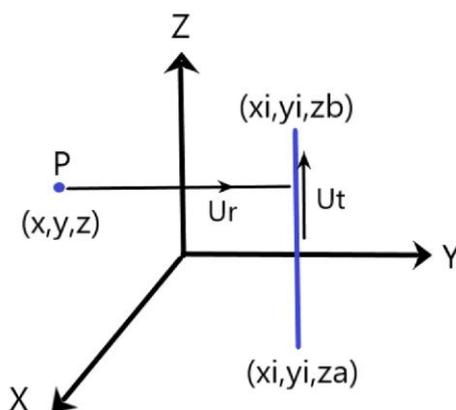


Figura 37. Esquema del sistema de coordenadas.

$$47) B(P) = B_x \cdot U_x + B_y \cdot U_y = \frac{\mu_0 \cdot I}{4\pi((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2)} \cdot ((y_i - y)U_x - (x_i - x)U_y) \cdot \left[ \frac{z_b - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_b - z)^2}} - \frac{z_b - z}{\sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z_a - z)^2}} \right]$$

En los cambios de dirección de los conductores, se mantiene el eje z paralelo multiplicando la ecuación 47 por la matriz de transformación,  $T_x$  (ecuación 48) de giro de los ejes de referencias que se efectúa sobre el eje x.

$$48) T_x = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(g) & \text{sen}(g) \\ 0 & -\text{sen}(g) & \cos(g) \end{pmatrix}.$$

Los tramos verticales y horizontales de los cables de entrada y salida del transformador están reflejados en los planos contenidos en la figura 38.

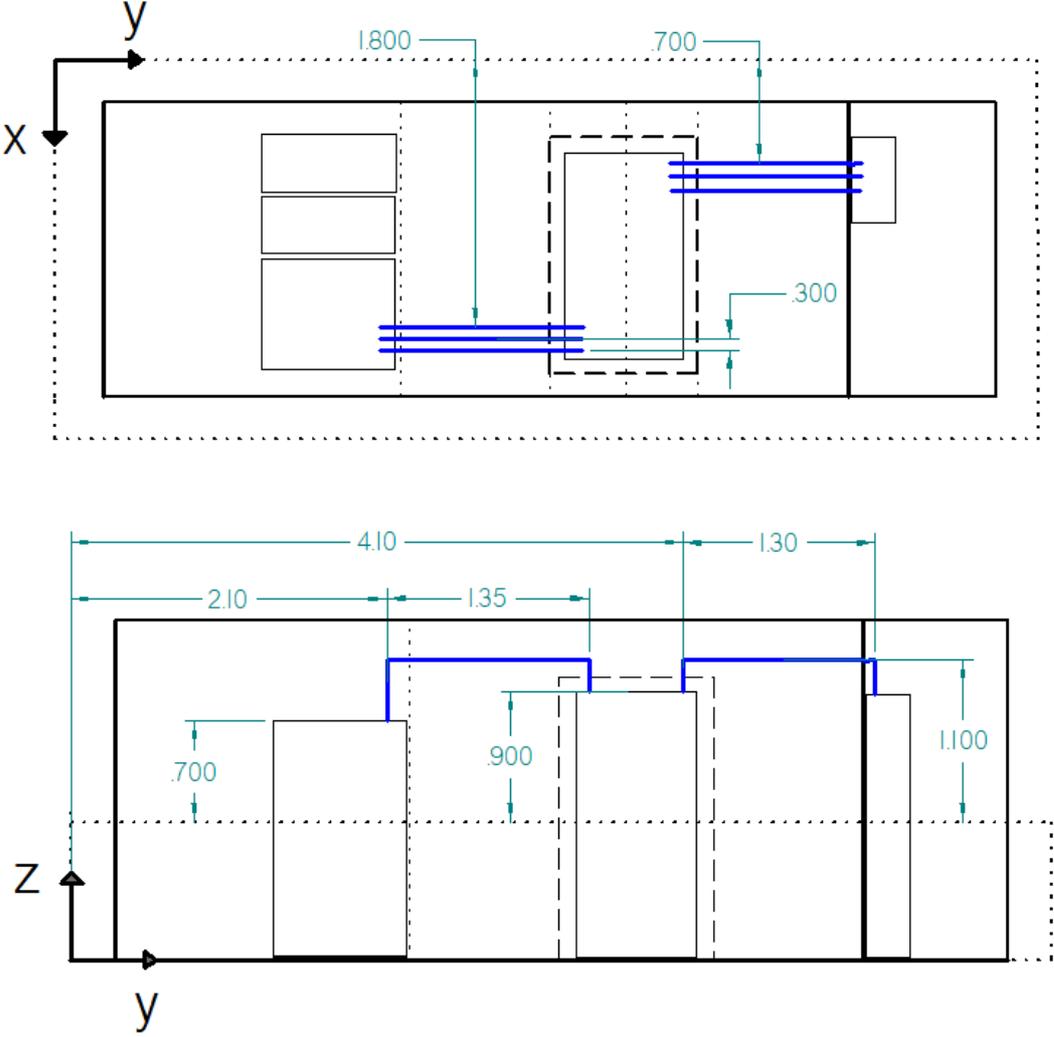


Figura 38. Planos de situación de conductores (unidades en m).

La figura 39 refleja la denominación de cada tramo, los conductores del tipo A son la alimentación de MT al transformador y los B sus salidas de BT. La situación espacial de cada tramo y su intensidad están contenida en la tabla 17.

