

Proyecto Fin de Grado

Ingeniería de la Energía

Estudio termoeléctrico de cables aéreos para redes mixtas DC/AC

Autor: Ana Sánchez Márquez

Tutor: Manuel Barragán Villarejo

Andrei Mihai Gross Muresan

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

Sevilla, 2020



Proyecto Fin de Grado
Ingeniería de la Energía

Estudio termoeléctrico de cables aéreos para redes mixtas DC/AC

Autor:

Ana Sánchez Márquez

Tutor:

Manuel Barragán Villarejo
Profesor Ayudante Doctor

y

Andrei Mihai Gross Muresan
Personal Técnico de Investigación

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

Sevilla, 2020

Proyecto Fin de Grado: Estudio termoeléctrico de cables aéreos para redes mixtas DC/AC

Autor: Ana Sánchez Márquez

Tutor: Manuel Barragán Villarejo y Andrei Mihai Gross Muresan

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

Agradecimientos

Quiero aprovechar estas líneas para agradecer a mis tutores la ayuda y atención ofrecida, y por haberme permitido desarrollar este trabajo con normalidad, a pesar de las circunstancias.

A todos mis compañeros y amigos, a los que siempre recordaré, por haberme tendido su mano siempre que lo he necesitado a lo largo de esta etapa, y por los buenos momentos vividos.

A mi familia, en especial a mis padres y hermana, por confiar en mí cuando ni yo misma lo hacía, por todo lo que siempre me han dado, y por su apoyo incondicional.

Y, por último, a Antonio, por su paciencia, cariño y comprensión, en todos los aspectos y en todas las circunstancias. Gracias.

Ana Sánchez Márquez

Sevilla, 2020

Resumen

Aspectos como el crecimiento de la población mundial y el desarrollo tecnológico, así como la preocupación por el cambio climático, están cambiando la manera en que se genera y consume la energía. En el ámbito urbano, están comenzando a adquirir importancia la movilidad eléctrica, y los sistemas de autoconsumo conectados a red, en prácticamente su totalidad mediante energía fotovoltaica. Ambas tecnologías tienen en común el empleo de la corriente continua, bien a la hora de generar y almacenar como es el caso de la fotovoltaica (FV), o de consumir para realizar la carga en el del vehículo eléctrico (VE). Por lo que cabe preguntarse si no habría una manera más eficaz de configurar las redes de distribución de baja tensión adaptándose a los requerimientos actuales.

En este trabajo se realiza el estudio termoeléctrico de una red aérea híbrida posada sobre fachada con el objetivo de valorar el incremento de potencia que se produciría con respecto a una distribución en alterna. Para ello, se utilizará un algoritmo que en función de la corriente que circule por los conductores, continua o alterna, y la disposición de los cables, proporcione la temperatura alcanzada. El algoritmo se basa en un software de elementos finitos FEMM gestionado mediante una interfaz realizada en Matlab. Este análisis proporcionará cuanta corriente de cada tipo ha de circular por el cable para obtener la máxima transferencia de potencia posible en cada una de las configuraciones propuestas, cumpliendo siempre con el criterio térmico.

Abstract

Aspects such as world population growth and technological development, as well as the raising concern about climate change, are changing the way in which energy is generated and consumed. In urban areas, electric mobility and self-consumption systems connected to the grid are beginning to gain importance, most of them using photovoltaic energy. Both technologies have in common the use of direct current, either when generating and storing, as is the case with photovoltaics (PV), or consuming to charge the electric vehicle (EV). As a result, it is worth wondering if there is a more efficient way to configure low voltage distribution network adapted to current requirements.

In this work, the thermoelectric study of a hybrid aerial network perched on facade is carried out to assess the increase in power that would occur with respect to an alternating distribution. To do this, an algorithm will be used that, depending on the current flowing through the conductors, direct or alternating, and the arrangement of the cables, provides the temperature reached. The algorithm is based on a finite element software FEMM managed through an interface made in Matlab. This analysis will provide how much current of each type must flow through the cable to obtain the maximum possible power transfer in each of the proposed configurations, always complying with the thermal criteria.

Agradecimientos	vii
Resumen	ix
Abstract	xi
Índice	xiii
Índice de Tablas	xv
Índice de Figuras	xvii
Notación	xix
1 Introducción	1
1.1 <i>Protocolos</i>	4
1.1.1 Protocolo de Kioto	4
1.1.2 Acuerdo de París	5
1.1.3 Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020	5
1.1.4 Objetivo para 2030	6
1.1.5 Estrategia a largo plazo para 2050	6
1.2 <i>Generación distribuida (GD)</i>	7
1.2.1 Normativa	8
1.3 <i>Almacenamiento</i>	9
1.4 <i>Vehículos eléctricos (VE)</i>	10
1.5 <i>Redes inteligentes</i>	12
1.6 <i>Crisis sanitaria covid-19</i>	12
1.7 <i>Ventajas DC frente AC</i>	13
1.8 <i>Proyecto de partida</i>	13
1.8 <i>Objetivo</i>	14
2 Instalación de la canalización eléctrica bajo estudio	17
2.1 <i>Red</i>	17
2.2 <i>Cable</i>	18
2.2.1 Conductor	18
2.2.2 Aislamiento	19
3 Algoritmo termoelectrónico para el diseño de una canalización eléctrica	21
3.1 <i>FEMM</i>	21
3.2 <i>Geometría</i>	22
3.3 <i>Materiales</i>	22
3.4 <i>Transmisión de calor</i>	22
3.4.1 Conducción	22
3.4.2 Convección	23
3.4.3 Radiación	23
3.5 <i>Generación de calor</i>	24
3.6 <i>Método de la bisección</i>	25
4 Validación del algoritmo termoelectrónico	27
4.1 <i>Geometría del modelo</i>	27

4.2	<i>Definición de materiales</i>	30
4.3	<i>Transmisión de calor en el modelo</i>	30
4.3.1	Conducción en el modelo	31
4.3.2	Convección en el modelo	31
4.3.3	Radiación en el modelo	31
4.4	<i>Validación del algoritmo</i>	31
4.4.1	Geometría 1	32
4.4.2	Geometría 2	36
5	Resultados del sistema híbrido	39
5.1	<i>Configuración diagonal geometría 1 (1.A)</i>	40
5.1.1	Configuración diagonal (1.A) cable 4x16 mm ²	41
5.1.2	Configuración diagonal (1.A) cable 4x25 mm ²	42
5.1.3	Configuración diagonal (1.A) cable 4x50 mm ²	44
5.2	<i>Configuración paralelo geometría 1 (1.B)</i>	45
5.2.1	Configuración paralelo (1.B) cable 4x16 mm ²	46
5.2.2	Configuración paralelo (1.B) cable 4x25 mm ²	47
5.2.3	Configuración paralelo (1.B) cable 4x50 mm ²	49
5.3	<i>Comparativa geometría 1</i>	50
5.3.1	Comparativa de la sección 4x16mm ²	50
5.3.2	Comparativa de la sección 4x25mm ²	51
5.3.3	Comparativa de la sección 4x50mm ²	52
5.3.4	Resumen de resultados de la geometría 1	53
5.4	<i>Configuración diagonal geometría 2 (2.A)</i>	54
5.4.1	Configuración diagonal (2.A) cable 3x95/50 mm ²	54
5.4.2	Configuración diagonal (2.A) cable 3x150/95 mm ²	56
5.5	<i>Configuración paralelo geometría 2 (2.B)</i>	57
5.4.1	Configuración paralelo (2.B) cable 3x95/50 mm ²	58
5.4.2	Configuración paralelo (2.B) cable 3x150/95 mm ²	59
5.6	<i>Comparativa geometría 2</i>	61
5.6.1	Comparativa de la sección 3x95/50 mm ²	61
5.6.2	Comparativa de la sección 3x150/95 mm ²	62
5.6.3	Resumen de resultados de la geometría 2	63
6	Conclusiones	65
	Referencias	67
7	Anexos	69
	<i>Anexo A</i>	69
	<i>Anexo B</i>	76
	<i>Anexo C</i>	83
	<i>Anexo D</i>	92
	<i>Anexo E</i>	100
	<i>Anexo F</i>	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resultados de la geometría 1.	35
Tabla 2. Resultados de la geometría 2.	38
Tabla 3. Resumen de resultados de la red mixta para la geometría 1.	53
Tabla 4. Resumen de resultados de la red mixta para la geometría 2.	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Población mundial entre los años 1960 y 2019. (Banco mundial, 2020)	1
Figura 2. Acceso a la electricidad (%). (Banco mundial, 2020)	2
Figura 3. Consumo de electricidad per cápita (kWh per cápita). (Banco mundial, 2020)	3
Figura 4. Emisiones de gases de efecto invernadero (%). (Banco mundial, 2020)	4
Figura 5. Evolución de las emisiones de CO ₂ en España (%). (El periódico de la energía, 2018)	5
Figura 6. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Tg). (EEA, 2020)	5
Figura 7. Energía procedente de fuentes renovables en 2018 (%). (Statistics Explaines, 2020)	6
Figura 8. Proyecciones a largo plazo de los objetivos de la UE. (EEA, 2020)	7
Figura 9. Zonas climáticas en España. (DB HE5, 2019)	9
Figura 10. Distribución de la generación fotovoltaica a lo largo del día 01/01/2020. (REE, 2020)	9
Figura 11. Distribución de la generación eólica a lo largo del día 01/01/2020. (REE, 2020)	10
Figura 12. Distribución de la generación eólica a lo largo del día 02/01/2020. (REE, 2020)	10
Figura 13. Evolución del precio batería ion-litio (\$/kWh). (BloombergNEF, 2020)	11
Figura 14. Modos de recarga de los VE. (Electromaps, 2019)	11
Figura 15. Topología propuesta de la red mixta AC/DC, a. (Distribución eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC, 2017)	14
Figura 16. Topología propuesta de la red mixta AC/DC, b. (Distribución eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC, 2017)	14
Figura 17. Clasificación de baja tensión. (R.E.B.T e ITC, 2020)	17
Figura 18. Abrazadera para línea posada sobre fachada. (Cahors, Materiales para redes trenzadas, 2019.)	18
Figura 19. Cable Al Polirret. (Prysmian Group, 2017)	18
Figura 20. Conductor de aluminio. (Focus Technology Co., 2020)	19
Figura 21. Diagrama de flujo del estudio termoeléctrico.	21
Figura 22. Características técnicas cable AL RZ (I). (Prysmian, 2016)	27
Figura 23. Características técnicas cable AL RZ (II). (Prysmian, 2016)	28
Figura 24. Geometría 1.	28
Figura 25. Geometría 2.	29
Figura 26. Triangulación del modelo.	29
Figura 27. Transmisión de calor en el modelo.	30
Figura 28. Escala de temperaturas en FEMM.	31
Figura 29. Modelo térmico geometría 1.	32
Figura 30. Análisis de datos geometría 1 sección 4x16 mm ² .	33
Figura 31. Análisis de datos geometría 1 sección 4x25 mm ² .	34
Figura 32. Análisis de datos geometría 1 sección 4x50 mm ² .	35
Figura 33. Modelo térmico geometría 2.	36
Figura 34. Análisis de datos geometría 2 sección 3x95/50 mm ² .	37

Figura 35. Análisis de datos geometría 2 sección 3x150/95 mm ² .	38
Figura 36. Geometría red mixta configuración 1.A.	40
Figura 37. Modelo térmico configuración 1.A.	40
Figura 38. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x16 mm ² .	41
Figura 39. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x16 mm ² .	42
Figura 40. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x25 mm ² .	43
Figura 41. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x25 mm ² .	43
Figura 42. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x50 mm ² .	44
Figura 43. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x16 mm ² .	44
Figura 44. Geometría red mixta configuración 1.B.	45
Figura 45. Modelo térmico configuración 1.B.	46
Figura 46. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x16 mm ² .	46
Figura 47. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x16 mm ² .	47
Figura 48. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x25 mm ² .	48
Figura 49. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x25 mm ² .	48
Figura 50. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x50 mm ² .	49
Figura 51. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x50 mm ² .	49
Figura 52. Comparativa potencias red mixta sección 4x16 mm ² .	50
Figura 53. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=4x16mm ²)	51
Figura 54. Comparativa potencias red mixta 4x25 mm ² .	51
Figura 55. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=4x25mm ²)	52
Figura 56. Comparativa potencias red mixta sección 4x50 mm ² .	52
Figura 57. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=4x50mm ²)	53
Figura 58. Geometría diagonal configuración 2.A.	54
Figura 59. Modelo térmico configuración diagonal 2A.	54
Figura 60. Corrientes DC/AC configuración 2.A sección 3x95/50 mm ² .	55
Figura 61. Potencia red mixta configuración 2.A sección 3x95/50 mm ² .	55
Figura 62. Corrientes DC/AC configuración 2.A sección 3x150/95 mm ² .	56
Figura 63. Potencia red mixta configuración 2.A sección 3x150/95 mm ² .	56
Figura 64. Geometría paralelo configuración 2.B.	57
Figura 65. Modelo térmico configuración paralelo 2.B.	58
Figura 66. Corrientes DC/AC configuración 2.B sección 3x95/50 mm ² .	58
Figura 67. Potencia red mixta configuración 2.B sección 3x95/50 mm ² .	59
Figura 68. Corrientes DC/AC configuración 2.B sección 3x150/95 mm ² .	60
Figura 69. Potencia red mixta configuración 2.B sección 3x150/95 mm ² .	60
Figura 70. Comparativa geometría 2 sección 3x95/50 mm ² .	61
Figura 71. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=3x95/50mm ²)	61
Figura 72. Comparativa geometría 2 sección 3x150/95 mm ² .	62
Figura 73. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=3x150/95mm ²)	62

Notación

AC	Alternating current (Corriente alterna)
DC	Direct current (Corriente continua)
BT	Baja tensión
EERR	Energías renovables
FV	Fotovoltaica
GD	Generación distribuida
VE	Vehículo eléctrico
FEMM	Finite Element Method Magnetics
A	Amperio
V	Voltio
kW	Kilovatios

1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día existe un continuo crecimiento de la demanda energética a nivel mundial. En concreto, y el tipo de energía que se va a comentar a lo largo de este Trabajo Fin de Grado, es la energía eléctrica, cada vez más presente en el estilo de vida actual. Esta tendencia al alza es complicada achacarla a un solo motivo en concreto, ya que son muchos y de diversa índole los factores que pueden llegar a influenciarla, aunque hay ciertos aspectos cuya influencia si resulta evidente en el impacto sobre la imparable curva de consumo.

Uno de los más claros es el progresivo crecimiento de la población mundial. En la Figura 1 se muestra una gráfica con la tendencia desde el año 1960, cuando había un total de 3.031 millones de habitantes hasta el 2019, con 7.674 millones [1]. Por lo que, en tan solo cincuenta y nueve años se ha incrementado en más del doble la cantidad de potenciales consumidores.

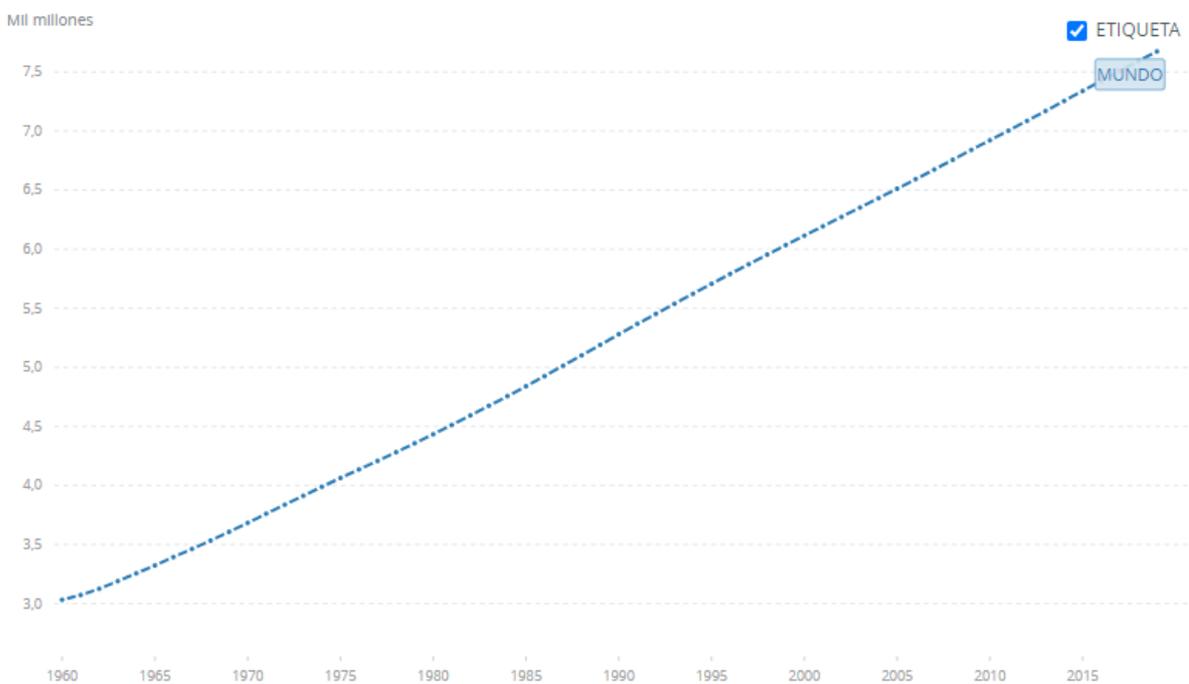


Figura 1. Población mundial entre los años 1960 y 2019. (Banco mundial, 2020)

Otro aspecto que influye directamente es el acceso a la energía eléctrica. Esta disponibilidad impulsa el crecimiento económico y el progreso humano, por lo que puede afirmarse que el consumo de energía va en paralelo al desarrollo de la civilización.

En el año 2008 un 89.57% de la población mundial tenía acceso a la energía eléctrica frente al 72.66% en 1998 [2]. Esto supone un incremento en ese período de tiempo de veinte años de un 23.28%. En la Figura 2 puede apreciarse este crecimiento.

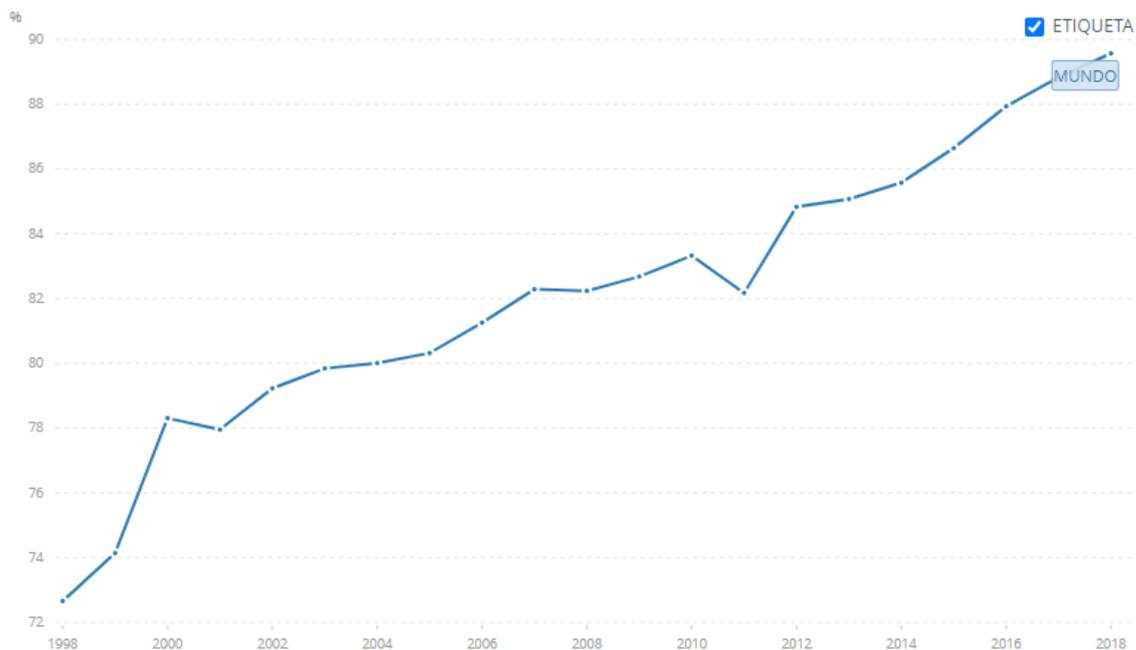


Figura 2. Acceso a la electricidad (%). (Banco mundial, 2020)

Si se analiza la rutina de cualquier habitante de un país desarrollado no es complicado darse cuenta de la dependencia energética que presenta a lo largo del día. Lo normal hoy en día en estos países es que cada persona posea su propio teléfono móvil, el cual recibe incluso más de una carga diaria, también es común disponer de ordenador propio, televisor, reloj inteligente, auriculares inalámbricos, etc. En resumen, un sinfín de pequeños consumidores empleados a diario, que visto desde el punto de vista de un solo individuo puede no parecer relevante, pero si se multiplica por los millones de personas que tienen este mismo patrón de consumo ya se alcanza otra magnitud.

También están adquiriendo cada vez más importancia los vehículos eléctricos frente a los que hasta ahora representaban prácticamente a todo este sector transporte, los de combustión. Todo esto alega que en los próximos años va a seguir aumentando progresivamente el consumo de energía eléctrica por persona.

En la Figura 3 se muestra el consumo de electricidad per cápita a nivel mundial desde el año 1971 cuando era de 1.200.126 kWh/per cápita, hasta 2014 donde esa cifra se elevó hasta 3.131.348 kWh/per cápita [3].

