



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSPORTE

Autor: Daniela González Barahona

Director: Miguel Fernández-Sabugal Pérez

Madrid

Junio de 2026

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
Cálculo y diseño de los sistemas auxiliares de una subestación eléctrica de transporte
en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico 2025/2026 es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido
tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Daniela González Barahona

Fecha: 26/01/2026

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Miguel Fernández-Sabugal Pérez

Fecha: 02/ 03/ 2026

Declaración de originalidad

Declaro bajo mi responsabilidad que el Proyecto presentado con el título **CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSPORTE** de la ETS de Ingeniería – ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2025/2026 es de mi autoría y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.

Uso de Inteligencia Artificial¹

Declaro bajo mi responsabilidad que (indicar la opción correcta):

☐ No he utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento.

☒ He utilizado Inteligencia Artificial en la elaboración del presente documento y/o del Anexo B siempre en las condiciones permitidas por la Universidad Pontificia Comillas, es decir, aplicando el Nivel 2 de la [Escala de Evaluación de Perkins et al. \(2024\)](#): *“La IA puede utilizarse para actividades previas a la tarea, como la lluvia de ideas, la descripción y la investigación inicial. Este nivel se centra en el uso de la IA para la planificación, las síntesis y la generación de ideas, pero las evaluaciones deben hacer hincapié en la capacidad de desarrollar y refinar estas ideas de forma independiente”*. En concreto, las Inteligencia Artificial ha sido empleada para:

Se han empleado herramientas de inteligencia artificial generativa como apoyo auxiliar en fases previas y de revisión de trabajo dentro del Nivel 2 de la Escala de Evaluación de Perkins et al. (2024). En concreto, la IA se ha utilizado para la organización inicial de ideas, la estructuración de apartados de la memoria, la síntesis preliminar de información, la mejora formal de la redacción académica y la revisión de coherencia terminológica y expositiva.

Los cálculos, hipótesis de diseño, selección de equipos, simulaciones, interpretación de resultados, validación de normativa, referencias bibliográficas y conclusiones técnicas finales han sido desarrollados, contrastados y asumidos íntegramente por la autora. La IA no ha sido empleada como sustituto de trabajo técnico propio ni para generar resultados no verificados.

¹ Esta declaración se refiere al uso de la Inteligencia Artificial generativa para realizar los documentos del Proyecto (Anexo B y Memoria). No aplica a Proyectos donde, por su naturaleza, deban emplear inteligencia artificial como parte de los mismos (aplicación de técnicas de aprendizaje automático, redes neuronales, análisis de datos...)



Firmado (alumno): Daniela González Barahona

Fecha: 08/06/2026

Autorización para la entrega del Proyecto

El Director del Proyecto



Fdo: Miguel Fernández-Sabugal

Fecha: 01/07/2026



GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE GRADO CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSPORTE

Autor: Daniela González Barahona

Director: Miguel Fernández-Sabugal Pérez

Madrid

Junio de 2026

Agradecimientos

Quiero agradecer, en primer lugar, a mis padres, por hacer posible que llegara hasta aquí y por su apoyo incondicional a lo largo de todos estos años. Nada de esto habría sido posible sin ellos.

A mi tutor, Miguel Fernández-Sabugal Pérez, por su dirección, su criterio y su dedicación a lo largo de todo el proyecto, que han sido fundamentales para llevarlo a buen puerto.

A la Universidad ICAI y a todas las personas que la hacen funcionar, por allanar el camino durante esta etapa; y de manera muy especial a mi profesor favorito, Félix, por su dedicación y por todo lo que me ha enseñado.

A mi familia, por estar siempre y ser mi referente. A mis amigos, por acompañarme, animarme y recordarme que había vida más allá del proyecto. Y a todos mis seres queridos, que de una forma u otra han caminado a mi lado durante esta etapa y han hecho que valiera mucho más la pena.

A todos ellos, gracias.

CÁLCULO Y DISEÑO DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE UNA SUBESTACIÓN ELÉCTRICA DE TRANSPORTE

Autor: González Barahona, Daniela.

Director: Fernández-Sabugal Pérez, Miguel.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Los servicios auxiliares (SSAA) de una subestación eléctrica de transporte alimentan los equipos de protección, control, mando y comunicaciones de los que depende su operación segura. En este proyecto se calcula y diseña este sistema tomando como referencia la S/E de Villaviciosa de Odón, de 400/220 kV.

El punto de partida es el inventario de cargas auxiliares. A partir de él se equilibran las cargas por fases, se selecciona el transformador auxiliar y se dimensionan los conductores principales de la red de baja tensión. Se dimensiona además el sistema de corriente continua a 125 Vcc que respalda las cargas críticas, y se calculan las corrientes de cortocircuito en los nodos representativos de la red, base para la posterior selección y coordinación de las protecciones.

El diseño se basa en el criterio N-1: la instalación mantiene la alimentación de las cargas esenciales ante la pérdida de una fuente, de un transformador auxiliar o de un tramo de la red. Finalmente, se comprueba que la solución adoptada cumple los criterios técnicos y normativos aplicables [MINI16].

Palabras clave: subestación eléctrica, servicios auxiliares, corriente alterna, corriente continua, fiabilidad, baterías, protecciones, cortocircuitos.

1. Introducción

Aunque no intervienen en el transporte de energía, los servicios auxiliares sostienen el funcionamiento de la subestación: sin ellos no es posible supervisar la instalación, maniobrar la aparamenta ni garantizar el disparo de las protecciones. Esa dependencia explica que se diseñen con criterios de redundancia y continuidad, de modo que las cargas esenciales conserven alimentación incluso ante contingencias. El principio de mantener el servicio tras la pérdida de un elemento es el criterio N-1, que vertebra todo el proyecto.

2. Definición del proyecto

El objeto del proyecto es calcular y diseñar los servicios auxiliares que alimentan las cargas de baja tensión de la subestación. El trabajo arranca con el inventario de cargas auxiliares, clasificadas en críticas y no críticas según su función y su tipo de

alimentación. Las cargas monofásicas se reparten por fases para determinar la potencia demandada y dimensionar el transformador auxiliar; a continuación se dimensionan los conductores de los distintos circuitos y el sistema de corriente continua que alimenta las cargas críticas. El cálculo de cortocircuitos cierra el estudio y aporta los valores de referencia para seleccionar y coordinar las protecciones.

3. Descripción del sistema

El caso de estudio es la subestación de Villaviciosa de Odón, de 400/220 kV. Los transformadores auxiliares se alimentan del devanado terciario de los transformadores principales, a 20 kV, y entregan una red de baja tensión de 400/230 V que cubre tanto las cargas trifásicas a 400 V como las monofásicas a 230 V. De esa misma red se alimentan los rectificadores-cargadores del sistema de 125 Vcc, que suministran las cargas críticas y mantienen los bancos de baterías en flotación, listos para asumir el suministro si falla la alimentación en corriente alterna.

La distribución de baja tensión se realiza en anillo, disposición redundante que es la que materializa el criterio N-1 frente a la indisponibilidad de un transformador o de un tramo de red. Se puede observar la configuración del sistema en la Figura 1.

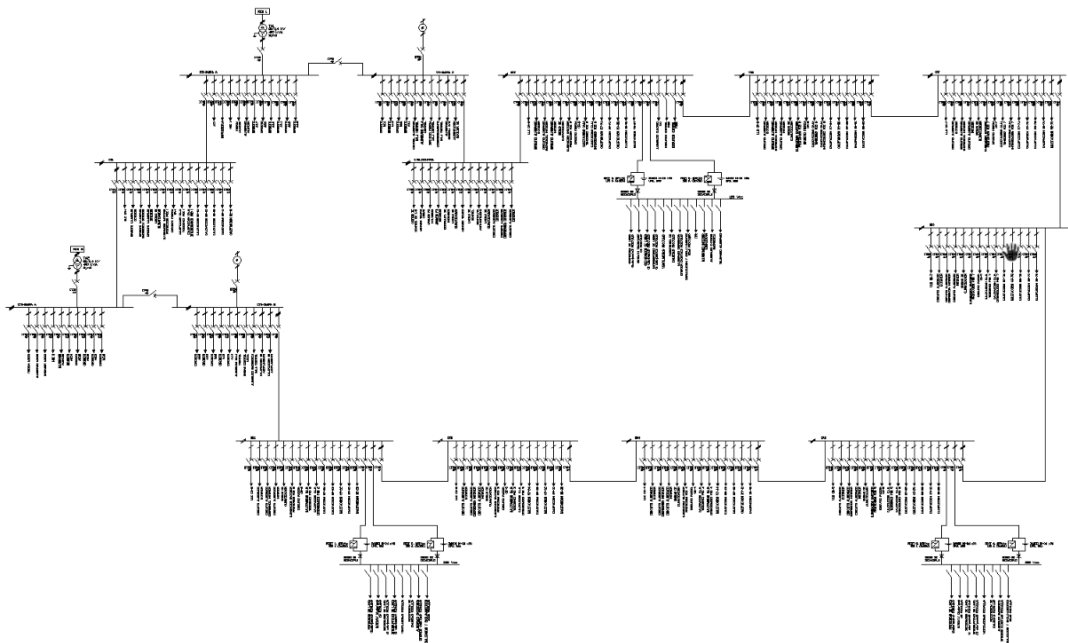


Figura 1. Esquema unifilar de BT

La Figura 2 muestra la subestación, con el parque de 400 kV a la izquierda (en rojo) y el de 220 kV a la derecha (en azul).



Figura 2. Subestación de Villaviciosa de Odón [GOOG26]

Los cálculos se desarrollan sobre el parque de 220 kV. La metodología es trasladable al de 400 kV siempre que se mantengan los mismos criterios de arquitectura, clasificación de cargas y configuración de los servicios auxiliares.

4. Resultados

Los resultados principales del dimensionamiento de los sistemas de CA y CC, así como del análisis de cortocircuitos, se recogen en la Tabla 1 y se comentan a continuación.

<i>Magnitud</i>	<i>Resultado</i>
Tensión de alimentación en MT de los SSAA	20 kV
Red de BT	400/230 V
Potencia aparente de diseño en CA	375,7 kVA
Transformador auxiliar	400 kVA
Intensidad nominal en BT	577,35 A
Sección del anillo principal	300 mm ² Cu XLPE
Caída de tensión máxima acumulada (hasta receptor)	5,528 %
Sistema de CC para protección y control	125 Vcc

<i>Magnitud</i>	<i>Resultado</i>
Arquitectura del sistema de CC	3 sistemas en servicio + 3 redundantes
Banco de baterías (dedicado por sistema; 6 en total)	96 elementos Ni-Cd Saft Uptimax UP1L 280
Capacidad nominal por banco	280 Ah
Rectificador-cargador por sistema	125 Vcc, 105 A
Icc trifásica máxima corregida	15,873 kA
Icc bifásica mínima corregida	5,404 kA

Tabla 1. Resultados principales obtenidos

El inventario de cargas es el punto de apoyo de todo lo demás. Las cargas críticas, alimentadas en corriente continua, fijan el dimensionamiento de baterías y rectificadores; las no críticas, alimentadas en corriente alterna, determinan mediante su equilibrado la potencia aparente demandada y, con ella, el transformador auxiliar.

Para el transformador se adopta una potencia nominal normalizada de 400 kVA (según la serie de valores asignados de la ITC-RAT 07 [MINI14]), inmediatamente superior a la demanda de diseño de 375,7 kVA, con conexión Dyn11 (que aporta neutro en baja tensión y mejora el comportamiento ante desequilibrios) y una tensión de cortocircuito del 4 % [MINI14]. Los conductores del anillo principal se dimensionan para la intensidad nominal del transformador en baja tensión, 577,35 A, lo que conduce a una sección de 300 mm² de cobre con aislamiento XLPE [MINI02]; con ella, la caída de tensión máxima acumulada hasta el receptor más desfavorable se mantiene en el 5,528 % en el escenario de contingencia, por debajo del límite del 6,5 % establecido en la ITC-BT-19 para usos distintos del alumbrado; los circuitos de alumbrado, con un máximo del 0,9 %, cumplen holgadamente el límite del 4,5 % [MINI02].

Por último, el cálculo de cortocircuitos aporta los valores que gobiernan la selección de protecciones. La corriente máxima corregida, 15,873 kA en bornes del transformador auxiliar, fija el poder de corte exigible a la aparamenta de baja tensión; la mínima corregida, 5,404 kA en el nodo eléctricamente más alejado (cortocircuito bifásico), sirve para comprobar que las protecciones actúan en las condiciones más desfavorables.

5. Conclusiones

El diseño desarrollado cumple los objetivos planteados. La arquitectura en anillo con barras partidas, junto con la redundancia de transformadores, grupos electrógenos y sistemas de corriente continua, proporciona a los servicios auxiliares un nivel adecuado de fiabilidad exigida y satisface el criterio N-1 en los escenarios analizados.

El transformador auxiliar de 400 kVA cubre la demanda de diseño con margen suficiente para absorber las incertidumbres del inventario y posibles ampliaciones; aun en contingencia, con un único transformador asumiendo toda la carga, su grado de carga se mantiene en el 85,4 %. La sección de 300 mm² adoptada para el anillo satisface a la vez los criterios de intensidad admisible y de caída de tensión.

El sistema de 125 Vcc se configura mediante seis conjuntos rectificador-cargador/banco de baterías (tres en servicio y tres redundantes), cada uno con su propio banco dedicado, sin baterías compartidas entre sistemas, lo que garantiza que la autonomía de diseño de 8 h se cumple de forma independiente en cada uno. Cada banco está formado por 96 elementos Ni-Cd Saft Uptimax UP1L 280 [SAFT18], y cada rectificador-cargador se configura con tres módulos de 35 A, resultando una corriente asignada de 105 A [RECT18], dimensionada de forma individual para la carga de su propio sistema más la recarga de su banco asociado.

Por su parte, las corrientes de cortocircuito calculadas y validadas mediante simulación proporcionan la base para fijar el poder de corte de la aparamenta y para la posterior coordinación de las protecciones [MINI02].

6. Referencias

[MINI02] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. REAL DECRETO 842/2002, DE 2 DE AGOSTO, POR EL QUE SE APRUEBA EL REGLAMENTO ELECTROTÉCNICO PARA BAJA TENSIÓN. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, NÚM. 224, 18 DE SEPTIEMBRE DE 2002.

[MINI14] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. REAL DECRETO 337/2014, DE 9 DE MAYO, POR EL QUE SE APRUEBAN EL REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN Y SUS INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS ITC-RAT 01 A 23. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, NÚM. 139, 9 DE JUNIO DE 2014.

[MINI16] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. RESOLUCIÓN DE 5 DE ABRIL DE 2016, POR LA QUE SE APRUEBA EL PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN P.O.

1.1, «CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO Y SEGURIDAD PARA LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO». *BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO*, NÚM. 83, 6 DE ABRIL DE 2016.

[GOOG26] GOOGLE. *GOOGLE EARTH PRO. IMAGEN SATELITAL DE LA SUBESTACIÓN DE VILLAVICIOSA DE ODÓN. CONSULTA REALIZADA EN 2026.*

[SAFT18] SAFT, “UPTIMAX NI-CD BATTERY. TECHNICAL MANUAL”, DOC. NO. 21846-2-1218, DICIEMBRE 2018.

[RECT18] RECTICUR/NORWATT. *RECTIFICADORES DE ALTA FRECUENCIA 110, 125 Y 220 VCC. RAF ARGOS. FICHA TÉCNICA, 2018.*

.

CALCULATION AND DESIGN OF THE AUXILIARY SYSTEMS OF AN ELECTRICITY TRANSMISSION SUBSTATION

Author: González Barahona, Daniela.

Supervisor: Fernández-Sabugal Pérez, Miguel.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas

ABSTRACT

The auxiliary systems of an electricity transmission substation power the protection, control, command and communication equipment on which its safe operation depends. This project covers their calculation and design, using the Villaviciosa de Odón 400/220 kV substation as a case study.

The starting point is the inventory of auxiliary loads. From it, the loads are balanced across phases, the auxiliary transformer is selected and the main low-voltage conductors are sized. The 125 Vdc system that backs up the critical loads is also sized, and the short-circuit currents are calculated at the representative nodes of the network, providing the reference values for the subsequent selection and coordination of the protective devices.

The design is built around the N-1 criterion: the installation keeps the essential loads supplied following the loss of a source, an auxiliary transformer or a section of the network. Finally, the adopted solution is checked against the applicable technical and regulatory requirements [MINI16].

Keywords: electrical substation, auxiliary services, alternating current, direct current, reliability, batteries, protections, short circuits.

1. Introduction

Although they play no part in transmitting energy, the auxiliary systems sustain the operation of the substation: without them it is not possible to supervise the installation, operate the switchgear or guarantee the tripping of the protection systems. This dependence is why they are designed around redundancy and continuity, so that the essential loads remain supplied even under contingency conditions. The principle of keeping the service after the loss of a single element —the N-1 criterion— runs through the entire project.

2. Project definition

The aim of the project is to calculate and design the auxiliary systems that supply the low-voltage loads of the substation. The work begins with the inventory of auxiliary loads, classified as critical and non-critical according to their function and type of supply. The single-phase loads are distributed across phases to determine the demanded power

and size the auxiliary transformer; the conductors of the various circuits and the direct current system that supplies the critical loads are then sized. The short-circuit calculation closes the study and provides the reference values for selecting and coordinating the protective devices.

3. System description

The case study is the Villaviciosa de Odón 400/220 kV substation. The auxiliary transformers are supplied from the tertiary winding of the main transformers, at 20 kV, and deliver a 400/230 V low-voltage network that covers both the three-phase loads at 400 V and the single-phase loads at 230 V. This same network feeds the rectifier-chargers of the 125 Vdc system, which supply the critical loads and keep the battery banks on float charge, ready to take over the supply should the alternating current source fail.

The low-voltage distribution is arranged as a ring, a redundant layout that makes the N-1 criterion possible against the unavailability of a transformer or a section of the network. The system configuration is shown in Figure 1.

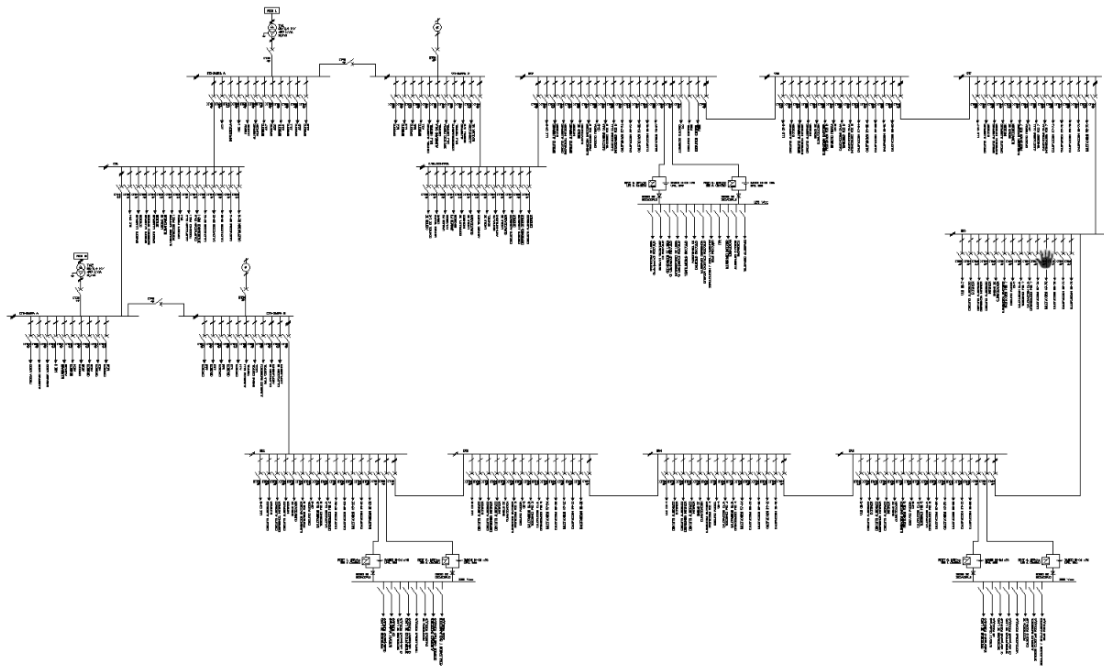


Figure 1. Low-voltage single-line diagram

Figure 2 shows the substation, with the 400 kV switchyard on the left, in red, and the 220 kV switchyard on the right, in blue.



Figure 2. Villaviciosa de Odón substation [GOOG26]

The calculations are carried out on the 220 kV switchyard. The methodology can be transferred to the 400 kV switchyard provided that the same criteria of architecture, load classification and auxiliary systems configuration are maintained.

4. Results

The redundant architecture adopted is one of the project's main results; the rest are gathered in Table 2.

<i>Magnitude</i>	<i>Result</i>
Medium-voltage supply for the auxiliary systems	20 kV
Low-voltage network	400/230 V
Design apparent power in AC	375.7 kVA
Auxiliary transformer	400 kVA
Nominal low-voltage current	577.35 A
Main ring conductor section	300 mm ² Cu XLPE
Maximum accumulated voltage drop (up to load)	5.528 %

<i>Magnitude</i>	<i>Result</i>
Direct current system for protection and control	125 Vdc
DC system architecture	3 systems in service + 3 redundant systems
Battery bank per system	96 Saft Uptimax UP1L 280 Ni-Cd cells
Nominal capacity per battery bank	280 Ah
Rectifier-charger per system	125 Vdc, 105 A
Maximum corrected three-phase short-circuit current	15.873 kA
Minimum corrected phase-to-phase short-circuit current	5.404 kA

Table 2. Main results obtained

The load inventory is what everything else rests on. The critical loads, supplied in direct current, set the sizing of the batteries and rectifiers; the non-critical loads, supplied in alternating current, determine through their balancing the apparent power demanded and, with it, the auxiliary transformer.

For the transformer, a standardised rating of 400 kVA is adopted, immediately above the design demand of 375.7 kVA, with a Dyn11 connection—which provides a neutral on the low-voltage side and improves the behaviour under imbalance—and a short-circuit voltage of 4 % [MINI14]. The main ring conductors are sized for the transformer's nominal low-voltage current, 577.35 A, which leads to a 300 mm² copper section with XLPE insulation [MINI02]; with it, the maximum accumulated voltage drop up to the most unfavourable load stays at 5.528 %, below the 6.5 % limit set by ITC-BT-19 for uses other than lighting; the lighting circuits, with a maximum of 0.9 %, comply comfortably with the applicable 4.5 % limit [MINI02].

Finally, the short-circuit calculation provides the values that govern the selection of the protective devices. The maximum corrected current, 15.873 kA at the auxiliary transformer terminals, sets the breaking capacity required of the low-voltage switchgear; the minimum corrected current, 5.404 kA at the electrically most remote node,

corresponding to a phase-to-phase short circuit, is used to check that the protective devices operate under the most unfavourable conditions.

5. Conclusions

The design developed meets the objectives set. The ring architecture with sectionalised busbars, together with the redundancy of transformers, generator sets and direct current systems, gives the auxiliary systems the required level of reliability and satisfies the N-1 criterion in the scenarios analysed.

The 400 kVA auxiliary transformer covers the design demand with enough margin to absorb the uncertainties of the inventory and possible future extensions; even under contingency, with a single transformer assuming the whole load, its loading remains at 85.4 %. The 300 mm² section adopted for the ring satisfies both the admissible-current and the voltage-drop criteria.

The 125 Vdc system is configured with six rectifier-charger/battery-bank sets, comprising three systems in service and three redundant systems. Each battery bank consists of 96 Saft Uptimax UP1L 280 Ni-Cd cells [SAFT18], and each rectifier-charger is rated at 105 A [RECT18].

The short-circuit currents, calculated and validated by simulation, provide the basis for setting the breaking capacity of the switchgear and for the subsequent coordination of the protective devices [MINI02].

6. References

[MINI02] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA. REAL DECRETO 842/2002, DE 2 DE AGOSTO, POR EL QUE SE APRUEBA EL REGLAMENTO ELECTROTÉCNICO PARA BAJA TENSIÓN. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, NÚM. 224, 18 DE SEPTIEMBRE DE 2002.

[MINI14] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. REAL DECRETO 337/2014, DE 9 DE MAYO, POR EL QUE SE APRUEBAN EL REGLAMENTO SOBRE CONDICIONES TÉCNICAS Y GARANTÍAS DE SEGURIDAD EN INSTALACIONES ELÉCTRICAS DE ALTA TENSIÓN Y SUS INSTRUCCIONES TÉCNICAS COMPLEMENTARIAS ITC-RAT 01 A 23. BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, NÚM. 139, 9 DE JUNIO DE 2014.

[MINI16] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO. RESOLUCIÓN DE 5 DE ABRIL DE 2016, POR LA QUE SE APRUEBA EL PROCEDIMIENTO DE OPERACIÓN P.O.

1.1, «CRITERIOS DE FUNCIONAMIENTO Y SEGURIDAD PARA LA OPERACIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO». BOLETÍN OFICIAL DEL ESTADO, NÚM. 83, 6 DE ABRIL DE 2016.

[GOOG26] GOOGLE. GOOGLE EARTH PRO. IMAGEN SATELITAL DE LA SUBESTACIÓN DE VILLAVICIOSA DE ODÓN. CONSULTA REALIZADA EN 2026.

[SAFT18] SAFT, “UPTIMAX NI-CD BATTERY. TECHNICAL MANUAL”, DOC. NO. 21846-2-1218, DICIEMBRE 2018.

[RECT18] RECTICUR/NORWATT. RECTIFICADORES DE ALTA FRECUENCIA 110, 125 Y 220 VCC. RAF ARGOS. FICHA TÉCNICA, 2018.

Índice de la memoria

<i>Índice de la memoria</i>	<i>I</i>
<i>Índice de figuras</i>	<i>V</i>
<i>Índice de tablas</i>	<i>VII</i>
<i>Lista de abreviaturas</i>	<i>IX</i>
Capítulo 1. Introducción	11
1.1 Contexto del proyecto	11
1.2 Motivación	11
1.3 Objeto y alcance	12
1.4 Objetivos	13
1.4.1 Caracterización de cargas	13
1.4.2 Dimensionamiento del sistema de alimentación en CA:	13
1.4.3 Dimensionamiento del sistema de alimentación en CC:	13
1.4.4 Análisis de cortocircuito y protecciones	13
1.4.5 Verificación normativa y criterio N-1	13
1.5 Metodología.....	14
1.6 Estructura del documento	14
Capítulo 2. Descripción de la instalación y normativa aplicable	17
2.1 Caracterización general de una subestación de transporte	17
2.2 Descripción de la subestación objeto de estudio	17
2.3 Sistemas auxiliares de la subestación	18
2.4 Alimentación en CA	19
2.5 Alimentación en CC	19
2.6 Criterios de fiabilidad y redundancia	20
2.7 Normativa aplicable	20
Capítulo 3. Arquitectura eléctrica de los servicios auxiliares.....	25
3.1 Criterios de diseño de la arquitectura	25
3.2 Selección del esquema unifilar de media tensión.....	26

3.3	Selección del esquema unifilar de baja tensión.....	27
3.4	Niveles de tensión adoptados	28
3.4.1	Media tensión	28
3.4.2	Baja tensión.....	28
3.4.3	Corriente continua.....	28
3.5	Descripción del sistema CA/CC adoptado	29
3.5.1	Cargas críticas	29
3.5.2	Cargas no críticas	29
Capítulo 4.	Análisis y reparto de cargas	31
4.1	Inventario de cargas.....	31
4.2	Clasificación de cargas críticas y no críticas	32
4.3	Criterios de utilización y simultaneidad.....	32
4.4	Equilibrado de cargas por fases.....	34
4.5	Resultados del reparto de cargas	35
Capítulo 5.	Dimensionamiento del transformador auxiliar.....	37
5.1	Hipótesis de dimensionamiento.....	37
5.2	Potencia aparente de diseño	37
5.3	Selección de potencia normalizada	38
5.4	Selección comercial del transformador auxiliar	39
5.5	Parámetros del transformador seleccionado.....	40
5.6	Selección del grupo de conexión.....	43
Capítulo 6.	Dimensionamiento de conductores de baja tensión.....	45
6.1	Criterios generales de selección	45
6.2	Cables de alimentación del anillo principal.....	47
6.3	Cables interiores	52
6.4	Comprobación de caída de tensión.....	55
6.4.1	Caída de tensión en los cables de alimentación.....	55
6.4.2	Caída de tensión en los cables interiores.....	58
6.4.3	Caídas de tensión acumuladas	59
Capítulo 7.	Dimensionamiento del sistema de alimentación en CC.....	61
7.1	Arquitectura del sistema de CC.....	61
7.2	Hipótesis de diseño y criterios de dimensionamiento	62

7.3	Cargas críticas alimentadas a 125 Vcc	66
7.4	Perfil de descarga del sistema de 125 Vcc	67
7.5	Dimensionamiento del banco de baterías de 125 Vcc	67
7.5.1	Determinación del número de elementos en serie	67
7.5.2	Capacidad requerida del banco de baterías	68
7.5.3	Preselección del modelo de batería	69
7.5.4	Comprobación de tensiones y autonomía	69
7.6	Selección de rectificadores-cargadores de 125 Vcc	70
7.7	Resumen de resultados del sistema de CC	72
Capítulo 8.	Cálculo de cortocircuitos	75
8.1	Hipótesis de cálculo	75
8.2	Modelo empleado	75
8.3	Cortocircuito trifásico	77
8.4	Cortocircuito bifásico	85
8.5	Cortocircuito bifásico a tierra	92
8.6	Cortocircuito monofásico a tierra	95
8.7	Resultados y validación	98
Capítulo 9.	Selección y coordinación de protecciones	101
9.1	Alcance del estudio de protecciones	101
9.2	Datos de partida para la selección de protecciones	103
9.3	Criterios normativos y técnicos de protección	105
9.3.1	Protección frente a sobrecargas	105
9.3.2	Protección frente a cortocircuitos	106
9.3.3	Criterio de selectividad	109
9.3.4	Criterio de continuidad del servicio	109
9.4	Selección de dispositivos de protección	109
9.4.1	Nivel 1: Salida del transformador auxiliar	110
9.4.2	Nivel 2: Cuadros principales y alimentadores del anillo	111
9.4.3	Nivel 3: Circuitos finales desde cuadros a receptores	112
9.5	Verificación frente a sobrecargas	113
9.5.1	Verificación en el Nivel 1	113
9.5.2	Verificación en el Nivel 2	116

9.5.3 Verificación en el Nivel 3	118
9.6 Verificación frente a cortocircuitos	120
9.6.1 Verificación en el Nivel 1	120
9.6.2 Verificación en el Nivel 2	123
9.6.3 Verificación en el Nivel 3	125
9.7 Coordinación y selectividad entre protecciones	128
Capítulo 10. Estudio económico	131
10.1 Hipótesis económicas	131
10.2 Costes principales	132
10.3 Presupuesto resumido	133
10.4 Análisis económico	134
Capítulo 11. Impacto ambiental y sostenibilidad	137
11.1 Consideraciones ambientales	137
11.2 Alineación con ODS	138
11.3 Gestión de equipos y baterías	140
Capítulo 12. Conclusiones y trabajos futuros	143
12.1 Conclusiones	143
12.2 Trabajos futuros	144
Capítulo 13. Bibliografía	147
ANEJOS 151	
Anejo I. Inventario de cargas de CA	153
Anejo II. Equilibrado de cargas de CA	159
Anejo III. Robustez ante desequilibrios	167
Anejo IV. Caídas de tensión en cables principales de alimentación	169
Anejo V. Caída de tensión en las derivaciones individuales	173
Anejo VI. Dimensionamiento del sistema 125 Vcc	183
Anejo VII. Cálculo de cortocircuitos	185
Anejo VIII. Selectividad de las protecciones	191
Anejo IX. Presupuesto económico	195
Parte II . Planos	197

Índice de figuras

Figura 1. Esquema unifilar de BT	12
Figura 2. Subestación de Villaviciosa de Odón [GOOG26]	13
Figura 3. Transformador de distribución para redes inteligentes [ORMA22]	39
Figura 4. Arquitectura funcional de uno de los seis conjuntos rectificador-cargador/banco de baterías independientes que componen el sistema de 125 Vcc.	62
Figura 5. Batería NiCd SAFT Uptimax UP1 L [SAFT18].....	63
Figura 6. Rectificador alta frecuencia 110 & 125 & 220 Vcc	72
Figura 7. Modelo representativo en Simulink para el cálculo de cortocircuitos en la red de baja tensión de los SSAA.	76
Figura 8. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito trifásico en bornes del transformador auxiliar 1.....	82
Figura 9. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito bifásico A-B en bornes del transformador auxiliar 1.	92
Figura 10. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito bifásico a tierra A-B-T en bornes del transformador auxiliar 1	95
Figura 11. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito monofásico a tierra A-T en bornes del transformador auxiliar 1	98
Figura 12. Interruptor automático ABB Tmax XT5N 630 Ekip Dip LSI 4P [ABB_26a]	114
Figura 13. Interruptor automático ABB Tmax XT4N 250 Ekip Dip LSI 4P [ABB_26b]	117
Figura 14. Interruptor automático ABB Tmax XT2N 160 Ekip Dip LS/ 4P [ABB_26c].	119
Figura 15. Curvas tiempo-corriente de las protecciones con Matlab	130

Índice de tablas

Tabla 1. Resultados principales obtenidos	14
Table 2. Main results obtained	20
Tabla 3. Normativa aplicable	23
Tabla 4. Comparación configuraciones MT [VARG20].	26
Tabla 5. Comparación configuraciones para BT [VARG20].	27
Tabla 6. Resultado del equilibrado por fases de las cargas en CA	34
Tabla 7. Resumen de la demanda de los SSAA en CA y CC	36
Tabla 8. Potencias asignadas normalizadas según la ITC-RAT 07 del Real Decreto 337/2014 [MINI14]	38
Tabla 9. Parámetros nominales del transformador auxiliar	42
Tabla 10. Comparación de grupos de conexión frente a desequilibrios de carga.	44
Tabla 11. Elección de las canalizaciones según la ITC-BT-20 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].	45
Tabla 12. Situación de las canalizaciones según la ITC-BT-20 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].	46
Tabla 13. Intensidad máxima admisible, en amperios, en servicio permanente para cables con conductores de cobre en instalación al aire en galerías ventiladas (temperatura ambiente 40 °C) según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02]	48
Tabla 14. Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asignada al conductor según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].	49
Tabla 15. Coeficiente de corrección F para temperatura ambiente distinta de 40 °C según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].	50
Tabla 16. Factor de corrección para agrupaciones de cables unipolares instalados al aire según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].	50

Tabla 17. Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C. N.º de conductores con carga y naturaleza del aislamiento según la ITC-BT-19 del Real Decreto 842/2002 [MINI02]	53
Tabla 18. Parámetros eléctricos del cable de alimentación de 0,6/1 kV según catálogo EESCABLE [EES_26]	55
Tabla 19. Parámetros del conductor H07V-K según ficha técnica del fabricante [RCT_24]	58
Tabla 20. Reparto de cargas críticas entre los tres sistemas de 125 Vcc.....	66
Tabla 21. Perfil de descarga por sistema	67
Tabla 22. Revisión de criterios.	70
Tabla 23. Resumen dimensionamiento en CC	73
Tabla 24. Corrientes de cortocircuito trifásico teóricas en los nodos principales de la red de BT.	79
Tabla 25. Corrientes de cortocircuito trifásico obtenidas mediante Simulink en los nodos principales de la red de BT.	81
Tabla 26. Corrientes de cortocircuito trifásico corregidas por variación de tensión.	85
Tabla 27. Valores eficaces de la corriente de cortocircuito bifásico entre fases A-B.	89
Tabla 28. Corrientes de cortocircuito bifásico corregidas por variación de tensión.	91
Tabla 29. Densidad de corriente de cortocircuito, en A/mm ² , para conductores de cobre [MINI02].	108
Tabla 30. Ekip Dip LSI Protection Settings [ABB_24].	115
Tabla 31. Ekip Dip Tolerances [ABB_24].	115
Tabla 32. Ekip Dip LS/I Protection settings [ABB_24].....	127
Tabla 33. Presupuesto resumido estimado de los SSAA.....	133
Tabla 34. Contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible.....	139

Lista de abreviaturas

<i>Abreviatura</i>	<i>Significado</i>
S/E	Subestación eléctrica
SSAA	Servicios auxiliares
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
BT	Baja tensión
MT	Media tensión
AT	Alta tensión
CT	Centro de transformación
CR	Caseta de relés
REBT	Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión
RAT	Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión
ITC	Instrucción Técnica Complementaria
UNE	Una Norma Española

IEC	International Electrotechnical Commission
XLPE	Polietileno reticulado
PVC	Policloruro de vinilo

Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo sitúa el proyecto: por qué los servicios auxiliares (SSAA) de una subestación eléctrica (S/E) de transporte merecen un estudio propio y qué objeto, alcance, objetivos y metodología guían la memoria.

1.1 CONTEXTO DEL PROYECTO

Las S/E de transporte son nudos esenciales del sistema eléctrico, donde la energía se transforma, se maniobra y se protege en los niveles más altos de tensión. De su correcto funcionamiento depende que el suministro llegue con la seguridad y la continuidad exigidas a la red [FUND26].

Ese funcionamiento, sin embargo, no se sostiene solo con los equipos de potencia. Detrás de cada maniobra, cada medida y cada disparo de protección hay un conjunto de equipos de BT que necesitan alimentación fiable, en CA y en CC. Son los SSAA: no transportan energía, pero sin ellos la S/E no puede operarse con seguridad. Este proyecto se ocupa precisamente de su cálculo y diseño.

1.2 MOTIVACIÓN

La red de transporte se explota con exigencias de disponibilidad muy altas, y los SSAA son un punto sensible dentro de esa exigencia: si fallan, se pierde capacidad de maniobra, las protecciones pueden no actuar y la seguridad de los equipos principales queda comprometida [SERV20]. A diferencia de una carga convencional, su indisponibilidad no afecta a un consumo, sino a la capacidad de gobernar la propia instalación.

De ahí que el diseño de los SSAA gire en torno a la continuidad del servicio. Los equipos de protección, control y mando deben seguir operativos incluso si se pierde, en parte o por

completo, la alimentación auxiliar en CA, lo que obliga a un dimensionamiento cuidadoso y a comprobar que la solución resultante es sólida tanto en lo eléctrico como en lo normativo.

1.3 OBJETO Y ALCANCE

El proyecto tiene por objeto el cálculo y diseño de los SSAA de una S/E de transporte, abarcando tanto la alimentación en CA como el sistema de CC a 125 Vcc.

Dentro del alcance se incluyen la caracterización y clasificación de las cargas auxiliares, el equilibrado de cargas en BT, la selección del transformador auxiliar, el dimensionamiento de los conductores, el del sistema de CC con sus rectificadores-cargadores y bancos de baterías, el cálculo de las corrientes de cortocircuito en la red de BT y la selección y coordinación de las protecciones asociadas.

Quedan fuera el diseño eléctrico del parque de AT (su aparamenta primaria y las protecciones propias de líneas, barras y transformadores principales) y el cálculo detallado de la red general de puesta a tierra de la S/E. Estos aspectos solo se tienen en cuenta en la medida en que sus criterios reglamentarios condicionan el diseño de los SSAA.

También quedan fuera del alcance el dimensionamiento y la coordinación de las protecciones del sistema de 125 Vcc, centrado en la coordinación de protecciones del anillo de corriente alterna (Capítulo 9). No obstante, de acuerdo con la ITC-BT-22 [MINI02], todos los circuitos del sistema de continua deben disponer de protección frente a sobreintensidades, representada en los esquemas unifilares mediante el símbolo genérico correspondiente, sin especificación de modelo ni calibre.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 CARACTERIZACIÓN DE CARGAS

Caracterizar y cuantificar las cargas auxiliares de la S/E, clasificándolas en función de su criticidad, tipo de alimentación y papel dentro de la operación de la instalación.

1.4.2 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN CA:

Dimensionar el sistema de alimentación en CA de los SSAA a partir de la demanda de las cargas auxiliares alimentadas en BT, incluyendo el equilibrado de cargas, la selección del transformador auxiliar y la verificación de los conductores asociados.

1.4.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN CC:

Dimensionar el sistema de alimentación en CC a 125 Vcc a partir de la demanda de las cargas críticas y de la autonomía considerada, incluyendo la selección de rectificadores-cargadores y bancos de baterías.

1.4.4 ANÁLISIS DE CORTOCIRCUITO Y PROTECCIONES

Analizar las corrientes de cortocircuito en la red de BT de los SSAA y seleccionar las protecciones necesarias, verificando su intensidad asignada, poder de corte y coordinación.

1.4.5 VERIFICACIÓN NORMATIVA Y CRITERIO N-1

Verificar la adecuación del diseño de los SSAA a la normativa aplicable y al criterio N-1, comprobando que la arquitectura propuesta permite mantener la alimentación de las cargas auxiliares críticas ante los escenarios de contingencia considerados.

1.5 METODOLOGÍA

En primer lugar, se define la arquitectura general de los SSAA y se establecen las hipótesis de partida del diseño, incluyendo los niveles de tensión, la configuración de explotación y los escenarios de contingencia considerados.

En segundo lugar, se realiza el inventario de cargas auxiliares y su clasificación según criticidad y tipo de alimentación. A partir de este inventario se determina la demanda de referencia para el dimensionamiento de los sistemas de CA y CC.

En tercer lugar, se dimensionan los elementos principales de alimentación, verificando su adecuación frente a los criterios de intensidad admisible, caída de tensión, autonomía y margen de reserva aplicables en cada caso.

En cuarto lugar, se calculan las corrientes de cortocircuito en los puntos representativos de la red de BT de los SSAA, considerando los escenarios de explotación definidos.

Finalmente, se seleccionan las protecciones asociadas a la red de BT y se comprueba la coherencia global del diseño con los criterios técnicos, funcionales y normativos establecidos.

1.6 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La memoria avanza desde la contextualización del proyecto hasta la validación técnica de las soluciones adoptadas.

El Capítulo 1 presenta el contexto, la motivación, el objeto, el alcance, los objetivos y la metodología. El Capítulo 2 describe la instalación objeto de estudio, la arquitectura de los SSAA, los criterios de fiabilidad y la normativa aplicable. El Capítulo 3 recoge la arquitectura eléctrica de los SSAA.

El Capítulo 4 desarrolla el inventario, la clasificación y el equilibrado de cargas. El Capítulo 5 justifica la selección del transformador auxiliar a partir de la demanda calculada y de los criterios de redundancia. El Capítulo 6 aborda la selección de conductores y la comprobación de caída de tensión en la red de BT. El Capítulo 7 dimensiona el sistema de CC a 125 Vcc, con sus rectificadores-cargadores, baterías y autonomía. El Capítulo 8 presenta el cálculo de las corrientes de cortocircuito, y el Capítulo 9, la selección y coordinación de las protecciones.

Por último, se incluyen la evaluación económica, las conclusiones del proyecto, la bibliografía y los anexos.

Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y

NORMATIVA APLICABLE

2.1 CARACTERIZACIÓN GENERAL DE UNA SUBESTACIÓN DE TRANSPORTE

Una S/E de transporte reúne dos mundos: los equipos primarios de AT, que manejan la potencia, y los sistemas secundarios que los protegen, controlan y supervisan. Lo que interesa a este proyecto es que ese segundo mundo no funciona por sí solo, sino que depende de los SSAA para mantener alimentados sus equipos, tanto en régimen normal como cuando algo falla.

Por eso, antes de dimensionar nada, conviene caracterizar la instalación: qué niveles de tensión hay disponibles, cuántas posiciones funcionales se consideran, qué cargas auxiliares cuelgan de ellas, cómo de críticos son los servicios que alimentan y qué continuidad se les exige. Son los datos de partida que fijan el inventario de cargas, la arquitectura de alimentación en CA y CC y las comprobaciones que se desarrollan más adelante.

2.2 DESCRIPCIÓN DE LA SUBESTACIÓN OBJETO DE ESTUDIO

La instalación objeto de estudio es la S/E de Villaviciosa de Odón, de transporte y nivel 400/220 kV. Como referencia para el trabajo se toman las 9 casetas de relés (CR) recogidas en el inventario de cargas auxiliares, cada una asociada a una posición funcional del parque.

El parque de 220 kV presenta una configuración de doble barra con acoplamiento, habitual en transporte por la flexibilidad de explotación que ofrece y por la continuidad que mantiene ante la indisponibilidad de una barra o un interruptor. Cada posición (línea o transformador)

se conecta a una de las dos barras principales mediante su propio interruptor, mientras que un interruptor de acoplamiento adicional permite unir o separar ambas barras según las necesidades de explotación o mantenimiento. Es una disposición que permite seguir operando las posiciones durante determinadas contingencias o maniobras de mantenimiento, en línea con la fiabilidad que se exige a estas redes.

Ahora bien, el diseño eléctrico del parque -su apartamiento de AT, las barras principales, los interruptores y seccionadores- queda fuera del trabajo. La configuración se usa solo como dato de partida para situar la instalación y dar contexto al inventario de cargas. Lo que sí pesa es el número de casetas: cada CR incorpora equipos de protección, control, mando, señalización y comunicaciones alimentados desde los SSAA, de modo que cuántas haya condiciona directamente el dimensionamiento.

2.3 SISTEMAS AUXILIARES DE LA SUBESTACIÓN

Los SSAA de la instalación se organizan en dos subsistemas. Uno es la red de CA a 400/230 V, que alimenta las cargas auxiliares en alterna y, además, da entrada a los rectificadores-cargadores. El otro es el sistema de CC a 125 Vcc, que sostiene las cargas críticas y se mantiene respaldado por bancos de baterías.

La alimentación en MT de los transformadores auxiliares procede del devanado terciario de los transformadores principales, a 20 kV [RAS_98]. Esa tensión se transforma después en los centros de transformación (CT) a 400/230 V, nivel desde el que se reparte la BT hacia los cuadros y casetas del alcance.

El resultado es una separación funcional limpia entre las cargas que se alimentan directamente en CA y las cargas críticas en CC, y es esa separación la que ordena el inventario, el equilibrado y el dimensionamiento eléctrico posterior.

2.4 ALIMENTACIÓN EN CA

La red de CA se apoya en los dos CT, cada uno con su transformador auxiliar y un grupo electrógeno de respaldo conectado a la barra correspondiente. Desde ellos se alimentan los cuadros principales de BT y las casetas del inventario.

La distribución se resuelve con barras partidas y una red en anillo. En explotación normal el anillo trabaja con un punto de apertura definido: así no hay acoplamiento permanente entre fuentes y cada tramo se explota de forma radial, pero queda la vía para reconfigurar la alimentación si se pierde un tramo o una fuente.

Las cargas alimentadas en CA comprenden los servicios auxiliares no críticos y los equipos auxiliares que requieren alimentación alterna, incluyendo alumbrado, climatización, calefacción, fuerza, servicios generales y alimentación de equipos asociados a los sistemas auxiliares. Esta arquitectura constituye la base para el dimensionamiento del transformador auxiliar, de los conductores principales del anillo y de las protecciones de la red de BT.

2.5 ALIMENTACIÓN EN CC

La alimentación en CC corre a cargo de rectificadores-cargadores asociados a bancos de baterías. Estos equipos toman la red de CA de 400 V y la convierten en una tensión continua de 125 Vcc para las cargas críticas del alcance.

En funcionamiento normal, los rectificadores-cargadores alimentan esas cargas y mantienen las baterías en flotación. Si cae la alimentación en CA, las baterías toman el relevo y sostienen las cargas críticas durante la autonomía prevista, de forma que los sistemas de protección, control y mando no llegan a quedarse sin tensión [SERV24].

El reparto de los 125 Vcc se hace mediante barras de CC, de las que salen los circuitos críticos hacia las casetas y posiciones del inventario. El dimensionamiento se ciñe al nivel de 125 Vcc; cualquier sistema a otro nivel de tensión continua queda fuera del alcance.

2.6 CRITERIOS DE FIABILIDAD Y REDUNDANCIA

Los SSAA de una S/E de transporte se diseñan para fiabilidad alta, porque de ellos dependen la protección, el control, el mando y, en última instancia, la operación segura de la instalación. Si fallan, se resiente la capacidad de maniobra y puede no actuar la protección; por eso la arquitectura busca eliminar los puntos únicos de fallo y sostener el servicio ante las contingencias previsibles.

El hilo conductor es el criterio N-1: el sistema debe seguir alimentando las cargas auxiliares consideradas aunque se pierda un elemento principal de alimentación. En la red de CA esto se consigue con fuentes alternativas y con la posibilidad de reconfigurar la distribución en BT; en el sistema de CC, con los rectificadores-cargadores y las baterías, que garantizan las cargas críticas durante la autonomía prevista.

A ello se añade la independencia funcional de los sistemas de protección, alimentados desde sistemas de CC diferenciados. Esta separación reduce el riesgo de fallo común y evita que una sola incidencia deje fuera a la vez al sistema principal y a su respaldo.

El enfoque es coherente con los criterios de seguridad de operación de la red de transporte, recogidos en el Procedimiento de Operación P.O. 1.1, «Criterios de funcionamiento y seguridad para la operación del sistema eléctrico» [MINI16]. Su verificación llega más adelante, al dimensionar los equipos principales y comprobar los escenarios normales y de contingencia.

2.7 NORMATIVA APLICABLE

El cálculo y diseño de los SSAA se apoya en la normativa de instalaciones de BT, de AT y de los circuitos auxiliares asociados: esencialmente el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (REBT), el Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en

instalaciones eléctricas de alta tensión (RAT), los Procedimientos de Operación aplicables y las normas UNE e IEC de los equipos y materiales.

El REBT, aprobado por el Real Decreto 842/2002 [MINI02], es la referencia principal en BT y se aplica a la red de los SSAA, a los circuitos interiores, a las canalizaciones, a la selección de conductores, a la protección frente a sobreintensidades y a las caídas de tensión. Dentro de él se manejan varias Instrucciones Técnicas Complementarias (ITC): la ITC-BT-18 para la puesta a tierra de masas en BT, la ITC-BT-19 para las prescripciones de instalaciones interiores o receptoras, la ITC-BT-20 para los sistemas de instalación y canalización, y la ITC-BT-22 para la protección frente a sobrecargas y cortocircuitos.

El RAT, aprobado por el Real Decreto 337/2014 [MINI14], aplica por tratarse de una S/E de transporte y a sus circuitos auxiliares. De él se consideran la ITC-RAT 07 para la selección del transformador auxiliar, la ITC-RAT 10 para cuadros y pupitres de control, la ITC-RAT 11 para las instalaciones de acumuladores, y las ITC-RAT 13 y 15 para la puesta a tierra y la equipotencialidad en parques de AT.

El criterio N-1, además, se sustenta en los criterios de seguridad de operación de la red de transporte recogidos en el Procedimiento de Operación P.O. 1.1 [MINI16].

Por último, se aplican las normas UNE e IEC correspondientes a los equipos y materiales seleccionados —conductores, cables de BT, aparataje de protección, baterías estacionarias, rectificadores-cargadores y equipos de distribución—, que se citan en cada capítulo según el elemento elegido

La normativa aplicable se resume en la Tabla 3 , indicando para cada referencia su ámbito de aplicación dentro del proyecto.

<i>Norma / ITC</i>	<i>Aplicación en el proyecto</i>
REBT, RD 842/2002	Marco reglamentario de las instalaciones de BT en CA y CC.
ITC-BT-18	Puesta a tierra de masas y conductores de protección en BT.
ITC-BT-19	Criterios generales de instalaciones interiores, intensidades admisibles y caída de tensión.
ITC-BT-20	Sistemas de instalación y canalizaciones.
ITC-BT-22	Protección frente a sobreintensidades: sobrecargas y cortocircuitos.
RAT, RD 337/2014	Marco reglamentario de la S/E de AT y sus circuitos auxiliares asociados.
ITC-RAT 07	Transformadores y autotransformadores de potencia; referencia para selección del transformador auxiliar.
ITC-RAT 10	Cuadros y pupitres de control.
ITC-RAT 11	Instalaciones de acumuladores; referencia para baterías del sistema de CC.
ITC-RAT 13	Instalaciones de puesta a tierra.
ITC-RAT 15	Instalaciones eléctricas de exterior y equipotencialidad en parques de AT.

DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN Y NORMATIVA APLICABLE

P.O. 1.1	Criterios de funcionamiento y seguridad para la operación del sistema eléctrico; referencia para el criterio N-1.
UNE / IEC aplicables	Cables, baterías, rectificadores, aparamenta y equipos auxiliares.

Tabla 3. Normativa aplicable

Capítulo 3. ARQUITECTURA ELÉCTRICA DE LOS SERVICIOS AUXILIARES

3.1 CRITERIOS DE DISEÑO DE LA ARQUITECTURA

Antes de elegir esquemas unifilares y niveles de tensión conviene fijar los criterios que guían esas decisiones, de modo que el resto del capítulo se limite a aplicarlos. La arquitectura de los SSAA de la S/E se ha diseñado atendiendo a cuatro principios.

El primero es la continuidad de servicio bajo criterio N-1, que es el que vertebra todo el diseño. La arquitectura debe poder perder un elemento principal de alimentación —una fuente, un transformador auxiliar o un tramo de red— sin que las cargas auxiliares dejen de estar alimentadas. Este principio es el que descarta las topologías puramente radiales y orienta la elección hacia configuraciones con respaldo y posibilidad de reconfiguración.

El segundo es la separación entre la alimentación en CA y la alimentación en CC. Las cargas no críticas se alimentan directamente en CA desde la red de BT, mientras que las cargas críticas se alimentan en CC, respaldadas por baterías que las independizan del estado de la red de alterna. Esta separación no solo responde a la naturaleza de cada carga, sino que permite dimensionar ambos sistemas por separado, con sus propios criterios.

El tercero es la redundancia de fuentes y la independencia frente al fallo común. La instalación cuenta con dos CT, cada uno con su transformador auxiliar y su grupo electrógeno de respaldo, y con sistemas de CC diferenciados para los equipos de protección. El objetivo es minimizar los puntos únicos de fallo y evitar que una sola incidencia comprometa a la vez el sistema principal y su respaldo.

El cuarto es la normalización y la disponibilidad comercial. Los niveles de tensión y los equipos se eligen entre valores normalizados y soluciones disponibles en el mercado, lo que asegura la compatibilidad con la aparamenta de protección, simplifica el mantenimiento y facilita futuras ampliaciones.

Estos cuatro criterios se concretan en los apartados siguientes: en la selección de los esquemas unifilares de MT y BT, en la definición de los niveles de tensión adoptados y en la descripción del sistema CA/CC resultante.

3.2 SELECCIÓN DEL ESQUEMA UNIFILAR DE MEDIA TENSIÓN

La elección del esquema de MT parte de comparar las configuraciones habituales en subestaciones de transformación, recogidas en la Tabla 4.

<i>Esquema</i>	<i>Ventaja principal</i>	<i>Inconveniente</i>	<i>Motivo de descarte/adopción</i>
Barra simple	Simplicidad y bajo coste	Sin continuidad ante fallo o mantenimiento de barra	Descartada: insuficiente nivel de disponibilidad
Barra simple seccionada	Buen compromiso entre continuidad y simplicidad	No elimina todos los puntos únicos de fallo	Solución adoptada
Doble barra	Mayor flexibilidad operativa	Mayor coste y complejidad de aparamenta	Descartada: sobredimensionada para SSAA
Anillo	Continuidad elevada	Complejidad de protecciones y explotación	Descartada: sobredimensionada para SSAA

Tabla 4. Comparación configuraciones MT [VARG20].

Se adopta una barra simple seccionada, que separa eléctricamente las dos semibarras mediante un interruptor de acoplamiento. Así se mantiene la alimentación a los transformadores auxiliares aunque una sección quede indisponible por avería o

mantenimiento, sin incurrir en el coste y la complejidad de aparamenta de una doble barra o un anillo, que para los SSAA resultarían sobredimensionados. Es el punto de equilibrio entre simplicidad, coste, maniobrabilidad y disponibilidad que el caso requiere. El anillo, en concreto, se descarta en MT por no aportar ventajas en una barra que conecta únicamente las dos celdas de los transformadores auxiliares; su uso sí resulta justificado, en cambio, en la distribución de BT hacia las casetas, como se detalla en el apartado siguiente.

3.3 SELECCIÓN DEL ESQUEMA UNIFILAR DE BAJA TENSIÓN

En BT, la topología viene condicionada por el criterio N-1 establecido en el apartado 3.1: la distribución debe sostener la pérdida de cualquier elemento singular, lo que descarta de entrada las configuraciones radiales, incapaces de dar continuidad ante el fallo de un transformador o de un tramo. Las alternativas valoradas se resumen en la Tabla 5.

<i>Esquema</i>	<i>Ventaja principal</i>	<i>Inconveniente</i>	<i>Motivo de descarte/adopción</i>
Barra simple radial	Simplicidad y bajo coste	Sin continuidad ante fallo de transformador o tramo	Descartada: disponibilidad insuficiente
Barra simple seccionada radial	Permite respaldo entre transformadores	No resuelve fallo en tramo de salida	Descartada: no garantiza continuidad hasta cada caseta
Barra simple seccionada con anillo	Alta continuidad con complejidad moderada	Requiere correcta gestión del punto de apertura	Solución adoptada
Doble barra con anillo	Máxima disponibilidad y flexibilidad operativa	Coste y complejidad excesivos	Descartada: no justificada para SSAA

Tabla 5. Comparación configuraciones para BT [VARG20].

Se adopta una barra simple seccionada con distribución en anillo. Hay dos barras principales de 400 V, cada una alimentada por su transformador auxiliar y unidas por un interruptor de acoplamiento normalmente abierto. Desde ellas, la alimentación a los cuadros de las casetas

se reparte por una red en anillo, de modo que si un tramo queda fuera de servicio puede realimentarse desde el extremo opuesto. Es la topología habitual en este tipo de subestaciones y la que aporta la continuidad exigida a los SSAA.

3.4 NIVELES DE TENSIÓN ADOPTADOS

3.4.1 MEDIA TENSIÓN

Para la alimentación de los transformadores auxiliares se adopta una tensión nominal de 20 kV, obtenida del devanado terciario de los transformadores principales de la S/E 400/220 kV. La elección está respaldada por la reglamentación: el Artículo 3 del RAT [MINI14] sitúa las instalaciones de tercera categoría entre 1 kV y 30 kV, y la ITC-RAT 04 del Real Decreto 337/2014 [MINI14] remite a los valores normalizados de la UNE-EN 60038 [UNE_12], entre los que figura 20 kV. Resulta, por tanto, coherente con el origen de alimentación disponible y con la normalización aplicable.

3.4.2 BAJA TENSIÓN

Se adopta un sistema trifásico de 400/230 V, el valor normalizado de distribución en BT en España según la UNE-EN 60038 [UNE_12], con 400 V entre fases y 230 V entre fase y neutro. Cubre así tanto los receptores trifásicos a 400 V como los monofásicos a 230 V, y es compatible con la aparamenta de protección disponible en el mercado para este rango. Conforme al Artículo 4 del REBT [MINI02], queda dentro de los valores usuales para instalaciones de CA.

3.4.3 CORRIENTE CONTINUA

Se adopta un nivel de 125 Vcc para los sistemas de protección, control, mando y señalización. Esta tensión alimenta los circuitos de disparo y maniobra, garantizando su disponibilidad mediante rectificadores y baterías de respaldo. Es un valor estándar del sector para los SSAA de subestaciones, en línea con la IEC 61936-1 [IEC_21] y con la práctica de los operadores del sistema.

3.5 DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA CA/CC ADOPTADO

La arquitectura resultante combina los dos sistemas descritos en los apartados anteriores. En CA, dos barras principales de 400 V -una por CT, unidas por el acoplamiento normalmente abierto- alimentan en anillo los cuadros de las casetas, con un grupo electrógeno por CT como respaldo. En CC, los rectificadores-cargadores y sus baterías sostienen las cargas críticas a 125 Vcc. Cada CT dispone, así, de un grupo electrógeno conectado a su barra principal, que actúa como respaldo ante la pérdida total del suministro desde la red de MT y mantiene las cargas en CA durante el tiempo necesario para restablecer la alimentación principal.

Según su criticidad, las cargas se agrupan en dos categorías:

3.5.1 CARGAS CRÍTICAS

Son las cargas de cuya alimentación depende la operación segura de la S/E y que, por ello, se alimentan en CC a 125 Vcc mediante rectificadores-cargadores respaldados por baterías, con independencia del estado de la red de CA. Comprenden los sistemas de protección y control de las posiciones (protecciones de línea, gateways de comunicaciones y señalización y enclavamientos), los accionamientos de maniobra de seccionadores e interruptores, el alumbrado de emergencia interior y exterior y determinados servicios auxiliares de las casetas, como la ventilación y el caldeo asociados a los equipos.. Su inventario detallado y su agrupación por posición se recogen en el Capítulo 4, y constituyen la base para el dimensionamiento del sistema de CC desarrollado en el Capítulo 7.

3.5.2 CARGAS NO CRÍTICAS

El alumbrado interior y exterior, la climatización, la calefacción, el bombeo de agua potable y las tomas de corriente de servicio, alimentadas en CA a 400/230 V directamente desde la red.

Capítulo 4. ANÁLISIS Y REPARTO DE CARGAS

En este capítulo se realiza un inventario, clasificación y análisis de las cargas auxiliares de la S/E para obtener la demanda de cálculo de los SSAA, distinguiendo entre cargas críticas y no críticas y entre las alimentadas en CA y en CC.

Ese análisis es la base de todo lo que viene después: el transformador auxiliar y los conductores se dimensionan a partir de la demanda en CA, y los rectificadores-cargadores y las baterías, a partir de la demanda crítica en CC. El equilibrado de las cargas monofásicas, además, reduce el desequilibrio entre fases y, con él, la corriente por el neutro.

4.1 INVENTARIO DE CARGAS

El inventario reúne los receptores auxiliares considerados en el dimensionamiento. De cada carga se registra su ubicación, el cuadro desde el que se alimenta, la tensión nominal, la potencia, el tipo de alimentación, la fase asignada -en las cargas monofásicas en CA- y el factor de utilización o de servicio aplicado.

Las cargas se agrupan según su sistema de alimentación: las que se alimentan en CA desde la red de BT de 400/230 V y las cargas críticas alimentadas en CC a 125 Vcc para sistemas de protección, control, mando, telecomunicaciones y señalización.

En el cuerpo del capítulo se recogen únicamente los resultados. El inventario detallado de receptores se incluye en el Anejo I y el desarrollo completo de los cálculos de demanda y del equilibrado por fases, en el Anejo II.

4.2 CLASIFICACIÓN DE CARGAS CRÍTICAS Y NO CRÍTICAS

La clasificación se apoya en los receptores reales de la S/E de Villaviciosa de Odón, ordenados según su función, su criticidad y su tipo de alimentación.

Son críticas las cargas cuya pérdida de alimentación comprometería la operación segura de la S/E: la actuación de las protecciones, la capacidad de mando o la supervisión de la instalación. Entran aquí los sistemas de protección, control, mando, señalización y el equipo de comunicaciones para teleprotección y telemando (*Gateway*), el alumbrado de emergencia y los demás equipos ligados a la continuidad operativa. Todas ellas se alimentan en CC, respaldadas por baterías.

Son no críticas aquellas cuya indisponibilidad no afecta de forma inmediata a la seguridad eléctrica ni al disparo de las protecciones: el alumbrado ordinario, la climatización, la calefacción, la ventilación, las tomas de corriente y los servicios generales. En esta categoría se incluyen también los servicios auxiliares de la caseta de telecontrol —iluminación, climatización, detección de incendios y el cableado pasivo de fibra óptica—, que dan soporte a la sala pero no intervienen en la comunicación de protección y telemando propiamente dicha. Todas estas cargas se alimentan desde la red de BT en CA.

4.3 CRITERIOS DE UTILIZACIÓN Y SIMULTANEIDAD

La demanda de cálculo no se obtiene de la potencia nominal de cada receptor sin más, sino aplicando, cuando procede, un factor que refleja la potencia que cada carga demanda realmente en las condiciones de operación consideradas. La potencia de diseño de cada carga es:

$$P_d = P_n \cdot FU$$

donde P_d es la potencia de diseño, P_n es la potencia nominal de la carga y FU es el factor de utilización adoptado.

En aquellas cargas para las que se dispone de un factor de servicio específico, este se aplica de forma equivalente. El factor de servicio puede tomar valores mayores que la unidad cuando representa una mayoración del conjunto de la carga, a diferencia del factor de utilización, acotado a la unidad.

$$P_d = P_n \cdot FS$$

donde (FS) representa el factor de servicio o simultaneidad asociado a la carga correspondiente.

A partir de la potencia de diseño se obtiene la intensidad de cálculo. En CA, a partir de la potencia activa, la tensión y el factor de potencia; para cargas monofásicas:

$$I = \frac{P_d}{U_{fn} \cdot \cos\varphi}$$

E. 1. Intensidad monofásica

y para cargas trifásicas:

$$I = \frac{P_d}{\sqrt{3} \cdot U_{ff} \cdot \cos\varphi}$$

E. 2. Intensidad trifásica

En CC, la intensidad de cálculo se obtiene directamente como:

$$I = \frac{P_d}{U_{cc}}$$

Con estos criterios la demanda queda homogénea y trazable para el dimensionamiento posterior de transformadores, conductores, rectificadores y baterías.

4.4 EQUILIBRADO DE CARGAS POR FASES

Las cargas monofásicas se reparten entre las tres fases (A, B y C) buscando minimizar el desequilibrio y, con ello, la corriente por el neutro. El reparto perfecto -neutro nulo- no es alcanzable en la práctica con cargas discretas, pero una distribución cuidada se aproxima a él y mejora la estabilidad del sistema. La Tabla 6 recoge las intensidades resultantes por fase.

Fase	$\bar{I}$ (A)	$ \bar{I} $ (A)	$\angle$ (°)	S_{eq} (kVA)
A	$476,95 + j183,15$	510,90	21,01	117,51
B	$-71,05 - j483,02$	488,22	-98,37	112,29
C	$-388,08 + j304,57$	493,32	141,88	113,46
Neutro	$17,82 + j4,70$	18,43	14,76	—

Tabla 6. Resultado del equilibrado por fases de las cargas en CA

El reparto adoptado permite reducir la corriente residual por el conductor neutro a 18,43 A, valor muy inferior a las corrientes de fase obtenidas, comprendidas entre 488 A y 511 A. La corriente de neutro representa aproximadamente un 3,7 % de la corriente media de fase, por lo que el desequilibrio residual puede considerarse reducido. Este resultado confirma que la asignación de las cargas monofásicas a las fases se aproxima de forma satisfactoria al reparto equilibrado buscado. El detalle de la asignación de cargas y del cálculo fasorial de corrientes se recoge en el Anejo II.

Adicionalmente, se estima la caída de tensión en el conductor neutro asociada a dicha corriente residual, con objeto de comprobar que el potencial del neutro en los puntos de consumo permanece próximo al neutro de referencia del transformador. Para ello se adopta,

de forma conservadora, la longitud total del anillo principal, igual a $L = 470,96 \text{ m}$, y los parámetros eléctricos del conductor seleccionado, $R = 0,0817 \Omega/\text{km}$ y $X = 0,0654 \Omega/\text{km}$.

La corriente de neutro obtenida es:

$$\bar{I}_N = 18,43 \angle 14,76^\circ \text{ A}$$

La impedancia equivalente del conductor neutro considerada resulta:

$$\bar{Z}_N = 0,47096 \cdot (0,0817 + j0,0654) = 0,0385 + j0,0308 \Omega$$

Por tanto, la caída de tensión en el neutro se obtiene como:

$$\bar{U}_N = \bar{I}_N \cdot \bar{Z}_N$$

$$\bar{U}_N = 18,43 \angle 14,76^\circ \cdot 0,0493 \angle 38,67^\circ = 0,91 \angle 53,43^\circ \text{ V}$$

En consecuencia, el desequilibrio residual de cargas no da lugar a una elevación apreciable del potencial del neutro. Bajo la hipótesis conservadora considerada, el desplazamiento del neutro puede considerarse despreciable, ya que la caída obtenida, de 0,91 V, representa únicamente el 0,40 % de la tensión fase-neutro nominal de 230 V.

4.5 RESULTADOS DEL REPARTO DE CARGAS

La Tabla 7 reúne las magnitudes de demanda obtenidas para los SSAA, en CA y en CC.

<i>Sistema</i>	<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>
CA - cargas no críticas	Potencia aparente total	341,58 kVA
CA - cargas no críticas con factor de seguridad $n = 1,1$	Potencia aparente de diseño	375,74 kVA
CC a 125 Vcc - cargas críticas	Demanda total	10,754 kW

Tabla 7. Resumen de la demanda de los SSAA en CA y CC

Por el lado de CA, las cargas no críticas suman 341,58 kVA, que ascienden a 375,74 kVA tras aplicar el factor de seguridad $n = 1,1$ adoptado para la selección del transformador. Por el lado de CC, las cargas críticas a 125 Vcc demandan 10,75 kW -8,784 kW de las nueve posiciones y 1,970 kW de las cargas generales-, lo que equivale a una corriente máxima de diseño de 86,03 A.

Estas magnitudes constituyen el punto de partida de los dos capítulos siguientes: la demanda en CA conduce a la selección del transformador auxiliar y al dimensionamiento de los conductores (Capítulo 5 y Capítulo 6), mientras que la demanda crítica en CC fija la capacidad del banco de baterías y la selección de los rectificadores-cargadores (Capítulo 7).

Capítulo 5. DIMENSIONAMIENTO DEL TRANSFORMADOR AUXILIAR

5.1 HIPÓTESIS DE DIMENSIONAMIENTO

La instalación cuenta con dos transformadores auxiliares, uno por CT, cada uno con un grupo electrógeno de respaldo. En operación normal, las cargas se reparten entre los transformadores de CT1 y CT2; pero la distribución en anillo de la red de BT permite adoptar un criterio de continuidad más exigente: que cada transformador pueda asumir por sí solo la totalidad de la demanda si el otro queda fuera de servicio. El dimensionamiento se hace, por tanto, sobre esa hipótesis de contingencia.

5.2 POTENCIA APARENTE DE DISEÑO

La selección del transformador auxiliar se realiza a partir del inventario de cargas no críticas en C.A. y del equilibrado de cargas por fases previamente realizado. Como resultado de este análisis se obtiene una potencia aparente total aproximada de 341,6 kVA.

Asimismo, debe tenerse en cuenta que, para la selección del transformador, no se han aplicado factores de simultaneidad globales, lo que simplifica los cálculos y aporta un margen de seguridad adicional al dimensionamiento. Además, se aplica un factor de seguridad de $n=1,1$ a las potencias calculadas del equilibrado de cargas, obteniendo una potencia aparente demandada de 375,7 kVA.

5.3 SELECCIÓN DE POTENCIA NORMALIZADA

Como se puede observar en la Tabla 8, en la ITC-RAT 07 del Real Decreto 337/2014 [MINI14] se recogen las potencias aparentes asignadas normalizadas de los transformadores, por lo que la elección se realiza en función de la potencia aparente demandada estimada.

Potencia asignada kVA	U _m ≤ 24 kV				U _m = 36 kV.			
	P _k (W) a 75 °C	P ₀ (W)	Lw(A) dB(A)	Z _{cc} (%), a 75 °C	P _k (W) a 75 °C	P ₀ (W)	Lw(A) dB(A)	Z _{cc} (%), a 75 °C
50	875	110	42	4	1050	160	50	4,5
100	1475	180	44	4	1650	270	54	4,5
160	2000	260	47	4	2150	390	57	4,5
250	2750	360	50	4	3000	550	60	4,5
315	3250	440	52	4	—	—	—	—
400	3850	520	53	4	4150	790	63	4,5
500	4600	610	54	4	—	—	—	—
630	5400	730	55	4	5500	1100	65	4,5
800	7000	800	56	6	7000	1300	66	6

Tabla 8. Potencias asignadas normalizadas según la ITC-RAT 07 del Real Decreto 337/2014 [MINI14]

La potencia normalizada inmediatamente superior a la demanda aparente de diseño (375,7 kVA) es la de 400 kVA, quedando descartada la opción de 315 kVA por ser inferior a dicha demanda.

El grado de carga se evalúa, no obstante, sobre la demanda aparente estimada sin el factor de seguridad, igual a 341,6 kVA, con el fin de no contabilizar dos veces el margen de diseño:

$$\text{Grado de carga} = \frac{S_{\text{demandada}}}{S_{\text{transformador}}} \cdot 100 = \frac{341,6}{400} \cdot 100 = 85,4 \%$$

Este valor corresponde al escenario de contingencia (criterio N-1), en el que un único transformador asume la totalidad de la demanda de los SSAA. En operación normal, la carga se reparte entre los transformadores auxiliares de CT1 y CT2, por lo que cada uno trabaja en torno al 43 %.

Se obtiene así un margen del 14,6 % incluso en el caso más desfavorable de contingencia, que constituye una reserva razonable frente a incertidumbres del inventario, errores de estimación y pequeñas ampliaciones futuras. Asimismo, en el equilibrado de cargas se ha

considerado el factor de utilización en aquellas cargas en las que resulta aplicable, lo que hace más realista la estimación de la demanda. Teniendo en cuenta todo lo anterior, la opción de 500 kVA se considera menos conveniente, al suponer un sobredimensionamiento innecesario del transformador.

5.4 SELECCIÓN COMERCIAL DEL TRANSFORMADOR AUXILIAR

La elección del fabricante no responde a un requisito de compatibilidad eléctrica, garantizada por la normalización de la tensión asignada, el grupo de conexión y la impedancia de cortocircuito, sino a criterios de homogeneidad de la instalación. Dado que los CT de la S/E son de Ormazabal, adoptar el transformador auxiliar de la misma gama facilita su integración en el conjunto existente, simplifica la gestión de repuestos y unifica el mantenimiento.

Se adopta como referencia comercial un transformador de distribución Ormazabal de la gama transforma.smart, de 400 kVA, grupo de conexión Dyn11, clase de tensión asignada primaria de 24 kV y tensión secundaria asignada de 420 V.



Figura 3. Transformador de distribución para redes inteligentes [ORMA22]

La clase de tensión asignada primaria de 24 kV no corresponde a la tensión nominal de explotación de la red de MT, sino al nivel máximo de tensión para el que está diseñado el aislamiento del equipo. Por tanto, dicha referencia resulta compatible con la red de MT de 20 kV considerada en el proyecto.

En el lado de BT, el transformador presenta una tensión secundaria asignada de 420 V. No obstante, el sistema de utilización de los SSAA se define como una red de BT de 400/230 V. Por ello, los cálculos de intensidad, caída de tensión, cortocircuito y selección de protecciones se realizan tomando como referencia la tensión de utilización de 400 V, manteniendo así la coherencia con el resto del dimensionamiento desarrollado en la memoria.

A partir de la selección comercial anterior se verifica la disponibilidad de un equipo real compatible con los requisitos de potencia, nivel de aislamiento y grupo de conexión adoptados. Sin embargo, para el modelo de cálculo se emplean los valores de referencia de la ITC-RAT 07 correspondientes a transformadores de 400 kVA y $U_m \leq 24 \text{ kV}$. En particular, se adoptan $P_k = 3850 \text{ W}$, $P_0 = 520 \text{ W}$, $L_w(A) = 53 \text{ dB(A)}$ y $u_{CC} = 4 \%$.

La adopción de estos valores permite mantener un criterio reglamentario y conservador respecto a los valores particulares del equipo comercial. En cualquier caso, la impedancia de cortocircuito adoptada, $u_{CC} = 4 \%$, coincide con la indicada en la ficha técnica del transformador Ormazabal considerado, por lo que los niveles de cortocircuito calculados permanecen coherentes con la referencia comercial seleccionada.

Debe distinguirse, por tanto, entre la selección comercial del equipo, utilizada para verificar la existencia de una solución compatible con la instalación, y los parámetros adoptados para el modelo de cálculo, definidos a partir de los valores de referencia establecidos en la ITC-RAT 07 del Real Decreto 337/2014 [MINI14].

5.5 PARÁMETROS DEL TRANSFORMADOR SELECCIONADO

Una vez seleccionada la potencia normalizada de 400 kVA y definida la referencia comercial del transformador auxiliar, se establecen los parámetros que se emplearán en los cálculos posteriores de intensidad nominal, dimensionamiento de conductores, caídas de tensión y estudio de cortocircuito.

Aunque el transformador comercial considerado presenta una tensión secundaria asignada de 420 V, el sistema de utilización de los SSAA se define como una red de BT de 400/230 V. Por ello, para el modelo de cálculo se adopta una relación de transformación de referencia de 20 kV / 400 V. Esta hipótesis mantiene la coherencia con el resto del dimensionamiento de la red de BT y proporciona una intensidad de cálculo superior a la que se obtendría empleando 420 V, por lo que resulta conservadora para la selección de conductores y protecciones. Los parámetros adoptados se resumen en la Tabla 9.

<i>Parámetro</i>	<i>Valor adoptado</i>
Potencia aparente nominal, S_n	400 kVA
Tensión primaria de servicio, U_{1n}	20 kV
Tensión secundaria de cálculo, U_{2n}	400/230 V
Frecuencia nominal, f_n	50 Hz
Número de fases	3
Intensidad nominal en MT, I_{1n}	11,55 A
Intensidad nominal en BT, I_{2n}	577,35 A
Pérdidas en carga a 75 °C, P_k	3850 W
Pérdidas en vacío, P_0	520 W
Nivel de potencia acústica, $L_w(A)$	53 dB(A)
Tensión de cortocircuito, u_{cc}	4 %

Tabla 9. Parámetros nominales del transformador auxiliar

El cálculo de la intensidad nominal se realiza a partir de la expresión general para potencia aparente en sistemas trifásicos según la ecuación E. 3:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

E. 3. Intensidad nominal para un sistema trifásico

donde I_n es la intensidad nominal, S_n es la potencia aparente nominal del transformador y U_n es la tensión compuesta del lado considerado.

Por tanto, se obtienen las intensidades para media y baja tensión respectivamente:

$$I_{1n} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 20 \cdot 10^3} = 11,55 \text{ A} \quad ; \quad I_{2n} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577,35 \text{ A}$$

Se adopta la intensidad nominal del lado de BT como referencia para el dimensionamiento de los conductores principales de salida del transformador y del anillo de distribución, al representar la corriente máxima que el transformador puede suministrar en condiciones nominales. Esta hipótesis evita que los conductores principales se conviertan en el elemento limitante de la instalación y permite mantener margen frente a futuras ampliaciones de carga.

Asimismo, se adopta una impedancia de cortocircuito $u_{CC} = 4 \%$, valor que se empleará posteriormente para determinar la impedancia equivalente del transformador y calcular las corrientes de cortocircuito en el lado de BT.

Las pérdidas en vacío, P_0 , corresponden a las pérdidas asociadas al núcleo magnético cuando el transformador se encuentra energizado. Por su parte, las pérdidas en carga, P_k , representan principalmente las pérdidas por efecto Joule en los devanados a corriente nominal y a una temperatura de referencia de 75 °C.

$$P_{pérdidas} = P_0 + P_k = 520 + 3850 = 4370 \text{ W}$$

A plena carga, las pérdidas totales del transformador serían aproximadamente 4370 W, obtenidas como suma de las pérdidas en vacío y las pérdidas en carga nominales

5.6 SELECCIÓN DEL GRUPO DE CONEXIÓN

La elección del grupo de conexión responde a dos criterios: la necesidad de disponer de neutro en el lado de BT y el comportamiento del transformador frente a desequilibrios de carga. La relación de transformación es la misma ($r = 1$) en todas las alternativas evaluadas, de modo que no interviene en la decisión.

El primero es un criterio funcional. La red de BT alimenta un elevado número de cargas monofásicas a 230 V entre fase y neutro, por lo que el secundario debe conectarse en estrella con el neutro accesible. Esto descarta de entrada las configuraciones que no proporcionan neutro en BT, como la conexión Dd.

El segundo criterio decide entre las conexiones que sí disponen de neutro. Para evaluarlo se compara, ante un desequilibrio en el secundario, la corriente que se refleja en el lado de MT. En la conexión Dy, el devanado primario en triángulo ofrece un camino cerrado a las corrientes de desequilibrio, de modo que la corriente reflejada a la red de MT se reduce a $I/\sqrt{3}$. En la conexión Yy, en cambio, la ausencia de un devanado en triángulo impide ese camino y la perturbación se transmite íntegra al primario. La Tabla 10 resume la comparación; el desarrollo detallado se recoge en el Anejo III.

El punto neutro del devanado secundario del transformador auxiliar se conecta a la red de tierras general de la subestación, de acuerdo con la ITC-RAT 15 [MINI14], configurando un esquema de conexión a tierra de tipo TN-S, coherente con la integración de los embarrados de baja tensión en la red de tierras equipotencial descrita en el apartado 2.3.

<i>Conexión</i>	<i>I primario</i>	<i>Neutro BT</i>	<i>Valoración</i>
Dy	$I/\sqrt{3}$	Sí	Adoptada
Dd	I	No	Descartada: sin neutro en BT
Yy	I	Sí	Descartada: peor comportamiento ante desequilibrios

Tabla 10. Comparación de grupos de conexión frente a desequilibrios de carga.

Por ambos motivos se adopta la conexión Dyn. Se elige además el índice horario 11 (Dyn11), habitual en transformadores de distribución y adecuado para disponer de neutro en el secundario de BT. Esta elección es además coherente con el carácter marcadamente monofásico de las cargas, ya puesto de manifiesto en el equilibrado del 0

Capítulo 6. DIMENSIONAMIENTO DE CONDUCTORES DE BAJA TENSIÓN

6.1 CRITERIOS GENERALES DE SELECCIÓN

Para la selección de cables, debe tenerse en cuenta que se distinguen dos tipos en el sistema. Por una parte, se encuentran los cables de alimentación, correspondientes a los conductores que alimentan las distintas casetas desde los centros de transformación y cuadros principales de baja tensión. Por otra parte, se encuentran los cables interiores, correspondientes a los conductores que alimentan los receptores finales desde los cuadros situados en cada caseta. A estos dos tipos de cables se les denominará en adelante cables de alimentación y cables interiores, respectivamente. La elección de las canalizaciones y de la situación de instalación adoptadas se resume en la Tabla 11 y en la Tabla 12.

Conductores y cables	Sistemas de instalación							
	Sin fijación	Fijación directa	Tubos	Canales y molduras	Conductos de sección no circular	Bandejas de escalera Bandejas soportes	Sobre aisladores	Con fiador
Conductores desnudos	–	–	–	–	–	–	+	–
Conductores aislados	–	–	+	*	+	–	+	–
Cables Multipolares	+	+	+	+	+	+	0	+
Cables con cubierta Unipolares	0	+	+	+	+	+	0	+
+: Admitido –: No admitido 0: No aplicable o no utilizado en la práctica *: Se admiten conductores aislados si la tapa sólo puede abrirse con un útil o con una acción manual importante y la canal es IP 4X o IP XXD								

Tabla 11. Elección de las canalizaciones según la ITC-BT-20 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].

Situaciones		Sistemas de instalación							
		Sin fijación	Fijación directa	Tubos	Canales y molduras	Conductos de sección no circular	Bandejas de escalera Bandejas soportes	Sobre aisladores	Con fiador
Huecos de la construcción	accesibles	+	+	+	+	+	+	–	0
	no accesibles	+	0	+	0	+	0	–	–
Canal de obra		+	+	+	+	+	+	–	–
Enterrados		+	0	+	–	+	0	–	–
Empotrados en estructuras		+	+	+	+	+	0	–	–
En montaje superficial		–	+	+	+	+	+	+	–
Aéreo		–	–	(*)	+	–	+	+	+
+: Admitido –: No admitido 0: No aplicable o no utilizado en la práctica (*): No se utilizan en la práctica salvo en instalaciones cortas y destinadas a la alimentación de máquinas o elementos de movilidad restringida									

Tabla 12. Situación de las canalizaciones según la ITC-BT-20 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].

Los cables de alimentación se escogen del tipo unipolar con cubierta, con conductor de cobre y aislamiento 0,6/1 kV, por tratarse de tramos principales de alimentación en baja tensión. La configuración unipolar resulta adecuada para alimentadores principales trifásicos con recorridos de cierta longitud y secciones elevadas, mientras que la cubierta exterior proporciona una mayor protección mecánica y un mejor comportamiento frente a las condiciones de instalación en el entorno de las casetas y centros de transformación.

El sistema de instalación adoptado para los cables de alimentación es en canal de obra registrable, mediante bandeja de escalera o soporte equivalente, solución coherente con una instalación ventilada habitual en subestaciones. Además, facilita la inspección, el mantenimiento y posibles ampliaciones futuras, frente a canalizaciones cerradas que dificultarían la explotación. De este modo, la solución escogida mejora la seguridad, el orden del tendido y la continuidad del servicio.

Para el cableado interior se seleccionan conductores H07V-K de cobre, con aislamiento PVC y tensión asignada 450/750 V. Este tipo de conductor resulta adecuado para instalaciones interiores protegidas mediante tubo, siempre que se respeten las condiciones de instalación previstas por el Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión. El sistema de instalación

adoptado es tubo en montaje superficial, solución habitual en casetas técnicas por facilitar la inspección, el mantenimiento y posibles modificaciones futuras.

La ITC-BT-21 se emplea para justificar las características y condiciones de instalación de los tubos y canales protectoras, mientras que la intensidad admisible de los conductores se determina posteriormente conforme a la ITC-BT-19, en función de la sección, naturaleza del aislamiento, número de conductores cargados y método de instalación. Los conductores seleccionados son válidos tanto para circuitos monofásicos como trifásicos, adaptándose el número de conductores a las condiciones de cada receptor.