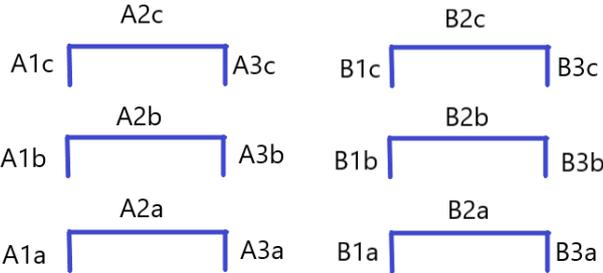


Figura 39. Denominación de los tramos.

Tramo	xi (m)	yi (m)	za (m)	zb (m)	I (A)	Tramo	xi (m)	yi (m)	za (m)	zb (m)	I (A)
A1a	2,4	2,1	0,7	1,1	36,7	B1a	1,3	4,1	0,9	1,1	910
A2a	2,4	2,1- 3,45	1,1	1,1	36,7	B2a	1,3	4,1- 5,4	1,1	1,1	910
A3a	2,4	3,45	1	0,9	36,7	B3a	1,3	5,4	1,1	0,9	910
A1b	2,1	2,1	0,7	1,1	36,7	B1b	1	4,1	0,9	1,1	910
A2b	2,1	2,1- 3,45	1,1	1,1	36,7	B2b	1	4,1- 5,4	1,1	1,1	910
A3b	2,1	3,45	1	0,9	36,7	B3b	1	5,4	1,1	0,9	910
A1c	1,8	2,1	0,7	1,1	36,7	B1c	0,7	4,1	0,9	1,1	910
A2c	1,8	2,1- 3,45	1,1	1,1	36,7	B2c	0,7	4,1- 5,4	1,1	1,1	910
A3c	1,8	3,45	1	0,9	36,7	B3c	0,7	5,4	1,1	0,9	910

Tabla 17. Coordenadas de conductores e intensidades por tramos.

Para calcular el efecto del campo magnético se establece un perímetro que rodea al centro de transformación separado a 1 m del suelo y a 0,3 m de distancia del CT. Para los puntos P situado en ese recorrido cada 0.1 m, se efectúa la norma del sumatorio de las componentes del vector magnético de todos los conductores citado anteriormente. El origen de coordenadas se fija en el extremo izquierdo superior de la planta de ese perímetro para abarcar todos los puntos con valores positivos (ver figura 40).



Figura 40. Planta del contorno con los tramos para calcular el campomagnético.

En las figuras 41, 42, 43 y 44 se muestran las distintas gráficas con los valores obtenidos del campo magnético en los tramos del contorno alrededor del CT.

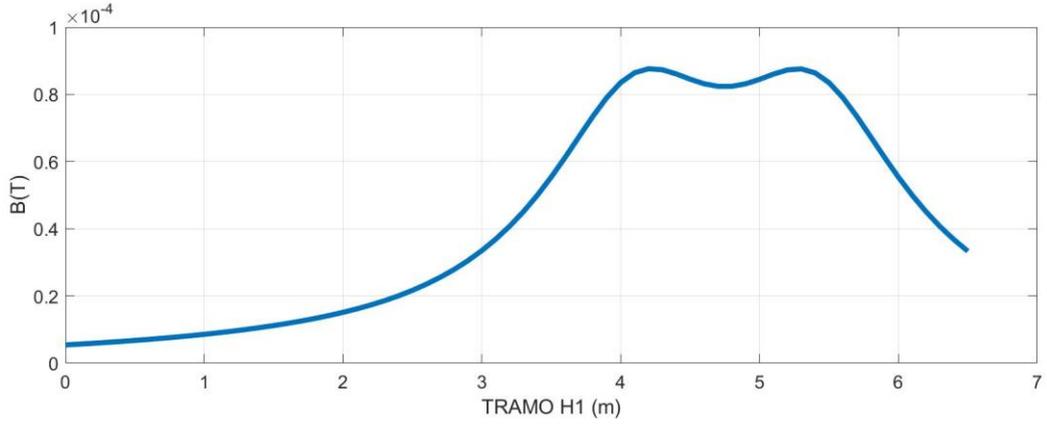


Figura 41. Campo magnético en tramo horizontal H1.

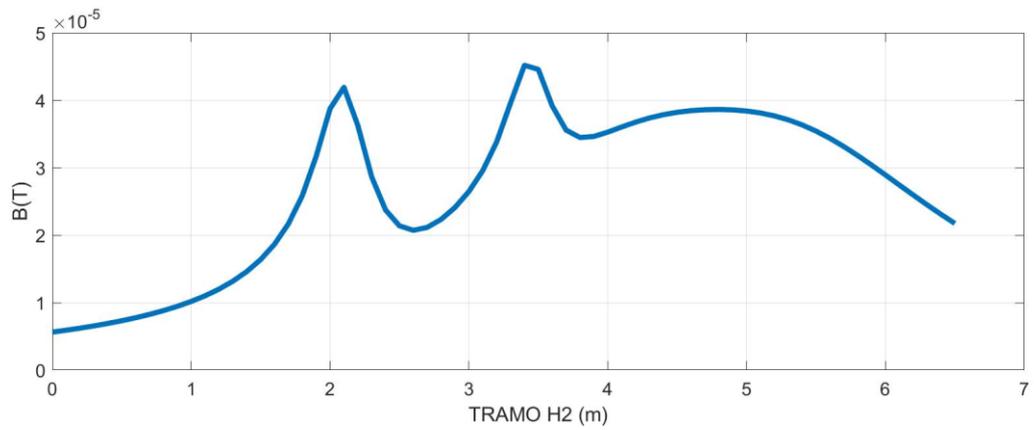


Figura 42. Campo magnético en tramo horizontal H2.

