

Trabajo Fin de Grado

Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis Comparativo de Herramientas de Cálculo de Instalaciones de Baja Tensión

Autor: Luna Moreno Díaz

Tutor: Agustín Maraver Guerrero

**Dep. Ingeniería de Construcción y Proyectos de
Ingeniería
Escuela Técnica Superior de Ingeniería**

Sevilla, 2015



Trabajo Fin de Grado
Ingeniería de las Tecnologías Industriales

Análisis Comparativo de Herramientas de Cálculo de Instalaciones de Baja Tensión

Autor:

Luna Moreno Díaz

Tutor:

Agustín Maraver Guerrero

Profesor Asociado

Dep. de Ingeniería de Construcción y Proyectos de Ingeniería

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2015

Proyecto Fin de Carrera: Análisis Comparativo de Herramientas de Cálculo de Instalaciones de
Baja Tensión

Autor: Luna Moreno Díaz

Tutor: Agustín Maraver Guerrero

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2015

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

A Agustín Maraver Gerrero, mi tutor, por darme la oportunidad de realizar este proyecto y poner a mi alcance todo su conocimiento.

A mis compañeros de clase, en especial a Lourdes, porque las clases son más amenas con ella.

A mis amigas del Colegio “Santa María del Buen Aire”, por la buena convivencia y la amistad. En especial a Reyes, Marina y Elena.

A Alberto, por el apoyo y los buenos consejos.

A mi familia, mi pilar fundamental. Gracias a mi padre por las dudas resueltas. Gracias a todos por apoyarme y confiar en mí.

Luna Moreno Díaz

Sevilla, 2015

Con el avance tecnológico de los software de cálculo, en lo que respecta al ámbito de la Ingeniería Eléctrica, se han desarrollado programas comerciales para el cálculo de instalaciones eléctricas que permiten simplificar el tiempo de un proyecto y aumentar la productividad. Usar estos programas es una forma rápida y sencilla de calcular una instalación pero podríamos plantear si es la más fiable. A raíz de estas cuestiones parte la idea de usar una herramienta de cálculo de instalaciones desarrollada en Excel, con notables diferencias respecto a las anteriores, con el fin de establecer un marco comparativo entre herramientas.

El objetivo de este documento es doble. Por un lado, validar una herramienta de cálculo desarrollada en Microsoft Excel para el cálculo de instalaciones de Baja Tensión mediante la comparación de resultados con dos programas comerciales y por otro, presentar las ventajas e inconvenientes del uso de dicha Hoja de cálculo frente a los programas convencionales de cálculo de instalaciones de Baja Tensión.

Tras el análisis de los resultados del cálculo de la Instalación propuesta en las tres herramientas se verifica que la herramienta de Excel es apta para el cálculo de instalaciones de Baja Tensión.

Abstract

With the technological advancement of calculation software, in the field of Electrical Engineering, commercial programs have been developed for calculation of electrical systems to simplify the project time and increase productivity. Using these programs is a quick and easy way to calculate a system but we could wonder if it is the most reliable. From these issues stems the idea of using a system calculation tool developed in Excel, with notable differences from the previous ones, in order to establish a comparative framework between tools.

This paper has two purposes. On the one hand, to validate a calculation tool developed in Microsoft Excel for the calculation of low voltage systems by comparing results with two commercial programs and on the other, present the advantages and disadvantages of using this worksheet compared to conventional programs of calculation of low voltage systems.

After analyzing the results of the calculation of the proposed Installation on the three tools, it can be verified that Excel worksheet is a suitable tool for the calculation of low voltage system.

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Abstract	v
Índice	vii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tablas	xiii
1 Prefacio	1
1.1. <i>Introducción</i>	1
1.2. <i>Objetivo del proyecto</i>	2
1.3. <i>Alcance del proyecto</i>	2
1.4. <i>Justificación del Proyecto</i>	3
2 Metodología	5
3 Normativa Utilizada	9
3.1. <i>Hoja de Cálculo</i>	9
3.2. <i>Ecodial</i>	9
3.3. <i>Doc</i>	10
4 Software Analizados	11
4.1. <i>Hoja de Cálculo</i>	11
4.2. <i>Softwares comerciales</i>	12
4.2.1. <i>Doc</i>	12
4.2.2. <i>Ecodial</i>	16
5 Aplicación a un Caso Práctico	19
5.1. <i>Características Eléctricas de la red de Utilización y de la Instalación</i>	19
5.1.1. <i>Red de Alta Tensión</i>	19
5.1.2. <i>Red de Baja Tensión</i>	20
5.1.3. <i>Características de la Instalación</i>	20
5.2. <i>Cables Eléctricos de Baja Tensión</i>	21
5.2.1. <i>Generalidades</i>	21
5.2.2. <i>Tipos de Cables y su Instalación</i>	22
5.3. <i>Instalaciones Interiores</i>	22

5.3.1.	Generalidades	22
5.3.2.	Línea General de Alimentación (LGA)	22
5.3.3.	Cuadro General de Baja Tensión (CGBT)	23
5.3.4.	Líneas de Derivación de la General (LDG) e Individuales (LDI)	23
5.3.5.	Cuadros Secundarios	23
5.3.6.	Instalaciones de Distribución	23
5.4.	<i>Puesta a Tierra</i>	23
5.5.	<i>Pararrayos</i>	24
5.6.	<i>Batería de Condensadores</i>	24
6	Introducción de Datos	25
6.1.	<i>Cargas</i>	25
6.1.1.	Ecodial	25
6.1.2.	Doc	26
6.2.	<i>Factores de Corrección</i>	26
6.2.1.	Factor de Corrección por Resistividad del Terreno	27
6.2.2.	Factor de Corrección por Temperatura	27
6.2.3.	Factor de Corrección por Agrupación de Cables	28
7	Comparación de Resultados	29
7.1.	<i>Secciones</i>	30
7.1.1.	Cálculo de secciones	30
7.1.2.	Análisis comparativo	30
7.1.3.	Conclusiones	37
7.2.	<i>Intensidades de Diseño</i>	37
7.2.1.	Ecodial	38
7.2.2.	Doc	39
7.2.3.	Conclusiones	39
7.3.	<i>Caídas de Tensión</i>	40
7.3.1.	Ecodial	42
7.3.2.	Doc	42
7.3.3.	Conclusiones	43
7.4.	<i>Intensidades de Cortocircuito</i>	43
7.4.1.	Cálculo de las Impedancias de Cortocircuito	43
7.4.2.	Análisis comparativo	45
8	Modificaciones de la Hoja de Cálculo	51
8.1.	<i>Corrientes de Cortocircuito</i>	51
8.2.	<i>Intensidades de diseño</i>	52
8.3.	<i>Cables en paralelo</i>	53

9	Protecciones	55
9.1.	<i>Introducción</i>	55
9.2.	<i>Normativa</i>	56
9.3.	<i>Selectividad</i>	56
9.4.	<i>Filiación</i>	57
9.5.	<i>Defectos a Proteger</i>	57
9.5.1.	Sobrecarga	57
9.5.2.	Cortocircuito	58
9.5.3.	Contactos Indirectos en Sistemas TT	58
9.5.4.	Contactos Indirectos en Sistemas TN	59
9.5.5.	Contactos Indirectos en Sistemas IT	59
9.6.	<i>Dimensionado de Protecciones en Ecodial</i>	60
9.6.1.	Elección Manual de las Protecciones	60
9.6.2.	Caso Práctico	61
9.7.	<i>Dimensionado de Protecciones en Doc</i>	68
10	Sección Económica	71
10.1.	<i>Introducción</i>	71
10.2.	<i>Justificación</i>	71
10.3.	<i>Aspectos Económicos</i>	72
10.4.	<i>Cálculos</i>	72
10.5.	<i>Cálculo de la Sección Económica en la Hoja de cálculo</i>	74
10.6.	<i>Caso Práctico</i>	76
11	Comparación de Programas	81
11.1.	<i>Aprendizaje</i>	81
11.1.1.	Guías de uso	81
11.1.2.	Estructura	82
11.1.3.	Conclusiones	83
11.2.	<i>Introducción de datos</i>	83
11.2.1.	Software comerciales	83
11.2.2.	Hoja	84
11.2.3.	Conclusiones	84
11.3.	<i>Información proporcionada por los programas</i>	85
11.3.1.	Ecodial	85
11.3.2.	Doc	85
11.3.3.	Hoja de cálculo	85
11.3.4.	Conclusiones	85

11.4.	<i>Corrección de Errores y Advertencias</i>	85
11.4.1.	Doc	86
11.4.2.	Ecodial	86
11.4.3.	Hoja de cálculo	86
11.4.4.	Conclusiones	86
12	Conclusiones y Propuestas de Mejora	87
12.1.	<i>Conclusiones</i>	87
12.1.1.	Validación de resultados	87
12.1.2.	Ventajas y desventajas de la Hoja respecto a los programas	89
12.2.	<i>Propuestas de mejora</i>	91
Referencias		i
ANEXO I		I

Índice de Figuras

Figura 1. Esquema de una instalación industrial que se alimenta directamente en alta tensión mediante un transformador de distribución propio	19
Figura 2. Esquema de conexión a tierra TT	24
Figura 3. Resultados del dimensionado de la Línea General de Alimentación en Pysmitool	32
Figura 4. Valores aproximados de la reactancia inductiva según el REBT	45
Figura 5. Curva de disparo de los interruptores MT-BT	64
Figura 6. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro de alumbrado y el interruptor que protege una luminaria conectada al cuadro	65
Figura 7. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro de tomas de fuerza y el interruptor que protege una toma de fuerza conectada al cuadro	66
Figura 8. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro C-1 y los interruptores inmediatamente aguas abajo	67
Figura 9. Curva de disparo de los interruptores diferenciales que protegen las cargas y los que están ubicados inmediatamente aguas arriba	68
Figura 10. Sección económica. Costes	79

Índice de Tablas

Tabla 1. Relación de cargas de la Instalación	21
Tabla 2. Análisis comparativo. Secciones de cable	35
Tabla 3. Análisis comparativo. Intensidades de diseño	38
Tabla 4. Análisis Comparativo. Reactancias de cable	41
Tabla 5. Análisis Comparativo. Caídas de tensión	42
Tabla 6. Análisis comparativo. Resistencias y reactancias de cortocircuito	47
Tabla 7. Análisis comparativo. Intensidades de cortocircuito	48
Tabla 8: Esquema TN. Tensiones nominales y tiempos de interrupción máximos	59

1.1. Introducción

La hoja de cálculo es un tipo de software mediante el cual se pueden utilizar datos numéricos y realizar cálculos automáticos de números dispuestos en forma de tablas compuestas por celdas. Con esta herramienta informática también es posible automatizar cálculos complejos al utilizar una gran cantidad de parámetros y al crear tablas conocidas como hojas de trabajo.

Dan Bricklin es el inventor aceptado de las hojas de cálculo. Bricklin contó la historia de un profesor de la universidad que hizo una tabla de cálculos en una pizarra. Cuando el profesor encontró un error, tuvo que borrar y reescribir una gran cantidad de pasos de forma muy tediosa, impulsando a Bricklin a pensar que podría replicar el proceso en un computador, usando el paradigma tablero/hoja de cálculo para ver los resultados de las fórmulas que intervenían en el proceso.

Su idea se convirtió en VisiCalc, la primera hoja de cálculo, y la "aplicación fundamental" que hizo que el PC dejase de ser sólo un hobby para entusiastas del computador para convertirse también en una herramienta en los negocios y en las empresas.

De las hojas de cálculo existentes en el mercado se ha hecho uso de Microsoft Excel, aplicación distribuida por Microsoft Office. La hoja de cálculo de Excel destaca por su sencillez y disponibilidad como una herramienta idónea para todos los entornos (profesional, educativo, etc.).

Hoy en día las grandes empresas diseñan sus propios software de cálculo. En lo que respecta al ámbito de la ingeniería eléctrica se han desarrollado programas comerciales para el cálculo de instalaciones eléctricas que permiten simplificar el tiempo de un proyecto y aumentar la productividad. Es el caso de Schneider y ABB, dos empresas internacionales especializadas en el sector de la ingeniería eléctrica que han desarrollado los programas Ecodial y Doc respectivamente para el cálculo de instalaciones eléctricas de Baja Tensión.

Desde 1836 hasta la actualidad, Schneider Electric se ha transformado en un especialista mundial en gestión de energía. Desde sus inicios en la industria del hierro y acero, las maquinarias pesadas y la construcción de embarcaciones en el siglo XIX, pasó a la gestión de electricidad y automatización en el siglo XX. Después de 170 años de historia, Schneider Electric se ha convertido en la actualidad en un proveedor de soluciones que permiten aprovechar al máximo la energía.

Schneider Electric presentó en Colombia el software Ecodial Advance Calculation, un instrumento de ayuda para dimensionar instalaciones eléctricas con base a los más recientes requerimientos normativos del mercado, así como a las últimas tecnologías

para distribución de la energía. Este software permite gestionar las restricciones de operación de las instalaciones eléctricas, y alerta, en tiempo real, sobre los errores o incoherencias en los planos, en términos de potencia, polaridad y sistema de conexión a tierra, entre otros. Ecodial Advance Calculation está organizado por módulos de trabajo: diseño, cálculo, diagnóstico e informe final, que corresponden a las etapas estratégicas del estudio. Este programa propone automáticamente diversas alternativas de protección, y ayuda a definir de forma adecuada los distintos componentes requeridos para la instalación.

ABB (acrónimo de Asea Brown Boveri) es una corporación multinacional, cuya sede central queda en Zürich, Suiza y cuyos mayores negocios son los de tecnologías en generación de energía eléctrica y en automatización industrial.

Doc es el nuevo software de ABB dedicado al diseño y cálculo de diagramas unifilares de sistemas eléctricos en baja y media tensión. Permite al usuario elegir los dispositivos de protección y seguridad y verificar y coordinar dichos dispositivos.

1.2. Objetivo del proyecto

El objetivo de este proyecto es realizar un análisis comparativo de Herramientas de Cálculo de Instalaciones de BT que además, permita validar una herramienta de cálculo desarrollada en Microsoft Excel.

Por otro lado, el propósito de la realización de este proyecto es presentar el Trabajo de Fin de Grado de la alumna Luna Moreno Díaz con el título “Análisis comparativo de Herramientas de Cálculo de Instalaciones de BT” para la obtención del título de Graduado/a en Ingeniería de las Tecnologías Industriales en la Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.

1.3. Alcance del proyecto

Con este análisis se pretende alcanzar dos objetivos:

1. En primer lugar, validar una herramienta de cálculo desarrollada en Microsoft Excel mediante la comparación de resultados con dos programas comerciales.
2. En segundo lugar, presentar las ventajas e inconvenientes del uso de una hoja de cálculo frente al uso de programas convencionales de cálculo de instalaciones de BT.

La validación de resultados comprende no solo la verificación de la hoja de cálculo si no también la comprobación de los resultados obtenidos en los software comerciales usados. Usar estos programas es una forma rápida y sencilla de calcular una instalación aunque podríamos plantear si es la más fiable. Es decir, en una herramienta de este tipo no se pueden consultar los cálculos llevados a cabo y esto lleva a cuestionarse la fiabilidad de los resultados. Sobre todo si el usuario se sirve de dicha herramienta para realizar un proyecto que luego firmará y del que asumirá los errores que se hayan podido cometer. Por tanto, es uno de los objetos de este

proyecto verificar los resultados, tanto de la hoja de cálculo como de los dos programas comerciales que se han usado. Para ello, haciendo uso de las normas que se especifican en cada herramienta y mediante una comparación exhaustiva de los resultados se va a validar el cálculo de una instalación tipo en las tres herramientas.

Se ha hablado de ventajas y desventajas en cuanto al uso de ambos tipos de herramienta. En concreto se van a tratar las cuestiones fundamentales para el desarrollo de un proyecto real como son el tiempo de ejecución o la generación de documentos así como los aspectos que afectan al usar por primera vez este tipo de programas como la facilidad de aprendizaje o las ayudas al usuario. Estas diferencias vendrán dadas principalmente por la diferencia en la interfaz de las dos herramientas (refiriéndonos a la hoja de cálculo respecto a las herramientas comerciales), la introducción de datos, la visualización de resultados, etc.

1.4. Justificación del Proyecto

Con la realización de este proyecto se afianzarán los contenidos estudiados en la materia de Instalaciones Eléctricas y Distribución de Energía Eléctrica, se mejorará el manejo de una herramienta tan importante hoy en día en cualquier empresa como es Microsoft Excel y se trabajará con dos programas comerciales de cálculo de Instalaciones usados para realizar proyectos de este tipo.

2 Metodología

En este proyecto se va a realizar un análisis comparativo de herramientas de cálculo de Instalaciones de Baja Tensión.

La metodología seguida en el análisis se basa en partir de una Hoja de cálculo desarrollada en Excel en un proyecto anterior y realizar una validación de resultados, una mejora del procedimiento y un análisis de las ventajas e inconvenientes que presenta la Hoja respecto a un software de cálculo comercial.

Las etapas que se van a llevar a cabo en este ejercicio son las siguientes:

1. Elección de los programas de cálculo comerciales. Se va a trabajar con dos herramientas de cálculo comerciales, Doc de ABB y Ecodial de Schneider. Se han elegido dichas herramientas porque han sido desarrolladas por empresas internacionales especializadas en el sector de la energía eléctrica.
2. Estudio de las herramientas objeto de análisis. Es necesario realizar un estudio de cada herramienta que permita un análisis comparativo lo más exhaustivo posible. La primera etapa del estudio consiste en adquirir unas nociones básicas sobre el uso de cada programa trabajando con una instalación sencilla al tiempo que hacemos uso de las guías de ayuda del programa y en el caso de la Hoja de cálculo de la memoria del proyecto donde se describe su uso. Después de haber adquirido una formación básica se partirá de una instalación más compleja que permita conocer en detalle las posibilidades que ofrece cada herramienta.
3. Cálculo de una instalación en las tres herramientas. Para establecer un marco de comparación homogéneo se partirá de una instalación industrial que se dimensionará en las tres herramientas. La Instalación objeto de análisis se alimenta en Alta Tensión por lo que se trabajará con un transformador. En dicha instalación se emplearán cargas variadas y diferentes tramos de cable para trabajar con distintas condiciones que permitan un análisis diverso de posibles casos que se podrían encontrar. No se desarrollará más de un cuadro para que la comparación no resulte tediosa.
4. Identificación de las magnitudes que serán comparadas. El cálculo de una Instalación Eléctrica abarca el dimensionado de los cables y de la aparamenta principalmente. Será necesario el cálculo de las intensidades de diseño, de las caídas de tensión, de las intensidades de cortocircuito, etc. Estas y otras

magnitudes serán comparadas para llevar a cabo uno de los objetivos del proyecto: la validación de resultados.

5. Comparación de resultados. Esta etapa del proyecto no consiste en una única comparación de los primeros resultados obtenidos tras el cálculo de la Instalación. Se trata de un proceso cíclico que comprende los siguientes pasos:
 - I. Recopilar los primeros resultados obtenidos de las magnitudes identificadas para la comparación.
 - II. Comparación de los resultados de las tres herramientas para cuantificar el error.
 - III. Identificar el origen de las diferencias en caso de que los errores sean grandes. Estas diferencias pueden deberse a diversas causas entre ellas: un cálculo según normas distintas, un cálculo a partir de un valor especificado por defecto en la herramienta que no coincide con el que se ha tomado en la instalación, un error en las herramientas, etc.
 - IV. Homogeneizar el marco de comparación resolviendo las diferencias encontradas. Para cada causa mencionada anteriormente se procederá de una forma determinada:
 - Los errores que pueden esperarse se encontrarán en la hoja de cálculo que como no ha sido previamente validada puede estar incompleta en algunos casos aunque también podríamos encontrar en los programas un valor que no coincide con las tablas normativas indicadas (por ejemplo, un factor de corrección, una intensidad máxima admisible, etc.).
 - En el caso de que las normas difieran será indicado y siempre que entre dentro de lo especificado en el marco español será admisible.
 - Hay que tener especial cuidado ya que las herramientas traen parámetros definidos por defecto que no tienen por qué coincidir con los considerados en nuestra instalación. La identificación de estas diferencias requiere un conocimiento exhaustivo de las herramientas.
 - V. Volver al punto inicial: recopilación de los nuevos resultados tras las modificaciones hasta que los errores obtenidos sean admisibles.

6. Conclusiones. Después del análisis comparativo se extraerán las conclusiones sobre distintos aspectos de las herramientas. Entre estos aspectos se incluirán: la sencillez de aprendizaje, el tiempo de ejecución, la introducción de datos, la visualización de resultados y los resultados obtenidos. En este capítulo del proyecto se llevará a cabo otro de los objetivos del proyecto: la presentación de ventajas e inconvenientes de la Hoja de cálculo respecto a los programas comerciales elegidos.

3 Normativa Utilizada

Para realizar un análisis comparativo de las herramientas es necesario conocer la normativa empleada en cada caso. Así, se podrá detectar fácilmente si hay diferencias en los resultados a consecuencia de usar normativas distintas.

3.1. Hoja de Cálculo

La normativa empleada en la Hoja se detalla en la memoria del proyecto donde se describe el desarrollo de dicha herramienta. En concreto, se ha hecho uso de los documentos que se nombran a continuación:

- Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión aprobado por Decreto 842/2002 de 2 de Agosto, publicado en el BOE nº 224 de 18 de septiembre de 2002.
- Instrucciones Técnicas Complementarias al Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión (ITC-BT).
- Normas UNE:
 - UNE 20460-5-523:2004: Selección e instalación de los materiales eléctricos. Sección 523: Intensidades admisibles en sistemas de conducción de cables.
 - UNE-EN 60909-0:2002: Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corrientes alterna. Parte 0: Cálculo de corrientes.
 - UNE 21144-2:2000: Cálculo de la intensidad admisible. Sección 2: Optimización económica de las secciones de los cables eléctricos de potencias.
 - UNE 20003:1954: Cobre-tipo recocido e industrial, para aplicaciones eléctricas.

3.2. Ecodial

En Ecodial, en el informe de cálculo de la instalación generado por el programa se especifica que el cálculo simple se hace según el informe técnico de CENELEC (Comité Europeo de normalización Electrotécnica) TR50480. En uno de los apartados de este informe se especifican las referencias normativas usadas para cada caso. Las que vamos a tratar aquí son las siguientes:

- IEC 60909 series: Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna.

- IEC 60947-2: Aparamenta de Baja Tensión. Parte 2: Interruptores automáticos

Para las referencias con fecha, sólo se aplica la edición citada. Para las referencias sin fecha se aplica la última edición del documento de referencia (incluyendo cualquier modificación).

3.3. Doc

En DOC, en la pestaña de propiedades generales de la instalación se puede seleccionar de acuerdo a que norma se harán los cálculos. Se han seleccionado las siguientes normativas de cálculo:

- IEC 60909-1: Corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna. Parte 1: Factores para el cálculo de las corrientes de cortocircuito en sistemas trifásicos de corriente alterna de acuerdo con la norma IEC 60909-0.
- UNE 20460: Selección e instalación de los materiales eléctricos.
- IEC 60947-2: Aparamenta de Baja Tensión. Parte 2: Interruptores automáticos.

4 Software Analizados

Las herramientas que se estudiarán en este análisis comparativo son dos software comerciales, en concreto, DOC de ABB y Ecodial de Schneider y una hoja de cálculo desarrollada en Microsoft Excel para el cálculo de Instalaciones en BT.

