



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA
INFORMÁTICA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE CABLES
AISLADOS DE ALTA TENSIÓN**

Autor: Néstor Rodríguez Pérez
Director: M^a. Inmaculada Blázquez García

Madrid
Junio 2018

Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título
**“Desarrollo de una herramienta informática para el dimensionamiento de
cables aislados de alta tensión”**

en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el
curso académico **2017-2018** es de mi autoría, original e inédito y
no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es
plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada
de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Néstor Rodríguez Pérez

Fecha: 01 / 06 / 2018

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO

Fdo.:

Fecha: 01 / 06 / 2018

AUTORIZACIÓN PARA LA DIGITALIZACIÓN, DEPÓSITO Y DIVULGACIÓN EN RED DE PROYECTOS FIN DE GRADO, FIN DE MÁSTER, TESINAS O MEMORIAS DE BACHILLERATO

1°. Declaración de la autoría y acreditación de la misma.

El autor **D. Néstor Rodríguez Pérez**

DECLARA ser el titular de los derechos de propiedad intelectual de la obra: **“Desarrollo de una herramienta informática para el dimensionamiento de cables aislados de alta tensión”**, que ésta es una obra original, y que ostenta la condición de autor en el sentido que otorga la Ley de Propiedad Intelectual.

2°. Objeto y fines de la cesión.

Con el fin de dar la máxima difusión a la obra citada a través del Repositorio institucional de la Universidad, el autor **CEDE** a la Universidad Pontificia Comillas, de forma gratuita y no exclusiva, por el máximo plazo legal y con ámbito universal, los derechos de digitalización, de archivo, de reproducción, de distribución y de comunicación pública, incluido el derecho de puesta a disposición electrónica, tal y como se describen en la Ley de Propiedad Intelectual. El derecho de transformación se cede a los únicos efectos de lo dispuesto en la letra a) del apartado siguiente.

3°. Condiciones de la cesión y acceso

Sin perjuicio de la titularidad de la obra, que sigue correspondiendo a su autor, la cesión de derechos contemplada en esta licencia habilita para:

- a) Transformarla con el fin de adaptarla a cualquier tecnología que permita incorporarla a internet y hacerla accesible; incorporar metadatos para realizar el registro de la obra e incorporar “marcas de agua” o cualquier otro sistema de seguridad o de protección.
- b) Reproducir la en un soporte digital para su incorporación a una base de datos electrónica, incluyendo el derecho de reproducir y almacenar la obra en servidores, a los efectos de garantizar su seguridad, conservación y preservar el formato.
- c) Comunicarla, por defecto, a través de un archivo institucional abierto, accesible de modo libre y gratuito a través de internet.
- d) Cualquier otra forma de acceso (restringido, embargado, cerrado) deberá solicitarse expresamente y obedecer a causas justificadas.
- e) Asignar por defecto a estos trabajos una licencia Creative Commons.
- f) Asignar por defecto a estos trabajos un HANDLE (URL *persistente*).

4°. Derechos del autor.

El autor, en tanto que titular de una obra tiene derecho a:

- a) Que la Universidad identifique claramente su nombre como autor de la misma
- b) Comunicar y dar publicidad a la obra en la versión que ceda y en otras posteriores a través de cualquier medio.
- c) Solicitar la retirada de la obra del repositorio por causa justificada.
- d) Recibir notificación fehaciente de cualquier reclamación que puedan formular terceras personas en relación con la obra y, en particular, de reclamaciones relativas a los derechos de propiedad intelectual sobre ella.

5°. Deberes del autor.

El autor se compromete a:

- a) Garantizar que el compromiso que adquiere mediante el presente escrito no infringe ningún derecho de terceros, ya sean de propiedad industrial, intelectual o cualquier otro.
- b) Garantizar que el contenido de las obras no atenta contra los derechos al honor, a la intimidad y a la imagen de terceros.
- c) Asumir toda reclamación o responsabilidad, incluyendo las indemnizaciones por daños, que pudieran ejercitarse contra la Universidad por terceros que vieran infringidos sus derechos e

- intereses a causa de la cesión.
- d) Asumir la responsabilidad en el caso de que las instituciones fueran condenadas por infracción de derechos derivada de las obras objeto de la cesión.

6º. Fines y funcionamiento del Repositorio Institucional.

La obra se pondrá a disposición de los usuarios para que hagan de ella un uso justo y respetuoso con los derechos del autor, según lo permitido por la legislación aplicable, y con fines de estudio, investigación, o cualquier otro fin lícito. Con dicha finalidad, la Universidad asume los siguientes deberes y se reserva las siguientes facultades:

- La Universidad informará a los usuarios del archivo sobre los usos permitidos, y no garantiza ni asume responsabilidad alguna por otras formas en que los usuarios hagan un uso posterior de las obras no conforme con la legislación vigente. El uso posterior, más allá de la copia privada, requerirá que se cite la fuente y se reconozca la autoría, que no se obtenga beneficio comercial, y que no se realicen obras derivadas.
- La Universidad no revisará el contenido de las obras, que en todo caso permanecerá bajo la responsabilidad exclusiva del autor y no estará obligada a ejercitar acciones legales en nombre del autor en el supuesto de infracciones a derechos de propiedad intelectual derivados del depósito y archivo de las obras. El autor renuncia a cualquier reclamación frente a la Universidad por las formas no ajustadas a la legislación vigente en que los usuarios hagan uso de las obras.
- La Universidad adoptará las medidas necesarias para la preservación de la obra en un futuro.
- La Universidad se reserva la facultad de retirar la obra, previa notificación al autor, en supuestos suficientemente justificados, o en caso de reclamaciones de terceros.

Madrid, a 1 de Junio de 2018

ACEPTA



Fdo..... Néstor Rodríguez Pérez

Motivos para solicitar el acceso restringido, cerrado o embargado del trabajo en el Repositorio Institucional:



ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA (ICAI)
INGENIERO ELECTROMECAÁNICO

**DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA
INFORMÁTICA PARA EL
DIMENSIONAMIENTO DE CABLES
AISLADOS DE ALTA TENSIÓN**

Autor: Néstor Rodríguez Pérez
Director: M^a. Inmaculada Blázquez García

Madrid
Junio 2018

DESARROLLO DE UNA HERRAMIENTA INFORMÁTICA PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE CABLES AISLADOS DE ALTA TENSIÓN

Autor: Rodríguez Pérez, Néstor.

Director: Blázquez García, M^a. Inmaculada.

Entidad Colaboradora: Universidad Pontificia de Comillas

RESUMEN DEL PROYECTO

Introducción

Actualmente, el transporte aéreo de la energía eléctrica se enfrenta a un creciente rechazo social (LIEN18) motivado por su impacto visual y servidumbre de grandes áreas de terreno. La necesidad de líneas eléctricas subterráneas en zonas urbanas debido a estos motivos, junto con las aplicaciones de este tipo de instalaciones en el sector eléctrico, hace que la actualización y la nueva instalación de cables aislados se estén convirtiendo en algo habitual, lo que supone la existencia de distintos tipos de cables y modos de instalación según las necesidades que se han de satisfacer.

A la hora de diseñar una línea subterránea de alta tensión, el proyectista debe hallar la sección del conductor del cable mediante la aplicación de unos factores tabulados en la ITC-LAT-06 según el tipo de instalación, siempre que sea de una tensión nominal menor o igual a 30kV. Para tensiones superiores a ésta, el proyectista debe determinar y justificar las condiciones de instalación y las distancias de seguridad, así como el cable aislado a emplear, lo que puede requerir mucho tiempo, ya que la capacidad de transporte de un cable es muy sensible a cualquier cambio en las características de la instalación, como puede ser la profundidad de la línea o la disposición de los cables.

Para realizar la selección del cable, el proyectista tiene distintas alternativas (BATE16). En primer lugar, puede emplear libros donde la ampacidad de los cables viene tabulada y que proporcionan los factores de corrección a aplicar según la instalación, como son los llamados “Libros negros” (“*Black Books*”, 1962, algo desactualizados) o las tablas publicadas por IEEE en 1994 (IEEE94). Otra opción consiste en emplear software comercial especializado, de elevado precio de licencia, como CYMCAP (de Cyme International) que permite obtener la intensidad máxima de un cable aislado según las características de la instalación. Por último, si no se tiene acceso a ninguna de las opciones anteriores, el proyectista tendrá que consultar distintos catálogos de fabricantes, seleccionar un cable, y calcular si ese cable admitirá la corriente de la línea subterránea que se pretende diseñar; o bien seleccionar un fabricante y confiar la elección del cable a éste, lo que suele suponer un sobrecoste económico y falta de transparencia en el proceso de selección.

El objeto de este proyecto es desarrollar una herramienta informática que permita dimensionar, de manera aproximada, el cable aislado unipolar, no armado, que sería capaz de aguantar la corriente nominal de la línea sin sobrecalentarse, para tensiones entre 30 y 500 kV. Junto a las dimensiones, se proporcionarán, además, datos de interés, como puede ser la capacidad o las distintas pérdidas de potencia estimadas.

También se comprobará el impacto que tiene la modificación de las características de la instalación en la sección del conductor que se calcule, y se obtendrá una estimación del sobre coste económico asociado a la elección de un cable de sección conductora mayor de lo necesario y el coste aproximado de una línea subterránea en España para distintas tensiones y materiales conductores.

El objetivo principal es ahorrar tiempo al proyectista de una línea subterránea de alta tensión proporcionándole, fundamentalmente, la sección de conductor que aproximadamente deberá tener el cable aislado (principal elemento identificativo de los cables aislados en los catálogos) y que el programa sea utilizado como herramienta para simular los efectos que las características de la instalación tienen en la dimensión del cable aislado que se necesita. No obstante, todos los resultados que se presenten deberán de ser contrastados con la información que proporcione el fabricante que finalmente se escoja, pues, dependiendo del fabricante, la precisión será distinta, debido a las distintas tecnologías y métodos empleados en la fabricación.

Metodología

La herramienta informática se programará en Microsoft® Excel. Respecto a la mayoría de las alternativas existentes, la herramienta programada invertirá el proceso de cálculo: a partir de las características de la instalación y de las características eléctricas de la línea, se obtendrá la dimensión del cable necesario.

El cable obtenido será unipolar, no armado, constituido de conductor, aislamiento, pantalla y cubierta, para una línea subterránea trifásica, 50 Hz, de entre 30 y 500 kV. El tipo de instalación será o directamente enterrado, o con los cables bajo tubo directamente enterrado, o bajo tubo en un bloque de hormigón.

El proceso de cálculo, esquematizado, sería el siguiente:

- Introducción, por parte del usuario, de los parámetros de entrada:
 - Datos de la línea.
 - Selección de conductor, aislamiento, cubierta y pantalla.
 - Datos de la instalación.
- A partir tensión nominal introducida, el programa realiza una estimación de la capacidad del cable ($\mu\text{F}/\text{km}$), que a su vez permite obtener una relación dimensional entre aislamiento y conductor.
- A partir de todos los datos de los que se disponen (calculados, introducidos y constantes asociadas), se obtienen las siguientes expresiones en función de las dimensiones del cable (incógnitas iniciales):
 - Expresiones de pérdidas de potencia activa asociadas a distintas partes del cable. Se tomará como referencia la norma UNE 21144-1-1:2012.
 - Expresiones de las resistencias térmicas de las distintas partes del cable y del medio de instalación. Se tomará como referencia la norma UNE 21144-2-1:1997, la norma UNE 21144-2-1/1M:2002 y la norma UNE 21144-2-1:1997/2M:2007.
- A continuación, se plantean tres igualdades que se habrán de cumplir y que estarán en función de las expresiones anteriores:
 - Sección de la pantalla estimada = Sección de la pantalla calculada.

- Intensidad máxima admisible = Intensidad nominal de la línea.
- Campo eléctrico (máximo en el aislamiento) \leq Rigidez dieléctrica del aislamiento.
- Finalmente, se utiliza la macro Solver de Microsoft® Excel para resolver un problema de optimización en el que la función objetivo consiste en minimizar el diámetro del conductor del cable y las restricciones son las tres igualdades anteriores y otras restricciones asociadas a las variables dimensionales.

Tras la programación de la herramienta, se comprueba la precisión del programa en el cálculo de la sección de conductor necesaria comparando el resultado con el catálogo de un fabricante. Este fabricante ha sido escogido en base a la cantidad de información que proporciona sobre las condiciones en las que los cables presentan las características tabuladas en el catálogo (reducción de las suposiciones adoptadas).

Finalmente, se realiza un análisis de sensibilidad para ver cómo influye el cambio de un parámetro de entrada en la sección del conductor calculada y un estudio económico acerca del sobrecoste económico asociado a un sobredimensionamiento del cable aislado, así como una estimación del coste total de una línea subterránea en España para distintas tensiones y materiales conductores.

Resultados

La comparación de la sección del conductor (mm^2) calculada por el programa, en función de la corriente admisible (A), se realizó con el catálogo del fabricante TFKable, “*The pathway to power. High-Voltage cables*”, (TFKA__), para distintas tensiones y materiales conductores. En los resultados aquí expuestos, la conexión Single-Point (SP) y la conexión Cross-Bonding (CB) son equivalentes. Algunos de los gráficos comparativos obtenidos son:

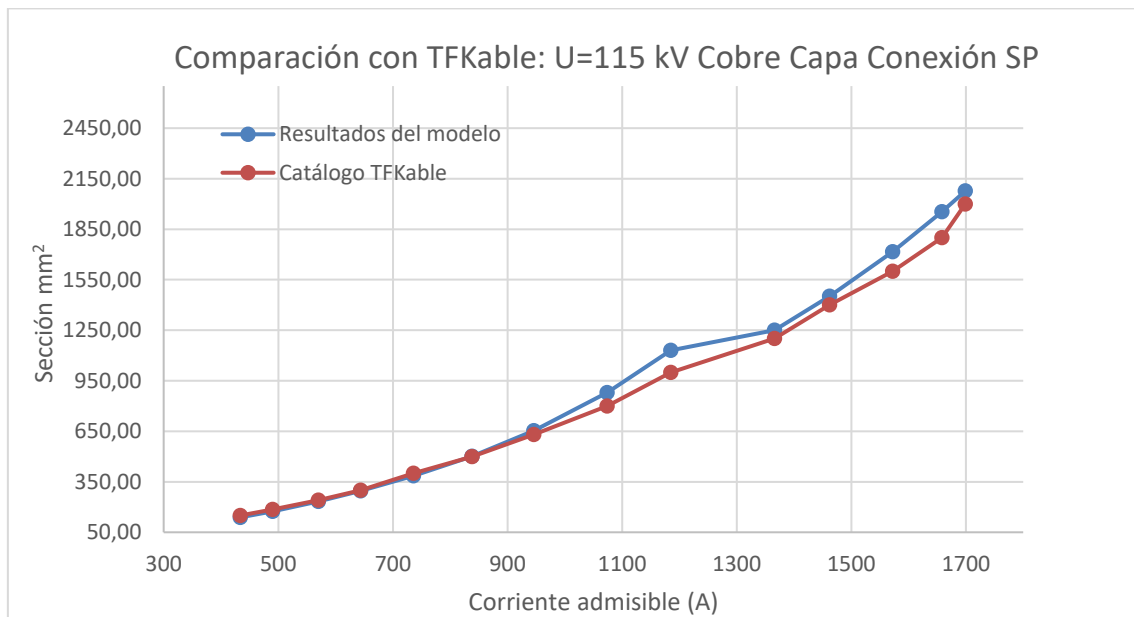


Gráfico 1. Comparación con TFKable: U=115kV Cobre, Capa, conexión Single-Point

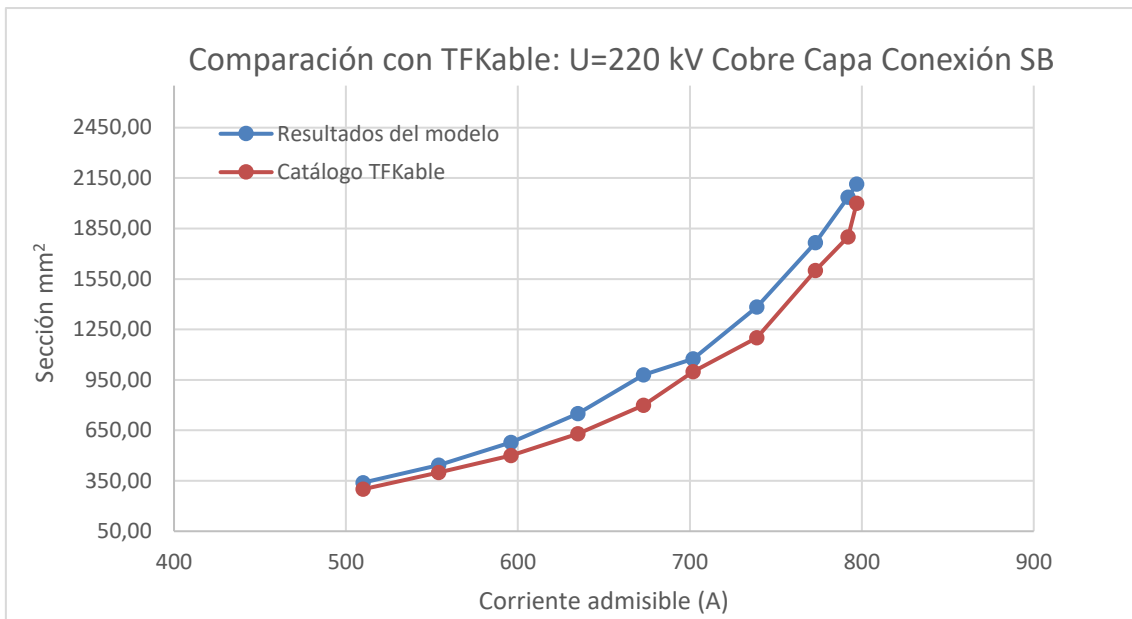


Gráfico 2. Comparación con TFKable: U=220kV Cobre, Capa, conexión Solid Bonding

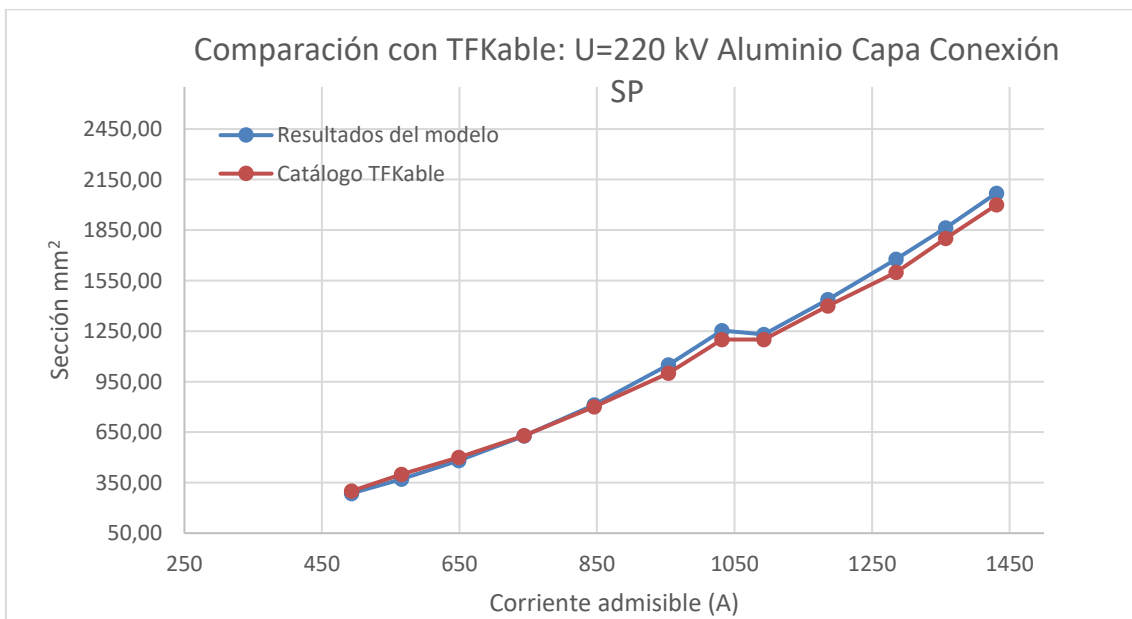


Gráfico 3. Comparación con TFKable: U=220kV Aluminio, Capa, conexión Single-Point

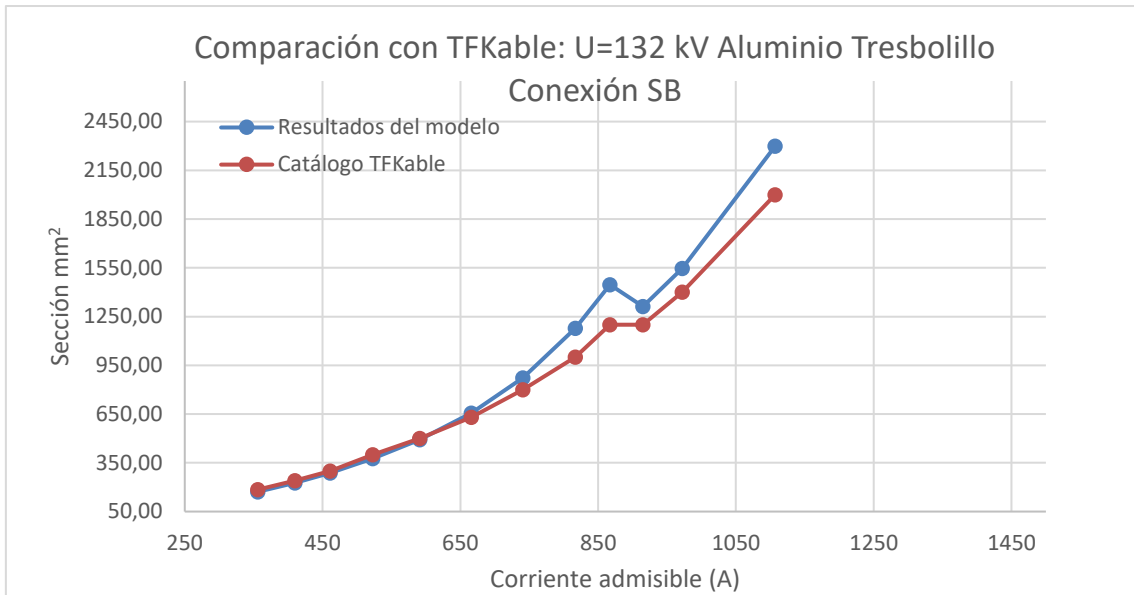


Gráfico 4. Comparación con TFKable: U=132kV Aluminio, Tresbolillo, conexión Solid Bonding

En cuanto al análisis de sensibilidad, se observó el cambio producido en la sección del conductor del cable debido a la modificación de un parámetro de entrada. Algunos de los gráficos obtenidos son:

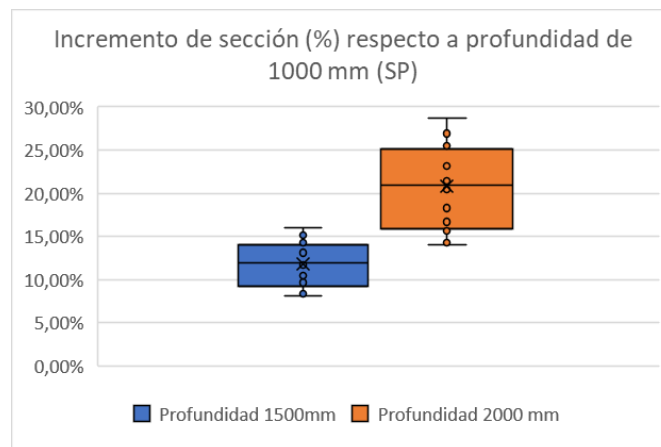


Gráfico 5. Incremento de sección (%) del conductor respecto a profundidad de 1000mm en conexión Single-Point

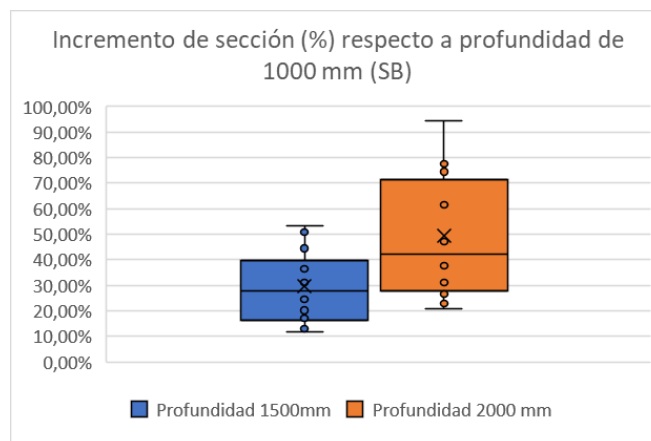


Gráfico 6. Incremento de sección (%) del conductor respecto a profundidad de 1000mm en conexión Solid Bonding

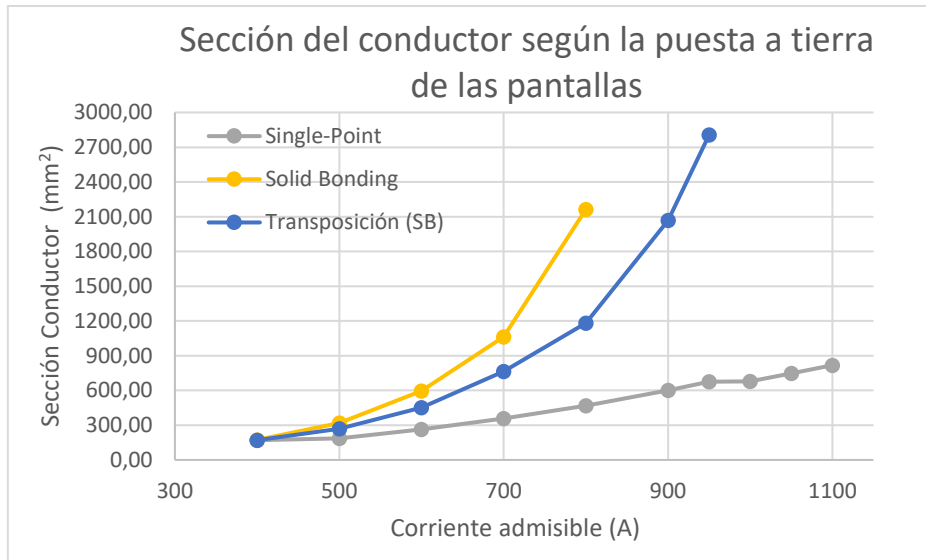


Gráfico 7. Sección del conductor según la puesta a tierra de las pantallas

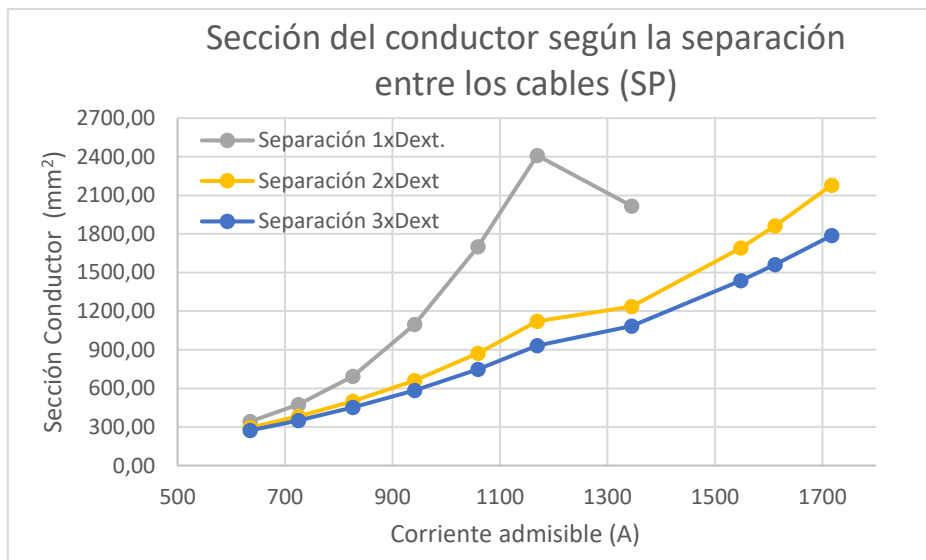


Gráfico 8. Sección del conductor según la separación entre los cables. Conexión Single-Point.

Algunos de los resultados del estudio económico, elaborado a partir de precios aproximados de cables aislados y de valores de referencia de inversión, son los siguientes:

Tensión	Material	% € Conductor/cable	% Sección Conductor/cable	Al aumentar 1mm ²		
				ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
45 kV	Cobre	44,56%	28,99%	0,0608	3,45	0,14
	Aluminio	10,68%	31,00%	0,0062	3,23	0,06
66 kV	Cobre	63,73%	32,00%	0,0608	3,13	0,10
	Aluminio	11,96%	30,00%	0,0062	3,33	0,05
132 kV	Aluminio	7,75%	24,43%	0,0062	4,10	0,08
220 kV	Cobre	61,52%	22,22%	0,0608	4,50	0,10
	Aluminio	7,89%	20,69%	0,0062	4,83	0,08

Tabla 1. Valores medios obtenidos en función del material conductor y la tensión del cable aislado.

Cobre, 220 kV		
ΔSección mm²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	9,88	29,64
130	12,84	38,53
200	19,76	59,28

Tabla 2. Incremento en el precio del cable y en el coste del circuito (3 fases) para distintas variaciones de sección del conductor habituales en los catálogos de los fabricantes (incremento del coste económico debido al sobredimensionamiento)

		Inversión		
	Coste Cables (3 fases) €/km	Término variable €/km	Término fijo €	Longitud
Cu 2000 mm ² , 220 kV	592.800	2.271.313	--	≥ 2,2 km
	592.800	1.905.324	805.175	≤ 2,2 km

Tabla 3. Inversión total estimada para una línea subterránea de 220 kV en el que el cable tiene como conductor Cobre de 2000mm². Términos variables y fijos obtenidos del BOE-A-2015-13487 (Líneas eléctricas de transporte).

Conclusiones

En base a los resultados presentados en los Gráficos 1, 2, 3 y 4, se puede concluir que la herramienta presenta una gran precisión en el cálculo de la sección del conductor necesaria cuando se compara con el catálogo de un fabricante, dadas las condiciones de cálculo. Se puede afirmar que esta precisión es mejor cuando la conexión de las pantallas a tierra es del tipo Single-Point (SP), cuando la disposición es en capa y el material conductor empleado es aluminio. Por otro lado, en la mayoría de los casos estudiados se observa un empeoramiento de esta precisión a medida que aumenta la corriente admisible, resultando habitualmente en una sección mayor que la del catálogo, lo que seguiría permitiendo satisfacer los requisitos de la instalación. Se concluye, por tanto, que la herramienta programada cumple satisfactoriamente con el objetivo establecido de proporcionar al usuario una estimación de la sección del conductor del cable aislado que necesitaría emplear en las condiciones introducidas.

En lo que respecta al análisis de sensibilidad, los resultados obtenidos se encuentran en la línea de lo esperado: cualquier variación en las condiciones de la instalación que empeore la evacuación del calor en el cable (aumento de la profundidad, disminución de la separación entre cables, desecamiento del terreno, etc.) produce un incremento en la

sección del conductor del cable que puede llegar a ser muy considerable para altos niveles de corriente. También se comprueba que estos incrementos son mayores cuando la conexión de la pantalla a tierra es del tipo Solid Bonding (SB), pudiendo no llegar a soportar corrientes (límite constructivo) que la conexión Single-Point (SP) si permitiría. (Gráfico 7).

Finalmente, el estudio económico muestra la importancia de la correcta selección del cable a utilizar en una línea eléctrica subterránea, donde la simple elección del siguiente cable en el catálogo puede aumentar considerablemente la inversión económica final.

En general, se puede afirmar que el proyecto desarrollado cumple con los objetivos iniciales establecidos.

Referencias

- [LIEN18] Lienert, P., B. Sütterlin, y M. Siegrist. “Public Acceptance of High-Voltage Power Lines: The Influence of Information Provision on Undergrounding”, Energy Policy 112, pp. 305-315, Enero 2018.
- [-] ITC-LAT-06
- [BATE16] Bates, C., K. Malmedal, y D. Cain. “Cable Ampacity Calculations: A Comparison of Methods”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, n. ° 1, pp. 112-118, Enero 2016.
- [IEEE94] IEEE Std. 835-1994, “IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables”, Septiembre 1994.
- [-] UNE 21144-1-1:2012
- [-] UNE 21144-2-1:1997 y modificaciones del 2002 y 2007
- [TFKA__] The High Voltage Team, TELE-FONIKA Kable Sp. Z o.o.S.K.A (TFKable), “The pathway to power. High-voltage cables”, Edition 1, Cracow (Poland).
- [-] BOE-A-2015-13487
- [-] BOE-A-2015-13488

DEVELOPMENT OF A COMPUTER TOOL FOR THE DIMENSIONING OF HIGH VOLTAGE ISOLATED CABLES

Introduction

Nowadays, air transport of electric power faces a growing social rejection (LIEN18) motivated by its visual impact and servitude of large areas of land. The need for underground power lines in urban areas due to these reasons, together with the applications of these types of installations in the electricity sector, means that upgrading and re-installing isolated cables is becoming something usual, which implies the existence of diverse types of cables and modes of installation according to the needs that must be met.

When designing a high voltage underground line, the designer must find the section of the cable conductor by applying some factors tabulated in the ITC-LAT-06 according to the type of installation, provided it is of a nominal voltage lower or equal to 30kV. For voltages greater than this, the designer must determine and justify the installation conditions and safety distances, as well as the isolated cable to be used, which may require a long time, since the transport capacity of a cable is very sensitive to any change in the characteristics of the installation, such as the depth of the line or the arrangement of the cables.

To make the cable selection, the designer has different alternatives (BATE16). First, you can use books where the ampacity of the cables is tabulated, and which provide the correction factors to apply according to the installation, such as the so-called "Black Books" (1962, somewhat outdated) or tables published by IEEE in 1994 (IEEE94). Another option is to use specialized commercial software, with a high license price, such as CYMCAP (by Cyme International) that allows obtaining the maximum ampacity of an isolated cable according to the characteristics of the installation. Finally, if none of these options can be accessed, the designer will have to consult different catalogues of manufacturers, select a cable, and calculate if that cable will accept the current of the underground line that is being designed; or select a manufacturer and entrust the choice of the cable to it, which usually supposes an economic extra cost and a lack of transparency in the selection process.

The purpose of this project is to develop a computer tool that allows the approximate dimensioning of unipolar, unarmored isolated cable, which would be able to withstand the nominal current of the line without overheating, for voltages between 30 and 500 kV. Along with the dimensions, data of interest will also be provided, such as the capacity or the estimated power losses.

The impact of the modification of the characteristics of the installation on the section of the conductor to be calculated will also be checked, and an estimate of the economic extra cost associated with the choice of a conductor section greater than necessary will be obtained as well as the approximate cost for an underground line in Spain for different voltages and conductive materials.

The main objective is to save time to the designer of a high voltage underground line by providing, fundamentally, the conductor section that approximately must have the isolated cable (main identifying element of isolated cables in catalogues) and that the program is used as a tool to simulate the effects that the characteristics of the installation have on the dimension of the isolated cable that is needed. However, all the results presented must be contrasted with the information provided by the manufacturer that is finally chosen, since, depending on the manufacturer, the accuracy will be different, due to the different technologies and methods used in manufacturing.

Methodology

The computer tool will be programmed in Microsoft® Excel. Compared to most of the existing alternatives, the programmed tool will invert the calculation process: from the characteristics of the installation and the electrical characteristics of the line, the necessary cable dimension will be obtained.

The cable obtained will be unipolar, not armed, consisting of conductor, insulation, screen and cover, for a three-phase underground line, 50 Hz, between 30 and 500 kV. The type of installation will be either directly buried, or with the cables in a directly buried pipe, or in a pipe in a concrete block.

The calculation process, schematized, would be the following:

- Introduction, by the user, of the input parameters:
 - Data of the line.
 - Selection of conductor, insulation, cover and screen.
 - Details of the installation.
- With the nominal voltage that has been introduced, the program estimates the capacity of the cable ($\mu\text{F} / \text{km}$), which is used to obtain a dimensional relationship between insulation and conductor.
- From all the data available (calculated, entered and associated constants), the following expressions are obtained according to the dimensions of the cable (initial unknowns):
 - Expressions of active power losses linked to the parts of the cable. The standard UNE 21144-1-1: 2012 will be taken as reference.
 - Expressions of the thermal resistances of the parts of the cable and the installation medium. The UNE 21144-2-1: 1997 standard, the UNE 21144-2-1 / 1M: 2002 standard and the UNE 21144-2-1: 1997 / 2M: 2007 standard will be taken as reference.
- Next, there are three equalities that must be met and that will be based on the previous expressions:
 - Section of the estimated screen = Section of the calculated screen.
 - Maximum admissible current = Nominal current of the line.
 - Electric field (maximum in insulation) \leq Dielectric strength of the insulation.

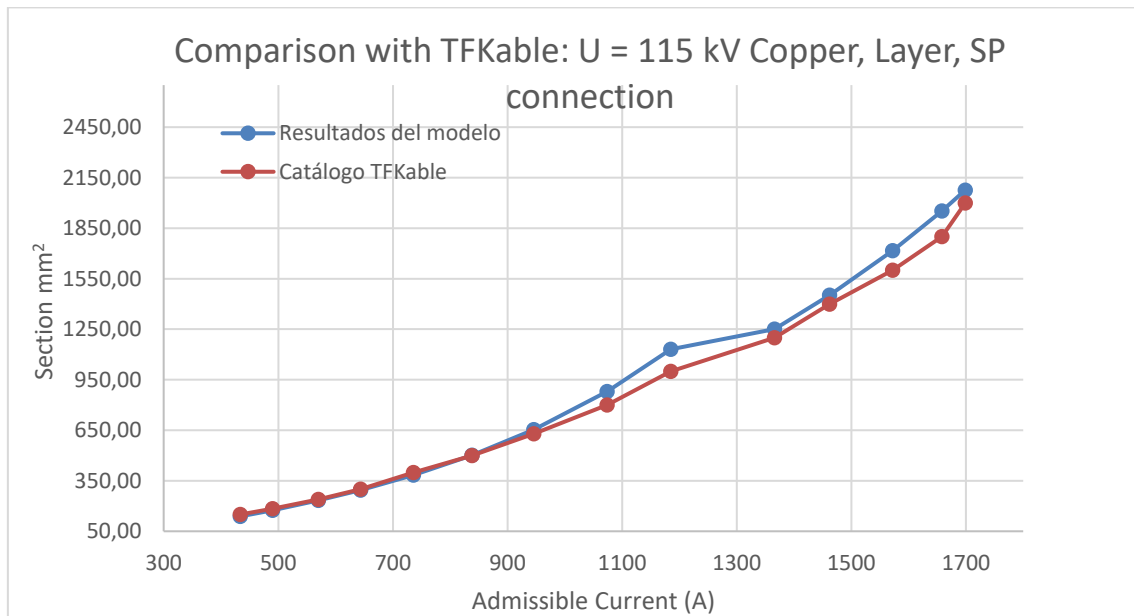
- Finally, the Microsoft® Excel Solver macro is used to solve an optimization problem in which the objective function consists of minimizing the diameter of the cable conductor and the restrictions are the three previous equalities and other restrictions associated with the dimensional variables.

After programming the tool, the accuracy of the program in the calculation of the necessary conductor section is checked by comparing the result with a manufacturer's catalogue. This manufacturer has been chosen based on the amount of information it provides on the conditions in which the cables have the characteristics tabulated in the catalogue (reduction of the assumptions adopted).