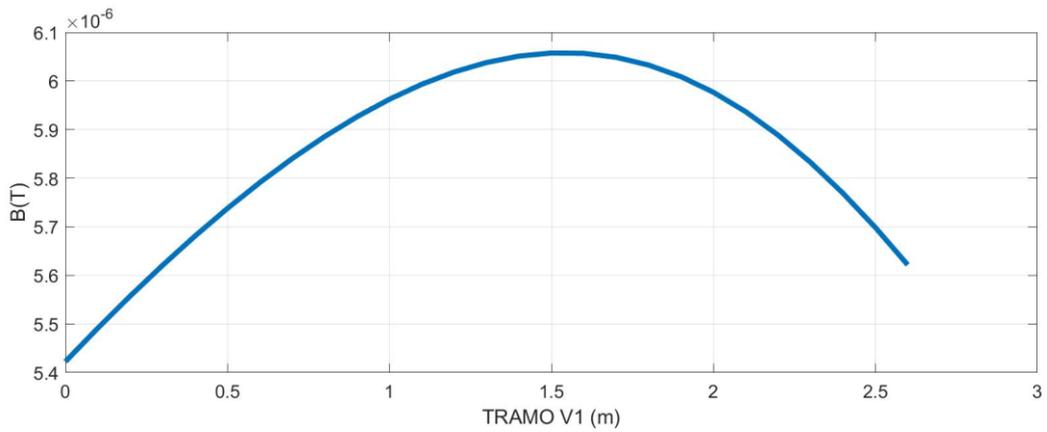


Figura 43. Campos magnéticos en tramo vertical V1.

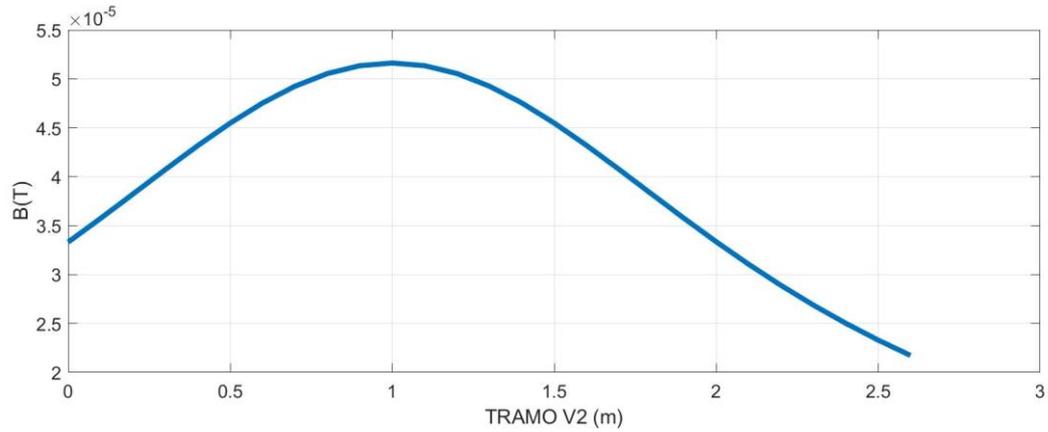


Figura 44. Campos magnéticos en tramo vertical V2.

En las gráficas se observa que el valor pico se alcanza en la parte final del tramo H1, llegando a unos  **$B= 9 \times 10^{-5} \text{ T}$**  por debajo del límite establecido de  $20 \times 10^{-5}$  Teslas. Se establecen en esa zona al ser la más próxima a los cables de mayor intensidad del secundario del trafo.

Los diferentes picos que aparecen en las siluetas de las gráficas son producidos por los tramos verticales de los conductores. En la medición de un mismo punto se suman todos los valores del tramo vertical.

# 12 ELEMENTOS DE SEGURIDAD

---

En este apartado se describen los distintos aspectos que intervienen en la seguridad, de gran importancia no solo por cumplir con la normativa vigente, sino también por contribuir con el diseño al bienestar de los posibles operarios del centro de transformación.

## **Iluminación.**

Una buena iluminación es un elemento de seguridad al ser necesaria para realizar adecuadamente las tareas de mantenimientos o control. Con tres puntos de luz con una intensidad lumínica de 500 lux se garantiza una buena visibilidad.

## **Espacios adecuados para trabajar.**

Los pasillos y espacios diseñados en la distribución de los componentes del CT garantiza separar la zona de MT de la de BT, espacios suficientes para maniobrar sin contactar con elementos en tensión y resguardo de elementos del exterior como puede ser la lluvia a la hora de trabajar con electricidad.

## **Enclavamientos.**

Los enclavamientos son medidas de seguridad impuestas por mecanismos que bloquean una determinada acción cuando se realiza otra para reducir los riesgos. Están instalado en las celdas de media tensión al ser los espacios de mayor tensión donde maniobran los operarios. Los más destacados son para:

- No conectar el seccionador de puesta a tierra con el IA cerrado
- No cerrar el IA si el seccionador de puesta a tierra está conectado.
- No quitar la tapa frontal si el seccionador de puesta a tierra está abierto.
- No abrir el seccionador de puesta a tierra cuando la tapa frontal no este colocada.

## **Placas de señalización de seguridad.**

Se expone con claridad la placa donde se describirán los primeros auxilios básicos y la placa de señalización con las 5 reglas de oro. En esta se define los procedimientos estándares de obligado cumplimiento para minimizar el riesgo eléctrico en trabajos sin tensión:

1. Desconectar.
2. Enclavamiento, bloqueo y señalización.
3. Comprobar ausencia de tensión.
4. Poner a tierra.
5. Señalizar la zona de trabajo.

## **Banqueta aislante.**

La plataforma y las patas son de material aislante para aislar al operario del suelo y no cerrar el circuito a través de la tierra. La base de sustentación de la banqueta formada por los extremos inferiores de las patas podrá abarcar un cuadrado cuyo lado medirá como máximo 90 cm.