El criterio general adoptado se basa en priorizar la protección mecánica, la fiabilidad y la robustez en los cableados de alimentación, mientras que en el cableado interior predominan la facilidad de instalación, el mantenimiento y la adaptación a los cuadros y receptores.

6.2 CABLES DE ALIMENTACIÓN DEL ANILLO PRINCIPAL

Dentro de los cables de alimentación se consideran los tramos correspondientes al anillo principal de distribución en baja tensión. El dimensionamiento se realiza sobre estos conductores, al tratarse de los tramos más exigentes desde el punto de vista de continuidad de servicio y de carga transportada.

Para elegir una sección tentativa se realizan cálculos previos con el fin de obtener la intensidad de diseño de cada tramo de alimentación. Dado que la disposición de la red de los SSAA presenta una configuración en anillo y debe poder ser alimentada desde cualquiera de los transformadores auxiliares en caso de contingencia, el dimensionamiento se realiza considerando el caso más desfavorable de explotación. A partir de las cargas previstas se obtiene una intensidad máxima de aproximadamente 493,03 A.

No obstante, al tratarse de conductores principales asociados a la salida del transformador y al anillo de distribución, se adopta como intensidad de diseño la intensidad nominal del transformador auxiliar. Este criterio resulta más conservador, ya que permite prever posibles

ampliaciones futuras de carga hasta la potencia máxima admisible del transformador, evitando que los conductores principales se conviertan en el elemento limitante de la instalación.

El transformador auxiliar seleccionado es de 400 kVA y tiene una tensión secundaria de 400 V. Su intensidad nominal en el lado de baja tensión se calcula de la siguiente manera:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{400 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 577,35 \text{ A}$$

Por tanto, la intensidad de diseño adoptada es de 577,35 A, y la sección a escoger será la correspondiente a la intensidad admisible inmediatamente superior a esta. Se elige entonces la sección del conductor de acuerdo con la Tabla 13:

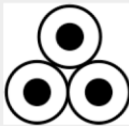
Sección nominal mm²	Tres cables unipolares (1)			1 cable trifásico		
						
	Tipo de aislamiento					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	46	45	38	44	43	36
10	64	62	53	61	60	50
16	86	83	71	82	80	65
25	120	115	96	110	105	87
35	145	140	115	135	130	105
50	180	175	145	165	160	130
70	230	225	185	210	220	165
95	285	280	235	260	250	205
120	335	325	275	300	290	240
150	385	375	315	350	335	275
185	450	440	365	400	385	315
240	535	515	435	475	460	370
300	615	595	500	545	520	425
400	720	700	585	645	610	495
500	825	800	665	—	—	—
630	950	915	765	—	—	—

Tabla 13. Intensidad máxima admisible, en amperios, en servicio permanente para cables con conductores de cobre en instalación al aire en galerías ventiladas (temperatura ambiente 40 °C) según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02]

Entre los distintos materiales aislantes se escoge el XLPE para los cables de alimentación instalados al aire en canal de obra registrable por ser una solución habitual en cables de energía de 0,6/1 kV y proporcionar una mayor intensidad admisible y una mayor temperatura

máxima de servicio, resultando adecuado para la configuración y las condiciones del caso objeto de estudio.

Para obtener la intensidad admisible corregida del conductor, es necesario aplicar a los valores de la Tabla 13 los factores de corrección correspondientes a las condiciones particulares de la instalación objeto de estudio. De este modo, se garantiza que el incremento de temperatura producido por la circulación de la corriente no dé lugar a una temperatura en el conductor superior a la máxima admisible para el tipo de aislamiento seleccionado. De acuerdo con el tipo de instalación escogida, la intensidad admisible vendrá dada por la ecuación E. 4:

$$I_{adm,corr} = I_{adm,tabla} \cdot F_T \cdot F_{agr}$$

E. 4. Intensidad admisible corregida

Para el caso estudiado, al seleccionarse un cable con aislamiento XLPE, la temperatura máxima admisible del conductor en servicio permanente es de 90 °C, tal como se recoge en la Tabla 14:

Tipo de Aislamiento seco	Temperatura máxima °C	
	Servicio permanente	Cortocircuito $t \leq 5s$
Policloruro de vinilo (PVC) $S \leq 300 \text{ mm}^2$ $S > 300 \text{ mm}^2$	70	160
	70	140
Polietileno reticulado (XLPE)	90	250
Etileno Propileno (EPR)	90	250

Tabla 14. Cables aislados con aislamiento seco; temperatura máxima, en °C, asignada al conductor según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].

Una vez identificada la temperatura máxima admisible del conductor, se emplea la Tabla 15 para determinar el coeficiente de corrección por temperatura ambiente. Dicha tabla proporciona el factor F_T aplicable cuando la temperatura ambiente de la instalación difiere de la temperatura de referencia considerada en la tabla de intensidades admisibles.

Temperatura de servicio Θ_s en °C	Temperatura ambiente, Θ_a , en °C											
	10	15	20	25	30	35	40	45	50	55	60	
90	1.27	1.22	1.18	1.14	1.10	1.05	1	0.95	0.90	0.84	0.77	
70	1.41	1.35	1.29	1.22	1.15	1.08	1	0.91	0.81	0.71	0.58	

Tabla 15. Coeficiente de corrección F para temperatura ambiente distinta de 40 °C según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].

Puesto que la Tabla 13 está referida a una temperatura ambiente de 40 °C, y se adopta dicha temperatura como condición de cálculo para la galería ventilada, el coeficiente de corrección por temperatura para aislamiento XLPE resulta:

$$F_T = 1$$

Esta hipótesis se considera válida al tratarse de una instalación con adecuada renovación del aire, por lo que no se aplica el incremento adicional de temperatura de 15 K previsto para canales o galerías pequeñas sin ventilación eficaz. Por tanto, no es necesario reducir la intensidad admisible por efecto de la temperatura ambiente.

A continuación, se revisan los factores de corrección de agrupamiento según la Tabla 16.

Tipo de instalación		Nº de bandejas	Nº de circuitos trifásicos (2)			A utilizar para (1):
			1	2	3	
Bandejas perforadas (3)		1	0,95	0,90	0,85	Tres cables en capa horizontal
		2	0,95	0,85	0,80	
		3		0,85	0,80	
Bandejas verticales perforadas (4)		1	0,95	0,85	-	Tres cables en capa vertical
		2	0,90	0,85	-	
Bandejas escalera, soporte, etc. (3)		1	1,00	0,95	0,95	Tres cables en capa horizontal
		2	0,95	0,90	0,90	
		3	0,95	0,90	0,85	
Bandejas perforadas (3)		1	1,00	1,00	0,95	Tres cables dispuestos en trébol
		2	0,95	0,95	0,90	
		3	0,95	0,90	0,85	
Bandejas verticales perforadas (4)		1	1,00	0,90	0,90	
		2	1,00	0,90	0,85	
Bandejas escalera, soporte, etc. (3)		1	1,00	1,00	1,00	
		2	0,95	0,95	0,95	
		3	0,95	0,95	0,90	

Tabla 16. Factor de corrección para agrupaciones de cables unipolares instalados al aire según la ITC-BT-07 del Real Decreto 842/2002 [MINI02].

Puesto que el tipo de instalación escogido corresponde a bandeja tipo escalera o soporte equivalente, y se considera una única bandeja con un único circuito trifásico formado por cables unipolares, el factor de corrección por agrupamiento resulta:

$$F_{agr} = 1$$

Por tanto, no es necesario reducir la intensidad admisible por efecto del agrupamiento de circuitos.

Finalmente, se obtiene:

$$I_{adm,corr} = I_{adm,tabla} \cdot F_T \cdot F_{agr} = I_{adm,tabla} \cdot 1 \cdot 1 = I_{adm,tabla}$$

Las condiciones de instalación son equivalentes a las de referencia de la tabla, por lo que la intensidad admisible se aplica sin reducción.

De acuerdo con la Tabla 13, la sección de 240 mm² presenta una intensidad admisible de 535 A. Aunque este valor sería superior a la intensidad máxima obtenida a partir de las cargas previstas, no resulta suficiente frente a la intensidad nominal del transformador, adoptada como intensidad de diseño. Por ello, se selecciona la sección inmediatamente superior, correspondiente a 300 mm², cuya intensidad admisible es de 615 A, valor superior a la intensidad nominal del transformador.

Dicha sección será adoptada para todos los cables de alimentación del anillo principal, dado que el dimensionamiento se ha realizado considerando el caso más desfavorable de explotación. Por tanto, se considera que será suficiente para soportar las corrientes que puedan presentarse tanto en condiciones normales como ante los escenarios de contingencia previstos en la red, además de permitir futuras ampliaciones de carga hasta el límite nominal del transformador.

Las alimentaciones en CA a los rectificadores-cargadores de baterías se consideran cables interiores, al tratarse de circuitos finales desde los cuadros de C.A. hasta los equipos

rectificadores. Por tanto, su dimensionamiento se incluye dentro del apartado de cables interiores.

La sección seleccionada se verificará posteriormente mediante la comprobación de caída de tensión acumulada en el apartado 6.4, considerando la red desde la salida del transformador auxiliar hasta el receptor más desfavorable.

6.3 CABLES INTERIORES

El dimensionamiento de los cables interiores se realiza a partir de la intensidad de diseño de cada circuito, determinada por la potencia nominal del receptor alimentado y por su tensión de alimentación. A diferencia de los cables del anillo principal, en estos circuitos no se consideran potencias acumuladas por tramo, ya que cada derivación interior alimenta directamente un receptor o equipo final desde el cuadro correspondiente.

Para la selección de la sección se toma como referencia la Tabla 17 correspondiente a conductores de cobre con aislamiento PVC instalados bajo tubo en montaje superficial, de acuerdo con las condiciones de instalación adoptadas para los circuitos interiores.

A		Conductores aislados en tubos empotrados en paredes aislantes		3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR						
A2		Cables multiconductores en tubos empotrados en paredes aislantes	3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR							
B		Conductores aislados en tubos ⁹ en montaje superficial o empotrados en obra				3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR				
B2		Cables multiconductores en tubos ⁹ en montaje superficial o empotrados en obra			3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR					
C		Cables multiconductores directamente sobre la pared ⁹					3x PVC	2x PVC		3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR			
E		Cables multiconductores al aire libre ⁹ . Distancia a la pared no inferior a 0.3D ⁹						3x PVC		2x PVC	3x XLPE o EPR	2x XLPE o EPR		
F		Cables unipolares en contacto mutuo ⁹ . Distancia a la pared no inferior a D ⁹							3x PVC			3x XLPE o EPR ¹⁾		
G		Cables unipolares separados mínimo D ⁹									3x PVC ¹⁾		3x XLPE o EPR	
			mm ²	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Cobre			1,5	11	11,5	13	13,5	15	16	-	18	21	24	-
			2,5	15	16	17,5	18,5	21	22	-	25	29	33	-
			4	20	21	23	24	27	30	-	34	38	45	-
			6	25	27	30	32	36	37	-	44	49	57	-
			10	34	37	40	44	50	52	-	60	68	76	-
			16	45	49	54	59	66	70	-	80	91	105	-
			25	59	64	70	77	84	88	96	106	116	123	166
			35		77	86	96	104	110	119	131	144	154	206
			50		94	103	117	125	133	145	159	175	188	250
			70				149	160	171	188	202	224	244	321
			95				180	194	207	230	245	271	296	391
			120				208	225	240	267	284	314	348	455
			150				236	260	278	310	338	363	404	525
			185				268	297	317	354	386	415	464	601
			240				315	350	374	419	455	490	552	711
							360	404	423	484	524	565	640	821

Tabla 17. Intensidades admisibles (A) al aire 40 °C. N.º de conductores con carga y naturaleza del aislamiento según la ITC-BT-19 del Real Decreto 842/2002 [MINI02]

La intensidad máxima entre las cargas monofásicas corresponde a las unidades de climatización, con un valor de 52,17 A según los resultados del estudio de cargas recogidos en el Anejo II. Por su parte, la intensidad máxima entre las cargas trifásicas corresponde a los rectificadores-cargadores de baterías con un valor de 21,65 A según el Anejo II. Aunque en el estudio de cargas se haya considerado el factor de utilización correspondiente, se comprueba adicionalmente la corriente nominal del equipo de 30 kVA a 400 V:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3} \cdot U} = \frac{30000}{\sqrt{3} \cdot 400} = 43,30 \text{ A}$$

E. 5. Intensidad para un sistema trifásico

De acuerdo con la Tabla 17, la sección de 16 mm² presenta una intensidad admisible de 66 A en circuitos monofásicos con dos conductores cargados y de 59 A en circuitos trifásicos

con tres conductores cargados. Estos valores serían suficientes desde el punto de vista estrictamente térmico para las intensidades máximas de diseño consideradas.

No obstante, se adopta finalmente una sección común de 25 mm² para las derivaciones interiores de potencia, al proporcionar una mayor robustez térmica, reducir la caída de tensión en los circuitos más desfavorables y permitir una solución constructiva homogénea para los circuitos interiores principales. Para dicha sección, la Tabla 14 proporciona una intensidad admisible de 84 A en circuitos monofásicos con dos conductores cargados y de 77 A en circuitos trifásicos con tres conductores cargados.

La sección seleccionada permite proteger la derivación monofásica más exigente mediante un interruptor automático de calibre normalizado de 63 A, cumpliéndose la condición:

$$I_B \leq I_n \leq I_Z.$$

En este caso:

$$52,17 A \leq 63 A \leq 84 A$$

De este modo, se verifica que el calibre de la protección no supera la intensidad admisible del conductor, garantizando la protección frente a sobrecargas conforme a lo establecido en la ITC-BT-22 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión [MINI02].

Para los circuitos interiores principales se adopta una sección común de 25 mm² y se prevé la utilización de protecciones normalizadas compatibles con dicha sección. La selección concreta de protecciones se desarrolla posteriormente en el Capítulo 9.

La sección común de 25 mm² queda, por tanto, seleccionada por criterio térmico, por normalización constructiva y por margen adicional frente a caída de tensión. Su validez definitiva se verifica posteriormente mediante el cálculo de la caída de tensión acumulada desde la salida del transformador auxiliar hasta el receptor más desfavorable.

6.4 COMPROBACIÓN DE CAÍDA DE TENSIÓN

En este apartado se evalúa la caída de tensión en los conductores de la red de baja tensión, tomando como origen la salida del transformador auxiliar. Por tanto, no se considera la regulación interna de tensión del transformador, sino únicamente la caída producida en los conductores seleccionados.

6.4.1 CAÍDA DE TENSIÓN EN LOS CABLES DE ALIMENTACIÓN

Para el cálculo se emplean los parámetros eléctricos de los conductores adoptados, en particular los valores de resistencia y reactancia lineal, expresados en Ω/km . Para los cables de alimentación del anillo principal se selecciona un cable comercial de referencia, cuyos parámetros se recogen en la Tabla 18.

Nominal cross sectional area	ELECTRICAL DATA								DIMENSIONS AND WEIGHTS		Cable Code	
	Max. Conductor Resistance		Continuous Current Ratings						Approx. overall diameter	Approx. overall weight		
	DC at 20 °C	AC at 90 °C	Buried direct in ground	In buried ducts		In free air						
			(a)	(b)	(c)	(d)	(e)	(f)	(g)			
mm²	Q / km	Q / km	A	A	A	A	A	A	A	mm	kg / km	
1.5	12.1000	15.4287	27	28	20	23	23	31	31	5.8	50	C208XA10100MB51MR
2.5	7.4100	9.4485	36	36	26	30	30	31	40	6.2	65	C210XA10100MB51MR
4	4.6100	5.8782	46	46	34	38	40	41	53	6.8	85	C212XA10100MB51MR
6	3.0800	3.9274	57	57	42	48	50	52	68	7.3	105	C213XA10100MB51MR
10	1.8300	2.3335	75	75	56	63	68	70	91	7.9	140	C314XA10100MB51MR
16	1.1500	1.4665	97	97	73	82	91	93	121	8.9	205	C315XA10100MB51MR
25	0.7270	0.9273	124	124	96	106	122	125	161	10.5	300	C316XA10100MB51MR
35	0.5240	0.6686	149	149	117	128	150	154	198	11.5	395	C317XA10100MB51MR
50	0.3870	0.4941	175	176	140	153	183	189	240	12.9	520	C318XA10100MB51MR
70	0.2680	0.3428	214	215	174	188	233	240	304	14.7	725	C319XA10100MB51MR
95	0.1930	0.2476	257	256	212	227	288	297	374	16.5	980	C345XA10100MB51MR
120	0.1530	0.1970	291	292	243	260	335	346	434	18.0	1220	C346XA10100MB51MR
150	0.1240	0.1605	327	327	277	295	388	400	499	20.1	1500	C347XA10100MB51MR
185	0.0991	0.1294	369	369	316	336	450	464	577	22.2	1860	C348XA10100MB51MR
240	0.0754	0.1002	425	426	371	393	536	553	688	24.9	2415	C349XA10100MB51MR
300	0.0601	0.0817	479	473	422	447	620	641	797	27.7	2990	C350XA10100MB51MR
400	0.0470	0.0663	539	540	482	512	720	743	928	30.9	3845	C351XA10100MB51MR
500	0.0366	0.0545	604	606	549	587	834	862	1084	34.9	4950	C352XA10100MB51MF
630	0.0283	0.0454	674	673	619	668	955	986	1257	39.3	6295	C353XA10100MB51MF
800	0.0221	0.0390	739	741	688	750	1078	1116	1440	43.6	8090	C354XA10100MB51MF
1000	0.0176	0.0346	807	808	766	841	1234	1276	1674	52.2	10150	C255XA10100MB51MF

Tabla 18. Parámetros eléctricos del cable de alimentación de 0,6/1 kV según catálogo EESCABLE [EES_26]

De la Tabla 18 se toman los valores correspondientes a la sección previamente seleccionada de 300 mm². Se toman los datos de la columna de AC a 90°C al ser el caso más desfavorable disponible. Al no disponerse de la reactancia lineal tabulada para dicha sección, se adopta la hipótesis $X/R \approx 0,8$. Esta hipótesis se mantiene de forma homogénea en el cálculo como

aproximación conservadora ante la ausencia de un valor específico de reactancia en el catálogo empleado.

Las caídas de tensión se calculan mediante las expresiones indicadas en la E. 6 diferenciando entre circuitos trifásicos y monofásicos.

$$\Delta V_{3\phi} = \sqrt{3} \cdot I \cdot L \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

$$\Delta V_{1\phi} = 2 \cdot I \cdot L \cdot (R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

E. 6. Caída de tensión para circuitos trifásicos y monofásicos

donde I es la corriente de diseño del circuito, L la longitud del tramo en km, R y X la resistencia y reactancia lineales del conductor en Ω/km , y $\cos \varphi$ y $\sin \varphi$ los términos asociados al factor de potencia de la carga.

La caída de tensión porcentual se obtiene mediante la ecuación E. 7:

$$\Delta V (\%) = \frac{\Delta V}{U_n} \cdot 100$$

E. 7. Caída de tensión porcentual

tomando $U_n = 400 V$ para circuitos trifásicos y $U_n = 230 V$ para circuitos monofásicos.

A partir de estos parámetros se calculan las caídas de tensión en los distintos tramos del anillo, considerando el caso más desfavorable de explotación. Aunque para la selección de la sección del anillo principal se ha adoptado como intensidad de diseño la intensidad nominal del transformador auxiliar, igual a 577,35 A, para el cálculo de la caída de tensión no se considera que dicha intensidad circule por todos los tramos del anillo. La corriente en cada tramo depende de las cargas alimentadas aguas abajo y de la configuración de explotación considerada.

Por ello, las intensidades obtenidas inicialmente para cada tramo se escalan proporcionalmente hasta el caso de carga nominal del transformador, aplicando el coeficiente:

$$k = \frac{I_n}{I_{max,cargas}} = \frac{577,35}{493,03} = 1,17$$

De esta forma, la intensidad considerada en cada tramo se obtiene multiplicando la intensidad inicialmente calculada por dicho coeficiente. Este criterio permite comprobar la caída de tensión en una situación más conservadora, correspondiente al aprovechamiento completo de la capacidad nominal del transformador, sin asumir de forma irreal que la intensidad nominal circula por todos los tramos del anillo.

Con la sección de 300 mm² se obtiene una caída de tensión máxima acumulada en el anillo principal de aproximadamente 5,42 %, según los resultados recogidos en el Anejo IV.

De acuerdo con la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, en instalaciones industriales alimentadas directamente en alta tensión mediante transformador propio, la instalación interior de baja tensión se considera iniciada en la salida del transformador. En estas condiciones, los límites de caída de tensión son del 4,5 % para alumbrado y del 6,5 % para los demás usos [MINI02].

Dado que el anillo principal alimenta el conjunto de cuadros de servicios auxiliares y no constituye por sí mismo un circuito final exclusivo de alumbrado, la comprobación del alimentador principal se realiza frente al límite del 6,5 % correspondiente a usos distintos de alumbrado. A partir de los resultados obtenidos, se verifica que la caída de tensión acumulada máxima del anillo principal permanece por debajo de dicho límite, puesto que 5,42% < 6,5%.

No obstante, los circuitos finales destinados específicamente a alumbrado deberán verificarse de forma independiente frente al límite del 4,5 %, considerando la caída acumulada desde la salida del transformador hasta el receptor correspondiente.

6.4.2 CAÍDA DE TENSIÓN EN LOS CABLES INTERIORES

Para el cálculo de la caída de tensión en los cables interiores se selecciona el conductor H07V-K de cobre, con aislamiento PVC 450/750 V, cuyos parámetros se recogen en la Tabla 19.

Sección (mm ²)	Resistencia a 20 °C (Ohm/km)	Diámetro Exterior (mm)	Peso (kg/km)	Clase
1x1,5	13,3	2,88	20	Eca
1x2,5	7,98	3,52	31	Eca
1x4	4,95	4,02	45	Eca
1x6	3,3	4,58	63	Eca
1x10	1,91	5,88	108	Eca
1x16	1,21	6,95	161	Eca
1x25	0,78	8,55	241	Eca
1x35	0,554	9,8	332	Eca
1x50	0,386	11,7	474	Eca
1x70	0,272	13,48	663	Eca
1x95	0,206	16,1	879	Eca
1x120	0,161	17,8	1131	Eca
1x150	0,129	19,6	1388	Eca
1x185	0,106	22,3	1703	Eca
1x240	0,0801	25	2233	Eca

Tabla 19. Parámetros del conductor H07V-K según ficha técnica del fabricante [RCT_24]

Del catálogo comercial seleccionado se toma el valor de la resistencia lineal a 20 °C, al ser el único disponible en la ficha técnica. Para la sección previamente seleccionada de 25 mm², dicho valor es $R_{20}=0,78 \Omega/\text{km}$.

En el presente cálculo se adopta la resistencia a 20 °C como hipótesis simplificada, al ser el valor disponible en la ficha técnica y al tratarse de derivaciones interiores de longitud reducida frente a los tramos principales del anillo. Esta hipótesis se valida mediante la comprobación de que la caída total obtenida permanece por debajo del límite de proyecto adoptado para los circuitos considerados.

Asimismo, al no disponer de reactancia tabulada para el conductor interior, se mantiene la hipótesis $X/R \approx 0,8$ empleada en el cálculo general. Esta aproximación se considera

conservadora para el alcance del presente cálculo, al conducir a una estimación no inferior de la componente reactiva de la caída de tensión.

A partir de estos parámetros se calcula la caída de tensión propia de cada cable interior, diferenciando entre circuitos monofásicos y trifásicos según corresponda. Una vez calculada la caída de tensión acumulada en los cables de alimentación del anillo principal, se añade la caída propia de cada derivación interior desde el cuadro de origen hasta el receptor correspondiente. De este modo, se obtiene la caída total desde la salida del transformador auxiliar hasta cada punto de utilización. Los cálculos detallados se resumen en el Anejo V.

6.4.3 CAÍDAS DE TENSIÓN ACUMULADAS

El valor máximo obtenido para los circuitos de fuerza y servicios auxiliares considerados es de 5,528 %, calculado bajo el escenario de contingencia, correspondiente a la alimentación radial del anillo desde un único transformador con la demanda escalada mediante el coeficiente k hasta la capacidad nominal del transformador. Dicho valor es inferior al límite de proyecto del 6,5 % aplicable a usos distintos de alumbrado, conforme a la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión [MINI02]. Por tanto, la sección de 300 mm² adoptada para los cables principales del anillo y la sección común de 25 mm² adoptada para las derivaciones interiores cumplen conjuntamente el criterio de caída de tensión establecido para dichos circuitos.

Para los circuitos finales destinados a alumbrado, la comprobación se realiza frente al límite específico del 4,5 % establecido por la ITC-BT-19 [MINI02]. De acuerdo con lo indicado en dicha instrucción, la caída de tensión se determina considerando los aparatos susceptibles de funcionar simultáneamente en condiciones de utilización racional, lo que corresponde al régimen normal de explotación del anillo, con este operando abierto y cada transformador alimentando su mitad de red. En este caso, se considera la caída de tensión acumulada desde la salida del transformador auxiliar hasta el receptor de alumbrado más desfavorable, añadiendo la caída propia de la derivación final correspondiente. El valor máximo obtenido para los receptores de alumbrado es de 0,837 %, inferior al límite reglamentario del 4,5 %,

de tal modo que $0,837 \% < 4,5 \%$. Por tanto, se verifica que los circuitos finales de alumbrado cumplen el criterio de caída de tensión establecido en la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión [MINI02].

Capítulo 7. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA DE ALIMENTACIÓN EN CC

7.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA DE CC

El sistema de CC de la S/E se estructura en torno a un sistema principal de 125 Vcc destinado a la alimentación de las cargas críticas de protección, control, mando, señalización y telecomunicaciones.

El sistema de 125 Vcc está formado por rectificadores-cargadores alimentados desde la red de CA de 400 V, barras de distribución de CC y bancos de baterías asociados. La arquitectura no se concentra en un único conjunto, sino que se estructura en seis sistemas rectificador-cargador/banco independientes (tres en servicio y tres redundantes), cada uno con su propio banco de baterías dedicado, sin baterías compartidas entre sistemas. El reparto detallado de cargas entre sistemas y el dimensionamiento de cada banco se desarrollan en los apartados 7.3 a 7.5. En condiciones normales de funcionamiento, los rectificadores-cargadores alimentan las cargas críticas conectadas a la barra de 125 Vcc y mantienen los bancos de baterías en régimen de flotación. Ante la pérdida de la alimentación en CA, las baterías asumen automáticamente el suministro de las cargas críticas durante la autonomía considerada en el dimensionamiento.

El banco de baterías se conecta a la barra de CC de forma que pueda alimentar las cargas sin interrupción ante la indisponibilidad del rectificador-cargador o de la alimentación en CA. Esta configuración permite garantizar la continuidad de alimentación de los sistemas críticos de la S/E.

Cada conjunto rectificador-cargador/banco de baterías incorpora un diodo de desacople entre la salida del sistema y la barra de distribución de 125 Vcc. Este elemento evita la

circulación de corrientes entre los distintos sistemas conectados en paralelo y previene el retorno de corriente hacia un rectificador que quede fuera de servicio, preservando la independencia funcional exigida entre los sistemas redundantes definidos en el criterio N-1.

La Figura 4 muestra de forma simplificada la arquitectura funcional del sistema de alimentación de 125 Vcc.

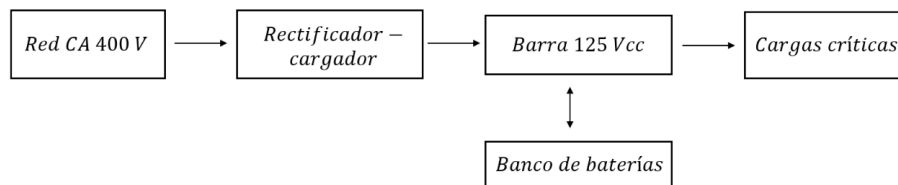


Figura 4. Arquitectura funcional de uno de los seis conjuntos rectificador-cargador/banco de baterías independientes que componen el sistema de 125 Vcc.

El esquema representa un sistema tipo de 125 Vcc. En la arquitectura final, este sistema se replica según los criterios de redundancia adoptados, de forma que la pérdida de un conjunto rectificador-cargador/banco de baterías no comprometa simultáneamente la alimentación de las cargas críticas.

En el presente capítulo se dimensionan los bancos de baterías del sistema de 125 Vcc a partir del reparto de la carga crítica entre los distintos sistemas, según se detalla en los apartados siguientes. Este dimensionamiento sirve de base para la arquitectura redundante del sistema de CC y para la selección de los rectificadores-cargadores asociados.

7.2 HIPÓTESIS DE DISEÑO Y CRITERIOS DE DIMENSIONAMIENTO

El dimensionamiento del sistema de CC requiere establecer previamente las hipótesis eléctricas y funcionales que condicionan la selección del banco de baterías y de los rectificadores-cargadores. En este apartado se definen la tensión nominal del sistema, el rango admisible de alimentación de las cargas críticas, la autonomía considerada, el tipo de batería seleccionado y los factores de corrección aplicados al cálculo de capacidad.

El sistema principal de CC se dimensiona para una tensión nominal de 125 Vcc, correspondiente a la alimentación de las cargas críticas de la S/E. Para los equipos alimentados desde esta barra se adopta como criterio de diseño un rango admisible de funcionamiento comprendido entre el 80 % y el 110 % de la tensión nominal según se especifica en la IEC 60255-1 [IEC_22] . Por tanto, la tensión del sistema deberá mantenerse dentro de los siguientes límites:

$$V_{min} = 0,80 \cdot 125 = 100 \text{ V}$$

$$V_{max} = 1,10 \cdot 125 = 137,5 \text{ V}$$

Estos límites condicionan directamente el número de elementos en serie del banco de baterías, ya que la tensión total del banco debe permanecer dentro del rango admisible tanto en régimen de flotación como al final de la descarga.

Para el sistema de baterías se seleccionan elementos de Ni-Cd Saft Uptimax de nueva generación, correspondientes a las gamas UP1 L y UP1 M. Dado que el sistema de 125 Vcc debe garantizar una autonomía prolongada, se toma la gama UP1 L, orientada a autonomías prolongadas, frente a la UP1 M, más adecuada para descargas intensas de corta duración.



Figura 5. Batería NiCd SAFT Uptimax UP1 L [SAFT18]

De acuerdo con la documentación del fabricante, para funcionamiento continuo en paralelo con descargas ocasionales de la batería se considera una tensión de flotación de:

$$V_{flot,elem} = 1,42 \text{ V/elemento}$$

La tensión de 1,45 V/elemento se considera asociada al régimen alto de carga y no se adopta como tensión permanente de flotación para la comprobación del rango de alimentación de las cargas críticas.

Para el final de descarga se adopta una tensión mínima de:

$$V_{final,elem} = 1,05 \text{ V/elemento}$$

Este valor es ligeramente superior al valor mínimo de 1,0 V/elemento indicado por el fabricante. Esta elección responde a la necesidad de compatibilizar el número de elementos del banco con el rango de tensión admisible del sistema de 125 Vcc. Con la tensión de flotación de 1,42 V/elemento, el límite superior de 137,5 V restringe el banco a un máximo de 96 elementos; si se adoptara una tensión final de 1,0 V/elemento, el límite inferior de 100 V exigiría un mínimo de 100 elementos, valor incompatible con el anterior. Adoptar 1,05 V/elemento como tensión final de descarga hace que el intervalo de elementos admisibles no sea vacío y permite que un banco de 96 elementos cumpla simultáneamente ambos límites. Esta hipótesis resulta además conservadora desde el punto de vista de la autonomía, al no apurar la celda hasta su tensión mínima absoluta.

La autonomía considerada para el sistema de 125 Vcc es de 8 h. Durante este periodo, el banco de baterías debe ser capaz de alimentar las cargas críticas definidas en el inventario, considerando el perfil de descarga correspondiente. Dicho perfil distingue entre cargas permanentes, cargas temporales y cargas de maniobra, evitando sobredimensionar el banco mediante la hipótesis de funcionamiento simultáneo continuo de todas las cargas durante toda la autonomía.

Para el cálculo preliminar de capacidad se aplica un factor de envejecimiento del banco de baterías:

$$F_e = 1,25$$

Este factor permite considerar la pérdida progresiva de capacidad durante la vida útil de la batería. En cuanto a la temperatura, se considera que la batería se instala en una sala técnica con condiciones ambientales controladas dentro del rango recomendado por el fabricante. Por ello, no se aplica inicialmente un factor corrector adicional por temperatura, adoptándose:

$$F_t = 1$$

En caso de que se definan condiciones ambientales más desfavorables, deberá incorporarse el correspondiente factor de corrección por temperatura en el cálculo de capacidad.

La capacidad equivalente requerida del banco de baterías se calculará a partir del perfil de descarga mediante la ecuación E. 8:

$$Q_{\text{teo}} = \sum I_i \cdot t_i$$

E. 8. Cálculo de la capacidad de un banco de baterías mediante el perfil de descarga

donde I_i es la corriente demandada en cada intervalo del perfil y t_i la duración correspondiente. La capacidad corregida se obtiene como:

$$Q_{\text{req}} = Q_{\text{teo}} \cdot F_e \cdot F_t$$

Dado que la documentación del fabricante proporciona la capacidad en régimen C5, la selección se realiza adoptando dicha capacidad como referencia. Al corresponder la autonomía de diseño a un régimen de descarga más lento (8 h), la capacidad real disponible será igual o superior a la indicada en C5, por lo que el empleo del dato de catálogo resulta conservador.

Conforme a la arquitectura definida en el apartado 7.1, el sistema de 125 Vcc no se concentra en un único banco, sino que se estructura en varios sistemas rectificador-cargador/banco independientes. La carga crítica de las nueve posiciones funcionales se reparte equitativamente entre tres sistemas en servicio, asociando tres posiciones a cada uno. Las

cargas críticas generales del sistema de 125 Vcc, de carácter único y no replicable, se asignan íntegramente a uno de los tres sistemas. Cada sistema en servicio cuenta, además, con un sistema redundante de idénticas características, resultando un total de seis conjuntos rectificador-cargador/banco que garantizan la continuidad de alimentación ante la indisponibilidad de cualquiera de ellos, conforme al criterio N-1 y a los requisitos del operador del sistema.

7.3 CARGAS CRÍTICAS ALIMENTADAS A 125 VCC

A continuación se resumen la distribución de las cargas críticas en la Tabla 20. No obstante el desglose de todas las cargas y los cálculos desarrollados se encuentran en el Anejo VI.

<i>Sistema</i>	<i>Posiciones</i>	<i>P_{permanente} (W)</i>	<i>P_{temporal} (W)</i>	<i>P_{maniobra} (W)</i>
Sistema 1 (3 pos)	3	2.403	300	225
Sistema 2 (3 pos)	3	2.403	300	225
Sistema 3 (3 pos + gen)	3	2.933	1.740	225
Total	9	7.739	2.340	675

Tabla 20. Reparto de cargas críticas entre los tres sistemas de 125 Vcc

La suma de las cargas permanentes de los tres sistemas (7.739 W) coincide con la carga permanente total del inventario, lo que verifica la consistencia del reparto. La carga de maniobra, al no tener componente asociada a las cargas generales, se reparte por igual entre los tres sistemas (225 W cada uno, correspondientes a las tres posiciones asignadas), sin incremento adicional en el sistema 3.

A diferencia de las cargas permanentes y temporales, la carga de maniobra no se incorpora al perfil de descarga desarrollado en el apartado 7.4. Se trata de una demanda de corta

duración, asociada al accionamiento puntual de las bobinas de disparo y cierre de los interruptores, que no representa un consumo sostenido a lo largo de la autonomía de diseño. Por ello, su verificación no se realiza mediante el cálculo de capacidad en Ah, sino comprobando que la corriente de maniobra ($I_{\text{maniobra}} = 5,4 \text{ A}$) no se considera limitante dado el margen entre la corriente de maniobra y la corriente nominal de ambos equipos.

7.4 PERFIL DE DESCARGA DEL SISTEMA DE 125 VCC

El dimensionamiento de cada banco se realiza a partir de su perfil de descarga. Las cargas permanentes se mantienen durante toda la autonomía de 8 h, mientras que las cargas temporales (alumbrado de emergencia) se consideran únicamente durante la primera hora. El perfil de cada sistema se recoge en la Tabla 21.

<i>Sistema</i>	<i>Intervalo</i>	<i>Potencia (W)</i>	<i>I a 125 Vcc (A)</i>
Sistemas 1 y 2	0–1 h (perm+temp.)	2.703	21,62
	1–8 h (permanentes)	2.403	19,22
Sistema 3	0–1 h (perm+temp.)	4.673	37,38
	1–8 h (permanentes)	2.933	23,46

Tabla 21. Perfil de descarga por sistema

7.5 DIMENSIONAMIENTO DEL BANCO DE BATERÍAS DE 125 VCC

7.5.1 DETERMINACIÓN DEL NÚMERO DE ELEMENTOS EN SERIE

El número de elementos queda acotado por los dos límites de tensión. El límite superior lo impone la tensión de flotación frente a la tensión máxima admisible:

$$N_{m\acute{a}x} = \frac{V_{m\acute{a}x}}{V_{flot,elem}} = \frac{137,5}{1,42} = 96,8$$

El límite inferior lo impone la tensión final de descarga frente a la tensión mínima admisible:

$$N_{m\acute{i}n} = \frac{V_{m\acute{i}n}}{V_{final}} = \frac{100}{1,05} = 95,2$$

Por tanto, el único valor entero que satisface ambas condiciones es:

$$N = 96 \text{ elementos}$$

Comprobación:

$$V_{flot,max} = 96 \cdot 1,42 = 136,32 \text{ V} < 137,5 \text{ V}$$

$$V_{final} = 96 \cdot 1,05 = 100,8 \text{ V} > 100 \text{ V}$$

Se adopta un banco formado por 96 elementos en serie en todos los sistemas, ya que el número de elementos viene impuesto por los límites de tensión del sistema de 125 Vcc y es independiente de la capacidad del banco.

7.5.2 CAPACIDAD REQUERIDA DEL BANCO DE BATERÍAS

La capacidad teórica de cada banco se obtiene a partir de su perfil de descarga mediante la ecuación E. 8, y la capacidad requerida aplicando los factores.

Para los sistemas 1 y 2:

$$Q_{teo} = 21,62 \cdot 1 + 19,22 \cdot 7 = 156,16 \text{ Ah}$$

$$Q_{req} = 156,16 \cdot 1,25 = 195,20 \text{ Ah}$$

Para el sistema 3 (con cargas generales):

$$Q_{teo} = 37,38 \cdot 1 + 23,46 \cdot 7 = 201,63 \text{ Ah}$$

$$Q_{req} = 201,63 \cdot 1,25 = 252,04 \text{ Ah}$$

La suma de las capacidades requeridas de los tres sistemas

$$Q_{total} = 195,20 + 195,20 + 252,04 = 642,44 \text{ Ah}$$

coincide, salvo redondeo, con la capacidad total que resultaría de dimensionar un único banco para toda la carga crítica (642,52 Ah), lo que confirma la coherencia del reparto.

7.5.3 PRESELECCIÓN DEL MODELO DE BATERÍA

El sistema más exigente es el sistema 3, con una capacidad requerida de 252,04 Ah. Se preselecciona el primer modelo de la gama Saft Uptimax UP1 L cuya capacidad nominal de catálogo sea igual o superior a dicho valor:

$$C_{catálogo} \geq 252,04 \text{ Ah} \rightarrow UP1L 280 (C5 = 280 \text{ Ah})$$

Por criterio de normalización constructiva, se adopta este mismo modelo para los tres sistemas, de modo que todos los bancos —tanto los activos como los redundantes— sean idénticos. Esta decisión simplifica el aprovisionamiento, el mantenimiento y la gestión de repuestos, y permite que cualquier banco redundante pueda sustituir a cualquier sistema en servicio. El sobredimensionamiento resultante en los sistemas 1 y 2 (280 Ah frente a 195,20 Ah requeridos) queda justificado por este criterio de normalización y aporta un margen adicional de autonomía.

La preselección deberá validarse mediante las curvas de descarga del fabricante para una autonomía de 8 h y una tensión final de 1,05 V/elemento.

7.5.4 COMPROBACIÓN DE TENSIONES Y AUTONOMÍA

Se resume en la Tabla 22 la comprobación de los resultados obtenidos.

<i>Comprobación</i>	<i>Resultado</i>	<i>Criterio</i>	<i>Cumple</i>
Tensión máxima en flotación	$96 \cdot 1,42 = 136,32 \text{ V}$	$< 137,5 \text{ V}$	Sí
Tensión final de descarga	$96 \cdot 1,05 = 100,8 \text{ V}$	$> 100 \text{ V}$	Sí
Capacidad requerida (sistema más exigente)	252,04 Ah	—	—
Capacidad del modelo (UP1L 280)	280 Ah	$\geq 252,04 \text{ Ah}$	Sí

Tabla 22. Revisión de criterios.

7.6 SELECCIÓN DE RECTIFICADORES-CARGADORES DE 125 VCC

La corriente asignada de cada rectificador-cargador debe alimentar las cargas críticas permanentes de su sistema y, simultáneamente, recargar el banco asociado, de acuerdo con la ecuación E. 9:

$$I_{rect} \geq I_{cargas} + I_{recarga}$$

E. 9. Corriente asignada rectificador

Para la recarga se adopta la corriente máxima recomendada por el fabricante para la gama Uptimax, igual a $0,2 \cdot C5$, que permite una recarga rápida del banco y la pronta reposición de la autonomía tras una contingencia:

$$I_{recarga} = 0,2 \cdot 280 = 56 \text{ A}$$

En el sistema más exigente (sistema 3, con cargas generales), la corriente de las cargas permanentes es $I_{cargas} = 37,38 \text{ A}$, de donde:

$$I_{rect} \geq 37,38 + 56 = 93,38 \text{ A}$$

Se selecciona, por normalización con el resto de sistemas, un rectificador-cargador configurado mediante tres módulos de 35 A en paralelo, con una corriente asignada de 105 A, adoptado igualmente para los tres sistemas. El conjunto del sistema de 125 Vcc queda formado por seis rectificadores-cargadores de 105 A (tres en servicio y tres redundantes), cada uno asociado a su banco de UP1L 280.

En el lado de corriente continua, la potencia de salida del conjunto es de $105 \text{ A} \times 125 \text{ V} = 13,125 \text{ kW}$. Según la documentación técnica del fabricante, cada módulo tiene una eficiencia superior al 93 % y un factor de potencia superior a 0,99 [RECT18], de donde se estima una potencia activa de entrada de aproximadamente 14,11 kW y una potencia aparente de entrada de aproximadamente 14,3 kVA. Este valor resulta coherente y ligeramente inferior a la potencia de diseño de 15 kVA empleada en el equilibrado de cargas del Capítulo 4, confirmando el carácter conservador de dicha estimación con datos verificables de catálogo.