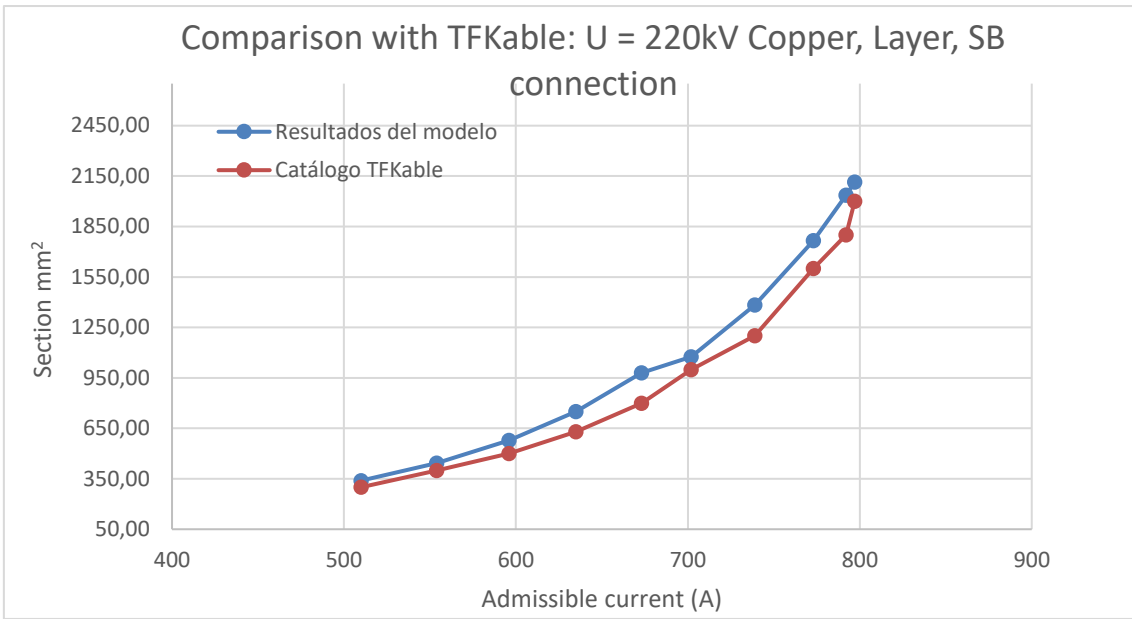
Finally, a sensitivity analysis is performed to see how the change of an input parameter influences the calculated conductor section and an economic study about the economic cost overload associated with an oversized isolated cable, as well as an estimate of the total cost of an underground line in Spain for different voltages and conductive materials.

Results

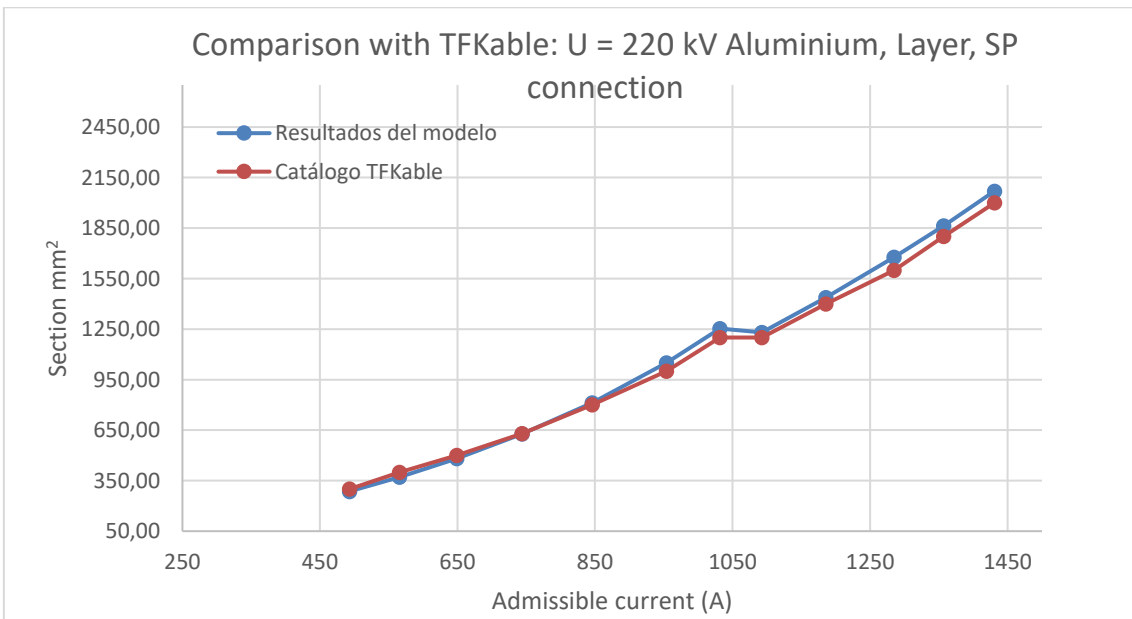
The comparison of the conductor section (mm^2) calculated by the program, depending on the admissible current (A), was made with the manufacturer's catalogue TFKable, "The pathway to power. High-Voltage cables ", (TFKA__), for different voltages and conductive materials. In the results presented here, the Single-Point (SP) connection and the Cross-Bonding (CB) connection are equivalent. Some of the comparative graphs obtained are:



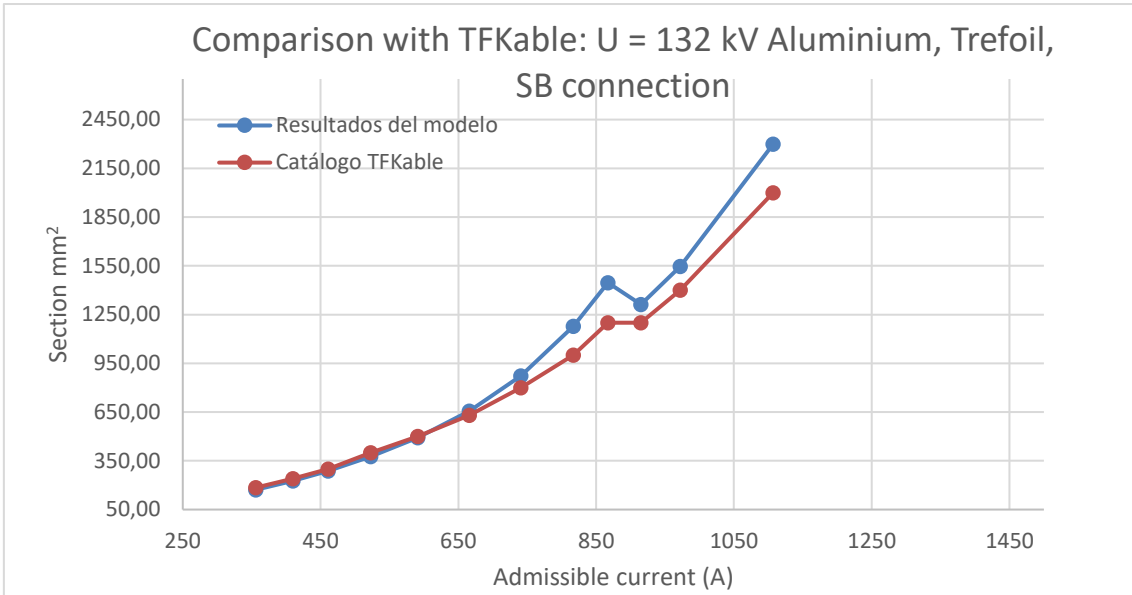
Graph 1. Comparison with TFKable: U = 115 kV Copper, Layer, Single-Point connection



Graph 2. Comparison with TFKable: U = 220kV Copper, Layer, Solid Bonding connection

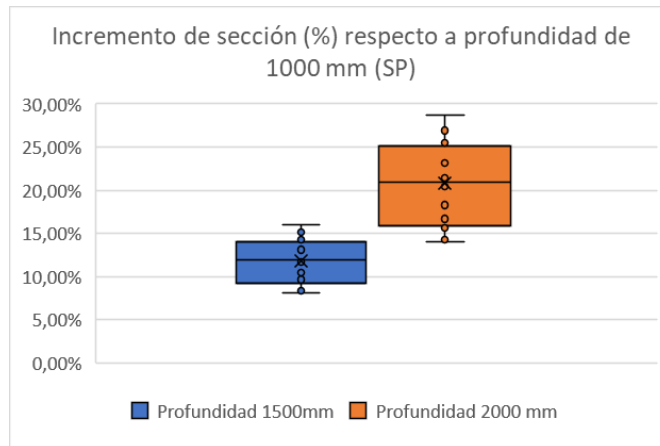


Graph 3. Comparison with TFKable: U = 220 kV Aluminium, Layer, Single-Point connection

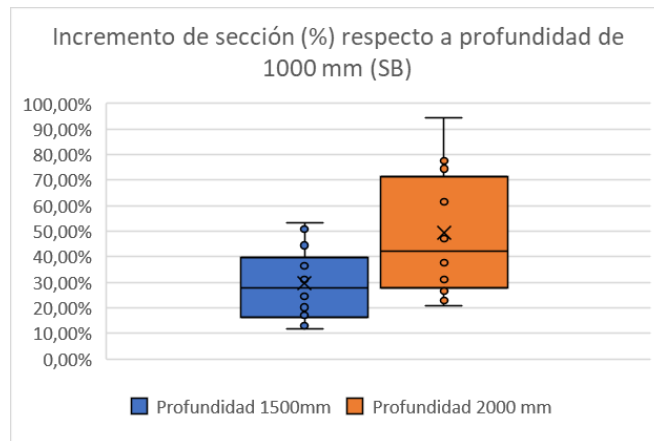


Graph 4. Comparison with TFKable: U = 132 kV Aluminium, Trefoil, Solid Bonding connection

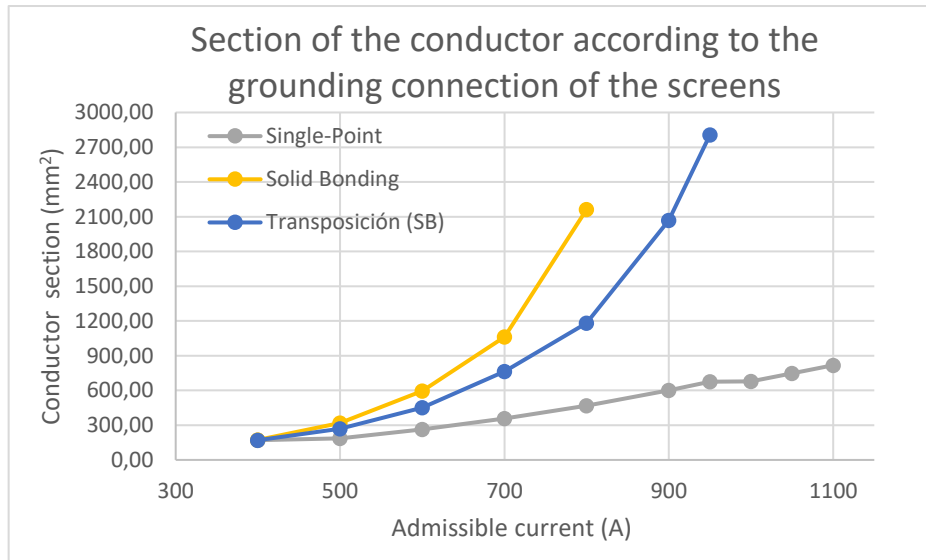
As for the sensitivity analysis, the change in the section of the cable conductor due to the modification of an input parameter was observed. Some of the graphics obtained are:



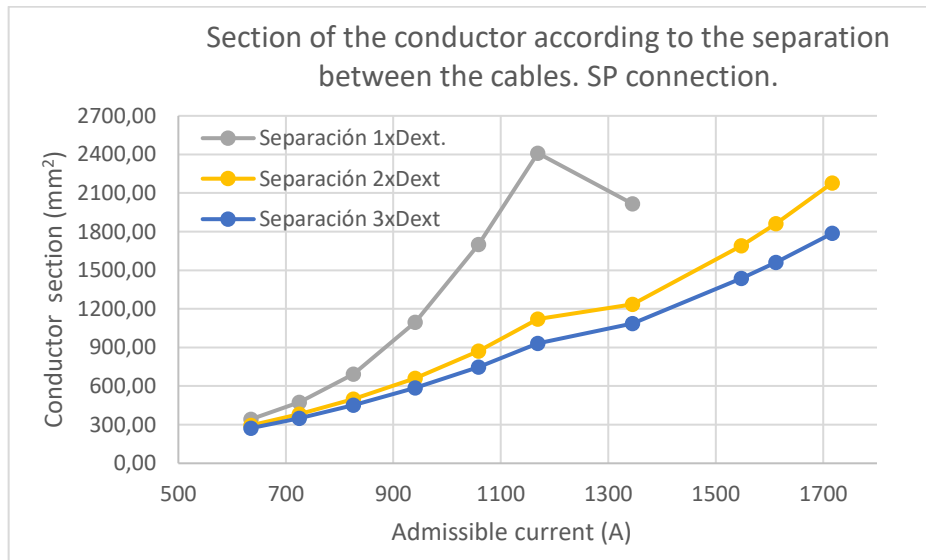
Graph 5. Increase of section (%) of the conductor with respect to a depth of 1000 mm in Single-Point connection



Graph 6. Increase of section (%) of the conductor with respect to a depth of 1000 mm in Solid Bonding connection



Graph 7. Section of the conductor according to the grounding connection of the screens



Graph 8. Section of the conductor according to the separation between the cables. Single-Point connection.

Some of the results of the economic study, based on approximate prices of isolated cables and investment reference values, are the following:

Voltage	Material	% € Conductor/cable	% Conductor section /cable	When increasing 1mm ² (conductor)		
				ΔConductor Price €/m	ΔTotal Section mm ²	ΔCable Price €/m
45 kV	Copper	44,56%	28,99%	0,0608	3,45	0,14
	Aluminium	10,68%	31,00%	0,0062	3,23	0,06
66 kV	Copper	63,73%	32,00%	0,0608	3,13	0,10
	Aluminium	11,96%	30,00%	0,0062	3,33	0,05
132 kV	Aluminium	7,75%	24,43%	0,0062	4,10	0,08
220 kV	Copper	61,52%	22,22%	0,0608	4,50	0,10
	Aluminium	7,89%	20,69%	0,0062	4,83	0,08

Table 1. Average values obtained depending on the material used as conductor and the voltage of the isolated cable.

Copper, 220 kV		
ΔSection mm²	ΔCable price €/m	ΔCircuit Cost €/m
100	9,88	29,64
130	12,84	38,53
200	19,76	59,28

Table 2. Increase in the price of the cable and in the cost of the circuit (3 phases) for different variations of the conductor section usual in the catalogues of the manufacturers (increase of the economic cost due to oversizing)

	Investment			Length
	Cable cost (3 phases) €/km	Variable term €/km	Fixed term €	
Cu 2000 mm ² , 220 kV	592.800	2.271.313	--	≥ 2,2 km
	592.800	1.905.324	805.175	≤ 2,2 km

Table 3. Estimated total investment for a 220 kV underground line in which the cable has Copper conductor of 2000mm² as conductor. Variable and fixed terms obtained from BOE-A-2015-13487 (Electric transmission lines). For distribution lines, the BOE-A-2015-13488 will be taken as reference

Conclusions

Based on the results presented in Graphs 1, 2, 3 and 4, it can be concluded that the tool presents a high precision in the calculation of the necessary conductor section when compared with a manufacturer's catalogue, given the conditions of calculation. It can be affirmed that this precision is better when the connection of the screens to ground is Single-Point (SP), when the arrangement is in layer and the conductive material used is aluminium. On the other hand, in most of the studied cases a deterioration of this precision is observed as the admissible current increases, usually resulting in a section greater than that of the catalogue, although it would still satisfy the requirements of the installation. It is concluded, therefore, that the programmed tool satisfactorily fulfils the established objective of providing the user with an estimate of the section of the conductor of the isolated cable that he/she would need to use in the conditions introduced.

Regarding the sensitivity analysis, the results obtained are in the line of the expected: any variation in the conditions of the installation that worsens the evacuation of heat in the cable (increase in depth, decrease in the separation between cables, drying of the ground, etc.) produces an increase in the section of the cable conductor that can become very considerable for high current levels. It is also verified that these increases are greater

when the connection of the screen to ground is Solid Bonding (SB) and may not reach currents (construction limit) that the Single-Point (SP) connection would allow. (Graph 7).

Finally, the economic study shows the importance of the correct selection of the cable to be used in an underground power line, where the simple choice of the following cable in the catalogue can considerably increase the final economic investment.

In general, it can be affirmed that the developed project fulfils the initial objectives established

References

- [LIEN18] Lienert, P., B. Sütterlin, y M. Siegrist. “Public Acceptance of High-Voltage Power Lines: The Influence of Information Provision on Undergrounding”, Energy Policy 112, pp. 305-315, January 2018.
- [-] ITC-LAT-06
- [BATE16] Bates, C., K. Malmedal, y D. Cain. “Cable Ampacity Calculations: A Comparison of Methods”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, n. ° 1, pp. 112-118, January 2016.
- [IEEE94] IEEE Std. 835-1994, “IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables”, September 1994.
- [-] UNE 21144-1-1:2012
- [-] UNE 21144-2-1:1997 and modifications of 2002 and 2007
- [TFKA__] The High Voltage Team, TELE-FONIKA Kable Sp. Z o.o.S.K.A (TFKable), “The pathway to power. High-voltage cables”, Edition 1, Cracow (Poland).
- [-] BOE-A-2015-13487
- [-] BOE-A-2015-13488

Índice

1	SÍMBOLOS	5
2	INTRODUCCIÓN	11
2.1	INTRODUCCIÓN HISTÓRICA.....	11
2.2	INTRODUCCIÓN TÉCNICA.....	13
3	ESTADO DEL ARTE	21
4	OBJETIVOS	24
5	CONSIDERACIONES GENERALES	25
6	PARÁMETROS DE ENTRADA	27
6.1	CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS DE LA LÍNEA	27
6.2	SELECCIÓN DE CONDUCTOR.....	28
6.3	SELECCIÓN DE AISLAMIENTO	32
6.4	SELECCIÓN DE PANTALLA.....	34
6.5	SELECCIÓN DE CUBIERTA.....	38
6.6	DATOS DE LA INSTALACIÓN	39
6.6.1	<i>Profundidad de la instalación</i>	39
6.6.2	<i>Disposición de las fases</i>	39
6.6.3	<i>Modos de instalación</i>	40
6.6.3.1	Cables directamente enterrados en el terreno	40
6.6.3.2	Cables enterrados bajo tubo en el terreno.....	41
6.6.3.3	Cables enterrados bajo tubo en bloque de hormigón.....	41
6.6.4	<i>Datos del tubo</i>	42
6.6.5	<i>Parámetros para instalaciones en bloque de hormigón</i>	43
6.6.6	<i>Características del terreno</i>	45
6.6.7	<i>Tipo de puesta a tierra de las pantallas</i>	47

6.6.7.1	Solid Bonding (SB) o puesta a tierra en ambos extremos del cable...	47
6.6.7.2	Sistema de puesta a tierra con transposición de cables (Capa, SB)....	48
6.6.7.3	Single-Point (SP) o puesta a tierra en un solo punto.	49
6.6.7.4	Cross Bonding (CB) o puesta a tierra con transposición de pantallas.	50
7	MÉTODO DE RESOLUCIÓN	52
8	CÁLCULOS	54
8.1	CÁLCULO DE CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA LÍNEA	54
8.1.1	<i>Cálculo de la tensión máxima de servicio</i>	54
8.1.2	<i>Estimación de la capacidad del cable.</i>	55
8.1.3	<i>Cálculo de la longitud crítica de la línea</i>	56
8.1.4	<i>Cálculo de la relación entre el diámetro exterior del aislamiento y el diámetro del conductor</i>	56
8.1.5	<i>Dimensionamiento de la pantalla</i>	57
8.1.5.1	Cálculo de la sección transversal de la pantalla	57
8.1.5.2	Cálculo de la resistencia óhmica de la pantalla	59
8.2	CÁLCULO DE PÉRDIDAS	60
8.2.1	<i>Cálculo de pérdidas en el conductor</i>	60
8.2.2	<i>Cálculo de pérdidas dieléctricas en el aislamiento</i>	63
8.2.3	<i>Cálculo de pérdidas en la pantalla metálica</i>	64
8.3	CAMPO ELÉCTRICO	68
8.4	RESISTENCIAS TÉRMICAS	70
8.4.1	<i>Resistencia térmica T4: Tres cables en tresbolillo directamente enterrados</i>	71
8.4.2	<i>Resistencia térmica T4: Tres cables colocados en capa, igualmente separados entre sí y con aproximadamente iguales pérdidas</i>	71
8.4.3	<i>Resistencia térmica T4: Tres cables unipolares colocados en capa y en contacto</i>	72
8.4.4	<i>Resistencia térmica T4'</i>	72

	3
8.4.5 Resistencia térmica $T4''$	72
8.4.6 Resistencia térmica $T4'''$	72
8.5 ECUACIÓN INTENSIDAD MÁXIMA ADMISIBLE	74
9 PARÁMETROS DE SALIDA	76
10 ANÁLISIS DE RESULTADOS	78
10.1 COMPARACIÓN CABLE TFKABLE COBRE, 115 kV	79
10.2 COMPARACIÓN CABLE TFKABLE COBRE, 220 kV	81
10.3 COMPARACIÓN CABLE TFKABLE ALUMINIO, 220 kV	84
10.4 COMPARACIÓN CABLE TFKABLE ALUMINIO, 132 kV	85
10.5 CONCLUSIONES DEL ANÁLISIS	86
11 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD.....	88
11.1 INFLUENCIA DE LA PROFUNDIDAD	89
11.2 INFLUENCIA DE LA CUBIERTA	91
11.3 INFLUENCIA DE LA PANTALLA	92
11.4 INFLUENCIA DEL TIPO DE CONDUCTOR.....	94
11.5 INFLUENCIA DEL TIPO DE PUESTA A TIERRA DE LA PANTALLA.....	96
11.6 INFLUENCIA DE LA SEPARACIÓN DE LOS CABLES	98
11.7 INFLUENCIA DEL TIPO DE TERRENO.....	99
12 ESTUDIO ECONÓMICO	102
12.1 CABLES DE 45kV	104
12.2 CABLES DE 66kV	106
12.3 CABLES DE 132kV	108
12.4 CABLES DE 220kV	109
12.5 ESTIMACIÓN DE LA INVERSIÓN TOTAL	110
12.5.1 Línea subterránea 132 kV, Al 1200 mm ²	110
12.5.2 Línea subterránea 220 kV, Al 1200 mm ²	111

12.5.3	<i>Línea subterránea 220 kV, Cu 2000 mm²</i>	111
13	ANEXO. TABLAS DE ANÁLISIS DE RESULTADOS	112
14	ANEXO. TABLAS DEL ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	115
15	ANEXO. ORGANIZACIÓN DE LA HERRAMIENTA	123
15.1	INICIO.....	123
15.2	ENTRADA DE DATOS.....	123
15.3	CÁLCULO DE PÉRDIDAS.....	127
15.4	CÁLCULO RESISTENCIAS TÉRMICAS.....	130
15.5	RESULTADOS.....	133
16	BIBLIOGRAFÍA	136

1 Símbolos

Los símbolos utilizados en el documento y las magnitudes que representan se dan en la lista siguiente:

Símbolo	Magnitud	Unidad
U_n	Tensión nominal de la línea subterránea trifásica (Tensión compuesta)	kV
U_s	Tensión máxima de servicio de la línea	kV
U_0	Tensión simple fase-tierra	V
C	Capacidad por fase de la línea	$\mu\text{F}/\text{km}$
ω	Pulsación angular	Rad/s
f	Frecuencia del sistema eléctrico (50 o 60 Hz)	Hz
I_z	Intensidad máxima admisible de la línea	A
I_c	Corriente capacitiva por fase de la línea	A
I_{ca}	Corriente de cortocircuito monofásico	kA
L	Profundidad de la instalación desde la superficie hasta el centro de la disposición de cables	mm
L_c	Longitud crítica de la línea	Km
L_T	Longitud de la línea (de cada fase)	Km
d_{ais}	Diámetro exterior del aislamiento	mm
d_c	Diámetro del conductor	mm

d_{medio} pantalla	Diámetro medio de la pantalla	mm
$D_{\text{ext.pant.}}$	Diámetro exterior de la pantalla	mm
D_{ext}	Diámetro exterior del cable	mm
t_i	Duración del cortocircuito monofásico	segundo
θ_f	Temperatura de cortocircuito	°C
θ_i	Temperatura de servicio permanente del cable	°C
θ	Temperatura del conductor	°C
θ_A	Temperatura del medio que rodea a la línea.	°C
$\Delta\theta$	Diferencia de temperatura entre el entorno y el conductor del cable.	°C, K
θ_m	Temperatura media del aire entre tubo y cable.	°C
ρ	Resistividad eléctrica del material empleado.	$\Omega \cdot m$
α	Coefficiente de temperatura del material empleado	K^{-1}
n_{hilos}	Número de hilos metálicos que conforman la pantalla	---
A_{hilo}	Sección transversal del hilo utilizado para conformar la pantalla	mm^2
R_{hilo}	Resistencia eléctrica de cada uno de los hilos que conforman la pantalla	Ω/m
R_{pantalla}	Resistencia eléctrica de la pantalla	Ω/m
R_{20cc}	Resistencia eléctrica del conductor en CC y a 20°C	Ω/m

R_{tcc}	Resistencia eléctrica del conductor en CC y a la temperatura normal de operación	Ω/m
R_{tca}	Resistencia eléctrica del conductor en CA y a la temperatura normal de operación	Ω/m
y_s	Factor de efecto piel o pelicular	---
y_p	Factor de efecto proximidad	---
x_s	Argumento de la función Bessel, utilizado en el cálculo del efecto piel o pelicular	---
k_s	Factor utilizado para el cálculo de x_s (efecto piel o pelicular). Está tabulado en la norma UNE 21144-1-1	---
x_p	Argumento de la función Bessel, utilizado en el cálculo del efecto proximidad	---
k_p	Factor utilizado en el cálculo de x_p (efecto proximidad). Está tabulado en la norma UNE 21144-1-1	---
s	Distancia entre los ejes de los conductores	mm
W_c	Pérdidas de potencia activa en el conductor (por fase)	W/m
W_{cond}	Potencia reactiva absorbida por el condensador equivalente de un cable aislado	var/fase
G	Conductancia del cable aislado	S
$tg\delta$	Factor de pérdidas del aislamiento del cable	---
I_D	Corriente de conducción	A
W_D	Pérdidas dieléctricas en el aislamiento del cable aislado	W/m
W_s	Pérdidas en la pantalla metálica del cable aislado	W/m

λ'_1	Relación de las pérdidas de una pantalla metálica producidas por las corrientes de circulación respecto a las pérdidas en el conductor	---
λ''_1	Relación de las pérdidas en una pantalla producidas por las corrientes de Foucault respecto a las pérdidas en el conductor	---
λ_1	Relación de las pérdidas totales en la pantalla respecto a las pérdidas totales en el conductor	---
X	Reactancia de la pantalla metálica del cable	Ω/m
X_m	Reactancia mutua entre la pantalla de un cable y los conductores de los otros dos, cuando la disposición es en capa	Ω/m
X_1	Reactancia de la pantalla metálica del cable en el caso concreto de instalación en capa con transposición regular y pantallas en SB	Ω/m
P	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	Ω/m
Q	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	Ω/m
β_1	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---
g_s	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---
λ_0	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---
Δ_1	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---
Δ_2	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---
m	Coefficiente definido en el cálculo de pérdidas de la pantalla metálica	---

ρ_s	Resistividad eléctrica del material que constituye la pantalla a la temperatura de servicio	$\Omega \cdot m$
t_s	Espesor de la pantalla	mm
ρ_T	Resistividad térmica del material empleado en la capa de la que se esté hallando la resistencia térmica	$^{\circ}C \cdot m/W$
T_1	Resistencia térmica por fase del aislamiento	$K \cdot m/W$
T_3	Resistencia térmica por fase del revestimiento exterior (cubierta)	$K \cdot m/W$
T_4	Resistencia térmica del medio exterior	$K \cdot m/W$
T'_4	Resistencia térmica entre cable y tubo	$K \cdot m/W$
T''_4	Resistencia térmica del tubo	$K \cdot m/W$
T'''_4	Resistencia térmica del medio que rodea al tubo	$K \cdot m/W$
U	Constantes utilizadas en el cálculo de T'_4	---
V	Constantes utilizadas en el cálculo de T'_4	---
Y	Constantes utilizadas en el cálculo de T'_4	---
D_o	Diámetro exterior del conducto	mm
D_d	Diámetro interior del conducto	mm
ρ_{suelo}	Resistividad térmica del suelo	$K \cdot m/W$
$\rho_{hormigón}$	Resistividad térmica del hormigón (1 $K \cdot m/W$)	$K \cdot m/W$
L_G	Profundidad del centro del bloque de hormigón	mm
r_b	Radio equivalente del bloque de hormigón	mm

x	Menor dimensión del bloque de hormigón	mm
y	Mayor dimensión del bloque de hormigón	mm
F	Coeficiente utilizado en el cálculo de pérdidas por Foucault en cables con conductor segmentado para algunos casos específicos.	---
M	Coeficiente utilizado en el cálculo de F	---
N	Coeficiente utilizado en el cálculo de F	---
L	Inductancia del cable	H/km

2 Introducción

2.1 Introducción Histórica

Hay que remontarse a la segunda mitad de s. XIX para encontrar los primeros cables eléctricos aislados, consistentes en hilos de cobre rodeados de goma vulcanizada como aislante; la introducción en 1880 de las bombillas incandescentes, tanto a nivel particular como municipal, hizo que algunas ciudades como Nueva York (CENT08) sustituyesen gran parte de las líneas aéreas por una alternativa más segura y que requiriese menos espacio: las líneas subterráneas de cables aislados.

A medida que la red eléctrica fue creciendo, se hizo necesario aumentar la tensión de transporte y distribución para minimizar pérdidas y aumentar la energía transmitida; es entonces cuando se empieza a utilizar como aislante el papel de celulosa impregnado en aceite mineral, de muy buenas propiedades, aunque con tendencia a fallar con la humedad. En 1879, con la introducción de la prensa de plomo, se pasa a utilizar este material alrededor del papel para evitar los efectos de la humedad. En 1890 se desarrolla el primer cable de alta tensión y en torno a principios del s. XX se consigue fabricar grandes longitudes de cables aislados.

Los primeros cables Oil Filled (aislamiento de papel impregnado y aceite fluido por el hueco central) surgen a partir de 1920 y constituirán el cable estándar de utilización para líneas de muy alta tensión durante todo el siglo XX, consiguiéndose dar el salto a 400 kV en 1952.

No obstante, la tecnología más utilizada actualmente para aislar cables (el conocido como aislamiento seco) surge con la aparición de los plásticos hacia 1930. En la década de los cincuenta, materiales termoplásticos como el PVC (policloruro de vinilo) y PE (polietileno) empezaron a ser utilizados como aislamiento, aunque con el paso del tiempo se comprobó que no soportaban lo suficientemente bien el envejecimiento y su fusión se producía a una temperaturas demasiado bajas en relación con las temperaturas habituales de servicio a las que se estaba habituado para los cables aislados con papel, por lo que tanto el PVC como el PE pasaron a ser utilizados principalmente para bajas tensiones.

En las décadas siguientes, conforme aumentaba todavía más la tensión, se buscaron tratamientos que permitiesen ampliar el rango de utilización de estos materiales plásticos.

Es así como surge en la década de los 70 el XLPE (polietileno reticulado), que consiste en aplicar al polietileno un tratamiento químico llamado reticulación que crea enlaces transversales entre cadenas lineales de polietileno. También en esta década surge el EPR (caucho de etileno propileno), orientado principalmente a cables de media tensión y utilizado cuando se necesita mayor flexibilidad que el XLPE, aunque tiene más pérdidas que éste.

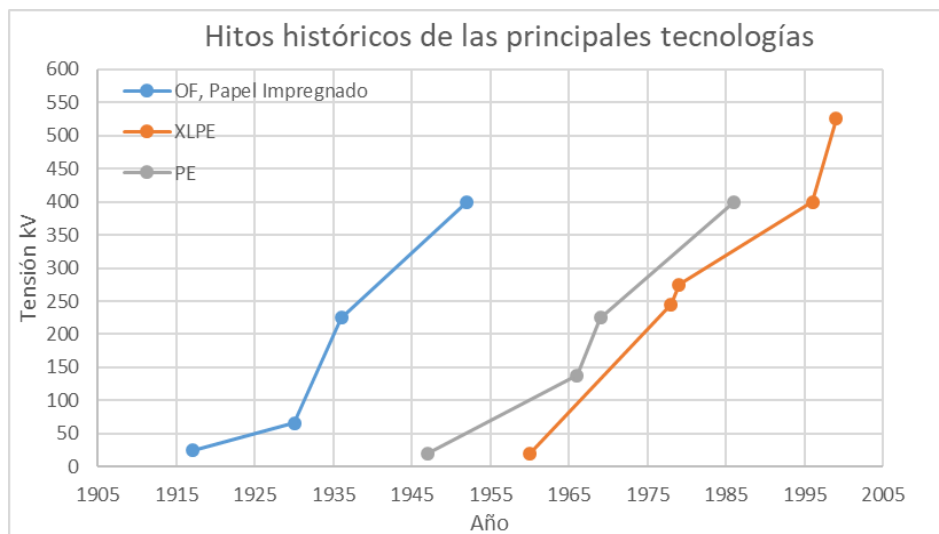


Gráfico 1. Hitos históricos de las principales tecnologías. Elaboración propia a partir de (CENT08), (PRIE__), (DIEZ__)

Así, desde finales del s. XX, el material aislante más utilizado para cables aislados de alta tensión ha sido el XLPE, llegando a ser empleado en enlaces de hasta 525 kV. Además, también se han mejorado los aislamientos de papel impregnado, creando el PPLP (papel laminado de polipropileno) y se espera que, en los próximos años, con el auge actual de la ciencia de los materiales, se descubran nuevos aislamientos y tratamientos químicos que permitan mejorar sus propiedades, permitiendo mejorar la eficiencia en el transporte subterráneo/submarino de la energía eléctrica.

2.2 Introducción Técnica

Actualmente, el transporte aéreo de la energía eléctrica se enfrenta a un creciente rechazo social (LIEN18) motivado por su impacto visual y servidumbre de grandes áreas de terreno. A estos factores hay que sumarle el hecho de que la calidad del servicio depende en gran medida de agentes climatológicos, tales como el viento, el hielo y la temperatura, que someten a grandes esfuerzos a los apoyos, pudiendo causar su vuelco si estos esfuerzos superan a los de diseño y provocando cortes en el suministro y/o sobrecarga de otras líneas.

Por otro lado, el empleo de cables aislados soterrados implica un impacto visual casi nulo, requiere menos espacio que las líneas aéreas y una menor tala de arbolado, (lo que implica un menor efecto sobre la flora), así como un apantallamiento de los campos eléctricos y una menor dependencia del clima. Sin embargo, desde el punto de vista del sistema eléctrico, las líneas subterráneas suponen el inconveniente de que, en caso de haber una falta, ésta no será fácilmente detectable y tampoco permiten reenganches automáticos, ya que suelen ser faltas permanentes provocadas fundamentalmente por agresiones externas debido a obras en las inmediaciones de la línea.

En el aspecto económico, las líneas subterráneas requieren una mayor inversión respecto a sus homólogas aéreas: para líneas subterráneas de 132kV este incremento de costes puede verse aumentado en hasta 8 veces el coste de una línea aérea; hasta 13 veces para una línea de 220kV; y de hasta 20 veces en el caso de líneas de 400kV. (COMI__)

Por las razones estéticas y de espacio mencionadas anteriormente, el uso de líneas subterráneas de alta tensión, pese a su elevado precio, es cada vez más solicitado por la sociedad y las administraciones públicas; especialmente en Europa, donde la mayoría de las ciudades presentan este tipo de infraestructura en el núcleo urbano, fruto de convenios con las compañías eléctricas, como es el caso de Madrid (convenio del 2003 con Iberdrola y Unión Fenosa) y Barcelona (convenio del 2002 con Endesa).

Además de en zonas urbanas, las líneas subterráneas también se suelen emplear en las conexiones de generadores y grandes industrias a la red eléctrica, en la entrada de una línea aérea a una subestación, en la conexión de transformadores en aquellas subestaciones que se encuentran blindadas (GIS) y, principalmente, en las interconexiones eléctricas submarinas. En España, son significativas las líneas de enlace

entre Tarifa y Marruecos (submarina 400kV), entre Mallorca y Menorca (submarina de 132kV) y la galería de Barajas (cable aislado, doble circuito de 400kV). (PRIE__)



Imagen 1. Galería de barajas. Fuente:(INMR15)



Imagen 2 Ejemplo de cable submarino.
Fuente: (MENO16)

Todas estas aplicaciones, junto con la constante expansión urbana, hacen que la actualización y la nueva instalación de cables aislados se estén convirtiendo en algo habitual, lo que supone la existencia de distintos tipos de cables y modos de instalación según las necesidades que se han de satisfacer.

Una primera clasificación de los cables aislados se puede realizar considerando diferentes características:

- Tensión: Diferenciando entre baja tensión ($U \leq 1\text{kV}$), media tensión ($1\text{kV} \leq U \leq 30\text{kV}$), alta tensión ($30\text{kV} \leq U \leq 132\text{kV}$) y muy alta tensión ($U \geq 220\text{kV}$).
- Aplicación: Haciendo la distinción entre cable subterráneo y cable submarino.
- Número de fases: una sola fase (unipolares) o tres fases (tripolares) en un solo cable.
- Aislamiento: pudiendo tener un aislamiento encintado (papel, papel laminado de polipropileno, etc.) o extruido (plásticos como el polietileno reticulado, el policloruro de vinilo, etc.). El tipo de aislamiento determinará el rango de tensiones en las que el cable puede ser utilizado, como se comentará más adelante.

En esta primera clasificación no se suele tener en cuenta el material conductor (aluminio o cobre) debido a que, para líneas de gran capacidad de transporte (220-400kV), la sección de aluminio a utilizar respecto a la del cobre puede verse incrementada en 1,5 veces, lo que plantea dificultades en el proceso de fabricación, optándose por la utilización de cobre pese a su mayor precio.

En cuanto a los modos de instalación que se pueden llevar a cabo, se ha de determinar:

- El sistema de puesta a tierra de la pantalla del cable: Solid Bonding (puesta a tierra al inicio y al final de la línea), Single-Point (en un solo punto), doble Single-Point (una modificación del Single-Point para duplicar la longitud admisible) y cross bonding (realizando la transposición de pantallas). Para su elección, se tendrá en cuenta las condiciones de falta a tierra.
- La instalación física del cable en el terreno: pudiendo realizarse en galería, zanja con el cable directamente enterrado y zanja con cables bajo tubo en matriz de hormigón. En este caso, la elección dependerá de distintos factores, como son el tipo de terreno, la finalidad de la línea, etc. También se ha de establecer parámetros como la separación entre cables, su disposición dentro de la galería/zanja/tubo, etc.

En el caso de líneas subterráneas de alta tensión de menos de 30kV los criterios y configuraciones dentro de la instalación están regulados en España por el ITC-LAT-06 aprobado en el Real Decreto 223/2008, pero para tensiones superiores a la anterior, los criterios adoptados por la empresa diseñadora de la instalación han de ser justificados mediante cálculos o métodos experimentales, siendo precisa la modificación de un elevado número de parámetros para cada proyecto.