- Hoja de cálculo desarrollada en Excel: se trata de una herramienta para el cálculo de instalaciones de baja tensión. Consta de tres hojas: la primera es la principal ya que en ella se definen los parámetros generales, las características de cada elemento de la instalación y se visualizan los resultados. La segunda contiene las tablas del modo de instalación de cables para instalaciones interiores, redes aéreas y subterráneas sacadas del reglamento. La tercera hoja trata la protección contra las sobretensiones generadas al producirse impactos de rayo.
- DOC: es el software de ABB para la elaboración y cálculo de instalaciones eléctricas en media y baja tensión. Las principales funcionalidades del programa son: dibujar el esquema unifilar de la instalación, calcular las intensidades y caídas de tensión por las líneas, calcular las corrientes de cortocircuito, dimensionar los cables y los dispositivos de protección, ajustar y coordinar estos dispositivos y generar la documentación del proyecto.
- Ecodial: es el software de Schneider para el cálculo de instalaciones eléctricas en media y baja tensión. Se estructura en torno a cuatro áreas de trabajo que se corresponden con un paso estratégico en su estudio: diseño, cálculo e informe de diagnóstico.

4.1. Hoja de Cálculo

La Hoja de cálculo objeto de análisis ha sido desarrollada en un proyecto anterior titulado “Desarrollo de una Metodología y Herramienta de Cálculo de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión”.

Para el diseño de una instalación en la Hoja se seguirán los siguientes pasos:

1. Abrir la hoja de cálculo.
2. Rellenar la tabla de coeficientes que incluye entre otros el factor de potencia, la resistividad del conductor de cobre y aluminio a 20°C, la reactancia de cortocircuito de la red, etc. Esta tabla se podría considerar la tabla de parámetros generales de la instalación.
3. Rellenar los tipos de instalación que van a ser utilizados. Para ello se indicará el tipo de cable, aislamiento, material, método de instalación, etc.

4. Rellenar la tabla “Resumen tipos de instalación”, a partir de los tipos de instalación seleccionados.
5. Dimensionar la instalación desde los puntos consumidores hasta el principio de la instalación. Los pasos a seguir para el dimensionado de un cuadro serán:
 - I. Para cada cuadro seleccionar el “modelo de cuadro”, copiarlo y rellenar los campos pertinentes. Esta plantilla será la cabecera del cuadro.
 - II. Para cada circuito de ese cuadro seleccionar el “modelo de circuito”, copiarlo bajo la cabecera del cuadro y rellenar los campos con las características de dicho circuito. Los campos a rellenar serán la polaridad del circuito, el tipo de carga, la potencia demandada por la carga, la longitud del circuito, el tipo de canalización, etc. A medida que se rellena cada circuito se volverá a copiar la plantilla para incluir el circuito que viene a continuación en ese cuadro.

Hay que rellenar las plantillas en el mismo orden que se encuentran en la instalación. Es decir, se irá completando la instalación por niveles. El primer nivel será el de los cuadros que alimentan cargas finales. El siguiente nivel será el de los cuadros secundarios. El último nivel será el CGBT.

Para dimensionar los circuitos que alimentan a los cuadros estos se tratarán como un cuadro con un solo circuito que alimenta una carga ficticia cuya potencia consumida será la potencia total que demandan las cargas del cuadro. Para ello se tienen en cuenta los siguientes aspectos:

- La carga se considerará trifásica.
- Se tratará como si fuese un tipo de carga “Ench.” ya que no es necesario aplicar ningún coeficiente, y este tipo de carga no poseía ningún valor que modificase ni su potencia ni su intensidad.
- La potencia activa que consuma la carga ficticia que alimenta el circuito será la suma la potencia activa consumida por cada elemento conectado al cuadro.

4.2. Softwares comerciales

Para entender el uso de los programas comerciales se va a describir la forma de proceder desde la creación del proyecto hasta la generación del documento final. Además, se van a describir las principales funcionalidades de cada herramienta.

4.2.1. Doc

Antes de abrir la interfaz del programa Doc permite seleccionar entre dos perfiles de usuario:

- Versión reducida. Se recomienda para dibujar diagramas y hacer cálculos con un bajo nivel de complejidad en baja tensión o con suministro por medio de un transformador de MT/BT.
- Versión profesional. Habilita todas las funcionalidades disponibles en Doc y se recomienda para el dibujo y cálculo de diagramas complejos con suministro de media tensión o con alimentación por medio de generadores.

Para el dimensionado de la Instalación Industrial que se describe en el capítulo posterior se elegirá el perfil profesional.

Una vez se ha abierto la herramienta los pasos a seguir para la definición de un proyecto son los siguientes:

1. Definir el tipo de planta seleccionando en la pestaña “Tools” la opción “Datos Generales de la Instalación”. A continuación se abre una ventana con dos partes diferenciadas. En la parte superior se selecciona el tipo de alimentación y en la parte inferior se definen los parámetros comunes a toda la Instalación. En concreto se definen la normativa de los interruptores, del dimensionado de los cables y del cálculo de las corrientes de cortocircuito, la temperatura ambiente, etc. Además, aparece una ventana de configuración de opciones avanzadas si seleccionamos el cuadro “Preferencias”. En el caso de la Instalación propuesta, se ha configurado en la pestaña “Cables” de dicha ventana la normativa del cálculo de las resistencias y reactancias de las líneas.
2. Una vez se ha definido el tipo de alimentación ya se puede dibujar el diagrama unifilar. Para ello se irán seleccionando los distintos elementos de la instalación en la barra de herramientas que aparece en la parte superior o en la barra que aparece en el lado izquierdo de la pantalla. La diferencia entre ambas es que en la barra superior aparecen los elementos individualmente y en la izquierda aparecen conjuntos de elementos, por ejemplo, para una carga determinada se seleccionaría el interruptor, el cable de alimentación y la carga en cuestión.
3. Al tiempo que se van colocando los elementos del diagrama unifilar se definen las características en una ventana que aparece al hacer doble clic sobre el elemento. Si se tiene un conocimiento avanzado del programa se pueden definir valores por defecto para los elementos de forma que no sería necesario definir las características cada vez que se seleccione dicho elemento. Para ello se selecciona “Establecer propiedades por defecto” en la pestaña “File”.
4. Una vez se ha completado el diagrama unifilar y se han definido los elementos de la instalación se procede al cálculo automático de la instalación haciendo clic sobre el botón de cálculo de la barra de herramientas. El cálculo incluye:
 - Comprobación de la exactitud del diagrama unifilar.
 - Cálculo de las corrientes en cualquier punto de la instalación.
 - Cálculo de las caídas de tensión.

- Asignación de la fase de conexión de cargas monofásicas para que resulte lo más equilibrado posible.
- Cálculo de la potencia demandada por la instalación y el factor de potencia.
- Dimensionado de los cables de acuerdo al criterio térmico y de caída de tensión.
- Cálculo de la máxima y mínima corriente de cortocircuito en cualquier punto de la instalación.
- Selección de los dispositivos de protección de acuerdo a la intensidad demandada por las cargas, las corrientes de cortocircuito y la protección de cables y personas.

Algunos parámetros usados en el procedimiento de cálculo pueden ser modificados por el usuario. Esta operación no es necesaria en general ya que los parámetros usados por defecto satisfacen las necesidades comunes. En cualquier caso, para modificar estos parámetros hay que seleccionar la opción de mostrar parámetros durante el dimensionado en la pestaña “Tools” en “opciones”. La guía de uso de la herramienta recomienda la modificación de estos parámetros en el caso de un usuario avanzado. En concreto, se permite la selección de:

- Instante de cálculo de las corrientes de cortocircuito.
- Tolerancia de la tensión de alimentación (c_{max}).
- Referencia de temperatura de los cables para el cálculo de la máxima corriente de cortocircuito.
- Tipo de sobreexcitación de los generadores presentes en el diagrama unifilar.
- Contribución de los motores en el cálculo de las corrientes de cortocircuito.
- Equilibrado automático de las fases: viene seleccionado por defecto; deseleccionándolo el usuario definirá la fase de conexión de cargas monofásicas.

5. Durante el cálculo se muestra en una ventana el progreso del proceso de cálculo. Pueden aparecer mensajes para indicar la detección de una situación anormal. A continuación se verán las posibles situaciones de fallo y las soluciones propuestas en la guía de Doc. Tras el cálculo los elementos del diagrama unifilar toman un color u otro que puede significar que se encuentran en alguna de las situaciones siguientes:

- Objeto dimensionado
- Objeto no dimensionado
- Objeto con problemas

- Objeto con errores
- Objeto deshabilitado

Los mensajes de error que pueden aparecer durante el cálculo son de dos tipos:

- Mensajes de bloqueo: advierten de una situación crítica e incorrecta que debe corregirse antes de poder proceder con el cálculo. Los posibles mensajes de bloqueo que pueden aparecer son:
 - Fases – Sistema de distribución no consistente en el elemento seleccionado: verifica la congruencia del diagrama unifilar (por ejemplo, un cable monofásico no puede alimentar una carga trifásica). La solución sería verificar la fase y las propiedades del sistema de distribución en el elemento indicado. En el caso de alguna discrepancia hay que cancelar el cálculo y dibujar de nuevo el elemento o modificar la fase y las propiedades del sistema de distribución después de haber llevado a cabo una múltiple selección de los objetos individuales involucrados.
 - Diagrama unifilar incorrecto: ausencia de cable entre el suministro y las cargas, objetos cortocircuitados, ausencia de conexión en alguna parte del diagrama unifilar, ect.
- Mensajes de advertencia: advierten de una situación anómala o potencialmente incorrecta pero no bloquean el proceso de cálculo. A continuación se describen los posibles mensajes de advertencia:
 - Caída de tensión excesiva en los objetos seleccionados: Doc verifica si el porcentaje de caída de tensión es inferior al 4% (o al valor establecido por el usuario). Para limitar la caída de tensión hay que incrementar la sección del cable.
 - Transformador no dimensionado correctamente: Doc verifica que el transformador suministra la potencia demandada por la planta. Esta situación se produce cuando el usuario ha bloqueado un transformador de una potencia que no es suficiente. Habría que incrementar la potencia del transformador.
 - Los objetos seleccionados no están protegidos contra sobrecargas/cortocircuitos/contactos indirectos: Doc verifica que todos los cables y dispositivos de conmutación están protegidos contra faltas. En ciertas situaciones no es necesario tomar medidas (por ejemplo, en el caso de falta de protección de sobrecargas en las configuraciones de emergencia). El usuario puede decidir, bajo su propia responsabilidad omitir protecciones cuando las normas y/o características de la planta lo permiten.
 - Suministros con potencia inferior a la requerida por la planta: Doc verifica que los generadores y los SAI pueden suministrar la potencia demandada por la planta. Será necesario verificar la

potencia de los generadores y SAI, los factores de utilización y la potencia consumida por las cargas.

- En los cables seleccionados no se verifica el criterio térmico/de caída de tensión. Habrá que verificar los datos del cable (longitud, aislamiento, método de instalación) y los datos de la carga y recalculan la sección.

Además de las situaciones de fallo descritas no se han tratado las relativas al dimensionado de la aparamenta. Puede ocurrir que en algunas situaciones Doc no sea capaz de seleccionar algunos dispositivos de conmutación y protección. En el capítulo de protecciones se verán los posibles casos en los que se da esta situación y los métodos para seleccionar manualmente los dispositivos.

6. Una vez se han completado las etapas de dibujo del diagrama, cálculo y verificación de la Instalación se puede proceder a la generación de la documentación del proyecto. Las funciones de impresión de documentos están disponibles clicando en el icono “Imprimir” de la barra de herramientas. Los documentos que Doc pone a disposición del usuario son:

- Esquema unifilar
- Preliminares de cálculo: criterios de cálculo y dimensionado
- Preliminares de cálculo de cortocircuito: hipótesis de cálculo
- Una relación de:
 - Lista de cables de BT
 - Lista de aparatos de MT
 - Lista de aparatos de BT
 - Reporte de interruptores de MT
 - Reporte de interruptores de BT
 - Intensidades de cortocircuito
 - Reporte de protecciones

4.2.2. Ecodial

Una vez se ha abierto la herramienta los pasos a seguir para la definición de un proyecto son los siguientes:

1. Definir los parámetros generales de la Instalación en la pestaña “Parametrización del proyecto”. Entre los principales parámetros se encuentran la frecuencia de la red, el factor de potencia objetivo, la temperatura ambiente por defecto de los cables enterrados y al aire, la máxima caída de tensión autorizada para un cable y las caídas de tensión máximas para cada tipo de carga.
2. Una vez se han definido estos parámetros ya se puede dibujar el diagrama unifilar situándose en la pestaña “Diseño y dimensionamiento”. En esta área de

trabajo se tienen 2 partes diferenciadas: la parte principal donde se dibuja el diagrama unifilar y la parte izquierda donde se muestran las características del objeto que esté seleccionado en ese momento. En la parte superior de esta área de trabajo aparece una barra de herramientas desde la cual se abre un menú con todos los elementos disponibles para la instalación. Este menú se divide según el tipo de elemento en Red, Interconexión, Carga, etc. También se puede seleccionar desde esta barra de herramientas la información que muestra el diagrama unifilar. En concreto, pueden mostrarse los parámetros de diseño (potencias, factor de potencia, longitud de los cables, etc.), los parámetros de cálculo (intensidades de diseño, caídas de tensión, intensidades de cortocircuito, etc.) o los resultados (por ejemplo, para un cable se mostraría la sección, y número de cables de la fase, el neutro y el conductor de protección).

3. Al tiempo que se van colocando los elementos del diagrama unifilar se definen sus características en el área “Propiedades” que ocupa la parte izquierda de este entorno de trabajo. Al seleccionar un conjunto de elementos (por ejemplo, para un circuito que alimenta una carga se seleccionan simultáneamente la protección, el cable y la carga) en la ventana de “Propiedades” se muestran las características principales del conjunto (que para el ejemplo descrito serían intensidad de diseño, potencia, factor de potencia, longitud del cable y régimen de neutro). También se puede seleccionar cada elemento individualmente y se despliegan las propiedades específicas de dicho elemento.
4. Una vez se ha completado el diagrama unifilar y se han definido los elementos de la instalación se procede al cálculo automático de la instalación haciendo clic sobre el botón “Calcular proyecto” que aparece arriba a la izquierda. Los cálculos que se incluyen son los mismos que se han definido para Doc.
5. Tras el cálculo pueden aparecer mensajes de error o advertencia. Estos mensajes se muestran al desplegar la ventana “Alertas” ubicada en la parte inferior. Los mensajes de error y advertencia son básicamente los mismos que los descritos en Doc como mensajes de bloqueo y advertencia respectivamente. Por lo tanto, las soluciones para resolver estas situaciones anormales pueden tomarse de las propuestas en la guía de Doc ya que en Ecodial solo se proporcionan soluciones relativas a problemas en el dimensionado de la aparamenta. El dimensionado de la aparamenta será tratado en el capítulo de protecciones.
6. Una vez se han completado las etapas de dibujo del diagrama, cálculo y verificación de la Instalación se puede proceder a la generación de la documentación del proyecto. En la ventana “Informe” están disponibles las funciones de generación de documentos. Se puede obtener el informe completo de la Instalación o un informe para cada cuadro de la misma. En dicho informe se muestran:
 - Parámetros generales del proyecto
 - Parámetros de cálculo del cableado

- Listado de cargas
- Listado de aparamenta
- Notas de cálculo de todos los circuitos de la Instalación. Esta información se proporciona para el conjunto de cada circuito, es decir, en caso de tratarse de una carga se muestran las notas de cálculo para el interruptor, el cable y la carga de dicho circuito. En estas notas se detallan:
 - Cable: longitud, tipo de canalización, aislante, temperatura, intensidades de diseño, factores de corrección, sección de cable, etc.
 - Carga: potencia activa, reactiva, factor de potencia, polaridad, etc.
 - Protección: calibre, gama, poder de corte, etc.
 - Intensidades de cortocircuito
 - Corrientes de empleo
 - Caídas de tensión acumuladas aguas arriba y para el circuito en cuestión.

Las notas de cálculo del informe pueden verse en el área situada a la izquierda en el entorno de trabajo “Diseño y dimensionamiento”. En la parte superior aparece una barra donde se pueden seleccionar tres alternativas: “Propiedades” (que ya se ha definido), “Solución” y “Curvas”. Haciendo clic sobre “Solución” aparecen las notas de cálculo para el circuito seleccionado. La pestaña “Curvas” muestra las curvas de disparo de las protecciones que serán tratadas en el capítulo de protecciones.

5 Aplicación a un Caso Práctico

Para poder establecer un marco de comparación homogéneo a la hora de realizar el análisis comparativo se ha planteado el cálculo con las tres herramientas de una instalación industrial que se describe a continuación.

5.1. Características Eléctricas de la red de Utilización y de la Instalación

Se trata de una instalación industrial que se alimenta directamente en alta tensión mediante un transformador de distribución propio. El esquema de la instalación se muestra a continuación.

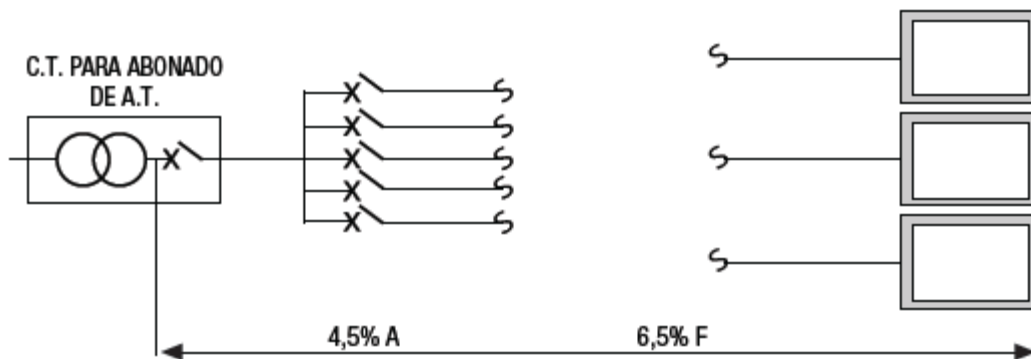


Figura 1. Esquema de una instalación industrial que se alimenta directamente en alta tensión mediante un transformador de distribución propio

En el anexo 1 se encuentra el unifilar de la instalación que permite una mejor comprensión de la misma.

5.1.1. Red de Alta Tensión

El centro de transformación responderá a las siguientes características técnicas:

- Tensión primaria: 10 kV
- Potencia instalada: 1x800 kVA
- Potencia de cortocircuito: 250 MVA
- Intensidad máxima de cortocircuito: 15,9 kA
- Frecuencia: 50 Hz
- Sistema de conexión de neutro Aislado
- Tensión de cortocircuito del transformador: 6%

5.1.2. Red de Baja Tensión

Con los transformadores instalados y los datos indicados para la red de alta tensión, tendremos las siguientes características para la red de baja tensión:

- Tensión secundaria: 3 x 230 / 400 V
- Frecuencia: 50 Hz
- Potencia disponible a plena carga: 620 kW
- Intensidad nominal: 1156 A
- Intensidad de cortocircuito máxima en bornas del transformador de baja tensión: 18,23 kA

5.1.3. Características de la Instalación

La instalación industrial alimenta cinco cuadros principales desde el CGBT. Estos cuadros se denominan CS1, CS2, CS3, CS4 y CS5. De estos cuatro cuadros se ha desarrollado el CS1.

El cuadro CS1 se alimenta desde una línea de derivación individual que parte del CGBT y consta de tres tramos: un primer tramo sobre bandeja, con más de siete circuitos a 35 °C; un segundo tramo bajo tubo enterrado con 2 circuitos por tubo; un tercer tramo sobre bandeja con más de siete circuitos a 50°C. A este cuadro se conectan 4 equipos y dos cables que alimentan cuadros secundarios a los que se conectan cargas finales.

El cuadro secundario que alimenta las tomas de fuerza se denomina CC1. Se alimentan cuatro tomas de fuerza trifásicas y seis monofásicas.

El cuadro secundario al que se conectan las cargas de alumbrado se denomina CC2. Se alimenta desde un cable que consta de dos tramos: un primer tramo sobre bandeja con más de siete circuitos y un segundo tramo bajo tubo aéreo con 2 circuitos por tubo. El alumbrado normal consta de lámparas de mercurio de alta presión agrupadas en tres zonas de 5, 6 y 6 lámparas respectivamente. El alumbrado de emergencia consta de lámparas fluorescentes repartidas en dos zonas con 9 lámparas en cada una de ellas.

A continuación se muestra una tabla con la relación de cargas de la Instalación. Se especifica el número de cargas de ese tipo, el tipo de carga (monofásica o trifásica) y la potencia demandada por la carga en Watios. Se ha supuesto que todas las cargas tienen un factor de potencia de 0,85.

Tabla 1. Relación de cargas de la Instalación

CARGA	NÚMERO	TIPO	POTENCIA (W)
Cuadro CS1			
Equipo 1	1	III	10000
Equipo 2	1	III	20000
Equipo 3	1	III	30000
Equipo 4	1	III	5000
Cuadro CC1			38000
Toma de fuerza monofásica	6	II	3000
Toma de fuerza trifásica	4	III	5000
Cuadro CC2			7160
Lámpara de mercurio de alta presión	5	II	400
Lámpara de mercurio de alta presión	6	II	400
Lámpara de mercurio de alta presión	6	II	400
Lámpara fluorescente de emergencia	9	II	20
Lámpara fluorescente de emergencia	9	II	20

5.2. Cables Eléctricos de Baja Tensión

5.2.1. Generalidades

Los cables que este apartado comprende, se refiere a aquellos destinados fundamentalmente al transporte de energía eléctrica para tensiones nominales de hasta 1.000 V. Todos ellos no propagadores del incendio y llama, baja emisión de humos, reducida toxicidad y cero halógenos. Podrán ser en cobre o en aluminio.

Por su tensión nominal los cables serán 450/750 V con tensión de ensayo 2.500 V, o 0,6/1 kV con tensión de ensayo a 3.500 V.

Los cables serán por lo general unipolares, salvo cuando se indique lo contrario.

Todos los cables deberán ser dimensionados para:

- Admitir las cargas instaladas sin sobrecalentamientos.
- Resistir las solicitaciones térmicas frente a cortocircuitos, limitadas por los sistemas de protección diseñados y sin menoscabo de la selectividad en el disparo.
- Que las caídas de tensión a plena carga, cuando se parte de un Centro de Transformación propio (ITC-BT-19), deben ser iguales o inferiores al 4,5% en alumbrado y del 6,5% en fuerza, consideradas desde las bornas de baja del transformador hasta el punto más alejado de la instalación. Estas caídas hasta los Cuadros Secundarios de zona, deberán ser calculadas teniendo en cuenta las resistencias y reactancias de los conductores a la temperatura de servicio prevista para el conductor (70°C para cables termoplástico's y 90°C para cables termoestables) y 50Hz.

Las intensidades admisibles por los cables se calcularán de conformidad con el R.E.B.T., ITC-BT-07 e ITC-BT-19. En ningún caso se instalarán secciones inferiores a las indicadas en Proyecto, ni a 1,5 mm².

5.2.2. Tipos de Cables y su Instalación

En nuestra instalación industrial se usarán 2 tipos de cable teniendo en cuenta lo especificado en el REBT para derivaciones individuales e instalaciones interiores. Para la línea general de alimentación y los circuitos que alimentan cuadros se usarán cables unipolares del tipo RZ1-K y para los circuitos que alimentan las cargas se usarán del tipo ES07Z1-K.

Los cables del tipo RZ1-K son con conductor de cobre, de tensión nominal 0,6/1 kV, aislamiento de polietileno reticulado (XLPE) y cubierta de polivinilo de cloruro (PVC). La temperatura máxima en el conductor es de 90°C en servicio permanente.

Los cables del tipo ES07Z1-K son con conductor de cobre, unipolares, de tensión nominal 450/750 kV y aislamiento de polivinilo de cloruro (PVC). La temperatura máxima en el conductor es de 70°C en servicio permanente.

El tendido de la línea general de alimentación se realizará con conductor enterrado bajo tubo. Para este caso, el cable RZ1-K será multipolar.

Los cables que alimentan los cuadros secundarios irán tendidos en montaje superficial sobre bandeja perforada horizontal.

El cableado de los circuitos que alimentan las cargas se realizará con conductores en montaje superficial sobre una pared de madera o separadas una distancia inferior a 0,3 veces el diámetro del tubo.