Como equipo comercial de referencia que cumple estas especificaciones se considera el rectificador-cargador de alta frecuencia Recticur RAF Argos, de entrada trifásica 400 V CA y salida 125 Vcc ajustable en el rango 90–160 V, apto para baterías de Ni-Cd (incluyendo la función de carga de igualación necesaria para esta tecnología), con regímenes de carga en flotación y carga rápida, compensación de temperatura mediante sensor opcional (accesorio ST, a especificar en el pedido), y arquitectura modular redundante N+X [RECT18]. La corriente nominal de salida de este equipo no está normalizada en escalones fijos, sino que se configura según el número de módulos instalados; cada módulo proporciona 35 A a 125 Vcc, por lo que la configuración de tres módulos (105 A) cubre con margen los 93,38 A calculados mediante la ecuación E. 9. La redundancia del sistema de CC se garantiza a nivel de conjunto, mediante los tres sistemas rectificador-cargador/banco redundantes definidos en el apartado 7.1.



Figura 6. Rectificador alta frecuencia 110 & 125 & 220 Vcc

7.7 RESUMEN DE RESULTADOS DEL SISTEMA DE CC

Se incluyen los resultados más relevantes de este capítulo en la Tabla 23:

<i>Magnitud</i>	<i>Valor</i>
Tensión nominal del sistema	125 Vcc
Rango admisible de tensión	100–137,5 V
Arquitectura	3 sistemas en servicio + 3 redundantes
Tipo de batería	Ni-Cd Saft Uptimax UP1L 280
Número de elementos en serie (por banco)	96
Tensión máxima en flotación	136,32 V
Tensión final de descarga	100,8 V
Autonomía considerada	8 h
Capacidad requerida (sistema más exigente)	252,04 Ah
Capacidad del modelo seleccionado	280 Ah
Rectificador-cargador (por sistema)	105 A
Modelo rectificador	Recticur RAF Argos (3 módulos de 35 A)

Tabla 23. Resumen dimensionamiento en CC

Capítulo 8. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS

8.1 HIPÓTESIS DE CÁLCULO

En este apartado se calculan las corrientes de cortocircuito en la red de baja tensión de los servicios auxiliares. El objetivo es determinar los niveles de corriente de defecto en los principales nodos de la instalación, con el fin de disponer de los valores necesarios para la posterior selección y coordinación de protecciones, así como para la verificación de la adecuación de los conductores frente a las solicitaciones derivadas del cortocircuito. Este cálculo se justifica por la necesidad de proteger los circuitos frente a sobreintensidades, conforme a la ITC-BT-22 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, aprobado por el Real Decreto 842/2002 [MINI02].

En el presente estudio se consideran como nodos de cálculo los bornes de salida de los distintos cuadros de las casetas, al tratarse de los puntos principales de distribución del anillo de baja tensión. A partir de estos nodos se evalúan las corrientes de defecto correspondientes a los distintos tipos de cortocircuito.

En todos los casos, las corrientes de cortocircuito obtenidas se expresan como valores eficaces de la componente periódica de la corriente de defecto. Esta elección es coherente con el modelo de simulación empleado, en el que las señales de corriente se procesan mediante bloques de medida de valor eficaz, y permite comparar directamente los resultados con los valores utilizados posteriormente para la selección y verificación de protecciones.

8.2 MODELO EMPLEADO

Los cálculos de cortocircuito se realizan mediante un modelo de simulación desarrollado en Simulink. En dicho modelo se representan los transformadores auxiliares mediante fuentes trifásicas con impedancia interna equivalente a la de cortocircuito del transformador,

mientras que los distintos tramos de cable del anillo principal se modelan mediante ramas serie RL, considerando la resistencia y reactancia correspondientes a cada tramo. No se incluyen en el modelo las cargas receptoras conectadas aguas abajo de cada cuadro, al tratarse mayoritariamente de cargas pasivas que no aportan corriente de cortocircuito significativa. Solo en un estudio más detallado sería necesario considerar la contribución transitoria de motores de potencia relevante o de fuentes conectadas en paralelo, como el grupo electrógeno en caso de encontrarse en servicio. En el presente modelo no se considera la contribución del grupo electrógeno, al no analizarse un escenario de funcionamiento en paralelo con el transformador auxiliar.

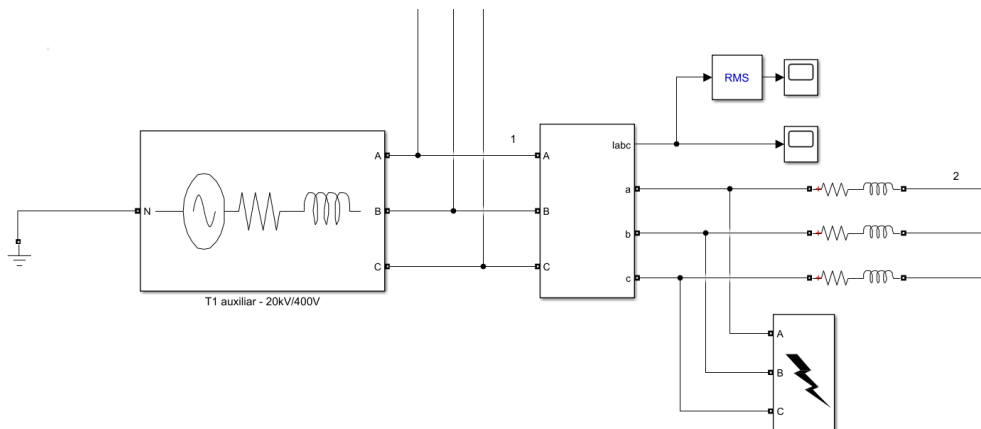


Figura 7. Modelo representativo en Simulink para el cálculo de cortocircuitos en la red de baja tensión de los SSAA.

En la Figura 7 se muestra la estructura básica del modelo empleado, en la que la fuente trifásica representa el transformador auxiliar con su impedancia equivalente, los tramos de cable se introducen mediante ramas serie RL y el bloque de falta se conecta en el nodo de estudio correspondiente. Esta estructura se replica para los distintos puntos de cálculo, modificando la posición del bloque de cortocircuito según el cuadro analizado. Se puede observar el modelo completo en el Anejo VII.

En funcionamiento normal, el anillo de baja tensión se explota abierto, de forma que los transformadores auxiliares de CT1 y CT2 no trabajan en paralelo. Por ello, en el modelo de

Simulink se han representado dos circuitos independientes: uno alimentado desde el transformador auxiliar de CT1 y otro desde el transformador auxiliar de CT2. Cada uno de estos circuitos alimenta las ramas correspondientes del anillo principal, de acuerdo con la configuración de explotación considerada.

Se distinguirá entre faltas simétricas y asimétricas. Las faltas simétricas mantienen el sistema trifásico equilibrado, mientras que las asimétricas producen un desequilibrio entre fases y requieren un análisis específico. En primer lugar, se estudia el cortocircuito trifásico, al tratarse de una falta simétrica y constituir el caso de referencia para determinar los niveles máximos de corriente de cortocircuito.

8.3 CORTOCIRCUITO TRIFÁSICO

En el caso del cortocircuito trifásico, al tratarse de una falta simétrica, el sistema puede analizarse mediante el circuito equivalente por fase. Por ello, además de la simulación desarrollada en Simulink, se realiza un cálculo teórico de comprobación a partir de la impedancia equivalente de Thévenin vista desde cada nodo de falta. Se emplea la ecuación E. 10 para el cálculo teórico:

$$I_{cc,3\phi} = \frac{U_{2n,ll}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Th}|}$$

E. 10. Corriente de cortocircuito trifásico

donde $U_{2n,ll}$ es la tensión compuesta nominal del secundario del transformador y Z_{Th} es la impedancia equivalente vista desde el punto de falta.

Se obtienen entonces los resultados recogidos en la Tabla 24, donde se muestran las corrientes de cortocircuito trifásico calculadas en bornes de los transformadores auxiliares y en los principales nodos del anillo de baja tensión.

<i>Nodo</i>	$R_{eq} (\Omega)$	$X_{eq} (\Omega)$	$I_{cc, teórica} (kA)$
Bornes transformador auxiliar 1	0,00385	0,01553	14,434
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	0,00434	0,01592	13,995
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	0,00438	0,01595	13,959
Bornes Cuadro TELECO C.A. Ctele	0,00520	0,01661	13,271
Bornes Cuadro SSAA C.A. Ctele	0,00524	0,01664	13,238
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-9	0,00708	0,01811	11,877
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-8	0,01357	0,02331	8,563
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-7	0,01700	0,02605	7,423
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-6	0,01729	0,02628	7,341
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	0,00434	0,01592	13,995
Bornes Cuadro TELECO C.A. CT1	0,00438	0,01595	13,959
Bornes transformador auxiliar 2	0,00385	0,01553	14,434
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	0,00414	0,01576	14,175
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-2	0,00830	0,01909	11,093
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-3	0,01128	0,02148	9,519

<i>Nodo</i>	$R_{eq} (\Omega)$	$X_{eq} (\Omega)$	$I_{cc, teórica} (kA)$
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-4	0,01349	0,02324	8,594
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-5	0,01541	0,02478	7,915
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	0,00414	0,01576	14,175
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	0,00418	0,01579	14,139
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-1	0,00765	0,01857	11,500

Tabla 24. Corrientes de cortocircuito trifásico teóricas en los nodos principales de la red de BT.

Como se observa en la Tabla 24, la corriente máxima de cortocircuito trifásico se obtiene en bornes de los transformadores auxiliares, con un valor de aproximadamente 14,434 kA. A medida que el punto de falta se aleja eléctricamente del transformador, la impedancia acumulada de los tramos de cable aumenta y, en consecuencia, la corriente de cortocircuito disminuye. El menor valor obtenido en los casos analizados corresponde al nodo más alejado del circuito alimentado desde CT1, con una corriente aproximada de 7,341 kA.

Por otra parte, el modelo de Simulink se configura activando simultáneamente las fases A, B y C en el bloque de falta, reproduciendo así un cortocircuito trifásico. Para cada simulación, el bloque de falta se conecta únicamente en el nodo objeto de estudio, desplazándolo progresivamente a lo largo del circuito con el fin de obtener la corriente de cortocircuito correspondiente a cada cuadro. Dichos resultados se recogen en la Tabla 25:

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc}, Simulink (kA)</i>
Bornes transformador auxiliar 1	14,430
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	13,990
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	13,960
Bornes Cuadro TELECO C.A. Ctele	13,270
Bornes Cuadro SSAA C.A. Ctele	13,240
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-9	11,880
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-8	8,563
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-7	7,423
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-6	7,341
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	13,990
Bornes Cuadro TELECO C.A. CT1	13,960
Bornes transformador auxiliar 2	14,430
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	14,180
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-2	11,090
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-3	9,519

<i>Nodo</i>	<i>$I_{cc, Simulink} (kA)$</i>
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-4	8,594
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-5	7,915
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	14,180
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	14,140
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-1	11,500

Tabla 25. Corrientes de cortocircuito trifásico obtenidas mediante Simulink en los nodos principales de la red de BT.

Como se puede observar, los valores obtenidos mediante Simulink presentan una elevada concordancia con los calculados de forma teórica, existiendo únicamente pequeñas diferencias asociadas al redondeo y a la precisión de lectura de los resultados. Por tanto, se considera validado el modelo desarrollado, que será empleado en los siguientes apartados para el análisis de los restantes tipos de cortocircuito.

En la Figura 8 se muestra el transitorio del valor eficaz de la corriente de las fases A, B y C para el cortocircuito trifásico aplicado en bornes del transformador auxiliar 1.

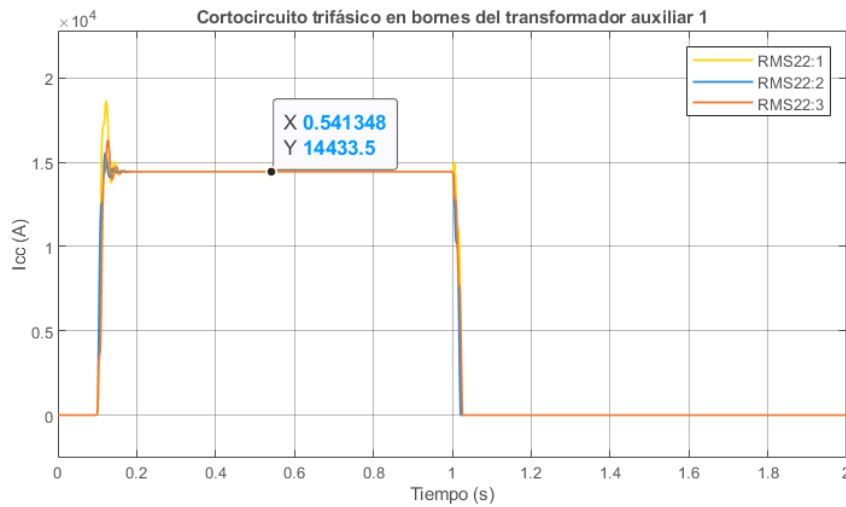


Figura 8. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito trifásico en bornes del transformador auxiliar 1.

Se observa que el bloque de falta se activa en el intervalo comprendido entre $t=0,1$ s y $t=1$ s. Antes de la aplicación del defecto, la corriente es prácticamente nula debido a que el modelo de cortocircuito se ha desarrollado considerando únicamente las impedancias equivalentes de la fuente, el transformador y los conductores hasta el punto de falta, sin representar las cargas receptoras en régimen permanente. Esta simplificación resulta adecuada para el cálculo de la corriente de cortocircuito, ya que las cargas pasivas no contribuyen de forma significativa a la corriente de falta, salvo en el caso de máquinas rotativas o fuentes activas de entidad relevante.

Tras la aparición del cortocircuito se produce un régimen transitorio inicial, tras el cual el valor eficaz de la corriente se estabiliza en torno a 14,430 kA, valor coherente con el obtenido en el cálculo teórico. Una vez despejada la falta, la corriente vuelve al valor previo al defecto.

Además, dado que la corriente de cortocircuito depende directamente de la tensión existente en el punto de falta antes de producirse el defecto, se analiza la influencia de posibles variaciones de tensión en el secundario del transformador. Para ello, se mantiene constante la impedancia equivalente de la red y se consideran dos escenarios de operación: una tensión

mínima igual a $0,85U_n$ y una tensión máxima igual a $1,10U_n$. Bajo esta hipótesis, la corriente de cortocircuito varía proporcionalmente con la tensión de alimentación.

Este análisis permite obtener valores extremos de corriente de cortocircuito para la posterior selección y verificación de las protecciones. El escenario de sobretensión proporciona la corriente máxima de cortocircuito, empleada para comprobar el poder de corte de la aparamenta. Por el contrario, el escenario de subtensión proporciona la corriente mínima de cortocircuito, empleada preliminarmente para verificar la correcta actuación de las protecciones en las condiciones más desfavorables de disparo.

Las corrientes de cortocircuito corregidas se obtienen a partir de los valores calculados a tensión nominal mediante la ecuación E. 11:

$$I_{cc,min} = 0,85 \cdot I_{cc,n}$$

$$I_{cc,max} = 1,10 \cdot I_{cc,n}$$

E. 11. Corrección de la corriente de cortocircuito en función de la tensión previa a la falta

donde $I_{cc,n}$ es la corriente de cortocircuito calculada para la tensión nominal, $I_{cc,min}$ es la corriente de cortocircuito correspondiente al escenario de tensión mínima e $I_{cc,max}$ es la corriente de cortocircuito correspondiente al escenario de tensión máxima.

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc, min} (kA)</i>	<i>I_{cc, max} (kA)</i>
Bornes transformador auxiliar 1	12,266	15,873
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	11,892	15,389
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	11,866	15,356
Bornes Cuadro TELECO C.A. Ctele	11,280	14,597
Bornes Cuadro SSAA C.A. Ctele	11,254	14,564
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-9	10,098	13,068
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-8	7,279	9,419
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-7	6,310	8,165
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-6	6,240	8,075
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	11,892	15,389
Bornes Cuadro TELECO C.A. CT1	11,866	15,356
Bornes transformador auxiliar 2	12,266	15,873
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	12,053	15,598
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-2	9,427	12,199
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-3	8,091	10,471

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc, min} (kA)</i>	<i>I_{cc, max} (kA)</i>
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-4	7,305	9,453
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-5	6,728	8,707
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	12,053	15,598
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	12,019	15,554
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-1	9,775	12,650

Tabla 26. Corrientes de cortocircuito trifásico corregidas por variación de tensión.

De la Tabla 26 se concluye que, para el cortocircuito trifásico, la corriente máxima corregida es de 15,873 kA y se obtiene en bornes de los transformadores auxiliares. Por el contrario, la corriente mínima corregida es de 6,240 kA y corresponde al nodo eléctricamente más alejado del circuito alimentado desde CT1.

Esta validación se realiza para el caso trifásico por tratarse de una falta simétrica con cálculo teórico directo mediante el equivalente por fase. Los valores obtenidos permiten identificar la corriente máxima de cortocircuito, 15,873 kA, que se empleará posteriormente para seleccionar un poder de corte asignado superior en la aparamenta de baja tensión, así como la corriente mínima de cortocircuito trifásico, útil para la comprobación preliminar de la actuación de las protecciones.

8.4 CORTOCIRCUITO BIFÁSICO

En el caso de cortocircuito bifásico, se emplea nuevamente el modelo de Simulink mostrado en la Figura 1. La única modificación respecto al cortocircuito trifásico es la configuración del bloque de falta. En este caso, se conectan únicamente dos fases entre sí, sin conexión a tierra. Se selecciona como caso representativo la falta entre las fases A y B. Los resultados

obtenidos se consideran extrapolables al resto de combinaciones de fases, debido a que el sistema se encuentra equilibrado antes de la aparición del cortocircuito.

A diferencia del cortocircuito trifásico, las faltas asimétricas no pueden analizarse directamente mediante un único circuito equivalente por fase, ya que el sistema deja de estar equilibrado durante el defecto. Por ello, su estudio teórico requiere recurrir al método de componentes simétricas, descomponiendo el sistema trifásico en sus componentes de secuencia directa, inversa y homopolar. En este caso, se realiza el cálculo teórico para el cortocircuito bifásico en bornes del transformador auxiliar.

Se definen las componentes simétricas de la corriente como:

$$\begin{aligned}\bar{I}_a &= \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2 \\ \bar{I}_b &= \bar{I}_0 + a^2 \cdot \bar{I}_1 + a \cdot \bar{I}_2 \\ \bar{I}_c &= \bar{I}_0 + a \cdot \bar{I}_1 + a^2 \cdot \bar{I}_2\end{aligned}$$

E. 12. Descomposición de un sistema trifásico desequilibrado en componentes de secuencia.

siendo:

$$a = e^{j120^\circ}$$

En el caso de un cortocircuito bifásico entre las fases A y B, sin conexión a tierra, la corriente de la fase C es nula. Además, al no existir retorno por tierra, la componente homopolar también se anula:

$$\bar{I}_c = 0 ; \bar{I}_0 = 0$$

Por tanto:

$$\begin{aligned}\bar{I}_c &= a \cdot \bar{I}_1 + a^2 \cdot \bar{I}_2 = 0 \\ \bar{I}_2 &= -a^2 \cdot \bar{I}_1\end{aligned}$$

Sustituyendo en la expresión de la corriente de la fase A:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_1 + \bar{I}_2 = (1 - a^2) \cdot \bar{I}_1$$

Como $|1 - a^2| = \sqrt{3}$, se obtiene:

$$I_{cc,2\phi} = \sqrt{3} \cdot |I_1|$$

Para una falta bifásica, las redes de secuencia directa e inversa quedan conectadas en serie, por lo que:

$$I_1 = \frac{U_{2n,f}}{Z_1 + Z_2}$$

Considerando que las impedancias de secuencia directa e inversa son aproximadamente iguales, $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_{Th}$, se obtiene:

$$I_1 \approx \frac{U_{2n,f}}{2 \cdot Z_{Th}}$$

y, por tanto:

$$I_{cc,2\phi} \approx \sqrt{3} \cdot \frac{U_{2n,f}}{2 \cdot |Z_{Th}|}$$

Como para el cortocircuito trifásico se cumple:

$$I_{cc,3\phi} = \frac{U_{2n,f}}{|Z_{Th}|}$$

se obtiene finalmente:

$$I_{cc,2\phi} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot I_{cc,3\phi}$$

E. 13. Aproximación de la corriente de cortocircuito bifásico bajo la hipótesis $Z_1 \approx Z_2$

Aplicando esta relación al cortocircuito en bornes del transformador auxiliar 1:

$$I_{cc,2\phi} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot 14,43 = 12,50 \text{ kA}$$

La relación obtenida en la E. 13 puede aplicarse al resto de nodos analizados, ya que en todos ellos se mantiene la hipótesis de red equilibrada antes del defecto y se considera $Z_1 \approx Z_2$. Por tanto, a partir de las corrientes de cortocircuito trifásico obtenidas previamente se calcula una estimación teórica de la corriente de cortocircuito bifásico en cada nodo. Estos valores se comparan con los resultados obtenidos mediante Simulink en la Tabla 27.

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc, teórica} (kA)</i>	<i>I_{cc, Simulink} (kA)</i>
Bornes transformador auxiliar 1	12,500	12,500
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	12,120	12,120
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	12,089	12,090
Bornes Cuadro TELECO C.A. Ctele	11,493	11,490
Bornes Cuadro SSAA C.A. Ctele	11,464	11,460
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-9	10,286	10,290
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-8	7,416	7,415
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-7	6,429	6,429
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-6	6,358	6,358
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	12,120	12,120

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc, teórica} (kA)</i>	<i>I_{cc, Simulink} (kA)</i>
Bornes Cuadro TELECO C.A. CT1	12,089	12,090
Bornes transformador auxiliar 2	12,500	12,500
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	12,276	12,280
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-2	9,607	9,607
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-3	8,244	8,244
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-4	7,442	7,442
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-5	6,854	6,854
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	12,276	12,280
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	12,245	12,240
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-1	9,959	9,959

Tabla 27. Valores eficaces de la corriente de cortocircuito bifásico entre fases A-B.

Además de los valores teóricos y de Simulink, se calculan las corrientes de cortocircuito bifásico para las variaciones de tensiones, se obtiene entonces la Tabla 28.

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc,min} (kA)</i>	<i>I_{cc,max} (kA)</i>
Bornes transformador auxiliar 1	10,625	13,750
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	10,302	13,332
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	10,277	13,299
Bornes Cuadro TELECO C.A. Ctele	9,767	12,639
Bornes Cuadro SSAA C.A. Ctele	9,741	12,606
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-9	8,747	11,319
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-8	6,303	8,157
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-7	5,465	7,072
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-6	5,404	6,994
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	10,302	13,332
Bornes Cuadro TELECO C.A. CT1	10,277	13,299
Bornes transformador auxiliar 2	10,625	13,750
Bornes Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	10,438	13,508
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-2	8,166	10,568
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-3	7,007	9,068

<i>Nodo</i>	<i>I_{cc,min} (kA)</i>	<i>I_{cc,max} (kA)</i>
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-4	6,326	8,186
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-5	5,826	7,539
Bornes Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	10,438	13,508
Bornes Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	10,404	13,464
Bornes Cuadro SSAA C.A. CR-1	8,465	10,955

Tabla 28. Corrientes de cortocircuito bifásico corregidas por variación de tensión.

De la Tabla 28 se obtiene que la corriente mínima de cortocircuito bifásico corresponde a los bornes del cuadro de SSAA C.A. de la CR-6, con un valor de:

$$I_{cc,min} = 5,404 \text{ kA}$$

Este resultado es coherente con la topología de la red, ya que dicho cuadro se encuentra entre los puntos más alejados eléctricamente de las fuentes de alimentación. Por tanto, este valor se adopta como referencia conservadora para la verificación de la sensibilidad de los disparadores de las protecciones.

Asimismo, debe destacarse que esta corriente mínima no modifica el valor de corriente máxima de cortocircuito empleado para la comprobación del poder de corte de los interruptores automáticos. Para dicha comprobación se mantiene el valor máximo global obtenido en bornes del transformador auxiliar:

$$I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

De este modo, el valor máximo de cortocircuito se emplea para verificar el poder de corte, mientras que el valor mínimo se emplea para comprobar la sensibilidad de actuación de las protecciones.

En la Figura 9 se muestran los resultados obtenidos mediante Simulink para el cortocircuito bifásico en bornes del transformador auxiliar 1.

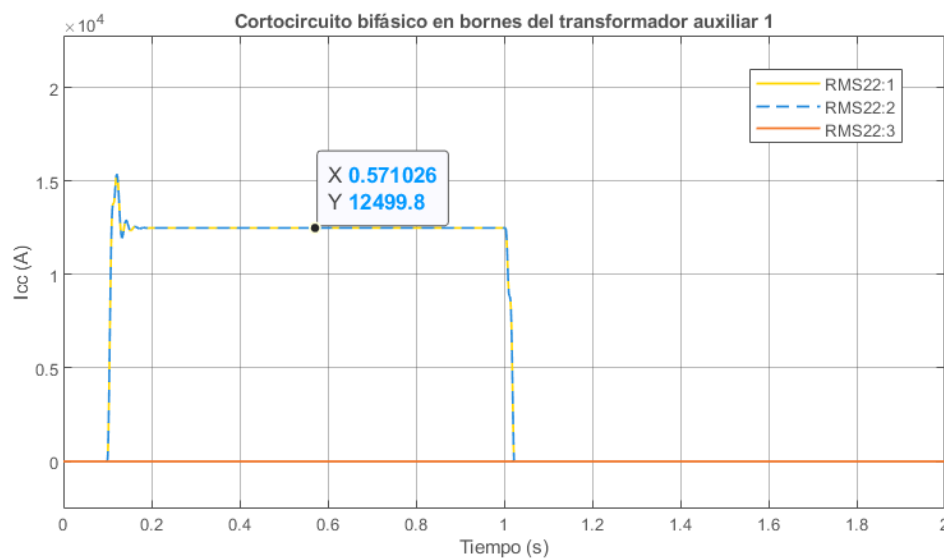


Figura 9. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito bifásico A-B en bornes del transformador auxiliar 1.

Como se observa en la Figura 9, durante el intervalo de falta el valor eficaz de la corriente en las fases afectadas se estabiliza en torno a 12,50 kA, valor coherente con la aproximación realizada previamente. Asimismo, la corriente en la fase C permanece prácticamente nula, ya que dicha fase no participa en el cortocircuito bifásico A-B.

8.5 CORTOCIRCUITO BIFÁSICO A TIERRA

Para el cálculo del cortocircuito bifásico a tierra se emplea nuevamente el método de componentes simétricas, al tratarse de una falta asimétrica. A partir de las relaciones de

transformación indicadas en la ecuación E. 12, se plantean las condiciones específicas de la falta entre dos fases y tierra.

Considerando una falta bifásica a tierra entre las fases A y B, y suponiendo una falta franca, las condiciones en el punto de falta son:

$$V_a = 0$$

$$V_b = 0$$

$$I_c = 0$$

E. 14. Condiciones específicas para cortocircuito bifásico a tierra A-B-T

Estas condiciones indican que las fases A y B se encuentran conectadas directamente a tierra, mientras que por la fase C no circula corriente de falta en el punto de falta.

Para una falta bifásica a tierra franca, la corriente de secuencia directa puede expresarse como:

$$I_1 = \frac{U_{2n,f}}{Z_1 + \frac{Z_0 \cdot Z_2}{Z_0 + Z_2}}$$

E. 15. Corriente de secuencia directa en un cortocircuito bifásico a tierra

donde $U_{2n,f}$ es la tensión simple nominal del secundario del transformador, y Z_1 , Z_2 y Z_0 son las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar, respectivamente.

Si se considera que las impedancias de secuencia son aproximadamente iguales de tal forma que $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$, entonces la ecuación anterior E. 15 se puede simplificar:

$$I_1 = \frac{U_{2n,f}}{Z_{Th} + \frac{Z_{Th} \cdot Z_{Th}}{Z_{Th} + Z_{Th}}} = \frac{U_{2n,f}}{Z_{Th} + \frac{Z_{Th}}{2}} = \frac{U_{2n,f}}{\frac{3}{2} \cdot Z_{Th}} = \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{2n,f}}{Z_{Th}}$$

El módulo de la corriente en las fases afectadas por la falta puede aproximarse como:

$$I_{cc,2\phi T} \approx \frac{3}{2} \cdot |I_1|$$

Sustituyendo el valor anterior:

$$I_{cc,2\phi T} \approx \frac{3}{2} \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{U_{2n,f}}{|Z_{Th}|} = \frac{U_{2n,f}}{|Z_{Th}|} = \frac{U_{2n,ll}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Th}|} = I_{cc,3\phi}$$

E. 16. Aproximación de la corriente de cortocircuito bifásico a tierra bajo la hipótesis $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$.

Por tanto, bajo la hipótesis de impedancias de secuencia aproximadamente iguales, la corriente de cortocircuito bifásico a tierra presenta un valor próximo al obtenido para el cortocircuito trifásico, como se observa en la ecuación E. 16. Esta aproximación permite justificar que ambos tipos de falta den lugar a corrientes del mismo orden de magnitud en los nodos analizados.

En el modelo de Simulink se configura una falta bifásica a tierra entre las fases A y B, considerando una falta franca mediante una resistencia de defecto y una resistencia de puesta a tierra prácticamente nulas. Dado que, bajo la hipótesis simplificadora $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$, la corriente de cortocircuito bifásico a tierra resulta del mismo orden que la corriente de cortocircuito trifásico, no se incorpora una tabla adicional de resultados por nodo para este tipo de defecto. En las simulaciones realizadas, los valores eficaces obtenidos para la falta bifásica a tierra presentan una coincidencia práctica con los recogidos previamente para el cortocircuito trifásico en la Tabla 25. Por tanto, se considera suficiente emplear dicha tabla como referencia para los niveles de corriente en los nodos principales, reservando la Figura 10 para mostrar el comportamiento transitorio del defecto y verificar la correcta representación del camino de retorno por tierra y del neutro puesto a tierra del transformador.

En la Figura 10 se muestra el transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito bifásico a tierra A-B-T aplicado en bornes del transformador auxiliar 1.

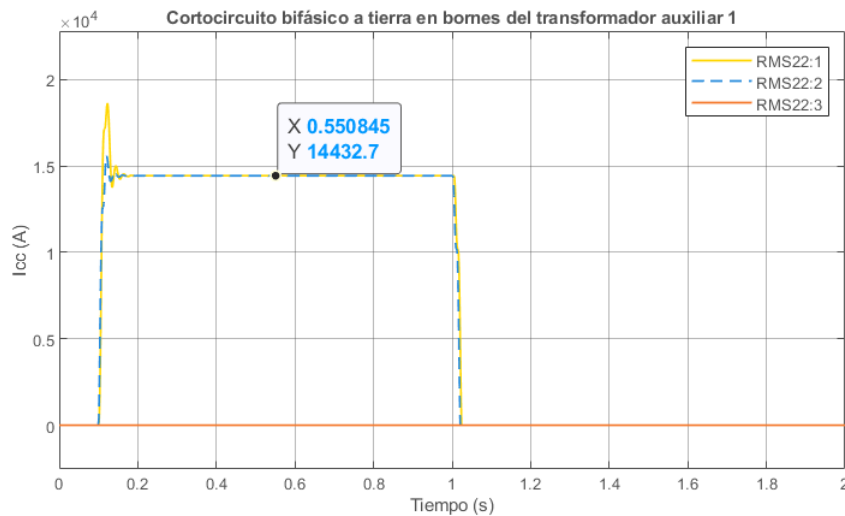


Figura 10. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito bifásico a tierra A-B-T en bornes del transformador auxiliar 1

Como se observa en la Figura 10, los valores eficaces de las corrientes de las fases afectadas se estabilizan en un valor próximo al obtenido para el cortocircuito trifásico. Durante el régimen transitorio inicial pueden aparecer pequeñas diferencias entre ambas fases, asociadas al instante de aplicación de la falta y al cálculo del valor eficaz, pero en régimen establecido ambas corrientes convergen al valor esperado. La fase C no presenta corriente de falta significativa, al no participar directamente en el defecto. Se verifica así el cumplimiento de las condiciones especificadas teóricamente en la ecuación E. 14, al circular corriente de defecto únicamente por las fases A y B.

8.6 CORTOCIRCUITO MONOFÁSICO A TIERRA

Para el cortocircuito monofásico a tierra se realiza nuevamente la descomposición del sistema trifásico desequilibrado en componentes simétricas, con el fin de obtener el cálculo teórico de la corriente de cortocircuito. Se parte de las relaciones indicadas en la ecuación E. 12 y se aplican las condiciones específicas de falta correspondientes a un defecto monofásico franco entre la fase A y tierra:

$$V_a = 0$$

$$I_b = 0$$

$$I_c = 0$$

E. 17. Condiciones específicas para cortocircuito monofásico a tierra

Se selecciona como caso representativo la falta monofásica entre la fase A y tierra. Al encontrarse el sistema equilibrado antes de la falta y considerarse impedancias de fase equivalentes, los resultados son extrapolables al resto de fases.

A partir de las relaciones de componentes simétricas, desarrolladas en la E. 12, la corriente de la fase A puede expresarse como:

$$\bar{I}_a = \bar{I}_0 + \bar{I}_1 + \bar{I}_2$$

Aplicando las condiciones específicas de la E. 17 a las ecuaciones de transformación, se obtiene que las tres componentes de secuencia son iguales:

$$\bar{I}_0 = \bar{I}_1 = \bar{I}_2$$

Por tanto, la corriente de falta en la fase A resulta:

$$\bar{I}_a = 3\bar{I}_1$$

En una falta monofásica a tierra, las redes de secuencia directa, inversa y homopolar quedan conectadas en serie, por lo que la corriente de secuencia directa puede expresarse como:

$$I_1 = \frac{U_{2n,f}}{Z_1 + Z_2 + Z_0}$$

donde $U_{2n,f}$ es la tensión simple nominal del secundario del transformador, y Z_1 , Z_2 y Z_0 son las impedancias de secuencia directa, inversa y homopolar, respectivamente.

La corriente de cortocircuito monofásico a tierra se obtiene entonces como:

$$I_{cc,1\phi T} = 3 \cdot |I_1|$$

Sustituyendo la expresión anterior:

$$I_{cc,1\phi T} = \frac{3U_{2n,f}}{|Z_1 + Z_2 + Z_0|}$$

Si se adopta la hipótesis simplificadora de que las impedancias de secuencia son aproximadamente iguales $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$ entonces se obtiene:

$$I_{cc,1\phi T} \approx \frac{3U_{2n,f}}{|3Z_{Th}|} = \frac{U_{2n,f}}{|Z_{Th}|} = \frac{U_{2n,ll}}{\sqrt{3} \cdot |Z_{Th}|} = I_{cc,3\phi}$$

E. 18. Aproximación corriente cortocircuito monofásico a tierra bajo la hipótesis $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$.

Por tanto, bajo esta hipótesis simplificadora, la corriente de cortocircuito monofásico a tierra presenta un valor próximo al obtenido para el cortocircuito trifásico. Esta conclusión es coherente con el hecho de que, al considerar impedancias de secuencia equivalentes, la suma serie de las tres redes queda compensada por el factor 3 asociado a la recomposición de la corriente de fase.

Este tipo de falta requiere la existencia de un camino de retorno a través del sistema de puesta a tierra hasta el neutro puesto a tierra del secundario del transformador, por lo que dicho esquema debe estar correctamente representado mediante la conexión a tierra del neutro de la fuente trifásica equivalente. En Simulink, se configura una falta monofásica franca entre la fase A y tierra, empleando una resistencia de defecto y una resistencia de puesta a tierra prácticamente nulas.

De forma análoga al caso bifásico a tierra, bajo la hipótesis $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$, no se incorpora una tabla adicional de resultados por nodo, ya que los valores eficaces obtenidos presentan una coincidencia práctica con los recogidos previamente para el cortocircuito trifásico. Por tanto, se considera suficiente emplear los resultados de cortocircuito trifásico recogidos en la Tabla 25 como referencia para los niveles de corriente en los nodos

principales, reservando la Figura 11 para mostrar el comportamiento transitorio del defecto monofásico y verificar la existencia del camino de retorno homopolar.

En la Figura 11 se muestra el transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito monofásico a tierra A-T aplicado en bornes del transformador auxiliar 1.

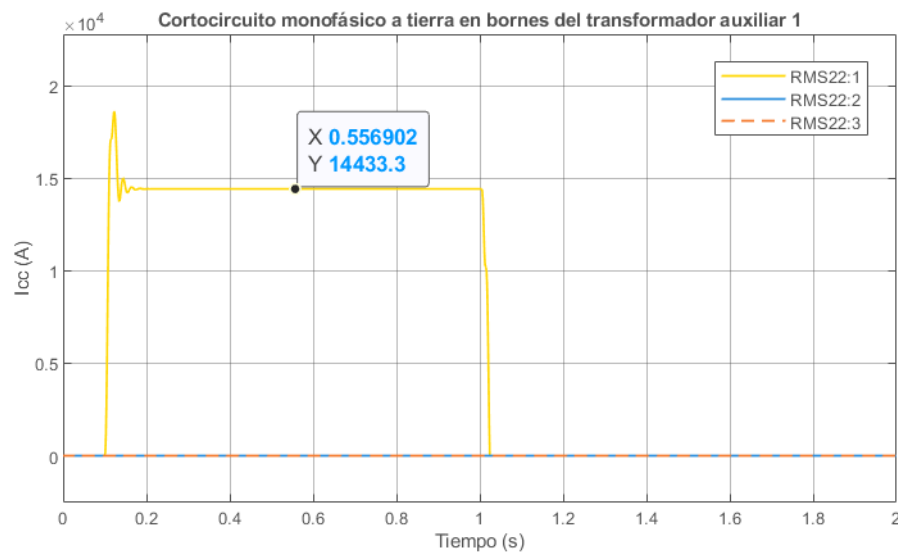


Figura 11. Transitorio del valor eficaz de la corriente durante un cortocircuito monofásico a tierra A-T en bornes del transformador auxiliar 1

Como se observa en la Figura 11, el valor eficaz de la corriente de la fase A se estabiliza en un valor próximo al obtenido para el cortocircuito trifásico bajo la hipótesis simplificadora adoptada. Las fases B y C permanecen prácticamente sin corriente de falta, al no participar directamente en el defecto. Se verifica así el cumplimiento de las condiciones teóricas establecidas en la ecuación E. 17 para el cortocircuito monofásico a tierra.

8.7 RESULTADOS Y VALIDACIÓN

Los resultados obtenidos mediante el modelo desarrollado en Simulink permiten validar la metodología de cálculo empleada. Todos las tablas con cálculos y resultados detallados se encuentran en el Anejo VII. En el caso del cortocircuito trifásico, la comparación entre los

valores teóricos obtenidos mediante la impedancia equivalente de Thévenin y los resultados de simulación muestra una elevada concordancia, con diferencias únicamente asociadas al redondeo y a la precisión de lectura del valor eficaz. Al tratarse de una falta simétrica, el cálculo teórico no requiere hipótesis adicionales de descomposición en componentes simétricas, por lo que este caso constituye la principal validación del modelo.

Para los restantes tipos de defecto se han empleado aproximaciones basadas en el método de componentes simétricas. A pesar de dichas simplificaciones, las simulaciones realizadas presentan una coincidencia práctica con las estimaciones teóricas obtenidas, por lo que se considera que el modelo resulta adecuado para analizar el comportamiento de la red ante faltas bifásicas, bifásicas a tierra y monofásicas a tierra.

De los cálculos realizados se tomarán como referencia, para la posterior selección y coordinación de protecciones, los valores extremos de corriente de cortocircuito obtenidos en la red de baja tensión. La corriente máxima corregida es de 15,873 kA, obtenida en bornes de los transformadores auxiliares para el escenario de sobretensión $1,10U_n$. Este resultado es coherente con el hecho de que dicho punto presenta la menor impedancia equivalente entre la fuente y el punto de falta. Este valor se empleará como referencia para la selección del poder de corte de la aparamenta de baja tensión.

Por el contrario, la corriente mínima corregida se obtiene en el nodo eléctricamente más alejado del circuito alimentado desde CT1, con un valor de 5,404 kA para el escenario de subtensión $0,85U_n$. Este valor constituye la referencia preliminar para comprobar la sensibilidad y la correcta actuación de las protecciones en las condiciones más desfavorables.

En cuanto a las faltas asimétricas, el cortocircuito bifásico presenta valores inferiores al trifásico, coherentes con la relación aproximada $I_{cc,2\phi} \approx \frac{\sqrt{3}}{2} I_{cc,3\phi}$. Por su parte, las faltas bifásicas a tierra y monofásicas a tierra presentan valores próximos al cortocircuito trifásico bajo la hipótesis simplificadora $Z_1 \approx Z_2 \approx Z_0 \approx Z_{Th}$, quedando verificada mediante Simulink la correcta representación del camino homopolar a través del neutro puesto a tierra.

Por tanto, los valores obtenidos son adecuados para servir de base a la posterior selección y coordinación de protecciones, así como para la comprobación térmica de los conductores frente a cortocircuito. Como limitación del modelo, no se considera la aportación transitoria de motores de potencia relevante ni la contribución del grupo electrógeno en paralelo, por lo que dichos escenarios deberían analizarse en un estudio de detalle específico.

Capítulo 9. SELECCIÓN Y COORDINACIÓN DE PROTECCIONES

9.1 ALCANCE DEL ESTUDIO DE PROTECCIONES

El estudio y dimensionamiento de las protecciones se desarrolla a partir de los resultados obtenidos en el Capítulo 8. En dicho capítulo se determinaron las corrientes de cortocircuito en los distintos puntos de la red de baja tensión. A partir de dichos valores se comprobará que las protecciones seleccionadas resultan adecuadas frente a sobrecargas y cortocircuitos, verificando su calibre nominal, su poder de corte, su capacidad de actuación ante la corriente mínima de cortocircuito y su coordinación con el resto de dispositivos situados aguas arriba y aguas abajo.

El estudio se limita a las protecciones asociadas a los servicios auxiliares de baja tensión de la subestación objeto de estudio. En concreto, se consideran las protecciones correspondientes a la salida del transformador auxiliar, los cuadros principales de baja tensión, el anillo de distribución a 400/230 V, los cuadros de las casetas, las derivaciones individuales hacia las cargas y las alimentaciones a los rectificadores-cargadores asociados a los sistemas de baterías.

Quedan fuera del alcance de este capítulo las protecciones propias del parque de alta tensión, tales como las protecciones de líneas de transporte, las protecciones de distancia, las protecciones diferenciales de barras de alta tensión, las protecciones completas de autotransformadores de potencia, las teleprotecciones de línea y la coordinación global con el sistema eléctrico peninsular. Estos sistemas no forman parte del objeto principal del proyecto, centrado en el cálculo y diseño de los servicios auxiliares.

No obstante, aunque no se desarrollen las protecciones del parque de alta tensión, el estudio se realiza en el contexto de una subestación de transporte, por lo que la continuidad de alimentación de los servicios auxiliares constituye un requisito esencial. Dichos servicios alimentan sistemas de protección, control, mando, señalización y telecomunicaciones, cuya indisponibilidad podría comprometer la operación segura de la instalación. Por ello, la selección y coordinación de protecciones debe garantizar no solo la seguridad frente a defectos eléctricos, sino también la desconexión selectiva de la parte afectada, evitando disparos innecesarios que reduzcan la disponibilidad del conjunto.