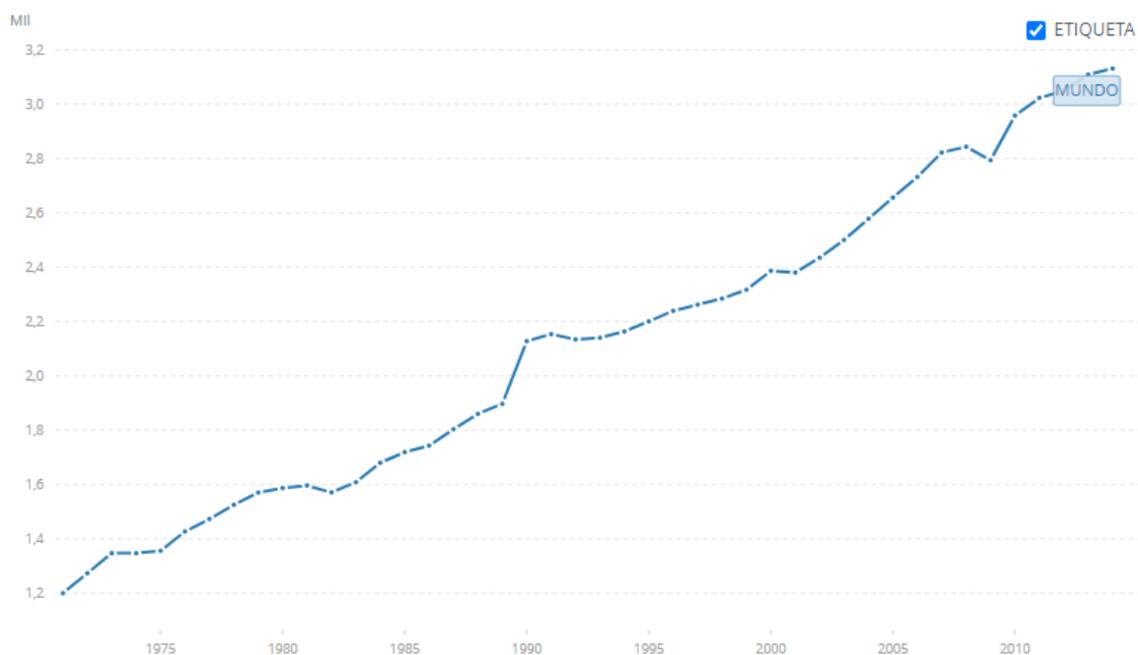


Figura 3. Consumo de electricidad per cápita (kWh per cápita). (Banco mundial, 2020)

Es rápido ver como todas las gráficas anteriores presentan una clara tendencia ascendente, con un crecimiento bastante pronunciado.

Por tanto, con esto surgen varios retos. Uno de ellos es garantizar el suministro para el normal desarrollo de la vida cotidiana tal y como la conocemos, lo que conlleva que tiene que haber sistemas fiables de generación, y otro reto actual y uno de los temas más sonados hoy en día es conseguir que toda esta producción sea lo más respetuosa posible con el medio ambiente, buscando siempre la descarbonización del sistema.

Por ello surge una encrucijada, conseguir generar cada vez más y a su vez disminuir progresivamente la contaminación asociada a estos sistemas. De ahí que actualmente existan innumerables proyectos cuya envergadura sea abordar estos aspectos.

Lo que hay que asumir es que generar toda esta energía lleva asociado hoy en día una cierta cantidad de emisiones, que contribuyen, entre otros, a el aumento del denominado efecto invernadero.

En la Figura 4 puede verse el aumento de estas emisiones desde el año 1960 hasta 2012, que es de un 40% [4].

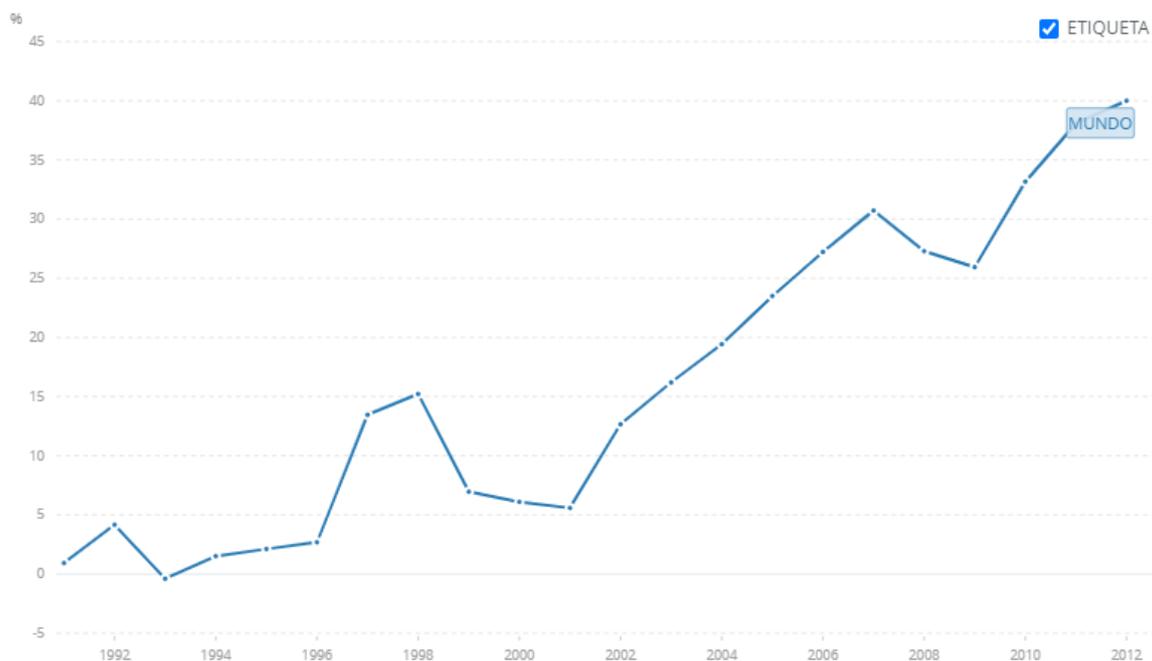


Figura 4. Emisiones de gases de efecto invernadero (%). (Banco mundial, 2020)

1.1 Protocolos

Para procurar conseguir el equilibrio mencionado anteriormente entre generación y reducción de la contaminación, se han planteado a lo largo de las últimas décadas diferentes acuerdos entre países de todo el mundo para tratar de combatir el cambio climático. A continuación, se describen brevemente cinco de ellos en orden cronológico.

1.1.1 Protocolo de Kioto

Celebrado en Kioto (Japón) en 1997, aunque no entró en vigor hasta febrero de 2005.

Es un acuerdo internacional cuyo objetivo es la reducción de las emisiones de seis de los gases de efecto invernadero que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6) [5].

El objetivo inicial era reducir el porcentaje de estas emisiones en un 5 % entre 2008 y 2012 con respecto a 1990. En 2012 en la cumbre de Doha se acordó continuar con este protocolo. La UE adquirió un compromiso de reducir sus emisiones en un 8% en lugar del 5% exigido. Al ser este 8% la media de entre todos los países miembros, cada uno tenía un objetivo en función de su economía y de aspectos medioambientales. El de España, era no superar entre 2008 y 2012 el 15% del nivel de emisiones del 1990. El periodo de compromiso del Protocolo se amplió hasta el 2020.

Europa consiguió disminuir las emisiones un 19.2%. En cambio, España sobrepasó en un 23.7% los niveles de 1990 [6], pero posteriormente entrado el año 2012 consiguió una reducción hasta los niveles a los que se había comprometido, como puede observarse en la Figura 5.

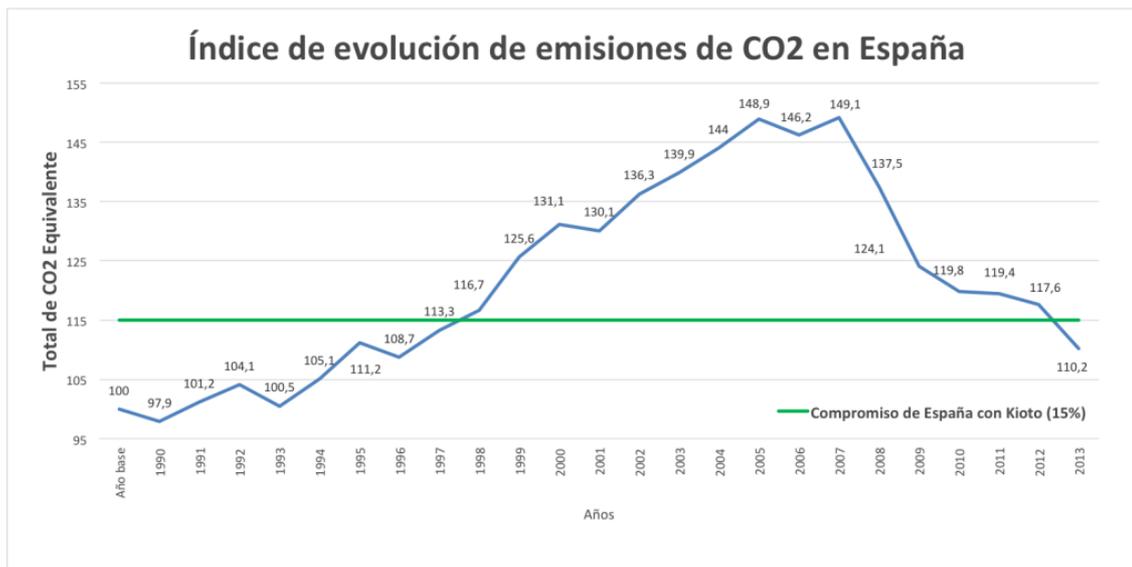


Figura 5. Evolución de las emisiones de CO2 en España (%). (El periódico de la energía, 2018)

1.1.2 Acuerdo de París

Estableció un marco global para mantener el calentamiento global por debajo de los 2°C.

La UE se comprometió a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en al menos un 40% en 2030 respecto a 1990 [7]. Esto implica que en la década que queda hasta alcanzar esa fecha, debe haber una reducción del 50% de las emisiones que se tienen hoy en día.

1.1.3 Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020

La UE asumió este paquete de medidas, con los siguientes objetivos fundamentales [8]:

- 20% de reducción de emisiones de GEI (en relación con 1990). En el año 2018 ya se consiguió un descenso de un 20.74 % de las emisiones que había en 1990 que ascendían a 4911,631Tg hasta conseguir disminuir en 2018 con 3893,095 Tg, como puede verse en la Figura 6. A la espera de los datos de los dos años posteriores, si han conseguido mantenerse estos datos, se cumpliría con el objetivo.

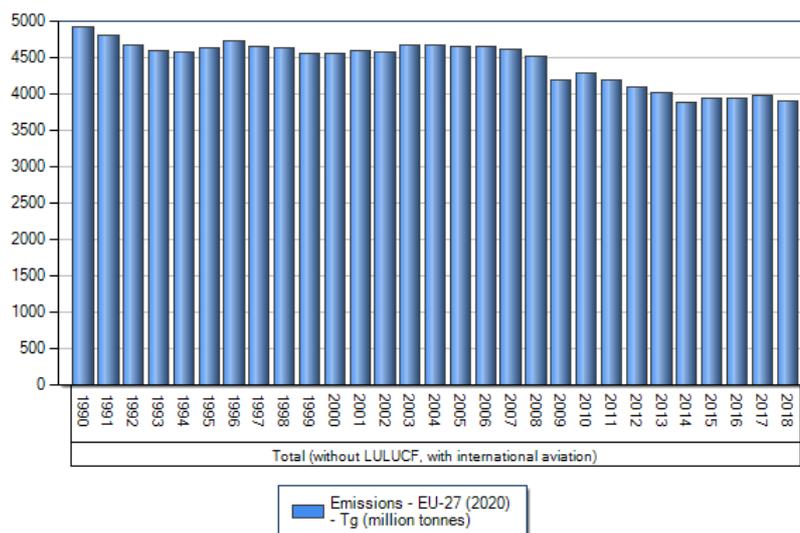


Figura 6. Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero (Tg). (EEA, 2020)

- 20 % de energías renovables (EERR) en la UE. En la gráfica de la Figura 7 se representa mediante barras el porcentaje de energía procedente de fuentes renovables en el año 2018. Las dos primeras corresponden a la actual UE-27, y a la anterior UE-28 que incluía a Reino Unido. Después de estas se muestran los 27 países miembro actuales de la UE, y, al final, otros países del continente europeo. La línea rosa dibujada para cada barra indica el objetivo que ese país se marcó para el año 2020. Como puede apreciarse la UE-27 estaba cerca ya en ese año de alcanzar ese 20% buscado.

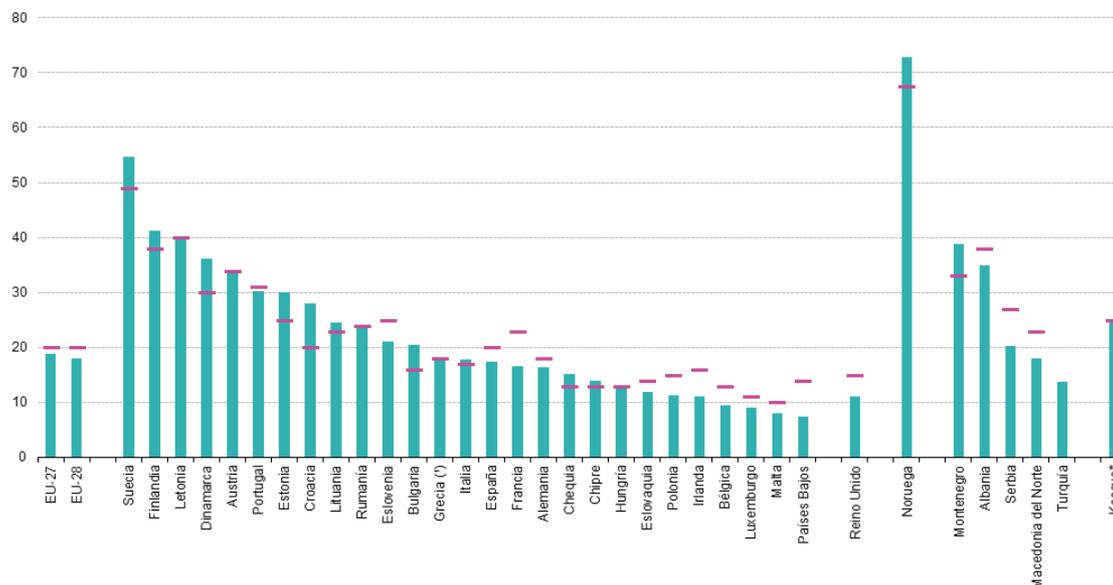


Figura 7. Energía procedente de fuentes renovables en 2018 (%). (Statistics Explains, 2020)

- 20 % de mejora de la eficiencia energética.

1.1.4 Objetivo para 2030

Los caminos para alcanzar estas metas son los mismos que los adoptados en los objetivos marcados para el 2020, pero ahora más ambiciosos [9].

- Reducir en al menos un 40% las emisiones de GEI con respecto a 1990. Esto permitirá a la UE cumplir con su compromiso con el Acuerdo de París.
- Al menos un 32% de cuota de energías renovables en el consumo final de energía.
- Al menos un 32,5% de mejora de la eficiencia energética.

1.1.5 Estrategia a largo plazo para 2050

Denominado Pacto Verde Europeo, es una hoja de ruta para dotar a la UE de una economía sostenible a través de la tecnología ecológica, la creación de una industria y un transporte sostenible, prestando especial atención en buscar siempre una reducción de la contaminación, para ser el primer continente climáticamente neutro en el año 2050 [10]. Esto se hará fijándose siempre en lo siguiente:

- Se hayan dejado de producir emisiones netas de gases de efecto invernadero.
- El crecimiento económico no esté asociado al uso de recursos.
- Que ningún lugar, ni persona se quede atrás.

En la Figura 8 se representan diferentes proyecciones para el Objetivo 2050. Se muestran dos escenarios diferentes. El primero de ellos, es el que se alcanzaría con las medidas actuales, y el segundo, con mejores resultados, el que podría alcanzarse si se imponen medidas adicionales.

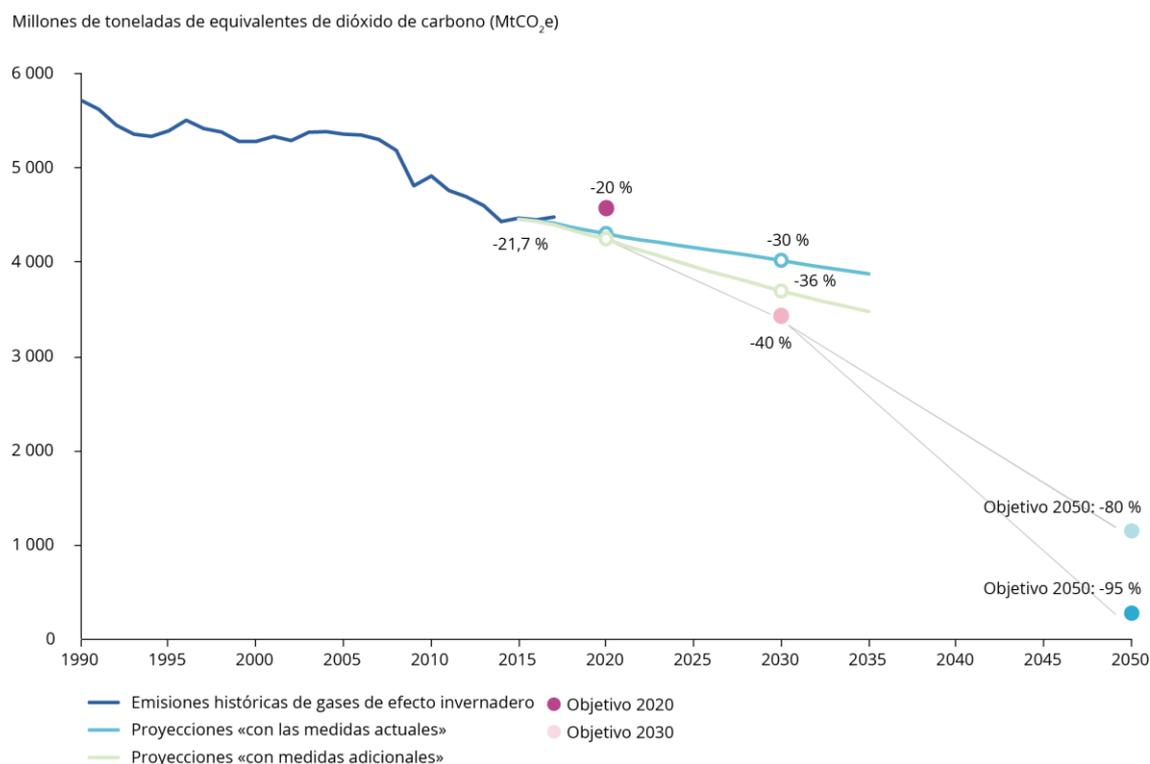


Figura 8. Proyecciones a largo plazo de los objetivos de la UE. (EEA, 2020)

Está claro que la manera más eficaz conocida hasta la fecha para conseguir cumplir todos estos objetivos con los que está comprometiéndose gran parte del planeta es la apuesta por las renovables. Aparte de seguir construyendo grandes plantas de generación renovable, existen otras maneras de avanzar hacia la descarbonización.

En concreto, se van a tratar a continuación tres aspectos que están adquiriendo cada vez más importancia en las redes eléctricas y que van directamente relacionados con estas energías renovables. Primero se va a hablar de la generación distribuida o generación in-situ, que consiste en generar la electricidad lo más cerca posible de las cargas, desapareciendo así las pérdidas en transporte y favoreciendo la autosuficiencia energética y limpia. Se tratará también el tema del almacenamiento para esta generación, y de los vehículos eléctricos.

1.2 Generación distribuida (GD)

Actualmente, en la mayoría de los países se genera prácticamente la totalidad de la electricidad en grandes plantas centralizadas que presentan muy buenos rendimientos en términos económicos, pero tienen que transportar la electricidad a grandes distancias, por lo que el rendimiento energético es bajo y el impacto medioambiental es alto. Muchas de estas centrales tienen que situarse alejadas de las ciudades por motivos de contaminación atmosférica como son las de combustibles fósiles, pero esto es un problema que solventa la GD ya que se contemplan con sistemas de energías renovables no contaminantes.

La energía distribuida es aquella que se genera por medio de pequeñas fuentes de energía en lugares lo más próximos posibles a las cargas. Esto suele darse sobre todo mediante paneles fotovoltaicos y mini eólica, y en menor medida, aunque existente, con biomasa. La FV al generar en DC necesita un sistema de acondicionamiento de la potencia, en este caso, un inversor.

En 2019 se instalaron en España 459 MW de potencia fotovoltaica para autoconsumo, lo que duplica la potencia instalada en 2018, 235 MW. Se estima que un 10 % son instalaciones aisladas de la red y el 90% restante conectadas [11].

El autoconsumo supone un ahorro energético por el simple hecho de evitar pérdidas de transporte, y una reducción de la dependencia energética con el exterior, además facilita el logro de objetivos medioambientales

y de lucha contra el cambio climático. Además de todas esas ventajas, da la oportunidad al usuario de gestionar su propia energía y controlar sus consumos.

1.2.1 Normativa

En los dos siguientes subapartados, se indica la normativa vigente que rige a este tipo de instalaciones.

1.2.1.1 Legislación

Hay varios Reales Decretos que regulan la normativa aplicable a estos sistemas. Desde abril de 2019, por el RD 244/2019 se permite en España vender los excedentes de energía eléctrica generada en las propias instalaciones de autoconsumo a la red. Nunca se podrá generar beneficio económico, pero sí compensar sobre el término de energía de la factura pudiendo salir este pago mensual finalmente a cero.