5.3. Instalaciones Interiores

5.3.1. Generalidades

Cuando las instalaciones se alimenten directamente en Alta Tensión mediante un Centro de Transformación propio, se considerará que las instalaciones interiores de Baja Tensión tiene su origen en las bornas de salida en B.T. de los transformadores, en cuyo caso las caídas de tensión máximas admisibles serán del 4.5% para alumbrado y del 6.5% para fuerza.

Estas instalaciones, definidas en la ITC-BT-12 del R.E.B.T. como de “Enlace”, cuando partan de un Centro de Transformación propio constarán de los apartados que a continuación se describen.

5.3.2. Línea General de Alimentación (LGA)

Enlazará las bornas de B.T. de los transformadores con los interruptores de protección en B.T. de los mismos, situados generalmente en el Cuadro General de Baja Tensión (CGBT). Su cálculo y su diseño se realizará para transportar las potencias nominales de los transformadores que como suministro normal han de alimentar al cuadro CGBT.

5.3.3. Cuadro General de Baja Tensión (CGBT)

Está destinado a alojar los dispositivos de protección contra sobreintensidades y sobretensiones de las líneas de llegada procedentes de los transformadores de potencia que lo alimentan, así como de los correspondientes a las líneas de salida alimentadoras de Cuadros Secundarios de zona (CSs), que contienen además protecciones contra contactos indirectos.

5.3.4. Líneas de Derivación de la General (LDG) e Individuales (LDI)

Las LGD y LDI enlazarán el cuadro CGBT con los CSs.

Su cálculo y diseño se realizará conforme a las potencias instaladas y simultáneas, cumpliendo con los criterios que para ellas han quedado definidas en el apartado de “Generalidades” correspondiente a “Cables Eléctricos de Baja Tensión”.

5.3.5. Cuadros Secundarios

Los Cuadros Secundarios de zonas están destinados a alojar los sistemas de protección contra sobreintensidades, sobretensiones y contactos indirectos para todos los circuitos alimentadores de la instalación de utilización, como son puntos de luz, tomas de corriente, etc.

5.3.6. Instalaciones de Distribución

Las instalaciones de distribución cumplirán con las instrucciones ITC-BT-19, ITC-BT-20, ITC-BT-21, ITC-BT-27, ITC-BT-28, ITC-BT-29 e ITC-BT-30, en sus apartados correspondientes.

5.4. Puesta a Tierra

En relación con los riesgos de la instalación, esta no deberá suponer ningún riesgo hacia personas o animales domésticos, tanto en servicio normal como en avería, y se aplicaran las medidas de protección necesarias contra contactos directos e indirectos de acuerdo a la ITC-BT-24 y la norma UNE 20460. La puesta a tierra se establece con objeto de limitar la tensión que, con respecto a tierra, pueden presentar en un momento dado las masas metálicas, asegurar la actuación de las protecciones y eliminar el riesgo que supone una avería en el material empleado. La puesta a tierra es la unión eléctrica directa, sin fusibles ni protección alguna, de una parte del circuito eléctrico o de una parte conductora no perteneciente al mismo mediante una toma de tierra con un electrodo o grupos de electrodos enterrados en el suelo. Todo ello, con el objeto de conseguir que en el conjunto de las instalaciones, edificios y superficie próxima al terreno no existan diferencias de potencial peligrosas. Para la puesta a tierra de nuestra instalación usaremos un esquema TT (ver Figura 2).

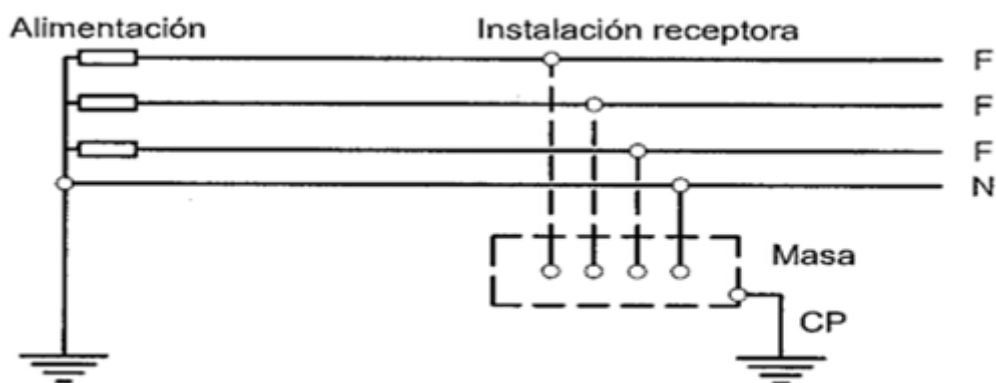


Figura 2. Esquema de conexión a tierra TT

5.5. Pararrayos

Esta instalación tiene como objetivo la protección del inmueble y su contenido contra las descargas atmosféricas, evitando la generación de diferencias de potencial entre las partes metálicas del mismo y, consecuentemente, descargas peligrosas para personas y equipos.

5.6. Batería de Condensadores

Para la compensación del factor de potencia de la instalación de BT se ha previsto la implantación de una Batería Fija de Condensadores de 20 kVAr conectada al CGBT a través de transformadores de intensidad y protegida con interruptor magnético.

Estas baterías serán de varios escalones que permitan la selección de potencia, según las características de la red en cada caso.

6 Introducción de Datos

Dado que vamos a comparar tres programas distintos de cálculo de instalaciones será necesaria una exhaustiva introducción de datos para asegurar que las tres instalaciones quedan en el mismo escenario.

En cuanto a los programas comerciales, aunque la forma de proceder es similar, se encontrarán diferencias en cuanto a parámetros definidos por defecto, entre otros, que varían en cada caso y que afectarían a parámetros de cálculo tan esenciales como la intensidad de diseño.

En la hoja de cálculo la introducción de datos es totalmente diferente a estos programas, como ya se definió anteriormente. Será necesario verificar que los datos introducidos van en consonancia con lo que se va obteniendo en las dos herramientas comerciales.

Al introducir la instalación propuesta en cada herramienta ya se pueden ver las diferencias en la introducción de datos que serán tratadas de forma específica a continuación. Sin embargo, cuando realmente se aprecian las diferencias o detalles de cada herramienta es cuando se comparan los resultados que se van obteniendo en cada caso. Es así como se han “corregido” ciertos parámetros de entrada de forma que se obtengan los resultados que permiten una comparación lo más exacta posible.

6.1. Cargas

Los datos que es necesario introducir en general son la potencia, el factor de potencia y la polaridad de la carga. A parte de esto, para cada herramienta se dan opciones más específicas como por ejemplo la distorsión armónica de la carga que no serán tratadas si no han sido tomadas en consideración en el cálculo de la instalación.

Las cargas que han sido “problemáticas” en cuanto a la homogeneidad de la introducción de datos son el alumbrado. Para las herramientas con las que se ha trabajado se tiene que:

- En Doc y Ecodial existen diferencias en este caso que se comentarán a continuación.
- En la hoja de cálculo es más sencillo y los datos necesarios son los mismos para cualquier tipo de carga.

6.1.1. Ecodial

En general, a partir de la potencia por luminaria y el número de luminarias se calcula la potencia activa que demanda la carga. El inconveniente en esta herramienta es que, caso de hacerlo así la intensidad de diseño obtenida no sería la misma que en las otras herramientas. Esto se debe a que la potencia activa se calcula a partir del tipo de

luminaria, la cantidad de luminarias y la potencia de reactancia auxiliar. Por ello, se introduce una potencia de reactancia auxiliar tal que la potencia activa obtenida sea la misma que en las otras herramientas, para $\cos\Phi=0,556$ (el que establece el reglamento para el cálculo de la intensidad de diseño de lámparas de descarga).

Por ejemplo, para una de las lámpara de mercurio de alta presión se introduce una potencia de reactancia auxiliar de 20 μF a coseno de Φ 0,556 de forma que se obtiene una potencia demandada por la carga de 2100 KW, muy próximo a los 2000 KW establecidos.

6.1.2. Doc

A diferencia de Ecodial, hay que introducir la longitud entre luminarias y el tipo de canalización de estos tramos de cable. Además, no se puede modificar el factor de potencia que resulta al seleccionar el tipo de carga. Por tanto, en algunas luminarias como las lámparas de mercurio de alta presión no se puede modificar el factor de potencia, que para este caso es 0,9 y es el mismo eligiendo o no compensación. Esto último es relevante ya que eligiendo la luminaria no compensada el factor de potencia resultante debería ser 0,556.

Según lo establecido en la ITC-BT-44.3.1, para el cálculo de la intensidad de diseño en el caso de lámparas de descarga hay que considerar un factor de potencia de 0,556 y se obliga a compensar este tipo de cargas para que el factor de potencia resultante sea 0,9 o mejor. Será aceptable un coeficiente diferente a 0,556 para el cálculo de la sección de los conductores, siempre y cuando el factor de potencia de cada receptor sea mayor o igual a 0,9 y si se conoce la carga que supone cada uno de los elementos asociados a las lámparas y las corrientes de arranque, que tanto éstas como aquéllos puedan producir. Pero en general, este no es un dato que nos proporcione el fabricante por tanto, en nuestro caso calcularíamos la intensidad de diseño de la primera forma.

Dado que en esta herramienta no se permite modificar el coseno de Φ a 0,556 en caso de lámparas de mercurio de alta presión la intensidad de diseño obtenida será mayor. Esto no estaría en concordancia con el reglamento a menos que se verifique la segunda condición.

En el caso de lámparas fluorescentes el factor de potencia depende de si se selecciona o no compensación. En el caso de elegir compensación el factor de potencia resultante es 0,51, muy próximo al que se está considerando ($\cos\Phi=0,556$).

6.2. Factores de Corrección

Las diferencias en los factores de corrección llevan a obtener distintas intensidades máximas admisibles y por tanto, secciones mayores o menores en algunos casos. Para tener el mismo escenario en las tres herramientas hay que corregir estas diferencias. Analizando los casos problemáticos se han encontrado discrepancias y valores por defecto que hay que modificar.

Las modificaciones en los factores de corrección se han hecho para los programas comerciales donde pueden venir valores prefijados que no coincidan con los estándares actuales de la Norma o que al ser tomados de la Normativa Europea difieran algo de los considerados en la Normativa Española. En la Hoja de cálculo los factores de corrección los indica el proyectista según las condiciones del tendido de cable y se han tomado de la última versión de la Norma UNE 20460-5-523.

6.2.1. Factor de Corrección por Resistividad del Terreno

6.2.1.1. Ecodial

En Ecodial el valor que se tiene por defecto para la resistividad del terreno es 2,5 K.m/W que es el valor estándar especificado por la norma UNE 20460-5-523.

6.2.1.2. Doc

Doc trae por defecto una resistividad del terreno de 1 K.m/W. Hay que escribir 2,5 K.m/W para que no se aplique un factor corrector distinto de uno. Esto puede deberse a que en la nueva versión de la UNE 20460-5-523 se considera una resistividad estándar del terreno de 2,5 K.m/W frente a 1 K.m/W (referencia anterior).

6.2.2. Factor de Corrección por Temperatura

Los estándares de temperatura en España son 40°C al aire y 25°C para instalaciones soterradas. Mientras no se justifiquen otras temperaturas, son las referencias que hay que tener en cuenta a la hora de elegir las tablas en las que buscar las intensidades admisibles.

En la versión actual de la norma UNE 20460-5-523 figuran como referencia estándar 30°C al aire y 20°C en instalaciones enterradas. Tal referencia no es válida en España, donde se consideran 40 °C al aire y 25 °C en instalaciones enterradas. Al traducir la norma en este caso se ha cometido el error de plasmar esa referencia de 30 y 20 °C (típica de otros países) que no se cometió en la versión anterior de la norma (versión de 1994). Para demostrarlo basta leer lo que dice en el anexo nacional (pág. 2 UNE 20460-5-523 [1994]):

Segunda parte (anexo A): es la adopción del Documento R-64001 de CENELEC que completa el Documento de Armonización HD 384.5.523 S1 tal y como se indica en los antecedentes del mismo, y contiene las intensidades para ambientes de 40°C, temperatura considerada como ambiente normal en España para instalaciones eléctricas, para ello se ha aplicado el factor de corrección correspondiente a los valores que aparecen en el documento original donde se dan las intensidades para ambientes de 30°C, evitándose de esta manera la aplicación sistemática de factores de corrección o lo que sería más grave, que no se aplicara este factor de corrección.

Como vemos, en la versión de 1994 se tuvo en cuenta el ambiente de 40°C en instalaciones al aire en España, y para evitar errores las tablas de referencia figuran a 40°C directamente.

6.2.2.1. Ecodial

En Ecodial, en el informe de cálculo generado por el programa se especifica que los cálculos se hacen en base al informe técnico de CENELEC. Por tanto, se están considerando los estándares de temperatura de 30°C al aire y 20°C en instalaciones enterradas que como ya se ha comentado no coinciden con los estándares establecidos en España. Además, las intensidades máximas admisibles para los distintos modos de instalación también se están consultando para estas temperaturas. Es lógico puesto que Schneider es una compañía Europea y se rige de acuerdo a la norma del Comité Europeo de Normalización Electrotécnica. Sin embargo, en algunos países como es el caso de España se establecen estándares propios que deben ser tenidos en cuenta si usamos una norma Europea.

6.2.2.2. Doc

En Doc, en la pestaña de propiedades generales se ha seleccionado el cálculo de los cables de acuerdo a la norma UNE 20460. Se ha comprobado que los factores de temperatura obtenidos coinciden con los estándares de 40°C para instalaciones al aire y 25°C para instalaciones soterradas.

6.2.3. Factor de Corrección por Agrupación de Cables

Cuando se utilizan varios cables por fase hay que aplicar también coeficientes de corrección por agrupamiento de circuitos, porque igualmente se trata de grupos de cables que se influyen eléctricamente aunque pertenezcan al mismo circuito.

Cuando se realiza una instalación con varios cables por fase no hay que olvidar que:

- A efectos de cálculo debemos aplicar un coeficiente de corrección no superior a 0,9 para compensar los posibles desequilibrios de intensidades entre los cables conectados a la misma fase.
- A la hora de realizar la instalación debemos emplear conductores del mismo material, sección y longitud, no tener derivaciones a lo largo de su recorrido y además los cables se han de agrupar en ternas al tresbolillo en uno o varios niveles.

En la norma UNE 20460-5-523(2004) se especifican los factores de corrección por agrupamiento de varios circuitos en cables instalados en conductos enterrados en la Tabla 52 – E3 y los correspondientes a instalaciones al aire en la Tabla A.52-3.

6.2.3.1. Ecodial

En Ecodial los factores de corrección obtenidos en este caso difieren algo de los de la tabla mencionada. En concreto, en el cálculo de la línea general de alimentación el factor de corrección por agrupamiento obtenido para cinco cables por fase es 0,6 en lugar de 0,65.

6.2.3.2. Doc

En Doc, al igual que en Ecodial, se obtiene un factor corrector de 0,6 para la agrupación de cables de la Línea General de Alimentación.

7 Comparación de Resultados

Como ya se indicó en la Metodología, es necesario identificar las magnitudes que serán comparadas en este análisis. El cálculo de una Instalación Eléctrica abarca el dimensionado de los cables y de la aparamenta principalmente.

El cálculo de la sección de cable se basa en requerimientos técnicos y se realiza a partir de tres criterios: el criterio térmico, que asegura la posibilidad de transmitir potencia suficiente en régimen permanente; el de caída de tensión, que asegura que se mantenga entre los valores requeridos por la Normativa aplicable; y el de cortocircuito, que asegura que el cable resiste la condición de cortocircuito un tiempo lo suficientemente largo para que la protección asociada al cable actúe. La combinación de estos tres casos nos da la solución técnica. Por tanto, en cuanto a la obtención de la sección de cable se van a comparar las intensidades de diseño y las caídas de tensión. Para poder llevar a cabo este análisis comparativo se van a comparar primero las secciones obtenidas y luego se tomará para cada cable la mayor sección obtenida en alguno de los programas. Si no lo hacemos de esta forma no tendremos un escenario homogéneo para la comparación de las caídas de tensión.

En cuanto al dimensionado de la aparamenta, que se trata de forma específica en el capítulo de protecciones, se van a comparar las intensidades máximas de cortocircuito en cada cable.

Ya se ha dicho que la comparación es un proceso cíclico porque a medida que se comparan resultados se corregirán diferencias que permitan acotar el error de los resultados obtenidos. Por tanto, para cada magnitud identificada para el análisis se tratarán los desajustes que se han encontrado y corregido hasta que el error se ha considerado admisible. Tras esto se plasmarán los resultados finales y se comentarán para las tres herramientas en las que se ha trabajado.

A continuación se especifican las normas seguidas en cada herramienta para el cálculo de las magnitudes que se han identificado para el análisis comparativo. Es esencial saber que norma de referencia se ha tomado para los cálculos ya que podría haber pequeñas diferencias en algunos parámetros según la norma usada.

En la Hoja:

- Las intensidades máximas admisibles siguen la norma UNE 20460-5-523.
- Las caídas de tensión se calculan según el ANEXO 2 del REBT.
- Las corrientes de cortocircuito se calculan según lo especificado en la norma UNE-EN 60909-0

En Doc y Ecodial:

- Las intensidades máximas admisibles siguen las normas UNE 20460-5-523
- Las caídas de tensión se rigen por la norma IEC 6034-5-52 sección 525.

- Las intensidades de cortocircuito se calculan según lo especificado en la norma UNE-EN 60909-0.

7.1. Secciones

7.1.1. Cálculo de secciones

La determinación reglamentaria de la sección de un cable consiste en calcular la sección mínima normalizada que satisface simultáneamente las tres condiciones siguientes:

- a) Criterio de la intensidad máxima admisible o de calentamiento. La temperatura del conductor del cable, trabajando a plena carga y en régimen permanente, no deberá superar en ningún momento la temperatura máxima admisible asignada de los materiales que se utilizan para el aislamiento del cable. Esta temperatura se especifica en las normas particulares de los cables y suele ser de 70°C para cables con aislamiento termoplásticos y de 90°C para cables con aislamientos termoestables.
- b) Criterio de la caída de tensión. La circulación de corriente a través de los conductores, ocasiona una pérdida de potencia transportada por el cable, y una caída de tensión o diferencia entre las tensiones en el origen y extremo de la canalización. Esta caída de tensión debe ser inferior a los límites marcados por el Reglamento en cada parte de la instalación, con el objeto de garantizar el funcionamiento de los receptores alimentados por el cable. Este criterio suele ser el determinante cuando las líneas son de larga longitud por ejemplo en derivaciones individuales que alimenten a los últimos pisos en un edificio de cierta altura.
- c) Criterio de la intensidad de cortocircuito. La temperatura que puede alcanzar el conductor del cable, como consecuencia de un cortocircuito, no debe sobrepasar la temperatura máxima admisible de corta duración (para menos de 5 segundos) asignada a los materiales utilizados para el aislamiento del cable. Esta temperatura se especifica en las normas particulares de los cables y suele ser de 160°C para cables con aislamiento termoplásticos y de 250°C para cables con aislamientos termoestables. Este criterio, aunque es determinante en instalaciones de alta y media tensión no lo es en instalaciones de baja tensión ya que por una parte las protecciones de sobreintensidad limitan la duración del cortocircuito a tiempos muy breves, y además las impedancias de los cables hasta el punto de cortocircuito limitan la intensidad de cortocircuito.

7.1.2. Análisis comparativo

Al calcular la instalación se obtiene para cada cable la sección que ha dimensionado la herramienta. Para comparar los resultados obtenidos en un escenario homogéneo es necesario que todos los cables tengan la misma sección ya que algunos parámetros como la caída de tensión dependen de esta.

Las secciones obtenidas en cada herramienta no son iguales en algunos casos que se verán a continuación. Como se especifica en el apartado de cálculo de secciones, ésta se determina para cumplir el criterio térmico y de caída de tensión (no se tendrá en cuenta el criterio de la intensidad de cortocircuito porque se trata de una instalación de Baja Tensión). Por tanto, en los cables con secciones distintas se compararán las variables que intervienen en el criterio térmico y de caída de tensión.

7.1.2.1. Diferencias encontradas

Antes de obtener las secciones definitivas, que serán las más restrictivas obtenidas para algunas de las tres herramientas en cada cable, se van a comentar las diferencias en los resultados.

Las diferencias se analizarán para los casos más representativos encontrados. Para el resto de cables que no se comentan, las soluciones obtenidas en las herramientas han sido las mismas o muy próximas.

Línea General de Alimentación

En cuanto a la sección de la línea general de alimentación se han obtenido diferentes soluciones para la sección y el número de conductores por fase. Se va a hacer uso del programa PysmiTool, una herramienta de Prysmian para calcular secciones de conductores en BT. Los cálculos se realizan según los criterios del REBT 2002 y por tanto siguiendo la norma UNE 20460-5-523(2004). Para obtener el resultado basta con introducir la ITC-BT objeto de cálculo (vivienda, local de pública concurrencia, red de distribución...), el sistema de instalación y los valores cuantitativos de la línea (intensidad o potencia, tensión, longitud, caída de tensión, temperatura del entorno...). Se ha decidido usar esta herramienta para verificar los resultados obtenidos porque sigue la norma electrotécnica nacional y por su sencillez de uso. Además, se puede usar para otros cables en los que se hayan obtenidos soluciones distintas y se quiera comprobar cuál es la mejor solución. Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Resumen características cálculo Baja Tensión (enterrados)

Tipo de Instalación I: ITC-BT 14 Línea general de alimentación
Tipo de Instalación II: Bajo tubo, canal o conducto de sección no circular
Tipo de Instalación III: Enterrados

Tipo de instalación: D

Nombre del cable seleccionado: Afumex 1000 V IrisTech (AS) (Cable de 1000 V AS)

Características instalación

Intensidad de corriente: 1155.00 A	Tipo de corriente utilizada: Alterna Trifásica
Potencia activa: 680.18 kW	Tensión utilizada: 400 V
Potencia aparente: 800.21 kVA	Composición de cable: Conductores aislados o cables unipolares
Cos φ: 0.85	Intensidad de cortocircuito: 21.17 kA
Rendimiento (motores): --	Tiempo disparo protecciones: 0.10 s
Coefficiente por tipo de instalación: 1 (otros)	% Caída de tensión: --
Coefficiente por tipo de receptor: 1 (otros)	Caída de tensión: --
Otro coeficiente: 1.00	Longitud de la línea: --
Temperatura suelo: 25 °C (1.00)	Ω/km
Resistividad térmica: 2.50 (1.00)	Tipo de instalación bandejas: --
Profundidad: 70 (1.00)	Numero de bandejas: --
nº de circuitos adicionales: 0 (1.00)*	nº de circuitos adicionales: --
Tipo de instalación agrupamiento: Un circuito completo por tubo	Factor Corrección por circuitos en 1 capa (bandejas): --
	nº de capas: --
	Factor corrección capas: --

* Ver el valor final de aplicación en el cuadro de Resultado

Resultado

Sección por intensidad: 300 mm²	Sección por cortocircuito: 50 mm²	Sección por caída de tensión: No calculado
Número de conductores por fase: 5	Número de conductores por fase: 1	Número de conductores por fase: No calculado
Intensidad máxima admisible del circuito: 1235.00 A	Sección: 300 mm² nº conductores por fase: 5	

NOTA: factor de corrección por agrupación final (nº cond por fase + circuitos ad.): 0.65



Figura 3. Resultados del dimensionado de la Línea General de Alimentación en Prysmitool

Se ha tomado que la separación entre conductores es nula entendiéndola esta separación como la que hay entre los conductores de la misma fase. También se ha tomado que el circuito completo irá tendido bajo un solo tubo. El factor de corrección obtenido se corresponde con la agrupación de varios cables por fase. El resultado obtenido será el que se tomará para las tres herramientas.

Línea de Derivación Individual que alimenta el Cuadro CS1

Para la sección de esta línea de derivación individual también se han obtenido distintas soluciones en los programas con respecto a la Hoja.