El estudio considera la explotación normal del anillo con punto de apertura definido y los escenarios de contingencia en los que la alimentación puede realizarse desde el extremo opuesto. De este modo, las protecciones deberán resultar válidas tanto para la configuración normal de explotación como para las configuraciones reconfiguradas ante la indisponibilidad de un tramo o de una fuente de alimentación.

Para la verificación se emplearán las corrientes máxima y mínima de cortocircuito obtenidas en el Capítulo 8. La corriente máxima servirá para determinar el poder de corte de las protecciones, mientras que la corriente mínima permitirá comprobar que los dispositivos seleccionados actúan correctamente incluso en los puntos más desfavorables de la red.

Las protecciones tienen como objetivos principales garantizar la seguridad, evitando daños a personas, a los conductores y a los equipos; preservar la continuidad del suministro eléctrico, desconectando únicamente la parte afectada por el defecto; y asegurar la selectividad, de forma que actúe en primer lugar la protección más próxima al punto de falta.

Una vez definido el alcance del estudio, en los apartados siguientes se establecen los criterios de selección de los dispositivos de protección y se comprueba su adecuación frente a sobrecargas, cortocircuitos y condiciones de selectividad.

9.2 DATOS DE PARTIDA PARA LA SELECCIÓN DE PROTECCIONES

En este apartado se recopilan los principales datos eléctricos de la instalación que serán empleados posteriormente para la selección y verificación de las protecciones. Estos datos comprenden las características del sistema de baja tensión, los parámetros del transformador auxiliar, las secciones de los conductores seleccionados y las corrientes de cortocircuito obtenidas en el Capítulo 8.

La red de baja tensión de los SSAA opera a 400 V entre fases y a 230 V entre fase y neutro, al tratarse de un sistema trifásico con neutro distribuido. Los datos principales del transformador auxiliar se recogen en la Tabla 9. A partir de su potencia nominal y de la tensión secundaria, la intensidad nominal en el lado de baja tensión resulta igual a 577,35 A, valor empleado como referencia en el dimensionamiento de los conductores principales del anillo. No obstante, para la selección de la protección general situada a la salida del transformador auxiliar se adopta como intensidad de empleo la corriente de contingencia del anillo, igual a 493,03 A, correspondiente al caso más desfavorable de explotación en que un único transformador auxiliar alimenta la totalidad del anillo.

La selección de las protecciones se realiza a partir del dimensionamiento previo de los conductores desarrollado en el Capítulo 6. En el caso del anillo principal de baja tensión, se adoptan conductores de cobre con aislamiento XLPE, tensión asignada 0,6/1 kV y sección nominal de 300 mm. Para dicha sección se ha considerado una intensidad admisible de 615 A. Por tanto, la protección general y las protecciones asociadas al anillo deberán seleccionarse de forma que la intensidad de empleo de cada nivel quede cubierta sin superar la intensidad admisible de estos conductores.

Los cables interiores también han sido previamente dimensionados en el Capítulo 6. En dicho capítulo se concluye que las derivaciones desde los cuadros hasta los receptores se resuelven mediante una sección común de 25 mm², empleando conductores H07V-K de cobre, con tensión asignada 450/750 V, instalados en tubo en montaje superficial.

Para dicha sección, la intensidad admisible resulta igual a 84 A en circuitos monofásicos y a 77 A en circuitos trifásicos. Estos valores constituyen el límite superior para la selección de las protecciones asociadas a los circuitos finales, de forma que el calibre de los dispositivos no permita una sobrecarga permanente de los conductores.

La intensidad máxima monofásica corresponde a las unidades de climatización, con un valor de 52,17 A. Este dato resulta relevante, ya que permite justificar la selección de protecciones interiores de calibre normalizado. En el caso de los rectificadores-cargadores, aunque en el equilibrado de cargas se haya aplicado un factor de utilización $F_U = 0,5$, para la protección del circuito de alimentación al equipo se tendrá en cuenta su potencia nominal de 30 kVA, que implica una corriente nominal de 43,30 A a 400 V.

Por último, se consideran los valores extremos de corriente de cortocircuito obtenidos en el Capítulo 8. La corriente máxima de cortocircuito corregida es $I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$, obtenida en bornes de los transformadores auxiliares, y se empleará como referencia para la selección del poder de corte de las protecciones. Por otra parte, la corriente mínima de cortocircuito corregida es $I_{cc,min} = 5,404 \text{ kA}$, correspondiente al cortocircuito bifásico en el nodo eléctricamente más alejado, y se utilizará para comprobar la actuación de los dispositivos de protección en las condiciones más desfavorables de defecto.

Asimismo, debe tenerse en cuenta que la red de baja tensión se explota en anillo abierto, por lo que las protecciones deberán resultar válidas tanto en la configuración normal de explotación como en las configuraciones reconfiguradas ante contingencia.

En consecuencia, los datos recopilados en este apartado constituyen la base para la selección de los calibres nominales, la verificación frente a sobrecargas, la comprobación del poder de corte y el análisis de coordinación y selectividad entre protecciones.

9.3 CRITERIOS NORMATIVOS Y TÉCNICOS DE PROTECCIÓN

Este apartado establece los criterios normativos y técnicos que se emplearán para la selección y verificación de las protecciones de baja tensión. El criterio normativo principal se basa en la ITC-BT-22 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión, aprobado por el Real Decreto 842/2002 [MINI02], relativa a la protección de las instalaciones interiores o receptoras frente a sobreintensidades.

De acuerdo con dicha instrucción, las sobreintensidades pueden estar motivadas por sobrecargas debidas a los aparatos de utilización o a defectos de aislamiento de gran impedancia, por cortocircuitos o por descargas eléctricas atmosféricas. En el presente proyecto, el estudio se centra en la protección frente a sobrecargas y cortocircuitos, al ser los fenómenos directamente asociados al dimensionamiento de los conductores, al poder de corte de la aparamenta y a la coordinación entre protecciones.

En consecuencia, se verificará que las protecciones seleccionadas garanticen que la corriente permanente en los conductores no supere su intensidad admisible. Asimismo, frente a cortocircuitos, se comprobará que los dispositivos instalados en el origen de cada circuito dispongan de una capacidad de corte igual o superior a la corriente de cortocircuito prevista en su punto de instalación.

9.3.1 PROTECCIÓN FRENTE A SOBRECARGAS

Los principales efectos de las sobrecargas son el incremento de temperatura en los conductores, el posible deterioro del aislamiento y la reducción de la vida útil del cable. Por ello, la protección frente a sobrecargas debe garantizar que la corriente que circula de forma permanente por el conductor no supere su intensidad admisible.

Para que un dispositivo de protección proteja adecuadamente un conductor frente a sobrecargas, deben cumplirse las condiciones indicadas en la E. 19. En dispositivos no

regulables se empleará I_n , mientras que en interruptores automáticos regulables se empleará la intensidad de ajuste I_r .

$$I_B \leq I_n \leq I_Z$$

o, en el caso de interruptores automáticos regulables,

$$I_B \leq I_r \leq I_Z$$

Además, debe verificarse:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_Z$$

E. 19. Condiciones de protección frente a sobrecargas.

donde I_B es la intensidad de empleo del circuito, I_n la intensidad nominal del dispositivo de protección, I_r la intensidad de ajuste en el caso de interruptores automáticos regulables, I_Z la intensidad admisible del conductor, e I_2 la intensidad convencional de funcionamiento del dispositivo de protección.

En consecuencia, las protecciones deberán seleccionarse de forma que permitan alimentar las cargas previstas sin disparos intempestivos, pero evitando que el calibre o ajuste del dispositivo permita una sobrecarga permanente del conductor protegido.

9.3.2 PROTECCIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS

Los cortocircuitos pueden estar originados por fallos de aislamiento en la instalación, defectos internos en los receptores conectados o conexiones incorrectas. Sus efectos principales son de naturaleza térmica y electrodinámica. Desde el punto de vista térmico, las elevadas corrientes de cortocircuito producen un incremento rápido de la temperatura en los conductores, pudiendo provocar el deterioro del aislamiento o incluso daños permanentes en el conductor si el defecto no se despeja en un tiempo suficientemente reducido. Desde el punto de vista electrodinámico, las corrientes de cortocircuito generan esfuerzos mecánicos

elevados sobre barras, conexiones y aparamenta, por lo que los dispositivos de protección deben interrumpir el defecto de forma segura.

Para la protección frente a cortocircuitos se comprobará, en primer lugar, que el poder de corte de los dispositivos seleccionados sea igual o superior a la corriente máxima de cortocircuito prevista en su punto de instalación. De acuerdo con el criterio adoptado en este proyecto, deberán cumplirse las condiciones indicadas en la E. 20:

$$I_{cu} \geq I_{cc,max}$$

$$I_{cs} \geq I_{cc,max}$$

E. 20. Condiciones de verificación del poder de corte frente a la corriente máxima de cortocircuito.

donde I_{cu} es el poder de corte último del interruptor automático, I_{cs} es el poder de corte de servicio e $I_{cc,max}$ es la corriente máxima de cortocircuito calculada en el punto considerado. En el caso más desfavorable de la red analizada, dicha corriente máxima se obtiene en bornes de los transformadores auxiliares.

Además de comprobar el poder de corte, se verificará la actuación de las protecciones ante la corriente mínima de cortocircuito disponible. Para ello, deberá cumplirse la condición indicada en la E. 21:

$$I_{cc,min} \geq I_a$$

E. 21. Condición de actuación ante la corriente mínima de cortocircuito.

donde $I_{cc,min}$ es la corriente mínima de cortocircuito disponible en el punto más desfavorable del circuito protegido e I_a es la corriente de actuación del disparador magnético o instantáneo de la protección. Esta condición garantiza que la corriente de defecto sea suficiente para provocar la actuación del dispositivo de protección incluso en las condiciones más desfavorables.

Por último se realizará una comprobación de las intensidades de cortocircuito admisibles en los conductores según se indica en la ITC-BT-07 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión del Real Decreto 842/2002 [MINI02]. Para ello se utiliza la

Tipo de aislamiento	Duración del cortocircuito, en segundos								
	0.1	0.2	0.3	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
XLPE y EPR	449	318	259	201	142	116	100	90	82
PVC									
Sección ≤ 300 mm ²	364	257	210	163	115	94	81	73	66
Sección > 300 mm ²	322	228	186	144	102	83	72	64	59

Tabla 29. Densidad de corriente de cortocircuito, en A/mm², para conductores de cobre [MINI02].

A partir de dichos valores puede expresarse la comprobación térmica mediante el criterio:

$$I^2 \cdot t \leq k^2 \cdot S^2$$

E. 22. Criterio adiabático de comprobación térmica frente a cortocircuito.

y, despejando:

$$I_{cc,adm} = \frac{k \cdot S}{\sqrt{t}}$$

o equivalentemente:

$$I_{cc,adm} = J_{cc,adm} \cdot S$$

donde:

$$J_{cc,adm} = \frac{k}{\sqrt{t}}$$

donde $I_{cc,adm}$ es la corriente de cortocircuito admisible térmicamente por el conductor, k es el coeficiente asociado al material conductor y al aislamiento, S es la sección del conductor y t es el tiempo de despeje de la falta.

9.3.3 CRITERIO DE SELECTIVIDAD

Para la coordinación de las protecciones se adopta como criterio técnico que, ante un defecto, actúe en primer lugar el dispositivo de protección situado más próximo al punto de falta. De este modo, se pretende limitar la desconexión al circuito afectado, manteniendo en servicio el resto de la instalación siempre que las condiciones de coordinación lo permitan.

La selectividad entre los distintos niveles de protección se comprobará posteriormente mediante la comparación de calibres, curvas tiempo-corriente y, en su caso, tablas de coordinación del fabricante. En particular, se analizará la coordinación entre la protección general de baja tensión, las protecciones asociadas a los cuadros principales y las protecciones de los circuitos finales.

9.3.4 CRITERIO DE CONTINUIDAD DEL SERVICIO

La continuidad de servicio se adopta como criterio funcional de diseño, coherente con la naturaleza crítica de los servicios auxiliares de una subestación de transporte. Estos sistemas alimentan equipos de protección, control, mando, señalización y telecomunicaciones, por lo que su indisponibilidad podría comprometer la operación segura de la instalación.

Por ello, la selección y coordinación de protecciones se orientará a evitar disparos innecesarios de protecciones aguas arriba y a desconectar únicamente la parte afectada por el defecto, siempre que sea compatible con la seguridad de las personas, la protección de los conductores y la integridad de los equipos.

9.4 SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN

Una vez definidos los criterios normativos y técnicos en el apartado 9.3, se procede a seleccionar la tipología de dispositivos de protección para la red de BT de los SSAA.

La protección frente a sobreintensidades puede realizarse mediante interruptores automáticos, fusibles o combinaciones de ambos. En el presente proyecto se adopta como solución general para la red de CA de BT el empleo de interruptores automáticos.

Esta elección se justifica porque los interruptores automáticos permiten integrar la protección frente a sobrecargas y cortocircuitos, realizar maniobras manuales de apertura y cierre, efectuar el rearme tras el despeje del defecto y, en el caso de las protecciones principales, disponer de ajustes que faciliten la coordinación entre distintos niveles de protección. Estas características resultan especialmente relevantes en los SSAA de una S/E de transporte, donde la continuidad de alimentación y la reposición rápida del servicio constituyen criterios fundamentales de diseño.

Los fusibles no se adoptan como solución general de la red de CA, ya que su actuación implica la sustitución del elemento fusible antes de poder restablecer el servicio. No obstante, pueden existir como protecciones internas de equipos específicos o en circuitos de CC cuando así lo establezca el fabricante.

Para ordenar la selección de dispositivos, se distinguen distintos niveles de protección en función de su posición dentro de la red de BT.

9.4.1 NIVEL 1: SALIDA DEL TRANSFORMADOR AUXILIAR

En el lado de BT del transformador auxiliar se empleará un interruptor automático de caja moldeada con disparador electrónico regulable. Esta elección se justifica por el elevado calibre requerido, la necesidad de disponer de un poder de corte suficiente frente a la corriente de cortocircuito máxima calculada y, especialmente, por la conveniencia de disponer de umbrales y tiempos de disparo regulables que permitan la coordinación selectiva con las protecciones de los niveles inferiores.

La protección general debe ser capaz de conducir la corriente que circula por ella en el caso más desfavorable de explotación. Dado que, ante la indisponibilidad de un transformador auxiliar, un único transformador alimenta la totalidad del anillo, se adopta como intensidad

de empleo la corriente de contingencia del anillo, igual a 493,03 A. El conductor principal del anillo, de sección 300 mm², presenta una intensidad máxima admisible de 615 A. Por tanto, el ajuste de la protección frente a sobrecargas deberá seleccionarse de forma que sea superior a la intensidad de empleo, pero no supere la intensidad admisible del conductor, garantizando así la protección del cable principal.

9.4.2 NIVEL 2: CUADROS PRINCIPALES Y ALIMENTADORES DEL ANILLO

En las salidas de los cuadros principales o cuadros de distribución que alimentan los tramos del anillo se emplearán interruptores automáticos de caja moldeada con disparador electrónico regulable. Estas protecciones no están destinadas a proteger cargas finales, sino los alimentadores principales del anillo de baja tensión.

A diferencia del Nivel 1, la intensidad de empleo de estas protecciones no se corresponde con la corriente de contingencia del conjunto del anillo, sino con la corriente real que circula por cada tramo en explotación. Dado que las cargas se distribuyen a lo largo del anillo, la corriente que atraviesa cada tramo disminuye progresivamente a medida que se alejan del origen, siendo el valor máximo el correspondiente al tramo de cabecera, igual a aproximadamente 199 A. Se adopta, por tanto, esta intensidad como referencia de empleo para el Nivel 2.

Esta diferencia de intensidad de empleo entre el Nivel 1 y el Nivel 2 permite seleccionar para los alimentadores del anillo un interruptor de calibre inferior al de la protección general. Esta decisión, además de ajustarse a la corriente realmente demandada por cada tramo, resulta determinante para garantizar la selectividad entre ambos niveles, según se justifica en el apartado 9.7: la diferencia de calibres entre la protección general (aguas arriba) y las protecciones del anillo (aguas abajo) es la que permite que, ante un defecto, actúe preferentemente la protección más próxima al punto de falta.

En todo caso, el calibre o ajuste de estas protecciones deberá ser compatible con la intensidad admisible de los conductores del anillo, de sección 300 mm² e intensidad admisible $I_z = 615$

A, de modo que no se supere dicho valor. Asimismo, los interruptores deberán disponer de un poder de corte suficiente para el nivel de cortocircuito previsto en su punto de instalación y coordinarse con el interruptor general situado a la salida del transformador auxiliar, que actúa como respaldo.

9.4.3 NIVEL 3: CIRCUITOS FINALES DESDE CUADROS A RECEPTORES

En las salidas de los cuadros hacia los receptores finales se dispondrán las protecciones asociadas a los circuitos interiores. Estas protecciones tienen como función proteger las derivaciones desde cuadro hasta receptor, por lo que se seleccionarán en función de la intensidad de empleo de cada carga y de la intensidad admisible del conductor correspondiente.

En función de la intensidad del circuito y del poder de corte necesario en el punto de instalación, estas protecciones podrán resolverse mediante interruptores automáticos de caja moldeada de menor calibre o mediante interruptores automáticos magnetotérmicos modulares.

En este nivel se incluyen las alimentaciones a receptores como climatización, alumbrado, tomas de corriente, circuitos de fuerza, calefacción, equipos auxiliares y rectificadores-cargadores. En el caso particular de los rectificadores-cargadores, se considerarán como receptores trifásicos alimentados desde la red de CA de BT.

El calibre de cada protección deberá ser compatible con la intensidad admisible del conductor protegido. En este caso, las salidas hacia receptores se realizan mediante cables interiores de 25 mm², con una intensidad admisible de $I_Z = 84 A$ en circuitos monofásicos y de $I_Z = 77 A$ en circuitos trifásicos. Por tanto, el calibre o ajuste de las protecciones no deberá superar dichos valores. Asimismo, los dispositivos deberán disponer de un poder de corte suficiente frente a la corriente de cortocircuito disponible en el cuadro correspondiente.

La elección del número de polos de cada dispositivo se realizará en función del tipo de circuito protegido, distinguiendo entre circuitos monofásicos, circuitos trifásicos y circuitos trifásicos con neutro distribuido.

La selección concreta de los calibres nominales, ajustes térmicos y poderes de corte de los dispositivos definidos en este apartado se verificará en los apartados siguientes, comprobando su adecuación frente a sobrecargas, cortocircuitos y condiciones de coordinación y selectividad entre niveles de protección.

9.5 VERIFICACIÓN FRENTE A SOBRECARGAS

En este apartado se comprueba que los calibres nominales o ajustes térmicos de las protecciones seleccionadas cumplen las condiciones establecidas en la E. 19. El objetivo es verificar que el calibre o ajuste de cada protección sea superior o igual a la corriente de empleo del circuito, pero inferior o igual a la intensidad admisible del conductor protegido.

9.5.1 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 1

En el Nivel 1 se analiza la protección general situada en el lado de BT del transformador auxiliar. La intensidad de empleo corresponde a la corriente de contingencia del anillo, igual a $I_B = 493,03 \text{ A}$. Por su parte, el conductor principal del anillo presenta una sección de 300 mm^2 y una intensidad admisible de $I_Z = 615 \text{ A}$.

Para este nivel se selecciona el interruptor automático de caja moldeada ABB Tmax XT5N 630, de 4 polos, 630 A, con unidad electrónica de disparo Ekip Dip LSI. Según la documentación técnica del fabricante, el equipo dispone de un poder de corte último de 36 kA a 415 V AC, conforme a la norma IEC 60947-2, y de las funciones de protección regulables L (sobrecarga), S (cortocircuito con retardo) e I (cortocircuito instantáneo) [ABB_26a].



Figura 12. Interruptor automático ABB Tmax XT5N 630 Ekip Dip LSI 4P [ABB_26a]

La elección de la unidad electrónica Ekip Dip LSI, frente a una unidad termomagnética, responde a la necesidad de disponer de umbrales y tiempos de disparo regulables. En particular, la función S, con tiempo de actuación ajustable, permite establecer la coordinación cronométrica con las protecciones de los niveles inferiores, según se detalla en el apartado 9.7. La elección de un interruptor de 4 polos se justifica por tratarse de una red de BT 400/230 V con neutro distribuido, alimentada desde el secundario en estrella del transformador auxiliar.

Al tratarse de un interruptor con disparador electrónico regulable, la verificación frente a sobrecargas se realiza con la intensidad de ajuste de la función de protección de sobrecarga (función L), denominada I_1 . Según la documentación del fabricante, dicho ajuste se establece como una fracción de la corriente nominal del interruptor según se observa en la ecuación E. 23 con un coeficiente k regulable entre 0,4 y 1 en pasos de 0,02, como se puede observar en la Tabla 30.

$$I_1 = k \cdot I_n$$

E. 23. Intensidad de ajuste de la función L.

ABB code	Protection Function	Threshold	Trip Time	Trip Curve
L	Overload	$I1 = 0.4...1 \times I_n$ with steps of 0.02 $I1 = 0.4 - 0.42 - 0.45 - 0.47 - 0.5 - 0.52 - 0.55 - 0.57 - 0.6 - 0.62 - 0.65 - 0.67 - 0.7 - 0.72 - 0.75 - 0.77 - 0.8 - 0.82 - 0.85 - 0.87 - 0.9 - 0.92 - 0.95 - 0.97 - 1 \times I_n$ for XT7	$t1$ at $3 \times I1 =$ 3 - 12 - 36 - 60s at $3 \times I1$ for XT2-XT4 3 - 12 - 36 - 48s for XT5 3 - 12 - 36 - MAX for XT6 3 - 12 - 24 - 36 - 48 - 72 - 108 - 144s for XT7	$t = k/I^2$
S	Selective short-circuit	$I2 = \text{Off} - 1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4.5 - 5.5 - 6.5 - 7 - 7.5 - 8 - 8.5 - 9 - 10 \times I_n$ $I2 = \text{Off} - 0.6 - 0.8 - 1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10$ for XT7	$t2 = 0.05 - 0.1 - 0.2 - 0.4$ for XT2-XT4-XT5-XT6 $t2 = 0.1 - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.5 - 0.6 - 0.7 - 0.8$ for XT7 at $10 \times I_n$ when $t = k/I^2$	$t = k$ or $t = k/I^2$
I	Short-circuit	$I3 = \text{Off} - 1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4.5 - 5.5 - 6.5 - 7 - 7.5 - 8 - 8.5 - 9 - 10 \times I_n$ $I3 = \text{Off} - 1.5 - 2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 7 - 8 - 9 - 10 - 11 - 12 - 13 - 14 - 15$ for XT7	$t3 \leq 40\text{ms}$ $t3 \leq 30\text{ms}$ for XT7	$t = k$

Tabla 30. Ekip Dip LSI Protection Settings [ABB_24].

La Tabla 31 resume las tolerancias para el modelo Ekip Dip con protecciones LSI:

Ekip Dip LSI	L	trip between 1,05...1,3 x $I1$ according IEC 60947-2	XT2-XT4-XT5-XT6: ±10% up to $4 \times I_n$ ±20% from $4 \times I_n$ XT7: ±10% up to $6 \times I_n$ ±20% from $6 \times I_n$
Ekip Dip LSI G	S	±10%	XT2-XT4-XT5-XT6: $t=k$: ±10% up to $4 \times I_n$ ±20% from $4 \times I_n$ $t=k/I^2$: ±15% $t2 > 100\text{ms}$ ±20ms $t2 \leq 100\text{ms}$ XT7: $t=k$ the better of the two data: ±10% or ± 40ms $t=k/I^2$: ±15% up to $6 \times I_n$ ±20% from $6 \times I_n$
	I	±10%	-

Tabla 31. Ekip Dip Tolerances [ABB_24].

Para este caso, con $I_n = 630 \text{ A}$, se adopta $I_o = 630 \text{ A}$ y $k = 0,96$, obteniéndose:

$$I_{1,1} = 0,96 \cdot 630 = 604,8 \text{ A}$$

La corriente convencional de disparo I_2 , que asegura la actuación del dispositivo en tiempo convencional, se obtiene a partir de las características del interruptor. Para los disparadores electrónicos conforme a IEC 60947-2 [IEC_24] se adopta:

$$I_2 = 1,3 \cdot I_1$$

E. 24. Intensidad convencional de disparo según el fabricante.

Para el Nivel 1 se obtiene:

$$I_{2,1} = 1,3 \cdot 604,8 = 786 \text{ A}$$

De este modo, se verifican las condiciones de protección frente a sobrecargas dadas en la ecuación E. 19:

$$493,03 \text{ A} \leq 604,8 \text{ A} \leq 615 \text{ A}$$

$$I_{2,1} = 786 < 1,45 \cdot I_Z = 891,75 \text{ A}$$

Por tanto, el interruptor seleccionado permite conducir la corriente de contingencia del anillo sin disparos intempestivos y, al mismo tiempo, garantiza que el ajuste de la protección no supera la intensidad admisible del conductor principal del anillo.

9.5.2 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 2

En el Nivel 2 se analizan las protecciones situadas en las salidas de los cuadros principales que alimentan los tramos del anillo de baja tensión. A diferencia del Nivel 1, la intensidad de empleo no se corresponde con la corriente de contingencia del conjunto del anillo, sino con la corriente real que circula por el tramo más cargado en explotación normal. De los resultados del cálculo de caída de tensión recogidos en el Anejo IV, denominadas como “corriente de diseño caso normal”, la corriente máxima por tramo es $I_B = 198,93 \text{ A}$, correspondiente al tramo de cabecera del anillo. El conductor del anillo mantiene la sección de 300 mm^2 , con una intensidad admisible de $I_Z = 615 \text{ A}$.

Para este nivel se selecciona el interruptor automático de caja moldeada ABB Tmax XT4N 250, de 4 polos, 250 A, con unidad electrónica de disparo Ekip LSI. Según la documentación técnica del fabricante, el equipo dispone de un poder de corte último de 36 kA a 415 V AC, conforme a la norma IEC 60947-2, y de las funciones de protección regulables L (sobrecarga), S (cortocircuito con retardo) e I (cortocircuito instantáneo) [ABB_24].



Figura 13. Interruptor automático ABB Tmax XT4N 250 Ekip Dip LSI 4P [ABB_26b]

La adopción de un calibre inferior al del Nivel 1 (250 A frente a 630 A) responde a que la corriente real que circula por los tramos del anillo es sensiblemente menor que la corriente de contingencia que debe soportar la protección general. Esta diferencia de calibres entre la protección general, situada aguas arriba, y las protecciones del anillo, situadas aguas abajo, es además la que permite establecer la selectividad entre ambos niveles, según se detalla en el apartado 9.7.

La verificación frente a sobrecargas se realiza con la intensidad de ajuste de la función de protección de sobrecarga (función L). Para una corriente nominal del interruptor de $I_n = 250 \text{ A}$, se adopta un coeficiente $k = 0,8$, se obtiene, según la ecuación E. 23 :

$$I_{1,2} = k \cdot I_n = 0,8 \cdot 250 = 200 \text{ A}$$

La corriente convencional de disparo, conforme a la norma IEC 60947-2 [IEC_24], y según los datos del fabricante, en la Tabla 31 resulta:

$$I_{2,2} = 1,3 \cdot I_{1,2} = 1,3 \cdot 200 = 260 \text{ A}$$

De este modo, se verifican las condiciones de protección frente a sobrecargas dadas en la ecuación E. 19:

$$I_B \leq I_{1,2} \leq I_Z \rightarrow 198,93 \text{ A} \leq 200 \text{ A} \leq 615 \text{ A}$$

$$I_{2,2} = 260A < 1,45 \cdot I_z = 891,75 A$$

Asimismo, el ajuste adoptado para el Nivel 2 resulta muy inferior al del Nivel 1, ya que:

$$I_{1,2} = 200 A < I_{1,1} = 604,8 A$$

Por tanto, las protecciones del Nivel 2 permiten conducir la corriente real de los tramos del anillo sin disparos intempestivos y garantizan que el ajuste no supera la intensidad admisible de los conductores de 300 mm². Asimismo, el ajuste inferior respecto al Nivel 1 favorece la coordinación frente a sobrecargas, quedando la comprobación completa de selectividad remitida al análisis de curvas tiempo-corriente y tablas del fabricante del apartado 9.7.

9.5.3 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 3

En el Nivel 3 se verifican las protecciones asociadas a las derivaciones interiores desde los cuadros hasta los receptores finales. Dado el elevado número de cargas existentes en la red de SSAA y la adopción de una sección común de 25 mm² para los cables interiores, se adopta un criterio de normalización constructiva para las protecciones de los circuitos finales principales.

De acuerdo con el dimensionamiento realizado en el apartado 6.3, para los conductores H07V-K de cobre de 25 mm² la intensidad admisible considerada es de 84 A en circuitos monofásicos y de 77 A en circuitos trifásicos. Se selecciona como calibre normalizado común para las derivaciones interiores un interruptor automático de 63 A.

Para este nivel se selecciona el interruptor automático de caja moldeada ABB Tmax XT2N 160, referencia XT2N 160 Ekip Dip LS/I In = 63 A, de 4 polos, con unidad electrónica de disparo Ekip Dip LS/I. Según la documentación técnica del fabricante, el equipo dispone de un poder de corte último de 36 kA a 415 V AC, conforme a la norma IEC 60947-2 [ABB_26c]. El número de polos del dispositivo se adecuará al tipo de circuito protegido, de acuerdo con la presencia o no de neutro distribuido.



Figura 14. Interruptor automático ABB Tmax XT2N 160 Ekip Dip LS/ 4P [ABB_26c].

La intensidad de ajuste de la función de protección de sobrecarga (función L) se establece para el calibre seleccionado en $I_{1,3} = 63 \text{ A}$. Se comprueba que se cumple la primera condición de la ecuación E. 19.

$$\text{Monofásico: } I_{1,3} = 63 \text{ A} \leq I_Z = 84 \text{ A}$$

$$\text{Trifásico: } I_{1,3} = 63 \text{ A} \leq I_Z = 77 \text{ A}$$

La segunda condición de la ecuación E. 19, con:

$$I_{2,3} = 1,3 \cdot I_{1,3} = 1,3 \cdot 63 = 81,9 \text{ A}$$

$$\text{Monofásico: } I_{2,3} = 81,9 \text{ A} < 1,45 \cdot 84 = 121,8 \text{ A}$$

$$\text{Trifásico: } I_{2,3} = 81,9 \text{ A} < 1,45 \cdot 77 = 111,65 \text{ A}$$

Se verifica entonces que ambas condiciones frente a sobrecargas se cumplen, de modo que el calibre de 63 A se toma como normalización constructiva, a pesar de no representar la optimización máxima de las protecciones individuales, debido al amplio margen que deja.

9.6 VERIFICACIÓN FRENTE A CORTOCIRCUITOS

En este apartado se verifica la adecuación de las protecciones seleccionadas frente a cortocircuitos. Para ello, se comprueba el poder de corte de los interruptores automáticos, la sensibilidad de sus disparadores frente a la corriente mínima de cortocircuito y la capacidad térmica de los conductores frente a la sollicitación producida durante el despeje de la falta.

9.6.1 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 1

En el Nivel 1 se verifican las protecciones generales situadas en el lado de BT de los transformadores auxiliares, encargadas de proteger la salida principal hacia el anillo de servicios auxiliares. Se utiliza el interruptor seleccionado en el apartado anterior.

Poder de corte:

De acuerdo con lo indicado en el apartado 9.2, la corriente máxima de cortocircuito en bornes del transformador auxiliar, corregida por sobretensión, es:

$$I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

Del catálogo del fabricante se obtiene que el poder de corte último del interruptor ABB Tmax XT5N 630 es $I_{cu} = 36 \text{ kA}$ a 415 V AC, conforme a IEC 60947-2 [ABB_26a]. Por tanto, se verifica:

$$I_{cu} = 36 \text{ kA} > I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

El poder de corte de servicio es $I_{cs} = 100\% \cdot I_{cu} = 36 \text{ kA}$. Se cumple entonces:

$$I_{cs} = 36 \text{ kA} \geq I_{cc,m\acute{a}x} = 15,873 \text{ kA}$$

Por tanto, se cumplen ambas ecuaciones especificadas en la ecuación E. 20.

El interruptor XT5N proporciona un poder de corte de 36 kA, suficiente frente a la corriente máxima de cortocircuito sin incurrir en sobredimensionamiento. La elección de la versión N, de menor poder de corte de la gama Tmax XT para este calibre, responde al criterio de adoptar la capacidad de corte mínima que cumple la exigencia, optimizando el coste.

Sensibilidad del disparador (con la función S del Ekip):

La unidad Ekip Dip LSI dispone de protección de cortocircuito selectivo (función S) con umbral y tiempo de disparo regulables. A diferencia de las unidades con umbral instantáneo fijo, el carácter regulable de la función S permite ajustar el umbral de disparo para garantizar la sensibilidad frente a la corriente mínima de cortocircuito. La función S se configura con curva a tiempo definido ($t = k$), en la que el disparo se produce tras un tiempo fijo independiente de la magnitud de la corriente de falta. Esta elección permite establecer un escalonamiento de tiempos predecible entre los niveles de protección, base de la coordinación cronométrica que se desarrolla en el apartado 9.7.

El umbral de la función S se ajusta como múltiplo de la corriente nominal:

$$I_{2s} = m \cdot I_n$$

E. 25. Umbral de sensibilidad de la función S [ABB_24].

con un margen de tolerancia de $\pm 10\%$, especificado en la Tabla 31. La verificación de sensibilidad debe considerar el valor máximo del umbral de disparo (tolerancia positiva), de modo que se garantice la actuación ante la corriente mínima de cortocircuito $I_{cc,min} = 5404 A$:

$$I_{2s} \cdot 1,10 \leq I_{cc,min}$$

Entre los multiplicadores disponibles en la Tabla 30, se selecciona el mayor que cumple dicha condición, con objeto de no reducir el margen de coordinación con las protecciones aguas abajo. Para $m_1 = 7,5$ se obtiene:

$$I_{2s,1} = 7,5 \cdot 630 = 4725 \text{ A}$$

con tolerancia:

$$4725 \cdot 1,10 = 5197,5 \text{ A}$$

Como $5197,5 \text{ A} < 5404 \text{ A}$, queda garantizada la actuación de la protección de cortocircuito selectivo del Nivel 1 ante la corriente mínima de cortocircuito, incluso considerando la tolerancia positiva del disparador según la ecuación E. 21.

Comprobación térmica del conductor

El tiempo de disparo de la función S es regulable como se indica en la Tabla 30. De los tiempos disponibles, se adopta $t_{2s,1} = 0,2 \text{ s}$. Además, según la Tabla 31, para este caso aplica una tolerancia del $\pm 20\%$ (al ser el umbral de la función S superior a $4 \times I_n$), por lo que el tiempo máximo de disparo considerado es

$$t_{2s,1\text{máx}} = 0,2 \cdot 1,2 = 0,24 \text{ s}$$

De la Tabla 29, para conductores de cobre con aislamiento XLPE/, la densidad de corriente admisible para $t = 1 \text{ s}$ es 149 A/mm^2 . Dado que la relación $J_{cc,adm} = k/\sqrt{t}$ implica que el coeficiente k del material es constante, se obtiene

$$k = 149 \text{ A}\sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$$

Aplicando dicho coeficiente al tiempo real de disparo $t_{2s,1\text{máx}}$:

$$J_{cc,adm} = \frac{k}{\sqrt{t}} = \frac{149}{\sqrt{0,12}} = 304,14 \text{ A/mm}^2$$

Para el conductor de sección $S = 300 \text{ mm}^2$ según la ecuación :

$$I_{cc,adm} = 304,14 \cdot 300 = 91243,5 \text{ A} = 91,24 \text{ kA}$$

Dado que la corriente máxima de cortocircuito calculada es $I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$, se verifica: $15,873 \text{ kA} < 91,24 \text{ kA}$ según la ecuación E. 22. En consecuencia, el conductor principal de 300 mm^2 cumple la comprobación térmica frente al cortocircuito máximo.

9.6.2 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 2

Para el Nivel 2 se verifica la actuación de las protecciones frente a cortocircuitos en los alimentadores principales del anillo de BT. Para este nivel se emplea el interruptor automático de caja moldeada ABB Tmax XT4N 250 con unidad Ekip LSI, especificado en el apartado 9.5.

Poder de corte:

De forma conservadora, se adopta la corriente máxima de cortocircuito calculada en bornes del transformador auxiliar:

$$I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

Aunque la corriente de cortocircuito real en los alimentadores del anillo será inferior, debido a la impedancia existente entre el transformador auxiliar y el punto de instalación de las protecciones de Nivel 2, la adopción de este valor permite realizar la comprobación del lado de la seguridad.

El interruptor ABB Tmax XT4N 250 presenta un poder de corte último $I_{cu} = 36 \text{ kA}$ a 415 V AC, conforme a IEC 60947-2 [ABB_26b] . Por tanto, se verifica:

$$I_{cu} = 36 \text{ kA} \geq I_{cc,m\acute{a}x} = 15,873 \text{ kA}$$

Asimismo, el poder de corte de servicio es $I_{cs} = 100\% \cdot I_{cu} = 36 \text{ kA}$, cumpliéndose también:

$$I_{cs} = 36 \text{ kA} \geq I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

En consecuencia, el interruptor automático seleccionado para el Nivel 2 cumple el requisito de poder de corte frente a la corriente máxima de cortocircuito considerada.

Sensibilidad del disparador

La unidad Ekip LSI dispone de protección de cortocircuito selectivo (función S) con umbral y tiempo de disparo regulables. La sensibilidad se verifica garantizando que el umbral de disparo de la función S resulte sensible a la corriente mínima de cortocircuito, considerando la tolerancia positiva del disparador.

El umbral de la función S se ajusta como múltiplo de la corriente nominal del interruptor, según la ecuación E. 25. Para el Nivel 2, con $I_n = 250 \text{ A}$, se adopta un multiplicador $m_2 = 10$, obteniéndose:

$$I_{2s,2} = 10 \cdot 250 = 2.500 \text{ A}$$

Considerando la tolerancia positiva del $\pm 10\%$ del disparador, el umbral máximo de disparo resulta:

$$I_{2s,2max} = 1,10 \cdot 2500 = 2750 \text{ A}$$

Dado que la corriente mínima de cortocircuito considerada es $I_{cc,mín} = 5404 \text{ A}$, se verifica:

$$I_{2s,2max} = 2750 \text{ A} < I_{cc,mín} = 5404 \text{ A}$$

Por tanto, queda garantizada la actuación de la protección de cortocircuito selectivo del Nivel 2 ante la corriente mínima de cortocircuito considerada.

Además, el umbral adoptado para el Nivel 2 queda por debajo del correspondiente al Nivel 1. Para el Nivel 1 se había seleccionado un umbral $I_{2s,1} = 4725 \text{ A}$, mientras que para el Nivel 2 se obtiene $I_{2s,2} = 2500 \text{ A}$, de modo que:

$$I_{2s,2} = 2500 \text{ A} < I_{2s,1} = 4725 \text{ A}$$

Esta separación entre umbrales favorece la coordinación entre las protecciones de ambos niveles. No obstante, la verificación completa de selectividad se realiza posteriormente mediante las tablas de coordinación del fabricante, en el apartado 9.7.

Comprobación térmica del conductor

Los conductores protegidos en el Nivel 2 corresponden a los alimentadores principales del anillo de BT. Por tanto, se trata de los mismos conductores considerados en el Nivel 1: conductores de cobre con aislamiento XLPE y sección $S = 300 \text{ mm}^2$.

A diferencia del Nivel 1, el tiempo de disparo de la función S se ajusta en $t_{2s,2} = 0,05 \text{ s}$, inferior al del Nivel 1, con objeto de garantizar el escalonamiento cronométrico que asegura la selectividad. Aplicando la tolerancia del $\pm 20\%$, el tiempo máximo considerado es:

$$t_{2s,2\text{máx}} = 0,05 \cdot 1,20 = 0,06 \text{ s}$$

Con el coeficiente $k = 149 \text{ A} \cdot \sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$ (cobre XLPE/EPR) y dicho tiempo:

$$J_{cc,adm} = \frac{k}{\sqrt{t}} = \frac{149}{\sqrt{0,06}} = 608,3 \text{ A/mm}^2$$

Para el conductor de sección $S = 300 \text{ mm}^2$, según la ecuación E. 22:

$$I_{cc,adm} = 608,3 \cdot 300 = 182.490 \text{ A} = 182,49 \text{ kA}$$

Dado que $I_{cc,máx} = 15,873 \text{ kA}$, se verifica: $15,873 \text{ kA} < 182,49 \text{ kA}$. En consecuencia, los conductores principales del anillo protegidos por las protecciones de Nivel 2 cumplen la comprobación térmica frente al cortocircuito máximo considerado.

9.6.3 VERIFICACIÓN EN EL NIVEL 3

Para el Nivel 3 se verifica la actuación de las protecciones frente a cortocircuitos en las derivaciones interiores desde los cuadros hasta los receptores finales. Para este nivel se

emplea el interruptor automático de caja moldeada ABB Tmax XT2N 160 Ekip Dip LS/I $I_n = 63$ A, de 4 polos, con unidad electrónica de disparo, seleccionado en el apartado 9.5.

Poder de corte

Para la verificación del poder de corte se adopta, de forma conservadora, la corriente máxima de cortocircuito calculada en bornes del transformador auxiliar:

$$I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

Aunque la corriente de cortocircuito real en las derivaciones interiores será sensiblemente inferior, debido a la impedancia existente entre el transformador auxiliar, los alimentadores principales del anillo y el punto de instalación de las protecciones de Nivel 3, la adopción de este valor permite realizar la comprobación del lado de la seguridad.

Según la ficha técnica del fabricante, el interruptor ABB Tmax XT2N 160 presenta un poder de corte último $I_{cu} = 36 \text{ kA}$ a 415 V AC, conforme a la norma IEC 60947-2 [ABB_26c]. Por tanto, se verifica:

$$I_{cu} = 36 \text{ kA} \geq I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

Asimismo, el poder de corte en servicio del interruptor es $I_{cs} = 100\% \cdot I_{cu} = 36 \text{ kA}$, por lo que también se cumple:

$$I_{cs} = 36 \text{ kA} \geq I_{cc,max} = 15,873 \text{ kA}$$

En consecuencia, el interruptor automático seleccionado para el Nivel 3 cumple el requisito de poder de corte frente a la corriente máxima de cortocircuito considerada.

Sensibilidad del disparador

La unidad Ekip Dip LS/I dispone de protección de cortocircuito instantáneo (función I) con umbral regulable, ajustable como múltiplo de la corriente nominal del interruptor.