Otros decretos que rigen las condiciones para la generación distribuida son los siguientes:

- RD 1955/2000, de 1 de diciembre, por el que se regulan las actividades de transporte, distribución, comercialización, suministro y procedimientos de autorización de instalaciones de energía eléctrica [12].
- RD 1699/2011, de 18 de noviembre, por el que se regula la conexión a red de instalaciones de producción de energía eléctrica de pequeña potencia [13].
- RD 413/2014, de 6 de junio, por el que se regula la actividad de producción de energía eléctrica a partir de fuentes de energía renovables, cogeneración y residuos [14].
- RD 15/2018, de 5 de octubre, de medidas urgentes para la transición energética y la protección de consumidores [15].
- RD 244/2019, de 5 de abril, por el que se regulan las condiciones administrativas, técnicas y económicas del autoconsumo de energía eléctrica [16].

1.2.1.2 CTE DB-HE5

Dentro del Código Técnico de la Edificación (CTE), se encuentra el Documento Básico (DB) HE5 [17]. Este DB indica la contribución mínima fotovoltaica obligatoria para edificios de nueva construcción y ampliaciones con uso distinto al residencial privado y superficie superior a 3000 m².

En función del tipo de uso del edificio se exigirá una potencia pico mínima a instalar. Esta potencia pico se calcula mediante la siguiente fórmula:

$$P = C \cdot A \cdot S + B$$

Donde:

- P: potencia pico a instalar, kWp.
- A y B: coeficientes en función del uso del edificio.
- C: coeficiente en función de la zona climática. Tabulado dentro de este HE5.
- S: superficie construida del edificio, m².

España queda dividida en cinco zonas climáticas, tal y como se distribuyen la Figura 9. Para cada una de ellas, en función de sus datos climatológicos, se exige una contribución mínima renovable en el total de la electricidad consumida.

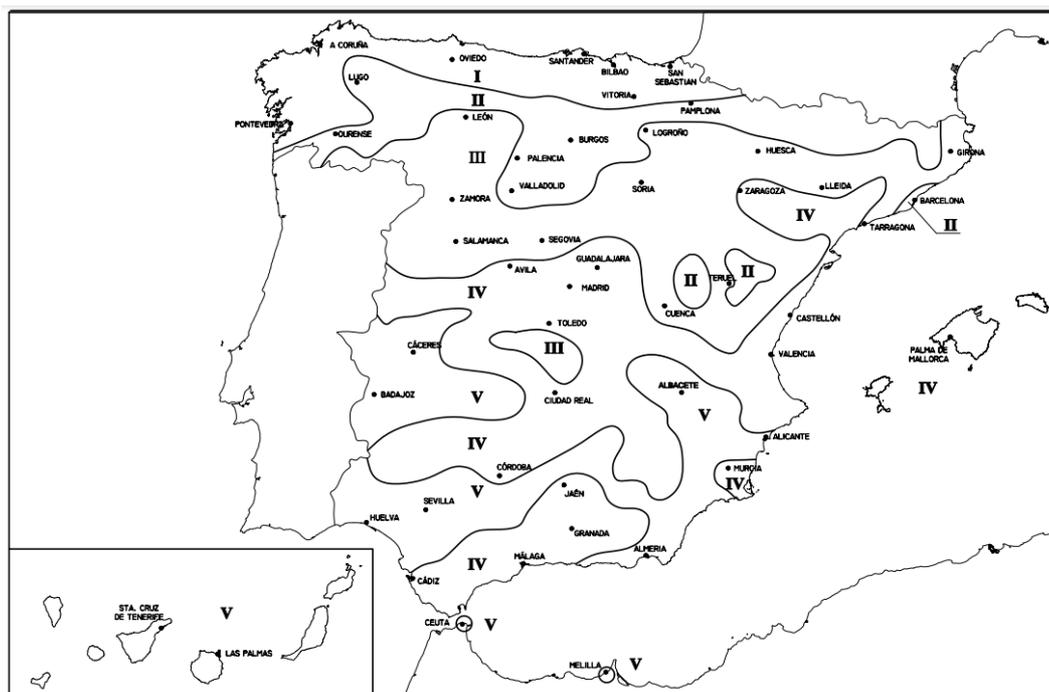


Figura 9. Zonas climáticas en España. (DB HE5, 2019)

Muchas construcciones que están integradas en plena ciudad superan estas dimensiones, como son los centros comerciales, ciertos supermercados, hospitales, hoteles, pabellones, centros de ocio etc.

1.3 Almacenamiento

El almacenamiento de electricidad es uno de los mayores retos tecnológicos actuales, ya que la limitación de las renovables más empleadas (eólica, solar fotovoltaica e hidráulica) es que no se puede disponer de ellas siempre que se quiera por la variabilidad de los recursos. Para el almacenamiento de energía hidráulica se utilizan las centrales de bombeo, aprovechando las horas en las que hay excedentes de energía para bombear agua hacia un depósito situado a una cota superior, para turbinarla cuando se requiera.

La limitación de la fotovoltaica sin almacenamiento es obvia. Siempre suelen presentar un mismo patrón de funcionamiento, a menos que el día presente condiciones climatológicas adversas, que no permitan si quiera alcanzar esta distribución. En la Figura 10 está este patrón a lo largo de las veinticuatro horas de un día, en concreto del 1 de enero del 2020. Esta fue la contribución FV al mix energético en la parte española perteneciente a la península ibérica.

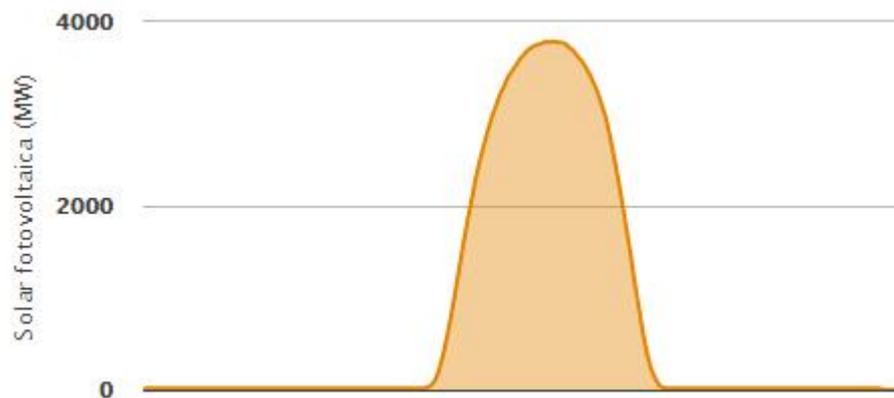


Figura 10. Distribución de la generación fotovoltaica a lo largo del día 01/01/2020. (REE, 2020)

La eólica presenta una distribución aleatoria. En las siguientes dos ilustraciones, Figura 11 y Figura 12, queda representada la generación eólica para el día 1 de enero de 2020, y para el siguiente, el 2 de enero de 2020. Puede apreciarse claramente como no tienen ninguna similitud entre ellas, es más, este segundo día tiene un pico de potencia aportada de casi el doble.



Figura 11. Distribución de la generación eólica a lo largo del día 01/01/2020. (REE, 2020)



Figura 12. Distribución de la generación eólica a lo largo del día 02/01/2020. (REE, 2020)

En la generación in-situ, al predominar estos dos tipos de energías, se necesita tener capacidad de almacenamiento que haga más gestionable al sistema.

Actualmente, la manera más desarrollada para esto es mediante baterías.

Hasta ahora las baterías para generadores fotovoltaicos eran mayoritariamente de plomo, pero están siendo relevadas por las de ion-litio. Aunque sean más caras que las primeras, presentan muchas ventajas frente a ellas, como la vida útil, ya que no sufren desperfectos con las descargas, como la relación tamaño-peso, eficiencia y la no emisión de gases que permite que puedan colocarse en el interior de la vivienda sin ningún riesgo. De esta forma, cuando el conjunto de paneles genera energía, si se dispone de este sistema de almacenamiento, habrá parte de esta que se dirija hacia el inversor para transformarse en alterna e ir hacia la vivienda o la red, y otra que vaya a almacenarse.

Para un futuro 100% renovable o lo más cercano a este porcentaje, es evidente que son imprescindibles sistemas de almacenamiento eficientes que den versatilidad a las renovables.

1.4 Vehículos eléctricos (VE)

El sector transporte hoy es el responsable del 35% de las emisiones nacionales de gases de efecto invernadero. Viendo esta cifra queda claro que, si se quiere cumplir con los protocolos indicados en apartados anteriores, hay que prestar especial atención a este sector y buscar alternativas.

La alternativa con más peso ahora mismo es la movilidad eléctrica. El motor eléctrico es un sistema más sencillo que uno térmico, por lo que el mantenimiento y el coste son menores. Además, aprovechan la energía producida en las frenadas y desaceleraciones, lo que ayuda a la autonomía de la batería. Pero, debe apreciarse que motivar la adquisición de este tipo de vehículos debe ir de la mano del incentivo de las EERR. Si la carga del vehículo proviene de una fuente no renovable, esa energía habrá producido emisiones en su generación.

La batería del vehículo, como cualquier otra, solo puede almacenar corriente continua, por lo que, si se carga a partir de alterna, tiene que ser convertida por el vehículo. Se estima que admiten hasta 3000 ciclos de carga completos. Al igual que en almacenamiento electroquímico de renovables, las de plomo ácido están perdiendo importancia para dar paso a otras como las de ion-litio que, entre otras ventajas, no tienen efecto memoria. En la Figura 13 está representado el coste en \$/kWh del precio de las baterías de ion-litio para vehículos eléctricos entre 2010 y 2018, con la correspondiente disminución de porcentaje entre un año y otro. Entre ambos extremos hay una disminución total del 85%.

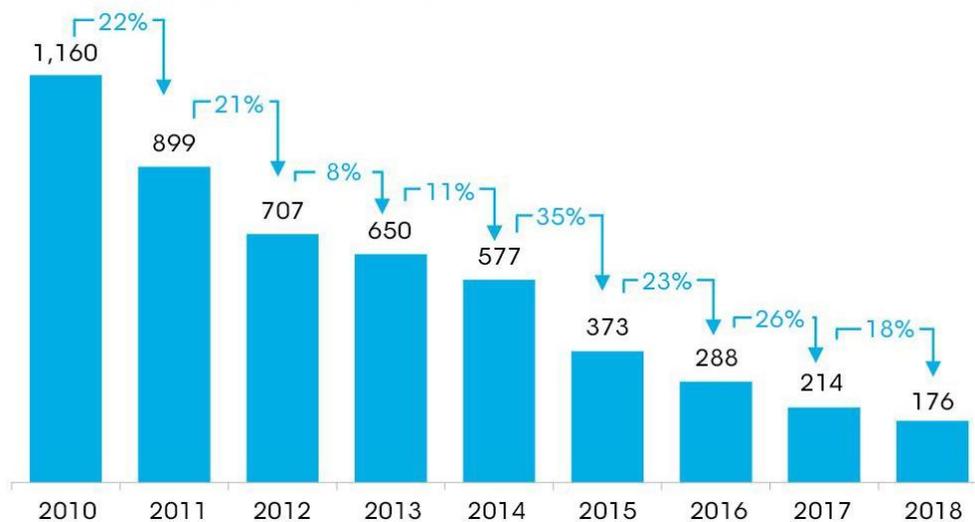


Figura 13. Evolución del precio batería ion-litio (\$/kWh). (BloombergNEF, 2020)

Existen cuatro modos de carga para estas baterías. Tres son en corriente alterna, y el cuarto en continua, el cual permite una carga rápida de al menos el 80% de la capacidad en una media hora. Aunque la carga rápida supone un desafío en términos de materiales para que las baterías aguanten correctamente las cargas, pueden compaginarse ambas formas según la necesidad del momento. La carga rápida es la que se utiliza por ejemplo en la vía pública y en las electrolíneas.

Los modos 1 y 2, tienen la denominada carga lenta que es entre seis y ocho horas; el modo 3, la semi-rápida, entre tres y cuatro horas; y, por último, la rápida, que como ya se ha dicho puede realizarse en media hora. Estos modos quedan reflejados en la Figura 14.

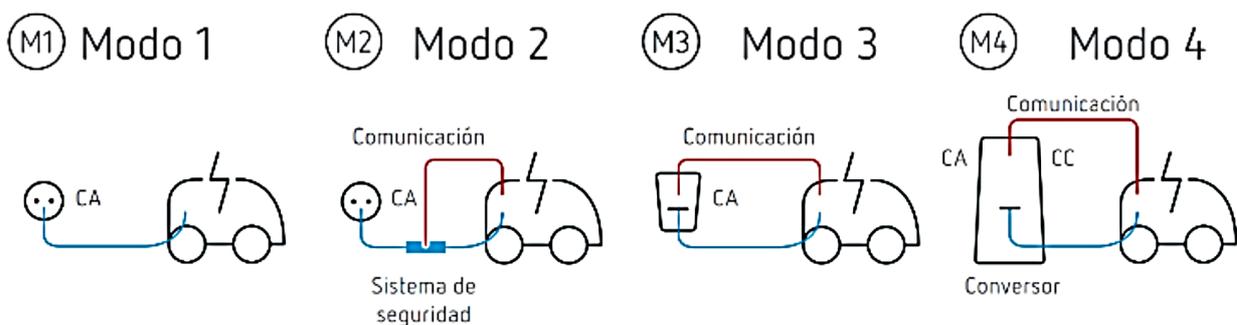


Figura 14. Modos de recarga de los VE. (Electromaps, 2019)

La autonomía que hasta hoy han presentado estos vehículos, junto al hecho de que los puntos de recarga son

limitados, condicionan todavía el despliegue de la movilidad eléctrica. En cambio, hay ciertas medidas mediante las que se aventaja a los conductores de este tipo de vehículos, entre ellas, la libre circulación en ciudades con limitación de acceso, el estacionamiento gratuito o las tarifas reducidas en zonas reguladas, y la posibilidad de conducir en carriles especiales, así como las ayudas para su adquisición. La última que ha salido en España es el Plan Moves 2020 [18]. Presenta un presupuesto de 100 millones de euros para impulsar la economía y la movilidad sostenible. Este plan incluye cinco medidas:

1. Ayudas a compra de vehículos alternativos. En la adquisición de un coche eléctrico la ayuda podría ascender hasta llegar a los 5.500€. Y en el caso de una moto eléctrica hasta 750 €.
2. Servicio de préstamo de bicicletas.
3. Infraestructuras de recarga.
4. Nuevas medidas de plan de transporte al trabajo.
5. Apoyo a los ayuntamientos para que ofrezcan respuestas rápidas a las necesidades de movilidad que han surgido como consecuencia del COVID19.

Con estas medidas se espera aumentar el PIB nacional, crear más de 5.000 empleos, y generar un ahorro estimado en torno a los 14 ktep, con unas emisiones evitadas del orden de 40.2525 toneladas de CO₂.

Estos vehículos ofrecen además gran flexibilidad al sistema eléctrico ya que los usuarios pueden gestionar la demanda según las necesidades, realizando la recarga cuando los precios de la electricidad sean menores. En un futuro se espera que el vehículo eléctrico funcione como un sistema de almacenamiento distribuido, el cual vierta energía que haya almacenado durante la noche a la red en los momentos de máxima demanda.

Como conclusión a este apartado, cabe decir que unas buenas prestaciones de este tipo de movilidad tienen tres beneficios principales en las ciudades: descarbonización, efecto positivo en la salud de los habitantes al eliminar la emisión de gases de combustión, y la disminución de la contaminación acústica. Y con el continuo descenso de los costes asociados a la adquisición de estos vehículos van a adquirir gran importancia en los años venideros.

1.5 Redes inteligentes

Más conocidas como Smartgrid, se denomina así al sistema de distribución apoyado en los avances tecnológicos que combina tres elementos: los equipos eléctricos tradicionales, los contadores electrónicos y los sistemas de información y telecomunicaciones que permiten recibir la información a distancia. Las redes inteligentes de última generación son flexibles, seguras, eficientes y sostenibles. Son fundamentales para la futura integración masiva de vehículos eléctricos.

Ante el reto de mantener la seguridad del suministro en un sistema eléctrico descarbonizado, Red Eléctrica impulsa iniciativas de redes inteligentes con el objeto de anticipar soluciones en el ámbito de las nuevas tecnologías de almacenamiento, las capacidades dinámicas de la red, la monitorización de los elementos de la red, el autoconsumo, el vehículo eléctrico y las nuevas opciones de los consumidores, que están ya actualmente dando forma a la red eléctrica del futuro [19].

1.6 Crisis sanitaria covid-19

Actualmente se está viviendo una crisis sanitaria, humanitaria, social y económica generada por la covid-19. Son numerosas las fuentes que dicen que tiene que haber una respuesta mundial adecuada para paliar los efectos de la pandemia con sus repercusiones económicas, como la Agencia Internacional de Energía Renovable (IRENA), que ha afirmado que las energías renovables impulsarán la recuperación económica.

Durante la época de confinamiento que se llevó a cabo en gran parte del planeta entre mediados de marzo y de mayo, el carbón registró en este quinto mes del año los peores números de su historia, dando mayor importancia en el mix energético a fuentes renovables como la hidráulica, la hidráulica de bombeo o la fotovoltaica. Esto acarrió además una reducción de los precios, en torno al 25% en el PVPC (Precio de venta al pequeño consumidor) [20]. Por lo que surge la oportunidad para los gobiernos de priorizar las energías

renovables tanto para cumplir con los objetivos como los del acuerdo de París como para la recuperación económica post-coronavirus.

Para evitar el riesgo de futuras pandemias es importante, entre otros, evitar en todo lo posible y en la medida en que esté afectado por el ser humano, el cambio climático, para mantener así el equilibrio del planeta, ya que al alterarse los ecosistemas se favorece el surgimiento de las zoonosis (enfermedades transmitidas de animales a humanos).

1.7 Ventajas DC frente AC

La actual configuración de las redes urbanas, en la que a las viviendas solo llega AC, genera ineficiencia en la conexión de varios sistemas, ya que hay ciertos aparatos eléctricos que tienen que hacer conversión a DC para poder funcionar.

Por ejemplo, cualquier dispositivo que disponga de una batería necesita DC, y la doble conversión de energía entre su generación y su uso para la recarga de baterías de los dispositivos más empleados actualmente como son teléfonos, ordenadores, smartwatch, etc., crea hasta un 30% de pérdidas energéticas [21]. Además, estas conversiones, se hacen a través de un transformador, que, aunque no esté enchufado al equipo, pero sí a la red, sigue usando electricidad y genera armónicos. Añadiendo a esto la inminente crecida de carga de vehículos eléctricos, y el almacenamiento de la fotovoltaica mediante baterías, cada vez resultarán menos eficientes las líneas eléctricas existentes.

Hay que plantearse si la distribución actual en baja tensión de AC en la que se tienen que poner convertidores AC/DC para poder dar y tomar de la red, es la mejor opción, ya que, si se eliminan estos convertidores intermedios, en principio, se tendría una red más eficiente al eliminar una etapa de transformación.

1.8 Proyecto de partida

Cualquier factor que indique un futuro crecimiento de las energías renovables y todos los beneficios que estas acarrearán, que como ya se ha visto no son pocos, lleva a ver la necesidad de optimizar el sistema eléctrico actual para mejorar la eficiencia en todos los aspectos, desde la generación hasta el consumo final.

De aquí surge este Trabajo Fin de Grado, como apéndice a un proyecto de investigación llevado a cabo en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Sevilla titulado Distribución eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC [22].

En el resumen del proyecto se indica el cambio que han sufrido los receptores eléctricos que se alimentan desde las redes de distribución de baja tensión (BT) en los últimos años, y el futuro incremento esperado en los próximos años por el despliegue de la movilidad eléctrica, la generación distribuida, y los sistemas de almacenamiento. Como ya se ha visto, prácticamente todos estos sistemas funcionan con DC, por tanto, sería conveniente realizar estas cargas directamente sin conversiones intermedias.

En este proyecto se analizan dos situaciones diferentes para redes de distribución de baja tensión. Partiendo de las existentes, se analiza la viabilidad de hacer que no solo distribuyan AC, si no que suministren tanto AC como DC. El porqué de esta intención es que el consumidor final pueda elegir qué tipo usar en función de los requerimientos de la carga eléctrica.

Las opciones propuestas son las siguientes:

- Añadir a la línea alterna existente formada por tres fases más neutro, dos cables más, uno positivo y otro negativo para que estos transporten la DC. Esta red, por tanto, constaría de seis conductores eléctricos como se muestra en la Figura 15.

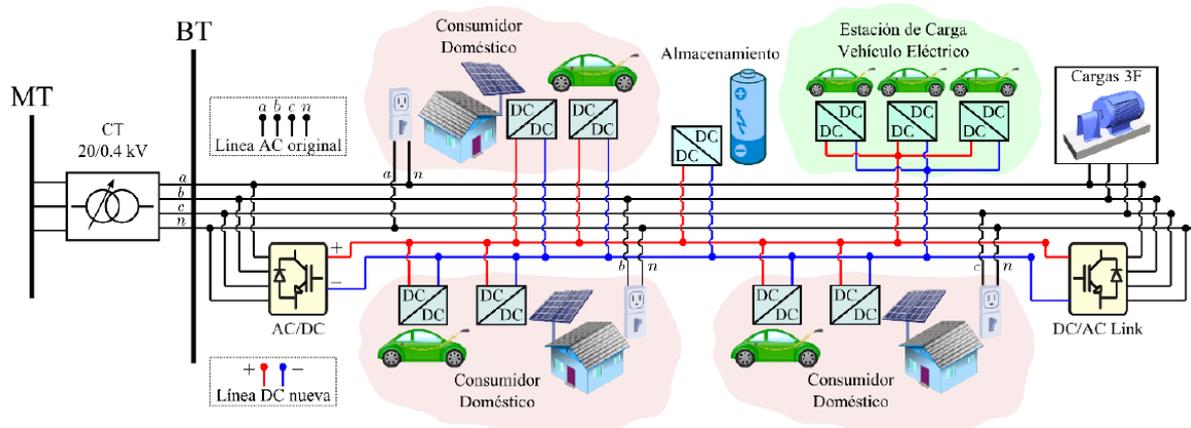


Figura 15. Topología propuesta de la red mixta AC/DC, a. (Distribución eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC, 2017)

- El otro caso es que dos de las fases de alterna comienzan a llevar continua como se indica en la Figura 16. En este caso, por tanto, no habría que añadir cables nuevos si no que se aprovecharía la red existente, con el consecuente ahorro económico respecto a la anterior configuración.