Algunos de estos parámetros tienen que ver con la composición del cable, que debe escogerse de tal forma que soporte los esfuerzos que puedan aparecer durante el tendido y que permita un transporte eficiente y seguro de la energía. A continuación, se presenta brevemente las distintas partes que normalmente conforman un cable aislado:

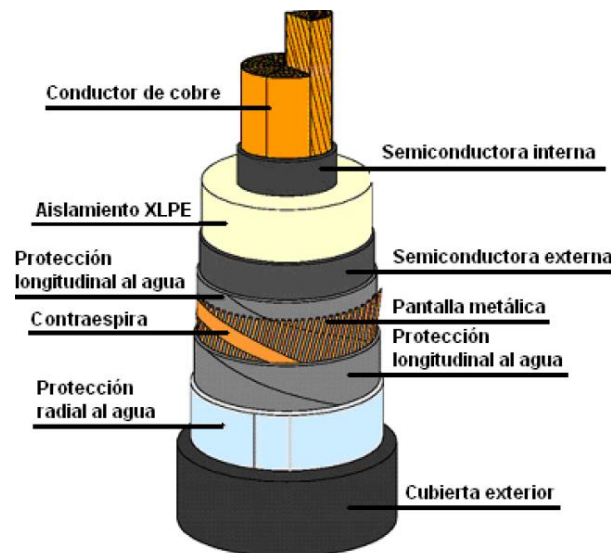


Figura 1. Composición detallada de un cable aislado. Fuente: (COMI__)

- Conductor: Es la parte fundamental del cable. Es el que soporta los esfuerzos mecánicos de tendido y el que ha de transportar la corriente independientemente de si está funcionando en régimen normal, en sobrecarga o en cortocircuito. El material ha de tener una gran conductividad (cobre o aluminio de gran pureza) y una superficie exterior uniforme. El principal objetivo es que el conductor ofrezca la mínima resistencia posible al paso de la corriente; esta resistencia está influenciada por la temperatura, el efecto pelicular (en caso de transportar corriente alterna) y el efecto proximidad (causado por la cercanía de otros cables). Algunas medidas utilizadas para reducir la resistencia eléctrica del conductor son:
 - Control de la temperatura: Mediante un hueco en el eje central, se refrigera el conductor mediante el bombeo de aceite por uno de los extremos del cable. Es lo que se conoce como cable Oil Filled (OF). Su uso se está reduciendo debido a las dificultades que presenta en su funcionamiento (riesgo de incendios, bombeo constante de aceite, etc.) No se tratarán en el proyecto.
 - Segmentación del conductor (tipo Milliken, de 4 a 6 segmentos) y esmaltado de los hilos que lo conforman: permiten reducir el efecto pelicular.

De la aplicación de estas medidas surgen distintos tipos de cableado: con alambres, con hilos trapezoidales y conductor segmentado. A continuación, se muestran los tipos de cableado según el cable con aislamiento seco (no OF):



Figura 2. Tipos de cableado según el tipo de cable aislado. Fuente: (COMI_)

- **Aislamiento:** Debe presentar una gran rigidez dieléctrica, para evitar pérdidas de corriente, y una serie de características químicas (resistencia a la humedad, a la oxidación, etc.), físicas (que sea capaz de aguantar todo el rango de temperaturas desde el régimen normal hasta el régimen de cortocircuito) y mecánicas (aspectos como la carga de rotura, la elasticidad y la resistencia a la abrasión son importantes a la hora del tendido).

El grosor de la capa de aislamiento depende del campo eléctrico máximo que se pueda originar durante el servicio; la rigidez dieléctrica del aislamiento, que varía según el material empleado, tendrá que ser superior a este campo para evitar la rotura del material (arborescencias) y determina el rango de tensiones a las que puede funcionar.

Se muestra a continuación la rigidez dieléctrica de los materiales aislantes más utilizados (comparándola con la rigidez del aire) y el rango de tensiones en los que éstos son utilizados.

Rigidez dieléctrica (kV/cm – 50 Hz)	
Aire	30
Papel	75 – 150
Aceite transformador	300
PE	50
PVC	200 – 400
XLPE	300
Goma butílica	150 – 200
Pyraleno	2000

Tabla 1. Rigidez dieléctrica de distintos aislamientos. Fuente: (COMI_)

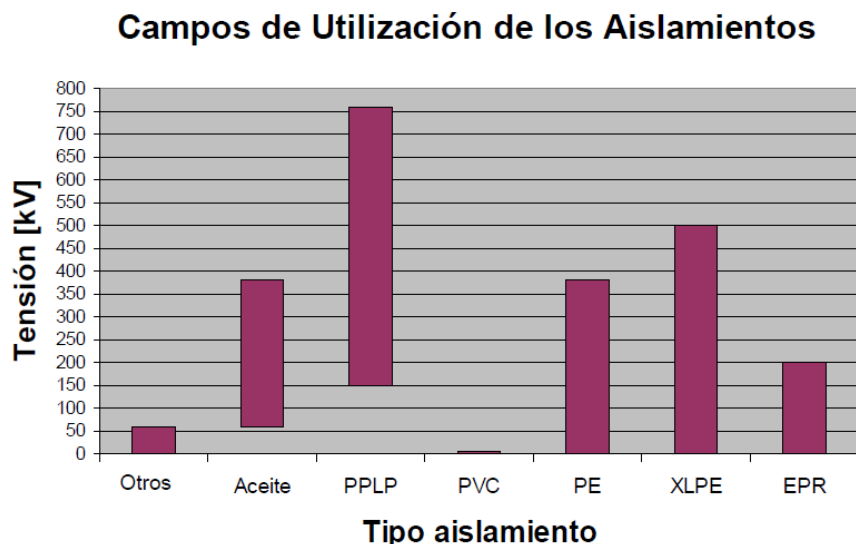


Gráfico 2. Rango de tensiones en las que los distintos aislamientos son utilizados. Fuente: (COMI_)

Observando el Gráfico 2, no es de extrañar que el aislamiento más utilizado hoy en día sea el XLPE (Polietileno reticulado), ya que su rango de tensiones abarca desde baja tensión hasta 500 kV (la máxima tensión nominal en España es 400 kV).

- **Capas semiconductoras:** Se suele disponer una capa entre el conductor y el aislamiento (semiconductora interna), y otra recubriendo al aislamiento (semiconductora externa). Suele ser del mismo material que el utilizado en el aislamiento, pero mezclado con elementos semiconductores. Proporciona una superficie lisa que homogeniza el campo eléctrico, evitando su concentración en determinados puntos. Debe asegurar un contacto completo con el aislamiento para evitar los huecos de aire entre las dos capas, puesto que, si este aire se ioniza, el aislamiento podría presentar arborescencias.

En el caso en que el material aislante sea XLPE, el contacto completo entre estas capas se garantiza mediante la extrusión simultánea de las dos capas semiconductoras con el aislamiento (triple extrusión).

- **Pantalla metálica:** En caso de que el cable sea subterráneo, se encuentra entre la cubierta exterior y el aislamiento; si el cable es submarino, entre el aislamiento y la armadura. Puede tener elementos de protección frente al agua a su alrededor. La pantalla desempeña una doble función eléctrica y mecánica en el cable aislado. En primer lugar, permite anular (“apantallar”) el campo eléctrico en el exterior del cable, lo que hace que el campo sea radial en el aislamiento. La pantalla,

además, sirve de conductor para las corrientes capacitivas (aquellas que se derivan a través del aislamiento), para las corrientes inducidas por la proximidad de otros cables, y la corriente homopolar (cortocircuito). La previsión de estas corrientes se utilizará para el dimensionamiento de la pantalla, habiendo de escoger aquella puesta a tierra que resulte más conveniente.¹

En cuanto a su función mecánica, la pantalla contribuye en algunos casos a la protección del aislamiento frente al agua y, en general, frente a agresiones externas.

Existen distintos tipos de pantallas según las necesidades de la línea, pero comúnmente se clasifican en estancas y no estancas:

- Pantallas estancas: Tubos extruidos de plomo o láminas de aluminio. La estanqueidad se consigue mediante la extrusión o el soldado de la pantalla durante la fabricación del cable.
 - Pantallas no estancas: El material empleado suele ser cobre o aluminio. Pueden estar en forma de hilos, trenzas o cintas.
- Armadura: Aunque en la Figura 1 no se ha representado, algunos cables (especialmente los submarinos) pueden presentar una capa que proporcione protección adicional frente a tracciones y esfuerzos cortantes, y que disminuya el peligro de electrocución. Puede disponerse en forma de alambres, pletinas o flejes.
 - Protección frente al agua: Pueden distinguirse dos métodos no excluyentes:
 - Protección longitudinal: Constituida por cintas semiconductoras absorbentes que son eficaces contra el agua que entra debido a daños o defectos en la cubierta.
 - Protección radial: Consiste en una cinta metálica que encierra al cable. Evita la penetración de agua a través de la cubierta exterior.
 - Cubierta: Constituye la envoltura externa de los cables y los aísla del medio externo, tanto mecánicamente (corrosión, humedad, etc.) como eléctricamente (evita el contacto pantalla-tierra en puntos indeseados). El principal material que se utiliza es polietileno (PE), ya que proporciona estabilidad mecánica y, en caso

¹ Los tipos de puesta a tierra se mencionaron anteriormente en los modos de instalación de cables aislados.

de incendio, genera pocos humos, gases no corrosivos y retarda la llama si previamente se le ha aplicado una capa de retardo a la llama.



Imagen 3. Ejemplo de cable aislado OF, tipo Milliken, aislamiento XLPE. Fabricado por PRYSMIAN. Fuente: (PRYS12)



Imagen 4. Ejemplo de cable aislado seco, cableado en alambres de cobre, pantalla en forma de hilos. Distribuido por Abelma Chile. Fuente: (ABEL__)

Aunque las partes descritas anteriormente son las fundamentales de un cable aislado, cada fabricante realiza distintas modificaciones, ya sea añadiendo nuevos componentes o alterando los materiales que lo conforman, con el fin de ofrecer ligeras ventajas mecánicas y eléctricas. La empresa proyectista de la instalación subterránea deberá seleccionar, en primer lugar, el tipo de cable que se utilizará y, en segundo lugar, qué empresa suministrará dicho cable.

De todo lo anterior se concluye que la idoneidad de las condiciones de la instalación depende en gran medida del cable que se escoja, convirtiendo esta elección en un proceso costoso, en lo que a tiempo se refiere, en cada proyecto. Es por ello que una herramienta que facilite este tipo de elecciones es siempre bienvenida por los proyectistas.

3 Estado del arte

Hoy en día, algunos fabricantes de cables aislados ofrecen sencillos programas de acceso gratuito para escoger el cable que mejor se adapte a los requisitos de la instalación. General Cable, por ejemplo, ofrece en su página web una herramienta para determinar el cable a utilizar dadas la tensión, la intensidad, el conductor, la temperatura, etc., pero sólo ofrece resultados para tensiones menores de 30 kV (intervalo regulado por el reglamento). Otro fabricante de cables, Prysmian, lanzó recientemente una aplicación gratuita para smartphones (con versión para navegador disponible) llamada Cable App (PRYS17), que presenta similares características a la anterior, estando destinada a instalaciones en baja y media tensión. Ambas aplicaciones mencionadas ofrecen al usuario los cables de fabricación propia, por lo que la variedad de elección queda reducida al catálogo de la empresa fabricante que se haya escogido previamente.

En el caso de que la instalación subterránea sea de más de 30kV, el proyectista tendrá que buscar en los catálogos de los fabricantes aquellos cables que sean aptos eléctricamente para su proyecto y comparar las distintas alternativas en base a su coste y su posible disposición en la instalación, teniendo en cuenta los factores de corrección que deberán ser proporcionados por el fabricante. Otra opción que existe es confiar la elección del cable a la empresa fabricante del mismo, lo que tiene la problemática de la falta de transparencia en este proceso y el incremento del coste del proyecto, afectando negativamente a la competitividad de la empresa proyectista.

Aunque la mayoría de los catálogos están en forma de archivos pdf, algunas empresas como la mexicana Condumex tienen un catálogo web interactivo que permite filtrar sus productos en función de distintas características (material, industria de destino, etc.), pero al final el tiempo ahorrado es mínimo, ya que el proyectista tiene que revisar uno a uno las características de los cables que se le presentan y estudiar qué sección de cable necesita.

Categoría		Subcategoría		
Energía		Cables para transmisión y subtransmisión		
Norma	Tipo de material	Configuración	Rango de uso	Idioma
<input type="checkbox"/> CFE <input type="checkbox"/> NMX <input type="checkbox"/> Otros	<input type="checkbox"/> Aluminio <input checked="" type="checkbox"/> Cobre <input type="checkbox"/> Fibra óptica <input type="checkbox"/> Bimetálico	<input checked="" type="checkbox"/> Monoconductor <input type="checkbox"/> Multiconductor	<input type="checkbox"/> Desnudos <input type="checkbox"/> Forrados baja tensión <input type="checkbox"/> Forrados media tensión <input type="checkbox"/> Forrados alta tensión	<input checked="" type="radio"/> Español <input type="radio"/> Inglés
<input type="button" value="Buscar"/> <input type="button" value="Limpiar"/>				
Resultados				
ID	Producto	Norma		
3	ALAMBRE DE COBRE SEMIDURO DESNUDO	CFE		
4	CABLE DE COBRE SEMIDURO DESNUDO	CFE		
10	ALAMBRE DE COBRE SUAVE DESNUDO	NMX		
11	ALAMBRE DE COBRE SEMIDURO DESNUDO	NMX		
12	CABLE DE COBRE SUAVE DESNUDO	NMX		
13	CABLE DE COBRE SEMIDURO DESNUDO	NMX		
15	CABLE PARARAYOS DE COBRE DESNUDO	Otros		
24	CABLES DE ENERGIA VULCANELM R. DE ALTA TENSION PARA AMBIENTES HUMEDOS Y MOJADOS CON AISLAMIENTO DE XLP PARA 115 KV CON CONDUCTOR DE COBRE Y CUBIERTA DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD (PEAD)	CFE		
26	CABLES DE ENERGIA VULCANEL 2000M R. DE ALTA TENSION PARA AMBIENTES HUMEDOS Y MOJADOS CON AISLAMIENTO DE XLP PARA 69 6 115 KV CON CONDUCTOR DE COBRE Y CUBIERTA DE PVC	CFE		
28	CABLES DE ENERGIA VULCANEL 2000M R. DE ALTA TENSION PARA AMBIENTES SECOS CON AISLAMIENTO DE XLP PARA 69 6 115 KV CON CONDUCTOR DE COBRE Y CUBIERTA DE PVC	CFE		
29	CABLES DE ENERGIA VULCANEL 2000M R. DE ALTA TENSION PARA AMBIENTES HUMEDOS Y MOJADOS CON AISLAMIENTO DE XLP PARA 138 KV CON CONDUCTOR DE COBRE Y CUBIERTA DE PVC	CFE		

Imagen 5. Captura de pantalla del catálogo interactivo de Condumex.

Asimismo, existen programas comerciales como CYMCAP (creado por CYME INTERNATIONAL), que permiten el análisis térmico de la línea subterránea, según la disposición y el tipo de cable empleado, para obtener la intensidad máxima del mismo. El principal inconveniente que presenta este software es el elevado precio de su licencia de utilización, por lo que solo es aconsejable su utilización para aquellas empresas proyectistas que desarrollen numerosos proyectos de este tipo al año.



Imagen 6. Imagen promocional de Cable App, de Prysmian Group. Fuente: (PRYS17)

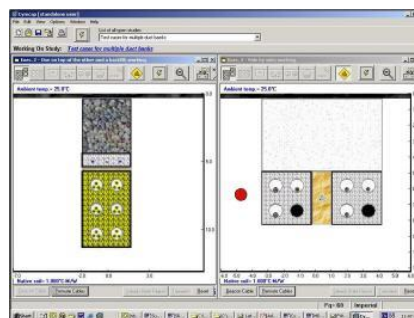


Imagen 7. Captura de pantalla de CYMCAP, de CYME INTERNATIONAL

Las alternativas a este software para comprobar de manera manual la ampacidad de los cables aislados y realizar la selección son distintas (BATE16). El método más antiguo es mediante el uso de los llamados “Libros negros” (“*Black Books*”)(AIEE62), que tabulan la ampacidad de los cables hallada mediante el método Neher–McGrath. Estos valores tabulares han de ser corregidos mediante los métodos que los *Black Books* proponen en sus primeras páginas, por lo que para los ingenieros actuales esta alternativa resulta

difícil, pudiendo omitir diferencias en las suposiciones adoptadas que resultarán en cables demasiado grandes o demasiado pequeños para los requisitos que se les exigen. Además, la antigüedad de estos libros (1962) hace que la confianza en los resultados, con el alto desarrollo tecnológico de los cables aislados en las últimas décadas, sea escasa. No obstante, todavía quedan ingenieros que utilizan estos libros.

En los últimos tiempos el método de Nehe-McGrath ha sufrido una adaptación que mejora su fiabilidad (BATE16). Inicialmente, este método suponía la estabilidad térmica del terreno. La modificación consiste en considerar los efectos de la creación de zonas secas alrededor del cable que modifican la resistencia térmica del terreno (Inestabilidad térmica o *Thermal Instability*) y el considerar el hecho de que el desplazamiento de la humedad por el terreno pueda ser conductora del calor generado por el cable. El principal inconveniente es la complejidad del proceso de cálculo, que suele necesitar de hojas de cálculo o de programas capaces de añadir al terreno capas con distinta resistividad térmica alrededor del cable, además de tener un conocimiento completo sobre el terreno en el que se va a realizar la instalación (*Nondrying Heat Rate NHT*, resistividad del suelo cuando está completamente seco, resistividad actual del suelo...).

Como actualización a los *Black Books* mencionados anteriormente, IEEE publicó en 1994 un nuevo conjunto de tablas de corrientes debido a los nuevos diseños y métodos de fabricación de cables aislados (IEEE94). El principal problema de estas tablas es que sólo consideran una puesta a tierra de las pantallas en Solid Bonding (también conocida como Both-ends).

En general, las opciones expuestas para seleccionar el cable aislado que se utilizará en la instalación se basan en la introducción de las dimensiones y características del cable como datos iniciales, a partir de los cuales se comprueba si, bajo unas determinadas condiciones de funcionamiento, resulta apto para la línea que se desea construir.

El modelo que se programará en este proyecto invertirá este proceso: a partir de las condiciones de funcionamiento y los materiales que compondrán el cable, se obtendrán las dimensiones del cable aislado a utilizar. Los cálculos de pérdidas y resistencias térmicas se realizarán tomando como referencia las normas UNE 21144-1-1:2012 y UNE 21144-2-1:1997 respectivamente.

4 Objetivos

Los objetivos que se pretenden conseguir con este proyecto son:

1. Proporcionar los datos dimensionales del cable aislado a utilizar, y otros datos relacionados, dadas las características de la línea eléctrica subterránea (de más de 30kV), tales como la profundidad de soterramiento, la tensión nominal, el tipo de puesta a tierra de las pantallas, etc.
2. Ahorrar tiempo a los diseñadores de una línea subterránea de alta tensión orientándoles sobre la sección de conductor que se requiere (parámetro principal en los catálogos de los fabricantes).
3. Comprobar el impacto que tiene la modificación de las características de la instalación (aumentar la profundidad, por ejemplo) en la sección del conductor calculada.
4. Obtener el sobrecoste asociado a la elección de un cable de sección conductora mayor de la necesaria y estimar el coste de una línea subterránea para distintas tensiones y materiales conductores.

5 Consideraciones Generales

Tal y como se explicó en el apartado introductorio, existen distintos tipos de cables aislados y de instalaciones según su función y las condiciones a las que vayan a estar sometidos.

El modelo ha sido programado para dimensionar cables unipolares aislados sin armadura, ya que ésta es un componente principalmente mecánico. Para resolver el problema de transferencia de calor se han obviado las capas semiconductoras (interna y externa), por lo que desde un primer momento se tomará que el campo eléctrico es homogéneo sobre el aislamiento. Un esquema simplificado del cable unipolar aislado para el que se ha programado la herramienta sería el siguiente:

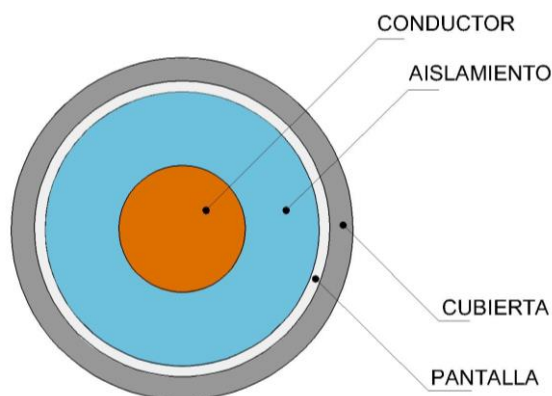


Figura 3. Esquema simplificado del cable unipolar aislado modelado.

En cuanto a las características eléctricas, la herramienta está diseñada para calcular cables para sistemas trifásicos de corriente alterna, 50 Hz y de entre 30 y 500 kV. Debido a esta característica trifásica, cada uno de los cables de la instalación están sometidos a distintas influencias según su disposición; el dimensionamiento se realizará para aquel que vea más mermada su capacidad de transporte (peor caso) según la norma UNE 21144.

Las disposiciones que se han tenido en cuenta son capa y tresbolillo, pudiendo realizarse la instalación directamente enterrada, con los cables bajo tubo directamente enterrado o bajo tubo en un bloque de hormigón.

Aunque la herramienta se ha diseñado para un sencillo manejo, la introducción de los parámetros de entrada y el análisis de los resultados obtenidos requiere de los conocimientos del usuario sobre líneas subterráneas de alta tensión y cables aislados.

Pese a tomar la norma UNE 21144 como referencia en distintas fases del dimensionamiento del cable, los resultados obtenidos son aproximados, pudiendo ser notable la diferencia con respecto al catálogo de un fabricante en el caso de que éste haya seguido un procedimiento de cálculo distinto (teórico o mediante ensayos), utilice materiales distintos, diferente tecnología o no se conozcan con precisión algunas de las condiciones en las que el cable presenta las características expuestas en el catálogo.

6 Parámetros de entrada

6.1 Características eléctricas de la línea

Las características eléctricas de la línea son todas aquellas características generales que el usuario debe saber sobre la línea que tiene intención de diseñar. Por tanto, será lo primero que se deba de introducir en la herramienta, estas características son:

- Frecuencia del sistema en Hz: La precisión del modelo resulta mejor para una frecuencia de 50Hz, que es la utilizada en Europa.
- Tensión nominal (kV): Se habrá de introducir la tensión compuesta fase-fase de la línea. La precisión del modelo es mejor para el rango de tensiones 30-500 kV.
- Intensidad máxima en servicio permanente (A): Resulta fundamental para poder dimensionar el cable aislado. Es la máxima intensidad que debe soportar el cable sin que se supere su temperatura máxima.
- Longitud de la línea en km: No influye directamente en el dimensionamiento del cable, pero es recomendable que el usuario la introduzca, puesto que en los resultados se incluirán las pérdidas de potencia activa totales que se producen en el conductor.
- Corriente de cortocircuito monofásico (kA) y su duración (s): Estos datos deberán de introducirse para poder realizar el cálculo de la sección transversal de la pantalla metálica, que actúa como conductor en caso de cortocircuito.

A partir de estos datos, se calcularán una serie de parámetros (ver apartado de cálculos) que se utilizarán posteriormente en las distintas operaciones. Estos parámetros se mostrarán en la parte derecha de la pantalla de introducción de datos:

- Tensión máxima de servicio U_s en kV: Aunque la tensión nominal esté determinada teóricamente, en la práctica esta tensión se puede sobrepasar, pudiendo alcanzar como máximo U_s .
- Capacidad del cable en $\mu\text{F}/\text{Km}$: Se realizará una estimación en base a la tensión nominal.
- Velocidad angular $\omega = 2 \cdot \pi \cdot f$ [rad/s]
- Longitud crítica de la línea: Es la longitud de la línea necesaria para que la corriente capacitiva de la línea sea la misma que la intensidad máxima admisible

de dicha línea. El usuario deberá comprobar que este valor es considerablemente superior a la longitud real de la línea que se va a diseñar.

- Potencia aparente de la línea $S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_{m\acute{a}x}$ [VA]

Todos estos datos se presentan a fin de que el usuario tenga toda la información que le pueda ser de utilidad a la hora de utilizar de un modo más eficiente la herramienta informática.

Datos de la línea	Características generales de la línea:
Frecuencia del sistema (Hz): 50	U_s : 416,3 kV (<i>Tensión máxima de servicio</i>)
Tensión Nominal (kV): 362	Capacidad: 0,19 μ F/Km
Intensidad máxima en servicio permanente(A): 871	ω : 314,16 rad/s
Longitud de la línea (Km): 5	L_c : 69,8 Km (<i>Longitud Crítica</i>)
Corriente de cortocircuito monofásico (kA): 15	Potencia aparente: 546,12 MVA
Duración del cortocircuito monofásico (s): 1	

Imagen 8. Captura de pantalla de la herramienta. Introducción de datos de la línea y visualización de características asociadas

6.2 Selección de conductor

El tipo de material conductor que se emplee y la forma en la que éste se disponga, resulta fundamental a la hora de determinar la sección que se necesita, ya que es el encargado de transportar la corriente en régimen normal, en sobrecarga y en cortocircuito, y tiene que ser capaz de soportar las tensiones mecánicas de tiro que se produzcan durante el tendido del cable.

Así pues, para la selección del conductor habrá de tenerse en cuenta factores como el tipo de instalación, la longitud de la línea, el precio, etc. para evitar gastos innecesarios debido a sobredimensionamientos o por pérdidas en el transporte de la energía.

Para un comportamiento eléctrico adecuado, todo conductor ha de tener una buena conductividad eléctrica y una superficie exterior regular. Teniendo en cuenta esto, los materiales empleados como conductores en cables aislados son el cobre y el aluminio². El usuario podrá elegir entre estos dos materiales en la hoja de introducción de datos de la herramienta.

² Norma UNE-EN 60228 Conductores de cables aislados (IEC 60228).

La resistividad eléctrica del aluminio es un 163% mayor que la del cobre, por lo que, para una misma capacidad de corriente, requiere secciones de conductor mayores. No obstante, el precio del cobre es del orden de unas 3⁴ veces mayor que el del aluminio³, lo que hace necesario muchas veces el comparar los precios de las dos alternativas para una misma línea eléctrica. En la tabla siguiente se muestran las principales características de estos materiales⁴:

	Cobre (Cu)	Aluminio (Al)
Densidad (g/cm³)	8,89	2,70
Resistividad ($\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$) a 20°C	$17,24 \cdot 10^{-3}$	$28,26 \cdot 10^{-3}$
Resistencia a la tracción (N/mm²)	200...300	70...90
Coefficiente de temperatura (K⁻¹) a 20°C	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$4,03 \cdot 10^{-3}$

Tabla 2. Características del cobre y del aluminio que se emplearán en el modelo. Fuente: (IBER02)

Como se puede apreciar en la tabla anterior, la baja densidad del aluminio (casi tres veces menor que la del cobre) constituye su principal ventaja de uso, pues, para una misma capacidad de transporte, el peso del conductor será del orden de la mitad. (IBER02)

En líneas generales, para muy altas tensiones y corrientes se suele utilizar el cobre debido a que las dimensiones totales del cable aislado pueden ser menores, lo que permite grandes longitudes de fabricación y una reducción considerable en el transporte de las bobinas. Por otro lado, el aluminio resulta más adecuado para menores niveles de tensión (66 y 132 kV) y corriente por su bajo precio.

Los tres fenómenos eléctricos que influyen de manera determinante en el comportamiento del conductor son: las pérdidas óhmicas, el efecto piel y el efecto proximidad.

Las pérdidas óhmicas son las pérdidas de energía debido a la resistencia eléctrica del conductor, y se determinan por la ley de Joule ($P [W]=I^2 \cdot R$).

El efecto piel (también conocido como efecto pelicular) consiste en una diferencia en la distribución de la intensidad: la densidad de corriente en el exterior del conductor es

³ Precios según el diario Expansión a fecha de 15 de marzo del 2018.

⁴ Los valores de resistividad y coeficiente de temperatura del cobre y del aluminio que actúan como conductores se corresponden con los de la Norma IEC 60028 para el cobre y la Norma IEC 60889 para el aluminio.

mayor y disminuye hacia el centro. Esto es debido al campo magnético que origina el conductor intrínsecamente. Tal diferencia de distribución supone una disminución de la capacidad total de carga, principalmente para secciones mayores de 1000 mm² (IBER02), valor a partir del cual se suelen utilizar conductores segmentados para reducir este efecto, como se comentará más adelante.

El efecto proximidad se produce cuando las distancias entre fases de una misma línea son pequeñas. Consiste en una deformación en el reparto de corriente en el conductor provocada por las corrientes inducidas por los diferentes alambres de los conductores adyacentes, haciendo que la corriente tienda a concentrarse en las caras más cercanas a los conductores.

En la práctica, el efecto pelicular tiene más relevancia que el efecto de proximidad, puesto que éste último disminuye rápidamente en cuanto se aumenta la separación entre cables.

En la herramienta se considerarán dos tipos de diseño de conductores: los redondos cableados y los segmentados (también conocidos como tipo Milliken). Así, con el objetivo de facilitar posteriormente el cálculo de las pérdidas por estos efectos, el usuario deberá elegir en un menú desplegable entre:

- Circular cableado (disponible tanto para cobre como para aluminio).
- Circular segmentado (Cobre).
- 4 Segmentos (Aluminio)
- 5 Segmentos (Aluminio)
- 6 Segmentos (Aluminio)

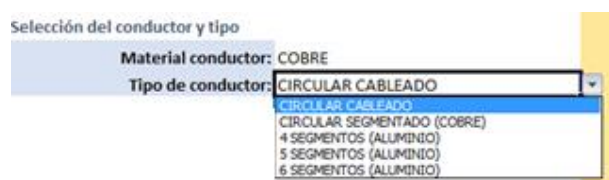


Imagen 9. Captura de pantalla de la herramienta. Selección del conductor y tipo

Las ventajas e inconvenientes de estos dos tipos de diseño se muestran en la siguiente tabla:


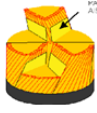
Tipo de conductor	Ventajas	Inconvenientes	
Circular Cableado	<ul style="list-style-type: none"> • Estabilidad • Superficie homogénea 	<ul style="list-style-type: none"> • Menor flexibilidad • Mayor efecto piel 	
Segmentado	<ul style="list-style-type: none"> • Gran flexibilidad • Bajo efecto piel 	<ul style="list-style-type: none"> • Coste elevado • Riesgo de puntos débiles en la extrusión del aislamiento. 	

Tabla 3. Ventajas e inconvenientes de los distintos tipos de conductor. Fuente: (IBER02), (COMI_)

6.3 Selección de aislamiento

El aislamiento es, desde el punto de vista de la tecnología de alta tensión, el componente más importante de un cable aislado: debe soportar las tensiones de servicio y las sobretensiones que se producen durante la vida de la instalación. Su grosor debe ser lo suficiente para que el campo eléctrico al que está sometido el aislamiento esté muy por debajo de su rigidez dieléctrica.

Como se vio en el capítulo introductorio, a lo largo del siglo XX surgieron multitud de tipos de aislamiento, como el papel laminado de polipropileno (PPLP), el policloruro de vinilo (PVC), el EPR (etileno propileno), el polietileno (PE) y el polietileno reticulado (XLPE). No obstante, con las técnicas de fabricación, los precios, y los niveles de tensión actuales, los aislamientos plásticos son los que más se han extendido, por lo que en la herramienta se dará a elegir al usuario entre el XLPE y el PE, que permiten un mayor rango de tensiones de utilización, aunque se recomienda utilizar el XLPE puesto que es utilizado por la mayoría de los principales fabricantes de cables aislados y presenta mejores características que el PE, como se mostrará más adelante.

Como pudo observarse en el Gráfico 2, tanto el PE como el XLPE se emplean desde baja tensión hasta muy alta tensión (380kV y 500kV respectivamente), lo que permite cubrir el rango de tensiones establecido para la herramienta (de 30kV a 500kV).

A continuación, se muestra una tabla con las principales características de estos aislamientos:

	Permitividad ϵ_r	T _{máx} Servicio (°C)	T _{máx} Corto (°C)	Tensión máxima (kV)	Resistividad térmica (°C·m/W)	Factor Pérdidas tgδ	Rigidez dieléctrica (kV/cm)
PE	2,3	70	150	380	3,5	0,001	50
XLPE	2,3	90	250	500	3,5	0,001	300

	Flexibilidad	Res. a altas temp.	Res. al agua	Descargas parciales
PE	MALA	MALA	REGULAR	REGULAR
XLPE	MALA	EXCELENTE	REGULAR	BUENA

Tabla 4. Características de los distintos aislamientos. Fuente: (IBER02), (COMI_)

En la tabla se aprecia cómo ambos tipos de aislamiento tienen algunas propiedades idénticas, como la permitividad, la resistividad térmica y el factor de pérdidas; esto se debe a que, como su propio nombre indica, el XLPE es polietileno sometido a un proceso de reticulación que mejora su resistencia a altas temperaturas, permitiendo una temperatura máxima de servicio un 128% mayor, y aumenta en 6 veces la rigidez dieléctrica del polietileno sin reticular. Estas mejoras hacen que la capacidad de transporte y los niveles de tensión que permite el XLPE sean mayores que en el caso de utilizar PE.

En la Imagen 10 se presenta una captura parcial de la pantalla de introducción de datos de la herramienta, correspondiente a la selección de aislamiento. El usuario deberá elegir en un menú desplegable entre PE y XLPE, sugiriéndole que el XLPE es el aislamiento más extendido. En la mitad derecha de la hoja se mostrarán las características (según Tabla 4) del aislamiento escogido, resaltando visualmente las características no numéricas (flexibilidad, resistencia a altas temperaturas, resistencia al agua y descargas parciales), a fin de que el usuario determine si se adecúa a sus necesidades.

Como dato adicional, se analizará si el aislamiento seleccionado es adecuado para el nivel de tensión introducido, dando como resultado APTO o NO APTO. En este último caso, el usuario deberá tomar las medidas oportunas, como el cambio de aislamiento o la disminución de la tensión de la línea.

Selección de aislamiento

Material: **XLPE**

El aislamiento de polietileno reticulado (XLPE) es el más utilizado hoy en día y es ofrecido por la gran mayoría de fabricantes de cables aislados.

Características del aislamiento escogido:

ϵ_r :	2,3	(Permitividad relativa)
$T_{\text{máx Servicio}} (^{\circ}\text{C})$:	90	
$T_{\text{máx Cortocircuito}} (^{\circ}\text{C})$:	250	
Tensión máxima (kV):	500	APTO
ρ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$):	3,5	(Resistividad térmica)
$\text{tg}\delta\cdot 10^{-3}$:	0,1	(Factor de pérdidas dieléctricas)
Rigidez dieléctrica (kV/cm):	300	
Flexibilidad:	MALA	
Resistencia a altas Temp.:	EXCELENTE	
Resistencia al agua:	REGULAR	
Descargas parciales:	BUENA	

Imagen 10. Captura de pantalla de la herramienta. Selección del aislamiento y visualización de características asociadas.

6.4 Selección de pantalla

La pantalla es el elemento metálico situado entre el aislamiento y la cubierta. Como se comentó en el capítulo introductorio, las funciones que desempeña la pantalla son del tipo eléctrico y mecánico:

- Permite que el campo eléctrico en el aislamiento sea radial, ya que anula éste en el exterior del cable. Con esto se consigue reducir el riesgo de arborescencias en el aislamiento y la interacción eléctrica con elementos externos al cable.
- Actúa como conductor activo de las corrientes capacitivas (pérdidas dieléctricas del aislamiento), de las corrientes inducidas por los campos magnéticos de cables próximos, y de la corriente homopolar en caso de falta (sin exceder la temperatura máxima admisible de cortocircuito).
- Añade protección mecánica frente a agresiones externas.
- Protege de un contacto accidental.

Para que la pantalla drene estas corrientes a tierra, es necesario que tenga una conexión a tierra (PAT, puesta a tierra). Los distintos tipos de PAT de la pantalla se explicarán más adelante.

Según los requisitos de la línea, el diseño de las pantallas metálicas se puede dividir en dos tipos: pantallas estancas y pantallas no estancas (PRIE__)

Las pantallas estancas consisten en tubos (cintas) de plomo, aluminio corrugado o acero. Por el proceso de fabricación (que suele ser mediante extrusión o soldado), se garantiza la estanqueidad.

El plomo tiene gran resistencia a la corrosión y una elevada resistencia eléctrica, lo que disminuye las pérdidas en las líneas en las que las pantallas tienen una PAT directa; su principal inconveniente es su elevado precio y peso, y su escasa capacidad para conducir las corrientes de cortocircuito, además de encontrarse medioambientalmente denostado, por lo que cada vez se utiliza menos. Por su parte, las pantallas de aluminio resultan ser más ligeras y tienen más capacidad de soportar cortocircuitos, aunque el proceso de fabricación es de mayor complejidad. (PRIE__)

Las pantallas no estancas están constituidas por hilos de cobre o aluminio, que proporcionan mayor ligereza y reduce el diámetro total del cable. Como contrapartida, proporcionan una limitada protección mecánica.

También se da casos en los que la pantalla es una combinación de los tipos anteriores, como, por ejemplo, pantallas de hilos de cobre cubiertos con una pletina de aluminio o hilos de cobre bajo un tubo de plomo extruido. No obstante, para poder calcular las pérdidas que se producen en la pantalla de una manera sencilla, los tipos de pantalla que se darán a elegir en la herramienta serán los de tipo HILOS y los de tipo CINTA (o tubo).

Para que la pantalla cumpla con los requisitos eléctricos que se le exigen, en especial los que se refieren al comportamiento en caso de cortocircuito, debe tener una sección transversal mínima que depende principalmente de la magnitud de la corriente en caso de falta a tierra y del tiempo que debe soportar dicha corriente. El cálculo de esta sección, así como todas las operaciones relacionadas con la pantalla, se detallarán en su apartado correspondiente más adelante.

En la hoja de introducción de datos el usuario deberá elegir el material de la pantalla en un menú desplegable, teniendo como opciones los materiales mencionados anteriormente: Plomo, Acero, Cobre y Aluminio. A continuación, del mismo modo, se dará a elegir el tipo de pantalla de entre Hilos y Cinta, haciéndose la siguiente recomendación en una ventana emergente: *“Las pantallas de hilos se suelen emplear con aluminio y cobre. En las pantallas de cinta se puede utilizar plomo, acero o aluminio”*. Finalmente, si el tipo de pantalla escogido es Hilos, se le da la opción al usuario de establecer la sección transversal de dichos hilos o bien la opción de utilizar un valor “Por defecto” ya establecido (3 mm²)



Imagen 11. Captura de pantalla de la herramienta. Selección de pantalla.

Al igual que en la selección del conductor y del aislamiento, en la mitad derecha de la hoja de introducción de datos se mostraran las principales características de la pantalla escogida, como los parámetros K y β (factores calculados según el material empleado que intervienen en cálculos posteriores de la sección), la sección necesaria calculada (si previamente se ha introducido una corriente y tiempo de cortocircuito monofásico), el coeficiente de temperatura del material a 20°C, su resistividad eléctrica, su resistencia óhmica (en caso de tener la sección necesaria calculada) y el número de hilos (de relevancia en caso de seleccionar este tipo de pantalla). En la siguiente tabla se muestran algunas de las características anteriores para los distintos materiales⁵:

Material	K	β	Coefficiente T^a $\alpha_{20^\circ\text{C}} (\text{K}^{-1})$	Resistividad $\rho_{20^\circ\text{C}} (\Omega \cdot \text{m})$
Plomo	41	230	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$21,4 \cdot 10^{-8}$
Aluminio	148	228	$4,03 \cdot 10^{-3}$	$2,84 \cdot 10^{-8}$
Acero	78	202	$4,5 \cdot 10^{-3}$	$13,8 \cdot 10^{-8}$
Cobre	226	234,5	$3,93 \cdot 10^{-3}$	$1,7241 \cdot 10^{-8}$

Tabla 5. Características y valores asociados a los materiales utilizados como pantalla. Fuente: (IBER02)

Así, a modo de ejemplo, si el usuario introdujese los siguientes datos:

- Corriente de cortocircuito monofásico (kA): 15
- Duración del cortocircuito monofásico (s): 1
- Material de la pantalla: Cobre
- Tipo de pantalla: Hilos
- Sección del hilo: 5 mm²

⁵ Los valores de resistividad y los coeficientes de temperatura corresponden a los indicados en la Tabla 1 de la norma UNE 21144-1-1:2012

Las características que vería el usuario serían:

Características de la pantalla escogida:

K:	226
β:	234,5
Sección necesaria calculada:	104,83 mm^2
Coefficiente T^{α} α_{20}:	0,00393 K^{-1}
Resistividad ρ_{20}:	1,724E-08 $\Omega \cdot m$
Nº de hilos (si aplica):	21
Resistencia R_s (a T^{α} máxima):	0,0002094 Ω/m

Imagen 12. Captura de pantalla de la herramienta. Visualización de características y datos asociados a la pantalla.