Figura 45. Banqueta aislante.

## **Pértiga de salvamento y guantes aislante.**

Estos equipos estarán diseñados para permitir al trabajador efectuar su tarea sin tener que aproximarse o entrar en contacto con las partes activas de la instalación de MT. Además de aumentar la resistencia de contacto y dificultar el paso de corriente eléctrica, mediante sus dimensiones ayudan a mantener una distancia adecuada para evitar los arcos eléctricos. Están dotadas de una empuñadura o en su defecto de unas marcas que indicarán

a partir de donde se debe colocar nunca las manos. Tiene la función de salvamento o comprobaciones de puesta tierra y se ha de combinar con guantes aislantes y banqueta aislante.



Figura 46. Pértiga y guantes aislantes de Alta Tensión.

# 13 TRANSPORTE E INSTALACIÓN

El transporte del objeto diseñado es multimodal, es decir que se puede transportar tanto por tierra, mar y aire. Para estandarizarlo se elige el denominado contenedor ISO, diseñado siguiendo la normativa ISO-668. Estos contenedores permiten transportar objetos voluminosos o pesados como pueden ser motores o maquinaria.

Son fabricados principalmente de acero corten y en sus esquinas tiene alojamientos para los twistlocks que les permiten ser enganchados por grúas especiales, en buques, en aviones o en camiones.

Teniendo en cuenta lo descrito anteriormente, se elige para el transporte el contenedor **ISO 20 Flat Rack** empleados para cargas atípicas. Carecen de paredes laterales e incluso, en algunos casos, sin paredes delanteras o traseras, pero mantienen su estructura, por tanto, son aptos para transporte multimodal. En la tabla 18 se muestran sus dimensiones y sus capacidades máxicas. En la tabla 19 se desglosa una estimación de las masas de los elementos principales del centro de transformación y verifica que cumple las tolerancias del contenedor.

Largo exterior	6,06 m	Alto	2,591 m
Largo interior	5,95 m	Peso máximo	30.000 kg
Ancho exterior	2,44 m	Tara	2.890 kg
Ancho interior	2,33 m	Carga neta	27.110 kg

Tabla 18. Dimensiones del contenedor.



Figura 47. Plataforma de transporte ISO 20 Flat Rack.

Elementos significativos	Peso (Kg)
Celdas MT	300
Transformador	1.700
Cuadro de BT	100
Cuadros de control	30
Cuadro auxiliar	20
Estructura	5.000
Total	7.150

Tabla 19. Estimación de peso del CT Móvil.

### Instalación del CT en el punto de servicio.

La versatilidad del diseño permite tres tipos de instalaciones según las necesidades que tengan que cubrir: provisional, provisional prolongada y permanente.

- **Instalación provisional.**

La provisional se usará para suplir posibles averías en centros de transformación ya instalados. No se descargará del medio de transporte en su instalación y se puentea al CT averiado en sus conexiones de media, baja tensión y la puesta tierra en su parte correspondiente a las picas (único elemento que le falta al CT móvil).

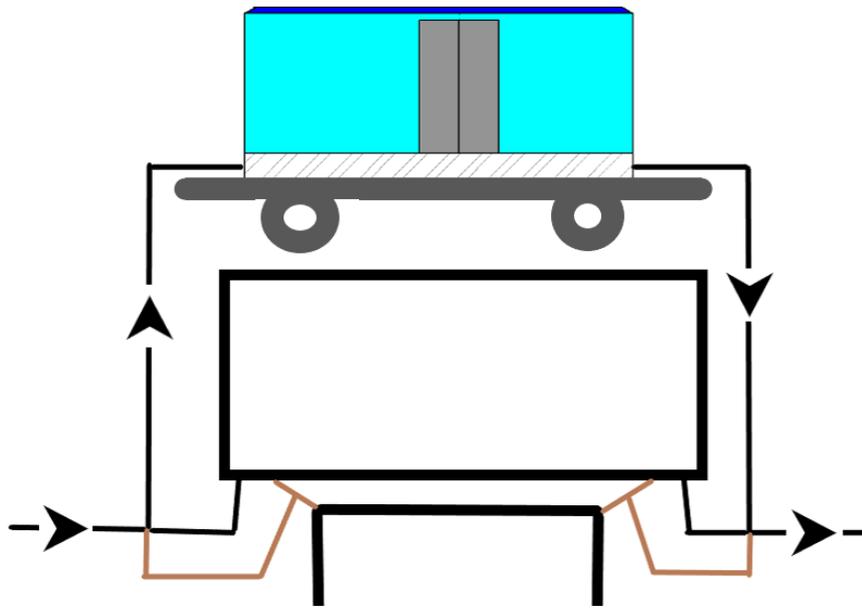


Figura 48. Esquema de instalación provisional.

- **Instalación provisional más prolongada.**

La provisional más prolongada se usará para suplir posibles averías más prolongadas que en el caso anterior en centros de transformación ya instalados. En su instalación se descarga del medio de transporte y se puentea al CT averiado de la misma manera que la provisional.