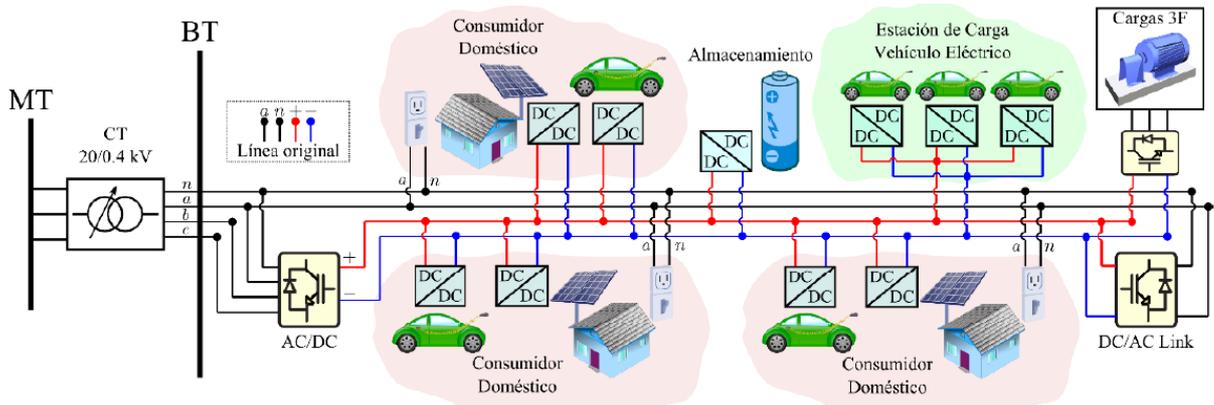


Figura 16. Topología propuesta de la red mixta AC/DC, b. (Distribución eficiente de energía eléctrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC, 2017)

Estas configuraciones permiten, en primer lugar, conseguir una red teóricamente más eficiente, en segundo lugar, eliminar los pasos de conversión entre medias de una carga y la red, y, por último, fomentar el desarrollo de la generación en las propias viviendas o empresas y la venta de sus excedentes (reducción de los costes asociados al consumo eléctrico), y favorecer el empuje del sector eléctrico del transporte urbano.

1.8 Objetivo

El objetivo del presente Trabajo Fin de Grado es realizar un análisis termoeléctrico de la configuración mostrada en la Figura 16. En concreto, una red mixta AC/DC de distribución en baja tensión para cables posados sobre fachada, con el fin de obtener la potencia transferida para cada caso de estudio y poder compararla con la que proporcionan las redes actuales.

Para conseguir este objetivo se plantea un algoritmo que a partir de los datos del cable y del entorno que se le proporcionan, encuentre cuanta corriente circula por el conductor cuando este alcanza la temperatura de régimen permanente, con el fin de disponer de un modelo representativo de la que sería la instalación real. Una vez se haya validado el anterior algoritmo, se añadirá la corriente continua al cable, simulando así la red propuesta que permitirá calcular cuanta corriente de cada tipo ha de circular para obtener los mejores resultados posibles. Con las potencias obtenidas se espera poder ver la viabilidad de esta red mixta y concluir

si presenta mejoras o no respecto a la convencional.

Así mismo, este trabajo permitiría elegir la sección adecuada para cumplir el criterio térmico en una instalación de este tipo, en la que se emplee el mismo modelo de cable que aquí se presenta.

El modelo de la red se realizará empleando el programa de elementos finitos FEMM, que contiene un módulo térmico.

2 INSTALACIÓN DE LA CANALIZACIÓN ELÉCTRICA BAJO ESTUDIO

El estudio termoelectrico del cable se va a realizar sobre una red de baja tensión apoyada sobre fachada. A continuación, se va a ver esta red de distribución y las partes de las que se compone.

2.1 Red

Las líneas de baja tensión se rigen en España por el Reglamento electrotécnico para baja tensión [23]. En el Artículo 4 de este aparece la clasificación de las instalaciones eléctricas de baja tensión según su tensión nominal asignada, tal y como se muestra en la Figura 17 y según la cual se indica que en este proyecto se va a trabajar con tensión usual.

	Corriente alterna (Valor eficaz)	Corriente continua (Valor medio aritmético)
Muy baja tensión.	$Un \leq 50V$	$Un \leq 75V$
Tensión usual.	$50 < Un \leq 500V$	$75 < Un \leq 750V$
Tensión especial.	$500 < Un \leq 1000V$	$750 < Un \leq 1500V$

Figura 17. Clasificación de baja tensión. (R.E.B.T e ITC, 2020)

Este mismo artículo indica que la tensión nominal a utilizar en la distribución de corriente alterna será de 230 V entre fase y neutro, y de 400 V entre fases para las redes trifásicas. Una red trifásica es aquella que está formada por tres corrientes alternas monofásicas con la misma amplitud y frecuencia, pero con una diferencia de fase entre cada una de 120°. Este es el caso de estudio del que se parte, de una red trifásica con el neutro conectado a tierra.

Una línea de distribución en baja tensión comienza en el centro de transformación y es la encargada de llevar la energía eléctrica desde ese punto hasta los usuarios. Concretamente se va a estudiar una línea aérea posada sobre fachada, la cual dentro del R.E.B.T se encuentra en la ITC-BT-06. En esta ITC aparecen cuatro apartados: materiales, cálculo mecánico, ejecución de las instalaciones e intensidades máximas admisibles por los conductores. Para los cables posados indica que la instalación se hará mediante abrazaderas fijadas a los mismos, aprovechando la existencia de salientes o marquesinas que faciliten el apoyo. Además, se deberá respetar una altura respecto al suelo de mínimo 2.5 metros y distancias mínimas en las proximidades de aberturas en las fachadas:

- Ventanas: 0.30 metros al borde superior y 0.5 metros al inferior y a los laterales.
- Balcones: 0.30 metros al borde superior y 1.00 metros a los laterales.

El haz de cables no está sometido a ningún esfuerzo mecánico que no sea su propio peso, por ello es suficiente con la sujeción de las abrazaderas, con la recomendación por parte de los fabricantes de instalar un soporte cada 50-70 cm. Existen varios tipos, y fabricadas en distintos materiales, acero plastificado, acero inoxidable plastificado y material sintético. En la Figura 18 se muestra un ejemplo de un soporte sintético mediante tornillo.



Figura 18. Abrazadera para línea posada sobre fachada. (Cahors, Materiales para redes trenzadas, 2019.)

2.2 Cable

El cable propiamente dicho es el conjunto de todos los conductores que haya más su respectivo aislamiento. El más adecuado para esta aplicación es el Al Polirret, seleccionado a partir del catálogo de Prysmian [24], con una tensión asignada de 0.6/1 kV, y según la norma de diseño UNE 21030-1. Esta norma indica que para estas instalaciones los cables deben estar aislados con materiales termoestables para poder soportar la acción de la intemperie correctamente. Está formado por cuatro conductores aislados trenzados, como se puede observar en la Figura 19.



Figura 19. Cable Al Polirret. (Prysmian Group, 2017)

Cada cable tiene adjudicado una designación genérica compuesta por una serie de letras y números, cada uno con un significado. Cuando un fabricante no indica estos datos puede ser porque sus cables no cumplan con las normativas de seguridad o de funcionamiento.

A este cable se le designa genéricamente como AL RZ:

- AL: conductor de aluminio.
- R: aislante de polietileno reticulado.
- Z: elastómero termoestable libre de halógenos.

Desde el año 2003 en los edificios de nueva construcción es obligatorio el uso de cables libres de halógenos. Esto es por las ventajas que presentan, tales como la resistencia al fuego, una excelente capacidad de evitar la propagación de un posible incendio, y la emisión de humos menos opacos que facilitan la visión.

2.2.1 Conductor

Como su propio nombre indica, su función consiste en conducir la corriente eléctrica ejerciendo la mínima resistencia posible a su paso.

Tanto el metal de los tres conductores como el del neutro del cable Al Polirret es aluminio (Al). Este material es un excelente conductor del calor y la electricidad, y aunque tenga menor conductividad que su análogo, el cobre, pesa prácticamente la mitad y es más económico.

Al finalizar su vida útil, el aluminio puede reciclarse al cien por cien empleando muy poca energía en ello, del orden de un cinco por ciento de la que fue necesaria en su fabricación, generando así ahorros energéticos y medioambientales, ya que se disminuyen las emisiones de CO₂ en un noventa y cinco por ciento para un mismo proceso en el que se hubiese producido aluminio nuevo, y por supuesto beneficios económicos. Al no dañarse durante el proceso la estructura de este, puede ser reciclado indefinidamente.

En la Figura 20 puede verse este conductor, formado por varios hilos de aluminio.

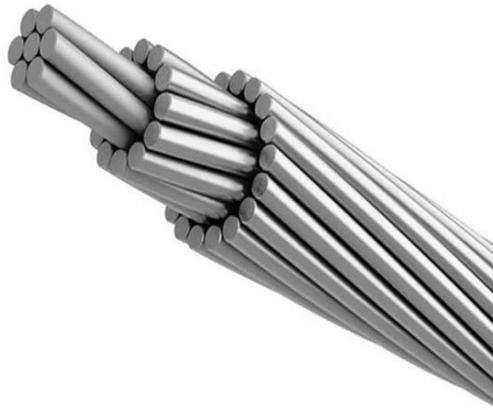


Figura 20. Conductor de aluminio. (Focus Technology Co., 2020)

2.2.2 Aislamiento

Cada uno de los conductores de los que se habla en el punto anterior van recubiertos por su correspondiente aislamiento de XLPE.

El XLPE tiene mejores características térmicas y eléctricas que el PVC, ya que es un material termoestable, frente a este último que es un termoplástico. Ambos difieren en cómo reaccionan ante los cambios de temperatura. En el caso del PVC se reblandece al calentarse, cambiando de forma y conservando esta una vez se enfría; mientras que el XLPE no modifica sus propiedades mecánicas ante variaciones de temperatura. Por esto, su mayor ventaja es que permite aumentar la temperatura máxima del conductor en servicio desde los 70°C (temperatura en régimen permanente en termoplásticos) a los 90°C.

Además, el PVC contiene cloro que es un halógeno, y como recientemente se ha comentado, ya no está permitido el empleo de este tipo de materiales en edificios nuevos.

3 ALGORITMO TERMOELÉCTRICO PARA EL DISEÑO DE UNA CANALIZACIÓN ELÉCTRICA

El diagrama de flujo expuesto en la Figura 21 representa el algoritmo termoelectrico usado para obtener la temperatura del cable en función de la corriente que circula por el conductor. Cada parte del diagrama de flujo representa una sección de este capítulo, salvo el último bloque condicional, al que se le dedicará el capítulo siguiente en su totalidad.

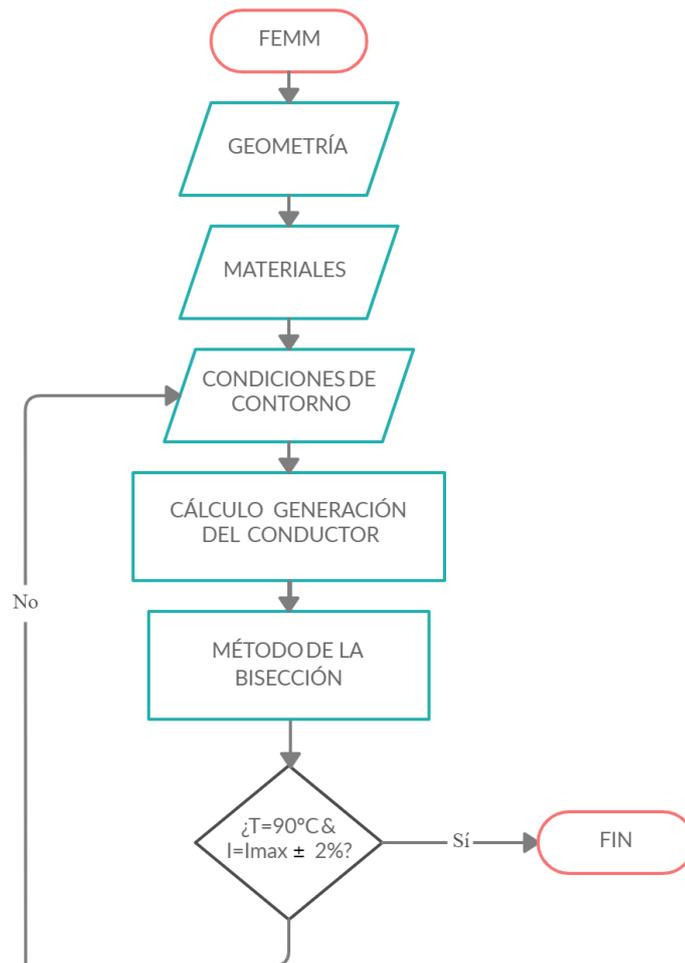


Figura 21. Diagrama de flujo del estudio termoelectrico.

3.1 FEMM

El FEMM es un software creado por el Dr. David Meeker basado en el método de elementos finitos, que permite obtener soluciones numéricas para medios continuos [25]. Realiza aproximaciones a ecuaciones diferenciales parciales complejas para la resolución de problemas en dos o tres dimensiones. Entre todas sus opciones, presenta un módulo para problemas de flujo de calor, mediante el cual se ha calculado el límite térmico de los cables.

FEMM está dividido en tres partes:

- Interactive Shell: de manera resumida, es la parte del programa que permite dibujar la geometría del

problema, definir las propiedades de los materiales y las condiciones de contorno. Permite importar archivos dwg creados previamente en otros programas como puede ser Autocad.

- Triangle.exe: una parte fundamental del método de elementos finitos consiste en la división en un número elevado de subdominios no-intersectantes, aquí por tanto es donde se realiza el mallado del problema. Utiliza el programa Triangle creado por Jonathan Shewchuck. Discretiza el dominio utilizando triángulos, consiguiendo así dividir al conjunto en pequeñas partes más sencillas. En los elementos más importantes del problema donde encuentra más información, como sería en este algoritmo los cables, realiza un análisis más exhaustivo, y de manera más general en el resto.
- Solvers: para los problemas de flujo de calor existe un comando solucionador denominado hsolv que recoge una serie de datos que describen al problema y resuelve las ecuaciones diferenciales parciales de estos para obtener así valores dentro del dominio de la solución.

3.2 Geometría

La geometría de los cables viene dada en los catálogos de fabricantes. Para cada tipo de instalación hay un cable adecuado, dependiendo de los niveles de tensión, ubicación, exposición, uso, etc.

Una vez seleccionado el que se quiere analizar y conocidas sus dimensiones físicas, ya se puede representar. Dibujar en FEMM es sencillo, aparte de importar archivos, está la posibilidad de dibujarlo en el propio programa.

Para representar un cable, se pueden dibujar dos arcos de circunferencia por cada uno de los conductores para completar la sección. Igual para los aislantes, y las cubiertas en el que caso de que las tuviera. El ambiente que rodea al cable habrá que representarlo con la suficiente magnitud como para que se puedan apreciar correctamente todos los flujos de calor. Por tanto, si es un cable enterrado, habría que definirle alrededor una zona que simulase el terreno donde está, si es un cable aéreo, se dibuja una zona simulando el aire, y así para el resto de posibles entornos.

3.3 Materiales

Cada una de las geometrías definidas será de un material concreto. Para que el programa reconozca esto, hay que añadir una línea de nuevo material por cada uno de los presentes, a la que se proporcionan cinco parámetros distintos. Primero hay que asignarle el nombre, que ya quedará guardado de ahí en adelante, después se indican las propiedades de este material, en este caso, las conductividades térmicas que tiene en la dirección x y en la dirección y, la densidad volumétrica de generación de calor, y la capacidad calorífica volumétrica. En este algoritmo, la generación de calor se calculará más adelante, dentro del proceso iterativo, y se modificará en ese punto las propiedades del material al nuevo valor.

3.4 Transmisión de calor

Una parte fundamental en un modelado de estas características consiste en definir los mecanismos de transferencia de calor que se van a dar en la instalación para así conseguir ajustar al máximo el modelo con la realidad. Existen tres maneras diferentes de transmisión de calor: conducción, convección y radiación. La primera condición para que cualquiera de ellos se dé, es que exista un gradiente de temperatura. En cualquier problema real lo normal es que se den los tres [26].

3.4.1 Conducción

Se trata del único mecanismo que tiene lugar a través de un cuerpo opaco, en contacto físico directo con el otro medio.

La conducción se rige por la Ley de Fourier, que queda expuesta en la siguiente fórmula.

$$Q = -k \cdot A \cdot \frac{dT}{dx}$$

Ecuación 1. Ley de Fourier.

Donde:

- Q: calor transferido por conducción, W.
- k: conductividad térmica, W/mK.
- A: área de transferencia, m².
- dT/dx: gradiente de temperatura en la dirección x, K/m.

El signo negativo de la ecuación indica que el flujo de calor se transfiere en la dirección de las temperaturas decrecientes.

La conductividad es una propiedad física de cada material e indica la facilidad que tiene este para dejar pasar corriente eléctrica a su través, por ello se buscan como conductores aquellos con una conductividad alta, y como aislantes los que tengan este parámetro lo menor posible. En el modelo se tiene que incluir el valor de conductividad térmica de cada uno de los materiales implicados, y aunque esta propiedad varía con la temperatura, en metales permanece prácticamente constante debido a que la resistividad eléctrica se suele incrementar de forma proporcional a la temperatura; y en los no metales también es aproximadamente constante, por lo que se pueden suponer valores fijos para todo el modelado.

3.4.2 Convección

Tiene que haber al menos un fluido, y este estar en contacto con otro fluido o con una superficie sólida. Existen dos tipos de convección, libre y forzada.

La convección forzada ocurre cuando hay algún agente externo que provoque el movimiento del fluido, como puede ser una bomba o un ventilador.

En cambio, la convección libre se da en fluidos que se mueven únicamente debido a las fuerzas de masa (fuerzas gravitacionales y diferencias de densidad).

Este mecanismo se rige por la Ley del enfriamiento de Newton:

$$Q = h \cdot A(T_1 - T_2)$$

Ecuación 2. Ley del enfriamiento de Newton.

Donde:

- Q: calor transferido por convección, W.
- h: coeficiente de película, W/m²K.
- A: área de transferencia, m².
- (T₁ - T₂): diferencia de temperatura, K.

El coeficiente de película no es propiedad física del material, hay que calcularlo para cada caso y puede resultar difícil de cuantificar, ya que depende de múltiples factores (propiedades, velocidad del fluido, presión, geometría, etc.).

3.4.3 Radiación

Único mecanismo que no requiere de contacto físico directo.

Es el calor que emite un cuerpo por el simple hecho de encontrarse a una determinada temperatura por encima de cero kelvin, y para que se dé ambos medios deben verse. Como no es necesario que haya masa entre ellos, es también el único método de transferencia que se da en el vacío.

Este se rige por la Ley de Stefan-Boltzmann, que es la siguiente

$$Q = \epsilon \cdot A \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Ecuación 3. Ley de Stefan-Boltzmann.

Donde:

- Q: calor transferido por radiación, W.
- A: área de transferencia, m².
- ϵ : emisividad.
- σ : constante de Stefan-Boltzmann: $5.678 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$.
- $(T_1^4 - T_2^4)$: diferencia de temperaturas a la cuarta, K.

La emisividad es la proporción de radiación que emite un cuerpo debido a su temperatura, en comparación con un cuerpo negro, el cual absorbe toda la luz y la radiación que inciden sobre él. Es adimensional y adopta valores entre 0 y 1.

Después de comprender la parte teórica, se va a ver como entiende el FEMM estos mecanismos. Existe una función para añadir propiedades de las condiciones de contorno. Lo normal en un algoritmo termoelectrico de estas características es que se den la totalidad de estos mecanismos, para los que habrá que ir proporcionando los siguientes valores:

- Temperatura fija: se configura la temperatura deseada.
- Flujo de calor por conducción: establecer el valor de la densidad de flujo de calor pertinente.
- Flujo de calor por convección: indicar el coeficiente de película y la temperatura externa deseada.
- Flujo de calor por radiación: establecer la emisividad deseada y la temperatura externa deseada.

3.5 Generación de calor

Al circular la corriente eléctrica a través de un conductor se produce el denominado Efecto Joule. La temperatura del conductor se eleva debido a que parte de la energía cinética de los electrones se transforma en calor [27]:

$$P = I^2 \cdot R$$

Ecuación 4. Efecto Joule.

Donde:

- P: potencia, W.
- I: intensidad, A.
- R: resistencia, Ω .

Debido a la variación de la temperatura y la naturaleza de cada material, la resistencia eléctrica puede aumentar o disminuir, esta variación la mide el coeficiente de temperatura de la resistencia eléctrica. Para la mayoría de los conductores metálicos tiende a aumentar al incrementarse la temperatura. Puede obtenerse el valor atendiendo a la siguiente fórmula:

$$R = R_0(1 + \alpha \cdot \Delta T)$$

Ecuación 5. Resistencia eléctrica.

Donde:

- R: resistencia total a la temperatura T, Ω .
- R₀: resistencia de referencia a una temperatura fijada T₀, Ω .
- α : coeficiente de temperatura, 1/K. Para el aluminio, $\alpha=3.9 \cdot 10^{-3} (1/\text{K})$ [6].

- $\Delta T: T - T_0$: diferencia de temperatura respecto a la fijada, K.

Se tiene que aplicar la fórmula del Efecto Joule definida en la Ecuación 4 a todos los conductores del cable que se esté analizando por los que circule corriente eléctrica.