De este modo, el usuario podrá observar de manera inmediata cómo varían la sección necesaria y la resistencia de la pantalla en función de los datos que introduzca.

6.5 Selección de cubierta

La función de la cubierta exterior es mayoritariamente mecánica, pues es un elemento no metálico que protege al cable del medio exterior, ya sean agentes químicos, atmosféricos, biológicos, abrasivos y, principalmente, la corrosión.

Actualmente, la mayoría de los cables aislados utilizan como cubierta una capa externa de polietileno termoplástico de alta densidad, ya que posee una excelente resistencia frente a la abrasión, proporciona una buena protección mecánica y evita que la humedad penetre en el interior del cable.

En la herramienta se le dará a elegir al usuario en un menú desplegable entre polietileno (PE), cloruro de polivinilo (PVC) y policloropreno.

El policloropreno se asemeja a la goma de caucho que se utilizaba a finales del siglo XIX pero resiste mejor a los aceites, a las altas temperaturas y es más flexible. El cloruro de polivinilo, por su parte, resiste un amplio rango de temperaturas y suele tener una larga vida útil y gran estabilidad (ELAN__).

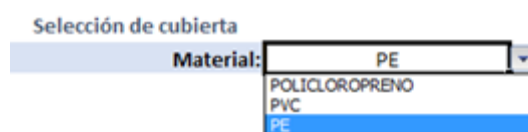


Imagen 13. Captura de pantalla de la herramienta. Selección de cubierta.

A la hora de dimensionar el cable, la cubierta ha de tener un grosor adecuado para que permita una correcta evacuación del calor que se genera por pérdidas. Es por ello que interesa que la cubierta tenga una baja resistividad térmica. En la siguiente tabla se muestran las resistividades de los materiales que se dan a escoger en la herramienta:

	Resistividad térmica ρ ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)
Policloropreno	5,5
Cloruro de polivinilo (PVC)	6
Polietileno (PE)	3,5

Tabla 6. Resistividad térmica de los materiales empleados como cubierta. Fuente: (SIMO11)

6.6 Datos de la instalación

La introducción del tipo de instalación que se va a realizar es fundamental para el dimensionamiento correcto de cable, ya que determina las condiciones en las que normalmente va a funcionar. Cualquier variación en parámetros como la profundidad, la disposición de los cables o la puesta a tierra de las pantallas, puede afectar a la sección que se calcule.

6.6.1 Profundidad de la instalación

El primer dato que ha de introducir el usuario es la profundidad de la instalación en milímetros: la distancia vertical desde la superficie hasta el centro de la disposición de cables. (Figura 6) La profundidad mínima se ha establecido en 800 mm, aunque para muy alta tensión sería recomendable un mínimo de 1000 mm.

6.6.2 Disposición de las fases

Como el modelo está programado para sistemas trifásicos, la línea subterránea tendrá tres cables unipolares. Existen dos tipos de disposición de las fases: en capa y en tresbolillo.

Ambas disposiciones pueden realizarse con los cables (o tubos) en contacto o separados; en ambos casos el usuario deberá indicar en la herramienta la distancia s de separación de los centros de dos cables contiguos en veces el diámetro exterior del cable (ya que el usuario desconoce de inicio este parámetro).

El principal inconveniente de la disposición en capa es que requiere de una mayor servidumbre, lo que implica un mayor movimiento de tierras y, en el caso en el que se requiera, más hormigón por unidad de longitud que la disposición tresbolillo. La disposición tresbolillo, por su parte, presenta un sistema más equilibrado, ya que cada cable recibe las mismas influencias en la misma medida; sin embargo, la evacuación individual de calor es peor que en la disposición en capa. Debido al método empleado por la UNE 21144-1-1, la disposición tresbolillo deberá tener los cables en contacto.

Dependiendo del sistema de puesta a tierra, será mejor una disposición que otra. Actualmente, se han desarrollado métodos que, teniendo en cuenta los armónicos de las corrientes, permiten determinar la configuración óptima de los cables (ZARC14).

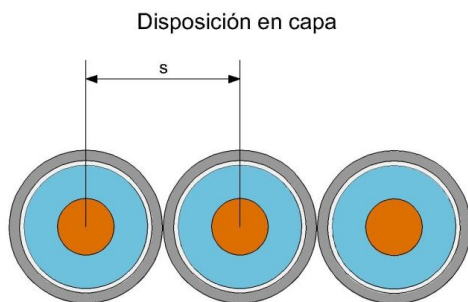


Figura 5. Representación de tres cables en capa.

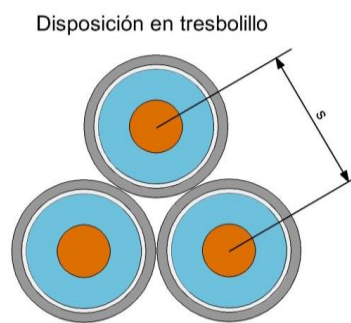


Figura 4. Representación de tres cables en tresbolillo.

6.6.3 Modos de instalación

La herramienta ha sido diseñada para dimensionar cables aislados que vayan a funcionar directamente enterrados en el terreno, enterrados bajo tubo en el terreno o enterrados bajo tubo en bloque de hormigón. El usuario deberá elegir de entre estas opciones en un menú desplegable.

6.6.3.1 Cables directamente enterrados en el terreno

Este tipo de instalación requiere tener abierta la zanja durante todo el recorrido entre cámaras de empalme para poder realizar el tendido de los cables, por lo que sólo resulta adecuado para zonas de poco tránsito (montes, terreno sin cultivar, etc.). Su aplicación en zonas urbanas resulta difícil puesto que se requiere gran rapidez de ejecución para minimizar molestias y posibles accidentes debido a la zanja. La obra civil no es independiente del tendido de la línea.

Conforme aumenta la profundidad de la instalación, las condiciones para disipar calor empeoran. No obstante, a mayor profundidad, más constantes son las características del terreno, por lo que, a lo largo del tiempo, el cable utilizado puede tener una mayor garantía de funcionamiento, puesto que sus condiciones de trabajo serán más constantes. Se ha de alcanzar, por tanto, un equilibrio entre estos conceptos. (DIEZ__)

El ITC-LAT-06 establece que para instalaciones no superiores a 30kV las profundidades no han de ser menores de 0,6m en acera ni de 0,8m en calzada. Dado que el rango de tensiones de aplicación del modelo programado es desde 30kV hasta 500kV, se establece que la profundidad mínima que puede introducir el usuario sea de 0,8m. Habitualmente la profundidad de este tipo de instalaciones está entre 1,4 y 1,6 metros, aunque pueden requerirse profundidades mayores si se prevé que haya excavaciones en la zona por otras causas o servicios.

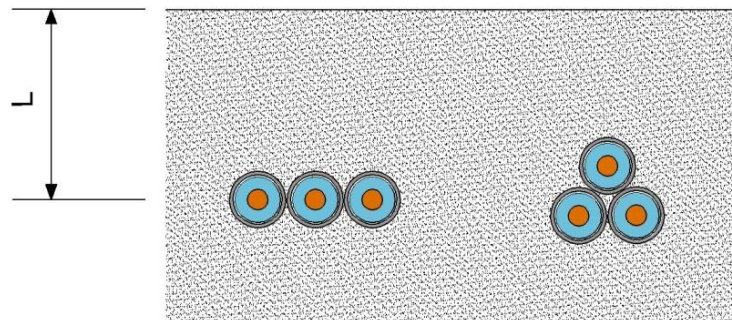


Figura 6. Instalación directamente enterrada en el terreno. Disposiciones capa (izquierda) y tresbolillo (derecha) representadas.

6.6.3.2 Cables enterrados bajo tubo en el terreno

La principal ventaja que proporciona este tipo de instalación respecto a la anterior es que, una vez dispuestos los tubos que van a contener a los cables, se puede volver a rellenar varios tramos de la zanja y después realizar el tendido (obra civil y tendido independientes). Además, los tubos proporcionan una protección mecánica adicional frente a las posibles excavaciones que se realicen en la zona, permitiendo disminuir ligeramente la profundidad de la instalación (sin superar los límites establecidos en el ITC-LAT-06)

6.6.3.3 Cables enterrados bajo tubo en bloque de hormigón

Este tipo de instalación se ha convertido en la más común porque proporciona protección mecánica a los cables en cualquier tipo de terreno. Al igual que en el caso anterior, la obra civil está desligada de los trabajos de tendido de la línea.

El bloque de hormigón aporta un entorno estable y homogéneo frente a las características del terreno que lo rodea; mejora la resistividad e impide el rápido desecamiento del terreno, lo que permite un mejor comportamiento del cable ante sobrecargas de larga duración y un envejecimiento más lento del mismo.

6.6.4 Datos del tubo

En el caso de que la instalación lo requiera, el usuario deberá introducir los datos del tubo que se vaya a utilizar.

La tabla 4 de la norma UNE 21144-2-1:1997 da los valores de las constantes necesarias para el cálculo térmico para los casos de tubos metálicos, tubos de fibra, tubos de amianto-cemento, tubos de material plástico⁶ y tubos de material cerámico. De entre estos materiales, el usuario podrá escoger en la herramienta entre fibra, cerámico, PVC (plástico) y PE (plástico). Se excluyen, por tanto, los tubos metálicos por acarrear pérdidas de potencia adicionales y los tubos de amianto-cemento por la prohibición del amianto en España en 2001⁷ debido a su efecto perjudicial para la salud de las personas.

Tras la elección del material, es necesario establecer la relación entre el diámetro interior del tubo y el diámetro exterior del cable, ya que de inicio no se conoce la dimensión del cable. El ITC-LAT-06 establece que $D_{interior\ tubo} \geq 1,5 D_{exterior\ cable}$, aunque en algunos casos, como en los tubos de PE, es recomendable que esta relación no sea inferior a 1,7. Si el usuario no sabe qué relación poner, puede seleccionar el valor por defecto, programado en 1,5.

El siguiente dato a introducir es el espesor del tubo en milímetros. En este caso no se establece un espesor mínimo, pero es recomendable que el tubo cumpla la norma UNE-EN-61386 de Sistemas de tubos para la conducción de cables (BLOG14). Se sugiere que inicialmente se introduzca un espesor no inferior a 5 mm, que es el valor programado por defecto en el caso en el usuario no sepa qué espesor poner.

Para un mejor dimensionamiento del cable, de manera que se aproxime lo más fielmente a la realidad de la instalación, se recomienda que el usuario realice un proceso iterativo para seleccionar el tubo (de entre los catálogos de fabricantes de los que disponga); esto es, introducir inicialmente una relación $D_{interior\ tubo} / D_{exterior\ cable}$ de 1,5 y un espesor de unos 7 mm, obtener la dimensión del cable que se necesitaría en estas condiciones y, a partir de este dato, seleccionar un tubo que se le adecúe, volviendo a realizar el cálculo con los datos del nuevo tubo seleccionado.

⁶ En este caso, los valores son proporcionados en una segunda modificación posterior del 2007, la norma UNE 21144-2-1:1997/2M:2007

⁷ BOE-A-2001-23636

Otro dato necesario para realizar el cálculo térmico del cable es la temperatura media que se estima que tendrá el aire contenido entre cable y tubo, que se introducirá en °C.

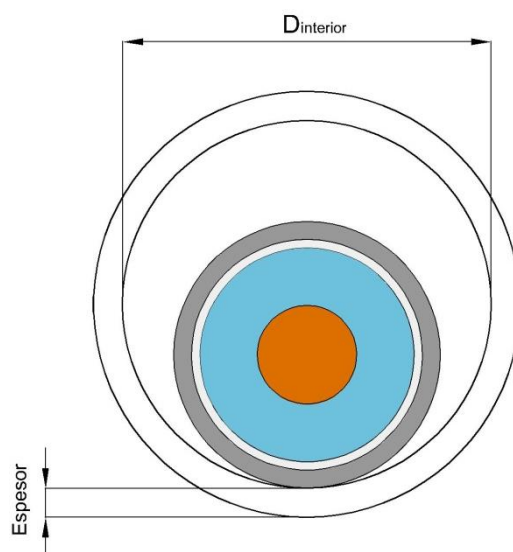


Figura 7. Representación de un cable aislado bajo tubo.

Finalmente, queda por introducir la separación entre tubos, dada en veces el diámetro exterior del tubo. En este punto el usuario ha de tener la precaución de introducir un valor que esté acorde con la separación de los cables, a fin de obtener resultados más adecuados.

6.6.5 Parámetros para instalaciones en bloque de hormigón

En el caso de que el usuario escoja “Bajo tubo en bloque de hormigón” como modo de instalación, deberá introducir algunos datos adicionales que son necesarios para dimensionar el cable aislado de este tipo de instalación.

En primer lugar, se da la opción de introducir la resistividad térmica del material que constituirá el bloque, que en la mayoría de las ocasiones será hormigón. La resistividad térmica del hormigón según la norma UNE 21144-2-1 es de $1 \text{ K}\cdot\text{m}/\text{W}$ (valor introducido en caso de seleccionar la opción “Por defecto”); pero se da la opción de introducir un valor diferente en caso de que el usuario conozca la resistividad del tipo de hormigón que va a utilizar y difiera del establecido.

Los siguientes datos que introducir son los relacionados con las dimensiones del bloque y su profundidad:

- Profundidad de colocación del centro del bloque de conductos (L_G) [mm]
- x menor dimensión del bloque [mm]
- y mayor dimensión del bloque [mm]

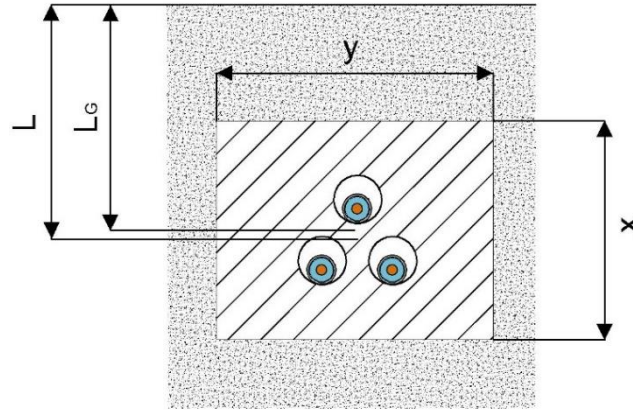


Figura 8. Representación de una instalación de cables bajo tubo en bloque de hormigón.

6.6.6 Características del terreno

Las características del terreno son fundamentales para determinar la resistencia térmica del medio que rodea a la instalación y así poder resolver el problema de transferencia de calor del cable. Los dos parámetros a introducir son:

- Tipo de terreno: Se elegirá en un menú desplegable entre los tipos de terreno recogidos en la tabla 9 del ITC-LAT-06. A continuación, se muestra la tabla que recoge la resistividad térmica del terreno según su tipología:

Resistividad térmica del terreno (K·m/W)	Naturaleza del terreno y grado de humedad
0,40	Inundado
0,50	Muy húmedo
0,70	Húmedo
0,85	Poco húmedo
1,00	Seco
1,20	Arcilloso muy seco
1,50	Arenoso muy seco
2,00	De piedra arenisca
2,50	De piedra caliza
3,00	De piedra granítica

Tabla 7. Resistividad térmica del terreno según la naturaleza y el grado de humedad del terreno. (Tabla 9 del ITC-LAT-06)

No obstante, siempre es recomendable que, si se tiene la oportunidad y los medios, se mida resistividad térmica del terreno *in situ*, y no mediante medidas en laboratorio o el uso de valores típicos. Si se cree que, cuando el cable esté en servicio, se producirá un desecamiento notable del terreno (aumento de su resistividad térmica), el ingeniero proyectista debería de introducir una resistividad térmica superior a la real inicialmente; de lo contrario, el desecamiento del terreno producirá un aumento de la temperatura del cable

(*thermal runaway*)(METW13), pudiendo superar su temperatura máxima de servicio y provocando una pérdida de hasta el 13% de la capacidad de transporte (GOUD11).

A este fenómeno de desecamiento del terreno o formación de zonas secas se le conoce como Inestabilidad térmica (*thermal instability*).

- Temperatura del terreno en °C: Conviene que esta temperatura sea lo más próxima posible a la temperatura del terreno a la profundidad de la instalación.

6.6.7 Tipo de puesta a tierra de las pantallas

Las pantallas son circuitos metálicos inmersos en los campos magnéticos de los conductores. Dependiendo del modo de conexión de las pantallas, podrán constituir un circuito abierto en el que sólo se induce tensión o un circuito cerrado en el que se induce una corriente.

La forma de conexión ha de tener un funcionamiento aceptable en base a los siguientes criterios (SIMO11):

- Eliminación o reducción de las corrientes de circulación producidas por el acoplamiento inductivo con la corriente circulante por el conductor central del cable en régimen permanente, a fin de reducir las pérdidas de potencia activa.
- Reducir las tensiones inducidas entre pantalla y tierra, tanto en régimen permanente como en cortocircuito. Una sobretensión inducida durante un cortocircuito puede llegar a perforar el aislamiento de la cubierta o producir descargas en los empalmes y cajas de conexiones.

En la actualidad se utilizan distintos tipos de puesta a tierra de las pantallas que permiten una buena actuación según los criterios anteriores.

- Solid Bonding (SB) o puesta a tierra en ambos extremos del cable.
- Sistema de puesta a tierra con transposición de cables (Capa, SB)
- Single-Point (SP) o puesta a tierra en un solo punto.
- Cross Bonding (CB) o puesta a tierra con transposición de pantallas.

Aunque existen más tipos de puesta a tierra, los anteriores son los principales y serán las opciones entre las que tendrá que elegir el usuario.

6.6.7.1 *Solid Bonding (SB) o puesta a tierra en ambos extremos del cable.*

Este tipo de puesta a tierra suele ser empleado en líneas de media tensión y de corta longitud. Las pérdidas de potencia activa en las pantallas pueden llegar a reducir la corriente nominal de la línea entre un 10 y un 25% en media tensión y hasta un 50% en muy alta tensión, lo que conlleva una menor ampacidad para una misma sección de conductor cuando se compara con otras puestas a tierra. Por este motivo se suele recurrir a otro tipo de puesta a tierra cuando la corriente que va a circular por el cable es superior a 500 A (SIMO11).

La instalación se recomienda que sea en disposición tresbolillo, con los cables lo más próximos entre sí, ya que de este modo se reduce la tensión inducida en la pantalla y, por consiguiente, la corriente de circulación.

Para no provocar la rotura de la cubierta por sobretensión, es conveniente conectar las pantallas entre sí y a tierra en los puntos de empalme de los cables.

Como consecuencia de esta conexión, la tensión entre pantalla y tierra es muy próxima a cero en régimen permanente y la tensión de contacto en los extremos de las pantallas es nula en caso de que se dispongan los cables en tresbolillo y muy pequeña en caso de que la disposición escogida sea capa (SIMO11).

En caso de defecto desequilibrado fuera del cable, la circulación de corriente por las pantallas reduce la tensión que se induce a lo largo de éstas por el acoplamiento conductor-pantalla.

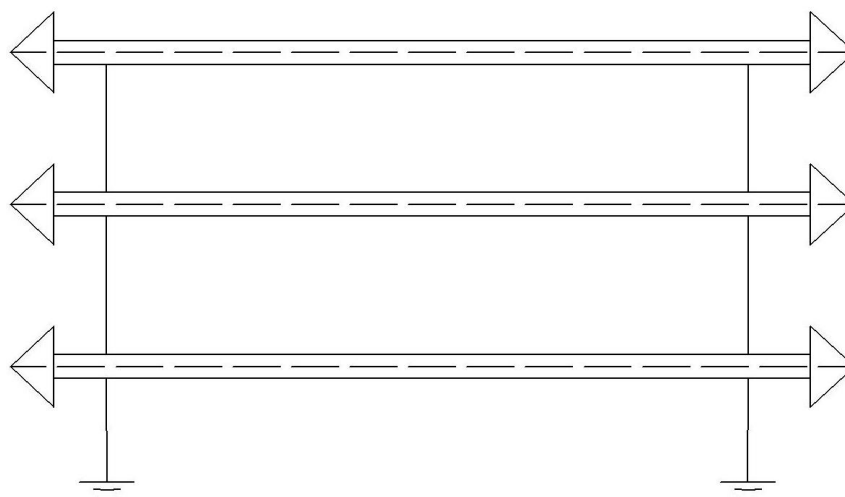


Figura 9. Esquema de conexión de puesta a tierra de las pantallas en ambos extremos del cable (Solid Bonding).

Basado en esquema encontrado en (SIMO11)

6.6.7.2 Sistema de puesta a tierra con transposición de cables (Capa, SB)

Este tipo de puesta a tierra es similar al anterior, ya que consiste en transponer los cables cuando éstos están en capa y con puesta a tierra de las pantallas en ambos extremos. Lo que se persigue conseguir con este sistema es reducir considerablemente las pérdidas y la tensión de contacto en los extremos.

6.6.7.3 *Single-Point (SP) o puesta a tierra en un solo punto.*

El SP se suele aplicar para líneas de corta o media longitud (500-600 metros) de tensión nominal igual o superior a 45kV. Es frecuente observar este tipo de puesta a tierra en los tramos extremos de una línea de gran longitud que utilice Cross-Bonding (siguiente tipo de puesta a tierra) (SIMO11).

Con este sistema de puesta a tierra, las pérdidas que se producen en las pantallas son debidas a las corrientes de Foucault, ya que no hay corrientes de circulación.

En caso de cortocircuito, las tensiones inducidas en las pantallas son elevadas, por lo que se ha de disponer de un conductor equipotencial (ecc) en paralelo con la línea que esté conectado a tierra en sus extremos y sea capaz de soportar la corriente de falta a tierra prevista. Para evitar pérdidas adicionales de potencia, este ecc debe transponerse a lo largo del recorrido o bien estar situado en el centro de una disposición en tresbolillo, recomendándose esta última opción por ser más sencilla y por reducir la tensión que se induce en la pantalla en caso de falta monofásica (SIMO11).

A la hora de diseñar líneas con este tipo de puesta a tierra, el ingeniero proyectista deberá de tener en cuenta el valor de la tensión de contacto aplicada en las pantallas para garantizar la seguridad de las personas, evitando que sean accesibles cuando esta tensión supere los 50 V.

Se recomienda también proteger la cubierta de los cables con descargadores (LTP) en los extremos de las pantallas que no se han conectado a tierra, para evitar las elevadas tensiones que pueden darse en régimen transitorio (SIMO11).

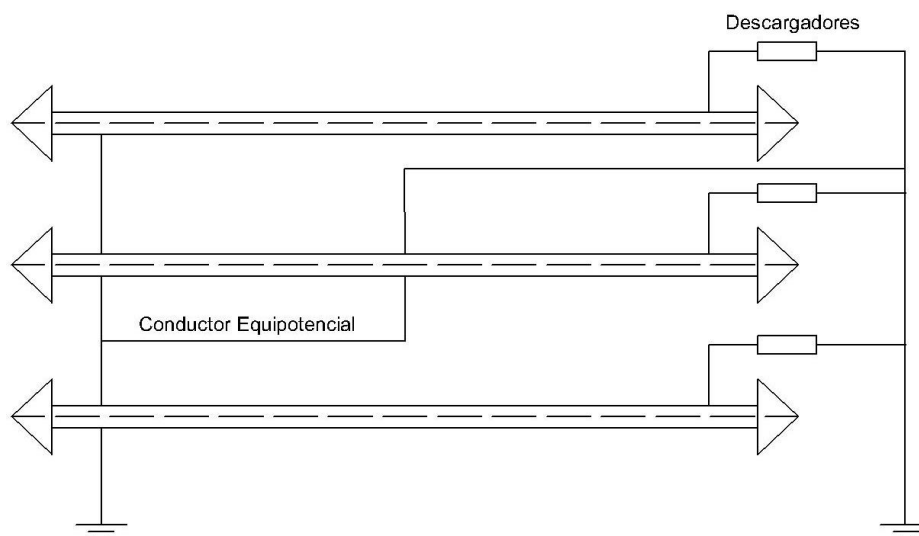


Figura 10. Esquema de conexión de puesta a tierra de las pantallas en un solo punto (Single-Point). Basado en esquema encontrado en (SIMO11)

6.6.7.4 *Cross Bonding (CB) o puesta a tierra con transposición de pantallas.*

El CB se suele aplicar para líneas de gran longitud de tensión nominal igual o superior a 45kV. Este sistema consiste en transponer sólo las pantallas a lo largo del recorrido, dejando el conductor en la misma posición. Puesto que la configuración de la línea es trifásica, el número de tramos ha de ser múltiplo de tres y, a poder ser, de la misma longitud, del orden de 500 o 600 metros. El final de cada tramo donde se produce la transposición de las pantallas se hace coincidir con los empalmes de los cables y se deben instalar limitadores de tensión de pantalla (LTP) para controlar las sobretensiones (SIMO11).

En el caso de que, debido a la gran longitud de la línea, sea difícil conseguir un número de tramos múltiplo de tres, se combina este sistema con uno o dos tramos finales en SP, como se mencionó en el apartado anterior.

Si la disposición escogida es tresbolillo, en régimen permanente la tensión inducida es nula, por lo que no hay corrientes de circulación por las pantallas, no siendo así en la disposición en capa, donde son muy pequeñas con comparación con otras puestas a tierra.

Respecto al sistema en SP, el sistema en CB presenta una tensión máxima pantalla-tierra tres veces inferior para una misma longitud y, en caso de cortocircuito, tensiones inducidas mucho menores (SIMO11).

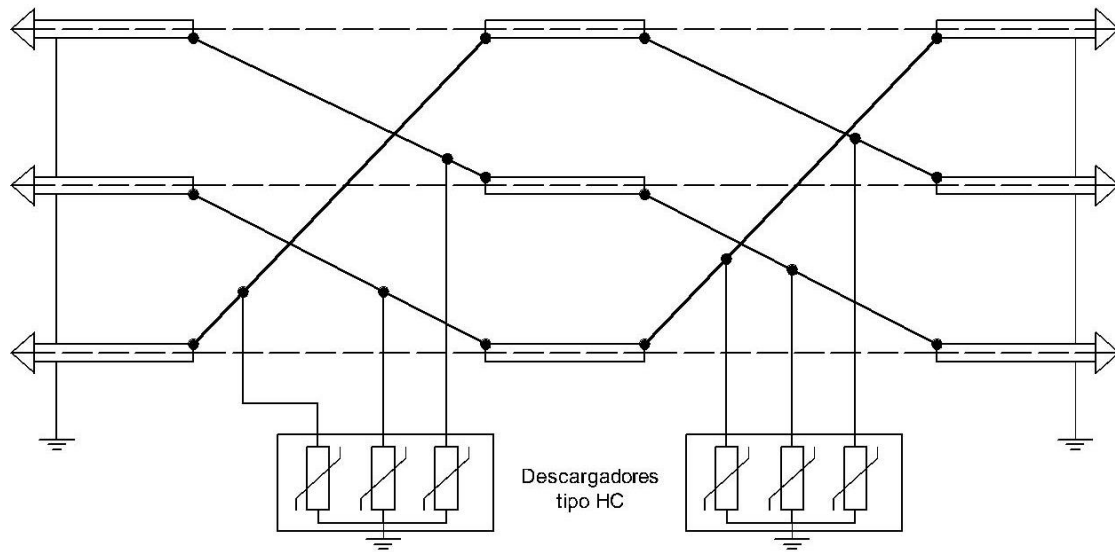


Figura 11. Esquema de conexión de puesta a tierra con transposición de pantallas (Cross Bonding). Basado en esquema encontrado en (SIMO11)

7 Método de resolución

El dimensionamiento del cable aislado se realiza mediante la optimización del diámetro del conductor para que cumpla unas determinadas condiciones (restricciones), tales como el campo eléctrico en el aislamiento, la intensidad máxima admisible y la sección transversal de la pantalla. La función objetivo será por tanto la minimización del diámetro del conductor.

En primer lugar, se hallan las expresiones de las pérdidas de potencia activa de cada parte del cable por unidad de longitud, en función de las incógnitas dimensionales, que son el diámetro del conductor, el espesor de la cubierta y la relación entre el diámetro de la pantalla y el diámetro del aislamiento. Para estas expresiones, se tomará como referencia la norma UNE 21144-1-1:2012.

Posteriormente, se hallan las expresiones de las resistencias térmicas de las partes no metálicas del cable (se considerará que las partes metálicas no oponen resistencia al flujo de calor), también en función de las incógnitas dimensionales. Para hallar estas expresiones, se sigue la norma UNE 21144-2-1:1997 y sus modificaciones posteriores.

En función de las resistencias térmicas y de las pérdidas de potencia activa de cada parte del cable, se obtiene una expresión para la intensidad máxima admisible del cable mediante la resolución del problema de transferencia de calor.

También se obtienen las expresiones que representan el campo eléctrico máximo sobre el aislamiento y el área de la sección transversal de la pantalla en función de las incógnitas dimensionales.

Planteamiento simplificado del problema de optimización:

Incógnitas dimensionales: d_c , $\frac{D_{ext.pant.}}{d_{ais}}$, *Espesor Cubierta*

Parámetros: *Los introducidos como parámetros de entrada y las distintas constantes de cálculo.*

F. O: $Min d_c$

Sujeto a:

$$I_{\text{máx admisible}} = I_{\text{máx esperada}}$$

$$\text{Campo eléctrico máximo} \leq \text{Rigidez dieléctrica aislamiento}$$

$$\text{Área de pantalla obtenida} = \text{Área de pantalla teórica}$$

$$\frac{D_{\text{ext.pant.}}}{d_{\text{ais}}} \geq 1 \quad \text{y} \quad \frac{D_{\text{ext.pant.}}}{d_{\text{ais}}} \leq 3$$

$$d_c \leq 62 \text{ mm} \quad \text{y} \quad d_c \geq 0,3 \text{ mm}$$

$$\text{Espesor cubierta} \geq 2 \text{ mm} \quad \text{y} \quad \text{Espesor cubierta} \leq 6,5 \text{ mm}$$

$$t_s \geq 0,4 \text{ mm}$$

La resolución de este problema de optimización se llevará a cabo mediante la macro Solver de Microsoft® Excel, utilizando el método de resolución GRG Nonlinear.

8 Cálculos

8.1 Cálculo de características generales de la línea

A continuación, se detallan las operaciones de cálculo de las características generales de la línea que se muestran en la parte derecha de hoja de introducción de datos, con el objetivo de facilitar al usuario la toma de algunas decisiones respecto a la línea subterránea. Algunos de los valores obtenidos serán utilizados posteriormente en otras operaciones.

8.1.1 Cálculo de la tensión máxima de servicio

La tabla 1 del ITC-LAT-06 dice cuáles son las tensiones más elevadas que la red puede alcanzar para cada tensión nominal normalizada. Un extracto de esa tabla (para tensiones superiores o iguales a 30kV, que es el ámbito de aplicación del modelo) se muestra a continuación:

TENSIÓN NOMINAL DE LA RED (U_n) kV	TENSIÓN MÁS ELEVADA DE LA RED (U_s) kV
30	36
45	52
66	72,5
110	123
132	145
150	170
220	245
400	420

Tabla 8. Tensión más elevada de la red para cada tensión nominal en España. (Tabla 1 del ITC-LAT-06)

Esta tabla es la que se tomará como referencia para establecer la tensión más elevada de la red. En el caso de que el usuario introduzca un valor de tensión nominal que no aparezca en la tabla, se aplicará la siguiente fórmula:

$$U_s = 1,15 \cdot U_n \quad [kV]$$

Conocer el valor de la tensión máxima de servicio permite dimensionar mejor el cable aislado, ya que hay que considerar que el campo eléctrico máximo que pueda aparecer (que es cuando la tensión es máxima) sea menor que la rigidez dieléctrica del aislamiento, para que no surjan arborescencias y pueda producirse el fallo completo del cable.

8.1.2 Estimación de la capacidad del cable.

Como se verá más adelante en el cálculo de las pérdidas dieléctricas, el conjunto formado por el conductor-aislamiento-pantalla forman un condensador no ideal, ya que son dos conductores (conductor y pantalla), separados por un dieléctrico (aislamiento), en el que el campo eléctrico originado por el conductor central va a parar a la pantalla.

Para hallar la capacidad de este condensador es necesario conocer de antemano el diámetro del conductor central y el diámetro exterior del aislamiento, o bien la relación entre ambos. Como las dimensiones del cable son una incógnita, se realizará una estimación de la capacidad en base a los cables que ofertan fabricantes en sus catálogos.

Como catálogo modelo se ha cogido el de General Cable (GENE__). Se seleccionaron las características de los cables desde 123kV hasta 550 kV y se representó en una gráfica la capacidad ($\mu\text{F}/\text{km}$) frente a la potencia aparente:

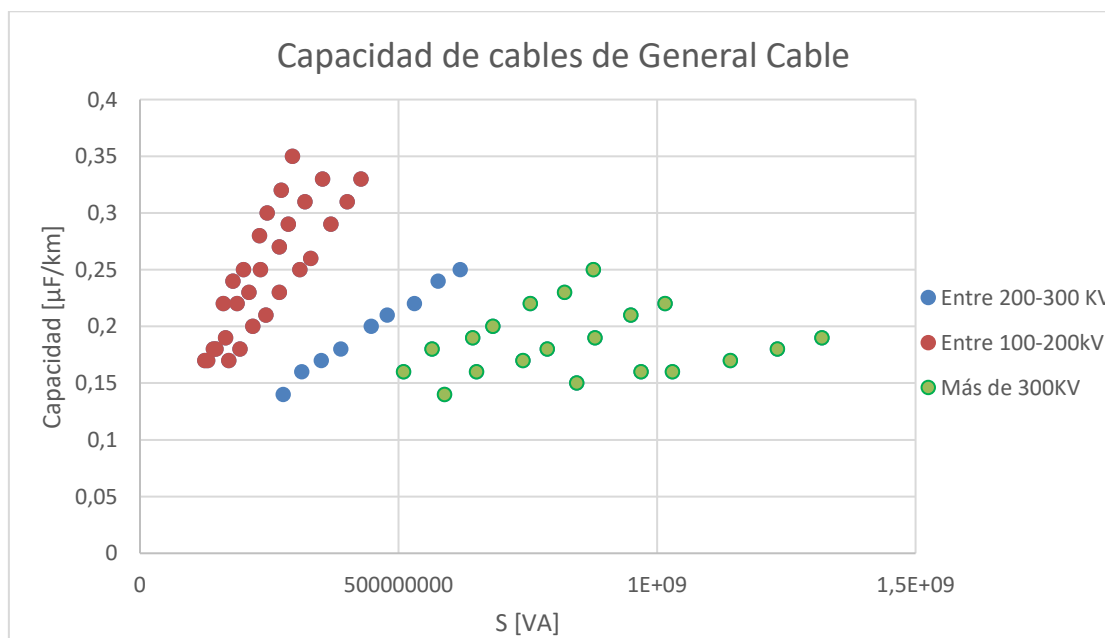


Gráfico 3. Capacidad de los cables de General Cable en función de su potencia aparente y su tensión. Fuente de los datos: (GENE__)

Se observan claramente tres rangos de tensiones distintos, por lo que para realizar una aproximación de la capacidad según la tensión nominal se realizó la media aritmética de la capacidad de cada rango de tensiones, obteniéndose:

		Capacidad media ($\mu\text{F}/\text{km}$)
U_n	$\leq 100\text{kV} *$	0,3
	(100-200] kV	0,25
	(200-300) kV	0,20
	$\geq 300\text{ kV}$	0,19

Tabla 9. Capacidad media para los cuatro rangos de tensiones establecidos

*Para menos de 100 kV se aplicó directamente 0,3 $\mu\text{F}/\text{km}$, estimación aceptable para este intervalo de tensión.

8.1.3 Cálculo de la longitud crítica de la línea

La longitud crítica de la línea se halla igualando la corriente capacitiva de la línea a la intensidad máxima admisible de dicha línea. En esta situación, toda la corriente admisible se emplearía en alimentar la capacidad del cable.

$$I_z = I_c \Rightarrow I_c = \frac{U_n \cdot \omega \cdot C \cdot L_c}{\sqrt{3} \cdot 10^3} \Rightarrow L_c = \frac{I_z}{\omega \cdot C} \cdot \frac{\sqrt{3}}{U_n} \cdot 10^3 \quad [km]$$

8.1.4 Cálculo de la relación entre el diámetro exterior del aislamiento y el diámetro del conductor

La relación entre el diámetro exterior del aislamiento y el diámetro del conductor es un valor que se puede hallar a partir de la capacidad estimada del cable. El conocer esta relación aligera la carga de cálculo de la herramienta, pues interviene de manera directa en la resistencia térmica del aislamiento y en el campo eléctrico máximo sobre éste.

$$C \cdot 10^{-9} = \frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{\ln \frac{d_{ais}}{d_c}} \Rightarrow \frac{d_{ais}}{d_c} = e^{\frac{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_r \cdot \epsilon_0}{C \cdot 10^{-9}}}$$

Donde:

ϵ_0 es la permitividad en el vacío = $8,853 \cdot 10^{-12}$ [F/m]

ϵ_r es la permitividad relativa del aislamiento

Para cada una de las capacidades definidas en la Tabla 9, la relación d_{ais}/d_c sería la siguiente para cada tipo de aislamiento:

	Capacidad (F/m)	d_{ais}/d_c
XLPE	3E-10	1,532
	2,5E-10	1,668
	2E-10	1,896
	1,9E-10	1,961
PE	3E-10	1,532
	2,5E-10	1,668
	2E-10	1,896
	1,9E-10	1,961

Tabla 10. Relación entre el diámetro exterior del aislamiento y el diámetro de conductor según el material empleado y la capacidad

8.1.5 Dimensionamiento de la pantalla

Se considera que un cortocircuito es una sobrecarga de corta duración, inferior a 5 segundos, seguida de una desconexión permanente.

Teniendo esto en cuenta, los periodos de carga son tan cortos en comparación con los de enfriamiento que se puede suponer el calentamiento del cable como un proceso adiabático, es decir, despreciando la disipación de calor al exterior durante la sobrecarga. Se supondrá también que desde el primer instante la temperatura del cable aislado es la temperatura de cortocircuito.

Con estas hipótesis, que son las más desfavorables, se calculará la intensidad de cortocircuito adiabática, inferior a la que realmente el cable será capaz de soportar.

La norma UNE 21192-92 (CEI 949) detalla el método de cálculo que se ha de seguir.

8.1.5.1 Cálculo de la sección transversal de la pantalla

La intensidad de cortocircuito adiabática se calcula mediante la expresión:

$$I_{ca} = \frac{K \cdot A}{\sqrt{t_i}} \cdot \sqrt{\ln \frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i}} \cdot 10^{-3} \quad [kA]$$

A continuación, se despeja la sección transversal de la pantalla:

$$A = \frac{I_{ca}}{\frac{K}{\sqrt{t_i}} \cdot \sqrt{\ln \frac{\beta + \theta_f}{\beta + \theta_i}} \cdot 10^{-3}} \quad [mm^2]$$

Donde:

A es la sección de la pantalla [mm^2]

K es un factor ya calculado según el material empleado (Tabla 5 de selección de pantalla)

β es un factor ya calculado según el material empleado (Tabla 5 de selección de pantalla)

Por tanto, si se conoce la potencia de cortocircuito de la red en el punto de conexión y la duración de dicho cortocircuito, se puede obtener la sección de la pantalla que se necesita.