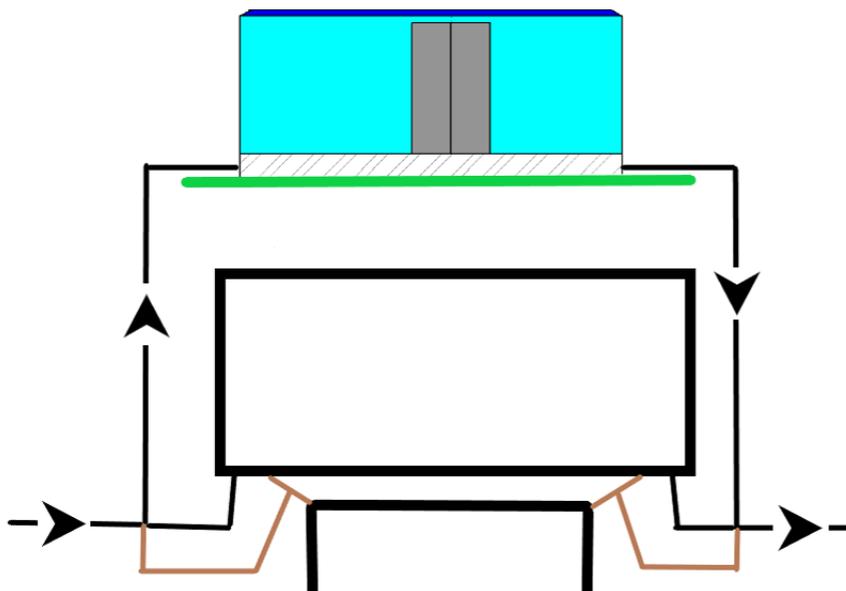


Figura 49. Esquema de instalación provisional prolongada.

- **Instalación permanente.**

La instalación permanente cubrirá nuevas necesidades en el sistema eléctrico de Melilla. Para la misma habrá que realizar una preinstalación que consistirá en hacer un foso de seis metros de largo, dos metros de ancho y medio metro de profundidad para enterrar el foso eléctrico del CT. Las picas para la puesta a tierra estarán enterradas a 0,5 metros de profundidad por debajo del fondo del foso.

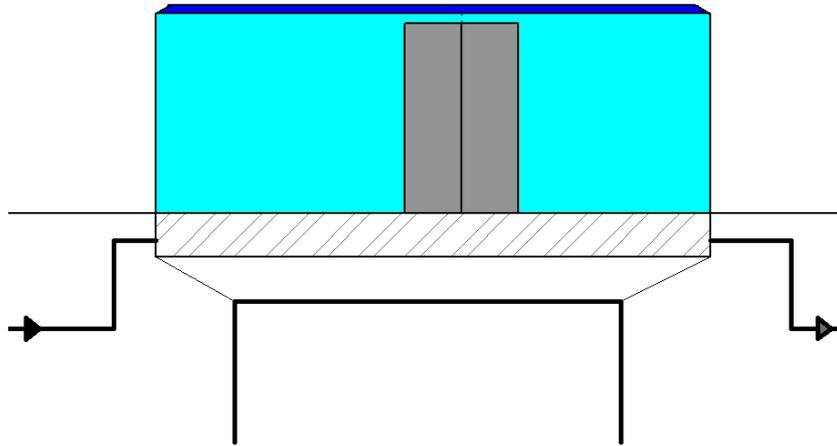


Figura 50. Esquema de instalación permanente.

# 14 ELEMENTOS DEL DISEÑO RESPETUOSO CON EL MEDIO AMBIENTE.

---

Colaborar con la conservación del medio ambiente teniendo en cuenta las malas condiciones actuales y las proyecciones desfavorables de futuro del mismo debe ser un punto determinante para un ingeniero en la realización de un diseño. En los siguientes puntos se exponen en que contribuiría el proyecto del CT móvil.

- Aislamiento sólido en vez de SF6.

Como sustitución al método generalmente utilizado del gas contaminante SF6 como elemento de aislamiento para las celdas de MT se opta por el denominado sistema SSIS (siglas correspondientes en su traducción del inglés al español Sistema de Aislamiento Sólido Blindado).

Se caracteriza por no tener ningún elemento en tensión en contacto con el aire y todas las superficies que conforman la aparamenta están recubiertas de una película conductora puesta a tierra.

En caso de degradación del aislamiento sólido, no se produciría un corto trifásico, sino uno de magnitud menor, un defecto a tierra al tener todos los componentes internos puestos a tierra.

También proporcionan un aislamiento total al medio donde están instaladas, por ejemplo, en ambientes húmedos evitando la corrosión de los materiales.

- Transformador seco

Liberase del aceite como método de refrigeración del transformador además de facilitar el diseño supone una reducción de agentes contaminantes.

- Construcciones modulares y móviles.

Todo diseño modular y de fácil instalación facilita una posible reutilización en nuevas instalaciones y o la sustitución parcial de algunos de sus componentes en caso de avería. Significa además de una reducción costes, una disminución de la utilización de materias primas.

- Utilización de materiales reciclados o reciclables.

En los espacios para albergar los elementos del CT se descartan los materiales utilizado en la construcción convencional generadores de escombros que son no reutilizables y pesados. La plataforma denominada foso eléctrico que soporta el peso de la estructura es de acero. La envolvente constituida por paredes, techo, rejillas y puertas son de materiales resistentes y ligeros como son los paneles de metal. Estos materiales son 100 % reutilizables o reciclables.

# 15 CONCLUSIONES

---

Tras la confección del proyecto, atendiendo a los cálculos realizados, se ha comprobado que en caso de cortocircuito a tierra en un sistema eléctrico con neutro aislado, el efecto en la intensidad es mínimo, mientras que el de la tensión es destacable, llegando a elevarse el valor de fase al de línea debido al efecto capacitivo.

El CT móvil ofrece tiempos de respuesta rápidos ante fallos en la red, puesto que no requieren de obra en primeras instancias. Su conjunto es una máquina que se conecta y desconecta con facilidad. Su transporte es sencillo y multimodal al adaptar sus dimensiones a los contenedores del tipo ISO. El telecontrol proporciona respuestas rápidas y seguras, necesarias en un sistema eléctrico débil como el melillense.

En estudios como los de la puesta tierra o de la refrigeración del transformador se han establecido siguiendo las distintas normas. Respecto a los de la contaminación acústica o de emisión de campo magnético, se concluye que dicho CT móvil puede ser instalado en cualquier punto de la ciudad.