3.6 Método de la bisección

Se trata de un sencillo método matemático basado en el teorema del valor intermedio para resolver ecuaciones de una variable. Es un algoritmo de búsqueda de raíces que va dividiendo el intervalo a la mitad y selecciona el subintervalo que contiene a la raíz, para llegar a esto se tienen que ir siguiendo las siguientes indicaciones.

Como variables de entrada se indica un límite inferior, a , y un límite superior, b , los cuales formarán el intervalo $[a, b]$ dentro del cual el algoritmo deberá buscar la solución. También se indica la tolerancia que se desea dar al resultado buscado.

La función $f(x)$ que se quiera analizar, tiene que ser continua en el intervalo definido $[a, b]$, lo siguiente es verificar que el producto de $f(a)$ y $f(b)$ es menor que cero (Ecuación 6), y si es así calcula el punto medio c del intervalo indicado anteriormente (Ecuación 7) y si $f(c)$ es igual a cero ya se habría encontrado la raíz. Si en cambio no sucede lo anterior se comprueba si $f(c)$ tiene signo opuesto a $f(a)$ o $f(b)$ y con el que cumpla esta condición se crea un nuevo intervalo $[a, c]$ o $[c, b]$ según corresponda (Ecuación 8), y se vuelven a realizar los pasos anteriores hasta que se alcance el resultado esperado a partir de la tolerancia que se le haya querido dar al algoritmo [28].

$$f(a) \cdot f(b) < 0$$

Ecuación 6. Comprobación del valor del producto $f(a)$ y $f(b)$.

$$c = \frac{a + b}{2}$$

Ecuación 7. Cálculo del punto medio del intervalo, c .

$$c = \begin{cases} f(a) \cdot f(c) < 0 & b = c \\ f(a) \cdot f(c) > 0 & a = c \end{cases}$$

Ecuación 8. Designación del nuevo intervalo de búsqueda.

La forma de operar en este algoritmo propuesto consiste en buscar la intensidad que circula por el cable cuando este alcanza la temperatura de régimen permanente. Por lo que irá buscando entre un rango de intensidades (dentro del intervalo $[a, b]$), hasta que el problema converge. Ya se verá con más detenimiento en el siguiente capítulo, pero se han considerado valores aceptables de intensidades aquellos que diferían como mucho en un 2% del valor indicado en el catálogo, por lo que cuando la diferencia era mayor se reajustaban las condiciones de contorno hasta alcanzar una simulación lo más similar posible.

4 VALIDACIÓN DEL ALGORITMO TERMOELÉCTRICO

En este apartado se va a validar el algoritmo definido en el Capítulo 3, para calcular la máxima corriente admisible en un conductor apoyado sobre fachada. Para ello se van a comparar los resultados de máxima corriente admisible obtenidos mediante el algoritmo propuesto, con los proporcionados por las tablas de fabricante para cables trifásicos de alterna dispuestos sobre fachada.

4.1 Geometría del modelo

La geometría de los cables escogidos para este Trabajo Fin de Grado viene dada en el catálogo de la empresa Prysmian para cada sección. En las tablas mostradas en la Figura 22 y la Figura 23 aparecen los datos que proporcionan y a partir de los cuales se han definido los problemas. Se han analizado cinco secciones distintas que aparecen señaladas en la Figura 23 mediante un recuadro naranja. El resto no han sido contempladas porque quedaban fuera de los requerimientos del problema, por ser cables para redes tensadas y no posadas o por ser cables monofásicos, cuando se están estudiando redes trifásicas.

Número de conductores x sección mm ²	Carga de rotura mínima daN	Espesor de aislamiento mm	Diámetro conductor aislado mm	Resistencia del conductor a 20°C Ω/km
Conductor: Fase o neutro no fiador				
16	190	1,2	7,9	1,91
25	300	1,4	9,6	1,2
50	600	1,6	12,3	0,641
95	1140	1,8	16,1	0,32
150	1800	2	19,3	0,206
Conductor: Neutro fiador ALMELEC				
29,5	870	1,4	10,4	1,15
54,6	1660	1,6	13	0,63
80	2000	1,8	15,8	0,4

Figura 22. Características técnicas cable AL RZ (I). (Prysmian, 2016)

Número de conductores x sección mm ²	Diámetro exterior mm	Peso total kg/m	Intensidad admisible cable posado sobre fachadas* A	Intensidad admisible cable tendido con fiador de acero* A	Caída de tensión V/A km	
					cos ϕ = 1	cos ϕ = 0,8
2 x 16 Al	15.8	145	73	81	4,88**	4**
2 x 25 Al	19.2	225	101	109	3,06**	2,54**
4 x 16 Al	18	285	67	72	4,24	3,48
4 x 25 Al	23.1	445	90	97	2,66	2,21
4 x 50 Al	29.6	770	133	144	1,42	1,22
3 x 95 / 50 Al	38	1250	207	223	0,71	0,65
3 x 150 / 95 Al	46.5	1875	277	301	0,46	0,44
1x 16 Al/29,5 Alm	16,8	187	-	81	4,88**	4**
1x 25 Al/54.6 Alm	22.6	310	-	110	3,06**	2,54**
1x 50 Al/54.6 Alm	25.3	385	-	165	1,61**	1,4
2 x 16 Al/29,5 Alm	17,5	255	-	81	4,88**	4**
3 x 16 Al/29,5 Alm	20,0	320	-	72	4,24	3,48
3 x 25 Al/29,5 Alm	27,1	425	-	100	2,66	2,21
3 x 25 Al/54.6 Alm	31	535	-	100	2,66	2,21
3 x 50 Al/29,5 Alm	32,1	640	-	150	1,42	1,22
3 x 50 Al/54.6 Alm	36	765	-	150	1,42	1,22
3 x 95 Al/54.6 Alm	44.0	1260	-	230	0,71	0,65
3 x 150 Al/80 Alm	51	1700	-	305	0,46	0,44

Figura 23. Características técnicas cable AL RZ (II). (Prysmian, 2016)

Los cinco cables objeto de estudio se pueden dividir, por sus similitudes, en dos grupos.

El primero de ellos formado por cables que tienen los tres conductores de la misma sección que el neutro, y todos estos son del mismo material. Las distintas secciones son: 16 mm², 25 mm² y 50 mm². A partir de ahora se llamará a este conjunto geometría 1. La Figura 24 muestra el dibujo de este primer grupo de cables en FEMM.

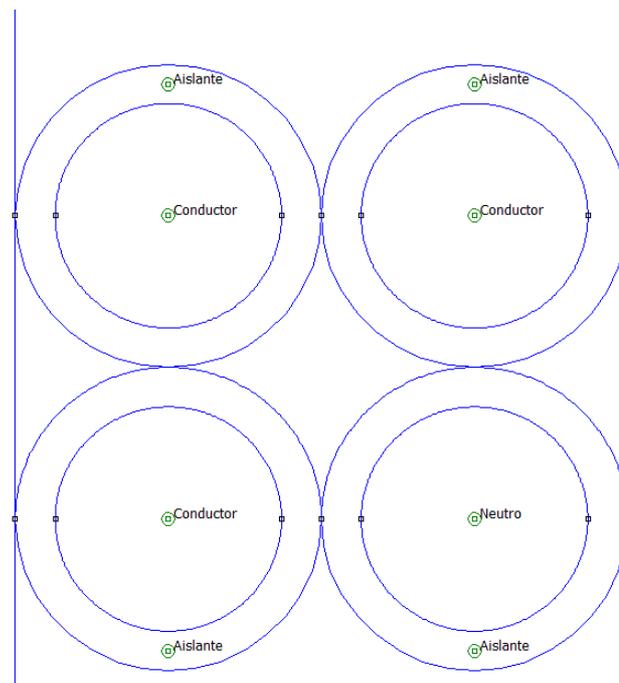


Figura 24. Geometría 1.

El segundo grupo abarca a los dos cables que tienen los tres conductores de la misma sección, y aunque el neutro es también del mismo material, tiene menor sección. Uno tiene cada conductor de 95 mm² y el neutro de 50 mm², y el otro cable, conductor de 150 mm² y neutro de 95 mm². Pasará a denominarse geometría 2, y queda representada como en la Figura 25.

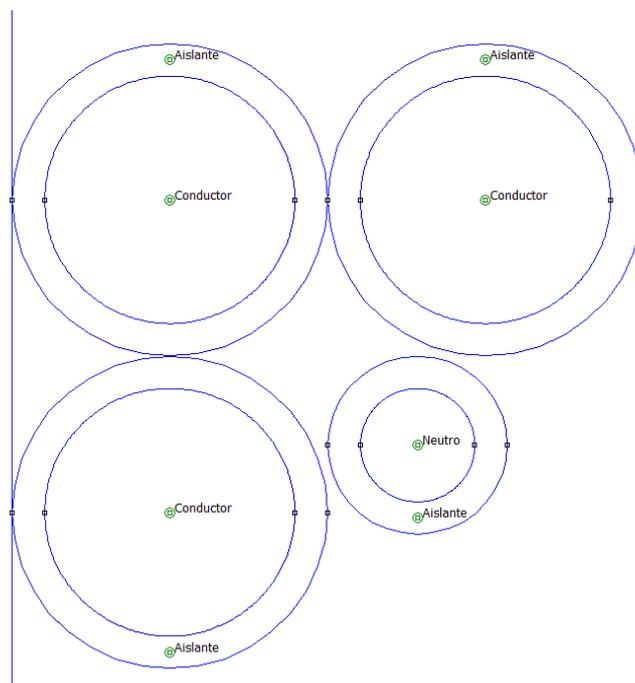


Figura 25. Geometría 2.

El mallado o triangulación del sistema resulta como se muestra en la Figura 26. Puede apreciarse como en la zona del cable se le ha dado mucha más precisión que en el resto del sistema.

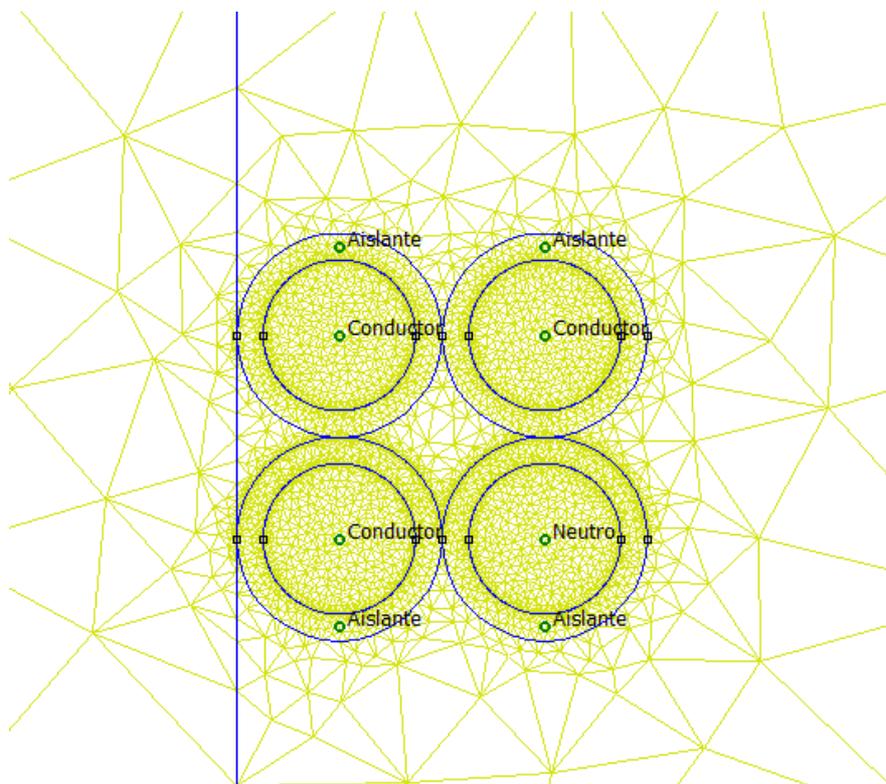


Figura 26. Triangulación del modelo.

4.2 Definición de materiales

En este caso se definen cinco materiales, con sus correspondientes características:

- Conductor: como ya se ha indicado en el Capítulo 2, estos son de aluminio, por lo que serán las características de este metal las que vayan asociadas a esta nueva definición. En el código se añade un nuevo material, con el nombre de conductor al que se le aplicarán las condiciones de este.
- Neutro: aunque realmente sea del mismo material que el conductor, hay que definirlo como un caso aparte ya que por el neutro no circula corriente eléctrica, y, por tanto, no tendrá generación de calor, difiriendo así en el comportamiento.
- Aislante: como todos los aislantes tienen las mismas características se define un único material denominado aislamiento.
- Pared: se supone un muro de ladrillo, lo suficientemente grande como para que permita apreciar la transmisión de calor del cable a esta.
- Aire: el aire estará rodeando todo el conjunto del cable y la pared. Es el mejor aislante existente, por lo que su conductividad es muy pequeña.

4.3 Transmisión de calor en el modelo

En la Figura 27 se ha dibujado simbólicamente la instalación con los correspondientes mecanismos de calor que participan. Puede verse la pared, y el cable con sus cuatro conductores y aislantes posado sobre esta. Como es conocido, la transferencia de calor se da siempre que haya un gradiente de temperatura y va desde el foco caliente al frío, esto queda representado en la ilustración mediante las tres flechas con cada uno de los calores intercambiados desde el cable hasta el ambiente y la pared.

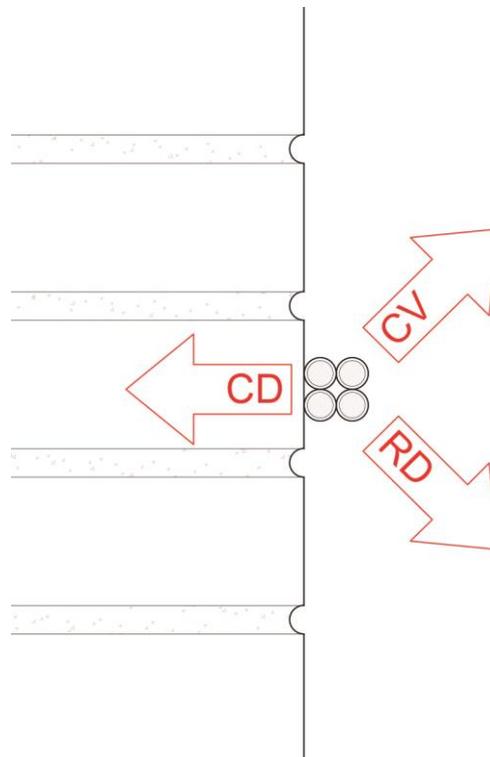


Figura 27. Transmisión de calor en el modelo.

4.3.1 Conducción en el modelo

La conducción en este caso se dará entre los cables, y entre estos y la pared. Se ha modelado muy pequeña ya que habrá puntos en los que no se dé debido a que no haya contacto físico directo con la fachada por la existencia de una abrazadera o porque entre la unión entre ambas no llegue a darse; pero puede existir algún punto en el que sí apoye directamente, por lo que se han intentado ajustar los cálculos en función de esto. Las conductividades térmicas de cada material son:

- Aluminio: 210 W/mK. [29]
- XLPE: 0.3 W/mK. [29]
- Aire: 0.02 W/mK. [29]
- Ladrillo: 0.5 W/mK. [29]

4.3.2 Convección en el modelo

Para el aire en convección natural, que es en las condiciones en las que está en este caso, se puede tomar un valor del coeficiente de película de entre 5 W/m²K y 25 W/m²K.

4.3.3 Radiación en el modelo

En este trabajo no se ha tenido en cuenta la radiación ya que en el catálogo de Prysmian se asume en los datos que proporcionan, facilitando un coeficiente de corrección para aquellos cables que estén directamente expuestos al sol, que no es el caso que se contempla.

4.4 Validación del algoritmo

Partiendo del modelo ya definido, el objetivo es poder validarlo. Esto se hará comprobando sus resultados y comparándolos con los de las tablas, para ver si constituye una buena representación de la instalación.

Como ya es conocido, el método de la bisección va a proporcionar como resultado la corriente que circula por el conductor cuando este alcanza su temperatura de régimen permanente, que son los 90°C indicados en numerosas ocasiones.

Obtenido el valor de la corriente circulante cuando se alcanza la temperatura de servicio para una sección concreta, se compara con el valor que da el fabricante en sus tablas. Para que el modelo se dé por bueno, estas dos intensidades deben ser prácticamente idénticas. En este caso se ha decidido que el resultado sea aceptable cuando el error sea inferior al 2%, asumiendo que es muy complejo simular el proceso con un cero por ciento de error debido al gran número de variables implicadas.

Al ejecutar el código, el método de la bisección buscará el valor de la corriente, y FEMM abrirá una ventana en la que mostrará los resultados del código térmico de manera visual. Utiliza una escala de colores para mostrar los gradientes de temperatura, esta es la que se muestra en la Figura 28 donde el color rosa de la izquierda indica los puntos más calientes y el azul de la derecha los fríos. Entre ambos extremos hay una diferencia de temperatura de unos 50°C.



Figura 28. Escala de temperaturas en FEMM.

En lo que sigue de capítulo se va a ir analizando uno por uno cada resultado para todas las secciones de cada una de las dos geometrías, y el error que esta intensidad sobre fachada obtenida mediante el algoritmo presenta respecto a los datos reales de la columna de máxima intensidad admisible de las tablas. Este error se cuantifica de la siguiente manera:

$$Error(\%) = \frac{|I_{modelo}(A) - I_{tablas}(A)|}{I_{tablas}(A)} \cdot 100$$

Ecuación 9. Cálculo del error del modelo.

4.4.1 Geometría 1

Esta es la que quedaba definida en la Figura 24. Ahora, en la Figura 29 se muestra esta misma imagen, pero con los resultados térmicos. Se puede observar que el cable del neutro, que es el que está en la parte inferior a la derecha, tiene menor temperatura que los tres conductores ya que no circula corriente por él, y como estos conductores alcanzan la temperatura máxima admitida por el material aislante. El código correspondiente a esta geometría se incluye en el Anexo A.

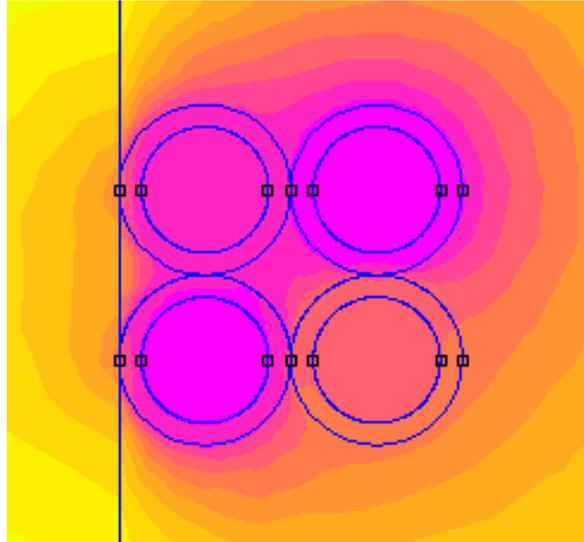


Figura 29. Modelo térmico geometría 1.

4.4.1.1 Cable 4x16 mm²

Si se recuerda el diagrama de flujo presentado en la Figura 21 donde se indicaba la manera de operar en el proceso iterativo, al obtener un primer resultado se comprueba si está dentro de la toleración considerada como aceptable y si no es así se revisan los parámetros de la transmisión de calor hasta que se tenga un resultado representativo de la realidad.

El coeficiente de película para el aire en convección natural tiene un rango amplio, y su selección es uno de los parámetros más importantes. Por tanto, se evalúan diferentes coeficientes de película y se compara el error obtenido con el modelo termoeléctrico con respecto a las tablas de fabricantes. En la Figura 30 se muestra este error, representado en el eje de ordenadas, para distintos valores de coeficiente de película, en el eje de abscisas.

Esta comparación concluye que el coeficiente de película $h = 6 \text{ W/m}^2\text{K}$ es el que proporciona menor error, y, por tanto, es el coeficiente utilizado para el algoritmo.

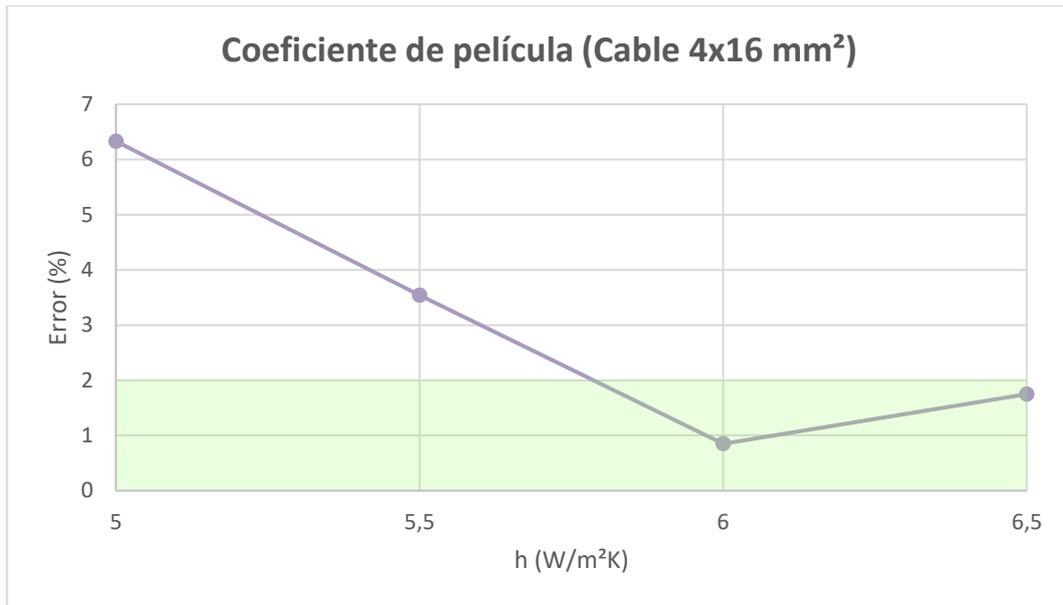


Figura 30. Análisis de datos geometría 1 sección 4x16 mm².