En la práctica, se recomiendan tiempos de cortocircuito inferiores a 1 segundo, ya que, si no, se pueden dar secciones totales del cable excesivas. A continuación, se muestra cómo varía la sección de una pantalla de aluminio en función del tiempo para distintos valores de corriente de cortocircuito (aislamiento XLPE):

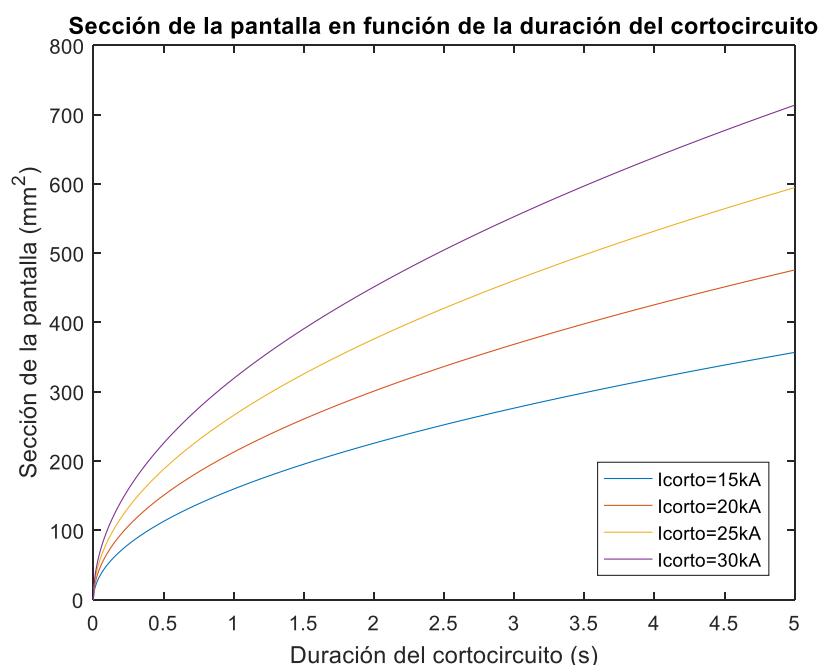


Gráfico 4. Variación de la sección de la pantalla (Aluminio) en función de la duración del cortocircuito para distintas intensidades de cortocircuito.

Se observa cómo a medida que aumenta la corriente de cortocircuito y el tiempo de cortocircuito, la sección transversal de pantalla necesaria aumenta considerablemente, principalmente en el primer segundo. Por esta razón, algunos fabricantes, como TFKable, dan como dato en sus catálogos la corriente de cortocircuito admisible para 1 segundo de duración.

8.1.5.2 Cálculo de la resistencia óhmica de la pantalla

A pesar de que la pantalla es un conductor activo de distintas corrientes, no es un conductor perfecto y presenta una cierta resistencia al paso de la corriente. Resulta obvio que esta resistencia será distinta según el material empleado, pero también varía según el tipo de pantalla (cinta o hilos) escogido. A continuación, se detalla el cálculo de esta resistencia para ambos tipos de pantalla.

Pantalla tipo cinta

En este caso la sección transversal de la pantalla constituye un único conductor, por lo que la fórmula a aplicar será la de la resistencia de un material en CC ⁸:

$$R_{pantalla} = [1 + \alpha \cdot (\theta_i - 20)] \cdot \frac{\rho}{A} \quad [\Omega/m]$$

Donde:

A es la sección transversal calculada de la pantalla [m²]

θ_i es la temperatura máxima de servicio [°C]

Aunque la norma UNE 21144-1-1:2012 propone que la θ_i ha de calcularse para la pantalla, se tomará la temperatura máxima de servicio del aislamiento, puesto que la diferencia es mínima y permite reducir la carga computacional del programa.

Pantalla de hilos

En el caso de la pantalla en hilos, la sección transversal de la pantalla es la suma de las secciones de todos los hilos que lo forman. Por tanto, en primer lugar, hay que saber el número de hilos que van a conformar la pantalla, y que ha de ser el número entero superior al número decimal que se obtenga:

⁸ Los efectos pelicular y proximidad se desprecian ya que la pantalla constituye un conductor en corona circular.

$$n_{hilos} \geq \frac{A_{Total\ Pantalla}}{A_{Hilo}} \quad \text{con } n_{hilos} \in \mathbb{Z}^+$$

La resistencia óhmica de cada hilo se obtiene aplicando la misma fórmula que para la pantalla tipo cinta, pero para cada hilo:

$$R_{hilo} = [1 + \alpha \cdot (\theta_i - 20)] \cdot \frac{\rho}{A_{Hilo}} \quad [\Omega/m]$$

Una vez hallada la resistencia eléctrica de cada hilo, la resistencia total de la pantalla se calcula tomando que los hilos se encuentran eléctricamente en paralelo:

$$R_{Pantalla} = \frac{1}{\frac{n_{hilos}}{R_{hilo}}} = \frac{R_{hilo}}{n_{hilos}} \quad [\Omega/m]$$

La resistencia eléctrica de una pantalla de hilos será siempre menor o igual que la resistencia de una pantalla de cinta.

8.2 Cálculo de pérdidas

8.2.1 Cálculo de pérdidas en el conductor

Para el cálculo de las pérdidas de potencia activa que se producen en el conductor es necesario hallar, en primer lugar, la oposición que presenta el material a la circulación de corriente eléctrica, lo que se conoce como la resistencia del conductor.

Hay que tener en cuenta que la resistencia de un conductor en CA (corriente alterna) es siempre mayor que la del mismo en CC (corriente continua) y que aumenta a medida que la temperatura del conductor se eleva, lo que se traduce en mayor pérdida de energía por efecto Joule.

Para el cálculo de la resistencia eléctrica por unidad de longitud del conductor en CA y a la temperatura normal de operación (temperatura de servicio) se siguen los pasos siguientes:

Resistencia del conductor por unidad de longitud en CC y a 20°C (R_{20cc}).

$$R_{20cc} = \frac{\rho}{A} \quad [\Omega/m]$$

Donde:

A es la sección efectiva [m²]

Resistencia del conductor por unidad de longitud en CC y a la temperatura normal de operación (R_{tcc})

$$R_{tcc} = [1 + \alpha \cdot (\theta_i - 20)] \cdot R_{20cc} \quad [\Omega/m]$$

Se puede apreciar como la influencia de la temperatura es considerable. Tomando como ejemplo un conductor de cobre ($\alpha=0,00393$) con una temperatura de servicio de 90°C (temperatura habitual para cables aislados), el incremento de la resistencia eléctrica por unidad de longitud sería de 1,275 veces.

Resistencia del conductor por unidad de longitud en CA y a la temperatura de servicio t (R_{tca})

Como se vio anteriormente en el apartado de selección del conductor, cuando por un conductor circula una corriente alterna, se induce a su alrededor un campo magnético que genera una diferencia de potencial en sí mismo (que da lugar al efecto piel) y en otros conductores próximos (que da lugar al efecto proximidad).

Ambos efectos aumentan la oposición del conductor al paso de la corriente eléctrica y se pueden expresar como porcentaje de incremento de la resistencia en CC para una temperatura t y una frecuencia f.

$$R_{tca} = R_{tcc} \cdot [1 + y_s + y_p] \quad [\Omega/m]$$

Donde:

y_s representa al efecto piel (*skin*).

y_p representa al efecto proximidad.

Cálculo del factor y_s (efecto piel).

$$y_s = \frac{x_s^4}{192 + 0,8 \cdot x_s^4}$$

$$x_s = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{tcc}} \cdot 10^{-7} \cdot k_s}$$

Donde k_s es un factor geométrico que depende del tipo de conductor seleccionado: circular cableado, circular segmentado (cobre), 4 segmentos (aluminio), 5 segmentos (aluminio) y 6 segmentos (aluminio). El valor de k_s viene tabulado en la norma UNE 21144-1-1.

Cálculo del factor y_p (efecto proximidad) para cables unipolares con conductores de sección circular.

$$y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 \cdot \left[0,312 \cdot \left(\frac{d_c}{s}\right)^2 + \frac{1,18}{\frac{x_p^4}{192 + 0,8 \cdot x_p^4} + 0,27} \right]$$

$$x_p = \sqrt{\frac{8 \cdot \pi \cdot f}{R_{tcc}} \cdot 10^{-7} \cdot k_p}$$

Donde:

d_c es el diámetro del conductor [mm]. Es una incógnita inicial del modelo programado.

k_p es el factor geométrico que depende del tipo de conductor. Al igual que k_s , viene tabulado en la norma UNE 21144-1-1.

En la práctica se ha comprobado que cuando la separación entre los ejes de los conductores es mayor de 30 cm, no se produce un aumento significativo de la resistencia por el efecto proximidad, pudiendo despreciarse (IBER02). El mayor incremento de la resistencia en CA suele ser debido al efecto piel.

Finalmente, las pérdidas de potencia activa por unidad de longitud se calcularían aplicando la ley de Joule:

$$W_c = R_{tca} \cdot I^2 \quad [W/m]$$

Donde I es la corriente que circula por el conductor [A]

Estas pérdidas de potencia activa constituyen la principal fuente de calor del cable. El diseño de las distintas partes del cable deberá permitir una correcta evacuación de este calor con el fin de que el conductor no supere su temperatura de servicio, lo que provocaría un aumento de su resistencia eléctrica y, por tanto, de las pérdidas de energía en forma de calor, retroalimentando el mismo problema y pudiendo llegar a provocar la quema del cable y su inutilización.

8.2.2 Cálculo de pérdidas dieléctricas en el aislamiento

Las pérdidas dieléctricas en el aislamiento se producen por la influencia de la tensión y pueden llegar a ser considerables para elevados niveles de tensión (para media tensión podrían despreciarse).

El condensador formado por el aislamiento, situado entre el conductor y la pantalla⁹, no es perfecto, sino que tiene unas pérdidas de potencia activa en su interior (efecto representado con una resistencia en paralelo con el condensador en el circuito equivalente).

La corriente de carga de un condensador, al aplicar una tensión alterna entre las armaduras de éste, viene dada por:

$$I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-6} \cdot U_0 \cdot L_T \quad [A]$$

La potencia reactiva que absorberá el condensador se calcularía del siguiente modo:

$$W_{cond} = U_0 \cdot I_c = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-6} \cdot U_0^2 \cdot L_T \quad [var/fase]$$

No obstante, como se ha mencionado antes, el condensador, al no ser ideal, presenta una conductancia G (en siemens) no exactamente nula cuando se le aplica una tensión U_0 a través del dieléctrico. Esta conductancia permite el paso de una pequeña corriente de conducción que está en fase con la tensión aplicada, produciendo unas pérdidas de potencia activa:

$$I_D = U_0 \cdot G$$

$$W_D = U_0 \cdot I_D$$

⁹ Se recuerda que la pantalla actúa como conductor de distintas corrientes. Véase *Selección de pantalla*

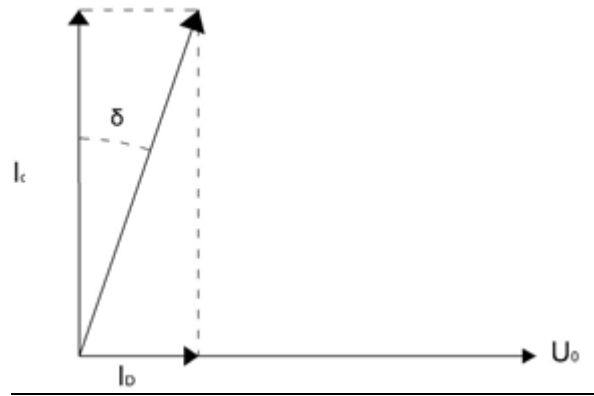


Figura 12. Representación fasorial de la corriente capacitiva, la corriente de conducción y la tensión aplicada.

Las corrientes de carga y de conducción están relacionadas por el ángulo δ . Así, la $\text{tg}\delta$, que se conoce como factor de pérdidas dieléctricas¹⁰, viene determinada por:

$$\text{tg}\delta = \frac{I_D}{I_c}$$

Aplicando estas expresiones al sistema conductor-aislamiento-pantalla de un cable aislado, que actúa como un condensador, las pérdidas de potencia activa que se producen en el aislamiento (pérdidas dieléctricas) por unidad de longitud serán:

$$W_D = \frac{I_D \cdot U_0}{L_T} = \frac{I_c \cdot \text{tg}\delta \cdot U_0}{L_T} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot 10^{-9} \cdot U_0^2 \cdot \text{tg}\delta \quad [W/m]$$

8.2.3 Cálculo de pérdidas en la pantalla metálica.

Para el cálculo de las pérdidas en la pantalla, se toma como referencia la norma UNE 21144-1-1:2012.

Tres cables unipolares en tresbolillo con la pantalla en Solid Bonding

Apartado 2.3.1 de la norma 21144-1-1:2012.

$$\lambda'_1 = \frac{R_{pantalla}}{R_{tca}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{pantalla}}{X}\right)^2}$$

$$X = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln\left(\frac{2 \cdot s}{d_{medio\ pantalla}}\right) \quad [\Omega/m]$$

$$\lambda''_1 = 0$$

¹⁰ El factor de pérdidas de los aislamientos que se dan como opción en la herramienta pueden verse en el apartado *Selección de aislamiento*

Tres cables unipolares en capa con la pantalla en Solid Bonding.

Apartado 2.3.3 de la norma 21144-1-1:2012.

$$\lambda'_1 = \frac{R_{pantalla}}{R_{tca}} \cdot \left[\frac{0,75 \cdot P^2}{R_{pantalla}^2 + P^2} + \frac{0,25 \cdot Q^2}{R_{pantalla}^2 + Q^2} + \frac{2 \cdot R_{pantalla} \cdot P \cdot Q \cdot X_m}{\sqrt{3} \cdot (R_{pantalla}^2 + P^2) \cdot (R_{pantalla}^2 + Q^2)} \right]$$

$$P = X + X_m$$

$$Q = X - \frac{X_m}{3}$$

$$X_m = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln(2) \quad [\Omega/m]$$

$$\lambda''_1 = 0$$

Tres cables unipolares en capa con transposición regular y pantallas en Solid Bonding.

Apartado 2.3.2 de la norma 21144-1-1:2012.

$$\lambda'_1 = \frac{R_{pantalla}}{R_{tca}} \cdot \frac{1}{1 + \left(\frac{R_{pantalla}}{X_1} \right)^2}$$

$$X_1 = 2 \cdot \omega \cdot 10^{-7} \cdot \ln \left\{ 2 \cdot \sqrt[3]{2} \cdot \left(\frac{s}{d_{medio\ pantalla}} \right) \right\} \quad [\Omega/m]$$

Cables unipolares con pantallas en Single-Point o en Cross-Bonding.

Apartado 2.3.6.1 de la norma 21144-1-1:2012.

$$\lambda''_1 = \frac{R_{pantalla}}{R_{tca}} \cdot \left[g_s \cdot \lambda_0 \cdot (1 + \Delta_1 + \Delta_2) + \frac{(\beta_1 t_s)^4}{12 \cdot 10^{12}} \right]$$

$$g_s = 1 + \left(\frac{t_s}{D_{ext.pant}} \right)^{1,74} \cdot (\beta_1 \cdot D_{ext.pant} \cdot 10^{-3} - 1,6)$$

$$\beta_1 = \sqrt{\frac{4 \cdot \pi \cdot \omega}{10^7 \cdot \rho_s}}$$

$$m = \frac{\omega}{R_{pantalla}} \cdot 10^{-7}$$

Tres cables unipolares en tresbolillo

$$\lambda_0 = 3 \cdot \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left(\frac{d_{medio\ pantalla}}{2 \cdot s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = (1,14 \cdot m^{2,45} + 0,33) \cdot \left(\frac{d_{medio\ pantalla}}{2 \cdot s} \right)^{(0,92 \cdot m + 1,66)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

Tres cables unipolares en capa

$$\lambda_0 = 6 \cdot \left(\frac{m^2}{1 + m^2} \right) \cdot \left(\frac{d_{medio\ pantalla}}{2 \cdot s} \right)^2$$

$$\Delta_1 = 0,86 \cdot m^{3,08} \cdot \left(\frac{d_{medio\ pantalla}}{2 \cdot s} \right)^{(1,4 \cdot m + 0,7)}$$

$$\Delta_2 = 0$$

Pérdidas asociadas a los conductores de gran sección de construcción segmentada

El apartado 2.3.5 de la norma 21144-1-1:2012 establece que, en el caso de utilizar un conductor de gran sección de construcción segmentada, las pantallas para la conexión Solid Bonding (en capa, en tresbolillo y cuando se produce transposición) presentan pérdidas por corrientes de Foucault (λ''_1), halladas como el producto de las pérdidas de Foucault que se producirían en el caso de Single-Point o Cross-Bonding y un factor calculado como:

$$F = \frac{4 \cdot M^2 \cdot N^2 + (M + N)^2}{4 \cdot (M^2 + 1) \cdot (N^2 + 1)}$$

Donde, para el caso de una disposición en tresbolillo:

$$M = N = \frac{R_{pantalla}}{X}$$

Y para una disposición en capa, con el cable central equidistante de los cables laterales:

$$M = \frac{R_{pantalla}}{X + X_m}$$

$$N = \frac{R_{pantalla}}{X - \frac{X_m}{3}}$$

8.3 Campo eléctrico

Para que el cable aislado dimensionado sea seguro, se ha de comprobar que el campo eléctrico máximo originado por la circulación de cargas eléctricas por el conductor central sea inferior a la rigidez dieléctrica del aislamiento. Si no es así, se produce la rotura del aislamiento, surgiendo arborescencias y descargas eléctricas a través de éste, suponiendo un grave problema de seguridad.

Tomando que entre el conductor y el aislamiento no ha quedado ningún hueco de aire y que el conductor es un cilindro perfecto, las líneas del campo eléctrico sobre el aislamiento son radiales y se distribuyen uniformemente. Estas líneas tienen su origen en el conductor y terminan en la pantalla, que constituye la puesta a tierra y por tanto se le asigna el potencial de referencia nulo.

El campo eléctrico en cada punto del espacio comprendido entre un cilindro por el que circulan cargas eléctricas (conductor central del cable) y un tubo conductor que lo contiene (pantalla del cable), compartiendo ambos el mismo eje central y con $D_{\text{tubo}} > D_{\text{cilindro}}$, viene dado por:

$$E_x = \frac{U}{x \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad [kV/cm]$$

El campo eléctrico máximo se obtiene en el contacto entre conductor y aislamiento:

$$E_{\text{máx}} = \frac{U}{r \cdot \ln \frac{R}{r}} \quad [kV/cm]$$

En la figura siguiente (Figura 13) se muestra la mitad de la sección transversal del conjunto conductor-aislamiento-pantalla y cómo varía el campo eléctrico en el aislamiento.

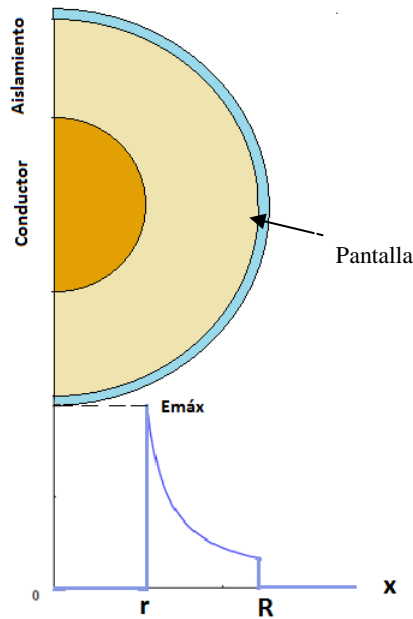


Figura 13. Variación del campo eléctrico en el conductor, el aislamiento y la pantalla.

En el dimensionamiento del cable, el campo eléctrico máximo habrá de calcularse en el caso más desfavorable, que es cuando la tensión simple es superior a la tensión simple nominal; la tensión simple de la tensión máxima de servicio.

$$\text{Caso más desfavorable } U = \frac{U_s}{\sqrt{3}} \quad [kV]$$

Por otro lado, el campo eléctrico máximo será lo menor posible cuando se cumpla:

$$\frac{dE_{m\acute{a}x}}{dr} = 0 \Rightarrow \frac{R}{r} = e$$

No obstante, la relación $\frac{R}{r}$ es la misma que la calculada a partir de la capacidad del cable aislado, $\frac{D_{ais}}{D_c}$, por lo que en el proceso de dimensionamiento del cable no se variará esta relación para alcanzar el objetivo del campo eléctrico, sino que se sólo se modificará el radio del conductor r .

8.4 Resistencias térmicas

Para determinar la intensidad máxima admisible del cable en régimen normal de funcionamiento (situación de equilibrio térmico), es necesario hallar la resistencia térmica total del cable que se opone a la evacuación del calor generado (pérdidas). El objetivo es que el cable sea capaz de trabajar a su temperatura de servicio sin ningún tipo de problemas que afecten a su capacidad de transporte.

Esta resistencia térmica total es la resistencia equivalente de la disposición de resistencias térmicas parciales en serie y paralelo; que se corresponden con las resistencias al flujo de calor de cada una de las partes que conforman un cable aislado.

Partiendo de la suposición de que todos los cables aislados y las capas que los conforman tienen una geometría tubular, se puede utilizar la expresión de la resistencia térmica de un tubo cilíndrico para hallar las diferentes resistencias térmicas parciales:

$$T_i = \frac{\rho_T}{2 \cdot \pi} \cdot \ln\left(\frac{D}{d}\right)$$

Donde:

- T_i es la resistencia térmica del material de la capa i en K·m/W
- D es el diámetro exterior de la capa en mm
- d es el diámetro interior de la capa en mm

Para simplificar cálculos posteriores, se tomará que los distintos elementos metálicos del cable son aproximadamente isoterms, es decir, su resistencia térmica se despreciará. Por tanto, el conductor central del cable y la pantalla metálica que lo rodea tendrán resistencia térmica nula y se considerarán únicamente como fuentes de calor (fuentes de pérdidas)

Así, las resistencias térmicas de cada una de las partes de un cable no armado que hay que tener en cuenta son:

- T1: Resistencia térmica del aislamiento del conductor.
- T3: Resistencia térmica de la cubierta del cable.

En el caso de T1, se obtiene directamente el valor numérico de la resistencia debido a que se conoce la relación D_{ais}/D_c . Por otro lado, no es posible conocer el valor numérico de

T3 puesto que se desconocen las dimensiones del cable (incógnitas del modelo), por lo que T3 interviene directamente en el proceso iterativo de dimensionamiento del cable.

Adicionalmente a las partes del cable, habrá que tener en cuenta la resistencia térmica del medio de instalación (si el cable está directamente enterrado):

- T4: Resistencia térmica del medio exterior.

Si el cable se encuentra entubado, la resistencia T4 se calcula como la suma de:

- T4': Resistencia térmica entre cable y tubo.
- T4'': Resistencia térmica del tubo.
- T4''': Resistencia térmica del medio que rodea al tubo.

Para el cálculo de estas resistencias se tomará como referencia la norma UNE 21144-2-1:1997

8.4.1 Resistencia térmica T4: Tres cables en tresbolillo directamente enterrados

En el caso de que el cable aislado esté directamente enterrado en el terreno, T4 se halla aplicando la siguiente expresión:

$$T_4 = \frac{1,5 \cdot \rho_T}{\pi} \cdot [\ln(2 \cdot u) - 0,63]$$

Donde:

$$u = \frac{2 \cdot L}{D_{ext}}$$

L es la distancia desde la superficie del suelo hasta el eje del cable (mm)

D_{ext} es el diámetro exterior del cable (mm)

ρ_T es la resistividad térmica del terreno en K·m/W

8.4.2 Resistencia térmica T4: Tres cables colocados en capa, igualmente separados entre sí y con aproximadamente iguales pérdidas

$$T_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \rho_T \cdot \left\{ \ln(u + \sqrt{u^2 - 1}) + \ln \left[1 + \left(\frac{2 \cdot L}{s} \right)^2 \right] \right\}$$

Donde:

s es la distancia entre ejes de los cables adyacentes [mm]

8.4.3 Resistencia térmica T4: Tres cables unipolares colocados en capa y en contacto

$$T_4 = \rho_T \cdot [0,475 \cdot \ln(2 \cdot u) - 0,346]$$

para $u \geq 5$

8.4.4 Resistencia térmica T4'

$$T'_4 = \frac{U}{1 + 0,1 \cdot (V + Y \cdot \theta_m) \cdot D_{ext}}$$

Donde:

U, V e Y son constantes definidas en la tabla 4 de la norma UNE 21144-2-1.

θ_m es la temperatura media del aire entre tubo y cable.

8.4.5 Resistencia térmica T4''

$$T''_4 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \rho_T \cdot \ln \frac{D_o}{D_d}$$

Donde:

D_o es el diámetro exterior del conducto [mm]

D_d es el diámetro interior del conducto [mm]

ρ_T es la resistividad térmica del material del conducto [K·m/W]

8.4.6 Resistencia térmica T4'''

El punto 2.2.7.3 de la norma UNE 21144-2-1 establece que la resistencia térmica para cada conducto, cuando no se encuentre embebido en hormigón, se calculará aplicando las mismas expresiones que en T4 para cada tipo de configuración, sustituyendo el radio exterior del cable por el radio exterior del conducto o tubo (en la herramienta este parámetro se introduce en veces el radio exterior del cable).

Cuando el conducto está embebido en hormigón, se supone que un medio homogéneo y de resistividad térmica igual a la del hormigón. Así, es necesario introducir a las expresiones calculadas un factor de corrección para tener en cuenta la diferencia real entre la resistividad del suelo y la del hormigón. Esta corrección, suponiendo que en el bloque de hormigón va a haber 3 conductos, cada uno con un cable aislado, viene dada por:

$$\frac{3}{2 \cdot \pi} \cdot (\rho_{suelo} - \rho_{hormigón}) \cdot \ln(u + \sqrt{u^2 - 1})$$

Donde:

$$u = \frac{L_G}{r_b}$$

L_G es la profundidad del centro del bloque de hormigón [mm]

r_b es el radio equivalente del bloque de hormigón [mm] que se calcula:

$$r_b = e^{\frac{1}{2} \frac{x}{y} \cdot \left(\frac{4}{\pi} - \frac{x}{y} \right) \cdot \ln\left(1 + \frac{x^2}{y^2}\right) + \ln \frac{x}{2}} \quad [mm]$$

Donde:

x es la menor dimensión del bloque de hormigón [mm]

y es la mayor dimensión del bloque de hormigón [mm]

8.5 Ecuación intensidad máxima admisible

Cuando por un conductor descargado empieza a circular corriente eléctrica, el aumento de temperatura produce un salto térmico, $\Delta\theta$, entre el cable y el medio que lo rodea. Al principio el calor generado es superior al calor evacuado y la temperatura del conductor aumenta; a medida que el salto térmico se hace más grande, la evacuación de calor aumenta también, alcanzando el equilibrio cuando la temperatura del conductor es tal que el calor generado iguala al calor evacuado ($dQ_1 = dQ_2$). La máxima corriente que podrá circular por el conductor será aquella que permita satisfacer dicha igualdad.

Como se calculó anteriormente, se conocen las expresiones de las distintas pérdidas de potencia activa que se producen en el cable y las resistencias térmicas de las partes que lo conforman. Estas expresiones permiten resolver el problema de transferencia de calor planteado. El método que se empleará será el planteamiento del problema mediante un símil eléctrico en el que la diferencia de temperatura entre conductor y medio equivalen a una diferencia de tensión, las pérdidas de potencia activa equivalen a fuentes de intensidad, y las resistencias térmicas equivalen a resistencias eléctricas. A continuación, se muestra el circuito eléctrico equivalente para resolver el problema de transferencia de calor de un cable unipolar no armado:

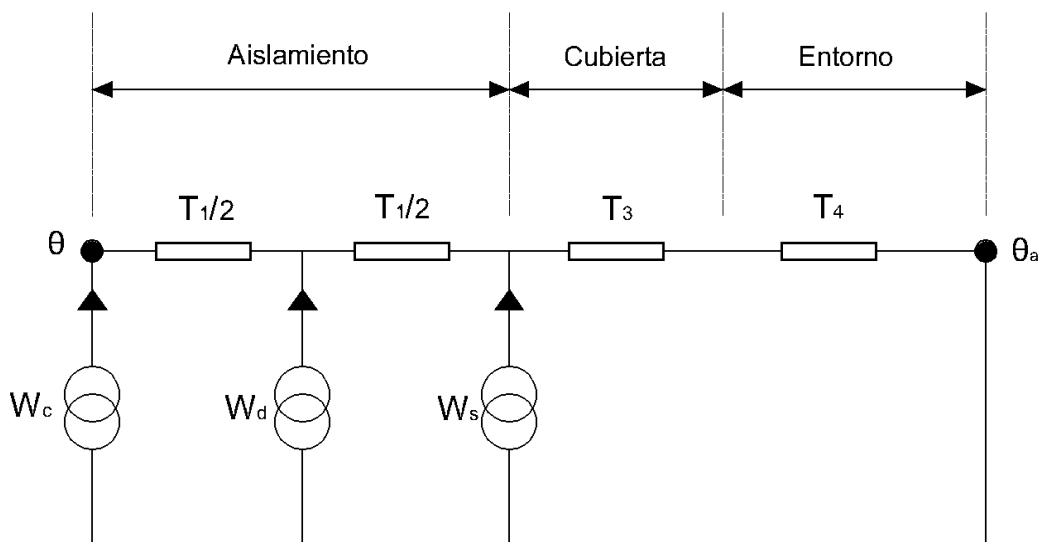


Figura 14. Circuito eléctrico equivalente del problema de transferencia de calor que presenta el cable aislado, objeto del modelo, en servicio. Basado en (SIMO11)

Aplicando la ley de Ohm al circuito anterior:

$$\Delta\theta = \theta - \theta_A = W_c \cdot \frac{T_1}{2} + (W_c + W_d) \cdot \frac{T_1}{2} + (W_c + W_d + W_s) \cdot (T_3 + T_4)$$

Teniendo en cuenta, como se indicó anteriormente:

$$W_c = R_{tca} \cdot I^2 \quad [W/m]$$

$$W_s = \lambda_1 \cdot R_{tca} \cdot I^2 \quad [W/m]$$

Se puede despejar la intensidad I :

$$\begin{aligned} \Delta\theta = \theta - \theta_A &= (2 \cdot R_{tca} \cdot I^2 + W_d) \cdot \frac{T_1}{2} + (R_{tca} \cdot I^2 + \lambda_1 \cdot R_{tca} \cdot I^2 + W_d) \cdot (T_3 + T_4) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta\theta &= R_{tca} \cdot I^2 \cdot T_1 + W_d \cdot \frac{T_1}{2} + (1 + \lambda_1) \cdot R_{tca} \cdot I^2 \cdot (T_3 + T_4) + W_d \cdot (T_3 + T_4) \Rightarrow \\ \Rightarrow \Delta\theta - W_d \cdot \frac{T_1}{2} - W_d \cdot (T_3 + T_4) &= R_{tca} \cdot I^2 \cdot T_1 + R_{tca} \cdot I^2 \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (T_3 + T_4) \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\Rightarrow I = \sqrt{\frac{\Delta\theta - W_d \cdot \left(\frac{T_1}{2} + T_3 + T_4\right)}{R_{tca} \cdot T_1 + R_{tca} \cdot (1 + \lambda_1) \cdot (T_3 + T_4)}} \quad [A]$$

La intensidad será la máxima admisible (I_z) cuando $\theta = \theta_i$

9 Parámetros de salida

Los parámetros de salida del programa podrán verse en la pestaña de Resultados. En esta página se presentarán los valores calculados de las dimensiones de las distintas partes del cable y otros datos que pueden resultar de interés para el usuario, como el desglose de las pérdidas de potencia activa estimadas (empleadas en el cálculo) y una estimación del precio del conductor del cable por unidad de longitud en base al precio del kilogramo de cobre y de aluminio, que podrá ser modificado por el usuario para una mejor aproximación (precios variables). También se estimará la inductancia del cable según la disposición de los cables en la instalación (GENE__):

Disposición tresbolillo:

$$L = \left[0,05 + 0,2 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot s}{d_c} \right) \right] \cdot 10^{-3} \quad [H/km]$$

Disposición capa:

$$L = \left[0,05 + 0,2 \cdot \ln \left(\frac{2 \cdot 1,26 \cdot s}{d_c} \right) \right] \cdot 10^{-3} \quad [H/km]$$

Donde se recuerda que:

s es la distancia entre los ejes de los conductores [mm]

De entre los resultados, el parámetro de más importancia y para el que se necesita mayor precisión, es la sección del conductor, pues es el principal parámetro en los catálogos de cables aislados (aparte de la tensión para la que está diseñado el cable).

Junto con los datos del cable, se mostrará también las igualdades que deben cumplirse para considerar que el cable mostrado es el adecuado para las características de la instalación introducidas (solución encontrada). El indicador de esto será mediante el color que adquiera el valor de estas igualdades: verde para indicar que la solución mostrada es válida (cuando el problema de optimización ha sido resuelto satisfactoriamente) y rojo para indicar que no se ha encontrado una solución válida (cuando Solver no es capaz de hallar una solución que satisfaga todas las restricciones del problema de optimización).

Para consultar el listado de parámetros que se presentan en la hoja de Resultados, así como la interfaz de ésta, véase el apartado correspondiente en el Anexo: Organización de la herramienta.

10 Análisis de resultados

Para comprobar si el cable obtenido como resultado del modelo programado se adecuaba a las características que debería presentar según los fabricantes, se han seleccionado distintos modelos de cables del fabricante TFKable para realizar una comparación con los resultados obtenidos.

Se ha seleccionado este fabricante debido a que es el único que se ha visto que ofrece gran cantidad de información sobre las condiciones en las que se realizan los cálculos de las características de los cables en sus catálogos. No obstante, en algún caso se ha tenido que suponer algún parámetro de entrada no especificado por el fabricante.

La comparación de resultados sólo se ha podido realizar para cables directamente enterrados, con sistemas de puesta a tierra en Single-Point y Solid Bonding, en capa o en tresbolillo, ya que, para otro tipo de instalaciones, como el caso de cables enterrados bajo tubo, el fabricante no especifica las condiciones (determinantes) en las que se ha realizado el cálculo/ensayo.

Las condiciones especificadas por TFKable en su catálogo son:

Conductor:	Cobre o Aluminio
Tipo de conductor:	Circular cableado ($\leq 1000 \text{ mm}^2$) / Circular segmentado ($\geq 1200 \text{ mm}^2$)
Aislamiento:	XLPE
Pantalla:	Lámina de aluminio soldado (tipo cinta)
Cubierta:	PVC
Tipo de instalación:	Directamente enterrado
Temperatura del terreno:	20°C
Profundidad de soterramiento:	1000 mm
Resistividad térmica del terreno:	1 K·m/W (Terreno Seco)
Disposición:	Tresbolillo Separación $1x D_{ext}$ Capa Separación $2x D_{ext}$
Corriente de cortocircuito:	19 kA / 1 segundo

Tabla 11. Condiciones especificadas por TFKable en su catálogo (TFKA___)

Los cables comparados son de tensiones de 115, 132 y 220kV. En la tabla siguiente se resumen los principales identificadores de los cables comparados:

Tensión	PAT de pantalla	Material conductor	Disposición
115 kV	SP, SB	Cobre	Capa
220 kV			Capa
			Tresbolillo
132 kV		Aluminio	Capa
		Tresbolillo	

Tabla 12. Características más importantes de los cables seleccionados para la comparación de resultados

Las tablas donde se comparan las secciones de conductor obtenidas con las secciones reales del catálogo pueden verse en el Anexo Tablas de análisis de Resultados

10.1 Comparación cable TFKable Cobre, 115 kV

Las gráficas donde se muestran las curvas Sección Conductor – Corriente admisible, según el modelo programado y el catálogo de TFKable se presentan a continuación:

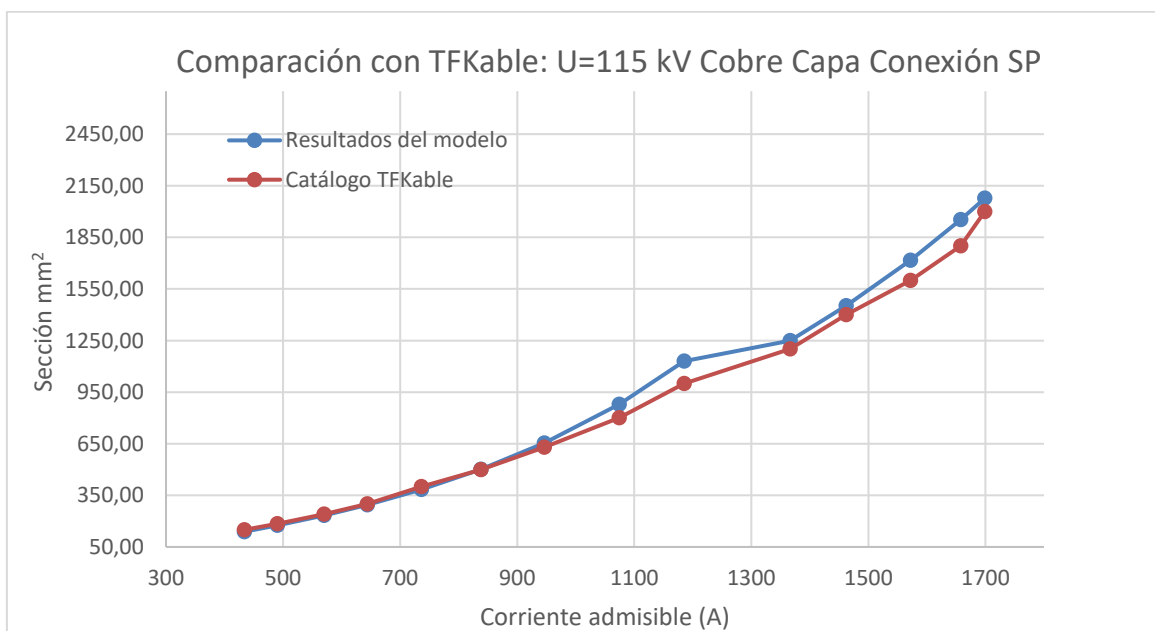


Gráfico 5. Comparación con TFKable: U=115 kV Cobre Capa Conexión SP

Para este cable puede observarse cómo para una conexión en Single-Point (SP) los valores obtenidos por el modelo son casi idénticos a los del catálogo hasta una sección de aproximadamente 1000 mm². A partir de esta sección la curva presenta un pico (que coincide con una mayor diferencia entre el modelo y el catálogo) y que también se observa, aunque de manera menos pronunciada, en la curva del catálogo; este pico se debe al cambio del tipo de conductor, que pasa de ser cableado a segmentado (tipo Milliken).

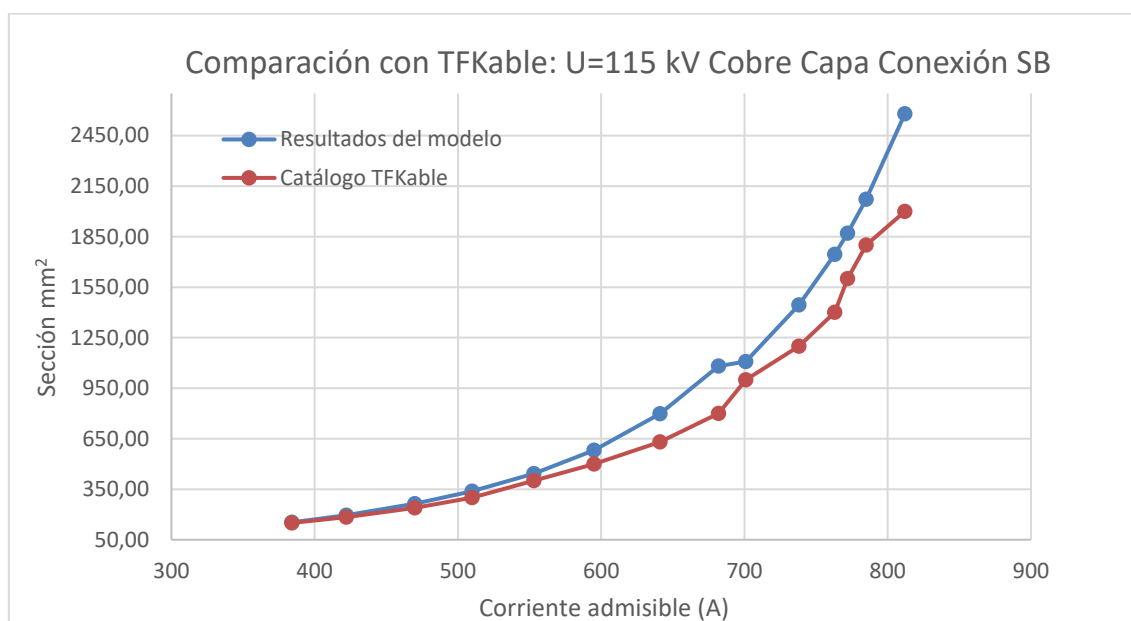


Gráfico 6. Comparación con TFKable: U=115 kV Cobre Capa Conexión SB

Si la conexión se realiza en Solid Bonding (SB), se observa cómo a medida que aumenta la corriente admisible, la diferencia entre el modelo y el catálogo es mayor. En este caso, para evitar un pico demasiado pronunciado en la curva del modelo, se realizó el cambio del tipo de conductor de cableado a segmentado cuando la sección marcada por el catálogo era de 1000 mm², de ahí que para una corriente admisible de 700 A la diferencia se reduzca considerablemente.