- En Ecodial la sección mínima admisible es 120 mm² en lugar de 150 mm² como en la Hoja debido a las diferencias en las intensidades de diseño. Por tanto se tomará 150 mm².
- En Doc se obtiene una sección muy pequeña, en concreto, 95 mm². Si consultamos la norma UNE 20460-5-523, en la Tabla A.52-2 bis (intensidades admisibles en amperios para una temperatura de 25°C en el terreno) la intensidad máxima admisible para 95 mm² es 202 A que multiplicada por el factor corrector de este cable (0,8) resulta 161,6 A que no se corresponde con los 195,2 A que muestra Doc. Por tanto, el valor de intensidad admisible que toma Doc no es correcto para el tendido indicado.

Cable que alimenta el Cuadro CC1

En cuanto al cable que alimenta el cuadro CC1 (cuadro de tomas de fuerza) los resultados de Doc y Ecodial coinciden pero los de la Hoja no. En este caso el criterio

más restrictivo es el de caída de tensión ya que la caída de tensión acumulada es casi del 4%.

- En Ecodial, en los parámetros generales se ha seleccionado que la caída de tensión máxima para un cable sea del 4%. En los resultados se proporciona, además de la caída de tensión trifásica, la caída de tensión entre fases. Para una sección de 16 mm² se supera el 4% de caída de tensión entre fases. Para comprobar que se trata de esto se ha modificado en los parámetros generales la caída máxima autorizada para un cable al 5% pero aun así, el resultado sigue siendo 25mm².
- En Doc no se da la opción de seleccionar la máxima caída de tensión acumulada para un cable y el resultado obtenido es el mismo que en Ecodial.

Si la mayor sección no se debe ni al criterio térmico ni al de caída de tensión quizás se esté teniendo en cuenta el criterio de intensidad de cortocircuito que no se ha considerado en la Hoja. Pero como se especificó al principio de este apartado, este criterio no suele aplicarse en Instalaciones de Baja Tensión por lo que simplemente tomaremos para este cable la sección de 25 mm² que es la mayor fijada por alguna de las herramientas.

Cable que alimenta el Cuadro CC2

En cuanto al cable que alimenta el cuadro CC2 (cuadro de alumbrado) y los que alimentan las cargas de alumbrado el resultado más restrictivo lo proporciona Ecodial.

Conductor de Neutro

En cuanto a la sección del neutro se tienen consideraciones diferentes para las tres herramientas. Según la ITC-BT-19 en instalaciones interiores para tener en cuenta las corrientes armónicas debidas a cargas no lineales y posibles desequilibrios, salvo justificación por cálculo, la sección del conductor de neutro será como mínimo igual a la de las fases. Para las herramientas utilizadas se tiene lo siguiente:

- En la Hoja no se ha contemplado el cálculo de esta sección de cable.
- En Ecodial la sección del neutro es igual a la de las fases.
- En Doc se ha seleccionado la optimización automática del neutro por lo que en los casos permitidos por la norma propone el neutro con la mitad de sección que las fases.

7.1.2.2. Resultados definitivos

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada herramienta. En cada caso se empleará la máxima sección obtenida para alguna de las tres herramientas.

Tabla 2. Análisis comparativo. Secciones de cable

Cables	Hoja de cálculo				DOC				ECODIAL			
	Fase		Neutro		Fase		Neutro		Fase		Neutro	
	Sección mm2	Nº cond	Sección mm2	Nº cond	Sección mm2	Nº cond	Sección mm2	Nº cond	Sección mm2	Nº cond	Sección mm2	Nº cond
Línea general de Alimentación	300	4	-	-	300	5	300	5	300	3	150	3
Cable a cuadro CS1	150	1	-	-	150	1	95	1	150	1	150	1
Cable a cuadro de tomas de fuerza	25	1	-	-	25	1	25	1	25	1	25	1
Cable a cuadro de Alumbrado	25	1	-	-	25	1	16	1	25	1	25	1
Cable a toma de fuerza 1F	6	1	-	-	6	1	6	1	6	1	6	1
Cable a toma de fuerza 3F	2,5	1	-	-	2,5	1	2,5	1	2,5	1	2,5	1
Cable a lámpara de mercurio 1	6	1	-	-	6	1	6	1	6	1	6	1
Cable a lámpara de mercurio 2	4	1	-	-	4	1	4	1	4	1	4	1
Cable a luminaria de emergencia	2,5	1	-	-	2,5	1	2,5	1	2,5	1	2,5	1

7.1.3. Conclusiones

Tras el análisis comparativo podemos concluir que las diferencias en los resultados de las secciones de cable se deben a diversas causas entre las que se encuentran:

- Los factores de corrección no coinciden y como consecuencia las intensidades máximas admisibles son ligeramente diferentes.
- Las intensidades máximas admisibles en Ecodial se obtienen de las tablas de temperaturas estándares de 30°C para instalaciones al aire y 20°C para instalaciones soterradas en lugar de los valores fijados en España: 40°C y 25°C respectivamente.
- En Doc las intensidades máximas obtenidas en algunos casos no coinciden con los valores de las tablas de la norma UNE 20460-5-523.
- Las intensidades de diseño difieren en algunos cables. Estas diferencias serán tratadas en apartados posteriores.

7.2. Intensidades de Diseño

El análisis de las intensidades de diseño es fundamental ya que dicha magnitud interviene en el cálculo de parámetros como la caída de tensión y forma parte del criterio térmico necesario para el cálculo de las secciones.

Las intensidades de diseño se obtienen a partir de la potencia, el factor de potencia y la tensión de la carga. En los cables con intensidades de diseño distintas se compararán estas magnitudes.

Los resultados obtenidos para los cables más significativos de la Instalación se muestran a posteriori. Se proporciona el error de Doc y Ecodial con respecto a la Hoja de cálculo.

Tabla 3. Análisis comparativo. Intensidades de diseño

Cables	Hoja de cálculo	DOC		ECODIAL	
	lb A	lb A	Error %	lb A	Error %
Línea general de Alimentación	1156,07	1060,30	-8,28	1155,00	-0,09
Cable a cuadro CS2	255,02	258,50	1,36	255,00	-0,01
Cable a cuadro CS1	187,28	181,20	-3,25	182,00	-2,82
Cable a cuadro de tomas de fuerza	51,68	53,90	4,30	51,60	-0,15
Cable a cuadro de Alumbrado	12,17	13,20	8,46	19,60	61,05
Cable a toma de fuerza 1F	15,35	16,10	4,89	15,30	-0,33
Cable a toma de fuerza 3F	8,50	8,90	4,71	8,49	-0,12
Cable a lámpara de mercurio 1	15,65	9,70	-38,02	16,40	4,79
Cable a lámpara de mercurio 2	18,78	11,70	-37,70	19,60	4,37
Cable a luminaria de emergencia	1,41	1,70	20,57	1,47	4,26

7.2.1. Ecodial

Comparando los resultados entre Ecodial y la Hoja de cálculo se observa lo siguiente:

- Las intensidades obtenidas en la Hoja y Ecodial son, en general, muy próximas, con errores en torno al 0,1%.
- Los cables que alimentan las cargas de alumbrado presentan errores superiores al 4%. Estos errores se deben a que la potencia demandada que se está considerando para estas cargas en Ecodial difiere un poco de las potencias establecidas para las luminarias. Esta cuestión se trató en un capítulo anterior sobre las cargas de alumbrado.
- El error más significativo es del 61,05% y se tiene en el cable que alimenta el cuadro de alumbrado (cuadro CC2). Si nos fijamos, todas las cargas de este cuadro son monofásicas por lo que se han conectado a las fases de la forma más equilibrada posible. Esto hace que la máxima intensidad demandada para una de las fases sea 19,6 A. En la hoja de cálculo no se tiene en cuenta el equilibrado de las cargas por lo que la intensidad de diseño resulta inferior. Esto podría ser un problema porque no se están considerando 7,5 A que circularían por el cable que alimenta el cuadro de alumbrado en condiciones normales.
- Los resultados para el circuito que alimenta el cuadro de tomas de fuerza son prácticamente iguales. En este caso, debido a que el equilibrado de las cargas es perfecto el cálculo de la intensidad de diseño mediante la suma

de potencias coincide con el cálculo mediante la suma de intensidades de diseño.

7.2.2. Doc

Comparando los resultados entre Doc y la Hoja de cálculo se observa lo siguiente:

- Los valores obtenidos en Doc presentan errores en torno al 8% en general.
- Los mayores errores se tienen en los cables que alimentan el alumbrado, que en Doc son un 38% inferior a los valores de la Hoja. Como se comentó en el capítulo anterior, los factores de potencia difieren debido a que en Doc en lugar de tener en cuenta un factor de 0,556 para lámparas de descarga se está usando el factor que se tendría estando la carga compensada (0,9).
- En el caso de los circuitos que alimentan las tomas de fuerza también se tienen errores significativos. Esto se debe a que en el cálculo de la intensidad de diseño Doc emplea la tensión real para esa carga, es decir, tiene en cuenta la caída de tensión en ese punto de la instalación. Como consecuencia, se obtienen intensidades de diseño ligeramente superiores.
- El error de la intensidad de diseño por el circuito que alimenta el cuadro de alumbrado es menor que en el caso de Ecodial. También en Doc se tiene en cuenta el equilibrado de las cargas pero, debido a que las intensidades demandadas por el alumbrado en Doc son inferiores, el resultado es una intensidad más pequeña en el cable que alimenta el cuadro y por tanto, más próxima al valor que se obtiene en la Hoja.
- El error de la intensidad del circuito que alimenta el cuadro CS1 es negativo a pesar de que las intensidades del cuadro de tomas de fuerza, del cuadro de alumbrado y del resto de cargas conectadas son mayores en Doc que en la hoja. Por tanto, con el cálculo de la intensidad de diseño por el método de suma de potencias al final obtenemos prácticamente el mismo resultado que con el método de la suma de intensidad de diseño en circuitos aguas arriba.

7.2.3. Conclusiones

Tras el análisis comparativo podemos concluir que las diferencias en las intensidades de diseño obtenidas se deben a diversas causas entre las que se encuentran:

- Las intensidades de diseño en la Hoja se obtienen a partir de la suma de potencias de los elementos conectados al cuadro mientras que en las otras herramientas se hace sumando las intensidades de diseño. En la práctica se emplea la suma de potencias por comodidad y porque el error no es significativo. Esta diferencia hace que las secciones mínimas admisibles sean distintas y dificulta el hecho de llevar las tres instalaciones al mismo escenario.
- En la Hoja no se tiene en cuenta el equilibrado de las cargas monofásicas.

- En las cargas de alumbrado se observan varias diferencias:
 - En Doc los factores de potencia considerados no son los indicados en el caso de lámparas de descarga.
 - En Ecodial la potencia demandada por las cargas de alumbrado difiere un poco de la potencia demandada establecida en la Instalación para estas cargas.
- En Doc la tensión que se toma para el cálculo de la intensidad de diseño tiene en cuenta la caída de tensión en ese punto de la instalación.

7.3. Caídas de Tensión

Para comparar las caídas de tensión se extraerán para cada herramienta, con las instalaciones en el mismo escenario, los parámetros necesarios para el cálculo de estas, en concreto, las resistencias, las reactancias, las intensidades de diseño y el factor de potencia.

Resistencias

Para el cálculo de la resistencia se pueden tomar dos opciones:

- a) Calcular la resistencia a la temperatura real del cable.
- b) Calcular la resistencia a la temperatura máxima permitida por el aislamiento.

El segundo caso es el más desfavorable y nos ahorramos el cálculo de la temperatura real del conductor. Para cables termoplásticos la máxima temperatura soportada en régimen permanente es 70°C y para termoestables 90°C.

En cuanto a las herramientas utilizadas se tiene que:

- En Ecodial no se proporcionan las resistencias de los circuitos por lo que no se sabe a qué temperatura se realiza el cálculo de la resistencia.
- En Doc, aunque se proporciona la resistencia del cable a la temperatura ambiente, a 20°C y a 80°C no se indica cuál se emplea para el cálculo de la caída de tensión.
- En la Hoja se calcula la resistencia a la máxima temperatura permitida por el aislamiento, el caso más restrictivo.

No tiene sentido comparar las resistencias porque no sabemos a qué temperatura se calculan en Doc. En el apartado posterior de comparación de las intensidades de cortocircuito se compararán las resistencias a 20°C. El error que se obtenga en ese caso será el que podemos esperar para las resistencias empleadas en el cálculo de las caídas de tensión.

Reactancias

A continuación se muestran las reactancias de la Hoja y de Doc (estas magnitudes no se proporcionan en Ecodial). El error de las reactancias se ha calculado como el error que presentan los valores de la Hoja respecto a Doc puesto que en la hoja se desprecia la reactancia para secciones menores de 120 mm².

Tabla 4. Análisis Comparativo. Reactancias de cable

Cables	Hoja de cálculo		Doc
	X Ω	Error %	X Ω
Línea general de Alimentación	0,000015	-97,61	0,000628
Cable a cuadro CS1	0,003441	-69,00	0,011100
Cable a cuadro de tomas de fuerza	0,000000	-100,00	0,009900
Cable a cuadro de Alumbrado	0,000000	-100,00	0,008250
Cable a toma de fuerza 1F	0,000000	-100,00	0,004185
Cable a toma de fuerza 3F	0,000000	-100,00	0,044550
Cable a lámpara de mercurio 1	0,000000	-100,00	0,005580
Cable a lámpara de mercurio2	0,000000	-100,00	0,002475
Cable a luminaria de emergencia	0,000000	-100,00	0,005940

Observando la tabla anterior se puede ver que los errores obtenidos son grandes. El cálculo de las reactancias en las herramientas comparadas es el siguiente:

- En la Hoja se ha hecho el cálculo de acuerdo a lo especificado en el REBT.
- En Doc se ha seguido la norma UNE 20460.

En el caso de la Hoja las caídas de tensión obtenidas serán menos restrictivas ya que se desprecia la reactancia para secciones inferiores a 120 mm².

Intensidades de diseño

En cuanto a las intensidades de diseño ya se ha visto en un apartado anterior el error obtenido en cada caso. De este apartado se puede deducir para las herramientas comparadas lo siguiente:

- Dado que en Doc los errores con respecto a la Hoja eran grandes se puede esperar el mismo comportamiento para las caídas de tensión.
- En Ecodial los resultados fueron muy similares por lo que no se arrastrará tanto error en esta magnitud.

Factores de potencia

Respecto a los factores de potencia se tiene que:

- En la hoja de cálculo se emplea el factor global 0,85.
- En Doc se calcula el factor de potencia para cada circuito y además en el caso de las cargas de alumbrado ya se vio que se emplean factores de potencia distintos.
- En Ecodial se puede esperar que se emplee el factor global 0,85.

Los resultados obtenidos en cada herramienta y los errores relativos de los resultados de Doc y Ecodial respecto a la Hoja de cálculo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 5. Análisis Comparativo. Caídas de tensión

Cables	Hoja de cálculo	Doc		Ecodial	
	$\Delta U/U$ %	$\Delta U/U$ %	Error %	$\Delta U/U$ %	Error %
Línea general de Alimentación	0,122	0,250	104,92	0,230	88,52
Cable a cuadro CS1	1,726	1,720	-0,35	2,137	23,81
Cable a cuadro de tomas de fuerza	1,308	1,080	-17,43	1,076	-17,74
Cable a cuadro de Alumbrado	0,205	0,220	7,32	0,256	24,88
Cable a toma de fuerza 1F	1,831	1,820	-0,60	1,902	3,88
Cable a toma de fuerza 3F	1,210	1,190	-1,65	1,257	3,88
Cable a lámpara de mercurio 1	1,628	1,540	-5,41	1,813	11,36
Cable a lámpara de mercurio2	1,221	1,160	-5,00	1,344	10,07
Cable a luminaria de emergencia	0,352	0,370	5,11	0,384	9,09

Este análisis es más complejo que los anteriores porque intervienen varias magnitudes que difieren en las tres herramientas. En concreto, se está arrastrando el error de las intensidades de diseño, el de las reactancias y el de los factores de potencia, aunque este último con apenas repercusión.

7.3.1. Ecodial

En general, las caídas de tensión son superiores en Ecodial. A pesar de que las intensidades de diseño obtenidas en las dos herramientas son prácticamente iguales los errores de las caídas de tensión son grandes. Estos errores seguramente se deban a las diferencias en las resistencias y sobre todo las reactancias pero debido a que no se proporcionan en Ecodial no se pueden comparar.

7.3.2. Doc

Si se comparan los resultados de Doc con respecto a la Hoja se observa lo siguiente:

- En general, las caídas de tensión son inferiores en Doc. No es lo que cabría esperar ya que si las reactancias son mayores y las intensidades de diseño también son mayores en general (se ha visto en el apartado anterior) deberían obtenerse unas caídas de tensión superiores en Doc.
- El error más significativo se tiene para la Línea General de Alimentación. Al contrario de lo ocurre en general, la caída de tensión en Doc es algo más del doble que la de la Hoja. Esta diferencia de 0,5 V se debe a la diferencia en las reactancias y puede ser significativa para la caída de tensión acumulada en determinadas cargas ya que podría superarse el límite en Doc pero no en la Hoja de cálculo.

7.3.3. Conclusiones

Tras el análisis comparativo se puede concluir que las diferencias en las caídas de tensión obtenidas se deben a que:

- Se arrastra el error de las intensidades de diseño que se vio en el apartado anterior. Este error era más significativo para Doc que para Ecodial.
- El hecho de despreciar las reactancias en la Hoja para secciones inferiores a 120 mm² hace que se obtengan caídas de tensión inferiores en este caso. A pesar del error obtenido se considerará admisible ya que esta consideración de cálculo de las reactancias se especifica en el REBT.

7.4. Intensidades de Cortocircuito

Para comparar las intensidades de cortocircuito se extraerán para cada herramienta, con las instalaciones en el mismo escenario, los parámetros necesarios para el cálculo de estas intensidades, en concreto las resistencias y reactancias de cortocircuito y finalmente las intensidades de cortocircuito máximas.

Para analizar las desviaciones en los resultados se describirá el cálculo según norma de las impedancias de cortocircuito que ha seguido cada herramienta. Finalmente se concluirá si los resultados obtenidos son admisibles.

Según la norma EN 60909-0:2001 la corriente de cortocircuito inicial simétrica, I_k'' , se debe calcular en general mediante la ecuación (4) con la fuente de tensión equivalente $cU_n/\sqrt{3}$ en el punto de defecto y la impedancia de cortocircuito $Z_k = R_k + jX_k$.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} \quad (1)$$

donde

R_k y X_k son la suma de las resistencias y reactancias del sistema de secuencia directa respectivamente, conectadas en serie.

7.4.1. Cálculo de las Impedancias de Cortocircuito

7.4.1.1. Doc y Ecodial

El cálculo de las resistencias y reactancias de cortocircuito en Doc y Ecodial se ha hecho según lo establecido en la norma IEC 60909-0 y se detalla a continuación.

Resistencia

Para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas, la resistencia R_L de las líneas se calcula a la temperatura de 20°C, según la norma UNE-EN 60909-0, apartado 2.4. La resistencia se puede determinar a partir de la sección nominal y de la resistividad, mediante la expresión:

$$R_{L20} = \rho \frac{L}{S} \quad (2)$$

Reactancia

La reactancia del cable se calcula, según el Informe Técnico CEI 60909-2, aplicando la siguiente fórmula:

$$X_L = f \cdot \mu_0 \cdot \left(\frac{1}{4} + \ln \frac{d}{r} \right) \cdot L \quad (3)$$

$$r = \sqrt{\frac{S}{\pi}} \quad (4)$$

donde:

X_L es la reactancia en mΩ;

f es la frecuencia de la red (50 Hz);

r es el radio de un conductor simple. En el caso de haces de conductores, r se sustituirá por $r_B = \sqrt[n]{nrR^{n-1}}$, donde R es el radio del haz.

$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m;

$d = \sqrt{d_{L1L2} d_{L2L3} d_{L3L1}}$ es la distancia media geométrica entre conductores;

7.4.1.2. Hoja de Cálculo

Resistencia

A diferencia de la norma, la resistencia del cable para el cálculo de las corrientes de cortocircuito máximas se calcula no para 20°C (temperatura más desfavorable para este caso) si no para la temperatura máxima que soporta el aislamiento (70°C en caso de aislamiento de PVC y 90°C en caso de XLPE y EPR). En un capítulo posterior se tratará la corrección de este error entre otros y los resultados que se muestran en este apartado serán los obtenidos tras dicha modificación.

Reactancia

Según el REBT la reactancia, X , de los conductores varía con el diámetro y la separación entre conductores. En el caso de redes de distribución aéreas trenzadas es sensiblemente constante al estar los conductores reunidos en haz, siendo del orden de $X=0,1\Omega/\text{km}$, valor que se puede utilizar para los cálculos sin error apreciable. En ausencia de datos se puede estimar el valor de la reactancia inductiva como $0,1\Omega/\text{km}$, o bien como un incremento adicional de la resistencia. Así podemos suponer que para un conductor cuya sección sea:

Sección	Reactancia inductiva (X)
$S \leq 120 \text{ mm}^2$	$X \cong 0$
$S = 150 \text{ mm}^2$	$X \cong 0,15 R$
$S = 185 \text{ mm}^2$	$X \cong 0,20 R$
$S = 240 \text{ mm}^2$	$X \cong 0,25 R$

Figura 4. Valores aproximados de la reactancia inductiva según el REBT

Para secciones menores o iguales de 120 mm^2 , como es habitual tanto en instalaciones de enlace como en instalaciones interiores, la contribución a la caída de tensión por efecto de la inductancia es despreciable frente al efecto de la resistencia.

7.4.2. Análisis comparativo

7.4.2.1. Diferencias encontradas

Antes de obtener los resultados definitivos se han ido depurando los valores en la Hoja tras realizar algunas modificaciones y también se ha corregido la selección de algunos datos en los programas. Los problemas que han surgido hasta llegar al resultado final se comentan a continuación:

- Tras conocer el cálculo de las impedancias en las tres herramientas podemos esperar que:
 - Las intensidades de cortocircuito sean inferiores en la hoja de cálculo respecto de Doc. Sin embargo, las intensidades obtenidas son superiores. Analizando las ecuaciones de la hoja de cálculo vemos que solo se está teniendo en cuenta la impedancia del cable que alimenta el cuadro donde se conecta el cable para el que se calcula la intensidad de cortocircuito máxima y no la impedancia desde el origen de la instalación. En consecuencia, la impedancia total es menor y por tanto, la intensidad de cortocircuito obtenida mayor.
 - Las intensidades de cortocircuito sean inferiores en la hoja de cálculo respecto de Ecodial. Pero, ocurre lo mismo que en el caso anterior.

Esta desviación es notoria para las intensidades de cortocircuito de los cables que alimentan cargas. A medida que nos acercamos al origen de la instalación no se aprecia este hecho y ello se debe a que en el caso de la Hoja de cálculo las I_{ccmax} de los cables que se conectan al CGBT no son correctas. Por tanto, habrá que analizar el cálculo de estos resultados.

- En Doc las intensidades de cortocircuito que se muestran haciendo clic sobre los cables son las del fallo fase tierra. Para obtener la intensidad de cortocircuito máxima que se daría en caso de cortocircuito trifásico simétrico en el embarrado del cuadro secundario pinchamos en el embarrado del cuadro y en la pestaña "Short circuit current" se muestra dicha intensidad.
- Al actualizar las intensidades de Doc teniendo en cuenta la consideración anterior se ve que los errores más apreciables se dan ahora en las intensidades de cc máxima de los cables que se conectan al CGBT, en

concreto hay un error del -17,05%. Por tanto, las diferencias estarán en las impedancias del transformador y de la red. Será necesario repasar las características de estos elementos.

7.4.2.2. Análisis de las Impedancias de Cortocircuito

Antes de comparar las intensidades de cortocircuito se van a comparar las impedancias de cortocircuito de las líneas ya que el único parámetro variable en el cálculo de la corriente de cortocircuito simétrica inicial es la impedancia.