Para calcular el error tal y como se ha mostrado en la Ecuación 6, hay que tener el valor de la intensidad máxima que esta sección admite sacado directamente de la tabla de Prysmian, y el obtenido mediante el modelo.

- Intensidad admisible sobre fachada sección 4x16 mm²: 67 A.
- Intensidad obtenida en FEMM sección 4x16 mm²: 66.43 A.

$$Error_{16\text{ mm}^2}(\%) = \frac{|66.43\text{ A} - 67\text{ A}|}{67\text{ A}} \cdot 100 = 0.85\%$$

El valor obtenido con FEMM difiere en un 0.85% de la realidad, menor que la máxima tolerancia, y, por tanto, se considera aceptable.

4.4.1.2 Cable 4x25 mm²

Nuevamente, se procede de la misma manera que en el punto anterior. Los resultados quedan reflejados en la Figura 31, donde el pico mínimo es el que corresponde a un coeficiente de película de $h=6\text{ W/m}^2\text{K}$.

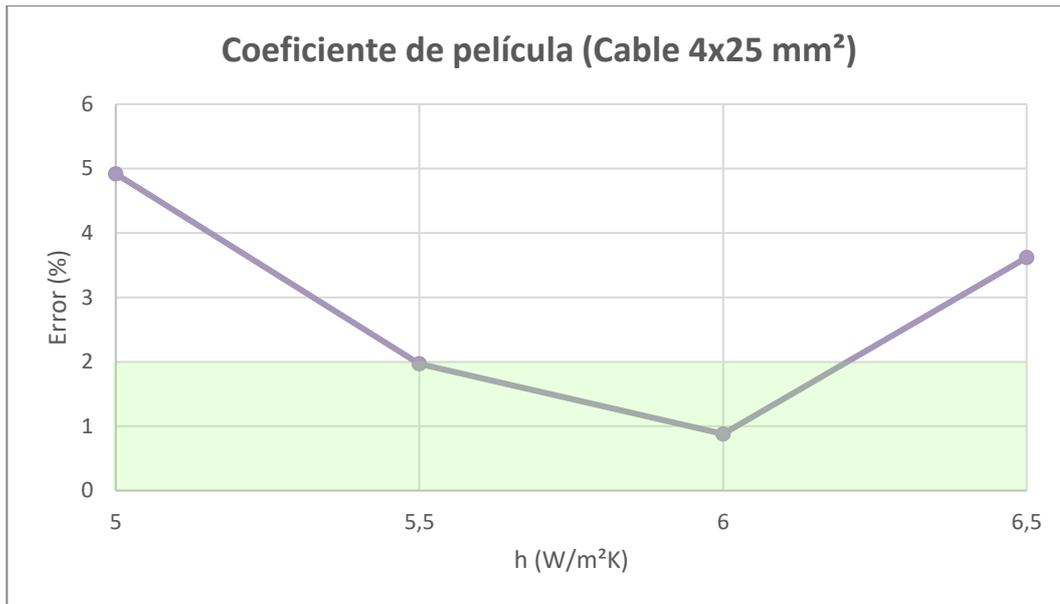


Figura 31. Análisis de datos geometría 1 sección 4x25 mm².

Las intensidades para esta sección son:

- Intensidad admisible sobre fachada sección 4x25 mm²: 90 A.
- Intensidad obtenida en FEMM sección 4x25 mm²: 90.79 A.

$$Error_{25\text{ mm}^2}(\%) = \frac{|90.79\text{ A} - 90\text{ A}|}{90\text{ A}} \cdot 100 = 0.88\%$$

Este error del 0.88% también es aceptable.

4.4.1.3 Cable 4x50 mm²

Dentro de esta primera geometría, los resultados para la mayor sección quedan reflejados en la Figura 32. El mínimo se obtiene al igual que en los dos casos anteriores para un valor de coeficiente de película de $h=6$ W/m²K.

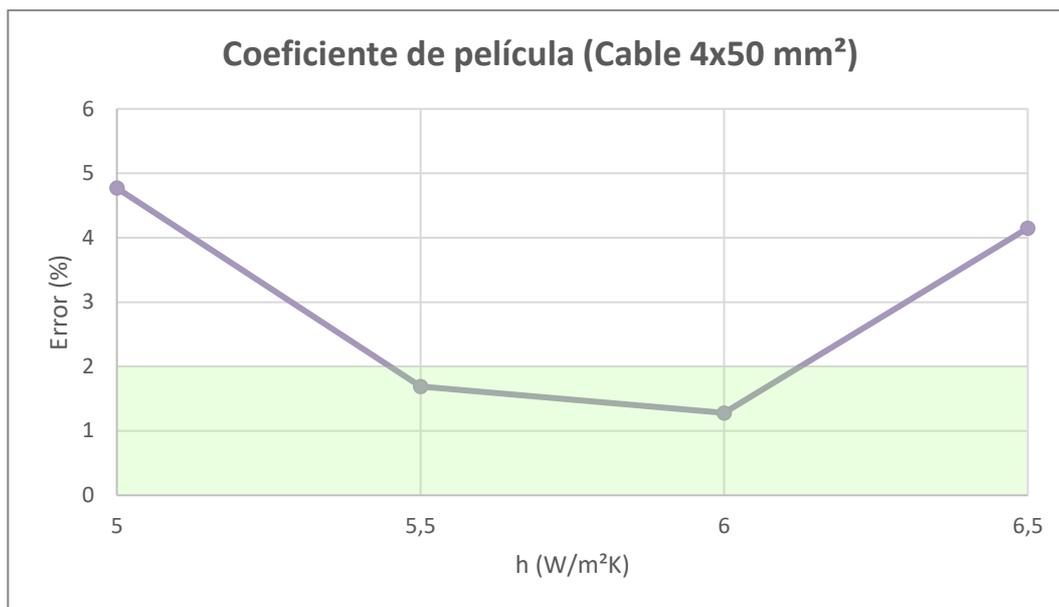


Figura 32. Análisis de datos geometría 1 sección 4x50 mm².

Las intensidades para esta sección son:

- Intensidad admisible sobre fachada sección 4x50 mm²: 133 A.
- Intensidad obtenida en FEMM sección 4x50 mm²: 134.70 A.

$$Error_{50\text{ mm}^2}(\%) = \frac{|134.70\text{ A} - 133\text{ A}|}{133\text{ A}} \cdot 100 = 1.28\%$$

Este porcentaje supera el 1%, pero aun así sigue estando dentro de la tolerancia exigida, por lo que es admisible.

4.4.1.4 Resultados geometría 1

La Tabla 1 recoge todos los resultados de este primer caso. Incluye para las tres secciones la corriente indicada en las tablas, la corriente calculada, y el error. Con esto se puede concluir que el algoritmo es capaz de calcular apropiadamente las corrientes admisibles para esta geometría.

	I _{tablas} (A)	I _{FEMM} (A)	Error (%)
Geometría 1 (s=4x16mm²)	67	66.43	0.85
Geometría 1 (s=4x25mm²)	90	90.79	0.88
Geometría 1 (s=4x50mm²)	133	134.70	1.28

Tabla 1. Resultados de la geometría 1.

4.4.2 Geometría 2

En la Figura 33 aparece el modelo térmico de la geometría 2 que se explicaba en la Figura 25. El neutro está a menor temperatura por no circular corriente eléctrica a su través y se tiene una de las fases que al calentarse un poco más que el resto es a la que se le impone la temperatura máxima posible, que es la que está en el lado derecho de la parte superior. Este hecho de que sea ese conductor el que alcance la máxima temperatura en lugar de los dos que están sobre la pared, puede ser debido a que el aire que lo rodea esté a 40°C y en convección natural, no contribuyendo así a una correcta refrigeración de este. El código desarrollado para esta geometría queda incluido en el Anexo B.

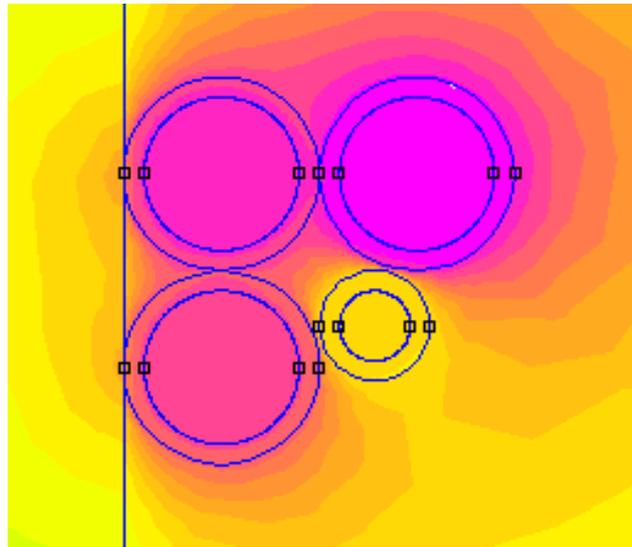


Figura 33. Modelo térmico geometría 2.

4.4.2.1 Cable 3x95/50 mm²

Al igual que con las secciones anteriores, para esta y la siguiente se va a buscar el coeficiente de película óptimo. El modo de operar es el mismo, se aplican diferentes coeficientes de película y se mira cuál de ellos proporciona un menor error respecto al valor tabulado.

En la Figura 34 puede verse el punto mínimo de error. El mejor resultado se obtiene para un coeficiente de película $h= 5.5 \text{ W/m}^2\text{K}$. Además, es el único valor que está dentro del rango de tolerancia.

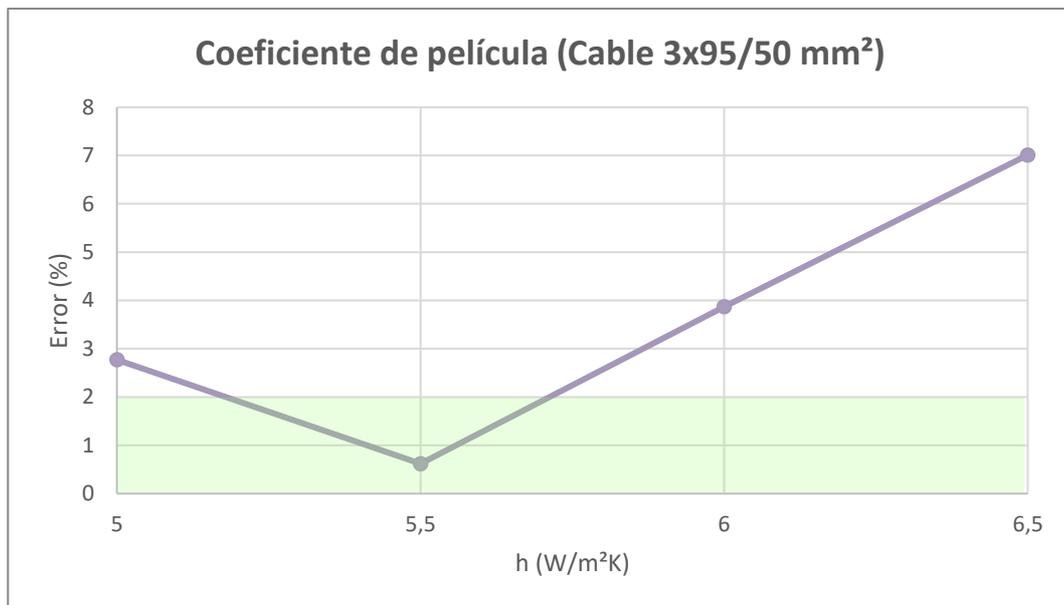


Figura 34. Análisis de datos geometría 2 sección 3x95/50 mm².

Las intensidades en este caso son:

- Intensidad admisible sobre fachada sección 3x95/50 mm²: 207 A.
- Intensidad obtenida en FEMM sección 3x95/50 mm²: 208.28 A.

$$Error_{95/50 \text{ mm}^2}(\%) = \frac{|208.28 \text{ A} - 207 \text{ A}|}{207 \text{ A}} \cdot 100 = 0.62\%$$

De nuevo se consigue un resultado bastante similar al tabulado, con una diferencia del 0.62%.

4.4.2.2 Cable 3x150/95 mm²

Por último, en la Figura 35, se presentan los resultados de la última sección, que es la mayor de todas las estudiadas. El mínimo se da para un coeficiente de película $h=5$ W/m²K. Es también, como en el caso anterior, el único resultado posible que respete la tolerancia.

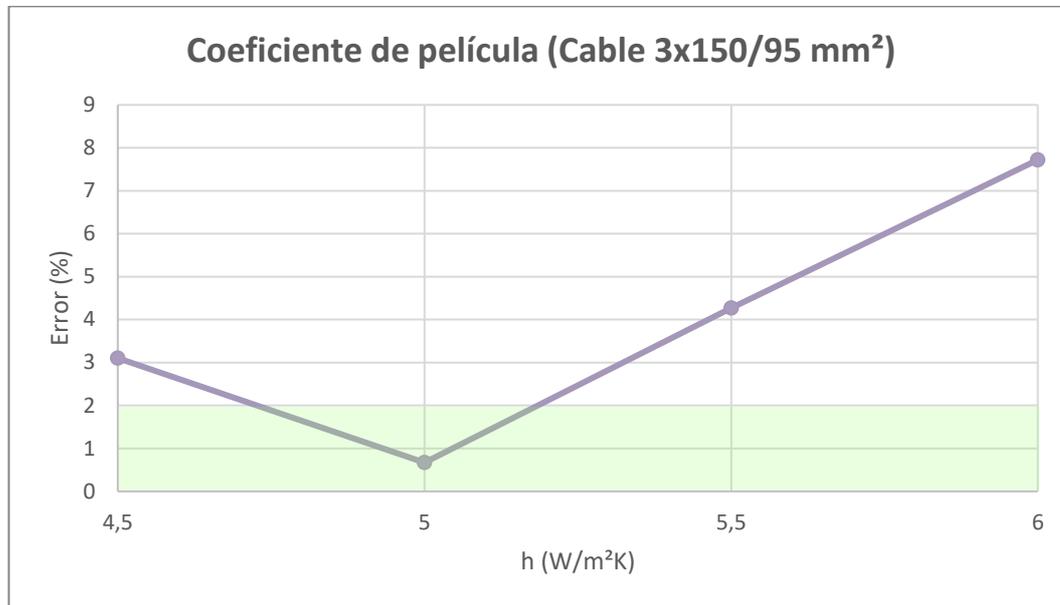


Figura 35. Análisis de datos geometría 2 sección 3x150/95 mm².

Las intensidades de esta sección son:

- Intensidad admisible sobre fachada sección 3x150/95 mm²: 277 A.
- Intensidad obtenida en FEMM sección 3x150/95 mm²: 278.85 A.

$$Error_{150/95 \text{ mm}^2}(\%) = \frac{|278.85 \text{ A} - 277 \text{ A}|}{277 \text{ A}} \cdot 100 = 0.67\%$$

El error respecto al valor del fabricante es de un 0.67%, por tanto, dentro del rango exigido.

4.4.2.3 Resultados geometría 2

En la Tabla 2 se muestran todos los resultados para el segundo caso. Incluye para las dos secciones, la corriente indicada en las tablas, la corriente calculada, y el error. Como todos los errores son pequeños y están dentro de la tolerancia exigida, puede afirmarse que el modelo es una buena representación de las tablas, y que por tanto ya puede trabajarse sobre él.

	I_{tablas} (A)	I_{FEMM} (A)	Error (%)
Geometría 2 (s=3x95/50 mm ²)	207	208.28	0.62
Geometría 2 (s=3x150/95 mm ²)	277	278.85	0.67

Tabla 2. Resultados de la geometría 2.

5 RESULTADOS DEL SISTEMA HÍBRIDO

Una vez dado por válido el modelo ya puede comenzarse a plantear la red híbrida, que es realmente el objetivo de este Trabajo Fin de Grado.

Partiendo de las dos geometrías anteriores, se modificará la corriente que circula por cada conductor para simular esta propuesta de la red. Ahora se emplearán dos de ellos para la distribución de alterna, y otros dos para la de continua, como se indicaba en la Figura 16.

El objetivo es conseguir la máxima transferencia de potencia posible en la red, por lo que se irá comparando la potencia de la instalación trifásica de partida, con la que transfiere esta nueva configuración.

La potencia de una instalación trifásica viene dada por la siguiente expresión:

$$P_{AC}(W) = 3 \cdot U_{AC} \cdot I_{AC}$$

Ecuación 10. Potencia de una red alterna trifásica.

Donde:

- U: Tensión de alterna de cada fase, V. Como ya se comentó esta es de 230 V.
- I: Corriente que circula por cada fase, A.

En esta red híbrida ahora la potencia será una expresión con dos sumandos, uno para la potencia proporcionada por la corriente continua y otra para la alterna. Quedando de la siguiente manera:

$$P_{DC/AC}(W) = U_{AC} \cdot I_{AC} + U_{DC} \cdot I_{DC}$$

Ecuación 11. Potencia de la red mixta.

Donde:

- U_{DC} : Tensión de continua, V. Se ha supuesto de 750 V.
- I_{DC} : Corriente de continua, A.

Por tanto, la expresión anterior quedaría para cada caso:

$$P_{DC/AC}(W) = 230 V \cdot I_{AC} + 750 V \cdot I_{DC}$$

Solo observando esta expresión ya puede intuirse el aumento que la corriente continua puede proporcionar a la red, al ser su tensión del orden del triple que la de alterna, y depender el término de la potencia directamente de este.

Obtenidos ambos valores, se analizará el incremento de la potencia respecto al caso inicial mediante la Ecuación 12, para ver si de verdad supone una mejora el cambio propuesto.

$$\Delta P(\%) = \frac{|P_{DC/AC}(kW) - P_{AC}(kW)|}{P_{AC}(kW)} \cdot 100$$

Ecuación 12. Incremento de potencia.

La forma general de operar ha consistido en ir fijando valores de corriente continua y viendo que parejas de corriente con la alterna se formaban cumpliendo siempre el criterio térmico.

Van a analizarse dos configuraciones posibles para cada una de las dos geometrías. Estas se explican a continuación dentro de sus apartados correspondientes.

5.1 Configuración diagonal geometría 1 (1.A)

En esta configuración de la geometría 1, los dos conductores de cada tipo de corriente quedan en diagonal entre sí. Esta disposición queda reflejada en la Figura 36.

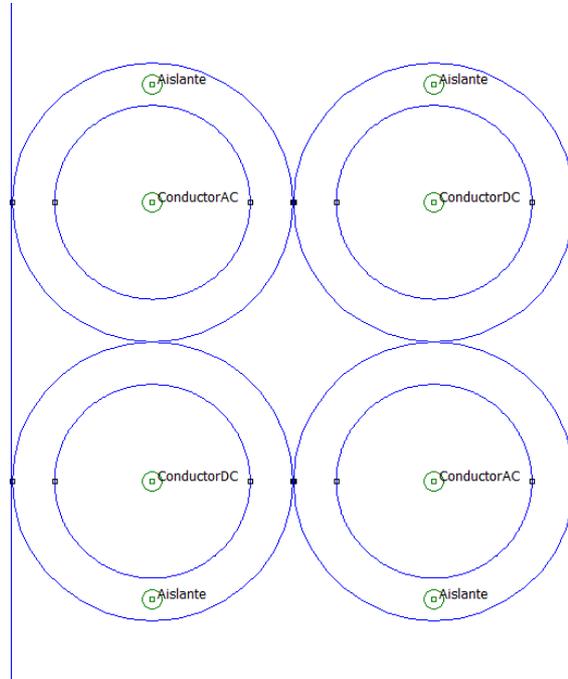


Figura 36. Geometría red mixta configuración 1.A.

En la Figura 37 se muestra un ejemplo de los resultados del algoritmo para una de las secciones en esta configuración. Puede apreciarse como los conductores de continua alcanzan una mayor temperatura, ya que al tener mayor valor de tensión como se vio al principio de este mismo capítulo, contribuirá en mayor medida al total de la potencia.

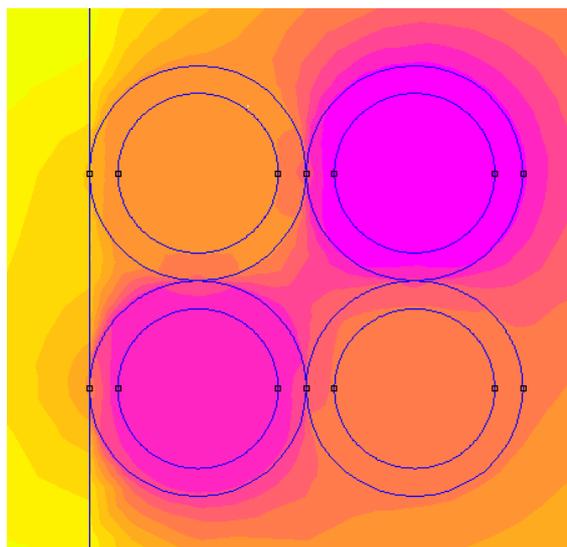


Figura 37. Modelo térmico configuración 1.A.

En los siguientes subapartados, se muestran los resultados obtenidos para las tres secciones posibles. Para cada caso, aparece la potencia máxima que puede alcanzar la red transportando únicamente AC, la que podría alcanzar si esta fuera mixta, y la mejora en porcentaje de potencia que esto conlleva. El código de esta configuración se muestra en el Anexo C.

5.1.1 Configuración diagonal (1.A) cable 4x16 mm²

En este caso se ha ido aumentando la corriente continua desde 73 A hasta 82 A, ya que en un análisis previo más general se pudo apreciar que el máximo valor de potencia se daba dentro de ese rango de intensidades.

Los resultados para este caso se muestran en la Figura 38. En el eje de abscisa están cada una de las diez simulaciones realizadas, y para cada una de ellas dos barras de diferente color hasta los amperios que corresponda en el eje de ordenadas. El color más claro representa a la corriente continua que se va imponiendo, y las barras más oscuras a la corriente alterna correspondiente en cada caso, que como puede verse conforme aumenta la primera, esta va disminuyendo.