En el apartado de la logística, se pone de manifiesto la importancia en la distribución de las masas en el interior del CT. Así, el centro de gravedad debe aproximarse al de un prisma sólido, facilitando así el transporte y la manipulación del conjunto. Por ejemplo, colocar el más pesado (transformador) cerca del centro de gravedad del CT y buscando las diferentes opciones de instalación para facilitar el conexionado.

Respecto al apartado medioambiental, se ha procurado contemplar alternativas ecológicas en cuanto a material y método de diseño.

Como conclusión general, el diseño del centro de transformación móvil es una alternativa práctica, ecológica y versátil para solucionar problemas dentro del sistema eléctrico de Melilla.

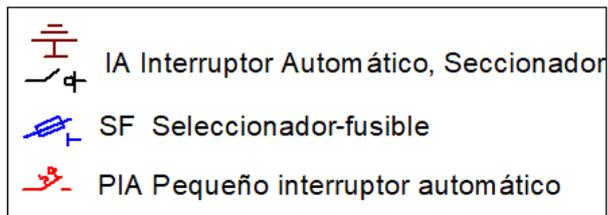
# REFERENCIAS

---

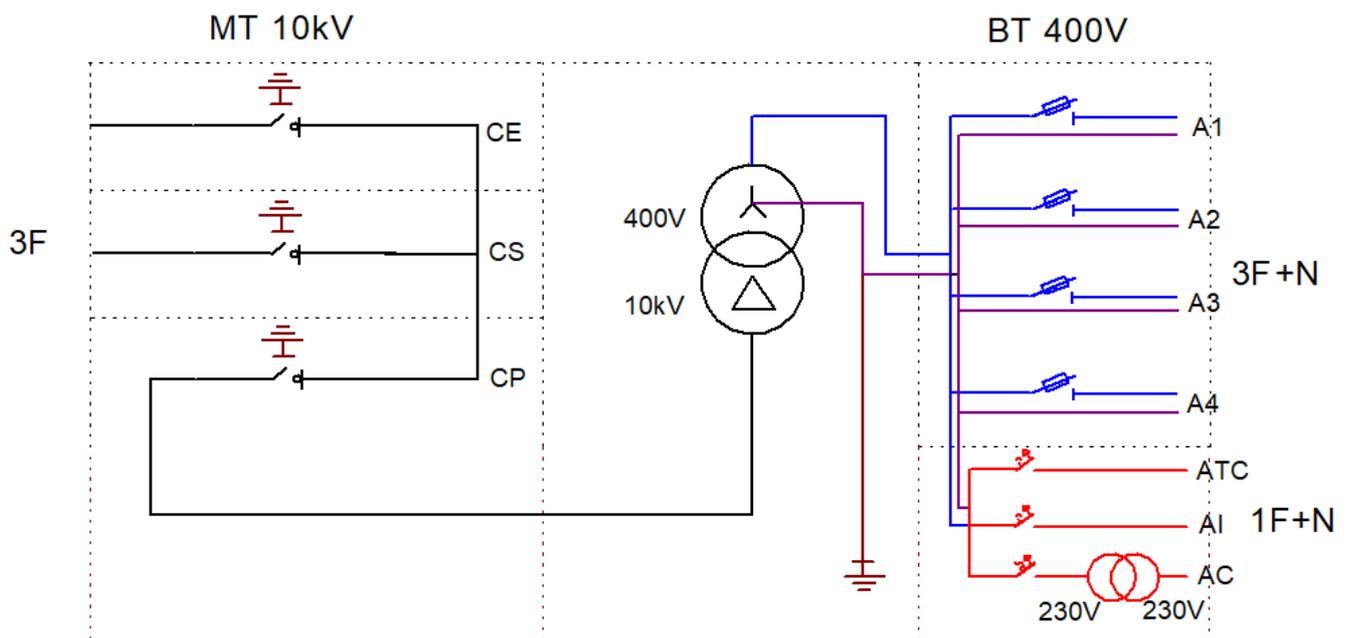
- [1] Red Eléctrica de España, «Producción de Energía Eléctrica en España,» 2019.
- [2] Schneider Electric, Cuaderno Técnico nº 178 El esquema IT (neutro aislado) de los esquemas de conexión a tierra., 2001.
- [3] «Predicción de demanda de energía eléctrica en Melilla,» ETSI-UPM, 2017.
- [4] Datos de la empresa de distribución de Melilla.
- [5] Proyecto de sustitución de celdas de telemando CD 56753, 2018.
- [6] «Acoplamiento Capacitivo». Available: [https://hmn.wiki/es/Electrostatic\\_coupling](https://hmn.wiki/es/Electrostatic_coupling).
- [7] Schneider Electric, Publicación Técnica nº 004 Centros de Transformación MT/BT, 2000.
- [8] Available: <http://ortizalvarosua12.blogspot.com/2012/10/tipo-de-carrocerias.html>.