Esta comparación solo será posible entre la Hoja y Doc ya que en Ecodial no se proporcionan las impedancias de cortocircuito de las líneas pero se pueden obtener algunas impedancias como se verá a continuación.

Ecodial

En Ecodial es posible obtener la impedancia de la red a partir de los datos que se facilitan para la red de Alta Tensión seleccionada. Es importante obtener este valor porque, dado que en la Hoja se ha supuesto una potencia de cortocircuito de 500 MVA, si este valor difiere mucho del valor considerado en Ecodial, los resultados también variarán y lo harán para todas las corrientes que se calculen pues esta impedancia se tendrá en cuenta para cualquier punto de defecto.

La Instalación propuesta se alimenta en Alta Tensión desde 10 kV. En un proyecto real la compañía suministradora debe proporcionar las potencias de cortocircuito máximas y mínimas de la red a la que se conecta la Instalación. En Ecodial, al seleccionar la red de Alta Tensión se proporcionan las potencias de cortocircuito máximas y mínimas y las intensidades de cortocircuito máximas y mínimas. A partir de esta información se ha calculado la impedancia de la red como sigue.

Según la norma antes citada las impedancias de cortocircuito de la red de alimentación se calcula como:

$$Z_Q = \frac{cU_n}{\sqrt{3}I_{kQ}''} = \frac{1,1 \cdot 10000}{\sqrt{3} \cdot 15900} = 0.000639\Omega \quad (5a)$$

$$X_Q = 0.995 \cdot Z_Q \quad (5b)$$

$$R_Q = 0.1 \cdot Z_Q \quad (5c)$$

Las diferencias con los resultados que se obtienen en la Hoja se tienen porque la potencia de cortocircuito máxima que se establece es 500 MVA en lugar de 250 MVA como en Ecodial. Además, se desprecia la resistencia de la red de alimentación no estando esta consideración en línea con lo que dice la citada norma pues solo debería despreciarse en caso de que la tensión nominal de la red de alimentación esté por encima de 35 kV. En caso de desconocerse valores más precisos se recomienda tomar $R_Q = 0,1X_Q$ donde $X_Q = 0,995Z_Q$ tal como se hace en Ecodial.

Para realizar una comparación con la mayor exactitud posible de las intensidades de cortocircuito se ha tomado en la Hoja la reactancia de red calculada en Ecodial.

Doc

En Doc no se facilitan los datos anteriores pero si la impedancia de cortocircuito para todas las líneas.

Las impedancias obtenidas para la Hoja y Doc se muestran a continuación. Los errores indicados son de los valores de la Hoja con respecto a los de Doc.

Tabla 6. Análisis comparativo. Resistencias y reactancias de cortocircuito

Cables	Hoja de cálculo				Doc	
	Rcc mΩ	Error %	Xcc mΩ	Error %	Rcc mΩ	Xcc mΩ
Línea general de Alimentación	0,000	-100,000	0,015	-97,611	0,247	0,628
Cable a cuadro CS2	7,579	-2,759	0,000	-100,000	7,794	6,360
Cable a cuadro CS1	18,000	-2,755	3,441	-69,000	18,510	11,100
Cable a cuadro de tomas de fuerza	43,200	-2,755	0,000	-100,000	44,424	9,900
Cable a cuadro de Alumbrado	36,000	-2,755	0,000	-100,000	37,020	8,250
Cable a toma de fuerza 1F	135,000	-2,755	0,000	-100,000	138,825	4,185
Cable a toma de fuerza 3F	324,000	-2,755	0,000	-100,000	333,180	4,455
Cable a lámpara de mercurio 1	180,000	-2,755	0,000	-100,000	185,100	5,580
Cable a lámpara de mercurio2	112,500	-2,756	0,000	-100,000	115,688	2,475
Cable a luminaria de emergencia	432,000	-2,755	0,000	-100,000	444,240	5,940

Si comparamos los resultados anteriores se observa lo siguiente:

- En cuanto a las resistencias de cortocircuito los valores de la Hoja son en torno a un 2,75% inferior que las de Doc salvo en el caso de la Línea General de Alimentación, donde se desprecia la resistencia de cortocircuito.

Como se vio anteriormente la resistencia de la línea a 20°C se obtiene a partir de la sección nominal, la longitud y la resistividad del conductor. Las secciones de los cables son las mismas en las tres herramientas (ver el apartado 7.1. de este capítulo) y las longitudes también. Viendo que el error obtenido es el mismo en todos los casos está claro que el valor resistividad del conductor a 20°C difiere un poco. Según la norma UNE 20003 la resistividad del cobre (cobre-tipo recocido industrial, para aplicaciones eléctricas) a 20°C es 0,01724 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$. El valor que se ha tomado en las herramientas es:

- En la Hoja se ha tomado 0,018 $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.
- En Doc no se especifica el valor de resistividad pero tiene que ser superior a ambos puesto que los valores obtenidos han sido un 2,75% mayores.

- En cuanto a las reactancias los valores difieren mucho. El cálculo seguido en las herramientas es el siguiente:
 - En la Hoja solo se han tenido en cuenta las reactancias a partir de 120 mm² de sección, según lo especificado en el REBT.
 - En Doc el cálculo de la reactancia puede indicarse para diferentes normas. En el caso de la Instalación propuesta se ha seleccionado el cálculo mediante la norma UNE 20460. Además, la reactancia del cable depende de la posición relativa de los cables. Se ha tomado la configuración trébol para todos los cables de la instalación. Con esta configuración se obtienen las menores reactancias de cortocircuito, estando del lado de la seguridad.

7.4.2.3. Análisis de las Intensidades de Cortocircuito

Por último se van a comparar las intensidades de cortocircuito. Los resultados obtenidos en cada herramienta y los errores relativos de los resultados de Doc y Ecodial respecto a la Hoja de cálculo se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 7. Análisis comparativo. Intensidades de cortocircuito

Cables	Hoja de cálculo	Doc		Ecodial	
	Icc kA	Icc kA	Error %	Icc kA	Error %
Línea general de Alimentación	18,298	21,170	15,70	18,230	-0,37
Cable a cuadro CS1	18,272	20,045	9,70	17,730	-2,97
Cable a cuadro de tomas de fuerza	9,506	7,889	-17,01	7,330	-22,89
Cable a cuadro de Alumbrado	9,506	7,889	-17,01	7,330	-22,89
Cable a toma de fuerza 1F	3,640	3,409	-6,35	3,470	-4,67
Cable a lámpara de mercurio 1	4,087	3,781	-7,49	3,830	-6,29

Los resultados obtenidos muestran que:

- En Doc y Ecodial las intensidades de cortocircuito son muy similares excepto para una falta en la Línea General de Alimentación y en los circuitos que alimentan los cuadros CS1, CS2, CS3, etc. Esto puede deberse a que la potencia de cortocircuito considerada es distinta en Doc y Ecodial y por consiguiente también la reactancia de red.
- Al tomar en la Hoja la misma reactancia de red que en Ecodial los resultados son prácticamente iguales para una falta en la Línea General de Alimentación y en los circuitos que parten del CGBT. La pequeña diferencia puede deberse a que en la Hoja se ha despreciado la resistencia de red y no se ha tenido en cuenta el factor corrector en el cálculo de la impedancia de cortocircuito del transformador.

- Viendo que las intensidades de cortocircuito de la Hoja son superiores a las obtenidas en Doc y Ecodial en general y que los resultados de dichos programas son muy parecidos entre si se puede intuir que la diferencia se debe a que las reactancias de la Hoja son notablemente menores. Este error es admisible ya que el caso más restrictivo lo se tiene para los menores valores de las reactancias de cortocircuito.

8 Modificaciones de la Hoja de Cálculo

Tras comparar las magnitudes establecidas para el análisis en las tres herramientas se han obtenido errores sustanciales en algunos casos. En los casos en los que se han obtenido resultados similares en Doc y en Ecodial pero no en la hoja de cálculo será necesario analizar la Hoja. A continuación se tratan los cálculos que han sido objeto de modificación.

8.1. Corrientes de Cortocircuito

En la Hoja no se han obtenido algunos parámetros según norma y eso lleva a obtener resultados distintos. Viendo cada caso se tiene que:

- Las resistencias de cortocircuito no se han calculado a 20°C si no a la temperatura máxima del aislamiento. Para solucionarlo se ha modificado el campo Rcc de forma que la resistencia se obtenga a partir de la resistividad a 20°C.
- La resistencia y reactancia del cable deberán dividirse por el número de conductores por fase en caso de tener dos o más conductores por fase.
- Las impedancias de cortocircuito no eran las acumuladas desde el principio de la instalación hasta el punto del fallo (que sería sin considerar la impedancia del cable donde se calcula el cortocircuito para tener en cuenta el caso más desfavorable, es decir, el máximo cortocircuito para ese cable). Para ello se han modificado los campos “RccA” y “XccA” de forma que acumulen la impedancia aguas arriba.

En cuanto a las impedancias de cortocircuito se han hecho algunas simplificaciones en la Hoja.

Impedancia de cortocircuito del transformador

Respecto a la impedancia de cortocircuito del transformador, se ha simplificado el cálculo tomando que la reactancia será igual a la impedancia. Según la norma UNE-EN 60909-0 la relación R_T / X_T decrece generalmente con el tamaño del transformador. Para grandes transformadores la resistencia es tan pequeña, que la impedancia puede ser considerada sólo como reactancia, cuando se calculan corrientes de cortocircuito. La resistencia se deberá considerar cuando se calcule el valor de cresta de la corriente de cortocircuito o la componente de corriente continua, que no es el caso.

No se ha tenido en cuenta el factor de corrección de impedancias de transformadores de red especificado en la citada norma. En concreto, para

transformadores de dos devanados, con y sin cambiadores de tomas en carga, se introduce un factor de corrección de impedancia, adicionalmente a la impedancia evaluada:

$$K_{TK} = K_T \cdot Z_T \quad (6a)$$

$$K_T = 0,95 \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} \quad (6b)$$

Donde x_T es la reactancia relativa del transformador $x_T = X_T / (U_{rT}^2 / S_{rT})$ y $c_{\max}$ está relacionada con la tensión nominal de la red conectada al lado de baja tensión del transformador de red. Para el caso analizado este factor valdría 0,9975.

Impedancia de cortocircuito de la Red

Igualmente, para la impedancia de cortocircuito de red se ha simplificado el cálculo tomando que la reactancia será igual a la impedancia. Según la norma UNE-EN 60909-0 en el caso de redes de alimentación de alta tensión con tensiones nominales por encima de 35 kV alimentadas por líneas aéreas, la impedancia equivalente Z_Q se puede considerar en muchos casos como una reactancia. En otros casos, si no se conoce con precisión el valor de la resistencia R_Q de las redes de alimentación, se puede sustituir $R_Q = 0,1X_Q$ donde $X_Q = 0,995Z_Q$. Por tanto, siendo conservadores habría que optar por esta última opción.

8.2. Intensidades de diseño

Dado el diseño de la Hoja, la intensidad de diseño de cada cable se dimensiona en función de la potencia demandada por las cargas o por los cables que parten del cuadro que alimenta ese cable. Esto es correcto excepto en caso de tener una instalación que se alimenta directamente en alta tensión con transformador de distribución propio. En este caso el cable que parte del transformador se dimensiona en función de la potencia de este. Además, en este caso hay que incluir la impedancia del transformador y de la red para el cálculo de la impedancia de cortocircuito. Para tener en cuenta todo esto se ha incluido en el campo "Tipo de Carga" otra carga denominada "CGBT" que indica que el cable que se está dimensionando alimenta el CGBT y parte de un transformador de distribución propio.

Las modificaciones introducidas para tener en cuenta este caso han sido:

- En el campo "P.Cál." se ha incluido que si la carga es "CGBT" la potencia de cálculo será la potencia del transformador.
- En el campo "RccA" se ha incluido que si la carga es "CGBT" la resistencia es cero.
- En el campo "XccA" se ha incluido que si la carga es "CGBT" la reactancia es la suma de la reactancia del transformador y de la red.

8.3. Cables en paralelo

No se ha tenido en cuenta tampoco el caso en el que se tienen cables en paralelo. En concreto, se tienen que colocar dos o más cables en paralelo por fase en la Línea General de Alimentación. Esto repercute en la intensidad máxima admisible, la impedancia del cable, etc.

La corriente admisible de la unión de los conductores es la suma de las corrientes admisibles en cada uno de ellos, determinada, nominalmente, en función del tipo de canalización y forma de colocación. Para tener en cuenta este caso en la hoja de cálculo se ha modificado en la columna "I.Per." el producto que aparecía, siendo ahora el producto de la intensidad máxima admisible, el factor de corrección total y el número de conductores por fase.

En cuanto a la impedancia del cable, se ha incluido dividir este valor por el número de conductores por fase.

Además, al tratarse de un agrupamiento de cables hay que considerar el factor de corrección correspondiente. Si por ejemplo la intensidad a canalizar fuera tal que necesitáramos 3 cables por fase, tenemos que tener en cuenta un coeficiente de corrección para ese agrupamiento de 3 circuitos y rehacer el cálculo (iterar) ya que hasta no saber el resultado no se han podido saber los cables por fase necesarios.

La forma de proceder en la Hoja será seleccionar una sección y número de cables por fase (los que se intuyan que van a cumplir el criterio térmico) e incluir el factor de corrección correspondiente al número de cables agrupados. Si por ejemplo, la intensidad permitida (igual al producto de la intensidad máxima admisible y el factor de corrección total) no es superior a la intensidad de diseño rehacemos el cálculo aumentando el número de cables por fase o la sección de cable.

9.1. Introducción

Una vez definidas las canalizaciones y sus propiedades, se pueden determinar las características de la aparamenta, en correspondencia a las cargas y las corrientes de cortocircuito, bajo conceptos de filiación y selectividad.

La concepción de las instalaciones de baja tensión tiende a prever las protecciones básicas contra tres tipos de defectos: las sobrecargas, los cortocircuitos y los defectos de aislamiento.

La implementación de las protecciones debe tener en cuenta los aspectos reglamentarios, particularmente aquellos relacionados con la seguridad de las personas y los requerimientos técnicos y económicos.

El dispositivo elegido debe soportar y eliminar los defectos con un coste optimizado respecto a la actuación requerida y limitar la incidencia de un defecto a una parte de la instalación y así asegurar la máxima continuidad de servicio.

El alcance de estos objetivos, requiere la coordinación del dispositivo de protección en su trabajo para gestionar la seguridad y alargar la vida de la instalación por limitación de esfuerzos y asegurar la disponibilidad eliminando el defecto inmediatamente aguas arriba del disyuntor.

Los objetivos de la coordinación entre disyuntores son la filiación y la selectividad. Si el defecto de aislamiento es tratado específicamente por las protecciones diferenciales, debe asegurar igualmente la selectividad entre dispositivos a corriente diferencial residual.

Las protecciones y su coordinación deben adaptarse a las necesidades de cada instalación:

- A nivel de CGBT, la necesidad de energía es superlativa.
- A nivel de cuadros de distribución, la limitación de esfuerzos en caso de defecto es importante.
- A nivel de distribución final, la seguridad de personas es esencial.

Se tienen tres niveles de protección en BT:

- Nivel A: el CGBT.

El CGBT es la llave de entrada de toda la distribución eléctrica; la disponibilidad de la energía es primordial en esta parte de la instalación. Las corrientes de cortocircuito son elevadas debido a la proximidad de las fuentes de BT. Éste es el dominio de los interruptores automáticos de potencia.

- Nivel B: los cuadros secundarios.

Los cuadros secundarios aparecen en la parte intermedia de la instalación. Las fuentes están todavía muy cercanas por lo que las intensidades de cortocircuito pueden llegar a 100 kA.

La necesidad de continuidad de servicio es aún muy importante. Las protecciones deben limitar los esfuerzos y estar perfectamente coordinadas con la distribución aguas arriba y aguas abajo. Ésta es la zona de los interruptores de caja moldeada.

- Nivel C: la distribución terminal.

Las protecciones están situadas directamente sobre los receptores; la selectividad debe ser realizada en función de las protecciones de los niveles superiores. La intensidad de cortocircuito acostumbra a ser débil (algunos kA). Ésta es la zona de los mini-interruptores.

9.2. Normativa

En las herramientas comerciales Doc y Ecodial se ha empleado la norma UNE 60947-2 para el dimensionado de los dispositivos de protección. Esta norma especifica las características fundamentales de los interruptores industriales: la categoría de uso, las características de reglaje, las medidas de diseño, etc. También reconoce y define la coordinación entre los interruptores, en particular, define las pruebas a realizar para verificar la selectividad y la filiación entre protecciones. El cumplimiento de esta norma por un interruptor es una muestra de calidad del dispositivo.

9.3. Selectividad

La selectividad es la coordinación de los dispositivos de corte automático para que un defecto, ocurrido en un punto cualquiera de la red, sea eliminado por el interruptor colocado inmediatamente aguas arriba del defecto, y sólo por él.

La selectividad puede ser:

- Total: para todos los valores del defecto, desde la sobrecarga hasta el cortocircuito franco, la protección inmediatamente aguas arriba del defecto abre siempre y las que la preceden permanecen cerradas.
- Parcial: la condición anterior no se cumple hasta la máxima corriente de cortocircuito, sino solamente hasta un valor inferior. Este valor se conoce como límite de selectividad.
- Sin selectividad: En caso de defecto, un interruptor aguas arriba del interruptor que protege el cable puede abrirse

Las técnicas de selectividad establecidas son:

- Amperimétrica: se emplea para la protección contra las sobrecargas.

- **Cronométrica:** se emplea para cortocircuitos débiles. El disparo de la protección aguas arriba de la que protege el cable está ligeramente temporizado hasta el accionamiento reflejo. Por ello, el interruptor que protege el cable, de un calibre inferior, será mucho más rápido.
- **Lógica:** este tipo de selectividad se logra con interruptores automáticos equipados con relés electrónicos concebidos para este fin. Sólo las funciones corto retardo (CR) o protección tierra (GFP) de los aparatos pilotados son gestionados por la selectividad lógica.
- **Energética:** se emplea cuando se protege frente a cortocircuitos elevados. Cuando dos dispositivos detectan un cortocircuito muy elevado, los contactos de los aparatos se entreabre simultáneamente limitando la corriente. Supongamos un defecto en un cable protegido por el interruptor D2 y con un interruptor D1 aguas arriba. La energía del arco, importante a nivel de D2, provoca su disparo y limitada a nivel de D1, es insuficiente para provocar su disparo. Por ello, el interruptor D2, de un calibre inferior será más limitador. Éste cortará con una limitación de corriente tal que la energía de defecto será muy inferior al umbral de disparo del interruptor aguas arriba.

9.4. Filiación

La filiación “refuerza” el poder de corte de los interruptores situados aguas abajo de un interruptor limitador. El interruptor limitador “ayuda” al interruptor situado aguas abajo limitando fuertes corrientes de cortocircuito. La filiación permite utilizar un interruptor de poder de corte inferior a la corriente de cortocircuito calculada en ese punto de la instalación.

Supongamos el caso anterior con los interruptores D1 y D2. Cuando se produce un cortocircuito aguas abajo de D2 este ve una corriente muy importante que le hace disparar rápidamente. El interruptor D1 situado aguas arriba ve una corriente de defecto limitada que genera una repulsión de los contactos, limitándose aún más la corriente. Pero la presión del arco es insuficiente para provocar el accionamiento reflejo de D1. Así, D1 ayuda a D2 a cortar la corriente sin disparar. El límite de selectividad puede sobrepasar el poder de corte del interruptor automático de aguas abajo y alcanzar el corte reforzado por filiación.

La filiación permite ahorrar en las instalaciones y simplificar la elección de las protecciones, con la utilización de interruptores de comportamiento estándar.

9.5. Defectos a Proteger

9.5.1. Sobrecarga

Los dispositivos de protección deben estar previstos para interrumpir toda corriente de sobrecarga en los conductores del circuito antes de que pueda provocar un calentamiento perjudicial al aislamiento, a las conexiones, a las cargas, a las propias canalizaciones o al medio ambiente del entorno.

Un dispositivo que protege una canalización contra sobrecargas debe satisfacer las siguientes condiciones:

1. La intensidad nominal del dispositivo de protección debe estar entre la intensidad de diseño (I_b) y la máxima intensidad admisible por el cable (I_z):

$$I_b \leq I_n \leq I_z \quad (7)$$

2. La intensidad que asegura efectivamente el funcionamiento del dispositivo de protección (intensidad a partir de la que dispara en tiempo inferior a una hora), I_2 , debe ser menor que 1,45 veces la máxima intensidad admisible del cable:

$$I_2 \leq 1,45 \cdot I_z \quad (8)$$

La corriente I_2 es menor o igual que 1,45 veces la intensidad nominal para interruptores automáticos e igual a 1,6 veces la intensidad nominal para fusibles.

9.5.2. Cortocircuito

Deben preverse dispositivos de protección para interrumpir toda corriente de cortocircuito antes de que esta pueda resultar peligrosa, debido a los efectos térmicos y mecánicos producidos en los conductores y en las conexiones.

Todo dispositivo que asegure la protección contra los cortocircuitos debe responder a las dos condiciones siguientes:

1. Su poder de corte debe ser como mínimo igual a la corriente de cortocircuito máxima supuesta en el punto donde está instalado, salvo que presente selectividad reforzada por filiación.
2. El tiempo de corte de toda corriente que resulte de un cortocircuito que se produzca en un punto cualquiera del circuito, no debe ser superior al tiempo que tarda en alcanzar la temperatura límite admisible por los conductores.

9.5.3. Contactos Indirectos en Sistemas TT

El corte automático en esquemas TT se obtiene por medio de interruptores residuales de sensibilidad. Se tiene que verificar que la tensión de contacto es menor que la tensión límite convencional (que vale 50V para locales húmedos):

$$R_a \cdot I_a \leq 50 \quad (9)$$

donde,

R_a impedancia del bucle de defecto; comprende la resistencia de dos tomas de tierra: la de la instalación de puesta a tierra, R_a y la de toma de tierra del punto neutro del centro de transformación, R_b .

I_a es la corriente que provoca el disparo del diferencial.

9.5.4. Contactos Indirectos en Sistemas TN

El principio de protección en el esquema TN consiste en asegurar que la intensidad de defecto de aislamiento U_0 / Z_s es suficiente para activar la desconexión de las protecciones de sobrecarga (interruptores automáticos o fusibles), en el tiempo adecuado:

$$Z_s \cdot I_a \leq U_0 \quad (10)$$

donde

U_0 valor eficaz de la tensión nominal entre fase y tierra

Z_s es la impedancia del bucle de defecto, incluida la fuente, el conductor activo hasta el punto de defecto y el conductor de protección entre el punto de defecto y la fuente.

I_a es la corriente que asegura el funcionamiento del dispositivo de protección automático en el tiempo definido en la siguiente tabla, en las condiciones definidas, o en un tiempo convencional no superior a 5 s.

Los tiempos de interrupción máximos en función de las tensiones nominales en el esquema TN:

Tabla 8: Esquema TN. Tensiones nominales y tiempos de interrupción máximos

U_0 (V)	Tiempo de disparo (s)
120	0.8
230	0.4
400	0.2
>400	0.1

9.5.5. Contactos Indirectos en Sistemas IT

En los sistemas IT el neutro del transformador está aislado de tierra o conectado mediante una impedancia de valor elevado. En caso de un primer defecto fase-masa o fase-tierra circularía una corriente de fuga muy pequeña (debido a la capacidad parásita de los cables) que no supone tensiones de contacto peligrosas. En caso de un segundo defecto fase-masa circularía una corriente de cortocircuito ante la que protegería el interruptor automático.

En este tipo de esquema se exige la instalación de un controlador permanente aislamiento, con la misión de mandar una señal sonora o luminosa ante la aparición

del primer defecto. La búsqueda y reparación rápida del primer defecto es esencial para asegurar la continuidad de servicio, que es la propiedad principal del sistema IT.