10.2 Comparación cable TFKable Cobre, 220 kV

Las gráficas donde se muestran las curvas Sección Conductor – Corriente admisible, según el modelo programado y el catálogo de TFKable se presentan a continuación:

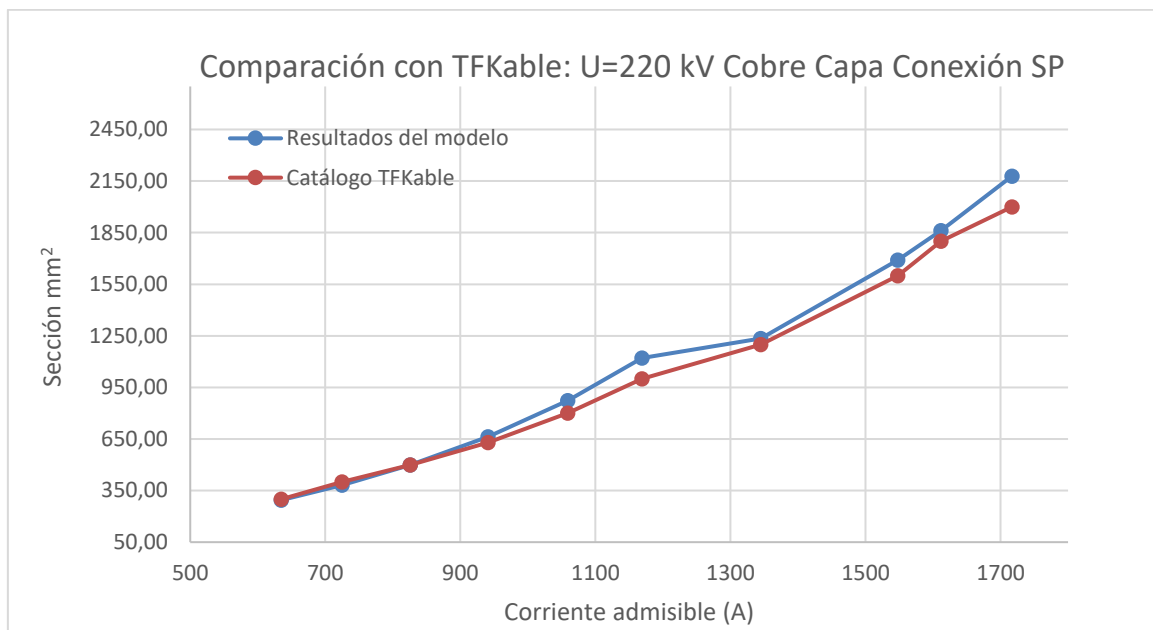


Gráfico 7. Comparación con TFKable: U=220 kV Cobre Capa Conexión SP

Para la conexión en Single-Point (SP), disposición en capa, se aprecia cómo, al igual que en el cable anterior, la diferencia de sección entre modelo y catálogo son casi inapreciables para corrientes menores de 1000 A. Tras el paso de conductor cableado a segmentado cuando la sección del catálogo es 1200 mm², la diferencia se puede considerar despreciable a pesar de haber aumentado ligeramente.

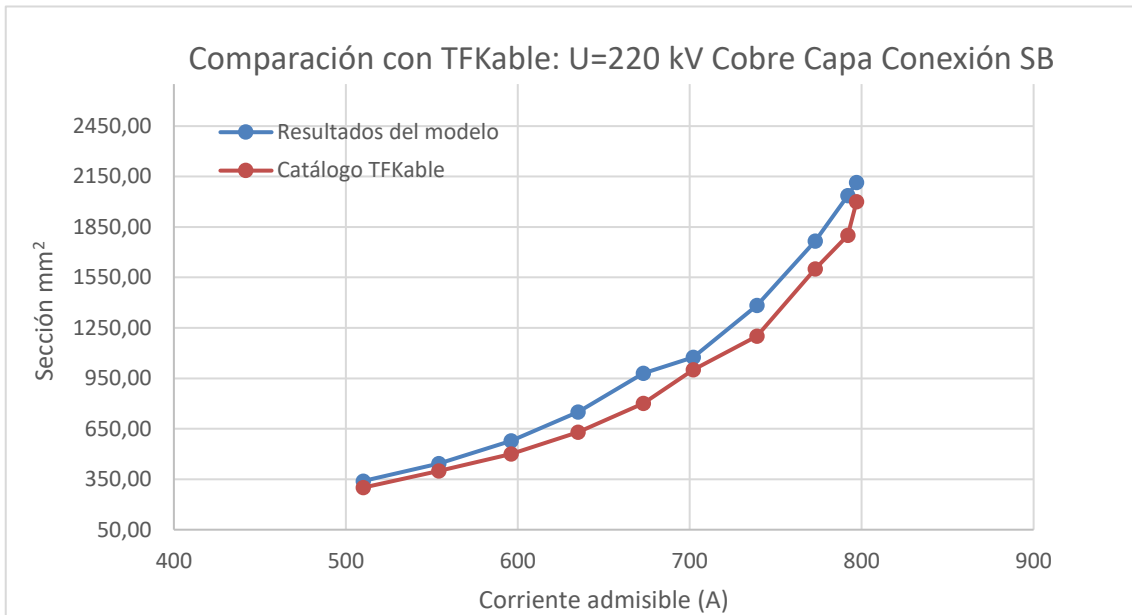


Gráfico 8. Comparación con TFKable: U=220 kV Cobre Capa Conexión SB

Para la conexión en Solid Bonding (SB), disposición en capa, destaca que la diferencia entre el modelo y el catálogo es algo mayor, aunque se mantiene más constante. Al igual que en el cable anterior, se tuvo que realizar el cambio de conductor de cableado a segmentado cuando la sección marcada por el catálogo era de 1000 mm^2 , traduciéndose en una mayor similitud entre modelo y catálogo.

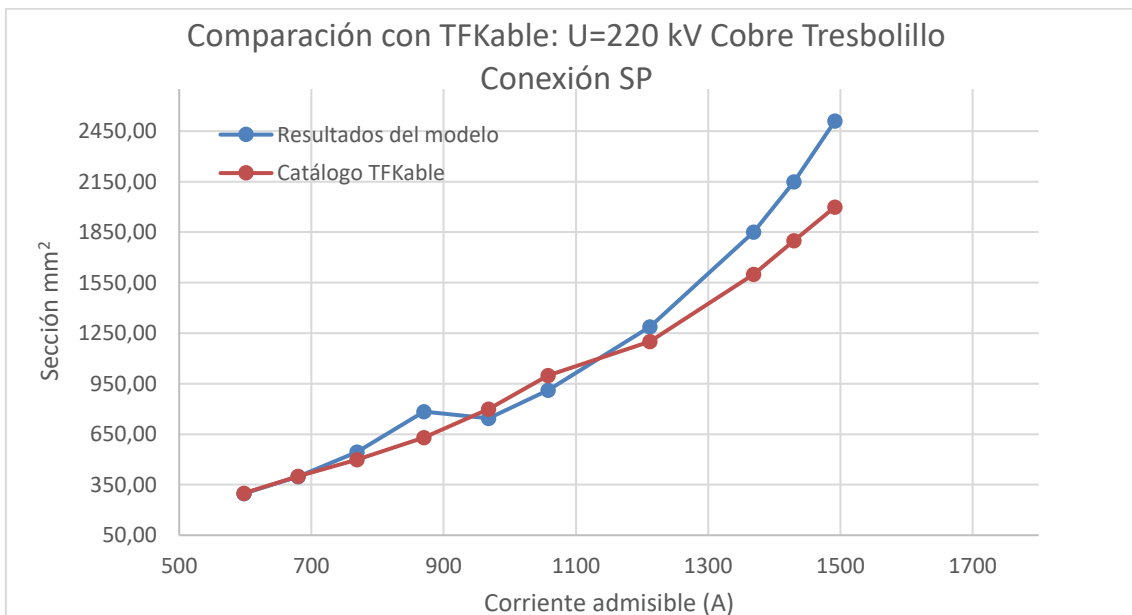


Gráfico 9. Comparación con TFKable: U=220 kV Cobre Tresbolillo Conexión SP

Si se cambia la disposición de capa a tresbolillo, destaca el hecho de que para una conexión de la pantalla a tierra tipo Single-Point (SP), el cambio de tipo de conductor cableado a conductor segmentado tenga que realizarse para una sección de 800 mm^2 del catálogo en vez de a 1200 mm^2 como correspondería. Se escogió realizar este cambio a esa sección debido a que el modelo proporcionaba un resultado de entre 1000 y 1200 mm^2 , por lo que el cambio en la tipología del conductor resultaba recomendable a partir de ese punto; esto se observa en la escasa diferencia que hay en los dos puntos siguientes a este cambio.

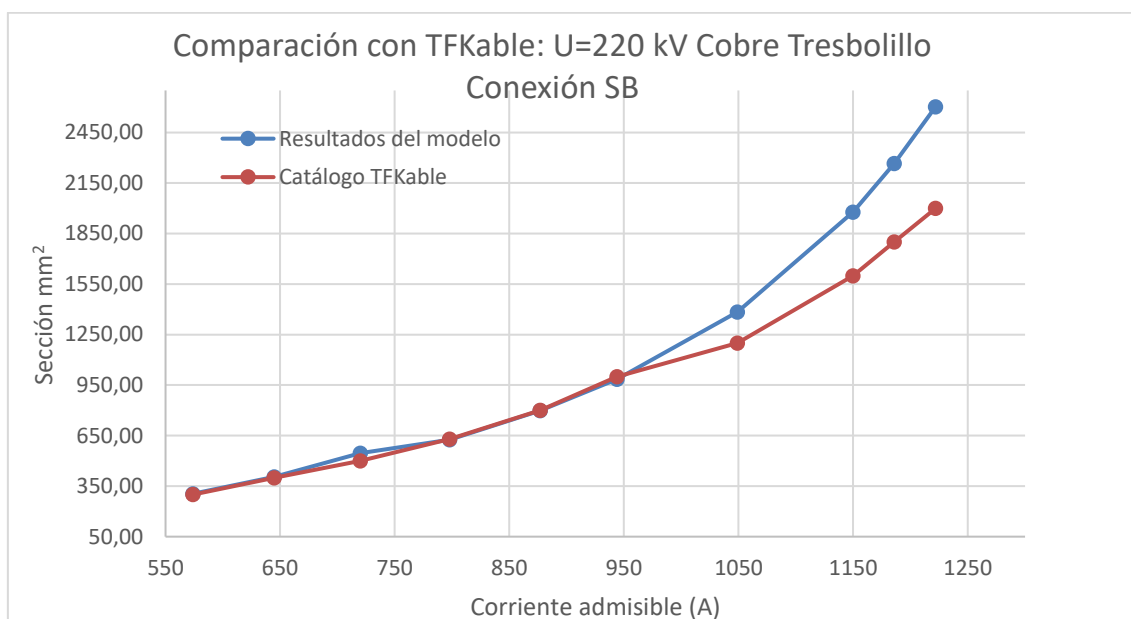


Gráfico 10. Comparación con TFKable: U=220 kV Cobre Tresbolillo Conexión SB

Los resultados obtenidos para una conexión en Solid Bonding (SB), disposición tresbolillo, resultan interesantes. Al igual que con la conexión en SP, se tuvo que adelantar el cambio de conductor (de 1200 mm^2 que marca el catálogo se adelantó a 630 mm^2), lo que puede observarse en el tercer punto, empezando por la izquierda, de la gráfica. Con este cambio se consigue que ambas curvas sean prácticamente iguales hasta una intensidad admisible de 950 A , donde se produce una bifurcación en la que la curva del modelo toma valores más elevados que la curva del catálogo. Esta bifurcación tiene su explicación en que, en el catálogo, es el punto donde se produce el cambio de conductor de cableado a segmentado, lo que reduce las pérdidas, permitiendo secciones menores de conductor.

10.3 Comparación cable TFKable Aluminio, 220 kV

Las gráficas donde se muestran las curvas Sección Conductor – Corriente admisible, según el modelo programado y el catálogo de TFKable se presentan a continuación:

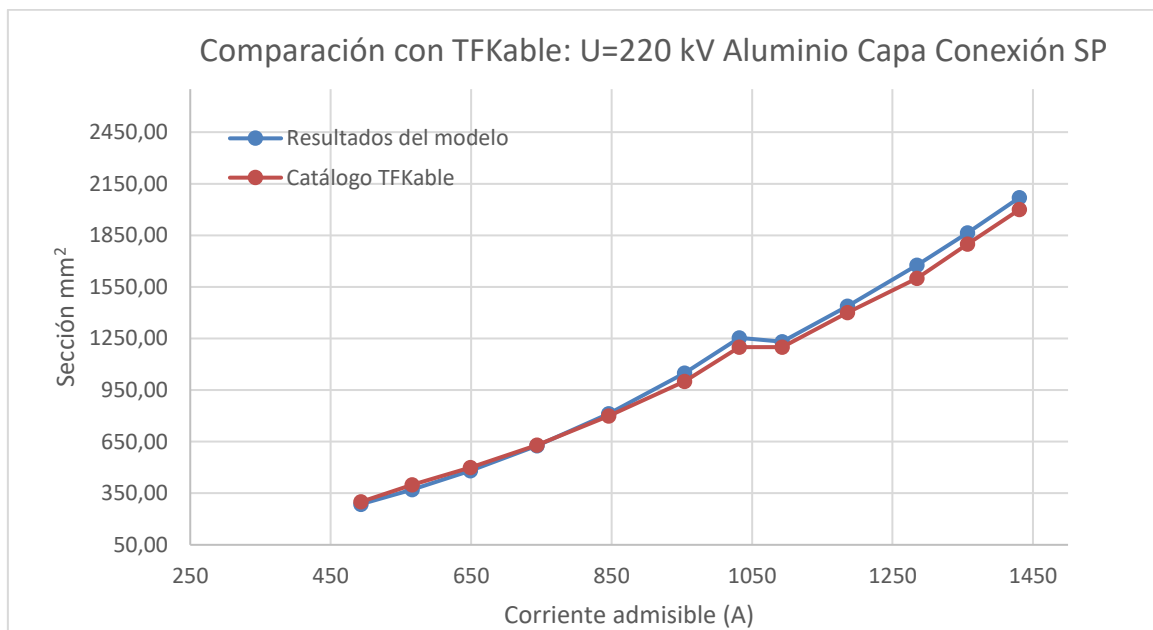


Gráfico 11. Comparación con TFKable: U=220 kV Aluminio Capa Conexión SP

Los resultados que se muestran en el Gráfico 11 son de una gran similitud con respecto al catálogo del fabricante. Las diferencias resultan en todo momento despreciables y el cambio de pendiente (cambio de conductor) se realiza a la vez.

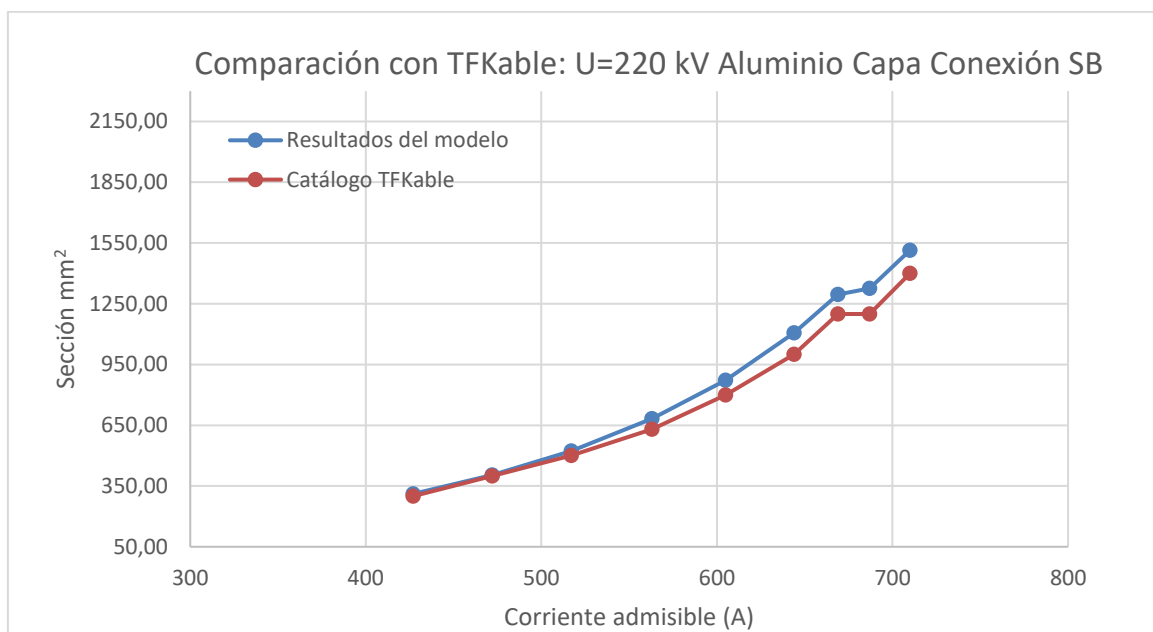


Gráfico 12. Comparación con TFKable: U=220 kV Aluminio Capa Conexión SB

Por otro lado, si se cambia la conexión a tierra de las pantallas a Solid Bonding (SB), la diferencia aumenta ligeramente a medida que se incrementa la corriente admisible. No obstante, el cambio de pendiente, al igual que en la conexión anterior, se produce en el mismo punto que en el catálogo y ambas curvas pueden considerarse semejantes.

10.4 Comparación cable TFKable Aluminio, 132 kV

Las gráficas donde se muestran las curvas Sección Conductor – Corriente admisible, según el modelo programado y el catálogo de TFKable se presentan a continuación:

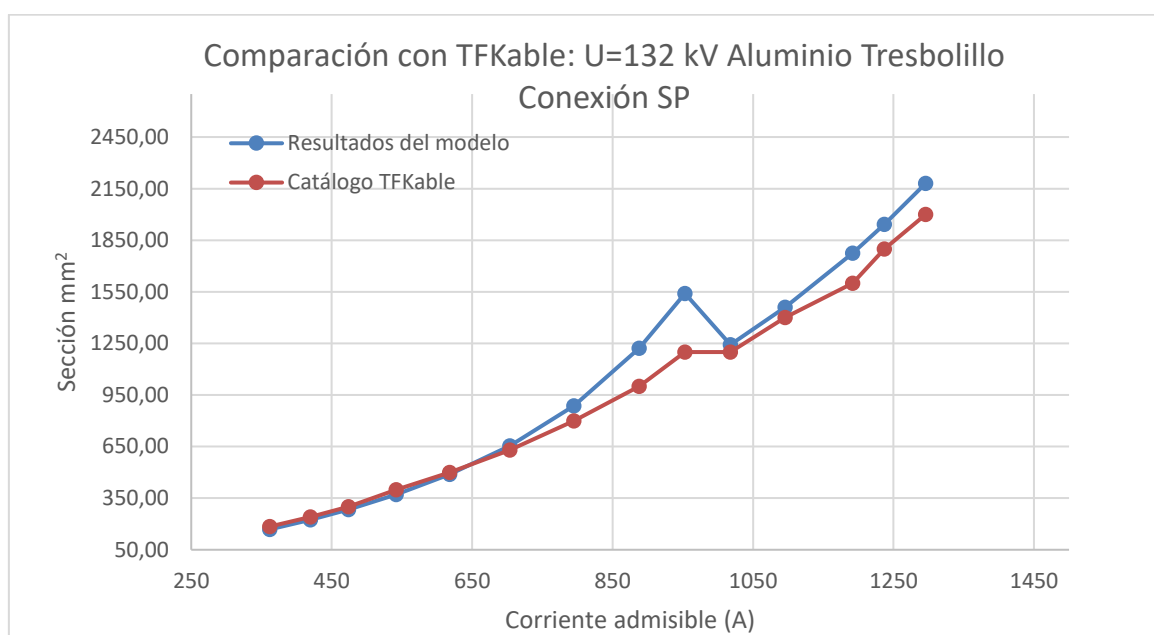


Gráfico 13. Comparación con TFKable: U=132 kV Aluminio Tresbolillo Conexión SP

En el Gráfico 13 se observa que ambas curvas son similares excepto en el intervalo de corrientes de 850-950 A, donde se observa un pico en la curva del modelo que difiere considerablemente del punto del catálogo. Tras este pico, ambas curvas vuelven a coincidir debido al cambio en la tipología del conductor.

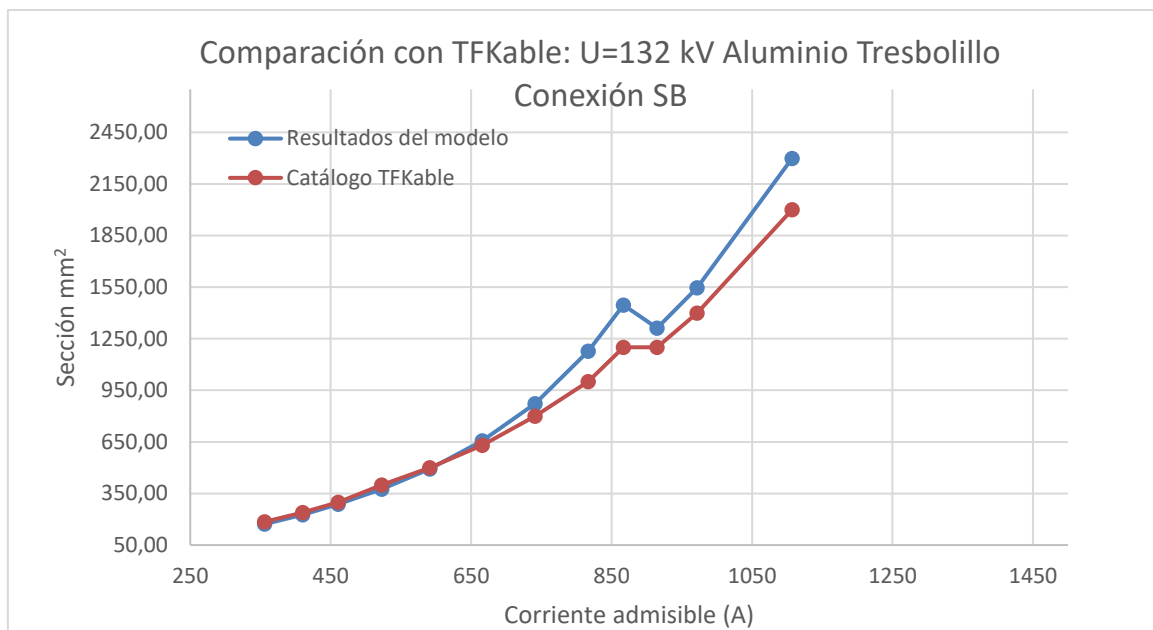


Gráfico 14. Comparación con TFKable: U=132 kV Aluminio Tresbolillo Conexión SB

La conexión de este cable en Solid Bonding presenta una relación entre curvas semejante al caso de conexión en Single-Point.

10.5 Conclusiones del análisis

Tal y como se ha mostrado, el análisis de resultados se la llevado a cabo intentando abarcar distintas tensiones, materiales conductores, puestas a tierra de pantalla y disposición de los cables para poder observar la precisión del modelo en distintos supuestos.

En general, se puede concluir que la precisión en las conexiones Single-Point es superior a la obtenida en las conexiones Solid Bonding. Este hecho también se observa en la disposición capa frente a tresbolillo y, de manera más notable, cuando el conductor utilizado es de aluminio en vez de cobre. En algunos casos, se hizo necesario adelantar el cambio en la tipología del conductor para no obtener secciones excesivamente grandes. En este sentido, destaca que la diferencia entre el modelo y el catálogo se hace visible a medida que la corriente aumenta, reduciéndose en el punto de cambio de conductor, y volviendo a aumentar posteriormente.

El hecho de que, en la mayoría de los puntos donde se observan diferencias, los resultados del modelo sean mayores que los valores del catálogo aseguran que el cable del fabricante es de buena calidad y que se han utilizado materiales y tecnologías que permiten reducir

la sección del conductor sin que afecte a las prestaciones del cable, lo que se traduce en una mayor confianza hacia el fabricante.

Aunque todos los resultados expuestos son para cables directamente enterrados, la coherencia de los resultados para los otros tipos de instalaciones disponibles en la herramienta queda asegurada por el método de cálculo seguido, que toma como referencia a la norma UNE 21144.

11 Análisis de sensibilidad

Este análisis consiste en estudiar cómo varía la sección del conductor al variar distintos parámetros de entrada en la herramienta, como puede ser la profundidad, el tipo de puesta a tierra de las pantallas o el tipo de conductor.

A no ser que se indique lo contrario, las características introducidas en la herramienta para realizar este análisis son las expuestas en la Tabla 11 (apartado de Análisis de resultados). Asimismo, las tablas correspondientes a las gráficas que a continuación se exponen se pueden encontrar en el Anexo Tablas del análisis de sensibilidad.

Existen numerosos parámetros (y combinaciones de parámetros) que se pueden variar para analizar su impacto en la sección del conductor central. Los que se han seleccionado han sido:

- La profundidad de la instalación.
- La cubierta del cable aislado.
- La pantalla del cable aislado.
- El tipo de conductor del cable aislado.
- El tipo de puesta a tierra de las pantallas.
- La distancia de separación entre los cables.
- El tipo de terreno.

11.1 Influencia de la profundidad

Para estudiar el impacto que tiene la profundidad en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 115 kV y disposición en capa. Las profundidades que se introdujeron fueron 1000mm, 1500mm y 2000mm, tanto para una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding) como para una conexión Solid Bonding. Los resultados que se obtuvieron fueron:

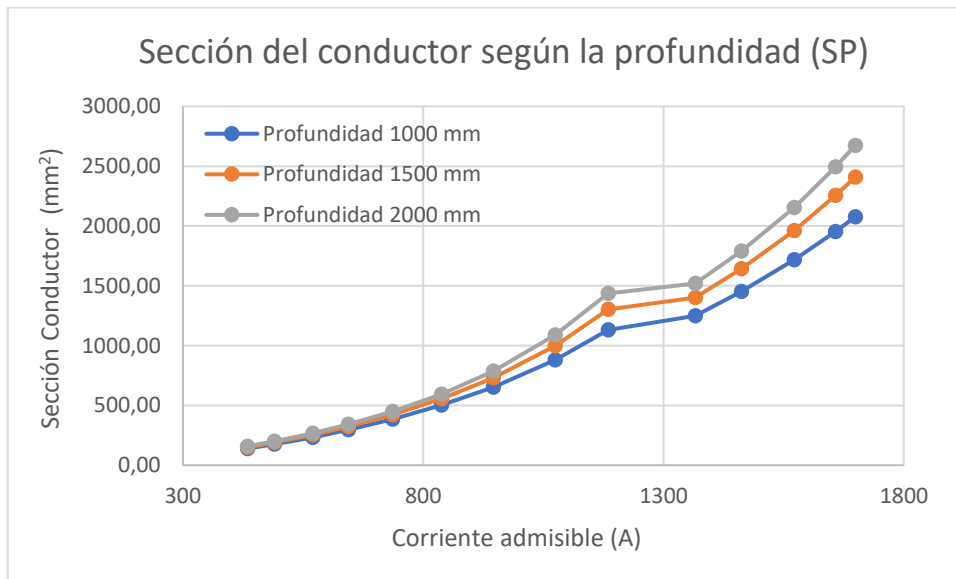


Gráfico 15. Sección del conductor según la profundidad para una conexión Single-Point (SP)

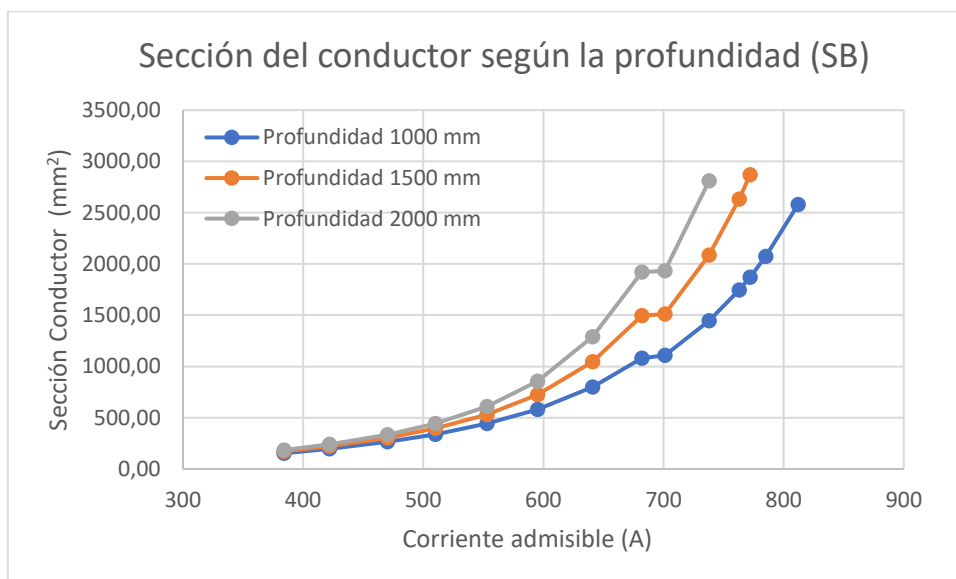


Gráfico 16. Sección del conductor según la profundidad para una conexión Solid Bonding (SB)

Si observamos el incremento (%) respecto a 1000 mm:

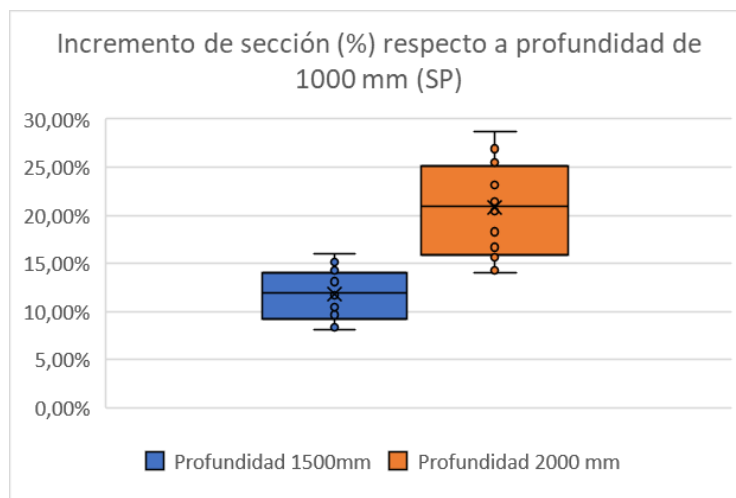


Gráfico 17. Incremento de sección respecto a profundidad de 1000mm (SP)

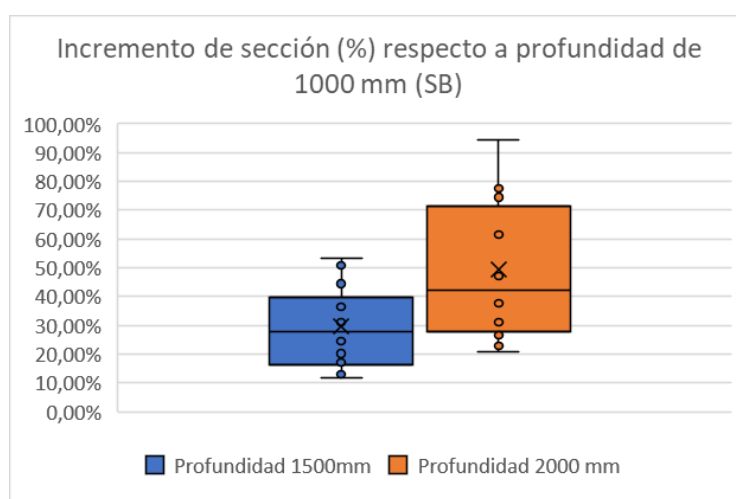


Gráfico 18. de sección respecto a profundidad de 1000mm (SB)

En ambos tipos de conexión se observa cómo al aumentar la profundidad, aumenta la sección de conductor necesaria para transportar una misma corriente. En SP, aumentar a 1500mm la profundidad supone un incremento de en torno al 12% (de media) de la sección de conductor y aumentar a 2000mm supone un incremento en torno al 21% (de media). En SB, estos incrementos son en torno al 29% y al 49% respectivamente.

Se extrae, por tanto, la conclusión de que la profundidad de la instalación tiene una influencia considerablemente mayor en la sección del conductor cuando la conexión es SB que cuando es SP (o CB).

11.2 Influencia de la cubierta

Para estudiar el impacto que tiene la cubierta en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa, tanto para una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding) como para una conexión Solid Bonding. Los resultados que se obtuvieron fueron:

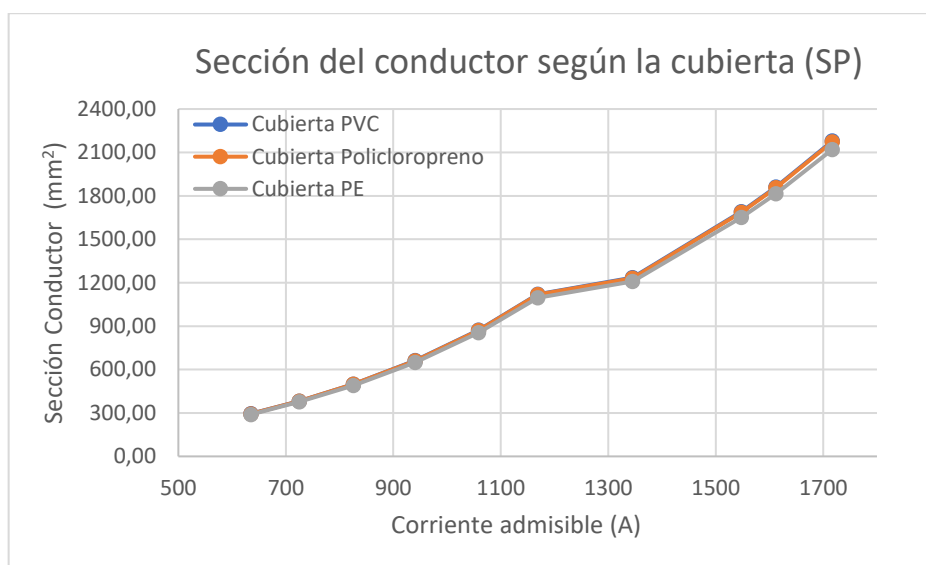


Gráfico 19. Sección del conductor según la cubierta para una conexión Single-Point (SP)

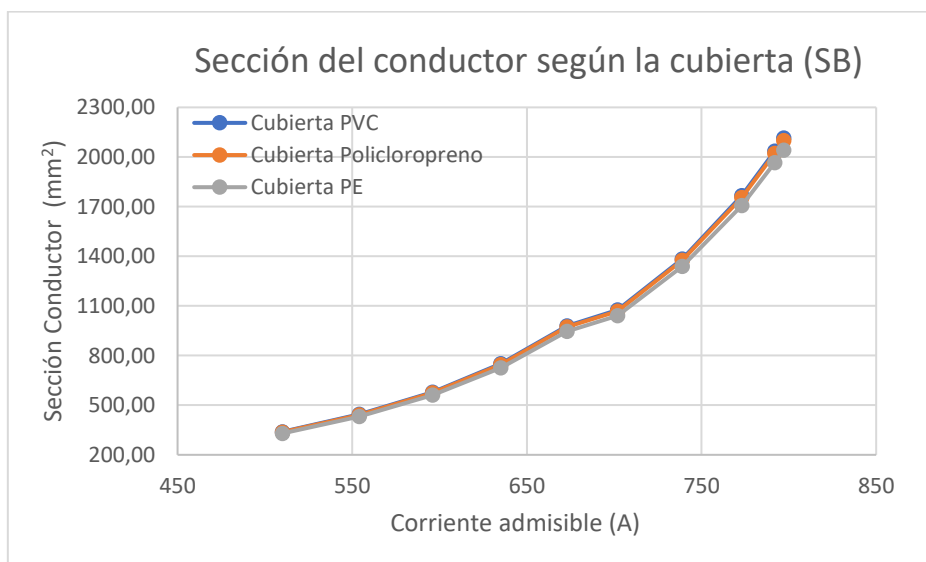


Gráfico 20. Sección del conductor según la cubierta para una conexión Solid Bonding (SB)

A la vista de los resultados obtenidos, se concluye que el variar el tipo de cubierta en la herramienta tiene un efecto despreciable sobre la sección del conductor (esto se debe, en

parte, a que el grosor de esta capa no se ha mantenido constante para cada tipo de cubierta). Por tanto, lo que sí se verá afectado es la dimensión total del cable aislado.

11.3 Influencia de la pantalla

Para estudiar el impacto que tiene la pantalla en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa, tanto para una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding) como para una conexión Solid Bonding. Se consideró, para todos los materiales, una pantalla tipo cinta. Los resultados que se obtuvieron fueron:

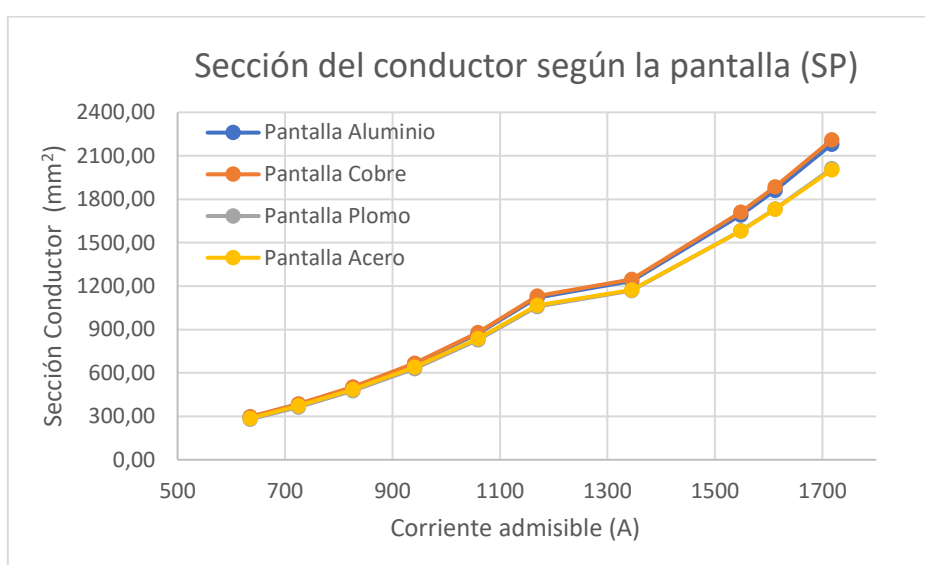


Gráfico 21. Sección del conductor según la pantalla para una conexión Single-Point (SP)

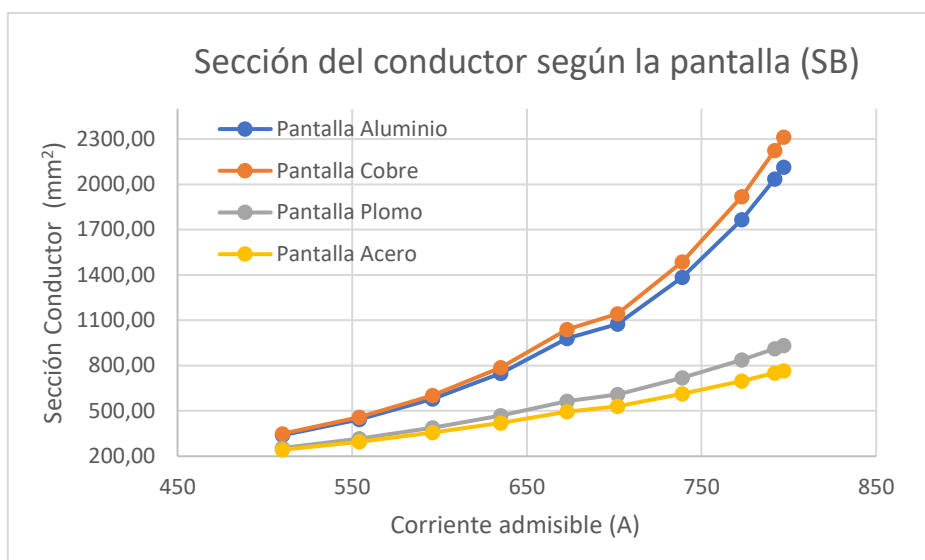


Gráfico 22. Sección del conductor según la pantalla para una conexión Solid Bonding (SB)

En este caso resulta interesante ver cómo la sección del conductor apenas se ve modificada al cambiar el material de la pantalla cuando la conexión de ésta es SP. Sin embargo, si la conexión es SB, la sección del conductor se ve enormemente reducida cuando el material empleado es plomo o acero, por lo que parece razonable utilizar cables con estas pantallas cuando se tenga pensado utilizar este tipo de conexión.