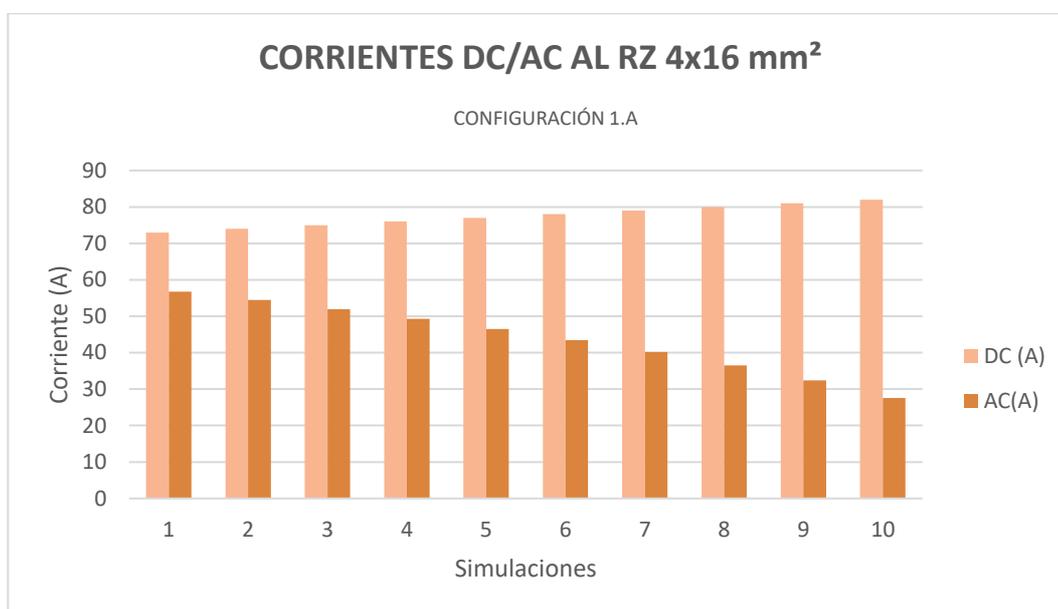


Figura 38. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x16 mm².

Con la gráfica anterior no se tendría suficiente información que permita saber que pareja DC/AC es la mejor. Para ello, se ha calculado la potencia de la red mixta para cada simulación, y se ha graficado para que se pueda apreciar claramente como se alcanza un máximo de transferencia y después de este comienza a caer de nuevo. Esta gráfica es la representada en la Figura 39, en la cual se puede ver que el punto máximo está en la sexta simulación, alcanzando un valor de 68.50 kW.

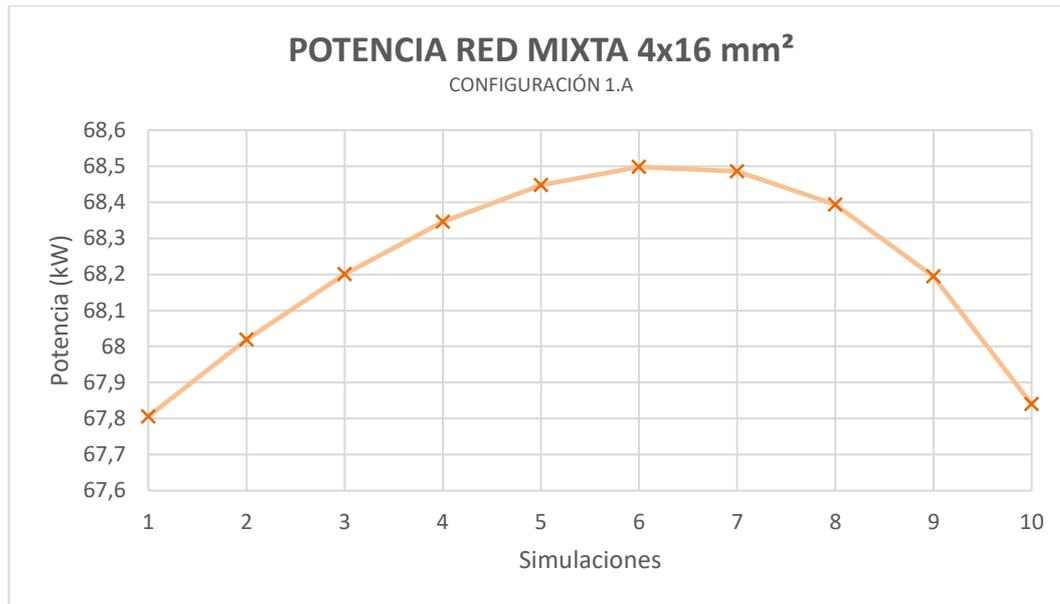


Figura 39. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x16 mm².

En las tres ecuaciones que siguen se calcula primero la potencia que tiene esta red cuando solo transporta alterna, que es de 46.23 kW, después la potencia de la red mixta, resultando de 68.50 kW, y, por último, el incremento que esto supone desde la situación inicial y que es de un 48.17%.

$$P_{AC}^{16\text{ mm}^2} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 67\text{ A} = 46.23\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{16\text{ mm}^2} = (230\text{ V} \cdot 43.47\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 78\text{ A}) = 68.50\text{ kW}$$

$$\Delta P^{16\text{ mm}^2}(\%) = \frac{|68.50\text{ kW} - 46.23\text{ kW}|}{46.23\text{ kW}} \cdot 100 = 48.17\%$$

5.1.2 Configuración diagonal (1.A) cable 4x25 mm²

En el análisis de esta configuración se vio que el máximo se alcanzaba para valores de corriente continua entre 102 A y 111 A, por lo que es en este rango en el que se realiza la búsqueda de la mejor pareja DC/AC, amperio a amperio. Los resultados para las diez simulaciones se muestran en la Figura 40.

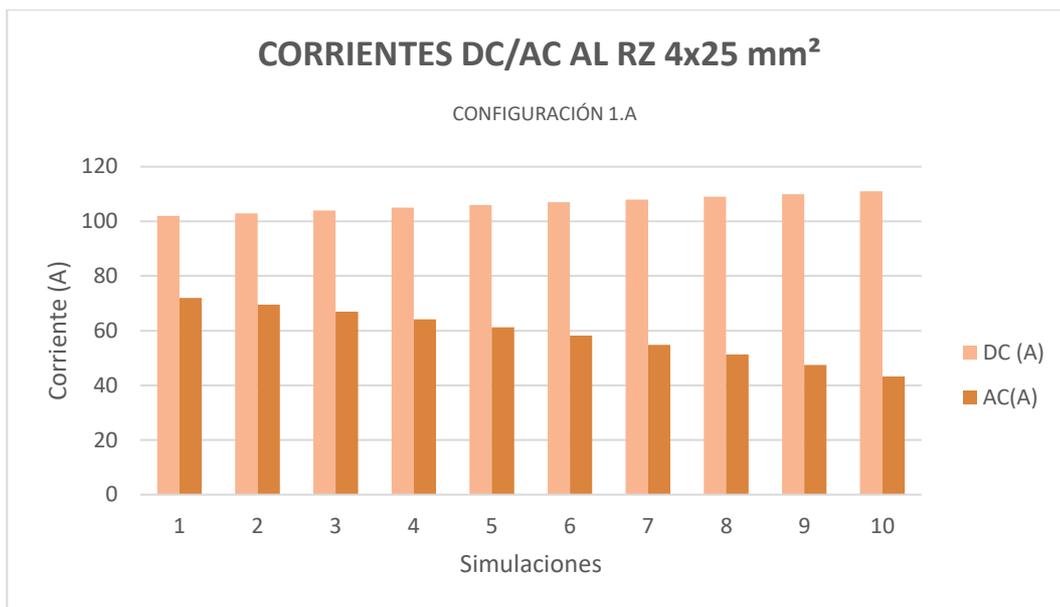


Figura 40. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x25 mm².

Tal y como puede apreciarse en la Figura 41, la máxima transferencia de potencia se da para la sexta simulación, con un valor de 93.63 kW.

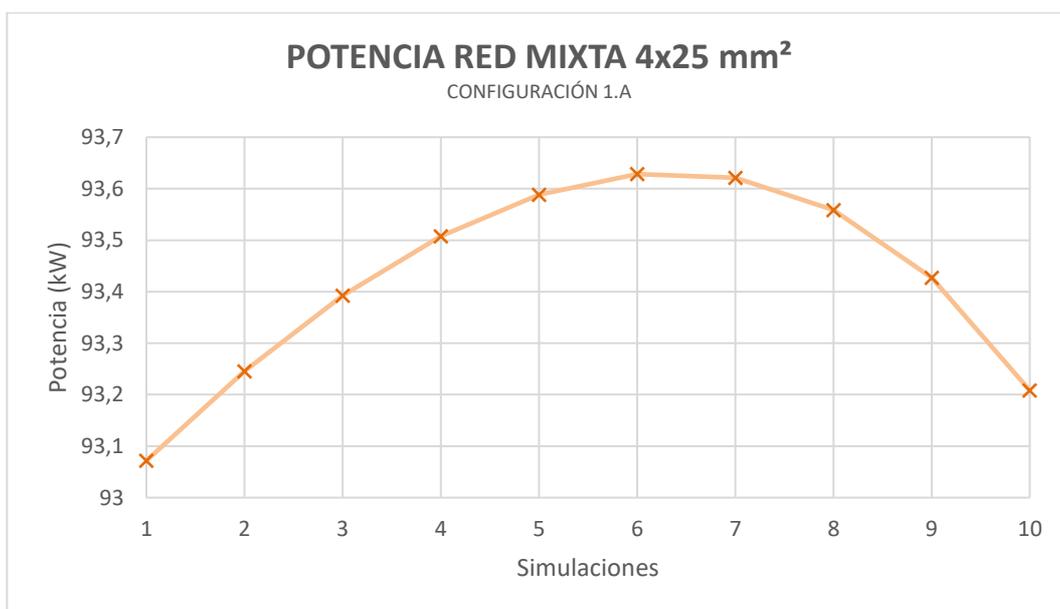


Figura 41. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x25 mm².

Mediante las tres ecuaciones siguientes se obtiene que la potencia de la red AC es de 62.10kW, y la de la red DC/AC asciende a 93.63 kW, lo que supone un incremento del 50.77 %.

$$P_{AC}^{25\text{ mm}^2} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 90\text{ A} = 62.10\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{25\text{ mm}^2} = (230\text{ V} \cdot 58.17\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 107\text{ A}) = 93.63\text{ kW}$$

$$\Delta P^{25 \text{ mm}^2} (\%) = \frac{|93.63 \text{ kW} - 62.10 \text{ kW}|}{62.10 \text{ kW}} \cdot 100 = 50.77 \%$$

5.1.3 Configuración diagonal (1.A) cable 4x50 mm²

Los máximos valores de potencia ahora se encuentran para una corriente continua entre 153 A y 162 A, donde se da la máxima potencia para la sexta simulación como se ve en la Figura 43, con un valor de 138.28 kW. En la Figura 42 están todas las parejas de corrientes de esta configuración.

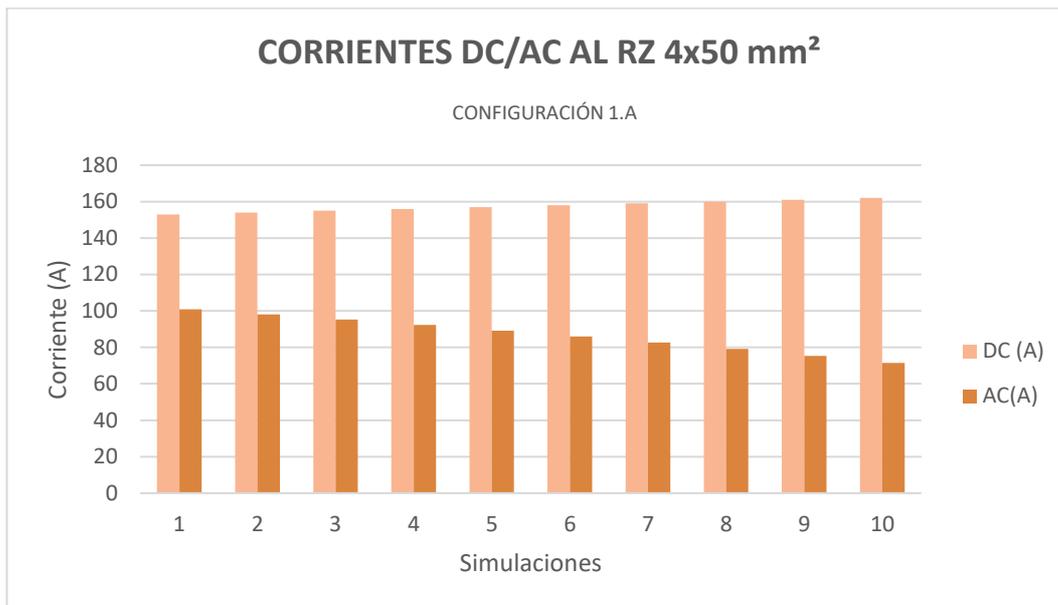


Figura 42. Corrientes DC/AC configuración 1.A sección 4x50 mm².

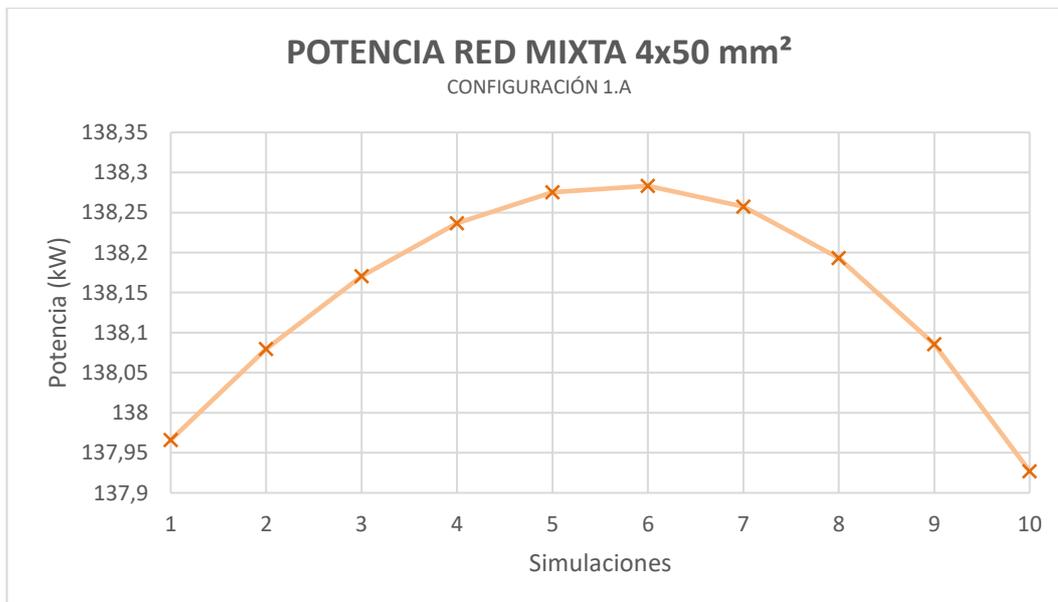


Figura 43. Potencia red mixta configuración 1.A sección 4x16 mm².

La potencia de la red AC es de 91.77 kW, la de la red mixta DC/AC de 138.28 kW, y el incremento de esta respecto a la primera es del 50.68 %.

$$P_{AC}^{50\text{ mm}^2 A} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 133\text{ A} = 91.77\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{50\text{ mm}^2 A} = (230\text{ V} \cdot 86.01\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 158\text{ A}) = 138.28\text{ kW}$$

$$\Delta P^{50\text{ mm}^2 A}(\%) = \frac{|138.28\text{ kW} - 91.77\text{ kW}|}{91.77\text{ kW}} \cdot 100 = 50.68\%$$

5.2 Configuración paralelo geometría 1 (1.B)

Se analizan las mismas secciones que en el caso anterior, pero ahora los cables de continua están abajo en paralelo entre ellos y en igual disposición los de alterna arriba. Esta configuración queda reflejada en la Figura 44. La siguiente imagen correspondiente a la Figura 45 muestra el resultado proporcionado por el algoritmo. En el Anexo D se añade el código correspondiente.

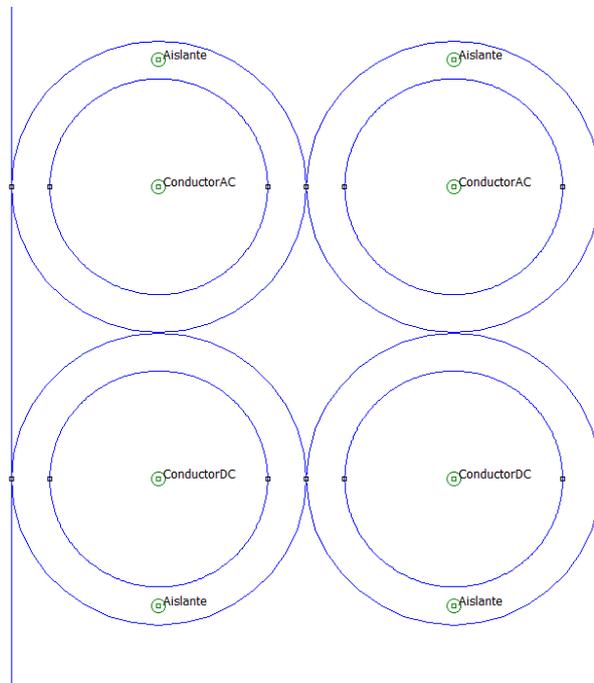


Figura 44. Geometría red mixta configuración 1.B.

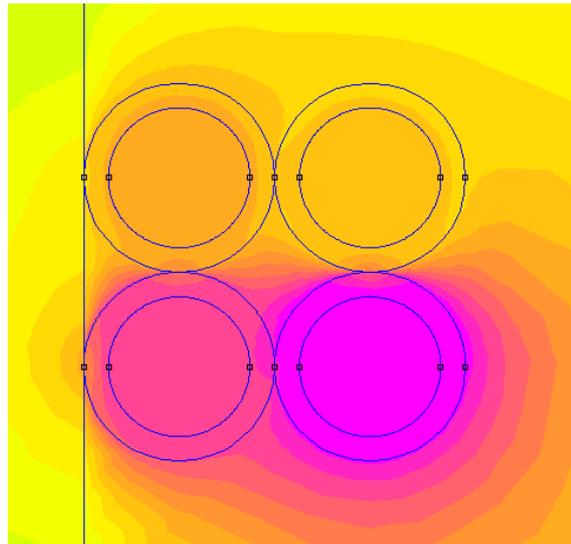


Figura 45. Modelo térmico configuración 1.B.

5.2.1 Configuración paralelo (1.B) cable 4x16 mm²

En la Figura 46 aparecen los resultados para el análisis desde 70 A hasta 79 A, ya que es en este intervalo donde se ha visto que se alcanza el máximo. En la tonalidad más oscura se representa la corriente continua y en la más clara la alterna.

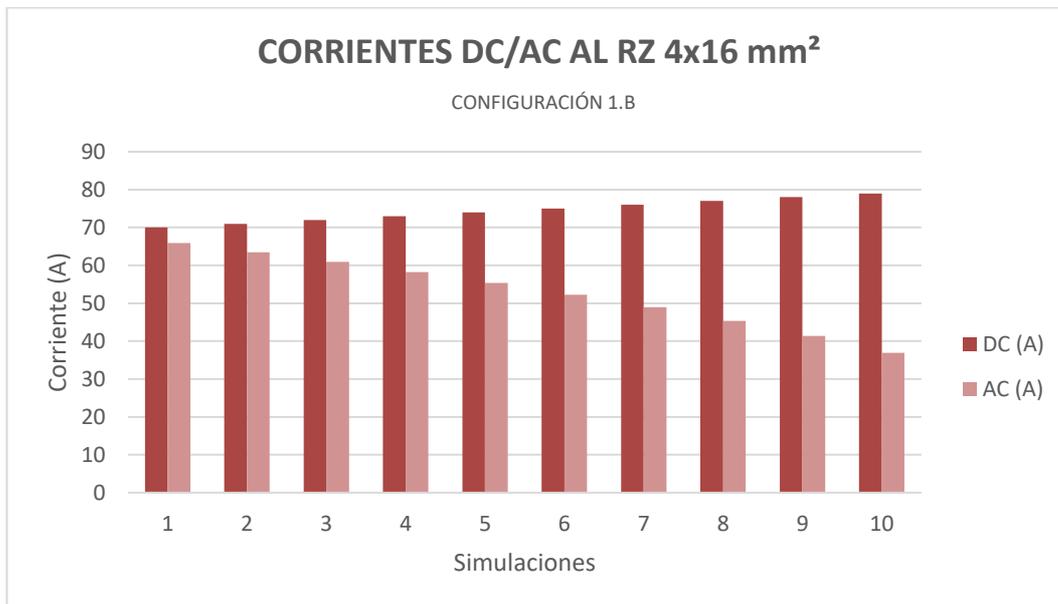


Figura 46. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x16 mm².

La Figura 47 muestra en la sexta simulación correspondiente a 75 A de corriente continua, la máxima potencia, con un valor de 68.27 kW.