# ANEXO I. ESQUEMAS ELÉCTRICOS

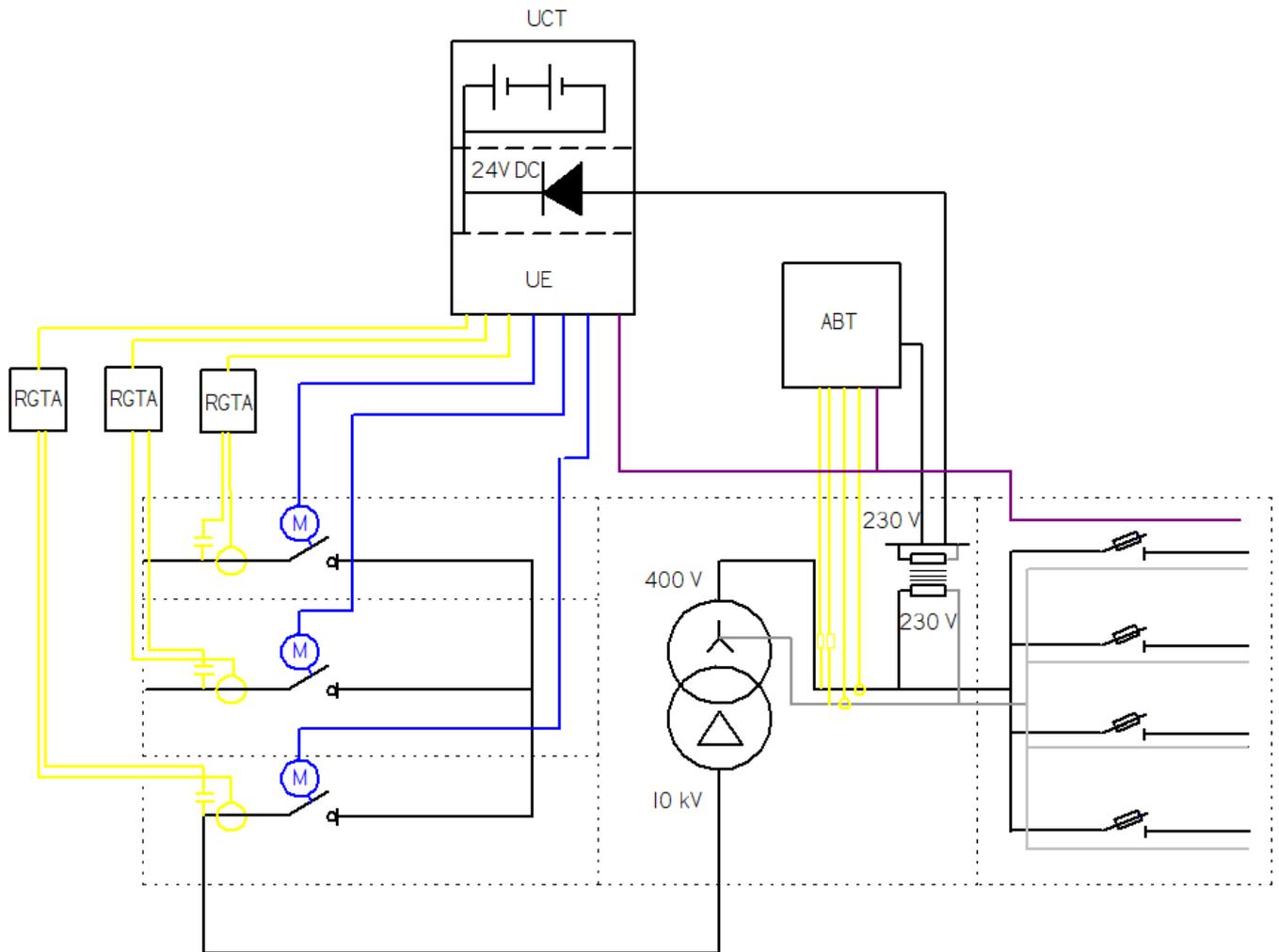
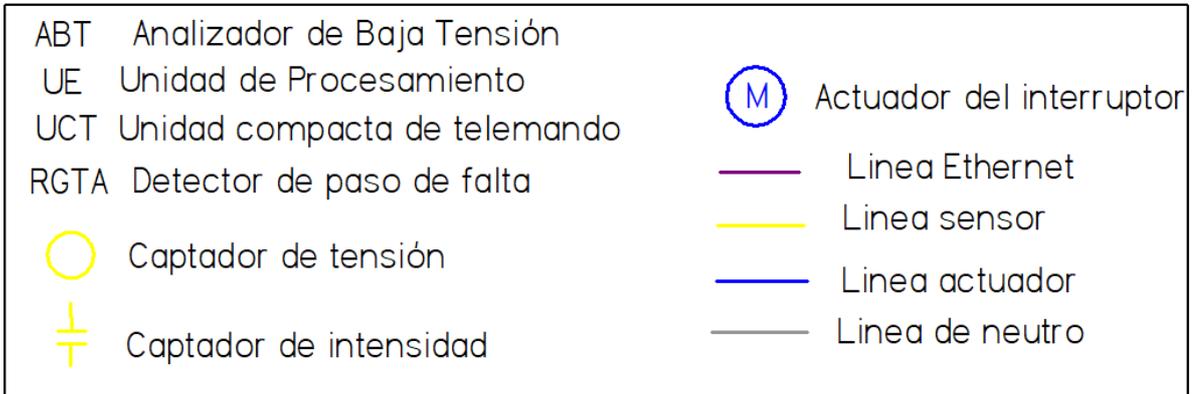
## PRINCIPAL



CE celda de entrada  
 CS celda de salida  
 CP celda de protección  
 A1 alimentación tramo 1  
 A2 alimentación tramo 2  
 A3 alimentación tramo 3  
 A4 alimentación tramo 4  
 ATC alimentación toma de corriente  
 AI alimentación de iluminación  
 AC alimentación del control