Para el Nivel 3, con $I_n = 63 A$, se adopta un multiplicador $m_3 = 6$, obteniéndose:

$$I_{2l,3} = 6 \cdot 63 = 378 A$$

Considerando la tolerancia positiva del $\pm 10\%$ del disparador, el umbral máximo de disparo resulta:

$$I_{2l,3m\acute{a}x} = 1,10 \cdot 378 = 415,8 A$$

Dado que la corriente mínima de cortocircuito considerada es $I_{cc,m\acute{i}n} = 5404 A$, se verifica:

$$I_{2l,3m\acute{a}x} = 415,8 A < I_{cc,m\acute{i}n} = 5404 A$$

, garantizando la actuación de la protección ante la corriente mínima de cortocircuito.

Comprobación térmica del conductor

Los conductores protegidos en el Nivel 3 corresponden a las derivaciones interiores. De acuerdo con el dimensionamiento del apartado 6.3, se han normalizado mediante conductores H07V-K de cobre, aislamiento PVC, y sección $S = 25 \text{ mm}^2$.

Para determinar el tiempo de despeje aplicable, se considera el tiempo de actuación de la función de protección instantánea (función I) del disparador Ekip Dip LS/I. Según la documentación técnica del fabricante, dicho tiempo es $t_3 \leq 20 \text{ ms}$ como se observa en la

ABB code	Protection Function	Threshold	Trip Time	Trip Curve
L	Overload	$I_1 = 0.4 \dots 1 \times I_n$ with steps of 0.04	t_1 at $3 \times I_1 = 12 - 36 \text{ s}$ 12 - 48 s for XT7	$t = k/I^2$
S	Selective short-circuit	$I_2 = \text{Off} - 1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4.5 - 5.5 - 6.5 - 7 - 7.5 - 8 - 8.5 - 9 - 10 \times I_n$	$t_2 = 0.1 - 0.2 \text{ s}$ at $10 \times I_n$ when $t = k/I^2$	$t = k$ $t = k$ or $t = k/I^2$ for XT7
I	Short-circuit	$I_3 = \text{Off} - 1 - 1.5 - 2 - 2.5 - 3 - 3.5 - 4.5 - 5.5 - 6.5 - 7 - 7.5 - 8 - 8.5 - 9 - 10 \times I_n$	$t_3 \leq 20 \text{ ms}$ $t_3 \leq 30 \text{ ms}$ for XT7	$t = k$
G	Earth fault	$I_4 = \text{Off} - 0.20 - 0.25 - 0.45 - 0.55 - 0.75 - 0.80 - 1 \times I_n$ $I_4 = \text{Off} - 0.2 - 0.3 - 0.4 - 0.6 - 0.8 - 0.9 - 1.0 \times I_n$ for XT7	$t_4 = 0.1 - 0.2 - 0.4 - 0.8 \text{ s}$ at $3 \times I_n$ when $t = k/I^2$	$t = k$ $t = k$ or $t = k/I^2$ for XT7

Tabla 32. Ekip Dip LS/I Protection settings [ABB_24]

Por ello, se adopta conservadoramente:

$$t_{2I,3} = 20 \text{ ms} = 0,02 \text{ s}$$

Para conductores de cobre con aislamiento PVC se adopta el coeficiente $k = 115 \text{ A} \cdot \sqrt{\text{s}}/\text{mm}^2$. Sustituyendo en la ecuación E.20:

$$I_{cc,adm} = \frac{k \cdot S}{\sqrt{t}} = \frac{115 \cdot 25}{\sqrt{0,02}} = 20330 \text{ A} = 20,33 \text{ kA}$$

Para la comprobación se adopta, de forma conservadora, la corriente máxima de cortocircuito calculada en bornes del transformador auxiliar $I_{cc,m\acute{a}x} = 15,873 \text{ kA}$, dado que las corrientes de cortocircuito en las derivaciones interiores no se han calculado individualmente al tratarse de circuitos finales con cargas receptoras. Por tanto:

$$I_{cc,m\acute{a}x} = 15,873 \text{ kA} < I_{cc,adm} = 20,33 \text{ kA}$$

En consecuencia, los conductores H07V-K de cobre con aislamiento PVC y sección 25 mm^2 cumplen la comprobación térmica frente al cortocircuito máximo considerado, bajo la actuación de la función instantánea del interruptor Tmax XT2N.

9.7 COORDINACIÓN Y SELECTIVIDAD ENTRE PROTECCIONES

La selectividad entre los distintos niveles de protección garantiza que, ante un defecto, actúe únicamente la protección situada inmediatamente aguas arriba del punto de falta, manteniendo en servicio el resto de la instalación. En el sistema analizado se establece una coordinación a tres niveles: protección general (Nivel 1), alimentadores del anillo (Nivel 2) y derivaciones finales (Nivel 3).

La coordinación se fundamenta en dos criterios complementarios. En primer lugar, la diferencia de calibres entre niveles: la protección general (XT5N 630, $I_n = 630 \text{ A}$) presenta un calibre muy superior al de los alimentadores del anillo (XT4N 250, $I_n = 250 \text{ A}$) y al de las derivaciones finales (XT2N 160, $I_n = 63 \text{ A}$). En segundo lugar, el escalonamiento de los tiempos de la función de cortocircuito selectivo (función S), ajustada con $t_{2s,1} = 0,2 \text{ s}$ en el

Nivel 1 y $t_{2s,2} = 0,05$ s en el Nivel 2, de modo que ante un defecto en el anillo actúe en primer lugar la protección aguas abajo. El Nivel 3, al constituir el último escalón de la cadena, emplea la función instantánea (I), sin retardo intencionado en el cual se garantiza la actuación de las protecciones de dicho nivel antes de los 20 ms.

Dado que la corriente máxima de cortocircuito (15,873 kA) supera la corriente de corta duración admisible de los interruptores, la selectividad no puede garantizarse únicamente mediante el escalonamiento cronométrico en todo el rango de faltas. Por ello, la verificación definitiva se realiza mediante las tablas de coordinación del fabricante, obtenidas con la herramienta de coordinación SOC de ABB [ABB_24b], que recogen los ensayos reales de selectividad entre las distintas combinaciones de interruptores, las tablas completas se encuentran en el Anejo VIII.

De acuerdo con dichas tablas, las parejas de interruptores adoptadas presentan selectividad total (T):

- Entre el Nivel 1 (XT5N 630) y el Nivel 2 (XT4N 250): selectividad total.
- Entre el Nivel 2 (XT4N 250) y el Nivel 3 (XT2N 160): selectividad total.

En consecuencia, la cadena de protecciones presenta selectividad total en todos sus niveles hasta el poder de corte de los dispositivos, superando ampliamente la corriente máxima de cortocircuito prevista en la instalación. Queda así garantizada la desconexión selectiva del tramo afectado ante cualquier defecto, sin pérdida de servicio en el resto de la red de servicios auxiliares.

Las curvas tiempo-corriente de los tres niveles de protección, que ilustran gráficamente la coordinación descrita, se recogen en la Figura 15.

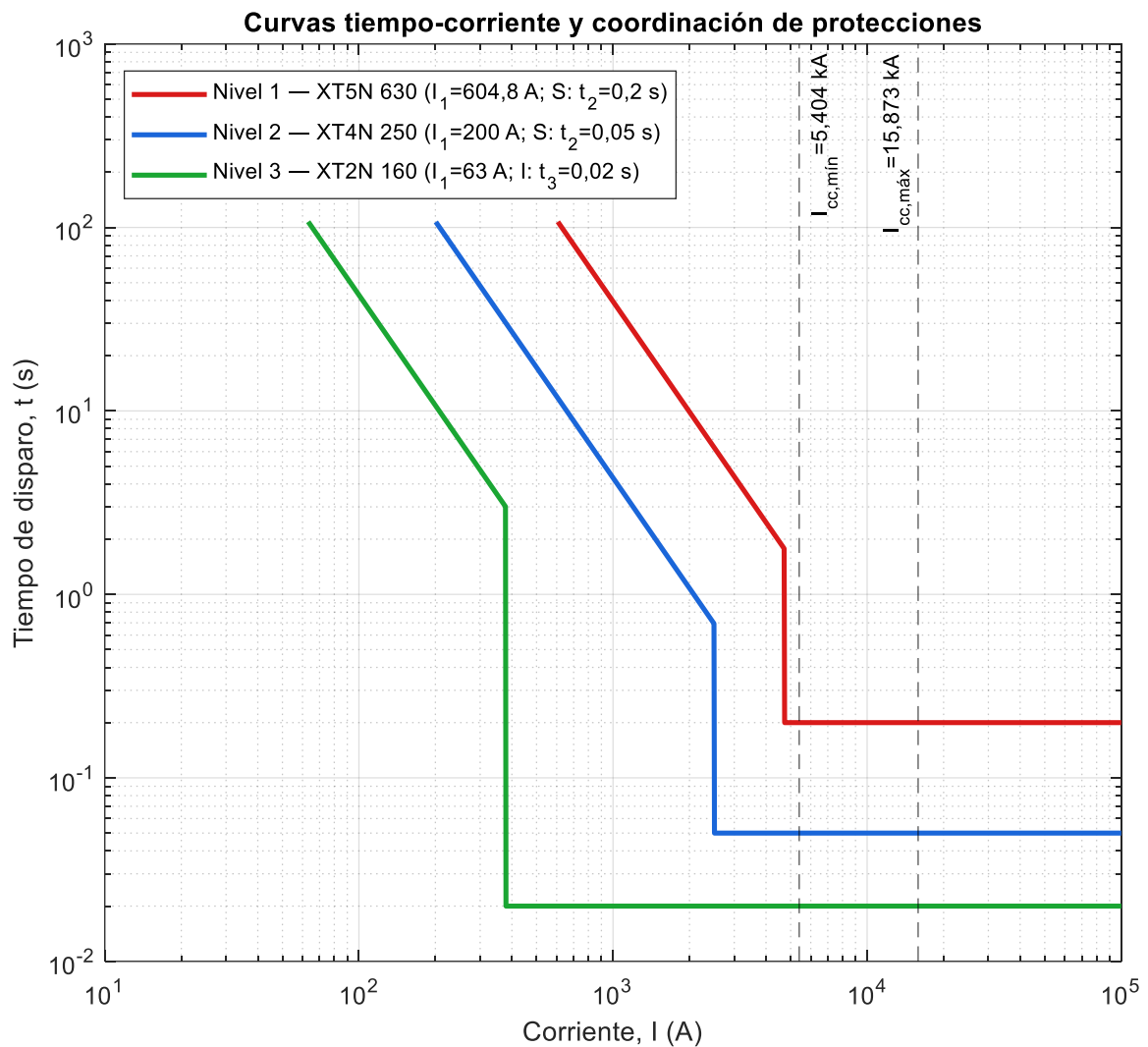


Figura 15. Curvas tiempo-corriente de las protecciones con Matlab

Capítulo 10. ESTUDIO ECONÓMICO

10.1 HIPÓTESIS ECONÓMICAS

El presente estudio económico tiene carácter preliminar y se realiza con el objetivo de obtener una estimación orientativa del coste asociado al diseño de los SSAA de la S/E. Dado que en esta fase del proyecto no se dispone de ofertas comerciales cerradas para todos los equipos seleccionados, los costes considerados deben entenderse como valores estimativos, sujetos a revisión una vez definida la ingeniería de detalle y completada la selección final de materiales y equipos.

El alcance económico considerado incluye los principales equipos eléctricos asociados a los SSAA, así como los conductores, protecciones, cuadros eléctricos, rectificadores-cargadores, bancos de baterías, canalizaciones y grupos electrógenos considerados en la arquitectura de diseño. Las partidas de montaje, conexionado, pruebas y puesta en servicio no se valoran de forma específica, salvo en aquellos casos en los que se encuentren incorporadas dentro del precio unitario de la partida empleada como referencia.

No se incluyen en esta estimación los costes correspondientes a la aparamenta principal de AT, obra civil general de la S/E, sistema general de puesta a tierra del parque, expropiaciones, permisos administrativos, costes de explotación a largo plazo ni IVA. Estos conceptos quedan fuera del alcance técnico y económico del presente proyecto.

Para cubrir posibles desviaciones derivadas de la fase preliminar del diseño, se incorpora una partida de contingencia sobre el presupuesto directo. Dicha partida permite absorber variaciones asociadas a precios comerciales, ajustes de mediciones, modificaciones menores de ingeniería o selección definitiva de equipos.

10.2 COSTES PRINCIPALES

Los costes principales del proyecto se agrupan en función de los subsistemas definidos en el diseño técnico. Esta clasificación permite relacionar directamente el presupuesto con los capítulos de dimensionamiento desarrollados previamente.

En primer lugar, el sistema de alimentación en CA incluye los transformadores auxiliares, cuadros de distribución, protecciones de BT, conductores principales del anillo, derivaciones interiores y canalizaciones asociadas. Estas partidas están condicionadas principalmente por la potencia de diseño adoptada, la sección de los conductores, la longitud de los trazados y el nivel de redundancia considerado.

En segundo lugar, el sistema de alimentación en CC comprende los rectificadores-cargadores, bancos de baterías, barras de distribución de CC, protecciones específicas y equipos auxiliares asociados. En este subsistema, el coste queda especialmente condicionado por la autonomía exigida, la capacidad seleccionada del banco de baterías y el grado de redundancia adoptado.

Asimismo, deben considerarse los costes de montaje, conexionado, ensayos, pruebas funcionales y puesta en servicio. Estas partidas son necesarias para garantizar que los equipos instalados cumplen las condiciones de funcionamiento previstas y que la arquitectura final responde a los criterios de continuidad y seguridad establecidos.

Las partidas económicas consideradas se agrupan de acuerdo con los principales subsistemas definidos en la memoria: sistema de alimentación en CA, sistema de alimentación en CC, conductores, protecciones, cuadros eléctricos, canalizaciones, grupos electrógenos, montaje, pruebas e ingeniería. Los precios unitarios se han obtenido, siempre que ha sido posible, a partir del Generador de Precios de CYPE o de referencias comerciales equivalentes. En aquellos equipos específicos para los que no se dispone de oferta comercial cerrada, los importes adoptados deben considerarse estimaciones preliminares pendientes de confirmación en fase de ingeniería de detalle.

10.3 PRESUPUESTO RESUMIDO

El presupuesto resumido se estructura por subsistemas, de forma coherente con el desarrollo técnico del proyecto. Esta presentación permite identificar el peso relativo de cada bloque dentro del coste total estimado.

<i>Concepto</i>	<i>Coste estimado (€)</i>	<i>Porcentaje sobre total (%)</i>
Sistema de alimentación en CA	180.000,00	25,8 %
Conductores y canalizaciones	248.128,11	35,5 %
Cuadros y protecciones de BT	119.611,26	17,1 %
Sistema de alimentación en CC	151.200,00	21,6 %
Presupuesto directo estimado	698.939,37	100 %
Ingeniería y documentación (5 %)	34.946,97	—
Contingencia (8 %)	55.915,15	—
Total estimado	789.801,49	—

Tabla 33. Presupuesto resumido estimado de los SSAA.

Al tratarse de una estimación económica preliminar, los valores se han obtenido a partir de bases de precios de la construcción, principalmente el Generador de Precios de CYPE [CYPE26] para conductores, canalizaciones y determinadas partidas de instalación, de tarifas de fabricante para las protecciones, y de referencias comerciales o estimaciones orientativas de mercado para transformadores, rectificadores-cargadores, bancos de baterías y cuadros eléctricos. El presupuesto deberá actualizarse en fase de ingeniería de detalle

mediante mediciones definitivas, precios unitarios vigentes y ofertas comerciales específicas.

No se incluye el IVA. Tampoco se valoran de forma independiente el montaje, el conexionado y las pruebas, salvo cuando dichos conceptos se encuentren incluidos en el precio unitario de la partida utilizada como referencia.

10.4 ANÁLISIS ECONÓMICO

El análisis económico del proyecto debe interpretarse como una valoración técnico-económica del diseño adoptado, y no como un estudio de rentabilidad financiera. Los SSAA no generan ingresos directos, sino que constituyen un sistema imprescindible para garantizar la continuidad, seguridad y operatividad de la S/E.

A partir del presupuesto resumido, la partida de mayor peso corresponde a los conductores y canalizaciones (35,5 % del PEM), condicionada principalmente por la longitud del anillo principal de baja tensión y la sección de 300 mm² adoptada por criterio de intensidad nominal del transformador. Le sigue el sistema de alimentación en CA (25,8 %), determinado por el coste de los transformadores auxiliares y los grupos electrógenos de respaldo. El sistema de alimentación en CC (21,6 %) y los cuadros y protecciones de BT (17,1 %) completan el presupuesto directo, con un peso condicionado respectivamente por la redundancia de baterías y rectificadores, y por el elevado número de circuitos protegidos con aparataje de poder de corte adecuado a los niveles de cortocircuito calculados..

El criterio de diseño adoptado busca evitar tanto el infradimensionamiento como el sobredimensionamiento injustificado. El infradimensionamiento podría comprometer la continuidad de servicio y la seguridad de la instalación, mientras que un sobredimensionamiento excesivo incrementaría innecesariamente el coste de inversión, el consumo de materiales y el volumen de equipos instalados.

La redundancia considerada en la arquitectura de los SSAA supone un incremento de coste respecto a una solución mínima no redundante. Sin embargo, dicho incremento se justifica por la criticidad de la instalación y por la necesidad de mantener operativos los sistemas de protección, control y mando ante contingencias. En una S/E de transporte, el coste adicional asociado a la redundancia debe evaluarse frente al impacto técnico y operativo que tendría la pérdida de alimentación de los SSAA.

Por tanto, el diseño propuesto se considera económicamente coherente siempre que el presupuesto final confirme que las soluciones adoptadas responden a criterios de necesidad técnica, continuidad de servicio y cumplimiento normativo, sin introducir márgenes injustificados ni duplicidades no justificadas por los criterios de fiabilidad establecidos.

Capítulo 11. IMPACTO AMBIENTAL Y SOSTENIBILIDAD

11.1 CONSIDERACIONES AMBIENTALES

Este proyecto no es una evaluación ambiental de la S/E, sino un estudio técnico de cálculo y diseño de sus SSAA. Aun así, las decisiones de dimensionamiento tienen implicaciones ambientales indirectas, ligadas sobre todo a la eficiencia energética, al uso de materiales y a la gestión de los equipos al final de su vida útil.

El criterio de fondo es el de un dimensionamiento ajustado. Tanto el infradimensionamiento como el sobredimensionamiento injustificado tienen consecuencias: el primero compromete la continuidad del servicio; el segundo supone un consumo innecesario de materiales y una utilización menos eficiente de los recursos. Este equilibrio se ha buscado en los principales sistemas dimensionados -transformador auxiliar, conductores, rectificadores-cargadores y bancos de baterías-, ajustando cada equipo a la demanda real sin reservas desproporcionadas.

En la red de CA, la selección de conductores se ha hecho atendiendo a la intensidad admisible y a la caída de tensión. Esa comprobación no solo garantiza el cumplimiento técnico, sino que limita las pérdidas por efecto Joule durante toda la vida de la instalación. La selección del transformador auxiliar, por su parte, sitúa el equipo en un grado de carga razonable, sin recurrir a una potencia sobredimensionada que encarecería la instalación y emplearía más material del necesario.

En el sistema de CC, la selección del banco de baterías y de los rectificadores busca equilibrar la autonomía exigida con un uso racional de materiales. Aquí entra en juego el elemento ambientalmente más sensible de toda la instalación, las baterías de Ni-Cd, que se tratan en detalle en el apartado 11.3.

11.2 ALINEACIÓN CON ODS

El proyecto se alinea principalmente con el ODS 7 (Energía asequible y no contaminante): aunque los SSAA no generan energía, su correcta operación es imprescindible para mantener en servicio los sistemas de protección, control y mando de la S/E, y con ellos la continuidad y la seguridad del suministro en la red de transporte [ONU_25].

Asimismo, el proyecto se relaciona con el ODS 9 (Industria, innovación e infraestructura), al diseñar una infraestructura eléctrica crítica bajo criterios de fiabilidad, redundancia y resiliencia, coherentes con el criterio N-1 adoptado a lo largo del proyecto a [ONU_25].

Por último, conecta con el ODS 12 (Producción y consumo responsables), especialmente en la selección, el mantenimiento y la gestión final de equipos y baterías, donde la naturaleza de los componentes obliga a contemplar criterios de reciclaje y tratamiento adecuado.

La contribución del proyecto a los ODS se resume en la Tabla 34.

<i>ODS</i>	<i>Relación con el proyecto</i>	<i>Contribución concreta</i>
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Continuidad y seguridad del suministro eléctrico	Dimensionamiento redundante de los SSAA (transformadores auxiliares, rectificadores-cargadores y baterías) que garantiza la disponibilidad de los sistemas de protección, control y telecomunicaciones críticos de la S/E, incluso ante contingencia N-1.
ODS 9: Industria, innovación e infraestructura	Robustez de infraestructuras eléctricas críticas	Diseño de una arquitectura auxiliar en anillo con doble alimentación (CT1/CT2), coordinación de protecciones selectiva (ABB Tmax XT) y verificación normativa completa (REBT, RAT), reforzando la fiabilidad de la infraestructura de transporte.
ODS 12: Producción y consumo responsables	Gestión responsable de equipos y baterías	Selección de baterías NiCd (SAFT Uptimax UP1 L) frente a alternativas Pb-ácido por su mayor vida útil y menor frecuencia de sustitución, reduciendo el volumen de residuos generados a lo largo del ciclo de vida de la instalación.

Tabla 34. Contribución del proyecto a los Objetivos de Desarrollo Sostenible

11.3 GESTIÓN DE EQUIPOS Y BATERÍAS

La gestión ambiental de los equipos debe contemplarse durante todo su ciclo de vida, desde la especificación hasta la retirada. En transformadores, conductores, cuadros, protecciones y rectificadores, una especificación técnica adecuada prolonga la vida útil y reduce las sustituciones prematuras, lo que disminuye el consumo de materiales a lo largo del tiempo.

El elemento que requiere mayor atención es el banco de baterías. Las baterías estacionarias de Ni-Cd empleadas en este proyecto contienen cadmio, un metal pesado tóxico sujeto a normativa específica de residuos peligrosos. Su uso se mantiene en aplicaciones industriales estacionarias como esta -subestaciones eléctricas- por sus ventajas técnicas frente a otras tecnologías: elevada fiabilidad, larga vida útil, tolerancia a sobrecargas y buen comportamiento ante variaciones de temperatura. No obstante, esa presencia de cadmio exige un tratamiento especial en toda su gestión: la instalación, operación, mantenimiento y, sobre todo, retirada deben ajustarse a las instrucciones del fabricante y a la normativa de gestión de residuos y acumuladores aplicable, en particular el Reglamento (UE) 2023/1542 relativo a las pilas y baterías y sus residuos [PARL23]. Deben evitarse las manipulaciones inadecuadas, los vertidos de electrolito y la eliminación junto a residuos convencionales.

Durante la explotación, conservar las condiciones de ventilación, temperatura y accesibilidad de la sala de baterías y respetar las revisiones periódicas del fabricante no es solo una cuestión de seguridad: mantiene la capacidad disponible del banco, reduce los fallos prematuros y alarga su vida útil, lo que también es un beneficio ambiental.

Al final de su servicio, las baterías deben retirarse de forma segregada y entregarse a un gestor autorizado o a los canales de reciclaje establecidos para este tipo de equipos. En este sentido, el fabricante de las baterías seleccionadas dispone de una red de puntos de recogida (*Bring Back Points*) que admiten sin coste las baterías de Ni-Cd al final de su vida útil y las canalizan hacia instalaciones de reciclaje autorizadas, con una eficiencia de reciclaje superior al 75 % del peso de la batería —valor por encima del exigido por la normativa

europea de baterías— que permite recuperar el níquel, el cadmio, el acero y el plástico para su reincorporación como materia prima [SAFT18]. De este modo, el cadmio, principal condicionante ambiental de esta tecnología, queda sujeto a un circuito de gestión controlado que evita su dispersión. Los equipos eléctricos sustituidos se gestionarán igualmente de forma diferenciada, priorizando la recuperación de materiales metálicos y de componentes reutilizables cuando sea técnicamente viable.

La sostenibilidad del sistema, en definitiva, no se decide solo en el diseño inicial: depende también de cómo se opera, se mantiene y se retira cada equipo, y muy en particular de la gestión responsable del banco de baterías de Ni-Cd.

Capítulo 12. CONCLUSIONES Y TRABAJOS

FUTUROS

El objeto de este proyecto era el cálculo y diseño de los SSAA de una S/E de transporte. Los objetivos y el alcance definidos en el Capítulo 1. se han cubierto a lo largo de la memoria, según se recoge en las conclusiones siguientes.

12.1 CONCLUSIONES

La arquitectura de los SSAA se ha diseñado bajo los criterios de continuidad establecidos, en particular el criterio N-1. La configuración en anillo con barra partida aporta un elevado nivel de seguridad frente a fallos, al permitir reconfigurar la alimentación ante la indisponibilidad de un tramo o de una fuente. Junto con la redundancia de transformadores auxiliares, grupos electrógenos y sistemas de CC, esta arquitectura garantiza la alimentación de los servicios de los que depende la protección de la S/E, incluso en condiciones de contingencia.

El equilibrado de cargas confirma la idoneidad del reparto adoptado: la corriente de neutro resultante, de 18,43 A frente a corrientes de fase del orden de 500 A, refleja un desequilibrio reducido y limita las solicitudes asociadas a un reparto desigual entre fases.

La selección del transformador auxiliar constituye uno de los puntos clave del dimensionamiento. El transformador de 400 kVA adoptado presenta, incluso en el escenario de contingencia en que asume por sí solo toda la demanda, un grado de carga del 85,4 %, lo que supone un margen razonable frente a incertidumbres del inventario y posibles ampliaciones futuras.

La sección de 300 mm² adoptada para los conductores principales del anillo resulta adecuada, al satisfacer simultáneamente el criterio de intensidad admisible y el de caída de tensión, manteniéndose esta última por debajo del límite reglamentario aplicable incluso bajo las hipótesis conservadoras consideradas.

El sistema de CC a 125 Vcc garantiza la alimentación de las cargas críticas durante una autonomía de 8 h ante la pérdida de la alimentación en CA. Para ello, la carga crítica se distribuye entre tres sistemas rectificador-cargador/banco en servicio, con baterías Ni-Cd Saft Uptimax UP1L 280 de 96 elementos, respaldados por tres sistemas redundantes que aseguran la continuidad de alimentación conforme al criterio N-1.

Por último, para el estudio de protecciones se desarrolló un modelo de la red en Simulink que, tras su validación frente a los cálculos teóricos, permitió obtener las corrientes de cortocircuito en todos los nodos considerados. Estos resultados constituyeron la base para la selección de la aparamenta ABB Tmax de los tres niveles de protección y para la verificación de su coordinación. Dicha verificación, realizada mediante las tablas de selectividad del fabricante (herramienta SOC), confirma selectividad total (T) entre los niveles 1-2 y 2-3, tanto en la zona de sobrecarga y corto retardo como en la de actuación instantánea. Queda como línea de trabajo futuro la confirmación de este resultado mediante ensayo físico de los equipos en la fase de comisionado de la instalación.

12.2 TRABAJOS FUTUROS

El alcance del proyecto deja abiertas varias líneas de continuación, propias de una fase de ingeniería de detalle o de un proyecto a mayor escala.

En primer lugar, la selectividad de protecciones ha quedado verificada mediante las tablas de selectividad del fabricante, obteniéndose selectividad total (T) entre los niveles 1-2 y 2-3 para las referencias seleccionadas. No obstante, dicha verificación se apoya en datos catalogados por el fabricante bajo condiciones normalizadas de ensayo. Su confirmación

definitiva mediante curvas tiempo-corriente obtenidas con los equipos físicos, en el marco de las pruebas de puesta en servicio de la instalación, constituye una línea de trabajo pendiente propia de la fase de comisionado.

El diseño de la red de puesta a tierra, complemento natural del diseño de los SSAA, ha quedado fuera del alcance de este trabajo. Constituye una línea pendiente de especial relevancia, al condicionar la seguridad de las personas y de los equipos de la instalación.

Asimismo, como se indicó en el apartado de alcance, el parque de 400 kV queda fuera del objeto del proyecto. No obstante, la metodología de trabajo desarrollada -inventario y clasificación de cargas, equilibrado, dimensionamiento de transformadores y conductores, y verificación normativa- es aplicable como marco de referencia para su estudio. Cabe señalar que la configuración de interruptor y medio del parque de 400 kV implica una arquitectura de protección, control y enclavamientos de mayor complejidad que la de barra doble con acoplamiento del parque de 220 kV, por lo que su dimensionamiento específico requeriría un análisis independiente que excede el alcance de este trabajo.

Por último, la selección comercial definitiva de los equipos queda pendiente de confirmación. Su cierre requiere la comparación con ofertas reales de los fabricantes y la consulta de las fichas técnicas particulares de cada equipo -transformador auxiliar, baterías, rectificadores-cargadores y aparamenta de protección.

Capítulo 13. BIBLIOGRAFÍA

- [FUND26] FUNDACIÓN ENDESA: *Transporte de la electricidad y las subestaciones*. URL <https://www.fundacionendesa.org/es/educacion/endesa-educa/recursos/transporte-de-electricidad>. — Transporte de electricidad
- [SERV20] SERVICIOS AUXILIARES DE SUBESTACIONES: *Servicios auxiliares de subestaciones eléctricas*. URL <https://servauxsubestaciones.blogspot.com/2020/06/serviauxsubestacioneselec.html>. — Servicios Auxiliares de Subestaciones
- [RAS_98] RAS OLIVA, ENRIQUE / ENRIC: *Transformadores de potencia, de medida y de protección*. 7.^a. : Marcombo, 1998 — ISBN 978-84-267-0690-4
- [SERV24] SERVISISTEMAS: *Estado de Flotación en Baterías: Carga Constante y Protección*. URL https://servisistemas.com.co/infoblog/que-significa-una-bateria-en-estado-de-flotacion-n26?srsId=AfmBOooN-Bn_rygzDgZ80QOo07oqw0rDpTq__7hYgo_o_z_xSxIneu4n. — Servisistemas
- [MINI16] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO: Resolución de 5 de abril de 2016, de la Secretaría de Estado de Energía, por la que se aprueba el procedimiento de operación del sistema eléctrico 1.1 “Criterios de funcionamiento y seguridad para la operación del sistema eléctrico”. Bd. BOE núm. 83, 2016
- [MINI02] MINISTERIO DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA: Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (Real Decreto 842/2002, BOE n.º 224).
- [MINI14] MINISTERIO DE INDUSTRIA, ENERGÍA Y TURISMO: Reglamento sobre condiciones técnicas y garantías de seguridad en instalaciones eléctricas de alta tensión (Real Decreto 337/2014, BOE n.º 139).
- [VARG20] VARGAS, JOHAN: *Esquema de Barras de una Subestación*. URL <https://ingenieriadesubestaciones.com/es/esquema-de-barras-de-una-subestacion/>. - abgerufen am 2026-06-19. — IDS
- [UNE_12] UNE / AENOR: UNE-EN 60038:2012. Tensiones normalizadas de CENELEC.
- [IEC_21] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: IEC 61936-1:2021. Power installations exceeding 1 kV AC and 1,5 kV DC – Part 1: AC.

- [ORMA22] ORMAZABAL: *Transformador de distribución para redes inteligentes transforma.smart* : Ormazabal, 2022 — ISBN CA-600-ES-B01
- [EES_26] EES CABLE: *0.6/1 kV Cable unipolar de cobre, con aislamiento de XLPE y sin armadura IEC 60502-1 - EES CABLE*. URL <https://www.eescable.com/es/product/cables-unipolares-de-06-1-kv-con-aislamiento-de-xlpe-sin-blindaje-y-con-conductor-de-cobre/>. — EES CABLE
- [RCT_24] CABLES RCT: *H07V-K*. URL <https://www.cablesrct.com/productos/cables-por-material/cables-pvc/169-750v/1000-h07v-k#documentos>. — Cables RCT
- [IEC_22] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: IEC 60255-1:2022. Measuring relays and protection equipment – Part 1: Common requirements.
- [RECT18] RECTICUR ELECTRÓNICA INDUSTRIAL: *Rectificadores alta frecuencia 110, 125 y 220 Vcc. RAF Argos*, 2018
- [ABB_26a] ABB: *XT5N 630 Ekip Dip LSI In=630 4p F F*. URL <http://new.abb.com/products/es/1SDA100401R1/xt5n-630-ekip-dip-lsi-in-630-4p-f-f>. - abgerufen am 2026-06-27. — ABB
- [ABB_24] ABB: *SACE Tmax XT. Low voltage molded case circuit-breakers* (Nr. 1SDC210100D0206)
- [IEC_24] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION: IEC 60947-2:2024. Low-voltage switchgear and controlgear – Part 2: Circuit-breakers.
- [ABB_26b] ABB: *XT4N 250 Ekip C Dip LSI In250A 4pFF*. URL <http://new.abb.com/products/1SDA068157R1/xt4n-250-ekip-c-dip-lsi-in250a-4pff>. - abgerufen am 2026-06-29. — ABB
- [ABB_26c] ABB: *XT2N 160 Ekip Dip LS/I In=63A 4p F F*. URL <http://new.abb.com/products/1SDA067092R1/xt2n-160-ekip-dip-ls-i-in-63a-4p-f-f>. - abgerufen am 2026-06-29. — ABB
- [ABB_24b] ABB: *SOC – Selected Optimized Coordination. Selectivity*. URL <https://www.lowvoltage-tools.abb.com/soc/Selectivity>. - abgerufen am 2026-06-30. — ABB Low Voltage Tools
- [CYPE26] CYPE INGENIEROS, S.A.: *Generador de precios de la construcción. España*. URL <https://generadordeprecios.info/>. - abgerufen am 2026-06-25. — Generador de precios de la construcción. España. CYPE Ingenieros, S.A.

- [ONU_25] NACIONES UNIDAS: *Objetivos de Desarrollo Sostenible*. URL <https://www.undp.org/es/sustainable-development-goals>. - abgerufen am 2026-06-07. — UNDP
- [PARL23] PARLAMENTO EUROPEO Y CONSEJO DE LA UNIÓN EUROPEA: Reglamento (UE) 2023/1542 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 12 de julio de 2023, relativo a las pilas y baterías y sus residuos, 2023
- [SAFT18] SAFT: *Uptimax Ni-Cd battery. Technical manual* (Nr. 21846-2–1218), 2018

ANEJOS

<i>Anejo I.</i>	<i>Inventario de cargas.....</i>	<i>153</i>
<i>Anejo II.</i>	<i>Equilibrado de cargas</i>	<i>159</i>
<i>Anejo III.</i>	<i>Robustez ante desequilibrios.....</i>	<i>167</i>
<i>Anejo IV.</i>	<i>Caídas de tensión en cables principales de alimentación.....</i>	<i>169</i>
<i>Anejo V.</i>	<i>Caída de tensión en las derivaciones individuales.....</i>	<i>173</i>
<i>Anejo VI.</i>	<i>Dimensionamiento del sistema 125 Vcc</i>	<i>183</i>
<i>Anejo VII.</i>	<i>Cálculo de cortocircuitos.....</i>	<i>185</i>
<i>Anejo VIII.</i>	<i>Selectividad de las protecciones.....</i>	<i>191</i>
<i>Anejo IX.</i>	<i>Presupuesto económico.....</i>	<i>195</i>

Anejo I. INVENTARIO DE CARGAS DE CA

En este anejo se recoge el inventario de las cargas no críticas en corriente alterna consideradas en el diseño de los servicios auxiliares, tomando como referencia la subestación de Villaviciosa de Odón. Cada carga se identifica por su descripción, ubicación y cuadro de alimentación, distinguiéndose entre monofásicas y trifásicas para el posterior equilibrado por fases. Para cada una se indican sus magnitudes nominales (tensión U , potencia aparente S , potencia activa P y factor de potencia), a partir de las cuales se obtiene el módulo de la intensidad $|I|$ y su ángulo φ , punto de partida del equilibrado desarrollado en el Anejo II.

Se distingue entre la potencia nominal y la potencia de diseño. Esta última incorpora, cuando procede, el factor de 1,8 aplicable a los circuitos de lámparas de descarga, según la ITC-BT-09 (alumbrado exterior) y la ITC-BT-44 (alumbrado interior) del REBT [MINI02]. Dicho factor no es un consumo real, sino una exigencia reglamentaria de dimensionamiento de conductores y protecciones, por lo que solo se aplica a esos circuitos; la demanda que sirve de base a la selección del transformador se calcula sobre la potencia real. La columna «FU» recoge el factor de utilización (≤ 1) de las cargas que no operan permanentemente a potencia nominal, que no debe confundirse con el coeficiente de 1,8: aquel reduce la potencia y este la incrementa, por causas distintas.