De acuerdo con la norma IEC 60364-4, la desconexión automática del circuito en caso de un primer defecto no es necesaria, siempre que se cumpla:

$$R_A \cdot I_d \leq 50V_{a.c} \quad (11a)$$

$$R_A \cdot I_d \leq 120V_{d.c} \quad (11b)$$

Donde

Ra es la suma de la resistencia del electrodo de puesta a tierra y de las partes conductoras expuestas

Id es la corriente de defecto de la primera falta fase-masa de impedancia despreciable.

Si se cumple esta condición, después de la falta, la tensión de contacto de la masa expuesta será inferior a 50 V que es tolerable por el cuerpo humano durante un tiempo indefinido.

A la aparición de un segundo defecto el corte de la alimentación debe ser obligatoriamente de inmediato. Después de la aparición de un primer defecto, las condiciones de interrupción de la alimentación en el segundo defecto son las siguientes:

- Primer caso: cuando se ponga a tierra masas por grupo o individualmente, las condiciones de protección son equivalentes a las del esquema TT, para dispositivos de protección de corriente diferencial-residual.
- Segundo caso: cuando las masas sean interconectadas mediante un conductor de protección, puestas colectivamente a tierra, se aplican las condiciones del esquema TN.

9.6. Dimensionado de Protecciones en Ecodial

Para la elección de la aparamenta se determina para cada circuito la lista de funciones necesarias para la protección y utilización de la instalación.

Las protecciones se coordinan con aquellas que se han realizado aguas arriba con la finalidad de obtener un buen funcionamiento, la compatibilidad de los elementos elegidos (en función de la In y la Icc), la compatibilidad de acoplamiento con los aparatos emplazados aguas arriba y todas las prescripciones de seguridad.

9.6.1. Elección Manual de las Protecciones

Tras calcular la instalación propuesta aparecen numerosas advertencias en cuanto a la selectividad de las protecciones. En concreto, hay dispositivos diferenciales y magnetotérmicos que no presentan selectividad con respecto al dispositivo que tienen aguas arriba. Será necesario en este caso verificar que existe selectividad parcial en el

contexto de la instalación, es decir, que el límite de selectividad es superior a la máxima intensidad de cortocircuito en ese punto de la instalación.

Para verificar lo anterior se emplearán las tablas de selectividad del documento “Información Técnica Complementaria” de Schneider. La selectividad total se indica con el símbolo “T” y si es parcial se indica el valor máximo de la corriente de defecto para el cual la selectividad está asegurada.

Para mayor soltura en el manejo de las tablas es aconsejable conocer la aparamenta ofrecida por Scheneider ya que cada protección se utiliza en un caso de terminado.

Dados los tres niveles de protección definidos anteriormente se tiene:

- Nivel A (CGBT): se emplean los interruptores Masterpact NT y NW de Merlin Gerin de 630 a 6300A.
- Nivel B (Cuadro secundario): se emplean los interruptores Compact de 100 a 3200A.
- Nivel C (Distribución Final): Scheneider ofrece para este caso los interruptores miniatura Multi 9 NG125, C60 y DPN de 0,5 a 125 A.

9.6.2. Caso Práctico

Conociendo la aparamenta y las necesidades de protección en cada parte de la instalación y haciendo uso del documento de “Información Técnica Complementaria” se van a realizar las modificaciones necesarias para conseguir una selectividad adecuada.

Para ello, se verá a continuación el ajuste que debe haber entre las curvas de las protecciones para cada tipo de selectividad.

9.6.2.1. Selectividad de las Protecciones

Selectividad parcial

Si la curva de disparo de la protección aguas abajo cruza la curva de no disparo de la protección aguas arriba, la selectividad se denomina parcial y la corriente a la que se cruzan las curvas se denomina límite de selectividad.

Si el límite de selectividad es superior a la corriente de cortocircuito más elevada que puede producirse en el circuito protegido por la protección aguas abajo, la selectividad se denomina total en el contexto de la instalación. En caso contrario, de denomina selectividad parcial.

Selectividad total

Si las curvas se cruzan delante del umbral instantáneo de protección aguas abajo, la búsqueda de selectividad puede realizarse regulando los ajustes de las protecciones. El uso de un disparador temporizado facilita esta operación.

Si el límite de selectividad se sitúa en la zona de las tablas, deberá elegirse un calibre más elevado para el aparato aguas arriba. En este caso, Ecodial conservará no obstante la corriente I_b del circuito como referencia para el ajuste térmico de la protección para evitar el sobredimensionamiento del cable.

Selectividad de las protecciones diferenciales

La selectividad entre las protecciones diferenciales se obtiene si se respetan las siguientes condiciones:

- La sensibilidad de la protección aguas arriba es dos veces superior a la sensibilidad de la protección aguas abajo.
- El tiempo de corte de la protección aguas arriba es 1,4 veces superior al de la protección aguas abajo.

Además, la protección aguas abajo debe tener una sensibilidad que respete la siguiente condición:

$$2 \cdot I\Delta n \leq I_{ef} \quad (12)$$

Donde

$I\Delta n$ es la sensibilidad del diferencial (A)

I_{ef} es la corriente de fallo mínima fase/PE (A).

Cuando no se respeta el criterio de selectividad en la sensibilidad, la selectividad se denomina parcial. En cambio, si no se respeta el criterio de selectividad en el tiempo de corte, no existirá selectividad entre las dos protecciones diferenciales (aunque se respete el criterio de selectividad en la sensibilidad).

Selectividad entre las protecciones de MT y BT

Para comprobar la selectividad entre las protecciones de MT y BT, deben compararse las curvas de disparo en el mismo lado del transformador. En Ecodial, la curva de disparo de la protección de MT se convierte en una curva equivalente de baja tensión para realizar el análisis de la selectividad.

En función de si se utiliza un fusible o un relé como protección de MT, las normas para garantizar la selectividad entre MT y BT serán ligeramente distintas. En la instalación propuesta se empleará un relé (No da la opción de seleccionar fusible).

- Fusibles de MT

Tiene que cumplirse que:

- Todas las partes de la curva del fusible de pre-arco mínimo deben estar situadas a la derecha de la curva CB por un factor mínimo de 1,35 (por ejemplo, en el tiempo T, donde la curva CB atraviesa un punto correspondiente a 100 A, la curva del fusible en el mismo tiempo T pasará por un punto correspondiente a 135 A o más, y así sucesivamente).
- Todas las partes de la curva del fusible deben estar por encima de la curva CB por un factor mínimo de 2 (por ejemplo, en el nivel de corriente I, donde la curva CB atraviesa un punto correspondiente a 1,5 segundos, la curva del fusible en el mismo nivel de corriente I pasará por un punto correspondiente a 3 segundos o más, etc.).

Los factores 1,35 y 2 se basan en las tolerancias máximas de fabricación para los fusibles de MT y los interruptores automáticos de BT.

- Relés de MT asociados a los interruptores automáticos de MT:

Tiene que cumplirse que:

- Todas las partes de la curva mínima CB de MT deben estar situadas a la derecha de la curva CB de BT por un factor mínimo de 1,35 (por ejemplo, en el tiempo T, donde la curva CB de BT atraviesa un punto correspondiente a 100 A, la curva CB de MT en el mismo tiempo T pasará por un punto correspondiente a 135 A o más, y así sucesivamente).
- Todas las partes de la curva CB de MT deben estar por encima de la curva CB de BT (el tiempo de la curva CB de BT debe ser igual o inferior a las curvas CB de MT menos 0,3 segundos).

Los factores 1,35 y 0,3 segundos se basan en las tolerancias máximas de fabricación para los transformadores de corriente de MT, los relés de protección de MT y los interruptores automáticos de BT.

9.6.2.2. Ajuste de las Protecciones

Selectividad de los interruptores MT-BT

En cuanto a la selectividad MT-BT se ha aumentado el ajuste del relé hasta 1500 A para tener selectividad total entre las protecciones. Como se observa en la gráfica I-t de las dos protecciones la curva del relé está situada a la derecha de la curva del interruptor automático con un factor algo mayor de 1,35 y además queda situada por encima de ésta en cualquier punto.

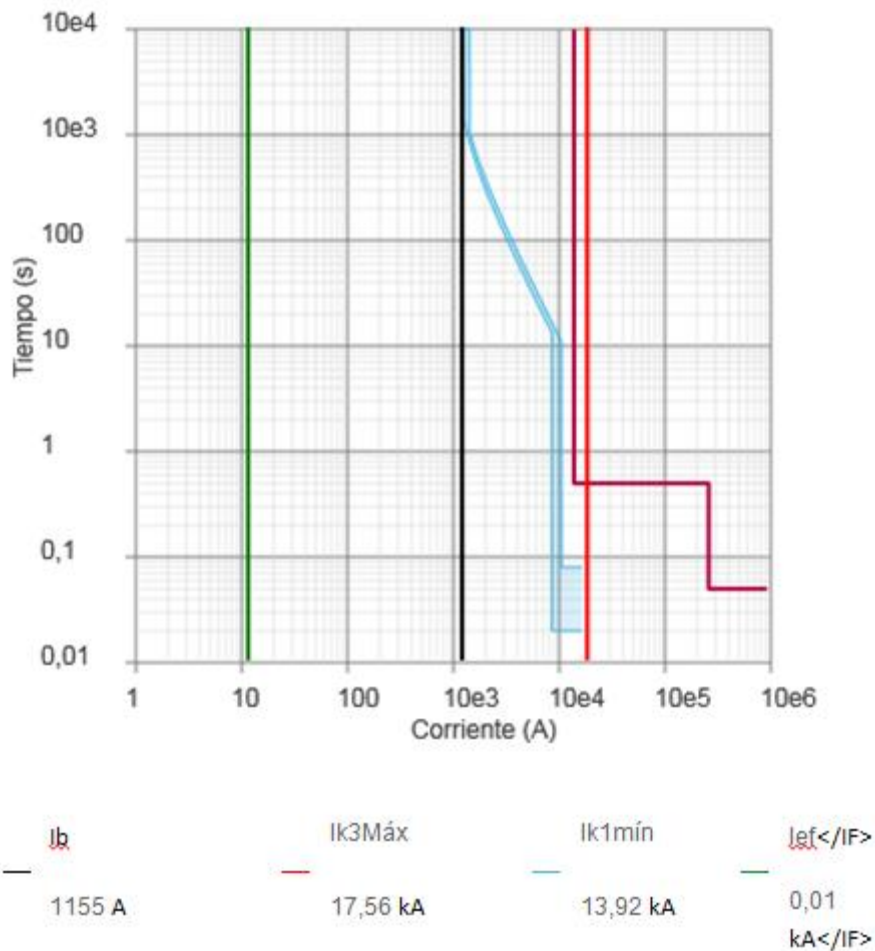


Figura 5. Curva de disparo de los interruptores MT-BT

Selectividad de los interruptores magnetotérmicos

Para los problemas de selectividad entre interruptores magnetotérmicos se explicará para los tres casos con problemas encontrados la solución que se ha tomado. La forma de proceder en cada caso es similar, lo que cambia son las tablas de selectividad a consultar, que dependen del tipo de protección aguas abajo y aguas arriba.

En primer lugar, se tratará la selectividad entre las protecciones del alumbrado y el interruptor general de ese cuadro (cuadro CC2). Partiendo de la elección de protecciones dada por Ecodial para las cargas de alumbrado (protecciones iC60 curva C), se ha elegido aguas arriba la protección con el menor calibre posible que no de problemas de selectividad. En concreto se ha tomado la opción de un interruptor miniatura NG125N de calibre 80 A. Consultando las tablas de selectividad se ve que para una protección aguas arriba de este calibre y una protección aguas abajo iC60 de calibre 20 A (es el máximo calibre de interruptor para las cargas del cuadro) se tiene un límite de selectividad de 3600 A. La intensidad de cortocircuito máxima en este punto de la instalación es de 2400 kA (cortocircuito monofásico franco) por tanto se tiene selectividad total en el contexto de la instalación.

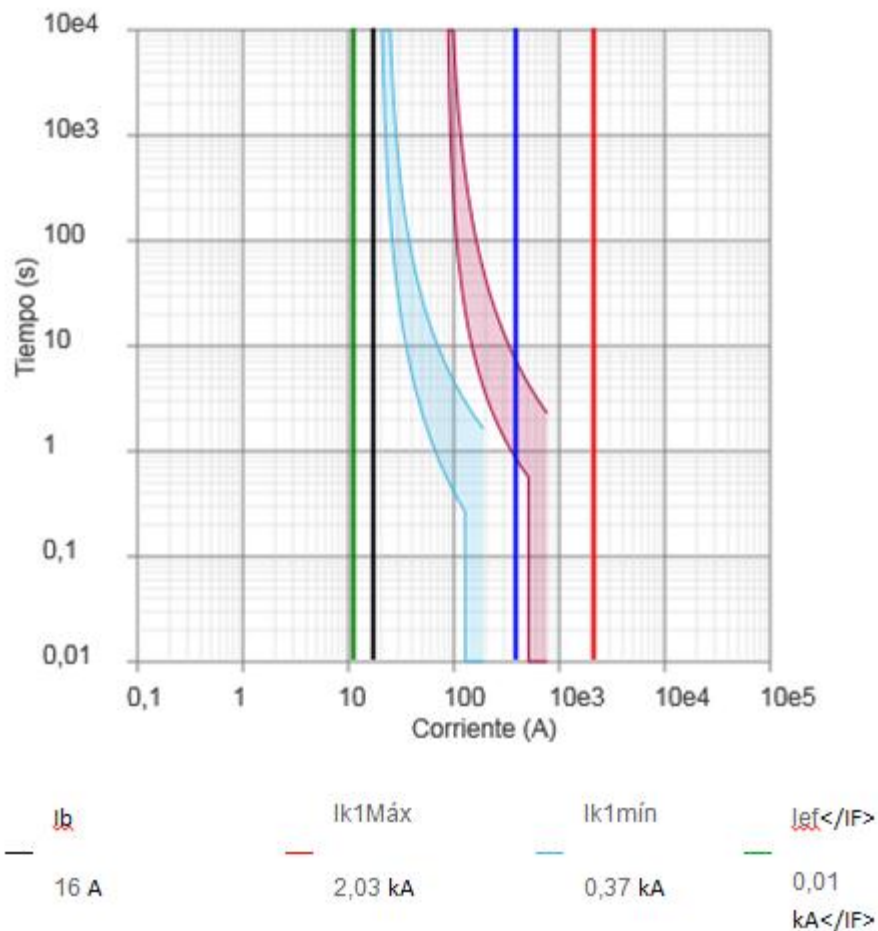


Figura 6. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro de alumbrado y el interruptor que protege una luminaria conectada al cuadro

Se ha tratado de igual forma la selectividad entre las protecciones de las tomas de fuerza y el interruptor general de ese cuadro (cuadro CC1). Partiendo de la solución dada por Ecodial para las tomas de corriente (protección iC60 curva C) se ha elegido un interruptor miniatura NG125N de calibre 63 A. El límite de selectividad para el caso más desfavorable se tiene para las tomas de fuerza trifásicas que se protegen con un iC60N de calibre 10 A. En concreto se tiene un límite de selectividad de 3500 A, que es superior a la máxima corriente de cortocircuito en este punto de la instalación, 3460 kA.

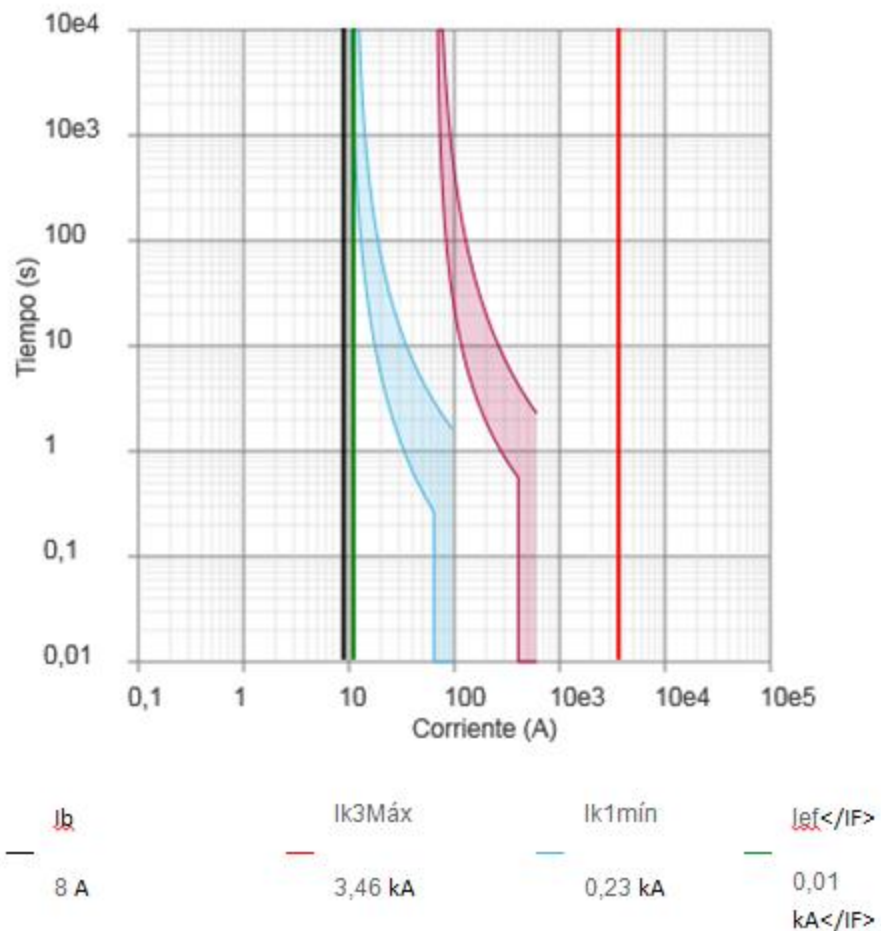


Figura 7. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro de tomas de fuerza y el interruptor que protege una toma de fuerza conectada al cuadro

El último problema de selectividad tratado es el que presentan los interruptores que protegen los cuadros secundarios y las cargas que parten del cuadro que se ha denominado CS-1 y la protección general de dicho cuadro. Se ha tomado la opción de un interruptor de caja moldeada NSX100 de calibre 200 A que presenta selectividad total con un interruptor NG125N de cualquier calibre (este es el interruptor seleccionado para los cuadros CC1, cuadro de tomas de corriente, y CC2, cuadro de alumbrado, que son los interruptores de mayor calibre en el cuadro CS-1). En Ecodial no se puede seleccionar el calibre 200 A para el interruptor de caja moldeada mencionado debido a que no es un valor de fabricante por lo que se ha cogido el calibre inmediatamente superior disponible, 250 A. Sin embargo, con este calibre no se estaría protegiendo el cable contra sobrecargas.

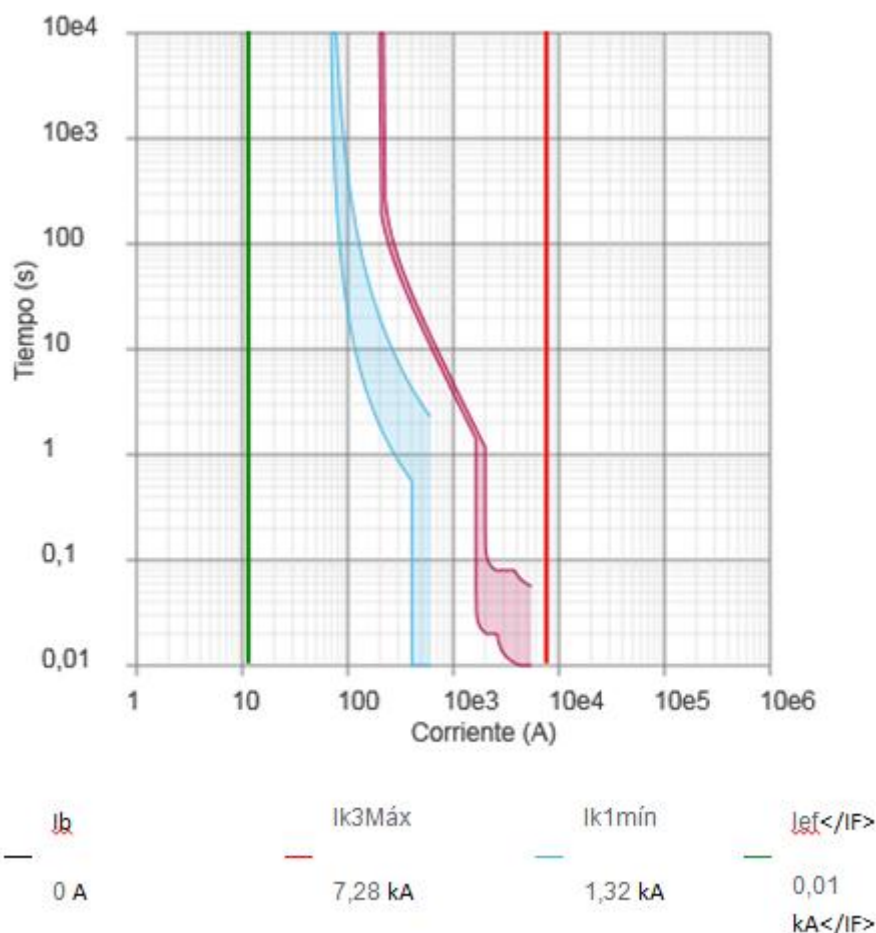


Figura 8. Curva de disparo del interruptor de cabecera del cuadro C-1 y los interruptores inmediatamente aguas abajo

En Ecodial, en la pestaña “curvas”, se indica en la esquina izquierda el límite de selectividad entre las protecciones seleccionadas. Este límite no coincide para los dos primeros casos descritos por lo que siguen apareciendo advertencias de ausencia de selectividad entre las protecciones que ya se han dimensionado correctamente.

Selectividad de los interruptores diferenciales

En cuanto a las protecciones diferenciales también se han obtenido advertencias de falta de selectividad tras su dimensionado. Atendiendo a las condiciones de selectividad de protecciones diferenciales vistas en el apartado anterior se han modificado las protecciones con problemas cumpliendo dichas condiciones.

En concreto, se ha modificado la sensibilidad de los diferenciales que protegen las cargas finales (alumbrado, tomas de corriente y equipos) a un valor de 30 mA (para algunas cargas Ecodial calculaba diferenciales de sensibilidades de hasta 1000 mA).

Los diferenciales inmediatamente aguas arriba de los mencionados anteriormente se han modificado a 300 mA (en algunos casos Ecodial calculaba diferenciales de 30 mA), el siguiente salto de sensibilidad para cumplir con la condición de una sensibilidad dos veces mayor para los diferenciales aguas arriba. También se ha

modificado el tiempo de corte para que fuese 1,4 veces superior al de las protecciones aguas abajo.