11.4 Influencia del tipo de conductor

Para estudiar el impacto que tiene el tipo de conductor en la sección de este, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa, tanto para una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding) como para una conexión Solid Bonding. Los resultados que se obtuvieron fueron:

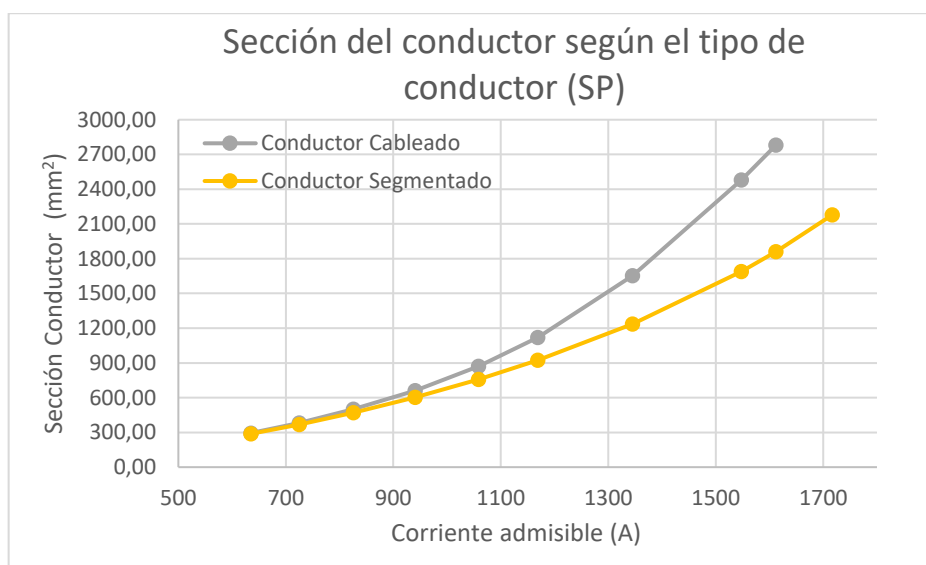


Gráfico 23. Sección del conductor según el tipo de conductor para una conexión Single-Point (SP)

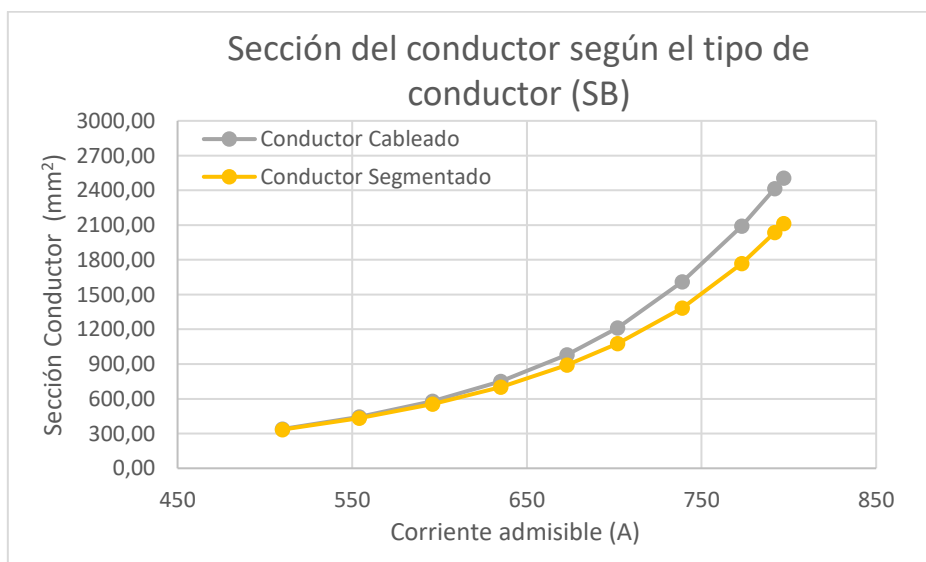


Gráfico 24. Sección del conductor según el tipo de conductor para una conexión Solid Bonding (SB)

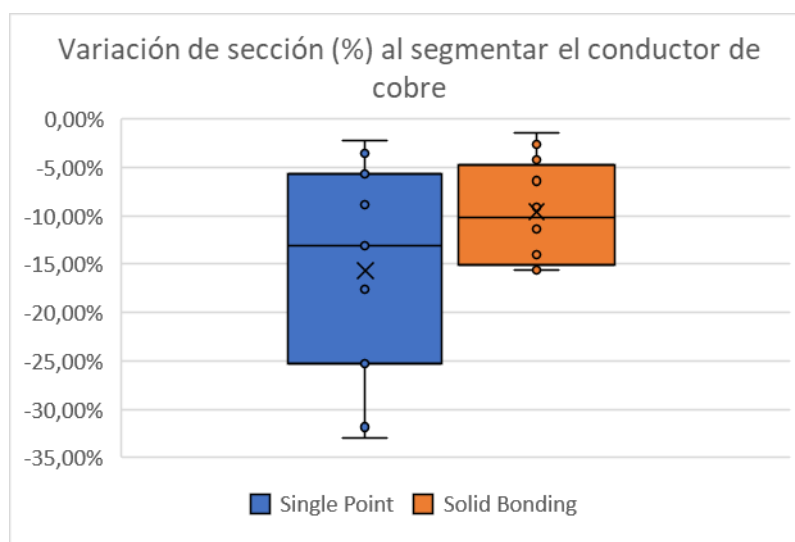


Gráfico 25. Variación de sección (%) al segmentar el conductor de cobre para las conexiones SP y SB

Como era de esperar, en todos los casos se obtiene una sección menor de conductor cuando éste se segmenta que cuando se emplea un conductor cableado. Esta reducción está en torno al 16% (de media) en SP y en torno al 10% (de media) en SB. Tanto en el Gráfico 23 como en el Gráfico 24 se observa que, conforme aumenta la sección del conductor necesaria, la reducción provocada por la segmentación es mayor, por lo que se comprueba que la medida de la mayoría de los fabricantes de utilizar conductores segmentados a partir de secciones de 1000-1200 mm² resulta conveniente para conseguir una mayor ampacidad para una misma sección del conductor.

11.5 Influencia del tipo de puesta a tierra de la pantalla

Para estudiar el impacto que tiene el tipo de puesta a tierra de la pantalla en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa. Las conexiones estudiadas fueron Single-Point (equivalente en los resultados a Cross-Bonding), Solid Bonding, y Transposición (estando en SB). Los resultados que se obtuvieron fueron:

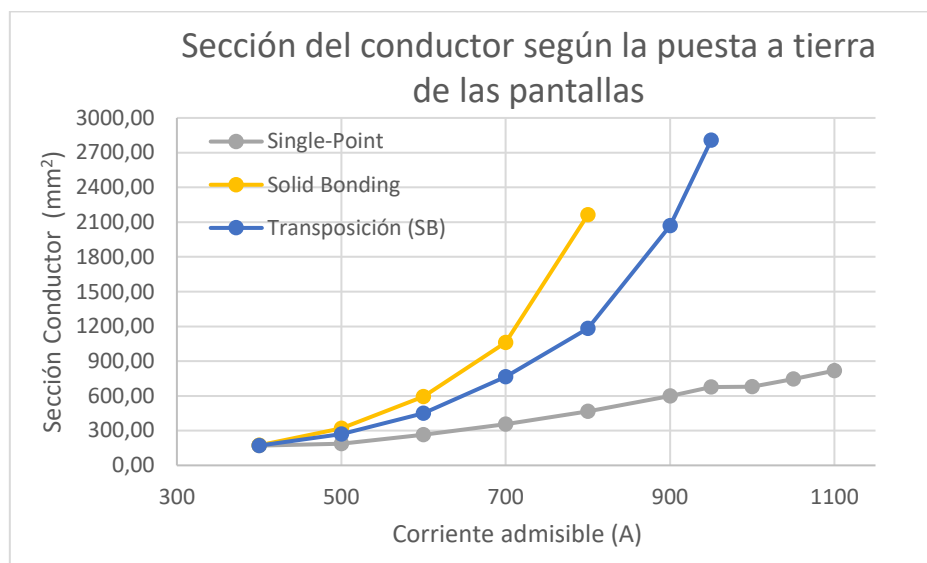


Gráfico 26. Sección del conductor según la puesta a tierra de las pantallas.

En la gráfica anterior se aprecia, además del hecho de que la conexión SB requiere de una mayor sección (incremento en torno al 151% de media, Gráfico 28) que la conexión SP, que la simple medida de transponer los cables en la instalación (estando en capa, conexión SB, tramos de una misma longitud y un número de tramos múltiplo de 3) permite reducir considerablemente (en torno al 25% de media, Gráfico 27) la sección de conductor respecto a la no transposición, permitiendo incluso transportar corrientes que el SB simple no permite (por requerir secciones de conductor muy elevadas, de difícil fabricación).

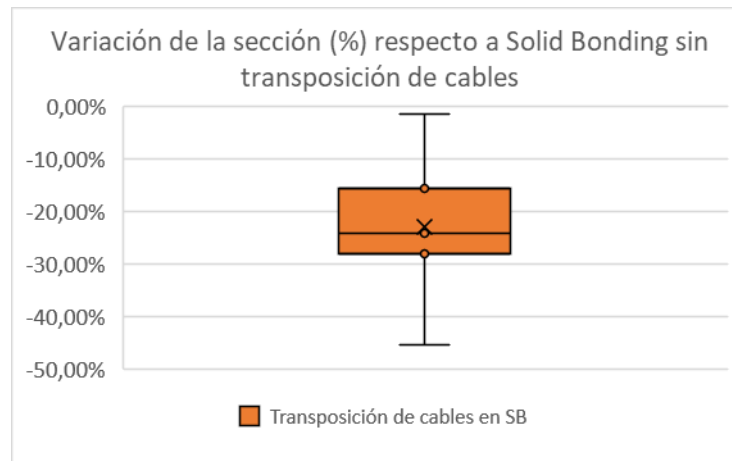


Gráfico 27. Variación de la sección (%) respecto a Solid Bonding sin transposición de cables.

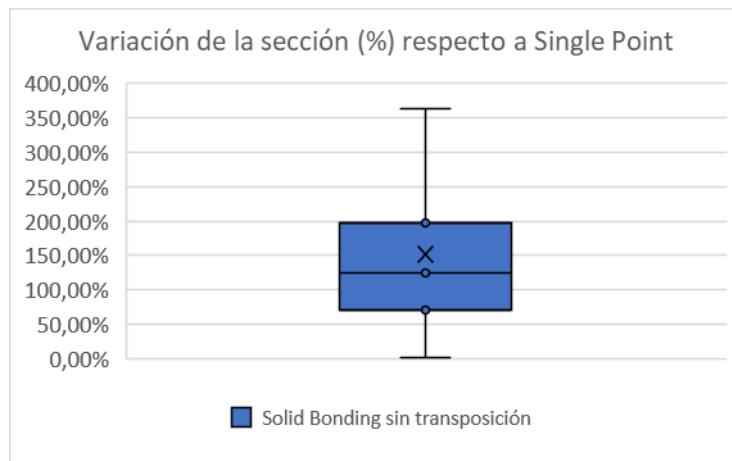


Gráfico 28. Variación de la sección (%) respecto a Solid Bonding sin transposición de cables.

11.6 Influencia de la separación de los cables

Para estudiar el impacto que tiene la separación de los cables en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa, con una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding). Los resultados que se obtuvieron fueron:

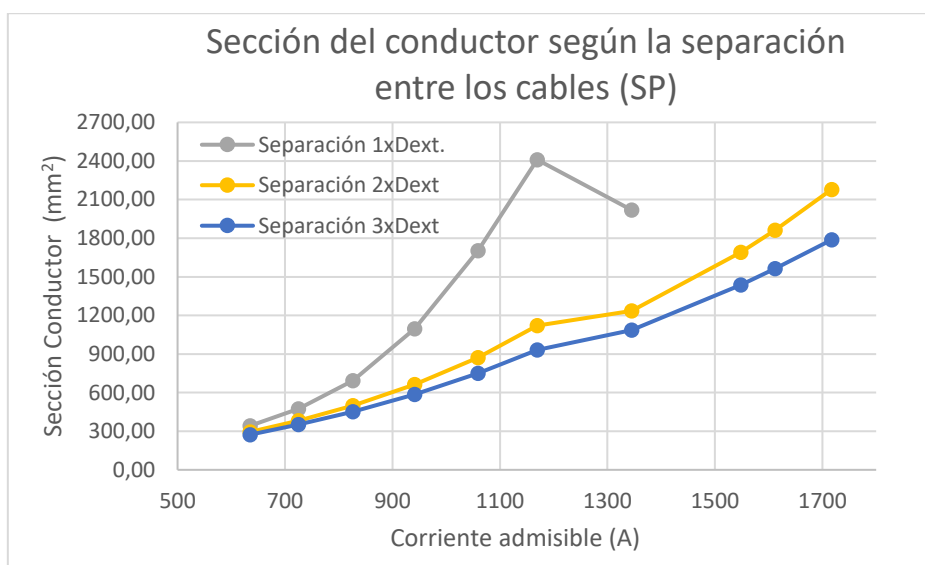


Gráfico 29. Sección del conductor según la separación entre los cables para una conexión Single-Point (SP)

El cambio de pendiente que se observa entre 1100 y 1300 A se debe al cambio de conductor cableado a conductor segmentado. Puesto que la segmentación del conductor es una medida que se emplea para reducir el efecto proximidad, este cambio de pendiente es más pronunciado en la curva correspondiente a cables en contacto (1xDext).

Se observa cómo a medida que aumenta la separación entre los cables, la sección del conductor va disminuyendo para una misma ampacidad (menores pérdidas por efecto proximidad).

11.7 Influencia del tipo de terreno

Para estudiar el impacto que tiene el tipo de terreno en la sección del conductor, se escogió un cable de conductor de cobre, tensión 220 kV y disposición en capa, con una conexión Single-Point (equivalente en los resultados al Cross-Bonding). Los tipos de terreno analizados fueron: seco, arenoso muy seco, húmedo, de piedra granítica e inundado. Los resultados que se obtuvieron fueron:

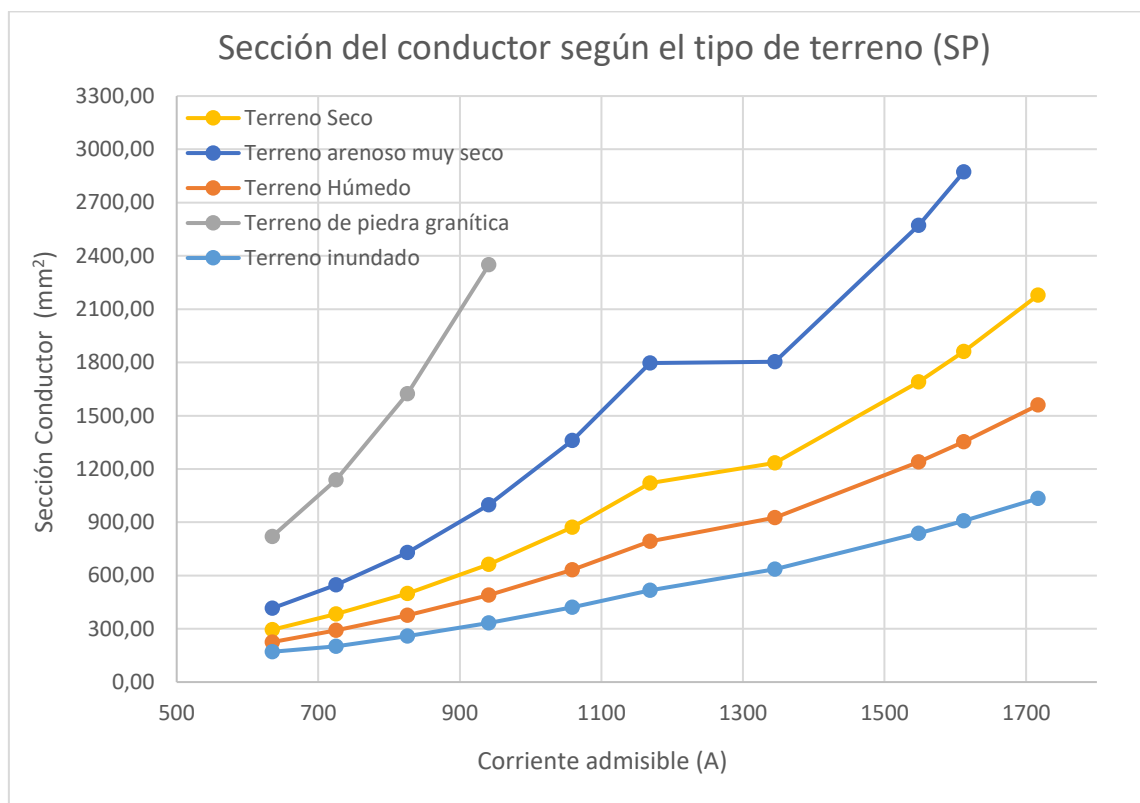


Gráfico 30. Sección del conductor según el tipo de terreno para una conexión Single-Point (SP)

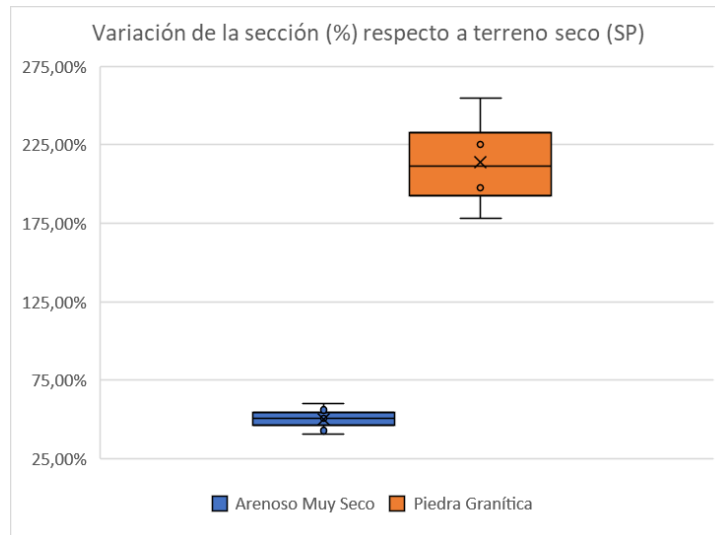


Gráfico 31. Variación de la sección (%) respecto a terreno seco (SP). (Incremento)

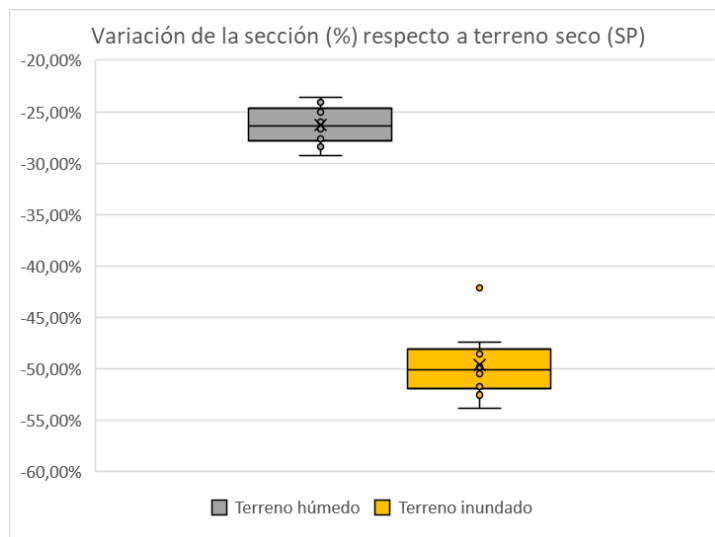


Gráfico 32. Variación de la sección (%) respecto a terreno seco (SP) (Disminución)

En las gráficas anteriores se comprueba cómo un aumento en la resistividad térmica del terreno (aumento de la sequedad) produce un incremento medio de la sección del conductor en torno al 50% (arenoso muy seco) y 210% (piedra granítica) respecto a un terreno seco. Por otro lado, una disminución de la resistividad térmica del terreno produce una disminución media de la sección del conductor en torno al 26,25% (terreno húmedo) y 50% (terreno inundado).

A la vista de los resultados, habrá que tener especial cuidado con las desecaciones del terreno alrededor del cable para evitar sobrecalentamientos del cable en distintos tramos de la línea subterránea.

12 Estudio económico

Uno de los principales objetivos del proyecto es determinar la sección de conductor que deberá tener un cable aislado para que funcione correctamente bajo determinadas condiciones. Los catálogos de los fabricantes suelen proporcionar las características de los cables bajo unas condiciones específicas, por lo que si se va a realizar otro tipo de instalación será necesario corregir estas características, contactar con el fabricante o sobredimensionar el conductor para que se tenga la certeza de que funcionará correctamente.

Este capítulo analizará el coste que tiene sobredimensionar el conductor para distintas tensiones y para los dos materiales conductores (Cobre y Aluminio), basándose en precios aproximados de cables proporcionados por OSPREL S.L. También se realizará, para algunos de los cables estudiados, una aproximación del coste de inversión total basándose en los valores unitarios de referencia de inversión publicados en el BOE-A-2015-13487 (líneas de transporte) y en el BOE-A-2015-13488 (líneas de distribución)

Los datos del cobre y del aluminio que se emplearán en este análisis son:

Material	Precio €/kg	Kg/m ³	€/m ³
Cobre	6,8375	8890	60785,38
Aluminio	2,2795	2700	6154,65

Tabla 13. Datos del cobre y del aluminio. Fuente:

Donde los precios fueron obtenidos de (TEMA18) y (TEMA18)' a fecha del 17/05/2018.

Los datos proporcionados por OSPREL S.L se muestran en la Tabla 14.

45 KV	Sección mm²	€/m y fase
Cobre	400	58,78
Cobre	500	63,63
Aluminio	630	38,18
Aluminio	800	43,91
66 KV		
Cobre	800	76,3
Aluminio	630	41,26
Aluminio	1200	50,86
132 KV		
Aluminio	630	61,9
Aluminio	1200	80
220 KV		
Cobre	2000	197,6
Aluminio	1200	93,6

Tabla 14. Precio aproximado del cable según material conductor y tensión nominal.

Para cada tensión, los cálculos realizados serán los mismos:

- El coste en €/m correspondiente al conductor del cable.
- Porcentaje del precio total del cable que corresponde al conductor.
- Estimación de la sección total del cable. Para ello se utilizará el modelo programado. Puesto que se desconoce la mayoría de las características de los cables para los que se tienen los precios, la sección total del cable estimada puede diferir considerablemente de la sección total real.
- Porcentaje de la sección total del cable que corresponde a la sección del conductor (puede diferir considerablemente respecto a la realidad).
- Cuando se aumenta en 1mm² la sección del conductor:
 - Variación del precio del conductor en €/m.
 - Variación de la sección total del cable en mm².
 - Variación del precio del cable en €/m.
- Valores medios para cada material conductor.
- Coste que tendría el escoger el siguiente cable de mayor sección en el catálogo de un fabricante (sobredimensionamiento). Se hallará tanto el incremento en el coste del cable como el incremento en el coste del circuito (3 cables).

12.1 Cables de 45kV

45 kV	Sección Conductor mm ²	€/m y fase	€/m Conductor	% € Conductor /cable	Sección total estimada	% Sección Conductor /cable	Al aumentar 1mm ²		
							ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Cu	400	58,78	24,31	41,36%	1400	28,57%	0,0608	3,50	0,15
Cu	500	63,63	30,39	47,76%	1700	29,41%	0,0608	3,40	0,13
Al	630	38,18	3,88	10,16%	2100	30,00%	0,0062	3,33	0,06
Al	800	43,91	4,92	11,21%	2500	32,00%	0,0062	3,13	0,055

Tabla 15. Costes, relaciones y variaciones para cables de 45kV

Los valores medios calculados a partir de la tabla anterior son:

	% € Conductor/cable	% Sección Conductor/cable	ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Cobre	44,56%	28,99%	0,0608	3,45	0,14
Aluminio	10,68%	31,00%	0,0062	3,23	0,06

Tabla 16. Valores medios para cables de 45kV según material conductor

Se observa que para 45kV el conductor representa aproximadamente un 45% del precio del cable en el caso de utilizar cobre y un 11% en caso de utilizar aluminio, a pesar de que para ambos casos el conductor representa en torno a un 30% de la sección total del cable.

Teniendo en cuenta que, en los catálogos de los fabricantes, la diferencia de sección de conductor entre un cable y el siguiente suele ser de 100, 130 o 200 mm², se presenta a continuación el coste que tendría el escoger el siguiente cable de mayor sección (sobredimensionamiento).

Cobre		
ΔSección mm ²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	13,64	40,92
130	17,73	53,20
200	27,28	81,84

Tabla 17. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del cobre (45kV)

Aluminio		
Δ Sección mm ²	Δ Precio Cable €/m	Δ Coste Circuito €/m
100	5,76	17,28
130	7,49	22,47
200	11,52	34,56

Tabla 18. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del aluminio (45kV)

Resulta obvio que sobredimensionar en aluminio resulta más barato que en cobre. Sin embargo, hay que tener precaución cuando las secciones del conductor (tanto en cobre como en aluminio) son superiores a 1000 mm², ya que a partir de este valor se emplea el conductor segmentado, lo que puede incrementar el coste del cable (fabricación más compleja), aunque tendrá una mayor corriente admisible.

12.2 Cables de 66kV

							Al aumentar 1mm ²		
66 kV	Sección Conductor mm ²	€/m y fase	€/m Conductor	% € Conductor /cable	Sección total estimada	% Sección Conductor /cable	ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Cu	800	76,3	48,63	63,73%	2500	32,00%	0,0608	3,13	0,10
Al	630	41,26	3,88	9,40%	2100	30,00%	0,0062	3,33	0,07
Al	1200	50,86	7,39	14,52%	4000	30,00%	0,0062	3,33	0,04

Tabla 19. Costes, relaciones y variaciones para cables de 66kV

Los valores medios calculados a partir de la tabla anterior son:

	% € Conductor/cable	% Sección Conductor/cable	ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Cobre	63,73%	32,00%	0,0608	3,13	0,10
Aluminio	11,96%	30,00%	0,0062	3,33	0,05

Tabla 20. Valores medios para cables de 66kV según material conductor

Para esta tensión el conductor supone un porcentaje mayor del precio total del cable (64% para el cobre y 12% para el aluminio), aunque sigue representando en torno al 30% de la sección total del cable. Respecto a la tensión de 45kV, supone un coste medio ligeramente menor el aumentar 1 mm² la sección del conductor, como puede observarse en los costes calculados para un sobredimensionamiento.

El coste que tendría el escoger el siguiente cable de mayor sección (sobredimensionamiento):

Cobre		
ΔSección mm ²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	9,54	28,61
130	12,40	37,20
200	19,08	57,23

Tabla 21. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del cobre (66kV)

Aluminio		
ΔSección mm²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	5,15	15,44
130	6,69	20,07
200	10,29	30,88

Tabla 22. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del aluminio (66kV)

12.3 Cables de 132kV

132kV	Sección Conductor mm ²	€/m y fase	€/m Conductor	% € Conductor /cable	Sección total estimada	% Sección Conductor /cable	Al aumentar 1mm ²		
							ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Al	630	61,9	3,88	6,26%	2700	23,33%	0,0062	4,29	0,10
Al	1200	80	7,39	9,23%	4700	25,53%	0,0062	3,92	0,07

Tabla 23. Costes, relaciones y variaciones para cables de 132kV

Los valores medios calculados a partir de la tabla anterior son:

	% € Conductor/cable	% Sección Conductor/cable	ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Aluminio	7,75%	24,43%	0,0062	4,10	0,08

Tabla 24. Valores medios para cables de 132kV de aluminio

Respecto a las dos tensiones anteriores (ambas <100kV) se aprecia cómo para 132kV la “participación” del conductor de aluminio en el coste total del cable y en la sección total del cable es menor. Esto se debe, fundamentalmente, al hecho de que, al aumentar la tensión nominal del cable por encima de 100kV, la relación d_{ais}/d_c aumenta debido a la disminución de la capacidad ($\mu\text{F}/\text{km}$), lo que implica un mayor grosor de aislamiento para evitar arborescencias (mayor seguridad).

El coste que tendría el escoger el siguiente cable de mayor sección (sobredimensionamiento):

Aluminio		
ΔSección mm ²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	7,94	23,83
130	10,33	30,98
200	15,89	47,66

Tabla 25. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del aluminio (132kV)

12.4 Cables de 220kV

220kV	Sección Conductor mm ²	€/m y fase	€/m Conductor	% € Conductor /cable	Sección total estimada	% Sección Conductor /cable	Al aumentar 1mm ²		
							ΔPrecio Conductor €/m	ΔSección Total mm ²	ΔPrecio Cable €/m
Cu	2000	197,6	121,57	61,52%	9000	22,22%	0,0608	4,50	0,10
Al	1200	93,6	7,39	7,89%	5800	20,69%	0,0062	4,83	0,08

Tabla 26. Costes, relaciones y variaciones para cables de 220kV

Como se mencionó anteriormente, al aumentar la tensión el conductor pierde importancia en el precio y en la sección total del cable a favor del aislamiento. Esto se puede observar muy fácilmente con el cable de conductor de Aluminio 1200 mm²: en la Tabla 23 el conductor constituía un 9,23% del precio total y un 25,53% de la sección total del cable; en la Tabla 26 constituye un 7,89% y un 20,69% respectivamente. El hecho de no disponer de datos de cables con conductores de cobre de la misma sección para las tensiones analizadas impide observar fielmente este hecho.

El coste que tendría el escoger el siguiente cable de mayor sección (sobredimensionamiento):

Cobre		
ΔSección mm ²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	9,88	29,64
130	12,84	38,53
200	19,76	59,28

Tabla 27. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del cobre (220kV)

Aluminio		
ΔSección mm ²	ΔPrecio Cable €/m	ΔCoste Circuito €/m
100	7,80	23,40
130	10,14	30,42
200	15,60	46,80

Tabla 28. Incremento en el coste por sobredimensionamiento en 100, 130 y 200 mm² del aluminio (220kV)

12.5 Estimación de la inversión total

Realizar una estimación genérica del coste total de una línea subterránea resulta complejo, ya que son muchos los factores que influyen y que resultan determinantes en el precio. El Ministerio de Industria, Energía y Turismo de España ofrece algunos valores de referencia, que son los utilizados para el cálculo de la retribución de las empresas titulares de las instalaciones:

- En el BOE-A-2015-13487: Presenta en el Anexo I los valores unitarios de referencia de inversión por elemento de inmovilizado para instalaciones de transporte de energía eléctrica ubicadas en el territorio peninsular.
- En el BOE-A-2015-13488: Presenta en el Anexo I los valores unitarios de referencia de inversión y de operación y mantenimiento de instalaciones de distribución de energía eléctrica ubicadas en el territorio peninsular.

12.5.1 Línea subterránea 132 kV, Al 1200 mm²

Esta línea (simple circuito), considerada de distribución por su nivel de tensión, presentaría el siguiente coste (código TI-14UY, territorio peninsular):

	Coste Cables (3 fases) €/km	Inversión Total €/km	Operación y mantenimiento €/km
Al 1200 mm ²	240.000	784.156	8.138

Tabla 29. Costes de una línea subterránea 132 kV, Al 1200 mm²

Donde el coste de los cables (calculado a partir de la Tabla 23) representa el 30,6% del total de la inversión y el resto lo constituye el excavado de zanjas, mano de obra, equipos, hormigón, tubos, etc. El correcto mantenimiento de este tipo de líneas se hace imprescindible para proporcionar un buen servicio a los consumidores, lo que se ve reflejado en el coste estimado de operación y mantenimiento por km.

12.5.2 Línea subterránea 220 kV, Al 1200 mm²

El nivel de tensión corresponde a una línea de transporte (simple circuito). Presentaría el siguiente coste (territorio peninsular):

	Coste Cables (3 fases) €/km	Inversión total		Longitud
		Término variable €/km	Término fijo €	
Al 1200 mm ²	280.800	1.041.301	--	≥ 2,2 km
	280.800	750.996	638.671	< 2,2 km

Tabla 30. Costes de una línea subterránea 220 kV, Al 1200 mm²

En este caso, el coste de los cables empleados representa el 27% de la inversión total si la línea es de más (o igual) de 2,2 km de longitud y un 37% del término variable de la inversión si la línea es de menos de 2,2 km de longitud. A pesar de que el cable es tan solo un 17% más caro que el cable de 132kV anterior, el término variable (€/km) de la inversión en 220 kV es un 32,8% mayor en el caso de longitud $\geq 2,2$ km y un 4,22% menor en el caso de longitud $< 2,2$ km (aunque el término fijo aumenta el coste total de la instalación).

12.5.3 Línea subterránea 220 kV, Cu 2000 mm²

El nivel de tensión corresponde a una línea de transporte (simple circuito). Presentaría el siguiente coste (territorio peninsular):

	Coste Cables (3 fases) €/km	Inversión total		Longitud
		Término variable €/km	Término fijo €	
Cu 2000 mm ²	592.800	2.271.313	--	≥ 2,2 km
	592.800	1.905.324	805.175	< 2,2 km

Tabla 31. Costes de una línea subterránea 220 kV, Cu 2000 mm²

En este caso, el coste de los cables empleados representa el 26% de la inversión total si la línea es longitud $\geq 2,2$ km y un 31% del término variable de la inversión si la línea es de longitud $< 2,2$ km.

13 Anexo. Tablas de análisis de resultados.

En todas las tablas la intensidad está en Amperios y la sección en mm². Las celdas coloreadas que contengan valores señalan el inicio del uso del conductor segmentado.

Datos del catálogo						Resultados del Modelo	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección mm ²	Sección SP	Sección SB
115	Cobre	Capa	434	384	150	138,84	153,17
			490	422	185	174,74	195,56
			570	470	240	233,15	263,77
			644	510	300	295,19	337,71
			736	553	400	384,40	442,13
			838	595	500	501,90	580,92
			946	641	630	653,12	797,95
			1074	682	800	879,65	1081,14
			1185	701	1000	1130,97	1108,00
			1366	738	1200	1250,05	1444,59
			1462	763	1400	1451,79	1744,52
			1572	772	1600	1716,50	1870,66
			1658	785	1800	1953,31	2072,64
1699	812	2000	2076,86	2578,96			

Tabla 32. Tabla de comparación con TFKable Cobre, 115 kV, disposición en capa

Datos del catálogo						Resultados del Modelo	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección mm ²	Sección SP	Sección SB
220	Cobre	Capa	635	510	300	294,76	339,13
			725	554	400	382,54	443,84
			826	596	500	499,35	578,77
			941	635	630	662,08	749,81
			1059	673	800	872,47	979,41
			1169	702	1000	1120,75	1075,52
			1345	739	1200	1234,73	1384,00
			1548	773	1600	1690,43	1766,80
			1612	792	1800	1861,80	2035,74
			1717	797	2000	2178,87	2114,30

Tabla 33. Tabla de comparación con TFKable Cobre, 220 kV, disposición en capa

Datos del catálogo						Resultados del Modelo	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección mm ²	Sección SP	Sección SB
220	Cobre	Tresbolillo	598	574	300	297,79	305,01
			680	645	400	398,21	404,54
			769	720	500	543,77	545,50
			870	798	630	784,39	625,60
			968	877	800	744,06	799,23
			1058	944	1000	912,01	984,56
			1212	1049	1200	1287,34	1383,57
			1369	1150	1600	1851,12	1978,16
			1430	1186	1800	2148,98	2266,01
			1492	1222	2000	2510,99	2603,78

Tabla 34. Tabla de comparación con TFKable Cobre, 220 kV, disposición en tresbolillo

Datos del catálogo						Resultados del Modelo	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección mm ²	Sección SP	Sección SB
220	Aluminio	Capa	493	427	300	286,33	311,30
			566	472	400	370,86	404,73
			649	517	500	480,92	523,61
			744	563	630	627,29	681,78
			846	605	800	813,06	872,43
			954	644	1000	1049,89	1106,62
			1032	669	1200	1252,99	1296,51
			1093	687	1200	1231,31	1325,56
			1186	710	1400	1437,55	1514,34
			1285		1600	1676,85	
			1357		1800	1864,44	
			1431		2000	2069,84	

Tabla 35. Tabla de comparación con TFKable Aluminio, 220 kV, disposición en capa

Datos del catálogo						Resultados del Modelo	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección mm ²	Sección SP	Sección SB
132	Aluminio	Tresbolillo	362	356	185	168,45	171,65
			420	410	240	224,10	227,39
			474	461	300	283,65	288,60
			542	523	400	370,77	376,16
			618	591	500	487,64	492,92
			704	666	630	653,34	656,13
			795	741	800	886,35	873,00
			888	817	1000	1221,79	1178,17
			953	867	1200	1540,49	1445,87
			1018	915	1200	1241,82	1312,64
			1096	972	1400	1461,16	1547,01
			1192		1600	1775,31	
			1237		1800	1941,89	
			1296	1107	2000	2181,36	2298,64

Tabla 36. Tabla de comparación con TFKable Aluminio, 132 kV, disposición en tresbolillo. En este caso las dos celdas en gris en la columna de SB se deben a que el catálogo presentaba una incongruencia para estas secciones, pues marcaba una misma intensidad admisible.

14 Anexo. Tablas del análisis de sensibilidad

En todas las tablas la intensidad está en Amperios y la sección en mm². Las celdas coloreadas que contengan valores señalan el inicio del uso del conductor segmentado.