CARGAS NO CRÍTICAS													
#Carga	Descripción	Ubicación	Cuadro	Tipo de carga	U (V)	S(kVA)	S _{diseño} (kVA)	P (kW)	P _{diseño} (kVA)	fdp	I (A)	∠ (°)	FU
1	ACS	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Monofásica	230	3,3	3,3	3,30	3,30	1,00	14,35	0,00	1
2	Impresora	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Monofásica	230	0,15	0,15	0,11	0,11	0,7	0,65	45,57	1
3	HMI 1	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Monofásica	230	0,30	0,30	0,27	0,27	0,9	1,30	25,84	1
4	Fuerza almacén	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
5	Alumbrado almacén	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
6	Circuito alumbrado exterior 7	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
7	Circuito alumbrado exterior 6	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
8	Circuito alumbrado exterior 5	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
9	Circuito alumbrado exterior 4	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
10	Circuito alumbrado exterior 3	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
11	Circuito alumbrado exterior 2	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
12	Circuito alumbrado exterior 1	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
13	Circuito alumbrado interior 3	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
14	Circuito alumbrado interior 2	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
15	Circuito alumbrado interior 1	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	GENERAL ALUMBRADO CT1	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
16	Control alumbrado sala control	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	PRINCIPAL C.A. CT1	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,95	0,43	18,19	1
17	Alumbrado sala control	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	PRINCIPAL C.A. CT1	Monofásica	230	0,5	0,5	0,49	0,49	0,98	2,17	11,48	1
18	Servicio de fuerza sala control	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	PRINCIPAL C.A. CT1	Monofásica	230	2	2	1,96	1,96	0,98	8,70	11,48	1
19	Acondicionamiento sala control	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	PRINCIPAL C.A. CT1	Monofásica	230	4	4	3,80	3,80	0,95	17,39	18,19	1
20	Alumbrado general de subestación	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	PRINCIPAL C.A. CT1	Trifásica	400	10,00	10,00	8,5	8,50	0,85	14,43	31,79	1
21	Alimentación auxiliar GE	CENTRO TRANSFORMACIÓN 1	TELECO C.A. CT1	Monofásica	230	3	3	2,85	2,85	0,95	13,04	18,19	1
22	Fuerza aseos	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Monofásica	230	1	1	0,90	0,90	0,90	4,35	25,84	1
23	Alumbrado aseos	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Monofásica	230	0,5	0,5	0,49	0,49	0,98	2,17	11,48	1
24	Radiador aseos	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Monofásica	230	1,25	1,25	1,25	1,25	1,00	5,43	0,00	1
25	HMI 2	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Monofásica	230	0,30	0,30	0,27	0,27	0,9	1,30	25,84	1
26	Circuito alumbrado exterior 14	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
27	Circuito alumbrado exterior 13	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
28	Circuito alumbrado exterior 12	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
29	Circuito alumbrado exterior 11	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
30	Circuito alumbrado exterior 10	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
31	Circuito alumbrado exterior 9	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
32	Circuito alumbrado exterior 8	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	1,50	2,70	1,47	2,65	0,98	11,74	11,48	1,8
33	Circuito alumbrado interior 6	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
34	Circuito alumbrado interior 5	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
35	Circuito alumbrado interior 4	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	GENERAL ALUMBRADO CT2	Monofásica	230	0,60	1,08	0,59	1,06	0,98	4,70	11,48	1,8
36	Unidad control local	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	PRINCIPAL C.A. CT2	Monofásica	230	0,3	0,3	0,29	0,29	0,95	1,30	18,19	1
37	Alumbrado emergencia sala control	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	PRINCIPAL C.A. CT2	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
38	Calefacción 89 acoplamiento	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	PRINCIPAL C.A. CT2	Monofásica	230	4	4	4,00	4,00	1	17,39	0,00	1

CARGAS NO CRÍTICAS													
#Carga	Descripción	Ubicación	Cuadro	Tipo de carga	U (V)	S(kVA)	S _{diseño} (kVA)	P (kW)	P _{diseño} (kVA)	fdp	I (A)	∠ (°)	FU
39	Calefacción 52 acoplamiento	CENTRO TRANSFORMACIÓN 2	PRINCIPAL C.A. CT2	Monofásica	230	4,8	4,8	4,80	4,80	1	20,87	0,00	1
40	Centro de Control de Subestación	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1,00	0,22	0,00	1
41	Armario Telecomunicaciones líneas	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	1,5	1,5	1,50	1,50	1,00	6,52	0,00	1
42	Armario FO multimodo	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,4	0,4	0,40	0,40	1,00	1,74	0,00	1
43	Armario FO monomodo	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,4	0,4	0,40	0,40	1,00	1,74	0,00	1
44	Centralita de incendios	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	2	2	1,96	1,96	0,98	8,70	11,48	1
45	Unidad de climatización	CASETA TELECONTROL	CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	6	6	5,40	5,40	0,90	26,09	25,84	1
46	Armario telecomunicaciones	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	1,5	1,5	1,43	1,43	0,95	6,52	18,19	1
47	Unidad de control	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,4	0,4	0,40	0,40	0,99	1,74	8,11	1
48	Centralita de incendios y anti-intrusismo	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	2	2	1,90	1,90	0,95	8,70	18,19	1
49	Unidad climatización	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
50	Circuito alumbrado interior	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
51	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
52	Circuito alumbrado exterior	CASETA TELECONTROL	CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
53	ULC CR-1	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
54	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
55	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
56	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
57	Unidad climatización	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
58	Iluminación bastidor protección pos 1	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
59	Circuito fuerza CR-1	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
60	Calefacción caja tensiones pos 1	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
61	Calefacción caja intensidades pos 1	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
62	Calefacción 57-14	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
63	Calefacción 89-13	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
64	Calefacción 89-12	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
65	Calefacción 89-11	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
66	Calefacción 52-10	CASETA RELÉS 1	CUADRO SSAA C.A. CR-1	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
67	ULC CR-2	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
68	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
69	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
70	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
71	Unidad climatización	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
72	Iluminación bastidor protección pos 2	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
73	Circuito fuerza CR-2	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
74	Calefacción caja tensiones pos 2	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
75	Calefacción caja intensidades pos 2	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
76	Calefacción 57-24	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1

CARGAS NO CRÍTICAS													
#Carga	Descripción	Ubicación	Cuadro	Tipo de carga	U (V)	S(kVA)	S _{diseño} (kVA)	P (kW)	P _{diseño} (kVA)	f _{dp}	I _I (A)	∠ (°)	FU
77	Calefacción 89-23	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
78	Calefacción 89-22	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
79	Calefacción 89-21	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
80	Calefacción 52-20	CASETA RELÉS 2	CUADRO SSAA C.A. CR-2	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
81	Rectificador baterías 125Vcc control 1	CASETA RELÉS 2	SISTEMA 125 Vcc CR-2	Trifásica	400	30,00	15,00	27	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
82	Rectificador baterías 125Vcc control 2	CASETA RELÉS 2	SISTEMA 125 Vcc CR-2	Trifásica	400	30,00	15,00	27,00	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
83	ULC CR-3	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
84	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
85	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
86	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
87	Unidad climatización	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
88	Iluminación bastidor protección pos 3	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
89	Circuito fuerza CR-3	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
90	Calefacción caja tensiones pos 3	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
91	Calefacción caja intensidades pos 3	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
92	Calefacción 57-34	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
93	Calefacción 89-33	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
94	Calefacción 89-32	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
95	Calefacción 89-31	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
96	Calefacción 52-30	CASETA RELÉS 3	CUADRO SSAA C.A. CR-3	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
97	ULC CR-4	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
98	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
99	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
100	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
101	Unidad climatización	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
102	Iluminación bastidor protección pos 4	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
103	Circuito fuerza CR-4	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
104	Calefacción caja tensiones pos 4	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
105	Calefacción caja intensidades pos 4	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
106	Calefacción 57-44	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
107	Calefacción 89-43	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
108	Calefacción 89-42	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
109	Calefacción 89-41	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
110	Calefacción 52-40	CASETA RELÉS 4	CUADRO SSAA C.A. CR-4	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
111	ULC CR-5	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
112	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
113	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
114	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1

CARGAS NO CRÍTICAS													
#Carga	Descripción	Ubicación	Cuadro	Tipo de carga	U (V)	S(kVA)	S _{diseño} (kVA)	P (kW)	P _{diseño} (kVA)	f _{dp}	I _I (A)	∠ (°)	FU
115	Unidad climatización	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
116	Iluminación bastidor protección pos 5	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
117	Circuito fuerza CR-5	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
118	Calefacción caja tensiones pos 5	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
119	Calefacción caja intensidades pos 5	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
120	Calefacción 57-54	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
121	Calefacción 89-53	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
122	Calefacción 89-52	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
123	Calefacción 89-51	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
124	Calefacción 52-50	CASETA RELÉS 5	CUADRO SSAA C.A. CR-5	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
125	Rectificador baterías 125Vcc control 1	CASETA RELÉS 5	SISTEMA 125 Vcc CR-5	Trifásica	400	30,00	15,00	27	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
126	Rectificador baterías 125Vcc control 2	CASETA RELÉS 5	SISTEMA 125 Vcc CR-5	Trifásica	400	30,00	15,00	27,00	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
127	ULC CR-6	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
128	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
129	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
130	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
131	Unidad climatización	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
132	Iluminación bastidor protección pos 6	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
133	Circuito fuerza CR-6	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
134	Calefacción caja tensiones pos 6	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
135	Calefacción caja intensidades pos 6	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
136	Calefacción 57-64	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
137	Calefacción 89-63	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
138	Calefacción 89-62	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
139	Calefacción 89-61	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
140	Calefacción 52-60	CASETA RELÉS 6	CUADRO SSAA C.A. CR-6	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
141	ULC CR-7	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
142	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
143	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
144	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
145	Unidad climatización	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
146	Iluminación bastidor protección pos 7	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
147	Circuito fuerza CR-7	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
148	Calefacción caja tensiones pos 7	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
149	Calefacción caja intensidades pos 7	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
150	Calefacción 57-74	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
151	Calefacción 89-73	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
152	Calefacción 89-72	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1

CARGAS NO CRÍTICAS													
#Carga	Descripción	Ubicación	Cuadro	Tipo de carga	U (V)	S(kVA)	S _{diseño} (kVA)	P (kW)	P _{diseño} (kVA)	f _{dp}	I _I (A)	∠ (°)	FU
153	Calefacción 89-71	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
154	Calefacción 52-70	CASETA RELÉS 7	CUADRO SSAA C.A. CR-7	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
155	ULC CR-8	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
156	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
157	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
158	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
159	Unidad climatización	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
160	Iluminación bastidor protección pos 8	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
161	Circuito fuerza CR-8	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
162	Calefacción caja tensiones pos 8	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
163	Calefacción caja intensidades pos 8	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
164	Calefacción 57-84	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
165	Calefacción 89-83	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
166	Calefacción 89-82	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
167	Calefacción 89-81	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
168	Calefacción 52-80	CASETA RELÉS 8	CUADRO SSAA C.A. CR-8	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
169	ULC CR-9	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
170	Circuito alumbrado exterior	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
171	Circuito alumbrado emergencia interior	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,1	0,1	0,10	0,10	0,98	0,43	11,48	1
172	Circuito alumbrado interior	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,4	0,4	0,39	0,39	0,98	1,74	11,48	1
173	Unidad climatización	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	12	12	10,80	10,80	0,9	52,17	25,84	1
174	Iluminación bastidor protección pos 9	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,2	0,2	0,20	0,20	0,98	0,87	11,48	1
175	Circuito fuerza CR-9	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	2	2	1,80	1,80	0,9	8,70	25,84	1
176	Calefacción caja tensiones pos 9	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
177	Calefacción caja intensidades pos 9	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
178	Calefacción 57-94	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
179	Calefacción 89-93	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
180	Calefacción 89-92	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
181	Calefacción 89-91	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,05	0,05	0,05	0,05	1	0,22	0,00	1
182	Calefacción 52-90	CASETA RELÉS 9	CUADRO SSAA C.A. CR-9	Monofásica	230	0,18	0,18	0,18	0,18	1	0,78	0,00	1
183	Rectificador baterías 125Vcc control 2	CASETA RELÉS 9	SISTEMA 125 Vcc CR-9	Trifásica	400	30,00	15,00	27	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
184	Rectificador baterías 125Vcc control 1	CASETA RELÉS 9	SISTEMA 125 Vcc CR-9	Trifásica	400	30,00	15,00	27,00	13,50	0,90	21,65	25,84	0,5
185	Alumbrado cuadros de C.C	CASETA RELÉS 9	SISTEMA 125 Vcc CR-9	Monofásica	230	0,08	0,08	0,08	0,08	0,98	0,35	11,48	1
186	Circuitos control PDB 1	CASETA RELÉS 9	SISTEMA 125 Vcc CR-9	Monofásica	230	0,65	0,65	0,62	0,62	0,95	2,83	18,19	1
187	Circuitos control PDB 2	CASETA RELÉS 9	SISTEMA 125 Vcc CR-9	Monofásica	230	0,65	0,65	0,62	0,62	0,95	2,83	18,19	1

Anejo II. EQUILIBRADO DE CARGAS DE CA

En este anejo se detalla el reparto de las cargas monofásicas entre las tres fases del sistema de baja tensión, con el objetivo de minimizar el desequilibrio entre fases y, en consecuencia, la corriente que circula por el conductor neutro. Cada carga se identifica mediante su número (#Carga), que permite enlazar esta tabla con el inventario recogido en el Anejo I. Las cargas trifásicas reparten su consumo por igual entre las tres fases, mientras que cada carga monofásica se asigna a una única fase.

Las intensidades empleadas corresponden a las obtenidas tras aplicar los factores de utilización indicados en el inventario, de modo que el equilibrado parte de una estimación realista de la demanda. Dado que cada carga presenta un ángulo de fase φ asociado a su factor de potencia, la corriente de cada fase no puede obtenerse como suma aritmética de los módulos, sino como suma vectorial de las aportaciones individuales. Por ello, la tabla recoge la intensidad de cada carga descompuesta en sus componentes real e imaginaria, y los totales de cada fase se calculan sumando dichas componentes.

Al pie de la tabla se indican las corrientes totales resultantes en cada fase (I_a , I_b , I_c), expresadas en sus componentes y en módulo, así como la corriente de neutro, calculada como la suma vectorial de las tres corrientes de fase. El valor de la corriente de neutro constituye el indicador del grado de equilibrio alcanzado: cuanto más próximo a cero, más equilibrado resulta el reparto. El reparto adoptado se ha ajustado de forma iterativa hasta aproximar al máximo las tres corrientes de fase entre sí.

CARGAS NO CRÍTICAS											
#Carga	Descripción	$\bar{I}_A$	Re	Im	$\bar{I}_B$	Re3	Im4	$\bar{I}_C$	Re6	Im7	Fase
1	ACS	0,0	0,00	0,00	-7,1739-12,4256i	-7,17	-12,43	0,0	0,00	0,00	B
2	Impresora	0,4565+0,4657i	0,46	0,47	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
3	HMI 1	1,1739+0,5686i	1,17	0,57	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
4	Fuerza almacén	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
5	Alumbrado almacén	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
6	Circuito alumbrado exterior 7	0,0	0,00	0,00	-3,7291-11,1311i	-3,73	-11,13	0,0	0,00	0,00	B
7	Circuito alumbrado exterior 6	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
8	Circuito alumbrado exterior 5	0,0	0,00	0,00	-3,7291-11,1311i	-3,73	-11,13	0,0	0,00	0,00	B
9	Circuito alumbrado exterior 4	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
10	Circuito alumbrado exterior 3	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
11	Circuito alumbrado exterior 2	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
12	Circuito alumbrado exterior 1	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
13	Circuito alumbrado interior 3	4,6017+0,9344i	4,60	0,93	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
14	Circuito alumbrado interior 2	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-3,1101+3,518i	-3,11	3,52	C
15	Circuito alumbrado interior 1	0,0	0,00	0,00	-1,4916-4,4524i	-1,49	-4,45	0,0	0,00	0,00	B
16	Control alumbrado sala control	0,413+0,1358i	0,41	0,14	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
17	Alumbrado sala control	2,1304+0,4326i	2,13	0,43	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
18	Servicio de fuerza sala control	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-5,7595+6,5148i	-5,76	6,51	C
19	Acondicionamiento sala control	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-12,9638+11,593i	-12,96	11,59	C
20	Alumbrado general de subestación	12,2687+7,6035i	12,27	7,60	0,4504-14,4267i	0,45	-14,43	-12,7191+6,8233i	-12,72	6,82	ABC
21	Alimentación auxiliar GE	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-9,7228+8,6948i	-9,72	8,69	C
22	Fuerza aseos	3,913+1,8952i	3,91	1,90	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
23	Alumbrado aseos	0,0	0,00	0,00	-0,6906-2,0613i	-0,69	-2,06	0,0	0,00	0,00	B
24	Radiador aseos	0,0	0,00	0,00	-2,7174-4,7067i	-2,72	-4,71	0,0	0,00	0,00	B
25	HMI 2	0,0	0,00	0,00	-0,0946-1,3009i	-0,09	-1,30	0,0	0,00	0,00	B
26	Circuito alumbrado exterior 14	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
27	Circuito alumbrado exterior 13	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-7,7753+8,795i	-7,78	8,80	C
28	Circuito alumbrado exterior 12	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
29	Circuito alumbrado exterior 11	11,5043+2,3361i	11,50	2,34	-3,7291-11,1311i	-3,73	-11,13	-7,7753+8,795i	-7,78	8,80	ABC
30	Circuito alumbrado exterior 10	0,0	0,00	0,00	-3,7291-11,1311i	-3,73	-11,13	0,0	0,00	0,00	B
31	Circuito alumbrado exterior 9	0,0	0,00	0,00	-3,7291-11,1311i	-3,73	-11,13	0,0	0,00	0,00	B
32	Circuito alumbrado exterior 8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-7,7753+8,795i	-7,78	8,80	C
33	Circuito alumbrado interior 6	0,0	0,00	0,00	-1,4916-4,4524i	-1,49	-4,45	0,0	0,00	0,00	B
34	Circuito alumbrado interior 5	0,0	0,00	0,00	-1,4916-4,4524i	-1,49	-4,45	0,0	0,00	0,00	B
35	Circuito alumbrado interior 4	0,0	0,00	0,00	-1,4916-4,4524i	-1,49	-4,45	0,0	0,00	0,00	B
36	Unidad control local	0,0	0,00	0,00	-0,2668-1,2768i	-0,27	-1,28	0,0	0,00	0,00	B
37	Alumbrado emergencia sala control	0,0	0,00	0,00	-0,2762-0,8245i	-0,28	-0,82	0,0	0,00	0,00	B

CARGAS NO CRÍTICAS											
#Carga	Descripción	$\bar{I}_A$	Re	Im	$\bar{I}_B$	Re3	Im4	$\bar{I}_C$	Re6	Im7	Fase
38	Calefacción 89 acoplamiento	17,3913	17,39	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
39	Calefacción 52 acoplamiento	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-10,4348+18,0736i	-10,43	18,07	C
40	Centro de Control de Subestación	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
41	Armario Telecomunicaciones líneas	6,5217	6,52	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
42	Armario FO multimodo	0,0	0,00	0,00	-0,8696-1,5061i	-0,87	-1,51	0,0	0,00	0,00	B
43	Armario FO monomodo	1,7391	1,74	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
44	Centralita de incendios	8,5217+1,7304i	8,52	1,73	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
45	Unidad de climatización	23,4783+11,371i	23,48	11,37	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
46	Armario telecomunicaciones	0,0	0,00	0,00	-1,3342-6,3838i	-1,33	-6,38	0,0	0,00	0,00	B
47	Unidad de control	1,7217+0,2453i	1,72	0,25	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
48	Centralita de incendios y anti-intrusismo	0,0	0,00	0,00	-1,779-8,5117i	-1,78	-8,51	0,0	0,00	0,00	B
49	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	-3,783-52,0366i	-3,78	-52,04	0,0	0,00	0,00	B
50	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
51	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	-0,1381-0,4123i	-0,14	-0,41	0,0	0,00	0,00	B
52	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
53	ULC CR-1	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
54	Circuito alumbrado exterior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
55	Circuito alumbrado emergencia interior	0,4261+0,0865i	0,43	0,09	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
56	Circuito alumbrado interior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
57	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-43,1735+29,2945i	-43,17	29,29	C
58	Iluminación bastidor protección pos 1	0,8522+0,173i	0,85	0,17	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
59	Circuito fuerza CR-1	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
60	Calefacción caja tensiones pos 1	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
61	Calefacción caja intensidades pos 1	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
62	Calefacción 57-14	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
63	Calefacción 89-13	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
64	Calefacción 89-12	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
65	Calefacción 89-11	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
66	Calefacción 52-10	0,7826	0,78	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
67	ULC CR-2	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
68	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
69	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	-0,1381-0,4123i	-0,14	-0,41	0,0	0,00	0,00	B
70	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
71	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-43,1735+29,2945i	-43,17	29,29	C
72	Iluminación bastidor protección pos 2	0,8522+0,173i	0,85	0,17	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
73	Circuito fuerza CR-2	7,8261+3,7903i	7,83	3,79	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
74	Calefacción caja tensiones pos 2	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
75	Calefacción caja intensidades pos 2	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B

CARGAS NO CRÍTICAS											
#Carga	Descripción	$\bar{I}_A$	Re	Im	$\bar{I}_B$	Re3	Im4	$\bar{I}_C$	Re6	Im7	Fase
76	Calefacción 57-24	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
77	Calefacción 89-23	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
78	Calefacción 89-22	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
79	Calefacción 89-21	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
80	Calefacción 52-20	0,0	0,00	0,00	-0,3913-0,6778i	-0,39	-0,68	0,0	0,00	0,00	B
81	Rectificador baterías 125Vcc control 1	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
82	Rectificador baterías 125Vcc control 2	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
83	ULC CR-3	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
84	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
85	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,288+0,3257i	-0,29	0,33	C
86	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
87	Unidad climatización	46,9565+22,7421i	46,96	22,74	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
88	Iluminación bastidor protección pos 3	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,5759+0,6515i	-0,58	0,65	C
89	Circuito fuerza CR-3	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
90	Calefacción caja tensiones pos 3	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
91	Calefacción caja intensidades pos 3	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
92	Calefacción 57-34	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
93	Calefacción 89-33	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
94	Calefacción 89-32	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
95	Calefacción 89-31	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
96	Calefacción 52-30	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,3913+0,6778i	-0,39	0,68	C
97	ULC CR-4	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
98	Circuito alumbrado exterior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
99	Circuito alumbrado emergencia interior	0,4261+0,0865i	0,43	0,09	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
100	Circuito alumbrado interior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
101	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-43,1735+29,2945i	-43,17	29,29	C
102	Iluminación bastidor protección pos 4	0,8522+0,173i	0,85	0,17	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
103	Circuito fuerza CR-4	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
104	Calefacción caja tensiones pos 4	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
105	Calefacción caja intensidades pos 4	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
106	Calefacción 57-44	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
107	Calefacción 89-43	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
108	Calefacción 89-42	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
109	Calefacción 89-41	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
110	Calefacción 52-40	0,7826	0,78	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
111	ULC CR-5	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
112	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
113	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,288+0,3257i	-0,29	0,33	C

CARGAS NO CRÍTICAS											
#Carga	Descripción	$\bar{I}_A$	Re	Im	$\bar{I}_B$	Re3	Im4	$\bar{I}_C$	Re6	Im7	Fase
114	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
115	Unidad climatización	46,9565+22,7421i	46,96	22,74	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
116	Iluminación bastidor protección pos 5	0,0	0,00	0,00	-0,2762-0,8245i	-0,28	-0,82	0,0	0,00	0,00	B
117	Circuito fuerza CR-5	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
118	Calefacción caja tensiones pos 5	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
119	Calefacción caja intensidades pos 5	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
120	Calefacción 57-54	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
121	Calefacción 89-53	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
122	Calefacción 89-52	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
123	Calefacción 89-51	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
124	Calefacción 52-50	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,3913+0,6778i	-0,39	0,68	C
125	Rectificador baterías 125Vcc control 1	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
126	Rectificador baterías 125Vcc control 2	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
127	ULC CR-6	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
128	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
129	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	-0,1381-0,4123i	-0,14	-0,41	0,0	0,00	0,00	B
130	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	-0,5525-1,649i	-0,55	-1,65	0,0	0,00	0,00	B
131	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-43,1735+29,2945i	-43,17	29,29	C
132	Iluminación bastidor protección pos 6	0,0	0,00	0,00	-0,2762-0,8245i	-0,28	-0,82	0,0	0,00	0,00	B
133	Circuito fuerza CR-6	7,8261+3,7903i	7,83	3,79	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
134	Calefacción caja tensiones pos 6	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
135	Calefacción caja intensidades pos 6	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
136	Calefacción 57-64	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
137	Calefacción 89-63	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
138	Calefacción 89-62	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
139	Calefacción 89-61	0,0	0,00	0,00	-0,1087-0,1883i	-0,11	-0,19	0,0	0,00	0,00	B
140	Calefacción 52-60	0,0	0,00	0,00	-0,3913-0,6778i	-0,39	-0,68	0,0	0,00	0,00	B
141	ULC CR-7	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
142	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
143	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,288+0,3257i	-0,29	0,33	C
144	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
145	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	-3,783-52,0366i	-3,78	-52,04	0,0	0,00	0,00	B
146	Iluminación bastidor protección pos 7	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,5759+0,6515i	-0,58	0,65	C
147	Circuito fuerza CR-7	7,8261+3,7903i	7,83	3,79	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
148	Calefacción caja tensiones pos 7	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
149	Calefacción caja intensidades pos 7	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
150	Calefacción 57-74	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
151	Calefacción 89-73	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C

CARGAS NO CRÍTICAS											
#Carga	Descripción	$\bar{I}_A$	Re	Im	$\bar{I}_B$	Re3	Im4	$\bar{I}_C$	Re6	Im7	Fase
152	Calefacción 89-72	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
153	Calefacción 89-71	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
154	Calefacción 52-70	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,3913+0,6778i	-0,39	0,68	C
155	ULC CR-8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
156	Circuito alumbrado exterior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
157	Circuito alumbrado emergencia interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,288+0,3257i	-0,29	0,33	C
158	Circuito alumbrado interior	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-1,1519+1,303i	-1,15	1,30	C
159	Unidad climatización	46,9565+22,7421i	46,96	22,74	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
160	Iluminación bastidor protección pos 8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,5759+0,6515i	-0,58	0,65	C
161	Circuito fuerza CR-8	0,0	0,00	0,00	-0,6305-8,6728i	-0,63	-8,67	0,0	0,00	0,00	B
162	Calefacción caja tensiones pos 8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
163	Calefacción caja intensidades pos 8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
164	Calefacción 57-84	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
165	Calefacción 89-83	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
166	Calefacción 89-82	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
167	Calefacción 89-81	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
168	Calefacción 52-80	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,3913+0,6778i	-0,39	0,68	C
169	ULC CR-9	0,2174	0,22	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
170	Circuito alumbrado exterior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
171	Circuito alumbrado emergencia interior	0,4261+0,0865i	0,43	0,09	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
172	Circuito alumbrado interior	1,7043+0,3461i	1,70	0,35	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	A
173	Unidad climatización	0,0	0,00	0,00	-3,783-52,0366i	-3,78	-52,04	0,0	0,00	0,00	B
174	Iluminación bastidor protección pos 9	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,5759+0,6515i	-0,58	0,65	C
175	Circuito fuerza CR-9	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-7,1956+4,8824i	-7,20	4,88	C
176	Calefacción caja tensiones pos 9	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
177	Calefacción caja intensidades pos 9	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
178	Calefacción 57-94	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
179	Calefacción 89-93	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
180	Calefacción 89-92	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
181	Calefacción 89-91	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,1087+0,1883i	-0,11	0,19	C
182	Calefacción 52-90	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,3913+0,6778i	-0,39	0,68	C
183	Rectificador baterías 125Vcc control 2	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
184	Rectificador baterías 125Vcc control 1	19,4856+9,4373i	19,49	9,44	-1,5699-21,5936i	-1,57	-21,59	-17,9157+12,1564i	-17,92	12,16	ABC
185	Alumbrado cuadros de C.C	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-0,2304+0,2606i	-0,23	0,26	C
186	Circuitos control PDB 1	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-2,1066+1,8839i	-2,11	1,88	C
187	Circuitos control PDB 2	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	-2,1066+1,8839i	-2,11	1,88	C

INTENSIDADES					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	476,949	183,147	476,949+183,147i	510,90	21,01
Ib	-71,054	-483,018	-71,054-483,018i	488,22	-98,37
Ic	-388,078	304,565	-388,078+304,565i	493,32	141,88
In	17,817	4,695	17,817+4,695i	18,43	14,76

INTENSIDADES CT1					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	78,566	21,821	78,566+21,821i	81,54	15,52
Ib	-16,856	-63,889	-16,856-63,889i	66,08	-104,78
Ic	-44,275	37,144	-44,275+37,144i	57,79	140,01
In	17,434	-4,924	17,434-4,924i	18,12	-15,77

INTENSIDADES CT2					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	55,817	8,904	55,817+8,904i	56,52	9,06
Ib	-19,708	-56,921	-19,708-56,921i	60,24	-109,10
Ic	-33,761	44,459	-33,761+44,459i	55,82	127,21
In	2,349	-3,559	2,349-3,559i	4,26	-56,57

INTENSIDADES CR1					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	6,991	0,952	6,991+0,952i	7,06	7,75
Ib	-0,631	-8,673	-0,631-8,673i	8,70	-94,16
Ic	-43,174	29,295	-43,174+29,295i	52,17	145,84
In	-36,813	21,573	-36,813+21,573i	42,67	149,63

INTENSIDADES CR2					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	47,867	22,838	47,867+22,838i	53,04	25,51
Ib	-5,426	-48,705	-5,426-48,705i	49,01	-96,36
Ic	-79,005	53,607	-79,005+53,607i	95,48	145,84
In	-36,564	27,740	-36,564+27,74i	45,90	142,81

INTENSIDADES CR3					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	46,957	22,742	46,957+22,742i	52,17	25,84
Ib	-0,631	-8,673	-0,631-8,673i	8,70	-94,16
Ic	-4,320	5,579	-4,32+5,579i	7,06	127,75
In	42,006	19,648	42,006+19,648i	46,37	25,07

INTENSIDADES CR4					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	6,991	0,952	6,991+0,952i	7,06	7,75
Ib	-0,631	-8,673	-0,631-8,673i	8,70	-94,16
Ic	-43,174	29,295	-43,174+29,295i	52,17	145,84
In	-36,813	21,573	-36,813+21,573i	42,67	149,63

INTENSIDADES CR5					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	85,928	41,617	85,928+41,617i	95,48	25,84
Ib	-4,155	-52,873	-4,155-52,873i	53,04	-94,49
Ic	-39,467	29,052	-39,467+29,052i	49,01	143,64
In	42,306	17,796	42,306+17,796i	45,90	22,81

INTENSIDADES CR6					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	< (°)
Ia	7,826	3,790	7,826+3,79i	8,70	25,84
Ib	-2,672	-6,531	-2,672-6,531i	7,06	-112,25
Ic	-43,174	29,295	-43,174+29,295i	52,17	145,84
In	-38,019	26,554	-38,019+26,554i	46,37	145,07

POTENCIAS			n=1,1
P (kW)	314,446		345,89038
S (kVA)	341,580		375,738

POTENCIAS CT1		
S (kVA)	47,890	168,940
P (kW)	45,259	155,518

POTENCIAS CT2		
S (kVA)	34,490	172,640
P (kW)	33,888	158,928

POTENCIAS Cteleco	
S (kVA)	27,150
P (kW)	25,113

POTENCIAS CR1	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR2	
S (kVA)	45,630
P (kW)	41,208

POTENCIAS CR3	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR4	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR5	
S (kVA)	45,630
P (kW)	41,208

POTENCIAS CR6	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR7	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR8	
S (kVA)	15,630
P (kW)	14,208

POTENCIAS CR9	
S (kVA)	47,010
P (kW)	42,521

INTENSIDADES CR7					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	$< (^{\circ})$
Ia	7,826	3,790	7,826+3,79i	8,70	25,84
Ib	-3,783	-52,037	-3,783-52,037i	52,17	-94,16
Ic	-4,320	5,579	-4,32+5,579i	7,06	127,75
In	-0,277	-42,667	-0,277-42,667i	42,67	-90,37

INTENSIDADES CR8					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	$< (^{\circ})$
Ia	46,957	22,742	46,957+22,742i	52,17	25,84
Ib	-0,631	-8,673	-0,631-8,673i	8,70	-94,16
Ic	-4,320	5,579	-4,32+5,579i	7,06	127,75
In	42,006	19,648	42,006+19,648i	46,37	25,07

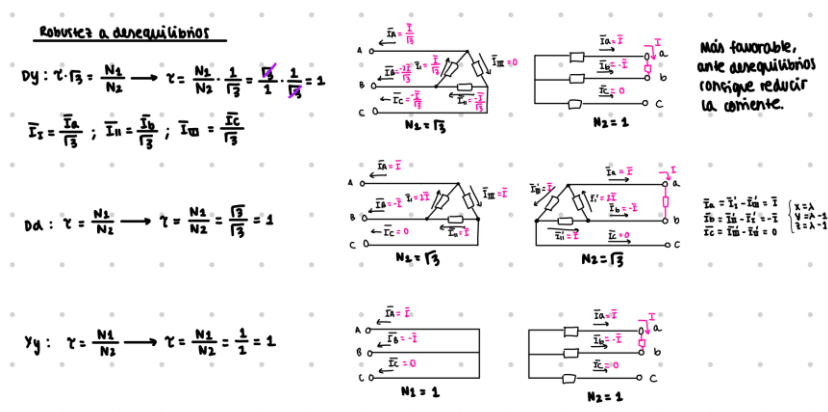
INTENSIDADES CR9					
	Re	Im	$\bar{I}$ (A)	$ $	$< (^{\circ})$
Ia	43,023	19,653	43,023+19,653i	47,30	24,55
Ib	-6,923	-95,224	-6,923-95,224i	95,48	-94,16
Ic	-49,090	35,683	-49,09+35,683i	60,69	143,99
In	-12,990	-39,888	-12,99-39,888i	41,95	-108,04

Anejo III. ROBUSTEZ ANTE DESEQUILIBRIOS

En este anejo se recoge el desarrollo del análisis comparativo de las distintas configuraciones de conexión del transformador auxiliar frente al desequilibrio de cargas, cuyo resultado se resume en el Capítulo 5. Dado el elevado número de cargas monofásicas presentes en los servicios auxiliares, el comportamiento del transformador ante desequilibrios constituye un criterio determinante para la selección de su conexión.

Para cada una de las configuraciones consideradas —triángulo-triángulo (Dd), estrella-estrella (Yy) y triángulo-estrella con neutro (Dyn)— se analiza el camino que siguen las corrientes asociadas al desequilibrio entre fases y su transmisión hacia el primario. El estudio parte de la descomposición de las corrientes desequilibradas y evalúa, en cada caso, la capacidad de la conexión para confinar dichas corrientes y limitar su repercusión sobre la red de media tensión, así como la disponibilidad de neutro en el lado de baja tensión.

A partir de este análisis se justifica la elección de la conexión Dyn adoptada en el proyecto, que combina la existencia de un devanado en triángulo —que ofrece un camino cerrado a las corrientes de desequilibrio y atenúa su transmisión al primario— con la disponibilidad de neutro en el secundario en estrella, necesaria para alimentar las cargas monofásicas a 230 V.



Anejo IV. CAÍDAS DE TENSIÓN EN CABLES

PRINCIPALES DE ALIMENTACIÓN

En este anejo se recoge el cálculo de las caídas de tensión en los cables principales de alimentación que conforman el anillo de baja tensión, desde la salida del transformador auxiliar hasta cada uno de los cuadros de las casetas. Para cada tramo se indican su longitud, la sección adoptada y los parámetros eléctricos del conductor (resistencia y reactancia por unidad de longitud), obtenidos del catálogo comercial del cable seleccionado.

La caída de tensión de cada tramo se calcula a partir de la intensidad que circula por él en el caso más desfavorable de explotación, considerando la configuración en anillo y la posibilidad de alimentación desde cualquiera de los transformadores auxiliares ante una contingencia. La tabla recoge la caída de tensión parcial de cada tramo y la caída acumulada a lo largo del recorrido, expresada tanto en voltios como en porcentaje sobre la tensión nominal. Estos valores permiten verificar el cumplimiento del límite reglamentario establecido en la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión [MINI02] para los usos distintos del alumbrado.

Lineas generales de alimentación																
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	Corriente diseño escalada (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (V)	ΔV acumulada (%)
Transformador Auxiliar 1	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	5,99	400	493,0283	577,3503	0,9206	0,3906	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,603	0,151	0,603	0,151
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	0,5	400	484,1515	566,9553	0,9199	0,3920	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,049	0,012	0,653	0,163
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	Cuadro TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	10	400	452,1952	529,5335	0,9157	0,4018	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,927	0,232	1,580	0,395
Cuadro TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Cuadro SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	0,5	400	437,2562	512,0396	0,9149	0,4036	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,045	0,011	1,625	0,406
Cuadro SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Cuadro SSAA C.A. CR-9	22,5	400	413,0075	483,6437	0,9148	0,4038	300	615	SI	0,0817	0,0654	1,906	0,477	3,531	0,883
Cuadro SSAA C.A. CR-9	Cuadro SSAA C.A. CR-8	79,5	400	345,1544	404,1858	0,9169	0,3992	300	615	SI	0,0817	0,0654	5,621	1,405	9,152	2,288
Cuadro SSAA C.A. CR-8	Cuadro SSAA C.A. CR-7	42	400	322,5945	377,7674	0,9174	0,3980	300	615	SI	0,0817	0,0654	2,775	0,694	11,927	2,982
Cuadro SSAA C.A. CR-7	Cuadro SSAA C.A. CR-6	3,5	400	300,0345	351,3490	0,9180	0,3965	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,215	0,054	12,142	3,035
Cuadro SSAA C.A. CR-6	Cuadro SSAA C.A. CR-5	78,5	400	277,4745	324,9307	0,9188	0,3948	300	615	SI	0,0817	0,0654	4,456	1,114	16,598	4,150
Cuadro SSAA C.A. CR-5	Cuadro SSAA C.A. CR-4	23,5	400	211,6133	247,8053	0,9236	0,3833	300	615	SI	0,0817	0,0654	1,014	0,253	17,612	4,403
Cuadro SSAA C.A. CR-4	Cuadro SSAA C.A. CR-3	27	400	189,0533	221,3869	0,9254	0,3790	300	615	SI	0,0817	0,0654	1,039	0,260	18,651	4,663
Cuadro SSAA C.A. CR-3	Cuadro SSAA C.A. CR-2	36,5	400	166,4934	194,9685	0,9276	0,3736	300	615	SI	0,0817	0,0654	1,235	0,309	19,886	4,972
Cuadro SSAA C.A. CR-2	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	51	400	100,6322	117,8431	0,9436	0,3309	300	615	SI	0,0817	0,0654	1,028	0,257	20,914	5,228
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	Transformador Auxiliar 2	3,49	400	87,2088	102,1240	0,9353	0,3539	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,061	0,015	20,975	5,244
Transformador Auxiliar 2	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	3,49	400	87,2088	102,1240	0,9353	0,3539	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,061	0,015	21,037	5,259
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	0,5	400	82,8065	96,9687	0,9343	0,3565	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,008	0,002	21,045	5,261
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	Cuadro SSAA C.A. CR-1	42,5	400	50,8501	59,5470	0,9056	0,4242	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,446	0,111	21,491	5,373
Cuadro SSAA C.A. CR-1	Cuadro TELECO C.A. CT1	33,5	400	28,2902	33,1286	0,9028	0,4300	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,196	0,049	21,687	5,422
Cuadro TELECO C.A. CT1	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	0,5	400	23,9600	28,0579	0,8943	0,4475	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,002	0,001	21,689	5,422
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	Transformador Auxiliar 1	5,99	400	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	300	615	SI	0,0817	0,0654	0,000	0,000	21,689	5,422

Lineas generales de alimentación									
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	I diseño caso normal (A)	cosΦ	senΦ	ΔV normal (V)	ΔV acumulada normal (V)	ΔV acumulada normal (%)
Transformador Auxiliar 1	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	5,99	400	198,930	0,923	0,385	0,208	0,208	0,052
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	0,5	400	190,462	0,922	0,388	0,017	0,224	0,056
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	Cuadro TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	10	400	159,144	0,911	0,413	0,279	0,504	0,126
Cuadro TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Cuadro SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	0,5	400	145,129	0,908	0,418	0,013	0,516	0,129
Cuadro SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Cuadro SSAA C.A. CR-9	22,5	400	122,897	0,907	0,422	0,487	1,003	0,251
Cuadro SSAA C.A. CR-9	Cuadro SSAA C.A. CR-8	79,5	400	61,522	0,909	0,417	0,860	1,863	0,466
Cuadro SSAA C.A. CR-8	Cuadro SSAA C.A. CR-7	42	400	41,015	0,909	0,417	0,303	2,166	0,541
Cuadro SSAA C.A. CR-7	Cuadro SSAA C.A. CR-6	3,5	400	20,507	0,909	0,417	0,013	2,179	0,545
Cuadro SSAA C.A. CR-6	Cuadro SSAA C.A. CR-5	0	—	—	—	—	—	—	—
Cuadro SSAA C.A. CR-5	Cuadro SSAA C.A. CR-4	23,5	400	59,479	0,903	0,429	0,247	2,818	0,704
Cuadro SSAA C.A. CR-4	Cuadro SSAA C.A. CR-3	27	400	79,986	0,905	0,426	0,381	2,571	0,643
Cuadro SSAA C.A. CR-3	Cuadro SSAA C.A. CR-2	36,5	400	100,494	0,906	0,424	0,646	2,191	0,548
Cuadro SSAA C.A. CR-2	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	51	400	159,972	0,905	0,426	1,438	1,544	0,386
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	Transformador Auxiliar 2	3,49	400	173,368	0,911	0,412	0,106	0,106	0,027
Transformador Auxiliar 2	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	3,49	400	56,025	0,951	0,310	0,033	0,033	0,008
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	0,5	400	51,825	0,951	0,310	0,004	0,038	0,009
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	Cuadro SSAA C.A. CR-1	42,5	400	20,507	0,909	0,417	0,153	0,191	0,048
Cuadro SSAA C.A. CR-1	Cuadro TELECO C.A. CT1	0	400	—	—	—	—	—	—
Cuadro TELECO C.A. CT1	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	0,5	400	4,114	0,950	0,312	0,000	0,027	0,007
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	Transformador Auxiliar 1	5,99	400	25,541	0,903	0,430	0,027	0,027	0,007

Anejo V. CAÍDA DE TENSIÓN EN LAS DERIVACIONES INDIVIDUALES

En este anejo se detalla el cálculo de la caída de tensión en las derivaciones individuales, es decir, en los circuitos interiores que alimentan cada carga desde el cuadro correspondiente. A diferencia de los cables principales, cada derivación alimenta directamente un único receptor, por lo que la intensidad de cálculo viene determinada por las condiciones nominales de la carga.

Para cada circuito se indican su longitud, la sección adoptada y la resistencia lineal del conductor, a partir de las cuales se obtiene la caída de tensión individual. La comprobación definitiva se realiza mediante la caída de tensión acumulada desde la salida del transformador hasta el receptor más desfavorable, sumando la contribución del cable principal y la de la derivación individual correspondiente. De este modo se verifica el cumplimiento de los límites de la ITC-BT-19 del Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión [MINI02] en el punto más exigente de la instalación.