Tras las modificaciones anteriores hay selectividad total para todas las protecciones diferenciales de la instalación. A continuación se muestra la gráfica I-t de los diferenciales del caso anterior:

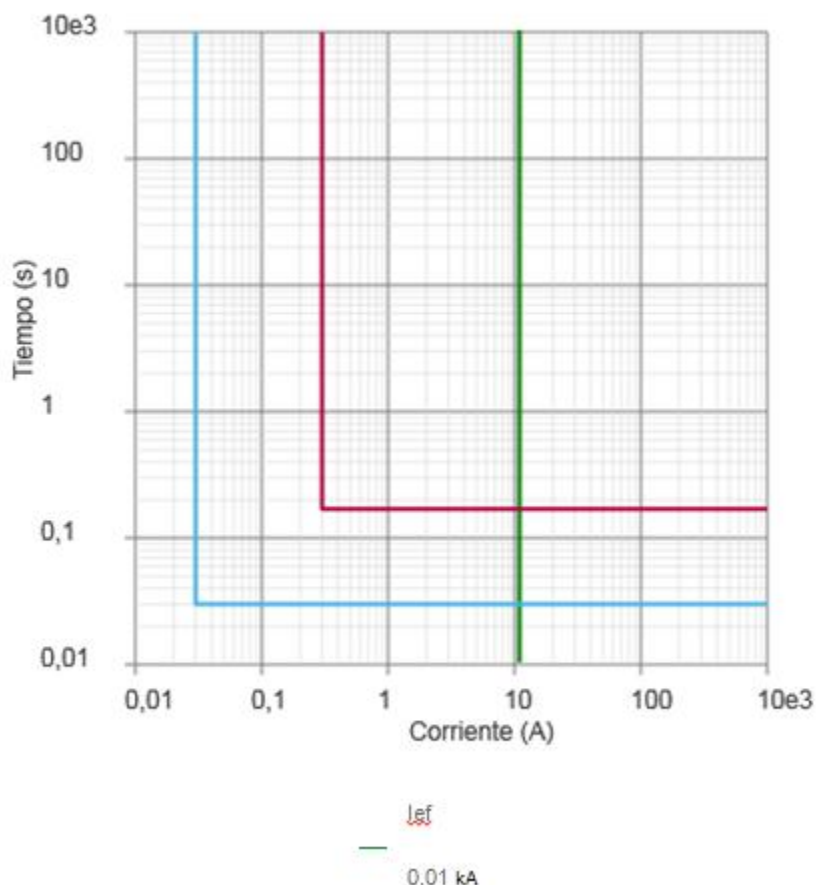


Figura 9. Curva de disparo de los interruptores diferenciales que protegen las cargas y los que están ubicados inmediatamente aguas arriba

9.7. Dimensionado de Protecciones en Doc

En cuanto al dimensionado y verificación de protecciones en Doc se describen a continuación las indicaciones que se dan en el manual de ayuda de Doc para corregir posibles fallos que pueden aparecer al dimensionar las protecciones de la Instalación y cómo se puede visualizar desde el programa la verificación de protecciones tras el cálculo de la Instalación. No se va a incluir la verificación de las protecciones de la Instalación del caso práctico porque ya se ha hecho para Ecodial.

Doc verifica las protecciones en contra de los siguientes defectos en tiempo real:

- Sobrecargas
- Cortocircuitos

- Contactos indirectos en sistemas TT
- Contactos indirectos en sistemas TN

Los criterios de protección están definidos en la norma IEC 60364-4-43.

La verificación de las protecciones puede llevarse a cabo con las curvas de disparo a las que se accede haciendo clic sobre el icono “curvas” del menú de herramientas. Doc muestra un nuevo espacio de trabajo donde es posible trabajar con las curvas de las protecciones en todas las configuraciones posibles.

El apartado “Relaciones” muestra la lista de protecciones verificadas por DOC. Esta ventana se divide en cuatro columnas:

- Dispositivo de protección, interruptor o fusible
- Objeto protegido, típicamente un cable
- Verificación de cálculo hecha por Doc
- Estado presente de la verificación

Si la relación de protección es satisfecha, el texto que la describe es negro y presenta el estado “OK”.

Si la relación de protección falla, el texto que la describe es rojo y presenta el estado “Failed”.

Cuando una protección falla se puede proceder de acuerdo a las siguientes indicaciones para entender por qué fallo y tomar las medidas apropiadas para dimensionarla correctamente.

Verificación de protección contra sobrecargas

Las medidas a tomar en caso de fallo de la protección contra sobrecarga son las siguientes:

- Seleccionar la verificación fallida
- Se mostrará en la gráfica la curva I-t de esa protección
- Seleccionar la curva del dispositivo de protección
- Modificar el ajuste del umbral térmico hasta que la corriente nominal esté entre “I_b” e “I_z”
- El color de mensaje de verificación de la protección cambiará de roja a negro cuando la relación de protección sea verificada.
- Problema: dispositivos que no muestran la curva de disparo, intensidades de diseño y máxima admisible muy cercanas

Verificación de protección contra cortocircuitos

Las medidas a tomar en caso de fallo de la protección contra cortocircuito son:

- Seleccionar la verificación fallida
- Se mostrará en la gráfica la curva $I-I^2t$ de esa protección

- En caso de tener un interruptor de caja moldeada se modificarán las funciones “S” e “I” hasta que la curva del interruptor automático esté completamente bajo la curva del cable.

Verificación de la protección contra contactos indirectos

Las medidas a tomar en caso de fallo de la protección contra indirectos son las siguientes:

- Seleccionar la verificación fallida
- Se mostrará la gráfica Intensidad-Tiempo del conductor de protección
- Hacer clic sobre el comando “min Ik”. Se mostrará una línea vertical en el diagrama que representa la corriente de cortocircuito min de ese cable. Se obtendrá la verificación de la protección cuando el umbral magnético del interruptor quede a la izquierda de dicha corriente. Para ello se disminuirá el umbral magnético de las unidades de disparo o se habilitarán los umbrales “S” o “I” utilizando valores de ajuste suficientemente bajos.

Imposibilidad de verificar todas las relaciones

Quizás no sea posible satisfacer todas las protecciones simultáneamente. Esto puede ocurrir, por ejemplo, si la protección contra contactos indirectos y la protección contra sobreintensidades debe ser garantizada usando el mismo dispositivo de protección: el primero requiere un ajuste magnético de baja, mientras que el segundo requiere valores altos o inhabilitación de la función “I”.

Es recomendable:

- Reemplazar las unidades de disparo magnetotérmicas por interruptores de caja moldeada provistos de varias posibilidades de ajuste.
- Utilizar unidades de disparo provistas de función “G”, que permitan tener configuraciones magnéticas altas para la protección contra sobreintensidades y ajustes magnéticos bajos para la protección contra contactos indirectos.

10.1. Introducción

En general, el cálculo de la sección de cable se basa en requerimientos técnicos, teniendo en cuenta los posibles problemas que puedan acontecer durante su vida útil. Esto se realiza a partir de tres criterios: el criterio térmico, que asegura la posibilidad de transmitir potencia suficiente en régimen permanente; el de caída de tensión, que asegura que se mantenga entre los valores requeridos por la Normativa aplicable; y el de cortocircuito, que asegura que el cable resiste la condición de cortocircuito un tiempo lo suficientemente largo para que la protección asociada al cable actúe. La combinación de estos tres casos nos da la solución técnica.

Sin embargo, existe un cuarto criterio que debería ser considerado en ciertas ocasiones, el criterio económico, y que es aquel que tiene en cuenta las pérdidas térmicas en la vida útil esperada de la instalación. La aplicación de este cuarto criterio puede ser importante con vistas a obtener un diseño que sea aceptable desde un punto de vista económico y energético.

10.2. Justificación

El creciente coste de la energía, junto con las altas pérdidas de energía producidas a consecuencia de las temperaturas de funcionamiento que permiten los nuevos materiales aislantes, obliga en la actualidad a considerar la selección de la sección de los cables con unos criterios económicos más amplios. En lugar de minimizar únicamente el coste inicial, se debe minimizar además el coste de las pérdidas a lo largo de la vida económica del cable. Debido a esta última condición, un cable con sección de conductor mayor que la que se escogería sobre la base del mínimo coste inicial, producirá unas pérdidas de energía menores para la misma corriente y resultará, considerado a lo largo de su vida económica, mucho menos caro.

Sin embargo, no en todas las instalaciones es recomendable realizar el análisis económico. Para este capítulo se ha consultado un artículo titulado “Selección económica de cables teniendo en cuenta las pérdidas térmicas” donde se analizan los casos donde estaría indicado el cálculo. Los resultados de este estudio fueron que en caso de BT para niveles de potencia altos (por encima de 300 kW), como es el caso de la Instalación propuesta, se realizará un cierto sobredimensionamiento.

Debido a las consideraciones anteriores parte la idea de incluir el cálculo de la sección económica en la Hoja de cálculo de Excel.

10.3. Aspectos Económicos

Como se ha explicado, el cálculo habitual de la sección de cable se hace mediante los tres criterios de selección, eligiendo el mayor de las tres secciones calculadas. Esta sería la sección técnica. Pero si se usa una sección mayor se podrían disminuir las pérdidas térmicas en el cable, aunque, el coste de capital de la instalación sería mayor. Si las pérdidas son altas y aumentamos la sección hasta la siguiente disponible se reducirían las pérdidas, esto es, se tendrían un menor coste de operación. Se podría seguir aumentando la sección y, por tanto, disminuyendo el coste operativo, hasta un límite que vendría marcado por un extracoste de capital demasiado alto para los ahorros energéticos obtenidos.

Un análisis completo del problema incluiría diversos aspectos económicos muy difíciles de valorar. En relación a este punto se han recogido algunos párrafos de la norma UNE 21144-3-2 donde se tratan estas cuestiones.

Para poder combinar los costes de compra e instalación con el importe de las pérdidas de energía que surgen durante la vida económica del cable, es necesario expresarlos en valores económicos comparables, es decir, valores referidos a un mismo punto en el tiempo. Resulta práctico utilizar la fecha de compra de la instalación como dicho punto y referirse al mismo como al “presente”. Esto se realiza por el procedimiento de depreciación, estando la tasa de depreciación ligada al coste de los préstamos monetarios.

En el procedimiento aquí mencionado se ha omitido la inflación, dado que ésta afectará tanto al coste de los préstamos como al de la energía. Si dichos elementos se consideran sobre el mismo período de tiempo y el efecto de la inflación es aproximadamente el mismo para ambos, la elección de una sección económica se puede realizar satisfactoriamente sin introducir la complicación añadida de la inflación.

Para calcular el valor presente de los costes de las pérdidas es necesario escoger los valores apropiados de evolución futura de la carga, los aumentos anuales del precio del kWh y las tasas anuales de depreciación a lo largo de la vida económica del cable, que puede ser de 25 años o más. No es posible dar en esta norma ninguna orientación sobre dichos aspectos ya que los mismos dependen de las condiciones y de las limitaciones financieras de cada instalación. Sólo se dan las fórmulas apropiadas; el proyectista y el usuario son quienes deberán convenir los factores económicos a emplear.

La incidencia de los errores en los datos financieros, particularmente aquéllos que determinan los costes futuros, es pequeña. Aunque resulta ventajoso buscar datos de la máxima exactitud posible, se pueden lograr considerables economías empleando datos basados en estimaciones razonables.

10.4. Cálculos

El cálculo de la sección económica se realiza de acuerdo con la norma UNE 21144-3-2 donde se especifica la optimización económica de las secciones de los cables eléctricos de potencia.

No se han incluido en este cálculo aspectos tales como el mantenimiento, las pérdidas de energía en los sistemas de ventilación forzada ni los costes de la energía según la hora del día.

El coste total de instalación y explotación de un cable durante su vida económica, expresado en valores presentes, se calcula como sigue:

$$CT = CI + CJ \quad (13)$$

donde

CI es el coste de la longitud de cable instalado, €;

CJ es el coste equivalente en la fecha de compra de la instalación, es decir, valor presente, de las pérdidas por efecto Joule durante una vida económica de N años, €;

Evaluación de CJ

El coste total debido a las pérdidas se compone de dos partes: a) los gastos de energía y b) los gastos debidos a la capacidad de suministro adicional requerido para cubrir pérdidas.

a) El coste de la energía durante el primer año es:

$$Pérdidas \text{ energía} = (I_{\max}^2 \cdot R \cdot l \cdot N_p \cdot N_c) \cdot T \cdot P(\text{€}) \quad (14)$$

b) El coste de las pérdidas del primer año es:

$$Pérdidas \text{ potencia} = (I_{\max}^2 \cdot R \cdot l \cdot N_p \cdot N_c) \cdot D(\text{€/año}) \quad (15)$$

El valor presente de los costes de la energía durante N años de explotación, depreciado a la fecha de la compra es:

$$CJ = (I_{\max}^2 \cdot R \cdot l \cdot N_p \cdot N_c)(T \cdot P + D) \cdot \frac{Q}{(1 + i/100)} \quad (16)$$

donde

I_{max} es la carga máxima del cable durante el primer año, A;

l es la longitud del cable, m;

R es la resistencia aparente en c.a. del conductor, por unidad de longitud.

Como la sección de conductor económica es usualmente mayor que la sección basada en consideraciones térmicas, su temperatura será inferior al valor máximo admisible. Resulta práctico suponer, a falta de información más precisa, que R es constante y tiene un valor correspondiente a una temperatura de $(\theta - \theta_a)/3 + \theta_a$.

Aquí θ es la temperatura máxima admisible nominal del conductor para el tipo de cable en cuestión y θ_a es la temperatura media ambiental.

- Np es el número de conductores de fase por circuito;
- Nc es el número de circuitos que transportan una carga del mismo valor y tipo;
- T es el número de horas por año de funcionamiento a la corriente máxima I_{max} que produciría las mismas pérdidas anuales que la corriente de carga variable efectiva, h/año;

$$T = \int_0^{8760} \frac{I(t)^2}{I_{max}^2} dt \quad (17)$$

- T es el tiempo, h;
- I(t) es la corriente de carga en función del tiempo, A;
- P es el coste de un vatio-hora de energía al nivel de tensión considerado, €/Wh;
- D es el coste anual para cubrir estas pérdidas, €/W·año;
- I es la tasa de depreciación, sin incluir el efecto de la inflación, %;
- Q es un coeficiente que tiene en cuenta el aumento de la carga, el aumento del coste de la energía a lo largo de N años y la tasa de depreciación;

$$Q = \sum_{n=1}^N (r^{n-1}) = \frac{1-r^N}{1-r} \quad (18a)$$

$$r = \frac{(1+a/100)^2 \cdot (1+b/100)}{(1+i/100)} \quad (18b)$$

- a es el aumento anual de la carga, %;
- b es el aumento anual del coste de la energía, sin incluir el efecto de la inflación, %;
- N período abarcado por los cálculos financieros, denominado también “vida económica”, años.

10.5. Cálculo de la Sección Económica en la Hoja de cálculo

La sección económica se calcula en instalaciones industriales para los cables principales, cuyas pérdidas adicionales suponen un coste importante.

Se va crear una nueva pestaña en la Hoja llamada “Eficiencia energética” para el cálculo de la sección económica.

Esta pestaña consta de tres tablas:

1. Tabla “Datos”: en esta tabla se introducen los datos generales de cálculo de la sección económica. Esta tabla incluye los siguientes parámetros:

- Tamb: es la temperatura media ambiental.
- I: carga máxima del cable durante el primer año. Puesto que no disponemos de datos de la intensidad que circula por cada circuito de la instalación durante un año, habrá que suponer un valor de intensidad máxima. En concreto, se va a tomar una intensidad un 10% superior a la intensidad de diseño del cable que se evalúe.
- ρ_{Cu}/ρ_{Al} : resistencia del conductor a 20°C.

La norma UNE 20003 (Cobre-tipo recocido e industrial, para aplicaciones eléctricas) recoge que la resistividad del cobre a 20°C es $1/58 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

La norma UNE 21096 (Alambre de aluminio industrial recocido, para conductores eléctricos) recoge que la resistividad del aluminio industrial a 20°C es $1/35,71 \Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$.

- T: es el número de horas por año de funcionamiento a la corriente máxima, I_{max} , que produciría las mismas pérdidas anuales que la corriente de carga variable efectiva, $h/\text{año}$. Se fijará en 2500 h/año.
- N: período abarcado por los cálculos financieros. Se establece un período de amortización de 25 años.
- a: 0,5 %
- b: 2,0 %
- i: 5.0 %.

Se han tomado los valores de evolución futura de la carga (a), aumento anual del precio del kWh (b) y tasa anual de depreciación (i) a lo largo de la vida económica del cable de un ejemplo de la norma UNE 21144-3-2.

Para determinar el coste de la energía y de la potencia se hará un promedio del término de potencia y del término de energía de la tarifa que se usaría para la Instalación. La instalación propuesta para el análisis es una instalación industrial con una potencia disponible de 620 kW y alimentada en Alta Tensión desde 10 kV. Por sus características, dicha instalación contrataría una tarifa tipo 6A. Esta tarifa cuenta con seis períodos tarifarios en función de la hora del día, el tipo de día y la temporada (mes). Se va a suponer que se consume potencia solo durante los períodos 1,2 y 6 siendo el consumo en cada período sobre el total de: 45% en el período 1, 35% en período 2 y 20% en período 6. Así, se tendría un coste de la energía y de la potencia como el indicado a continuación:

- P: 0,0821542 €/kWh.
- D: 25,177610645 €/kW año

2. Tabla “Selección”: en esta tabla se introduce el destino del cable para el que se quiere calcular la sección económica. El subcampo destino se encuentra en la pestaña principal “Instalación”. Al seleccionar un cable determinado se muestran:

- S: sección técnica del cable en mm²
- Tmax: temperatura máxima soportada por el aislamiento de ese cable en °C
- Thetam: temperatura del cable en caso de tener la sección económica
- long: longitud del cable seleccionado
- Np: número de conductores de fase por circuito
- Nc: número de circuitos que transportan una carga del mismo valor y tipo
- r: cantidad auxiliar definida para obtener Q
- Q: cantidad auxiliar definida en la ecuación donde se calcula el valor presente de los costes de la energía durante N años de explotación

3. Tabla de “Resultados”: en esta tabla se muestra para cada sección (rango de secciones entre 25 y 240 mm²) los siguientes campos:

- Resistencia a Thetam: resistencia del cable a la temperatura del cable en caso de tener la sección económica
- Coste de las pérdidas: valor presente de las pérdidas Joule durante una vida económica de N años
- Coste inicial: coste de la longitud del cable instalado. El precio para cada sección de cable se ha tomado del catálogo de Prysmian.
- Coste total: coste de instalación y explotación de un cable durante su vida económica, expresado en valores presentes.
- Amortización: número de años que tarda en amortizarse la sección económica frente a la sección técnica.

10.6. Caso Práctico

Se ha calculado la sección económica de la línea de derivación individual que alimenta el cuadro CS1, uno de los circuitos principales de la Instalación.

Los resultados de la Hoja se muestran a continuación. Se incluye una gráfica con el coste total, el coste inicial y el coste de las pérdidas. En la gráfica se observa que la sección económica del circuito es 185 mm² (se recuerda que la sección técnica calculada es 150 mm² para dicho cable) ya que para esa sección se cruzan las curvas de coste inicial y coste de las pérdidas.

Datos	
Temperatura ambiente	20
Intensidad	190
Resistividad cobre a 20°C	1,835E-08
Resistividad aluminio a 20°C	3,03E-08
T	2500
N	25
a	0,5
b	2
i	5
P	8,21542E-05
D	0,025177611
K2	0,39

Selección								
Cable	Seccion técnica mm2	Tmax °C	Thetam °C	Longitud m	Np	Nc	r	Q
CS1	150	90	43,333	150	3	1	0,981	20,088

Solución					
sección mm2	Resistencia (Thetam) °C	Coste pérdidas €	Coste inicial €	Coste total €	Amortización años
25	0,000801	57405,923	1125,000	58530,923	-
35	0,000572	41004,231	1485,000	42489,231	-
50	0,000401	28702,961	2115,000	30817,961	-
70	0,000286	20502,115	3015,000	23517,115	-
95	0,000211	15106,822	3870,000	18976,822	-
120	0,000167	11959,567	4815,000	16774,567	-
150	0,000134	9567,654	5985,000	15552,654	-
185	0,000108	7757,557	7200,000	14957,557	16,781
240	0,000083	5979,784	9450,000	15429,784	24,144

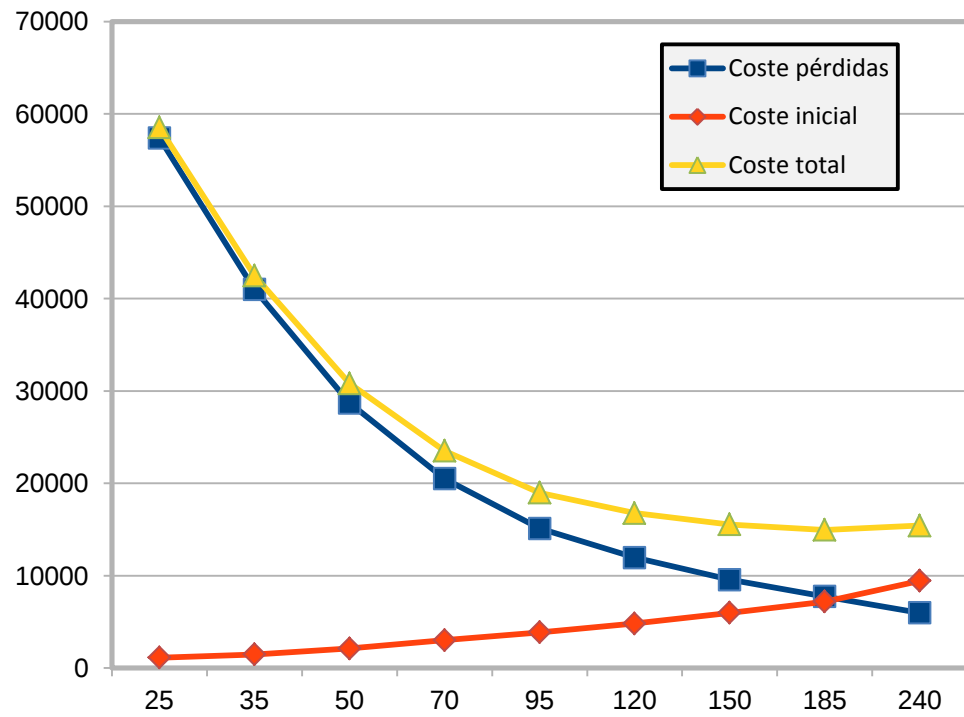


Figura 10. Sección económica. Costes

11 Comparación de Programas

Esta comparación tiene por objeto presentar las ventajas y desventajas entre la hoja de cálculo y los programas comerciales con los que se ha trabajado. Es fundamental este punto porque ayudará a comprender el motivo del desarrollo de la hoja de cálculo como una alternativa al uso de estos programas.

11.1. Aprendizaje

El aprendizaje de un programa depende de distintos factores entre los que vamos a tratar: el estudio de su manejo mediante las guías de uso que ofrece el programa y la estructura en la que se organiza dicho programa.

11.1.1. Guías de uso

Al usar por primera vez un programa de este tipo es esencial contar con guías de uso, tutoriales o ayudas al usuario. Esto determinará el tiempo que nos llevará tener un amplio conocimiento del mismo.

11.1.1.1. Ecodial

En Ecodial se ha hecho uso del manual de ayuda técnica del programa “Ecodial Advance Calculation Help”. En este documento se tratan distintos puntos del cálculo de Instalaciones de Baja Tensión como: caídas de tensión máximas, cálculos de impedancias, verificación y selectividad de protecciones, etc. En dichos puntos se incluyen descripciones, recomendaciones y obligaciones normativas, parametrización de magnitudes en el software, ejemplos, etc.

Este programa incluye iconos de ayuda contextual a la derecha de valores que es necesario introducir como datos. Por ejemplo, en el caso del factor de simultaneidad, si se hace clic en icono correspondiente aparece la ventana del documento de ayuda técnica del programa mencionado anteriormente en el apartado del coeficiente de simultaneidad.

11.1.1.2. Doc

En Doc se ha hecho uso de la guía completa del programa “DOC_EN” y de tutoriales en youtube. En esta guía se define el entorno de trabajo y los comandos disponibles, las funcionalidades, el cálculo y dimensionamiento, la verificación de protecciones, la generación de documentos, etc.

11.1.1.3. Hoja de Cálculo

Para la comprensión y manejo de la Hoja se ha hecho uso de la memoria del proyecto “Desarrollo de una Metodología y Herramienta de Cálculo de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión” que incluye todo lo referente al diseño de la herramienta. En

concreto se han visto todos los elementos que componen la instalación, los cálculos llevados a cabo y la forma de utilizar la herramienta de cálculo.

11.1.2. Estructura

La facilidad para aprender a usar las herramientas radica también en la forma en la que está estructurada, ya que ello definirá como se adapta el usuario al manejo de dicha herramienta.

11.1.2.1. Software Comerciales

En este proyecto se ha trabajado con los programas de Schneider y ABB pero también se ha hecho uso (aunque no en profundidad) de otras herramientas similares como CIEBT de dmELECT o SIMARIS de Siemens. Esto ha permitido describir en general qué estructura sigue un programa comercial de este tipo.