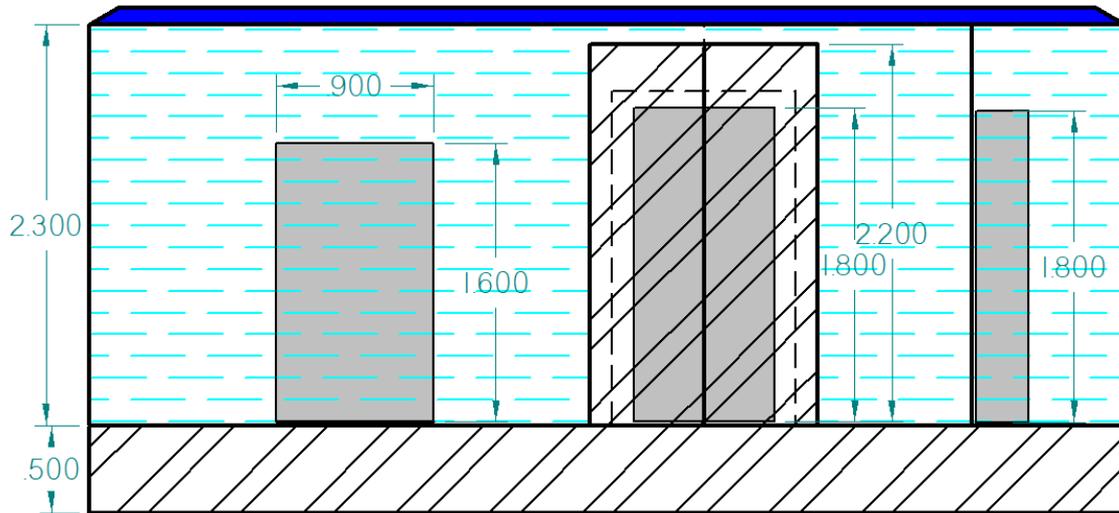


## CONTROL

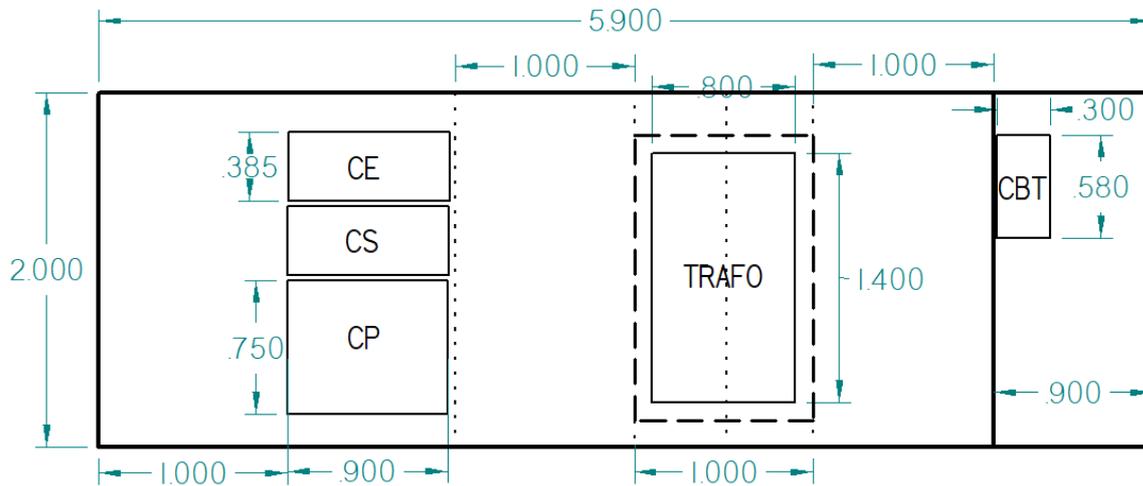


# ANEXO II. PLANOS

## ALZADO

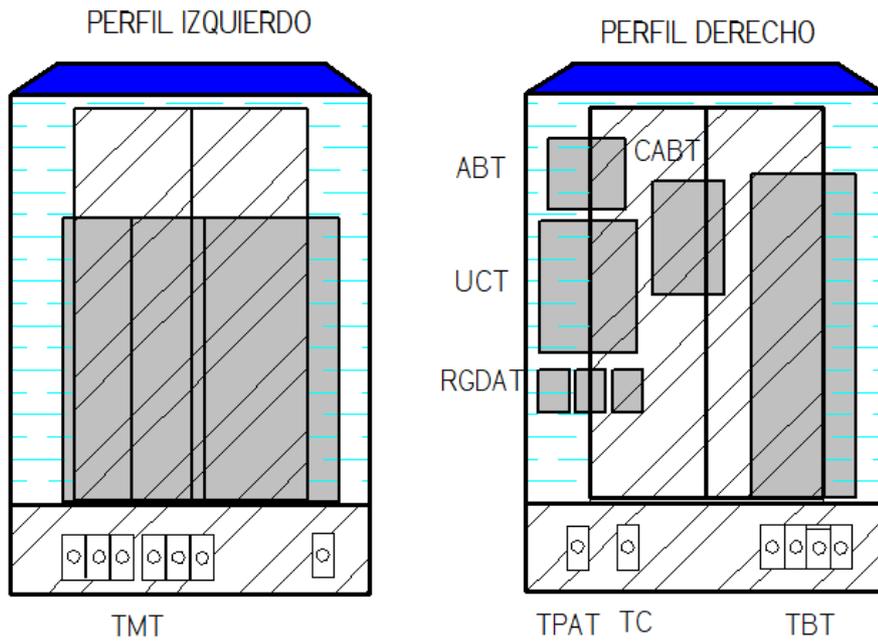


## PLANTA



CE	Celda de Entrada	TRAF0	Transformador
CS	Celda de Salida	CBT	Cuadro de Baja Tensión
CP	Celda de Protección		

## PERFILES



TMT Terminales de Media Tensión  
TPAT Terminales Puesta a Tierra  
TC Terminal Comunicación  
TBT Terminal de Baja Tensión

ABT Analizador de Baja Tensión  
UCT Unidad Compacta de Telemando  
CABT Cuadro Auxiliar De Baja Tensión  
RGDAT Rele detector de paso de falta