Incremento de sección (%) respecto a profundidad 1000 mm			
Profundidad 1500 mm		Profundidad 2000 mm	
Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB
8,14%	11,74%	13,97%	20,64%
8,33%	12,91%	14,31%	22,88%
8,66%	14,85%	14,91%	26,67%
9,04%	17,03%	15,60%	31,05%
9,63%	20,22%	16,69%	37,70%
10,48%	24,57%	18,27%	47,09%
11,64%	31,14%	20,46%	61,69%
13,39%	38,41%	23,74%	77,60%
15,09%	36,30%	26,91%	74,45%
12,20%	44,43%	21,47%	94,56%
13,10%	50,92%	23,18%	
14,31%	53,38%	25,53%	
15,40%		27,65%	
15,96%		28,74%	

Tabla 37. Incremento de sección (%) respecto a profundidad 1000mm

Variación de sección (%) al utilizar conductor segmentado (Cobre)	
Single Point	Solid Bonding
-2,22%	-1,43%
-3,57%	-2,57%
-5,66%	-4,24%
-8,86%	-6,41%
-13,06%	-9,09%
-17,63%	-11,34%
-25,27%	-13,99%
-31,86%	-15,49%
-33,03%	-15,66%
	-15,62%

Tabla 38. Variación de sección (%) al utilizar conductor segmentado (Cobre)

Intensidad (A)	Variación de sección (%) al transponer los cables en SB respecto a no transponerlos
400	-1,32%
500	-15,55%
600	-24,19%
700	-27,98%
800	-45,39%

Tabla 39. Variación de sección (%) al transponer los cables en SB respecto a no transponerlos

Intensidad (A)	Variación de sección (%) al utilizar Solid Bonding respecto Single-Point
400	1,33%
500	70,96%
600	124,82%
700	197,50%
800	362,99%

Tabla 40. Variación de sección (%) al utilizar Solid Bonding respecto Single-Point

Variación de la sección del conductor (mm ²) según la profundidad										
Características del cable					Profundidad 1000 mm		Profundidad 1500 mm		Profundidad 2000 mm	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB
115	Cobre	Capa	434	384	138,84	153,17	150,15	171,16	158,24	184,78
			490	422	174,74	195,56	189,30	220,81	199,75	240,29
			570	470	233,15	263,77	253,34	302,95	267,91	334,11
			644	510	295,19	337,71	321,86	395,23	341,23	442,59
			736	553	384,40	442,13	421,41	531,55	448,54	608,83
			838	595	501,90	580,92	554,49	723,62	593,59	854,47
			946	641	653,12	797,95	729,18	1046,40	786,74	1290,21
			1074	682	879,65	1081,14	997,40	1496,45	1088,47	1920,14
			1185	701	1130,97	1108,00	1301,67	1510,24	1435,27	1932,90
			1366	738	1250,05	1444,59	1402,61	2086,42	1518,40	2810,64
			1462	763	1451,79	1744,52	1641,92	2632,78	1788,36	
			1572	772	1716,50	1870,66	1962,09	2869,21	2154,71	
			1658	785	1953,31	2072,64	2254,10		2493,41	
			1699	812	2076,86	2578,96	2408,34		2673,73	

Tabla 42. Variación de la sección del conductor (mm²) según la profundidad

Variación de la sección del conductor (mm ²) según el tipo de cubierta										
Características del cable					Cubierta PVC		Cubierta Policloropreno		Cubierta PE	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB
220	Cobre	Capa	635	510	294,76	339,13	293,72	337,15	289,55	329,27
			725	554	382,54	443,84	381,26	441,16	376,10	430,52
			826	596	499,35	578,77	497,73	575,13	490,83	560,66
			941	635	662,08	749,81	659,98	744,88	649,78	725,29
			1059	673	872,47	979,41	869,73	972,70	854,61	946,09
			1169	702	1120,75	1075,52	1117,25	1068,59	1095,73	1041,10
			1345	739	1234,73	1384,00	1231,69	1374,79	1209,08	1338,24
			1548	773	1690,43	1766,80	1686,30	1754,74	1650,12	1706,87
			1612	792	1861,80	2035,74	1857,24	2021,72	1815,39	1966,05
			1717	797	2178,87	2114,30	2173,50	2099,71	2120,56	2041,80

Tabla 43. Variación de la sección del conductor (mm²) según el tipo de cubierta.

Variación de la sección del conductor (mm ²) según el tipo de pantalla												
Características del cable					Pantalla Aluminio (Cinta)		Pantalla Cobre (Cinta)		Pantalla Plomo (Cinta)		Pantalla Acero (Cinta)	
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB
220	Cobre	Capa	635	510	294,76	339,13	297,23	349,05	279,76	254,92	287,39	242,76
			725	554	382,54	443,84	385,53	459,26	364,20	317,10	372,59	296,33
			826	596	499,35	578,77	503,16	603,04	475,95	388,89	485,03	356,27
			941	635	662,08	749,81	667,31	787,71	630,30	469,48	639,90	421,35
			1059	673	872,47	979,41	879,98	1038,67	827,62	564,71	837,20	495,56
			1169	702	1120,75	1075,52	1131,48	1143,57	1057,80	609,46	1066,42	530,89
			1345	739	1234,73	1384,00	1246,11	1487,30	1169,34	718,69	1173,96	612,50
			1548	773	1690,43	1766,80	1709,90	1919,03	1581,78	837,19	1580,69	697,95
			1612	792	1861,80	2035,74	1884,93	2224,42	1733,83	912,50	1729,98	750,74
			1717	797	2178,87	2114,30	2209,59	2313,81	2011,21	933,54	2001,47	765,29

Tabla 44. Variación de la sección del conductor (mm²) según el tipo de pantalla

Variación de la sección del conductor (mm ²) según el tipo de conductor								
Características del cable				Conductor cableado		Conductor segmentado		
Tensión (kV)	Mat.	Disp.	Intensidad SP	Intensidad SB	Sección SP	Sección SB	Sección SP	Sección SB
220	Cobre	Capa	635	510	294,76	339,13	288,21	334,26
			725	554	382,54	443,84	368,89	432,42
			826	596	499,35	578,77	471,10	554,26
			941	635	662,08	749,81	603,42	701,78
			1059	673	872,47	979,41	758,56	890,40
			1169	702	1120,75	1213,14	923,16	1075,52
			1345	739	1652,21	1609,13	1234,73	1384,00
			1548	773	2480,83	2090,52	1690,43	1766,80
			1612	792	2780,17	2413,81	1861,80	2035,74
		1717	797		2505,60	2178,87	2114,30	

Tabla 45. Variación de la sección del conductor (mm²) según el tipo de conductor

Variación de la sección del conductor (mm ²) según la puesta a tierra de las pantallas						
Características del cable				Single-Point	Solid Bonding	Transposición (SB)
Tensión (kV)	Material	Disposición	Intensidad	Sección	Sección	Sección
220	Cobre	Capa	400	170,64	172,92	170,64
			500	186,71	319,21	269,58
			600	264,20	593,97	450,32
			700	356,75	1061,35	764,38
			800	467,20	2163,12	1181,35
			900	599,89		2069,62
			950	676,41		2806,28
			1000	678,40		
			1050	745,98		
			1100	817,50		

Tabla 46. Variación de la sección del conductor (mm²) según la puesta a tierra de las pantallas.

Variación de la sección del conductor (mm ²) según la separación entre los cables							
Características del cable					Separación 2xD _{ext}	Separación 1xD _{ext}	Separación 3xD _{ext}
Tensión (kV)	Material	Disposición	PAT Pantalla	Intensidad SP	Sección SP	Sección SP	Sección SP
220	Cobre	Capa	Single- Point	635	294,76	342,29	273,18
				725	382,54	474,91	350,89
				826	499,35	693,87	451,18
				941	662,08	1095,17	585,01
				1059	872,47	1701,82	748,97
				1169	1120,75	2409,85	932,44
				1345	1234,73	2017,69	1085,18
				1548	1690,43		1436,84
				1612	1861,80		1562,63
				1717	2178,87		1787,23

Tabla 47. Variación de la sección del conductor (mm²) según la separación entre los cables.

Intensidad (A)	Variación de sección (%) al pasar de terreno seco a terreno arenoso muy seco	Variación de sección (%) al pasar de terreno seco a terreno de piedra granítica	Variación de sección (%) al pasar de terreno seco a terreno húmedo	Variación de sección (%) al pasar de terreno seco a terreno inundado
635	40,92%	178,20%	-23,61%	-42,11%
725	42,86%	197,67%	-24,07%	-47,43%
826	45,98%	225,06%	-24,83%	-48,34%
941	50,68%	254,82%	-26,04%	-49,79%
1059	56,01%		-27,62%	-51,74%
1169	60,29%		-29,32%	-53,86%
1345	46,12%		-25,05%	-48,54%
1548	52,09%		-26,66%	-50,46%
1612	54,30%		-27,28%	-51,20%
1717			-28,41%	-52,55%

Tabla 48. Variación de sección (%) del conductor a pasar de terreno seco a otro tipo de terreno.

Variación de la sección del conductor (mm ²) según el tipo de terreno									
Características del cable					Terreno seco	Terreno arenoso muy seco	Terreno de piedra granítica	Terreno húmedo	Terreno inundado
Tensión (kV)	Material	Disposición	PAT Pantalla	Intensidad	Sección SP	Sección SP	Sección SP	Sección SP	Sección SP
220	Cobre	Capa	Single-Point	635	294,76	415,36	820,04	225,17	170,64
				725	382,54	546,52	1138,71	290,46	201,11
				826	499,35	728,93	1623,18	375,34	257,97
				941	662,08	997,61	2349,18	489,70	332,40
				1059	872,47	1361,15		631,47	421,09
				1169	1120,75	1796,40		792,20	517,12
				1345	1234,73	1804,16		925,42	635,40
				1548	1690,43	2570,90		1239,76	837,41
				1612	1861,80	2872,68		1353,86	908,49
1717	2178,87			1559,78	1033,77				

Tabla 49. Variación de la sección del conductor (mm²) según el tipo de terreno.

15 Anexo. Organización de la herramienta

El objetivo de este anexo es proporcionar información sobre las distintas secciones que componen la herramienta y qué parámetros se presentan o se han de introducir en ellas.

15.1 Inicio

Esta sección es la pantalla inicial de la herramienta. A modo de portada, en ella se indican el título del proyecto, el autor y la directora del mismo.

Universidad Pontificia de Comillas. E.T.S.I ICAI

"Desarrollo de una herramienta informática para el dimensionamiento de cables aislados de alta tensión"

Trabajo Fin de Grado

Autor: Néstor Rodríguez Pérez

Directora: M.^a Inmaculada Blázquez García

Acceder a la
introducción de datos

15.2 Entrada de datos

En esta sección se diferencian dos columnas: *Parámetros de diseño* y *Constantes y datos derivados de las especificaciones de entrada*.

En *Parámetros de diseño* el usuario deberá introducir los datos a partir de los cuales se realizará el dimensionamiento del cable aislado necesario. Dentro de esta columna, los datos a introducir se clasifican en distintos apartados. Las opciones y explicación de cada uno de los datos pedidos se exponen en el apartado de *Parámetros de entrada*.

- Datos de la línea:
 - Frecuencia del sistema (Hz).
 - Tensión nominal (kV).
 - Intensidad máxima en servicio permanente (A).
 - Longitud de la línea (Km).
 - Corriente de cortocircuito monofásico (kA).
 - Duración del cortocircuito monofásico (s).

- Selección del conductor y tipo:
 - Material conductor.
 - Tipo de conductor.
- Selección de aislamiento:
 - Material.
- Selección de cubierta:
 - Material.
- Selección de pantalla:
 - Material.
 - Tipo.
 - Sección del hilo en mm² (si aplica).
- Datos de la instalación:
 - Distancia superficie-eje central del cable (mm).
 - PAT de pantallas.
 - Disposición de las fases.
 - Modos de instalación.
 - Situación de los cables o tubos.
 - Separación entre cables (veces el $D_{\text{exterior cable}}$).
 - Si aplica:
 - Material del tubo (si aplica).
 - D_{interior} del tubo (en veces el D_{exterior} del cable).
 - Espesor del tubo (mm).
 - T^{a} media del aire entre cable y tubo (°C).
 - Separación entre tubos (veces el $D_{\text{exterior tubo}}$)(si aplica).
 - Resistividad térmica (K·m/W) del material que constituirá el bloque, si aplica (material por defecto, hormigón).
 - Profundidad de colocación del centro del bloque de conductos (mm).
 - x Menor dimensión del bloque en mm.
 - Y mayor dimensión del bloque en mm.
 - Tipo de terreno (ITC-LAT-06).
 - T^{a} Terreno (°C).

En *Constantes y datos derivados de las especificaciones de entrada* se le mostrará al usuario datos y constantes relacionados con los parámetros introducidos, a fin de que disponga de la mayor información posible sobre qué valores se utilizarán en los cálculos:

- Características generales de la línea:
 - U_s .
 - Capacidad.
 - ω .
 - L_c
 - Potencia aparente.
- Características del material conductor escogido:
 - Resistividad ρ_{20} .
 - Coeficiente $T^a \alpha_{20}$.
- Características del aislamiento escogido:
 - ϵ_r
 - $T_{m\acute{a}x}$ Servicio ($^{\circ}C$).
 - $T_{m\acute{a}x}$ Cortocircuito ($^{\circ}C$).
 - Tensión máxima (kV).
 - ρ ($^{\circ}C \cdot m/W$).
 - $tg\delta$.
 - Rigidez dieléctrica (kV/cm).
 - Flexibilidad.
 - Resistencia a altas Temp.
 - Resistencia al agua.
 - Descargas parciales.
- Características de la cubierta escogida:
 - ρ ($^{\circ}C \cdot m/W$).
- Características de la pantalla escogida:
 - K.
 - β .
 - Sección necesaria calculada.
 - Coeficiente $T^a \alpha_{20}$.
 - Resistividad ρ_{20} .
 - N° de hilos (si aplica).

- Resistencia R_s (a T^a máxima).
- Características del terreno:
 - ρ ($K \cdot m/W$).

Entrada de datos

Inicio
Introducción de datos
Pérdidas
R.Térmicas
Resultados

Parámetros de diseño	Constantes y datos derivados de las especificaciones de entrada
<p>Datos de la línea</p> <p>Frecuencia del sistema (Hz): 50 Tensión Nominal (kV): 300 Intensidad máxima en servicio permanente(A): 800 Longitud de la línea (Km): 5 Corriente de cortocircuito monofásico (kA): 19 Duración del cortocircuito monofásico (s): 1</p> <p>Selección del conductor y tipo</p> <p>Material conductor: ALUMINIO Tipo de conductor: 6 SEGMENTOS (ALUMINIO)</p> <p>Selección de aislamiento</p> <p>Material: XLPE</p> <p>Selección de cubierta</p> <p>Material: PVC</p> <p>Selección de pantalla</p> <p>Material: ALUMINIO Tipo: CINTA Sección del hilo en mm² (si aplica): 3 <input type="checkbox"/> Por defecto</p>	<p>Características generales de la línea:</p> <p>U_s: 345 kV Tensión máxima de servicio, Capacidad: 0,19 $\mu F/Km$ ω: 314,16 rad/s L_c: 77,4 Km (Longitud Crítica) Potencia aparente: 415,69 MVA</p> <p>Características del material conductor escogido:</p> <p>Resistividad ρ_{20}: 2,83E-08 $\Omega \cdot m$ Coeficiente T^{β} α_{20}: 0,00403 K^{-1}</p> <p>Características del aislamiento escogido:</p> <p>ϵ_r: 2,3 (Permitividad relativa) $T_{máx}$ Servicio ($^{\circ}C$): 90 $T_{máx}$ Cortocircuito ($^{\circ}C$): 250 Tensión máxima (kV): 500 APTO ρ ($^{\circ}C \cdot m/W$): 3,5 (Resistividad térmica) $tg\delta$: 0,001 (Factor de pérdidas dieléctricas)</p> <p>Rigidez dieléctrica (kV/cm): 300 Flexibilidad: MALA Resistencia a altas Temp.: EXCELENTE Resistencia al agua: REGULAR</p>

Imagen 14. Captura de pantalla del apartado de Entrada de datos. Mitad superior

<p>Datos de la instalación</p> <p>Distancia superficie-eje central del cable(mm): 1000 PAT de pantalla: Single-point (SP) Disposición de las fases: TRESBOLILLO Modo de instalación: DIRECTAMENTE ENTERRADO Situación de los cables o tubos: EN CONTACTO</p> <hr/> <p>Separación entre cables (veces el $D_{exterior}$ cable): 1</p> <hr/> <p>Material del tubo (si aplica): FIBRA</p> <p>$D_{interior}$ del tubo (en veces el $D_{exterior}$ del cable): 1,5 <input type="checkbox"/> Por defecto Espesor del tubo (mm): 5 <input type="checkbox"/> Por defecto T^{β} media del aire entre cable y tubo ($^{\circ}C$): 30</p> <hr/> <p>Separación entre tubos (veces el $D_{exterior}$ tubo) (si aplica): 1</p> <hr/> <p>Resistividad térmica ($K \cdot m/W$) del material que constituirá el bloque, si aplica (material por defecto, hormigón): 1 <input type="checkbox"/> Por defecto</p> <hr/> <p>Profundidad de colocación del centro del bloque de conductos (mm): 400 x Menor dimensión del bloque en mm: 400 y Mayor dimensión del bloque en mm: 1200</p> <hr/> <p>Tipo de terreno (ITC-LAT-06): SECO T^{β} Terreno ($^{\circ}C$): 20</p>	<p>Descargas parciales: BUENA</p> <p>Características de la cubierta escogida:</p> <p>ρ ($^{\circ}C \cdot m/W$): 6 (Resistividad térmica)</p> <p>Características de la pantalla escogida:</p> <p>K: 148 β: 228 Sección necesaria calculada: 201,09 mm^2 Coeficiente T^{β} α_{20}: 0,00403 K^{-1} Resistividad ρ_{20}: 2,84E-08 $\Omega \cdot m$ Nº de hilos (si aplica): 68 Resistencia R_s a T^{β} máxima: 0,000181 Ω/m</p> <p>Características del terreno:</p> <p>ρ ($K \cdot m/W$): 1</p>
--	--

CALCULAR

Imagen 15. Captura de pantalla del apartado de Entrada de datos. Mitad inferior

15.3 Cálculo de pérdidas

En esta sección se muestran todos los parámetros que intervienen en el cálculo de las pérdidas de potencia activa y los resultados de éstos. Las pérdidas se refieren a cada cable individualmente. En algunos casos, los datos mostrados se repiten en distintas partes de la sección; esto es así para facilitar el visionado y la comprobación de resultados.

- Cálculo de pérdidas en el conductor:
 - Efecto piel:
 - K_s
 - X_s
 - Factor y_s
 - Efecto proximidad:
 - K_p
 - X_p
 - Factor y_p
 - Resistencia en CC a $T^{\text{a}}_{\text{máx}}$ de servicio.
 - Resistencia en CA a $T^{\text{a}}_{\text{máx}}$ de servicio.
 - Pérdidas en el conductor (por unidad de longitud).
 - Total pérdidas en el conductor.
- Pérdidas dieléctricas en el aislamiento.
- Cálculo de pérdidas en la pantalla:
 - Hipótesis de tres cables unipolares en TRESBOLILLO con la pantalla en Solid Bonding.
 - R_s (Ω/m).
 - X (Ω/m).
 - λ''_1
 - λ'_1
 - Hipótesis de tres cables unipolares en CAPA con la pantalla en Solid Bonding (peor caso).
 - R_s (Ω/m).
 - X (Ω/m).
 - X_m (Ω/m).
 - P
 - Q

- λ''_1
- λ'_1
- Hipótesis de tres cables unipolares en CAPA, transposición regular, pantallas en Solid Bonding..
 - R_s (Ω/m).
 - X (Ω/m).
 - λ''_1
 - λ'_1
- Hipótesis de cables unipolares con pantalla en Single-Point o Cross-Bonding.
 - ρ_{Temp} Servicio
 - D_{ext} pantalla
 - Espesor Pantalla.
 - M
 - g_s
 - β_1
 - Tresbolillo:
 - λ_0
 - Δ_1
 - Δ_2
 - λ''_1
 - λ'_1
 - Capa (peor caso):
 - λ_0
 - Δ_1
 - Δ_2
 - λ''_1
 - λ'_1
- Pérdidas Conductores Segmentados.
 - Disposición.
 - R_s (Ω/m).
 - X (Ω/m).
 - M

- N
- Factor F.

Finalmente, al final de esta sección se muestran los factores de pérdidas en la pantalla por corrientes de Foucault y de circulación para las características introducidas por el usuario.

Cálculo de pérdidas

Inicio Introducción de datos Pérdidas R.T

Cálculo de pérdidas en el conductor

Efecto piel		Efecto proximidad			
K_s :	0,12	K_p :	0,37	Resistencia en CC a T ^o máx de servicio:	4,6E-05 Ω/m
x_s :	0,57291226	x_p :	1,006001	Resistencia en CA a T ^o máx de servicio:	4,7E-05 Ω/m
Factor y_s :	0,00056086	Factor y_p :	0,024424	Pérdidas en el conductor:	30,1379 W/m
				Total pérdidas en el conductor:	150689 W

(Efectos piel y proximidad incluidos)

Pérdidas dieléctricas en el aislamiento: 1,79071 W/m

Cálculo de pérdidas en la pantalla

Hipótesis de tres cables unipolares en TRESBOLILLO con la pantalla en Solid Bonding			Hipótesis de tres cables unipolares en CAPA con la pantalla en Solid Bonding (peor caso)			Hipótesis de tres cables unipolares en CAPA, transposición regular, pantallas en Solid Bonding					
R_s (Ω/m):	0,00018	λ''_1 :	0,07358	R_s (Ω/m):	0,00018107	P:	9,190E-05	R_s (Ω/m):	0,00018107	λ''_1 :	0,1358389
X (Ω/m):	4,8E-05	λ'_1 :	0,25593	X (Ω/m):	4,8351E-05	Q:	3,3834E-05	X_1 (Ω/m):	6,2869E-05	λ'_1 :	0,4136747
				X_m (Ω/m):	4,355E-05	λ''_{1m} :	0,13583894				
						λ'_{1m} :	0,70099223				

Las condiciones de la instalación estudiada son: Tres cables unipolares en TRESBOLILLO con la pantalla en Single-point (SP)
 Los factores de pérdidas que se producirán en la pantalla serán:

Corrientes de circulación λ'_1 :	0
Corrientes de Foucault λ''_1 :	0,07883137

Imagen 16. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de pérdidas. Mitad izquierda



Hipótesis de cables unipolares con pantalla en Single Point o Cross-Bonding			Pérdidas Conductores Segmentados		
$P_{Temp\ Servicio}$: 3,641E-08	Espesor Pantalla: 1,013509	g_s : 1,0037273	Disposición: TRESBOLILLO	$X (\Omega/m)$: 4,8351E-05	N : 3,7448549
$D_{ext\ pantalla}$: 64,1701441	m : 0,1735026	β_1 : 104,1261	$R_s (\Omega/m)$: 0,0001811	M : 3,74485489	Factor F: 0,9334396
Tresbolillo		Capa (peor caso)			
λ_0 : 0,01881232	λ_0 : 0,0376246				
Δ_1 : 0,08520205	Δ_1 : 0,0018899				
Δ_2 : 0	Δ_2 : 0				
λ''_1 : 0,07883137	λ''_1 : 0,1455252				
λ'_1 : 0	λ'_1 : 0				

Imagen 17. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de pérdidas. Mitad derecha

15.4 Cálculo Resistencias Térmicas

En esta sección se muestran todos los parámetros que intervienen en el cálculo de las resistencias térmicas de las distintas capas y el valor final de éstas.

- Resistencia térmica del aislamiento del conductor. T1
 - Relación $D_{\text{aislamiento}}/D_{\text{conductor}}$
 - Resistividad térmica ($^{\circ}\text{C}\cdot\text{m}/\text{W}$)
 - Resistencia T1
- Resistencia térmica de la cubierta. T3
 - Relación $D_{\text{exterior}}/D_{\text{interior}}$.
 - Resistividad térmica ($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).
 - Resistencia T3
- Resistencia térmica del medio exterior. T4. Hipótesis de cables directamente enterrados:
 - Grupo directamente enterrado en el terreno, en tresbolillo y en contacto:
 - ρ_T (resistividad térmica terreno)($\text{K}\cdot\text{m}/\text{W}$).
 - D_{exterior} del cable (mm)
 - h_0 Distancia superficie-eje cable (mm)
 - $u[f(h_0, D_{\text{exterior}})]$

- Resistencia T4.
 - Grupo directamente enterrado en el terreno, en capa y en contacto:
 - ρ_T (resistividad térmica terreno)(K·m/W).
 - D_{exterior} del cable (mm)
 - h_0 Distancia superficie-eje cable (mm)
 - $u[f(h_0, D_{\text{exterior}})]$
 - Resistencia T4.
 - Grupo directamente enterrado en el terreno, en capa y cables igualmente separados:
 - ρ_T (resistividad térmica terreno)(K·m/W).
 - D_{exterior} del cable (mm)
 - h_0 Distancia superficie-eje cable (mm)
 - Separación adyacente s (mm)
 - $u[f(h_0, D_{\text{exterior}})]$
 - Resistencia T4.
- Resistencia térmica del medio exterior. T4. Hipótesis de cables en conductos o tubos:
 - Resistencia térmica entre cable y conducto (tubo) T4':
 - D_{exterior} del cable (mm)
 - Constante U
 - Constante V
 - Constante Y
 - Temperatura media del aire entre cable-tubo (°C)
 - Resistencia T4'
 - Resistencia térmica propia del conducto (tubo) T4'':
 - ρ_T (resistividad térmica conducto) (K·m/W).
 - Espesor del tubo (mm)
 - D_d (Diámetro interior del tubo en mm)
 - D_o (Diámetro exterior del tubo en mm)
 - Resistencia T4''.
 - Resistencia térmica externa al conducto (tubo) T4''':
 - ρ_T (resistividad térmica conducto) (K·m/W).
 - h_0 Distancia superficie-eje cable (mm)
 - $u[f(h_0, D_{\text{exterior}})]$

- Separación adyacentes (mm)
- D_{exterior} del tubo (mm)
- N° Cables en el bloque (si aplica)
- Hipótesis de tubos enterrados directamente en el terreno:
 - T4''' En capa, equidistantes.
 - T4''' En tresbolillo, en contacto.
 - T4''' En capa, en contacto.
- P_C (resistividad térmica del hormigón) (K·m/W).
- Profundidad de colocación respecto al centro del bloque de conductos (mm)
- $u[f(\text{profundidad}, r_b)]$
- x Menor dimensión del bloque en mm.
- y Mayor dimensión del bloque en mm.
- r_b radio equivalente del bloque de hormigón (mm)
- Factor de corrección calculado.
- Hipótesis de tubos enterrados en bloque de hormigón:
 - T4''' En capa, equidistantes.
 - T4''' En capa, en contacto.
 - T4''' En tresbolillo, en contacto.

Al final de esta sección se mostrará la resistencia térmica T4 total que presenta la instalación introducida por el usuario.

Cálculo R. Térmicas

Inicio
Introducción de datos
Pérdidas
R.Térmicas
Resultados

Resistencia térmica del aislamiento del conductor. T1	
Relación $D_{\text{aislamiento}}/D_{\text{conductor}}$:	1,96
Resistividad térmica (K·m/W):	3,5
Resistencia T1:	0,37513 (K·m/W)

Resistencia térmica de la cubierta. T3	
Relación $D_{\text{exterior}}/D_{\text{interior}}$:	1,062334284
Resistividad térmica (K·m/W):	6
Resistencia T3:	0,0577433 (K·m/W)

Imagen 18. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de Resistencias Térmicas. Parte superior.

Resistencia térmica del medio exterior. T4. Hipótesis de cables directamente enterrados					
Grupo Directamente enterrado en el terreno, en trespelillo y en contacto		Grupo Directamente enterrado en el terreno, en capa y en contacto		Grupo Directamente enterrado en el terreno, en capa y cables igualmente separados	
ρ_T (resistividad térmica terreno)(K-m/W):	1	ρ_T (resistividad térmica terreno)(K-m/W):	1	ρ_T (resistividad térmica terreno)(K-m/W):	1
$D_{exterior}$ del cable (mm):	68,17014411	$D_{exterior}$ del cable (mm):	68,17014411	$D_{exterior}$ del cable (mm):	68,17014411
h_0 Distancia superficie-eje cable (mm):	1000	h_0 Distancia superficie-eje cable (mm):	1000	h_0 Distancia superficie-eje cable (mm):	1000
u [(1/h ₀ D _{exterior}):]	29,33835664	u [(1/h ₀ D _{exterior}):]	29,33835664	u [(1/h ₀ D _{exterior}):]	29,33835664
Resistencia T4:	1,643454445	Resistencia T4:	1,588220397	Resistencia T4:	1,723760239

Nota: Eje del cable en disposición trespelillo se refiere al eje de la configuración trifásica.

Imagen 19. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de Resistencias Térmicas. Parte central.

Resistencia térmica entre cable y conducto (tubo) T4'		Resistencia térmica propia del conducto (tubo) T4''	
$D_{exterior}$ del cable (mm):	68,17014411	ρ_T (resistividad térmica conducto)(K-m/W):	4,8
Constante U:	5,2	Espesor del tubo (mm):	5
Constante V:	0,91	D_e (Diámetro interior del tubo en mm):	102,2552162
Constante Y:	0,01	D_o (Diámetro exterior del tubo en mm):	112,2552162
Temperatura media del aire entre cable-tubo(°C):	30		
Resistencia T4':	0,562248023	Resistencia T4'':	0,071278385

La instalación de estudio es: Cable en **TRESPELILLO** **DIRECTAMENTE ENTERRADO** **EN CONTACTO**
Resistencia térmica del medio T4: 1,643454445 (K-m/W)

Imagen 20. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de Resistencias Térmicas. Parte inferior izquierda.

Resistencia térmica del medio exterior. T4. Hipótesis de cables en conductos o tubos					
Resistencia térmica externa al conducto (tubo) T4'''			Resistencia térmica interna al conducto (tubo) T4''''		
ρ_T (resistividad térmica terreno)(K-m/W):	1	Separación adyacente s (mm):	112,2552	ρ_c (resistividad térmica del hormigón)(K-m/W):	1
h_0 Distancia superficie-eje cable (mm):	1000	$D_{exterior}$ del tubo (mm):	68,17014	Profundidad de colocación respecto al centro del bloque de conductos (mm):	400
u [(1/h ₀ D _{exterior}):]	29,338357	# Cables en el bloque (si aplica):	3	r_c radio equivalente del bloque de hormigón	286,86729
Hipótesis de tubos enterrados directamente en el terreno			u_0 [(1/profundidad, r ₀):]	Factor de corrección calculado:	
T4''' En capa, equidistantes: 1,5653132			Hipótesis de tubos enterrados en bloque de hormigón		
T4''' En trespelillo, en contacto: 1,6434544			T4'''' En capa, equidistantes: 1,56531316	T4'''' En capa, en contacto: 1,5882204	T4'''' En trespelillo, en contacto: 1,643454445

Imagen 21. Captura de pantalla del apartado de Cálculo de Resistencias Térmicas. Parte inferior derecha.

15.5 Resultados

En la página de Resultados el usuario obtendrá las dimensiones del cable y datos relacionados:

- Relaciones dimensionales entre capas:
 - $d_{aislamiento}/d_{conductor}$
 - $d_{ext.pantalla}/d_{aislamiento}$
- Igualdades que se han de cumplir:
 - Sección Pantalla Estimada=Sección Pantalla Calculada
 - Intensidad máxima admisible = Intensidad nominal
 - Campo eléctrico ≤ Rigidez Dieléctrica Aislamiento

En cada igualdad, se indicará con el color verde si la igualdad se cumple y con el color rojo si no se cumple.

- Dimensiones del conductor:
 - Diámetro d_c
 - Sección.
- Dimensiones del aislamiento:
 - Diámetro exterior.
 - Espesor.
- Dimensiones de la pantalla:
 - Sección.
 - Diámetro exterior.
 - Diámetro medio.
 - Espesor efectivo (el real puede ser diferente en caso de usar el tipo hilo)
- Dimensiones de la cubierta:
 - Diámetro exterior.
 - Espesor.
- Sección del cable.
- Valores nominales:
 - Intensidad.
 - Rigidez dieléctrica.
 - Sección de la pantalla.
- Datos de interés sobre el cable obtenido:
 - Pérdidas conductor.
 - Pérdidas aislamiento.
 - Pérdidas pantalla.
 - R_{tca} a temp. Servicio.
 - Capacidad.
 - Inductancia.
- Estimación del precio del conductor:
 - Precio del cobre (modificable).
 - Precio del aluminio (modificable).
 - Precio estimado del conductor.

Resultados

Inicio
Introducción de datos

Relaciones dimensionales entre capas:

$d_{\text{aislamiento}}/d_{\text{conductor}}$:	1,96
$d_{\text{ext.pantalla}}/d_{\text{aislamiento}}$:	1,033

Igualdades que se han de cumplir:

Sección Pantalla Estimada=Sección Pantalla Calculada:	201,09 mm ²
Intensidad máxima admisible = Intensidad nominal:	800 A
Campo eléctrico ≤ Rigidez Dieléctrica Aislamiento:	186,67 KV/cm

■ Se cumplen las igualdades ■ No se cumplen las igualdades

Dimensiones del conductor:

Diámetro d_c:	31,69 mm
Sección:	788,752 mm ²

Dimensiones del aislamiento:

Diámetro exterior:	62,14 mm
Espesor:	15,23 mm

Dimensiones de la pantalla:

Sección:	201,09 mm ²
Diámetro exterior:	64,17 mm
Diámetro medio:	63,16 mm
Espesor:	1,01 mm

Dimensiones de la cubierta:

Diámetro exterior:	68,17 mm
Espesor:	2 mm

Sección del cable: 3649,88 mm²

Recalcular

Imagen 22. Captura de pantalla del apartado de Resultados. Mitad izquierda.

Pérdidas
R.Térmicas
Resultados

Valores nominales

Intensidad:	800 A
Rigidez dieléctrica:	300 KV/cm
Sección Pantalla:	201,093 mm ²

Datos de interés sobre el cable obtenido

Pérdidas conductor:	30,14 W/m
Pérdidas aislamiento:	1,79 W/m
Pérdidas pantalla:	2,38 W/m
R_{CA} a temp. Servicio:	4,71E-05 Ω/m
Capacidad:	0,19 μF/Km
Inductancia:	0,00034 H/Km

Estimación del precio del conductor

Precio del cobre:	6,83 €/kg
Precio del aluminio:	2,279 €/kg
Precio estimado del conductor:	4,85 €/m

Imagen 23. Captura de pantalla del apartado de Resultados. Mitad derecha.

16 Bibliografía

- [LIEN18] Lienert, P., B. Sütterlin, y M. Siegrist. “Public Acceptance of High-Voltage Power Lines: The Influence of Information Provision on Undergrounding”, Energy Policy 112, pp. 305-315, Enero 2018.
- [INMR15] INMR, “Spanish Grid Operator Selected 400 kV Cable System for Airport Expansion Project”, www.inmr.com,
Enlace: <http://www.inmr.com/spanish-grid-operator-selects-400-kv-cable-system-airport-expansion-project/#!prettyPhoto>,
Visitado 27 Diciembre 2017, Publicado 15 Agosto 2015.
- [MENO16] Diario Digital Menorca Al Día, “Red Eléctrica Española indica que el vertido de Cala en Bosch empezó el viernes”, www.menorcaaldia.com,
Enlace: <http://menorcaaldia.com/2016/07/10/red-electrica-espanola-indica-que-el-vertido-de-cala-en-bosch-empezo-el-viernes/>
Visitado 24 Abril 2018, Publicado 2016
- [PRYS12] Prysmian Club, “Cables con aislamiento de XLPE para Alta (AT) y Muy Alta Tensión (MAT)”, Prysmian Group, www.prysmianclub.es,
Enlace: <http://www.prysmianclub.es/es/articulo/cables-con-aislamiento-de-xlpe-para-alta-at-y-muy-alta-tension-mat>
Visitado 27 Diciembre 2017, Publicado 22 Marzo 2012
- [PRYS17] Prysmian Club, “Prysmian lanza CableApp, la nueva aplicación móvil para el cálculo de sección económica y ecológica para cables de Baja y Media Tensión”, Prysmian Group, www.prysmianclub.es,
Enlace: <http://www.prysmianclub.es/es/articulo/prysmian-lanza-cableapp-la-nueva-aplicacion-movil-para-el-calculo-de-seccion-economica-y-ecologica-para-cables-de-baja-y-media-tension>
Visitado 29 Diciembre 2017. Publicado 27 Marzo 2017
- [ABEL_] Abelma Chile, “Cables de media y alta tensión”, www.abelmachile.cl
Enlace: <http://www.abelmachile.cl/cables-de-media-y-alta-tension/>
Visitado 27 Diciembre 2017. Fecha de publicación no disponible.
- [ELAN_] Eland Cables, “Cables de PVC”, www.elandcables.com

Enlace: <https://www.elandcables.com/es/electrical-cable-and-accessories/cables-by-type/pvc-cable>

Visitado 23 Febrero 2018. Fecha de publicación no disponible.

- [BLOG14] Blogplastics, “Tubos corrugados de PE para la protección de cables (TPC)”, www.blogplastics.com,
Enlace: <http://www.blogplastics.com/tubos-corrugados-de-pe-para-la-proteccion-de-cables-tpc/>
Visitado 7 Marzo 2018. Publicado 29 Abril 2014
- [GENE__] General Cable, “Soluciones para cables subterráneos de alta y extra-alta tensión” Catálogo de SILEC Brand.
- [TFKA__] The High Voltage Team, TELE-FONIKA Kable Sp. Z o.o.S.K.A (TFKable), “The pathway to power. High-voltage cables”, Edition 1, Cracow (Poland).
- [SIMO11] Simón Comín, P., F. Garnacho Vecino, J. Moreno Mohíno, A. González Sanz, “Cálculo y diseño de líneas eléctricas de alta tensión. Aplicación al Reglamento de Líneas de Alta Tensión (RLAT)”, Ibergarceta Publicaciones S.L, Gas Natural Fenosa, pp. 786-873, Madrid, 2011.
- [PRIE__] Prieto Monterrubio, J. “Tema: Tecnología de líneas de cables aislados”, perteneciente al Módulo de líneas de transporte de energía eléctrica del curso de Especialista en Proyecto y Construcción de Infraestructuras eléctricas de Alta Tensión de la Universidad Pontificia de Comillas, Structuralia, Madrid, Fecha de publicación no disponible.
- [DIEZ__] Díez Osorio, A. “Tema: Construcción de cables aislados”, perteneciente al Módulo de líneas de transporte de energía eléctrica del curso de Especialista en Proyecto y Construcción de Infraestructuras eléctricas de Alta Tensión de la Universidad Pontificia de Comillas, Structuralia, Madrid, Fecha de publicación no disponible.
- [COMI__] Universidad Pontificia de comillas, “Capítulo 9: Líneas eléctricas con cables aislados”, transparencias pertenecientes al Programa de líneas eléctricas de transporte de la asignatura Centrales, Subestaciones y líneas del curso 2017-2018 del Grado en Ingeniería Electromecánica

- [IBER02] Iberinco, “Líneas subterráneas de alta tensión”, Bilbao-Madrid, Diciembre de 2002.
- [CENT08] Cables de energía y de telecomunicaciones S.A (CENTELSA), “Cables y tecnología. Cables para media tensión”, Boletín Técnico, Yumbo (Colombia), Abril 2008.
- [BATE16] Bates, C., K. Malmedal, y D. Cain. “Cable Ampacity Calculations: A Comparison of Methods”. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 52, n. ° 1, pp. 112-118, Enero 2016.
- [AIEE62] American Institute of Electrical Engineers (AIEE), Insulated Power Cable Engineers Association (IPCEA) “Power cable ampacities”, American Institute of Electrical Engineers, Nueva York, 1962.
- [IEEE94] IEEE Std. 835-1994, “IEEE Standard Power Cable Ampacity Tables”, Septiembre 1994.
- [ZARC14] Zarchi, D.A., M.M. Haji y B.Vahidi. “Optimal Configuration of Underground Cables to Maximise Total Ampacity Considering Current Harmonics”. IET Generation, Transmission & Distribution vol.8, n.º 6, pp. 1090-1097, 1 Junio 2014
- [GOUD11] Gouda, O.E., A.Z. El Dein, y G.M. Amer. “Effect of the Formation of the Dry Zone Around Underground Power Cables on Their Ratings”. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 26, n.º 2, pp. 972-978, Abril 2011.
- [METW13] Metwally, I. A., A. H. Al-Badi, y A. S. Al Farsi. “Factors Influencing Ampacity and Temperature of Underground Power Cables”, Electrical Engineering vol. 95, n.º 4, pp.383-392, Diciembre 2013
- [TEMA18] Temáticas.org, “Precio Cobre”, www.tematicas.org,
Enlace: <http://www.tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-cobre/>
Visitado 17 Mayo 2018. Actualización diaria.
- [TEMA18]’ Temáticas.org, “Precio Aluminio”, www.tematicas.org,

Enlace: <http://www.tematicas.org/indicadores-economicos/economia-internacional/precios/precio-aluminio/>

Visitado 17 Mayo 2018. Actualización diaria.

- [-] ITC-LAT-06
- [-] UNE 21144-1-1:2012
- [-] UNE 21144-2-1:1997
- [-] UNE 21144-2-1/1M:2002
- [-] UNE 21144-2-1:1997/2M:2007
- [-] BOE-A-2015-13487
- [-] BOE-A-2015-13488
- [-] BOE-A-2001-23636