Los software de cálculo de instalaciones tienen una forma similar de proceder desde la creación del proyecto hasta la generación del documento final. En general se definen cinco etapas:

- Definición de las condiciones generales: se especifican parámetros generales de la instalación, entre ellos, la tensión de alimentación, la frecuencia, el factor de potencia, las caídas de tensión máximas, etc.
- Diseño del esquema unifilar: en general es similar en todos los programas, se define la instalación de arriba a abajo seleccionando los elementos que la componen.
- Definición de las características de los elementos: entre estos elementos están la acometida, la línea general de alimentación, las derivaciones individuales y las cargas. Las características que se piden son el modo de instalación, el tipo de conductor y aislamiento, la tensión de aislamiento, la longitud de cable, etc.
- Cálculo del proyecto: una vez definida la instalación se procede al cálculo de la misma. Tras el cálculo se muestran mensajes de error, advertencia o información.
- Generación de documentos: tras calcular la instalación y corregir los posibles errores y advertencias se pueden generar los documentos del proyecto. Dependiendo del programa utilizado se tendrá un informe diferente.

11.1.2.2. Hoja de cálculo

La hoja de cálculo presenta una estructura muy diferente a la de las herramientas comerciales.

La principal diferencia es que no presenta interfaz gráfica donde dibujar el diagrama unifilar de la instalación. En su lugar, el entorno de trabajo es una Hoja de Excel donde se introduce la instalación como un diagrama que se conecta por nodos de inicio y fin. Para ello, con una plantilla se van incluyendo los circuitos desde abajo hasta arriba, al revés de cómo se dibujaría el esquema unifilar. En dicha plantilla se introducen las características de cada circuito y se visualizan los resultados.

11.1.3. Conclusiones

Centrando el análisis comparativo en las tres herramientas con las que se ha trabajado se puede concluir que:

- Ecodial es la herramienta más sencilla y rápida de aprender a usar para un usuario inexperto por dos razones, cada una de ellas asociada a los dos puntos que se han marcado como definitorios del aprendizaje:
 1. Guías de uso: las ayudas contextuales del programa resultan muy útiles para comprender con que parámetro se está trabajando y ayudan a ubicar rápidamente al usuario al recomendar valores según norma para dicho parámetro o valores que Ecodial usaría por defecto.
 2. Estructura: en cuanto a la organización de la herramienta, esta se estructura en torno a cuatro áreas de trabajo que se corresponden con un paso estratégico en su estudio: definición de condiciones generales, diseño y cálculo e informe de diagnóstico. Esta estructura organizacional se adapta muy bien a las etapas de realización de un proyecto por lo que la comprensión de su uso es casi inmediata.
- En cuanto al conocimiento de los programas comerciales, Doc es la herramienta de la que se tiene un conocimiento más profundo ya que las guías de uso del programa son más completas que las de Ecodial.

Centrando ahora el análisis en comparar por un lado las herramientas comerciales y por otro la Hoja de cálculo podemos concluir que:

- El hecho de no contar con interfaz gráfica en la Hoja puede crear mucha confusión la primera vez que un usuario utiliza la herramienta.
- La mayoría de los programas comerciales siguen una estructura similar desde la creación del proyecto hasta la generación de documentos por lo que haber trabajado con un solo programa facilita el uso de aprender a manejar un segundo.
- La Hoja siempre puede modificarse y mejorarse para que se adapte mejor al usuario.

11.2. Introducción de datos

La introducción de datos define la facilidad para introducir la Instalación en la herramienta con la mayor facilidad y en el menor tiempo posible. Es por tanto una etapa clave en la realización del proyecto que conviene comentar.

11.2.1. Software comerciales

En los programas se definen en primer lugar los parámetros generales de la Instalación como por ejemplo la normativa a usar, la tensión de alimentación, la frecuencia, el factor de potencia, etc. En determinados programas, como por ejemplo

en Doc, se permite la definición de las líneas que van a una carga determinada por lo que no tendrá que especificarse dicha línea cada vez que se ponga esa carga.

El resto de datos que hay que introducir son las propiedades de cada elemento de la instalación.

11.2.1.1. Ecodial

Las propiedades de cada elemento se visualizan constantemente en una ventana a la izquierda del entorno de diseño del diagrama unifilar.

Se pueden visualizar las propiedades del conjunto de elementos que componen un circuito, como por ejemplo, en el caso de tratarse de un circuito al que se conecta una carga final, estos elementos serían el interruptor, el cable y la carga.

También se pueden visualizar las propiedades específicas de cada elemento individual.

11.2.1.2. Doc

Las propiedades de cada elemento se visualizan en una ventana que aparece tras hacer doble clic sobre un elemento.

Además de estas propiedades se pueden seleccionar características más específicas haciendo clic en un botón que se sitúa abajo y a la derecha de la ventana de propiedades genéricas y se denomina “Más opciones”. Por ejemplo, en el caso de un cable se pueden especificar la separación entre circuitos adyacentes, el dimensionado del conductor de protección o la distorsión de tercer armónico.

11.2.2. Hoja

En la Hoja, para cada circuito se toma la platilla “modelo de circuito” y se introducen los datos de dicho circuito. Puede resultar muy sencillo si tenemos muchos circuitos iguales porque bastaría con copiar la plantilla las veces necesarias, lo que equivale a lo que se ha mencionado anteriormente para los programas cuando se define una línea que llega a una carga determinada.

11.2.3. Conclusiones

Tras la comparación de las tres herramientas podemos concluir lo siguiente:

- En cuanto a la rapidez en la introducción de datos Ecodial y la Hoja ahorran más tiempo que Doc donde hay que seleccionar la ventana de cada elemento para definir sus propiedades.
- En cuanto a comodidad Ecodial es la mejor herramienta ya que podemos visualizar las propiedades de los elementos de forma permanente y simplemente seleccionándolos desde el diagrama unifilar.
- En la Hoja, al tener una sola línea para definir cada circuito hay que conocer los campos donde se incluyen los datos para manejarlo con soltura.

11.3. Información proporcionada por los programas

Si queremos validar los resultados proporcionados por un programa es fundamental que este nos facilite todos los parámetros que se han calculado para llegar a los resultados finales. Estos resultados finales son las secciones de los cables, las caídas de tensión, las intensidades de cortocircuito, etc. Hablando de parámetros intermedios nos referimos a las impedancias de los cables, los factores de corrección, etc.

11.3.1. Ecodial

En Ecodial no se proporcionan las resistencias y reactancias para el cálculo de las intensidades de cortocircuito.

En cuanto a las caídas de tensión tampoco se proporcionan las resistencias y reactancias por lo que además no se sabe a qué temperatura se calculan dichas resistencias. Tampoco se facilita la caída de tensión en la línea general de alimentación.

Ya que no se proporcionan las reactancias no se sabe si se están calculando para la configuración de cable más desfavorable.

11.3.2. Doc

En Doc tampoco se sabe en el caso de las caídas de tensión a qué temperatura se ha calculado la resistencia. En concreto, se muestra la resistencia a diferentes temperaturas, entre ellas a 80°C que no se corresponde con la temperatura máxima admisible de ningún aislamiento ni con la temperatura real del cable.

11.3.3. Hoja de cálculo

En la Hoja de cálculo se muestran todos los cálculos intermedios por lo que se puede obtener cualquier parámetro.

11.3.4. Conclusiones

En cuanto a la información obtenida por las herramientas se puede concluir que:

- Doc proporciona más información que Ecodial por lo que el análisis ha sido más completo entre la Hoja y Doc.
- El hecho de no obtener los parámetros intermedios hace que no se sepa si la solución obtenida se ajusta a la situación más desfavorable que se puede suponer en la Instalación.

11.4. Corrección de Errores y Advertencias

Tras el cálculo de la instalación pueden aparecer mensajes de error y advertencia por distintas causas. Es importante conocer que variables hay que modificar para corregir un error concreto pues en caso contrario esta etapa del proyecto puede llevar mucho tiempo.

11.4.1. Doc

En Doc se proporciona información detallada sobre los mensajes de error y advertencia en la guía del programa. En concreto, se definen los posibles errores o advertencias que pueden aparecer y se dan soluciones para corregir dichos problemas. Además, en la ventana de cálculo, al final del dimensionado, para un error concreto se muestran varias alternativas que podrían ser la causa del error que aparece. Corrigiendo esos defectos el error desaparece.

En cuanto a las protecciones se proporcionan información sobre la verificación de protecciones contra los distintos tipos de falta en la guía de uso de Doc.

11.4.2. Ecodial

En Ecodial también se muestran estos mensajes pero no se da información detallada de cómo actuar en cada caso lo que dificulta la resolución de la instalación. Sin embargo, con la información que se da en Doc se puede seguir el mismo razonamiento para corregir los posibles errores o advertencias.

Lo anterior es esencial sobre todo en el dimensionado de las protecciones que a menudo presentan problemas de selectividad o no protegen frente a algún defecto. En la guía técnica de Ecodial se pueden consultar algunos puntos como la selectividad entre las protecciones de MT y BT, entre protecciones diferenciales o entre interruptores automáticos.

11.4.3. Hoja de cálculo

La Hoja de Excel advierte ante determinados errores resaltando el valor del campo que es erróneo. Los errores que se detectan son: caídas de tensión por encima del límite, intensidad máxima admisible inferior a la intensidad de diseño, calibre del interruptor magnetotérmico superior a la máxima intensidad admisible y longitud que protege el magnetotérmico inferior a la longitud del cable.

En cuanto a las protecciones la Hoja incluye el dimensionado del interruptor magnetotérmico del circuito pero no el dimensionado de interruptores diferenciales. Tampoco se incluyen verificaciones de selectividad o filiación.

11.4.4. Conclusiones

En cuanto a la corrección de errores de las herramientas podemos concluir que:

- Doc es la herramienta que facilita información más precisa sobre la corrección de errores o advertencias.
- En Ecodial ha llevado mucho tiempo la verificación de protecciones porque no se dan indicaciones concretas, salvo para protecciones diferencias y de MT-BT.
- En la Hoja las indicaciones de error resultan muy útiles pero hay más errores que podría cometer un usuario inexperto de los que se podría advertir.

12 Conclusiones y Propuestas de Mejora

12.1. Conclusiones

Con la realización de este proyecto se perseguían dos objetivos:

1. En primer lugar, validar la Hoja de cálculo desarrollada en Excel mediante la comparación de resultados con los programas comerciales.
2. En segundo lugar, presentar las ventajas e inconvenientes de usar la Hoja frente a utilizar programas comerciales de cálculo de Instalaciones.

12.1.1. Validación de resultados

Para poder llevar a cabo una validación de resultados de la Hoja de Cálculo se ha realizado un análisis comparativo con los programas comerciales Doc y Ecodial de las principales magnitudes que intervienen en el dimensionado de una instalación eléctrica. Estas magnitudes son: las intensidades de diseño, las caídas de tensión y las intensidades de cortocircuito.

Para entender las conclusiones obtenidas en cada caso se han recopilado los resultados más importantes del análisis de cada magnitud. En concreto, se recogen las diferencias encontradas en alguno de los parámetros que intervienen en el cálculo de las magnitudes identificadas y que son decisivos para los resultados obtenidos.

Por otro lado, se habló no solo de la validación de la Hoja de cálculo sino también de la comprobación de los resultados obtenidos en los programas comerciales. En cuanto a esta cuestión, en ambos programas se han obtenido algunos factores de corrección que no coinciden con los valores de las tablas de la norma UNE 20460 y en Doc se muestran intensidades máximas admisibles que tampoco coinciden con las indicadas en la norma actual.

12.1.1.1. Intensidades de diseño

Las intensidades de diseño se obtienen a partir de la potencia, el factor de potencia y la tensión nominal. A continuación se recoge para las herramientas utilizadas los aspectos más representativos en el cálculo de las intensidades de diseño.

- Hoja de cálculo
 - Las intensidades de diseño en la Hoja se obtienen a partir de la suma de potencias de los elementos conectados al cuadro en lugar de obtenerlas mediante la suma de intensidades de diseño de los elementos conectados al cuadro.
 - No se tiene en cuenta el equilibrado de las cargas monofásicas.

- Programas comerciales
 - En cuanto a la potencia demandada por las cargas de alumbrado en Ecodial esta potencia difiere un poco de la potencia demandada establecida en la Instalación para estas cargas.
 - En cuanto a los factores de potencia se han detectado las siguientes diferencias en Doc:
 - En el caso de lámparas de descarga se emplea el factor de potencia que resulta después de compensar la carga a diferencia de lo establecido en la norma (factor de potencia sin compensación).
 - Para cada circuito se calcula el factor de potencia, en lugar de emplear el factor de potencia global establecido para la Instalación (0,85).
 - En cuanto a la tensión de la carga en Doc el valor de tensión que se toma para el cálculo de la intensidad de diseño tiene en cuenta la caída de tensión en ese punto de la instalación.

En lo que respecta a la validación de las intensidades de diseño en la hoja de cálculo se concluye que los resultados son admisibles excepto cuando se calculan intensidades de diseño con cargas desequilibradas. En cualquier otro caso el cálculo de las intensidades de diseño mediante la suma de las potencias de los elementos conectados a un cuadro es muy próximo (con errores inferiores al 1%) al cálculo mediante la suma de las intensidades demandadas por cada elemento.

12.1.1.2. Caídas de tensión

Las caídas de tensión se obtienen a partir de las resistencias de cable a la temperatura máxima permitida por el aislamiento, las reactancias, las intensidades de diseño y el factor de potencia.

Resistencias

- En Ecodial no se proporcionan las resistencias de los circuitos.
- En Doc se proporcionan la resistencia del cable a diferentes temperaturas pero no se indica qué temperatura se emplea para el cálculo de la caída de tensión.
- En la Hoja se calcula la resistencia a la máxima temperatura permitida por el aislamiento, el caso más restrictivo.

Reactancias de cable

- En Ecodial no se proporciona la reactancia de cable
- En Doc se ha seguido la norma UNE 20460
- En la Hoja se ha realizado el cálculo de acuerdo a lo especificado en el REBT.

Intensidades de diseño

Se arrastra el error de las intensidades de diseño que se vio en el apartado correspondiente a intensidades de diseño. Este error era más significativo para Doc que para Ecodial.

Factores de potencia

- En Ecodial se puede esperar que se emplee el factor global 0,85.
- En Doc, como se ha comentado anteriormente para las intensidades de diseño, se calcula el factor de potencia para cada circuito y además en el caso de las cargas de alumbrado se emplean el factor de potencia tras la compensación de la carga.
- En la hoja de cálculo se emplea el factor global 0,85.

Tras el análisis de los resultados obtenidos se concluye que las caídas de tensión obtenidas en la Hoja de Cálculo son válidas. El hecho de considerar unas reactancias de cable notablemente inferiores que en los programas hace que se obtengan caídas de tensión inferiores. El cálculo en la Hoja se ha hecho según lo especificado en el REBT por lo que los errores se considerarán válidos aunque no se está considerando el caso más desfavorable

12.1.1.3. Intensidades de cortocircuito

Las intensidades de cortocircuito se obtienen a partir de las resistencias y reactancias de cortocircuito y la tensión nominal de la instalación.

Resistencias de cortocircuito

En las tres herramientas el cálculo de las resistencias sigue lo especificado en la norma UNE-EN 60909-0.

Reactancias de cortocircuito

- En Ecodial no se proporcionan las reactancias de cortocircuito
- En Doc el cálculo de la reactancia se ha hecho según la norma UNE 20460 eligiendo para todos los cables la configuración trébol, la más desfavorable.
- En la Hoja solo se han tenido en cuenta las reactancias a partir de 120 mm² de sección, según lo especificado en el REBT.

Tras el análisis de los resultados obtenidos se concluye que las intensidades de cortocircuito obtenidas en la Hoja de Cálculo son válidas. Las diferencias en los resultados se deben al hecho de considerar unas reactancias de cortocircuito menores. Esto hace que las intensidades máximas admisibles obtenidas en la Hoja sean superiores, por lo que se estaría del lado de la seguridad.

12.1.2. Ventajas y desventajas de la Hoja respecto a los programas

Las ventajas del uso de la Hoja de cálculo con respecto a las herramientas convencionales son las siguientes:

- En los programas hay que verificar que normativas se siguen para los distintos cálculos. Al utilizar programas de cálculo de una empresa internacional, como

son Doc y Ecodial, lo normal es que se siga la normativa Europea. Habrá que tenerlo en cuenta ya que en España se toman consideraciones diferentes en algunos casos como por ejemplo, en el caso de la temperatura ambiente en instalaciones al aire y enterradas. En consecuencia se obtienen ligeras diferencias en los resultados.

- En los programas hay que revisar los valores por defecto que trae el programa ya que pueden no coincidir con los establecidos en la instalación. En este análisis se han encontrado:
 - Valores estándares para la resistividad del terreno y la temperatura diferentes a los considerados por la norma actual.
 - Factores de simultaneidad definidos por defecto. En Ecodial a falta de una información más precisa para los cuadros y las canalizaciones se aplican los factores de simultaneidad establecidos en la norma IEC 61439-1.
- En los programas se han obtenido valores que no coinciden con los fijados por la norma. La desventaja en este caso es que no se pueden corregir estos valores, al contrario que en la Hoja donde se pueden corregir posibles errores fácilmente. En lo que respecta a esta cuestión, las empresas que han desarrollado los softwares de Doc y Ecodial no se hacen responsables de los resultados obtenidos ya que sus programas se pueden descargar de forma gratuita. Si ocurre, como efectivamente hemos comprobado, que hay algunos valores de las tablas normativas mal definidos el responsables de los errores será la persona que firma el proyecto, no la empresa que desarrolló el software.
- En los programas hay que verificar que para un cálculo determinado se está tomando la situación más desfavorable. Según el análisis efectuado:
 - Doc cumple con esta premisa
 - En Ecodial no se sabe en algunos casos si es así. Por ejemplo, en el cálculo de las reactancias no se sabe si se está tomando la configuración trébol que es la más desfavorable o si las resistencias para el cálculo de la máxima caída de tensión se están obteniendo a la temperatura máxima soportada por el aislamiento o a la temperatura real del cable.
 - En la Hoja de cálculo el usuario puede modificar las condiciones para tener en cuenta una situación u otra.
- La Hoja se puede adaptar todo lo que se quiera para adecuarla al manejo del usuario. Se le pueden añadir nuevas funcionalidades como se ha hecho en este proyecto con el cálculo de la sección económica.

Las desventajas del uso de la Hoja de cálculo con respecto a las herramientas convencionales son las siguientes:

- No cuenta con interfaz gráfica porque está pensada para introducir la Instalación como nodos de inicio y fin. Esta forma de entender la Instalación puede ser algo confusa al principio.
- En necesario conocer bien el uso de la herramienta y los distintos campos para manejarla con soltura ya que no es tan intuitiva como los programas convencionales.
- La Hoja de cálculo no ofrece un dimensionado tan completo como los programas comerciales. Este punto se trata más adelante en el apartado de propuestas de mejora.

12.2. Propuestas de mejora

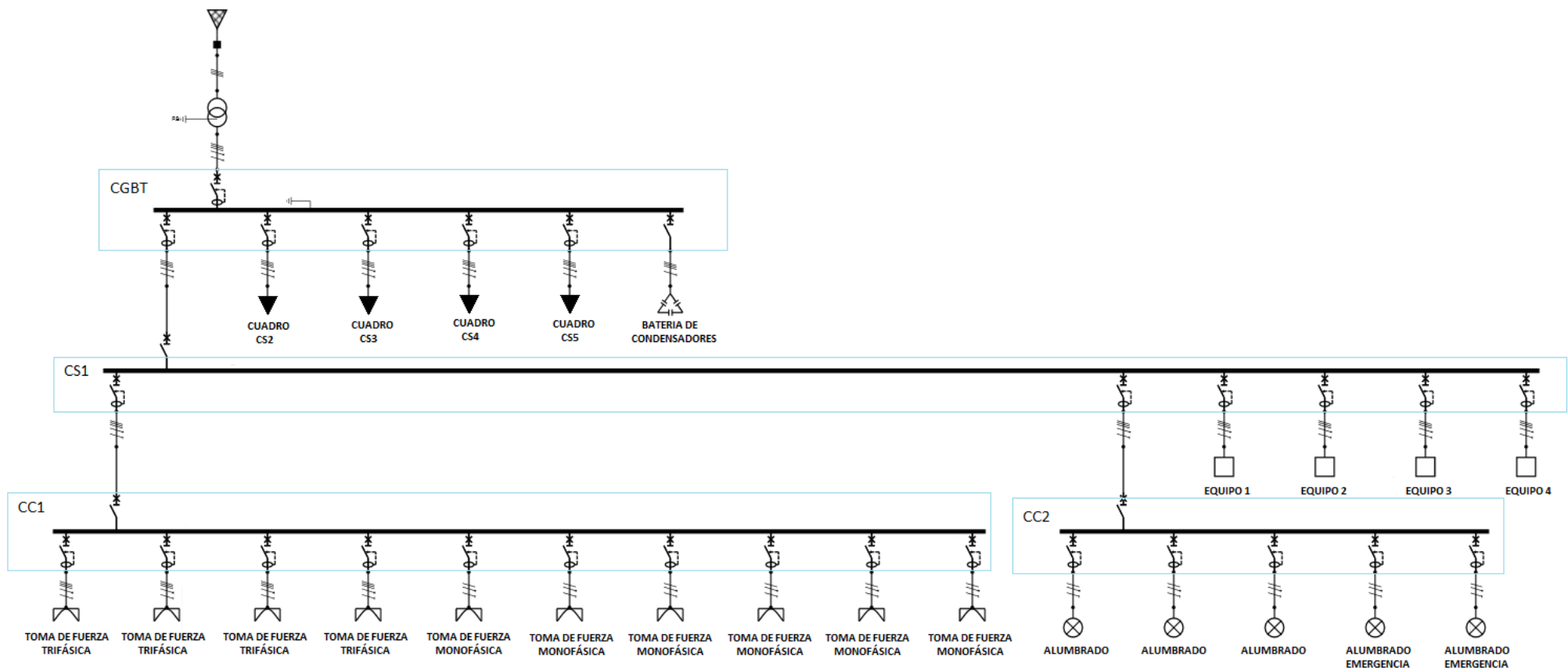
Ya se ha comentado que la Hoja no ofrece un dimensionado de la Instalación equiparable al de los programas comerciales usados porque aún faltan cosas por completar. A continuación se proponen posibles mejoras que podrían llevarse a cabo en la Hoja de Cálculo:

- Dimensionado del neutro y del conductor de protección
- Dimensionado de interruptores diferenciales
- Verificación de selectividad entre las protecciones
- Incluir base de datos para que en función del dimensionado se proporcionen los cables y las protecciones de un fabricante concreto que podrían usarse en la Instalación obtenida.
- Incluir el presupuesto de la Instalación.

Referencias

- [1] S. Schneider Electric España, «Manual Teórico Práctico. Instalaciones en Baja Tensión. Volumen 2».
- [2] S. Schneider Electric España, «Ecodial Advance Calculation. Ayuda Técnica».
- [3] Wikipedia, «Hoja de cálculo,» [En línea].
- [4] S. Schneider Electric España, «Información Técnica Complementaria. Coordinación de la Aparata. Selectividad y Filiación».
- [5] ABB, «DOC. Manual de Usuario».
- [6] Prysmian, «Cables y Accesorios para Baja Tensión».
- [7] J. Toraño, R. Rodríguez, I. Diego, L.M. López, Información Tecnológica-Vol. 15. Selección Económica de Cables Teniendo en Cuenta las Pérdidas Térmicas, Centro de Información Tecnológica, 2004.
- [8] Lopez, Pedro Cabrera, «Proyecto de Fin de Carrera. Desarrollo de una Metodología y Herramienta de Cálculo de Instalaciones Eléctricas de Baja Tensión,» 2015.

ESQUEMA UNIFILAR DE LA INSTALACIÓN



Plano Unifilar caso práctico	Número 1	Fecha 05/09/15
Proyecto LMD	Escala	
Elaborado por: Luna Moreno Díaz		