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	ACS	6	230	14,348	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,078	0,134	0,058	0,209	0,110
DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Impresora	6	230	0,652	0,70	0,714	25	70	SI	0,78	0,624	0,008	0,003	0,154	0,055
DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	HMI 1	6	230	1,304	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,015	0,007	0,157	0,059
DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Fuerza almacén	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	0,210	0,111
DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Alumbrado almacén	8	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,025	0,011	0,162	0,063
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 7	4	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,083	0,036	0,200	0,092
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 6	4	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,083	0,036	0,200	0,092
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 5	6	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,125	0,054	0,218	0,110
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 4	6	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,125	0,054	0,218	0,110
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 3	8	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,167	0,073	0,236	0,129
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 2	8	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,167	0,073	0,236	0,129
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado exterior 1	10	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,209	0,091	0,254	0,147
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado interior 3	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	0,178	0,071
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado interior 2	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	0,178	0,071
GENERAL ALUMBRADO CT1	Circuito alumbrado interior 1	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	0,178	0,071
PRINCIPAL C.A. CT1	Control alumbrado sala control	5	230	0,435	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,004	0,002	5,424	0,009
PRINCIPAL C.A. CT1	Alumbrado sala control	5	230	2,174	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,019	0,008	5,431	0,015
PRINCIPAL C.A. CT1	Servicio de fuerza sala control	5	230	8,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,077	0,034	5,456	0,040
PRINCIPAL C.A. CT1	Acondicionamiento sala control	5	230	17,391	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,163	0,071	5,493	0,078
PRINCIPAL C.A. CT1	Alumbrado general de subestación	5	400	14,434	0,85	0,527	25	64	SI	0,78	0,624	0,124	0,031	5,453	0,038
TELECO C.A. CT1	Alimentación auxiliar GE	10	230	13,043	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,244	0,106	5,528	0,106
DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Fuerza aseos	4	230	4,348	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,034	0,015	5,274	0,023
DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Alumbrado aseos	4	230	2,174	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,015	0,007	5,266	0,015

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Radiador aseos	4	230	5,435	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,034	0,015	5,274	0,023
DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	HMI 2	6	230	1,304	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,015	0,007	5,266	0,015
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 14	6	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,125	0,054	5,316	0,064
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 13	6	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,125	0,054	5,316	0,064
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 12	6	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,125	0,054	5,316	0,064
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 11	8	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,167	0,073	5,334	0,082
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 10	8	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,167	0,073	5,334	0,082
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 9	10	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,209	0,091	5,352	0,100
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado exterior 8	10	230	11,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,209	0,091	5,352	0,100
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado interior 6	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	5,276	0,024
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado interior 5	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	5,276	0,024
GENERAL ALUMBRADO CT2	Circuito alumbrado interior 4	4	230	4,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,033	0,015	5,276	0,024
PRINCIPAL C.A. CT2	Unidad control local	5	230	1,304	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	5,234	0,391
PRINCIPAL C.A. CT2	Alumbrado emergencia sala control	5	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,008	0,003	5,232	0,389
PRINCIPAL C.A. CT2	Calefacción 89 acoplamiento	5	230	17,391	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	5,287	0,445
PRINCIPAL C.A. CT2	Calefacción 52 acoplamiento	5	230	20,870	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,163	0,071	5,299	0,457
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Centro de Control de Subestación	4	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,001	0,396	0,127
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Armario Telecomunicaciones líneas	4	230	6,522	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,041	0,018	0,413	0,144
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Armario FO multimodo	4	230	1,739	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,011	0,005	0,400	0,131
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Armario FO monomodo	4	230	1,739	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,011	0,005	0,400	0,131
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Centralita de incendios	6	230	8,696	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,093	0,040	0,435	0,166
CUADRO TELECO C.A. CASETA TELECONTROL	Unidad de climatización	6	230	26,087	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	0,528	0,258

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Armario telecomunicaciones	6	230	6,522	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,073	0,032	0,438	0,161
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Unidad de control	6	230	1,739	0,99	0,141	25	70	SI	0,78	0,624	0,018	0,008	0,414	0,137
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Centralita de incendios y anti-intrusismo	6	230	8,696	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,098	0,042	0,449	0,172
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Unidad climatización	6	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,610	0,265	0,671	0,394
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Circuito alumbrado interior	6	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,019	0,008	0,414	0,137
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Circuito alumbrado emergencia interior	6	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,005	0,002	0,408	0,131
CUADRO SSAA C.A. CASETA TELECONTROL	Circuito alumbrado exterior	6	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,019	0,008	0,414	0,137
CUADRO SSAA C.A. CR-1	ULC CR-1	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	5,373	0,048
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	5,378	0,053
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	5,373	0,048
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	5,377	0,052
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	5,505	0,180
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Iluminación bastidor protección pos 1	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	5,378	0,053
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Circuito fuerza CR-1	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	5,432	0,107
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción caja tensiones pos 1	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción caja intensidades pos 1	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción 57-14	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción 89-13	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción 89-12	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción 89-11	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	5,374	0,049
CUADRO SSAA C.A. CR-1	Calefacción 52-10	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	5,378	0,053
CUADRO SSAA C.A. CR-2	ULC CR-2	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	4,972	0,548

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,977	0,553
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	4,972	0,548
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	4,976	0,552
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	5,104	0,680
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Iluminación bastidor protección pos 2	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,977	0,553
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Circuito fuerza CR-2	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	5,030	0,607
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción caja tensiones pos 2	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción caja intensidades pos 2	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción 57-24	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción 89-23	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción 89-22	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción 89-21	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,973	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Calefacción 52-20	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,977	0,553
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Rectificador baterías 125Vcc control 1	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	5,017	0,593
CUADRO SSAA C.A. CR-2	Rectificador baterías 125Vcc control 2	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	5,017	0,593
CUADRO SSAA C.A. CR-3	ULC CR-3	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	4,663	0,643
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,668	0,648
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	4,663	0,643
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	4,667	0,647
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	4,795	0,775
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Iluminación bastidor protección pos 3	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,668	0,648
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Circuito fuerza CR-3	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	4,722	0,702

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción caja tensiones pos 3	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción caja intensidades pos 3	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción 57-34	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción 89-33	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción 89-32	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción 89-31	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,664	0,644
CUADRO SSAA C.A. CR-3	Calefacción 52-30	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,668	0,648
CUADRO SSAA C.A. CR-4	ULC CR-4	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	4,403	0,705
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,408	0,710
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	4,404	0,705
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	4,407	0,708
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	4,536	0,837
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Iluminación bastidor protección pos 4	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,408	0,710
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Circuito fuerza CR-4	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	4,462	0,763
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción caja tensiones pos 4	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción caja intensidades pos 4	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción 57-44	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción 89-43	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción 89-42	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción 89-41	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,404	0,706
CUADRO SSAA C.A. CR-4	Calefacción 52-40	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,408	0,710
CUADRO SSAA C.A. CR-5	ULC CR-5	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	4,150	0,000

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,155	0,005
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	4,150	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	4,154	0,004
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	4,282	0,133
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Iluminación bastidor protección pos 5	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,155	0,005
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Circuito fuerza CR-5	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	4,208	0,059
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción caja tensiones pos 5	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción caja intensidades pos 5	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción 57-54	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción 89-53	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción 89-52	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción 89-51	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	4,151	0,001
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Calefacción 52-50	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	4,155	0,005
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Rectificador baterías 125Vcc control 1	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	4,195	0,046
CUADRO SSAA C.A. CR-5	Rectificador baterías 125Vcc control 2	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	4,195	0,046
CUADRO SSAA C.A. CR-6	ULC CR-6	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	3,036	0,545
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	3,041	0,550
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	3,036	0,545
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	3,039	0,549
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	3,168	0,677
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Iluminación bastidor protección pos 6	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	3,041	0,550
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Circuito fuerza CR-6	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	3,094	0,604

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción caja tensiones pos 6	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción caja intensidades pos 6	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción 57-64	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción 89-63	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción 89-62	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción 89-61	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	3,037	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-6	Calefacción 52-60	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	3,041	0,550
CUADRO SSAA C.A. CR-7	ULC CR-7	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	2,982	0,542
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,987	0,547
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	2,982	0,542
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	2,986	0,546
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	3,114	0,674
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Iluminación bastidor protección pos 7	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,987	0,547
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Circuito fuerza CR-7	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	3,041	0,600
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción caja tensiones pos 7	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción caja intensidades pos 7	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción 57-74	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción 89-73	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción 89-72	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción 89-71	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,983	0,543
CUADRO SSAA C.A. CR-7	Calefacción 52-70	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,987	0,547
CUADRO SSAA C.A. CR-8	ULC CR-8	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	2,288	0,466

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,293	0,471
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	2,289	0,466
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	2,292	0,470
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	2,421	0,598
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Iluminación bastidor protección pos 8	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,293	0,471
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Circuito fuerza CR-8	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	2,347	0,525
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción caja tensiones pos 8	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción caja intensidades pos 8	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción 57-84	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción 89-83	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción 89-82	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción 89-81	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	2,290	0,467
CUADRO SSAA C.A. CR-8	Calefacción 52-80	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	2,293	0,471
CUADRO SSAA C.A. CR-9	ULC CR-9	2	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,001	0,000	0,883	0,251
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuito alumbrado exterior	4	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	0,888	0,256
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuito alumbrado emergencia interior	2	230	0,435	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	0,883	0,251
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuito alumbrado interior	3	230	1,739	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,009	0,004	0,887	0,255
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Unidad climatización	3	230	52,174	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,305	0,133	1,015	0,383
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Iluminación bastidor protección pos 9	8	230	0,870	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	0,888	0,256
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuito fuerza CR-9	8	230	8,696	0,90	0,436	25	70	SI	0,78	0,624	0,136	0,059	0,942	0,310
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción caja tensiones pos 9	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción caja intensidades pos 9	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252

Derivaciones interiores desde cuadro a carga															
Desde	Hasta	Longitud (m)	Tension (V)	Corriente de diseño (A)	cosφ	senφ	Sección tentativa (mm ²)	Intensidad admisible (A)	Cumple	R (Ω/km)	X (Ω/km)	ΔV tramo (V)	ΔV tramo (%)	ΔV acumulada (%)	ΔV acumulada normal(%)
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción 57-94	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción 89-93	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción 89-92	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción 89-91	10	230	0,217	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,003	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Calefacción 52-90	10	230	0,783	1,00	0,000	25	70	SI	0,78	0,624	0,012	0,005	0,888	0,256
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Rectificador baterías 125Vcc control 2	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	0,928	0,296
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Rectificador baterías 125Vcc control 1	5	400	21,651	0,90	0,436	25	64	SI	0,78	0,624	0,183	0,046	0,928	0,296
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Alumbrado cuadros de C.C	4	230	0,348	0,98	0,199	25	70	SI	0,78	0,624	0,002	0,001	0,884	0,252
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuitos control PDB 1	4	230	2,826	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,021	0,009	0,892	0,260
CUADRO SSAA C.A. CR-9	Circuitos control PDB 2	4	230	2,826	0,95	0,312	25	70	SI	0,78	0,624	0,021	0,009	0,892	0,260

Anejo VI. DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA 125

VCC

En este anejo se recogen los cálculos correspondientes al dimensionamiento del sistema de alimentación en corriente continua a 125 Vcc. Se detalla el inventario de cargas críticas, distinguiendo entre las asociadas a cada posición funcional y las cargas generales del sistema, así como su reparto entre los tres sistemas rectificador-cargador/banco en servicio.

Para cada sistema se incluye el perfil de descarga considerado, diferenciando las cargas permanentes, mantenidas durante toda la autonomía, de las temporales, activas únicamente durante la primera hora. A partir de dicho perfil se obtiene la capacidad teórica y la capacidad requerida de cada banco, aplicando los factores de envejecimiento y temperatura. Finalmente se recogen la determinación del número de elementos en serie, la comprobación de las tensiones máxima y mínima admisibles, y la selección del modelo de batería y del rectificador-cargador asociado.

CARGAS CRÍTICAS para 1 posición						
#Carga	Nombre	Uds	P unitaria (W)	P total (W)	kdiseño	P diseño (W)
1	Protección de línea	2	35	70	0,8	56
2	Gateway	2	200	400	0,8	320
3	Seccionadores de línea (motores)	6	50	300	0,1	30
4	Interruptores de línea (motores)	3	150	450	0,1	45
5	Ventilador	1	10	10	1	10
6	Resistencia Caldeo	1	800	800	0,5	400
7	Alumbrado emergencia interior caseta	1	100	100	1	100
8	Señalización y enclavamientos DC	1	30	30	0,5	15
P (W) por posición						976
P (W) posiciones						8784

CARGAS CRÍTICAS generales						
#Carga	Nombre	Uds	P unitaria (W)	P total (W)	FS	P diseño (W)
9	TFR	1	480	480	1	480
10	Alumbrado interior emergencia	2	100	200	1,8	360
11	Alumbrado exterior emergencia	6	100	600	1,8	1080
12	Telemando alumbrado	1	50	50	1	50
P(W) set general						1970

CARGAS PERMANENTES	
Datos	Valor
Pperm,pos	801
Pperm,posiciones	7209
Pperm,general	530
Pperm	7739
Iperm	61,912

CARGAS TEMPORALES: alumbrado de emergencia	
Datos	Valor
Ptemp,pos	100
Ptemp,posiciones	900
Ptemp,general	1440
Ptemp	2340
Itemp	18,72

CARGAS DE MANIOBRA	
Datos	Valor
Pmaniobra,pos	75
Pmaniobra,posiciones	675
Pmaniobra	675
Imaniobra	5,4

Baterías	
Dato	Valor
Tensión nominal (Vcc)	125
Factor de envejecimiento (Fe)	1,25
Factor de temperatura (Ft)	1
Autonomía total (h)	8 h
Duración cargas temporales (h)	1 h
Nº de elementos en serie	96
Modelo de batería	SAFT Uptimax UP1L 280 (C5 = 280 Ah)
Tensión máx. flotación	136,32 V (96 × 1,42)
Tensión final descarga	100,8 V (96 × 1,05)

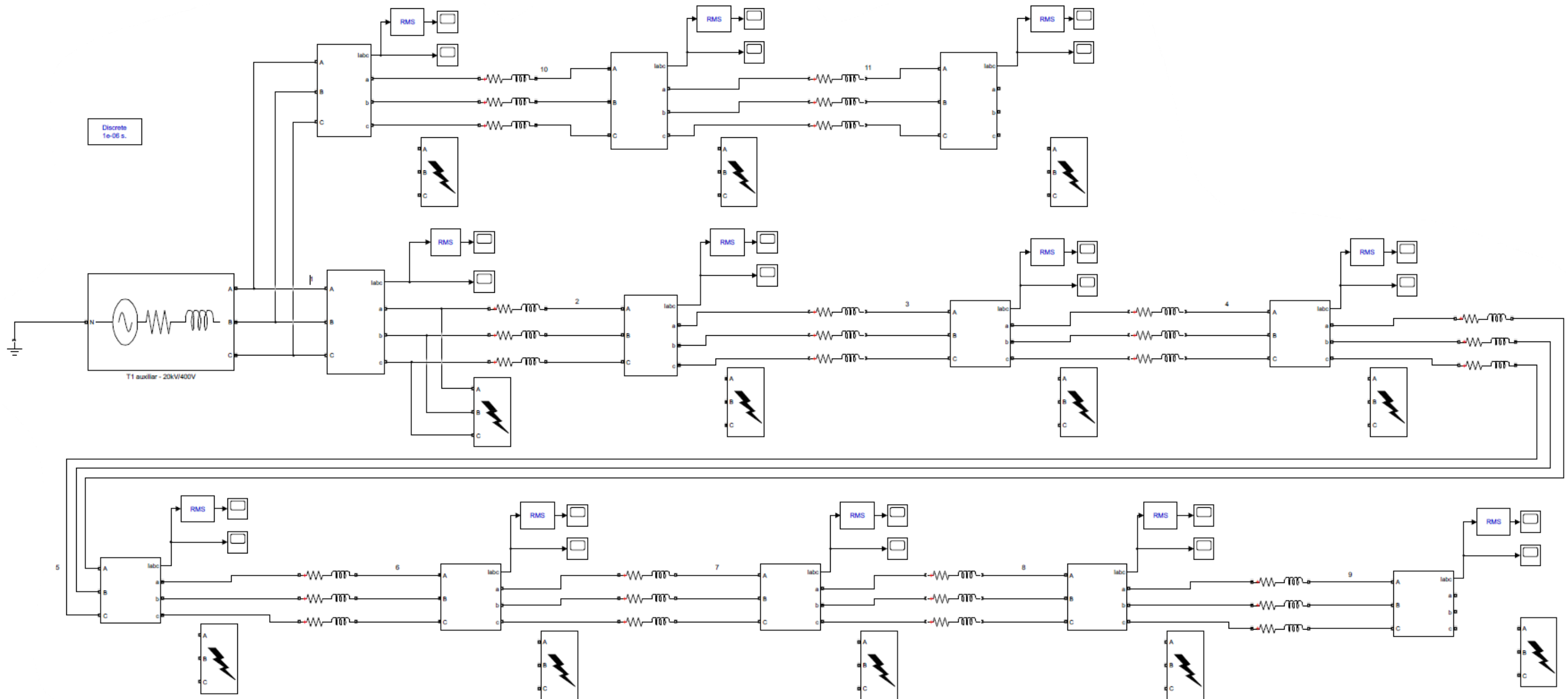
Perfiles de descarga			
Magnitud	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Posiciones asignadas	3	3	3
Cargas generales	—	—	Sí
P permanente (W)	2.403	2.403	2.933
P temporal (W)	300	300	1.740
I perfil 0–1 h (A)	21,62	21,62	37,38
I perfil 1–8 h (A)	19,22	19,22	23,46
Q_teorica (Ah)	156,16	156,16	201,63
Q_requerida (Ah)	195,2	195,2	252,04

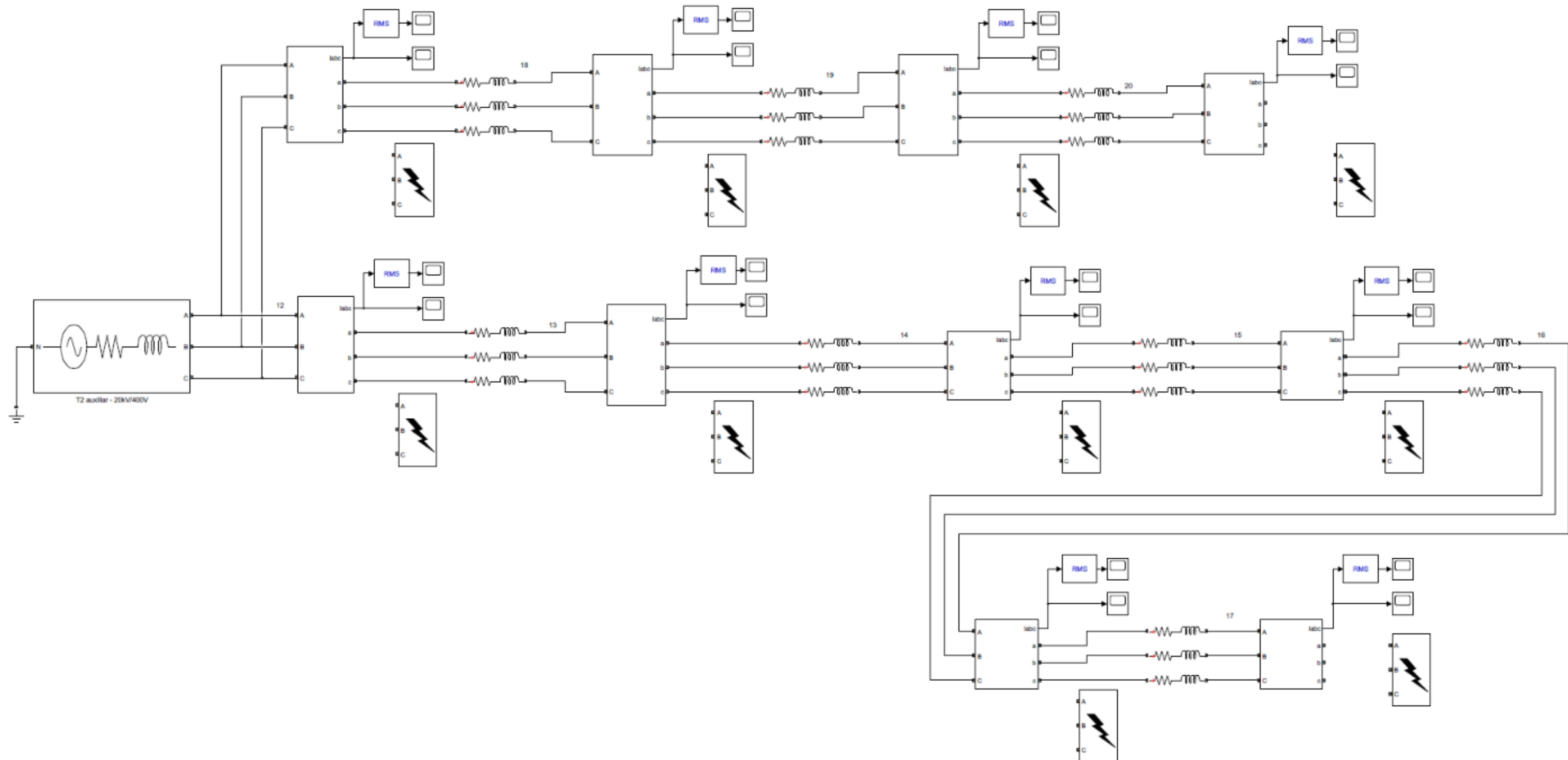
Anejo VII. CÁLCULO DE CORTOCIRCUITOS

En este anejo se detallan los cálculos de las corrientes de cortocircuito en la red de baja tensión de los servicios auxiliares, empleados para la selección y coordinación de las protecciones. Se consideran las distintas tipologías de falta y los puntos más representativos de la instalación, tanto en condiciones normales de explotación como en las situaciones de contingencia derivadas de la configuración en anillo.

Para cada punto de cálculo se indican las impedancias acumuladas hasta el punto de falta y las corrientes de cortocircuito resultantes. Estos valores constituyen la base para la verificación del poder de corte de los interruptores automáticos y para el estudio de coordinación de protecciones desarrollado en la memoria.

Los resultados obtenidos analíticamente se han contrastado mediante un modelo de la red implementado en MATLAB/Simulink, que reproduce los dos circuitos independientes asociados a CT1 y CT2 con el anillo de baja tensión en su configuración de explotación. En este anejo se recogen el modelo empleado y los resultados de las simulaciones, que permiten validar las corrientes de cortocircuito calculadas y verificar la coherencia entre ambos métodos.





Lineas generales de alimentación							
Desde	Hasta	Longitud (m)	R (Ω/km)	X (Ω/km)	R (Ω)	X (Ω)	L (H)
Transformador Auxiliar 1	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	5,99	0,0817	0,0654	4,8938E-04	3,9151E-04	1,2462E-06
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT1	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	0,5	0,0817	0,0654	4,0850E-05	3,2680E-05	1,0402E-07
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT1	Cuadro TELECO C.A. Ctele	10	0,0817	0,0654	8,1700E-04	6,5360E-04	2,0805E-06
Cuadro TELECO C.A. Ctele	Cuadro SSAA C.A. Ctele	0,5	0,0817	0,0654	4,0850E-05	3,2680E-05	1,0402E-07
Cuadro SSAA C.A. Ctele	Cuadro SSAA C.A. CR-9	22,5	0,0817	0,0654	1,8383E-03	1,4706E-03	4,6811E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-9	Cuadro SSAA C.A. CR-8	79,5	0,0817	0,0654	6,4952E-03	5,1961E-03	1,6540E-05
Cuadro SSAA C.A. CR-8	Cuadro SSAA C.A. CR-7	42	0,0817	0,0654	3,4314E-03	2,7451E-03	8,7380E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-7	Cuadro SSAA C.A. CR-6	3,5	0,0817	0,0654	2,8595E-04	2,2876E-04	7,2817E-07
Cuadro SSAA C.A. CR-6	Cuadro SSAA C.A. CR-5	78,5	0,0817	0,0654	6,4135E-03	5,1308E-03	1,6332E-05
Cuadro SSAA C.A. CR-5	Cuadro SSAA C.A. CR-4	23,5	0,0817	0,0654	1,9200E-03	1,5360E-03	4,8891E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-4	Cuadro SSAA C.A. CR-3	27	0,0817	0,0654	2,2059E-03	1,7647E-03	5,6173E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-3	Cuadro SSAA C.A. CR-2	36,5	0,0817	0,0654	2,9821E-03	2,3856E-03	7,5937E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-2	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	51	0,0817	0,0654	4,1667E-03	3,3334E-03	1,0610E-05
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT2	Transformador Auxiliar 2	3,49	0,0817	0,0654	2,8513E-04	2,2811E-04	7,2609E-07
Transformador Auxiliar 2	Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	3,49	0,0817	0,0654	2,8513E-04	2,2811E-04	7,2609E-07
Cuadro DISTRIBUCIÓN C.A. CT2	Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	0,5	0,0817	0,0654	4,0850E-05	3,2680E-05	1,0402E-07
Cuadro GENERAL ALUMBRADO CT2	Cuadro SSAA C.A. CR-1	42,5	0,0817	0,0654	3,4723E-03	2,7778E-03	8,8420E-06
Cuadro SSAA C.A. CR-1	Cuadro TELECO C.A. CT1	33,5	0,0817	0,0654	2,7370E-03	2,1896E-03	6,9696E-06
Cuadro TELECO C.A. CT1	Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	0,5	0,0817	0,0654	4,0850E-05	3,2680E-05	1,0402E-07
Cuadro PRINCIPAL C.A. CT1	Transformador Auxiliar 1	5,99	0,0817	0,0654	4,8938E-04	3,9151E-04	1,2462E-06

Tranformador auxiliar		
Variables nominales	Valores RAT	Valores Ormazabal
Sn (VA)	400000	400000
Vn (V)	400	400
In (A)	577,3502692	577,3502692
ucc (%)	4	4
Pk (W)	3850	3250
Z (Ω)	0,016	0,016
Rcc (Ω)	0,00385	0,00325
Xcc (Ω)	0,015529891	0,015666445
L (H)	4,94332E-05	4,98678E-05
X/R	4,033737801	4,820444626

Icc trifásica teórica			
Punto	Req	Xeq	Icc (kA)
1	0,00385	0,01553	14,434
2	0,00434	0,01592	13,995
3	0,00438	0,01595	13,959
4	0,00520	0,01661	13,271
5	0,00524	0,01664	13,238
6	0,00708	0,01811	11,877
7	0,01357	0,02331	8,563
8	0,01700	0,02605	7,423
9	0,01729	0,02628	7,341
10	0,00434	0,01592	13,995
11	0,00438	0,01595	13,959
12	0,00385	0,01553	14,434
13	0,00414	0,01576	14,175
14	0,00830	0,01909	11,093
15	0,01128	0,02148	9,519
16	0,01349	0,02324	8,594
17	0,01541	0,02478	7,915
18	0,00414	0,01576	14,175
19	0,00418	0,01579	14,139
20	0,00765	0,01857	11,500

Icc bifásica a tierra teórica		
Punto	Icc trifásica(kA)	Icc bifásicaT (kA)
1	14,434	14,434
2	13,995	13,995
3	13,959	13,959
4	13,271	13,271
5	13,238	13,238
6	11,877	11,877
7	8,563	8,563
8	7,423	7,423
9	7,341	7,341
10	13,995	13,995
11	13,959	13,959
12	14,434	14,434
13	14,175	14,175
14	11,093	11,093
15	9,519	9,519
16	8,594	8,594
17	7,915	7,915
18	14,175	14,175
19	14,139	14,139
20	11,500	11,500

Icc bifásica teórica		
Punto	Icc trifásica(kA)	Icc bifásica (kA)
1	14,434	12,500
2	13,995	12,120
3	13,959	12,089
4	13,271	11,493
5	13,238	11,464
6	11,877	10,286
7	8,563	7,416
8	7,423	6,429
9	7,341	6,358
10	13,995	12,120
11	13,959	12,089
12	14,434	12,500
13	14,175	12,276
14	11,093	9,607
15	9,519	8,244
16	8,594	7,442
17	7,915	6,854
18	14,175	12,276
19	14,139	12,245
20	11,500	9,959

Icc monofásica teórica		
Punto	Icc trifásica(kA)	Icc bifásicaT (kA)
1	14,434	14,434
2	13,995	13,995
3	13,959	13,959
4	13,271	13,271
5	13,238	13,238
6	11,877	11,877
7	8,563	8,563
8	7,423	7,423
9	7,341	7,341
10	13,995	13,995
11	13,959	13,959
12	14,434	14,434
13	14,175	14,175
14	11,093	11,093
15	9,519	9,519
16	8,594	8,594
17	7,915	7,915
18	14,175	14,175
19	14,139	14,139
20	11,500	11,500

Anejo VIII. SELECTIVIDAD DE LAS PROTECCIONES

En este anejo se incluyen las tablas de selectividad proporcionadas por el fabricante ABB, obtenidas mediante la herramienta de coordinación SOC (Selected Optimized Coordination) [ABB_24b], empleadas para verificar la selectividad entre los distintos niveles de protección de la red de baja tensión de los servicios auxiliares.

En estas tablas, el interruptor situado aguas arriba (protección de respaldo) se identifica en las columnas, y el situado aguas abajo (protección principal) en las filas. El valor recogido en la intersección indica el límite de selectividad de la pareja: un valor numérico expresa la corriente, en kA, hasta la cual la coordinación es selectiva, mientras que el símbolo «T» indica selectividad total, es decir, garantizada hasta el poder de corte de los interruptores.

Se recogen las dos combinaciones empleadas en el sistema de protección. La primera tabla verifica la pareja formada por la protección general XT5N 630 (Nivel 1, aguas arriba) y los alimentadores del anillo XT4N 250 (Nivel 2, aguas abajo). La segunda verifica la pareja formada por los alimentadores XT4N 250 (Nivel 2, aguas arriba) y las derivaciones finales XT2N 160 (Nivel 3, aguas abajo). En ambos casos, la celda correspondiente, señalada en las tablas, indica selectividad total (T), lo que confirma la coordinación selectiva completa de la cadena de protecciones en todo el rango de corrientes de cortocircuito previstas.

192

193

Anejo IX. PRESUPUESTO ECONÓMICO

En este anejo se recoge el presupuesto detallado de los servicios auxiliares, desglosado por equipos y materiales a partir de las mediciones obtenidas en los capítulos de dimensionamiento. Para cada partida se indican la cantidad, el precio unitario y el importe total, junto con la referencia de la fuente empleada para su valoración.

Los precios de conductores y canalizaciones proceden del Generador de Precios de la Construcción de CYPE Ingenieros [CYPE26], los de las protecciones de tarifa de fabricante, y los del transformador, los rectificadores-cargadores, los bancos de baterías y los cuadros de estimaciones orientativas de mercado. Al tratarse de una estimación preliminar, el presupuesto no incluye el montaje, el conexionado y las pruebas, ni la obra civil ni el IVA, y deberá completarse en la fase de ingeniería de detalle con mediciones definitivas y ofertas comerciales concretas.

PRESUPUESTO DE LOS SISTEMAS AUXILIARES DE LA SUBESTACIÓN						
Concepto	Cantidad	N.º cond.	Precio unit. (€)	Importe (€)	% s/ PEM	Referencia
Conductor Cu XLPE 0,6/1 kV 1×300 mm² (anillo)	559,72	4	72,33 €	161.938,19 €	23,2%	IEH012
Conductor H07V-K 1×25 mm² (interior)				17.278,56 €	2,5%	
Circuitos monofásicos	1208	2	6,76 €	16.332,16 €		IEH010
Circuitos trifásicos	35	4	6,76 €	946,40 €		IEH010
Transformador auxiliar 400 kVA	2		40.000,00 €	80.000,00 €	11,4%	Est. mercado
Grupo electrógeno (respaldo)	2		50.000,00 €	100.000,00 €	14,3%	IER010
Rectificador-cargador 125 Vcc (RAF Argos)	6		6.000,00 €	36.000,00 €	5,2%	Est. mercado
Bancos de baterías Ni-Cd 125 Vcc (UP1L 280)				115.200,00 €	16,5%	
96 elementos × 200 €/elem. × 6 bancos	6	96	200,00 €	115.200,00 €		Est. mercado
Interruptores automáticos				93.811,26 €	13,4%	
Nivel 1 XT5N 4p	2		1.979,00 €	3.958,00 €		1SDA100397R1
Nivel 2 XT4N 4P	14		621,09 €	8.695,26 €		1SDA068157R1
Nivel 3 XT2N 4p	187		434,00 €	81.158,00 €		1SDA067092R1
Cuadros eléctricos				25.800,00 €	3,7%	Est. mercado
Canalizaciones y accesorios				68.911,36 €	9,9%	
Tubo circuitos monofásicos interiores	1208		5,90 €	7.127,20 €		IEO010
Tubo circuitos trifásicos interiores	35		9,50 €	332,50 €		IEO010
Galería / canalización enterrada anillo	559,72		109,79 €	61.451,66 €		IEO010
PRESUPUESTO DE EJECUCIÓN MATERIAL (PEM)				698.939,37 €		
Ingeniería y dirección de obra (5% PEM)			5,0%	34.946,97 €		Estimado
Contingencias (8% PEM)			8,0%	55.915,15 €		Estimado
PRESUPUESTO TOTAL				789.801,49 €		



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

ICAI

ICADE

CIHS

PLANOS

Parte II . PLANOS



COMILLAS
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

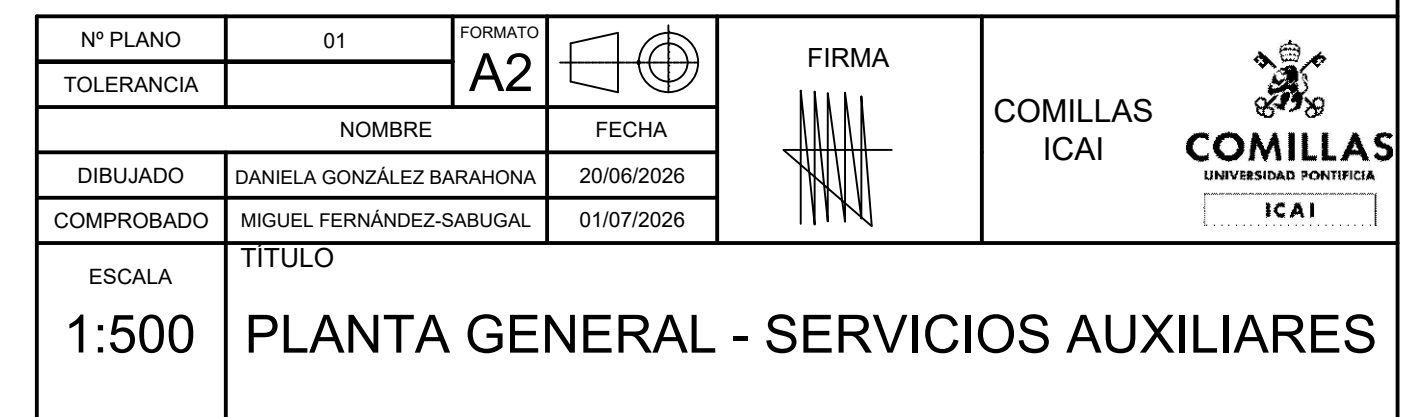
ICAI ICADE CIHS

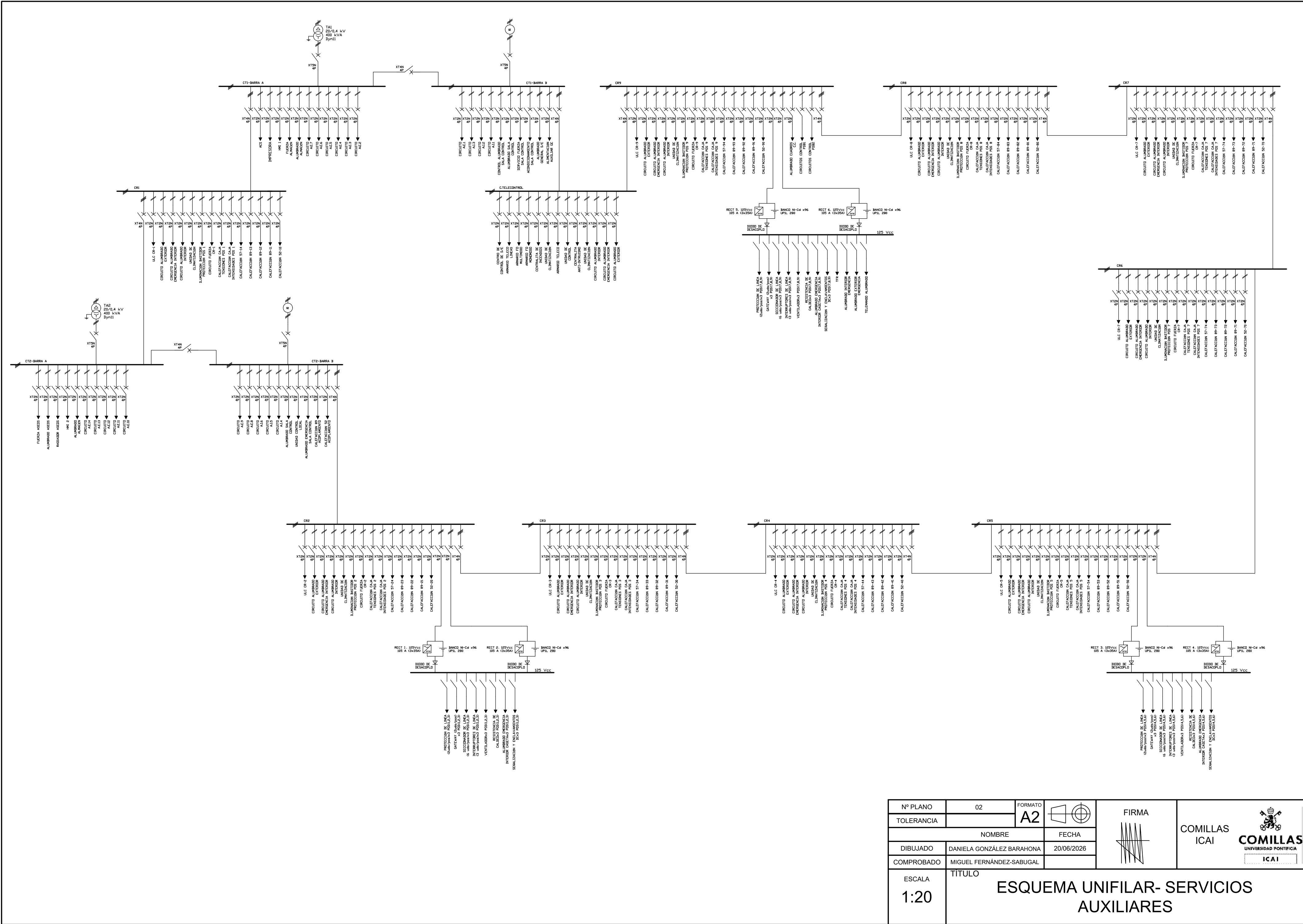
UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS INDUSTRIALES

PLANOS

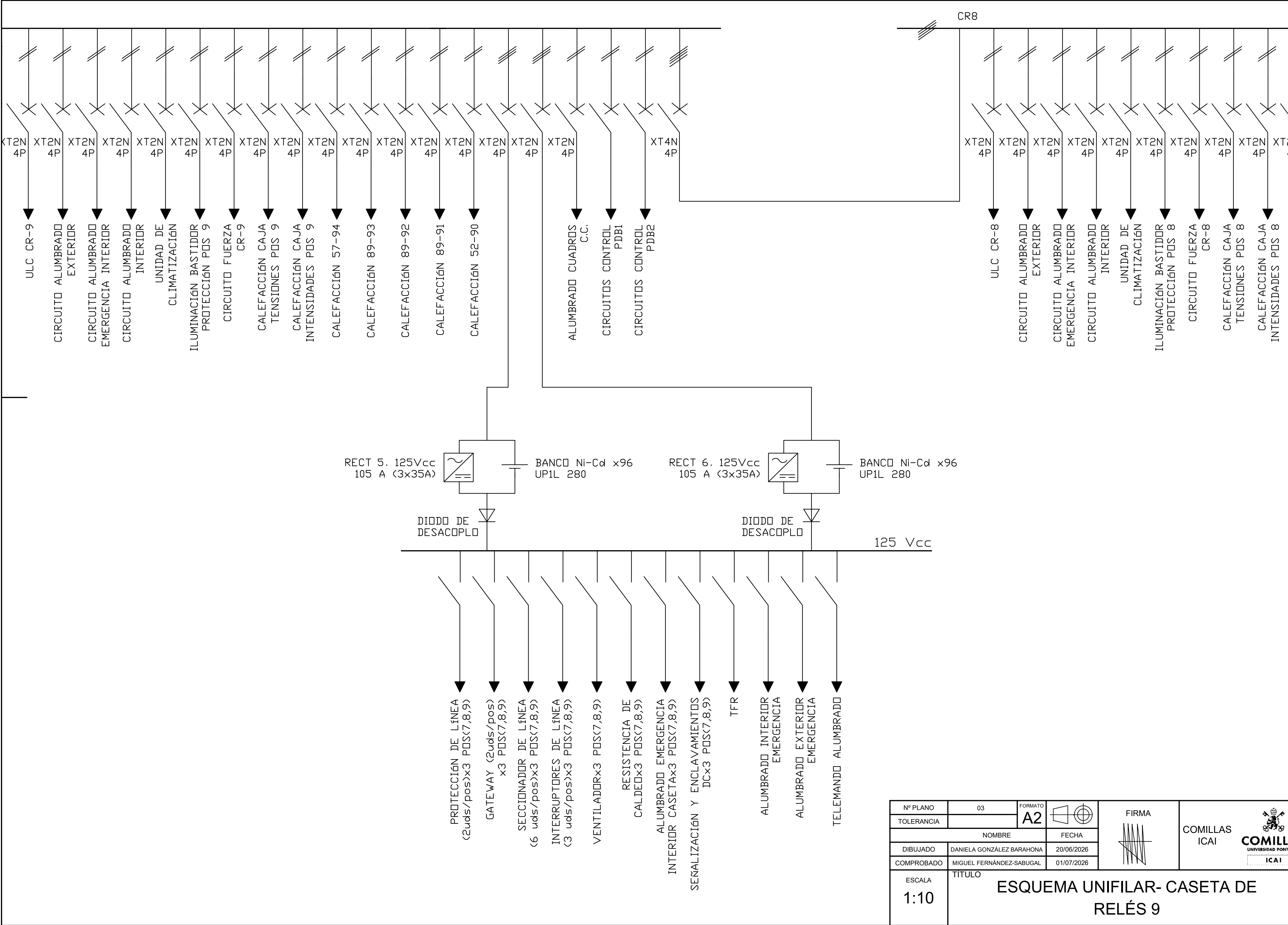
Índice de planos

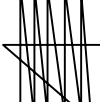
- 01. Planos Generales – Servicios Auxiliares*
- 02. Esquema Unifilar – Servicios Auxiliares*
- 03. Esquema Unifilar – Caseta de Relés 9*
- 04. Esquema Unifilar – Centro de Transformación 1*

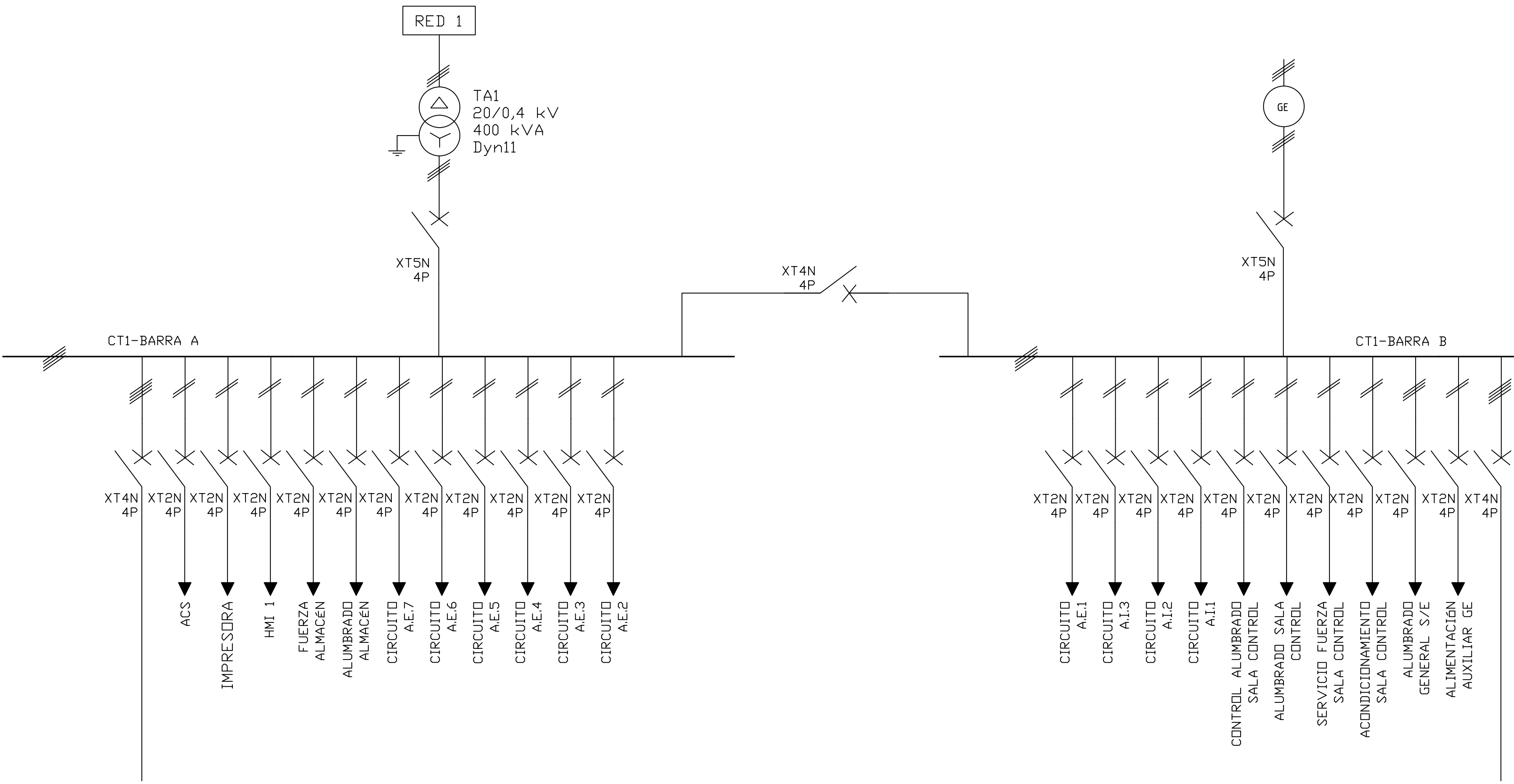


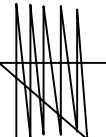


Nº PLANO	02	FORMATO	A2		FIRMA		COMILLAS ICAI	 COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA ICAI
TOLERANCIA								
NOMBRE		FECHA						
DIBUJADO	DANIELA GONZÁLEZ BARAHONA	20/06/2026						
COMPROBADO	MIGUEL FERNÁNDEZ-SABUGAL							
ESCALA 1:20	TÍTULO ESQUEMA UNIFILAR- SERVICIOS AUXILIARES							



Nº PLANO	03	FORMATO		FIRMA	 COMILLAS ICAI 
TOLERANCIA		A2			
NOMBRE			FECHA		
DIBUJADO	DANIELA GONZÁLEZ BARAHONA		20/06/2026		
COMPROBADO	MIGUEL FERNÁNDEZ-SABUGAL		01/07/2026		
ESCALA	TÍTULO				
1:10	ESQUEMA UNIFILAR- CASETA DE RELÉS 9				



Nº PLANO	04	FORMATO		FIRMA		COMILLAS ICAI	 COMILLAS UNIVERSIDAD PONTIFICIA 
TOLERANCIA		A2					
NOMBRE			FECHA				
DIBUJADO	DANIELA GONZÁLEZ BARAHONA	20/06/2026					
COMPROBADO	MIGUEL FERNÁNDEZ-SABUGAL	01/07/2026					
ESCALA 1:10	TÍTULO ESQUEMA UNIFILAR- CENTRO DE TRANSFORMACIÓN 1						