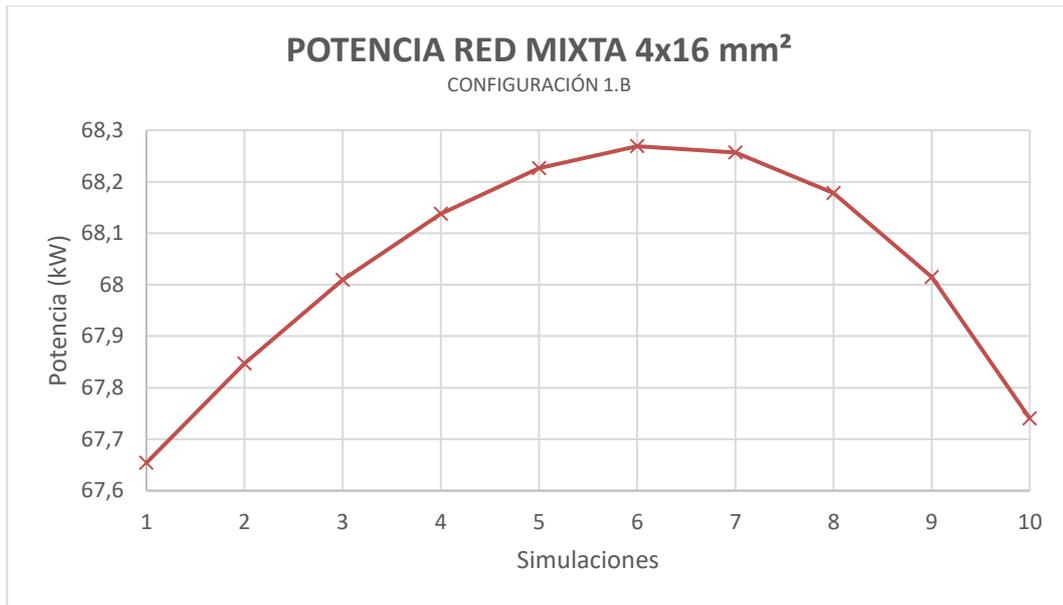


Figura 47. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x16 mm².

Para esta sección la potencia de la red AC es de 46.23 kW, la de la red DC/AC de 68.27 kW, y el incremento de potencia alcanzado es del 47.67 %.

$$P_{AC}^{16\text{ mm}^2B} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 67\text{ A} = 46.23\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{16\text{ mm}^2B} = (230\text{ V} \cdot 52.26\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 75\text{ A}) = 68.27\text{ kW}$$

$$\Delta P^{16\text{ mm}^2B}(\%) = \frac{|68.27\text{ kW} - 46.23\text{ kW}|}{46.23\text{ kW}} \cdot 100 = 47.67\%$$

5.2.2 Configuración paralelo (1.B) cable 4x25 mm²

Para este caso tras mirar en qué punto se encontraba la solución óptima, se llegó a que está entre 98 A y 107 A. La Figura 48 muestra las parejas DC/AC obtenidas.

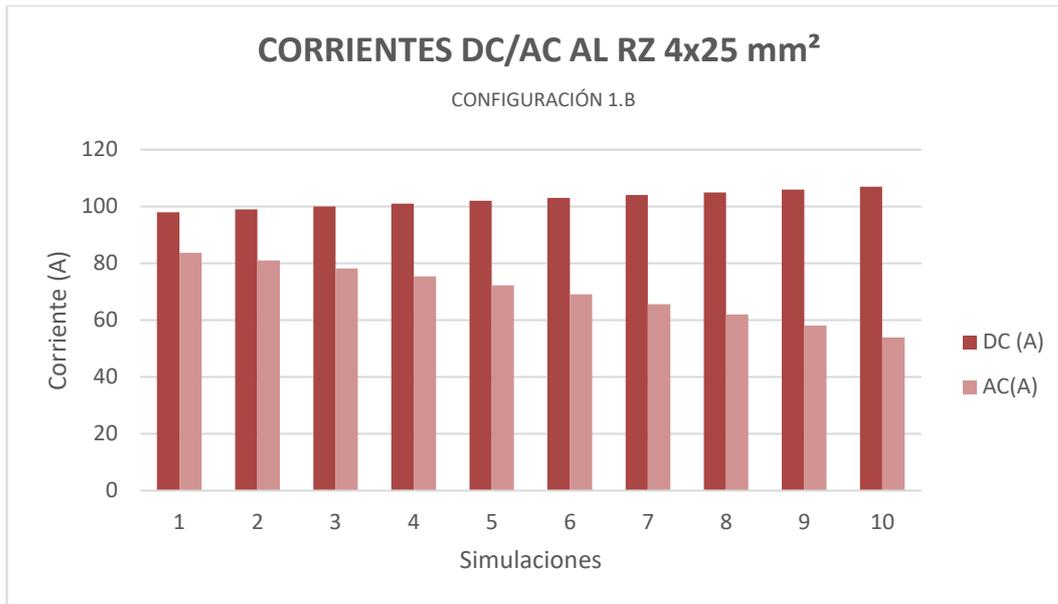


Figura 48. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x25 mm².

El máximo se sitúa en la sexta simulación, alcanzando un valor de 93.14 kW. Esto queda reflejado en la Figura 49.

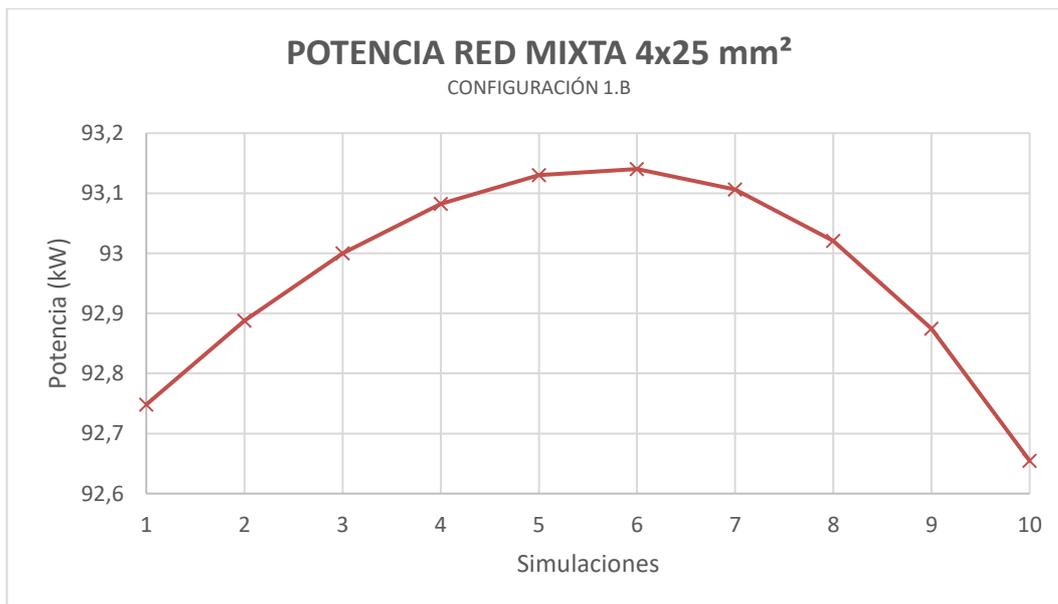


Figura 49. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x25 mm².

La potencia de la red AC es de 62.10 kW, la de la red mixta de 93.14 kW, y el incremento entre ambas es del 49.98 %.

$$P_{AC}^{25\text{ mm}^2 B} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 90\text{ A} = 62.10\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{25\text{ mm}^2 B} = (230\text{ V} \cdot 69.09\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 103\text{ A}) = 93.14\text{ kW}$$

$$\Delta P^{25\text{ mm}^2 B}(\%) = \frac{|93.14\text{ kW} - 62.10\text{ kW}|}{62.10\text{ kW}} \cdot 100 = 49.98\%$$

5.2.3 Configuración paralelo (1.B) cable 4x50 mm²

El último caso de esta primera geometría se representa en la Figura 50, para la que se encuentra su óptimo de transferencia entre 138 A y 147 A, alcanzado una potencia de 131.18 kW en la sexta simulación como se ve en la Figura 51.

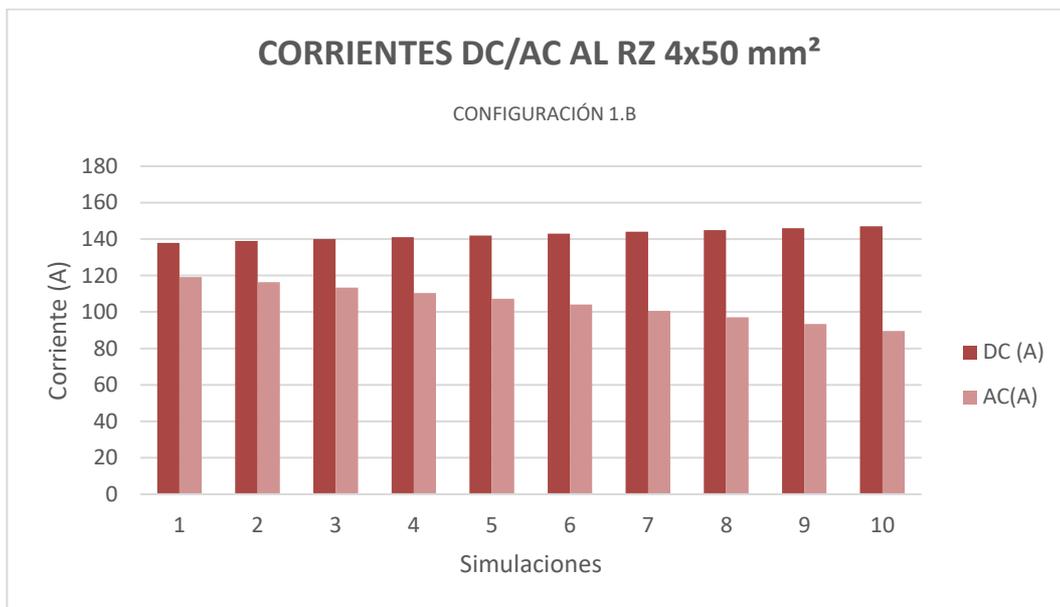


Figura 50. Corrientes DC/AC configuración 1.B sección 4x50 mm².

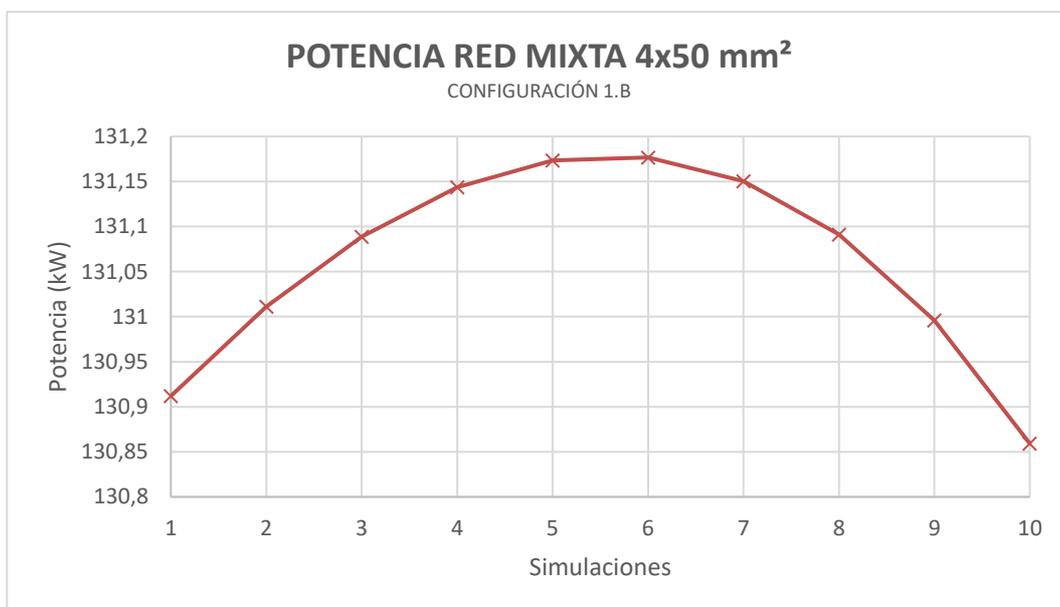


Figura 51. Potencia red mixta configuración 1.B sección 4x50 mm².

En este caso la potencia de la red AC es de 91.77 kW, la de la red DC/AC de 131.18 kW, y el incremento de potencia es del 42.94 %.

$$P_{AC}^{50\text{ mm}^2} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 133\text{ A} = 91.77\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{50\text{ mm}^2} = (230\text{ V} \cdot 104.03\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 143\text{ A}) = 131.18\text{ kW}$$

$$\Delta P^{50\text{ mm}^2}(\%) = \frac{|131.18\text{ kW} - 91.77\text{ kW}|}{91.77\text{ kW}} \cdot 100 = 42.94\%$$

5.3 Comparativa geometría 1

Antes de analizar ningún resultado, se puede intuir que lo lógico sería obtener mayor transferencia de potencia en aquellas disposiciones en que los conductores de continua no estén uno junto al otro, ya que se tendría una mejor refrigeración de estos, y por tanto una menor temperatura. En los tres siguientes subapartados se va a ver la comparación entre ambas configuraciones para cada una de las tres secciones de esta primera geometría.

5.3.1 Comparativa de la sección 4x16mm²

La disposición que permite para esta sección de cable una mayor potencia es la que se ha denominado diagonal (1.A), como puede comprobarse en la gráfica presentada en la Figura 52. La leyenda muestra que curva se corresponde con cada configuración, mediante la denominación que se les asignó en páginas anteriores.

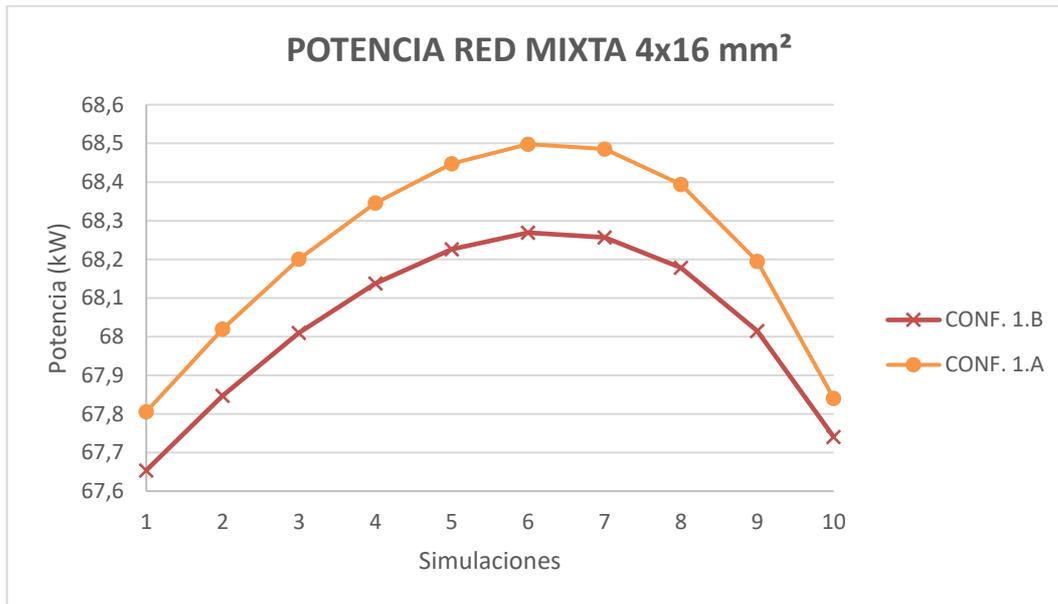


Figura 52. Comparativa potencias red mixta sección 4x16 mm².

En este caso la diferencia entre ambos picos de potencia es de 0.23 kW.

$$\Delta P^{16\text{ mm}^2}(\text{kW}) = 68.50\text{ kW} - 68.27\text{ kW} = 0.23\text{ kW}$$

La Figura 53 contiene dos gráficos en los que se recoge la presencia que tiene cada tipo de corriente en esa disposición mediante el porcentaje. El de la izquierda se corresponde con la configuración diagonal (1.A), y el de la derecha con la configuración paralelo (1.B). Puede apreciarse que esta segunda tiene menor participación de continua.

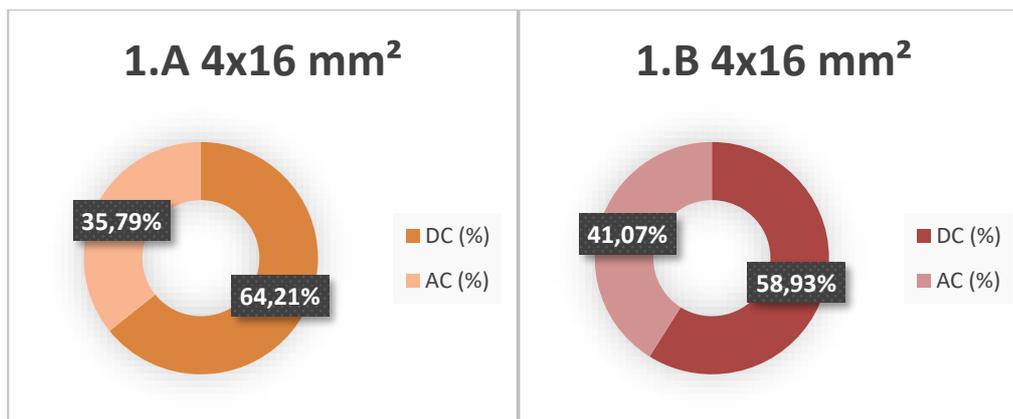


Figura 53. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=4x16mm²)

5.3.2 Comparativa de la sección 4x25mm²

En la Figura 54 se representan ambas curvas de potencia para esta sección. La correspondiente a la configuración diagonal (1.A) es la que alcanza mayores valores de potencia.

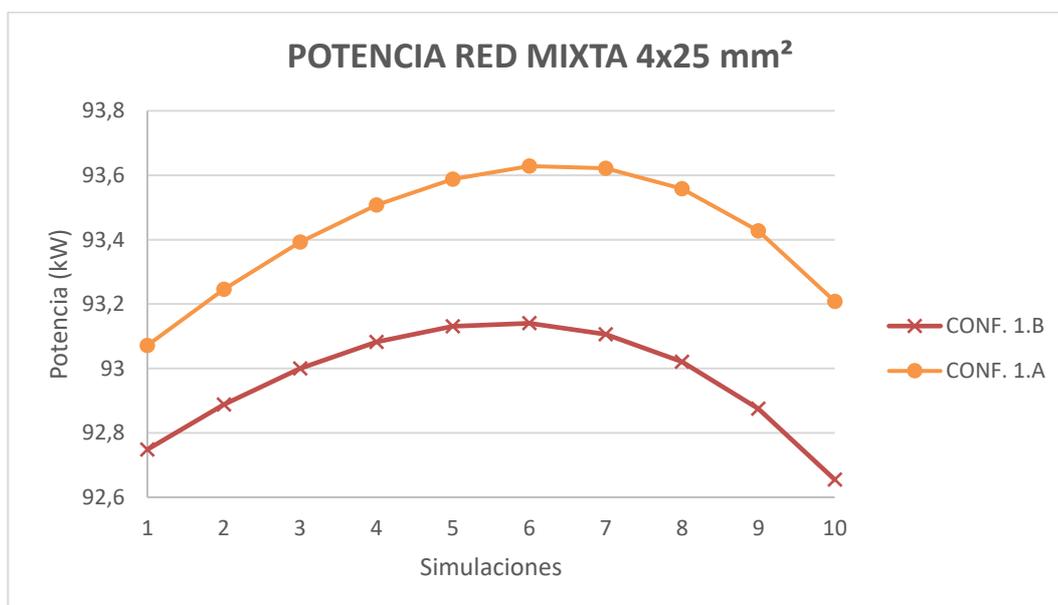


Figura 54. Comparativa potencias red mixta 4x25 mm².

La diferencia entre las potencias máximas para cada configuración es de 0.49 kW.

$$\Delta P^{25 \text{ mm}^2} (\text{kW}) = 93.63 \text{ kW} - 93.14 \text{ kW} = 0.49 \text{ kW}$$

Los gráficos que aparecen en la Figura 55 indican la aportación de cada corriente para cada configuración. En el primer caso correspondiente a la disposición diagonal, en la que como ya se ha visto, se alcanza más transferencia de potencia, hay una mayor participación de continua.

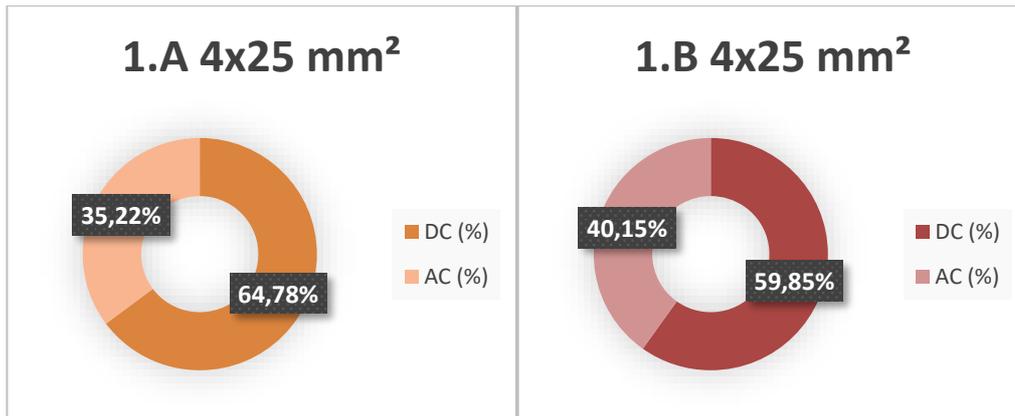


Figura 55. Aportación de cada corriente en la red mixta. ($s=4 \times 25 \text{ mm}^2$)

5.3.3 Comparativa de la sección 4x50mm²

Las comparaciones para esta última sección de la primera geometría se muestran en la Figura 56. Nuevamente se consiguen mejores resultados para la configuración diagonal (1.A) que para la configuración paralelo (1.B). Por tanto, para los tres casos se cumple lo que se estipulaba al principio de este punto, cuando se decía que lo lógico era obtener mayores resultados para la primera configuración ya que permite una mejor refrigeración natural de los conductores de continua.

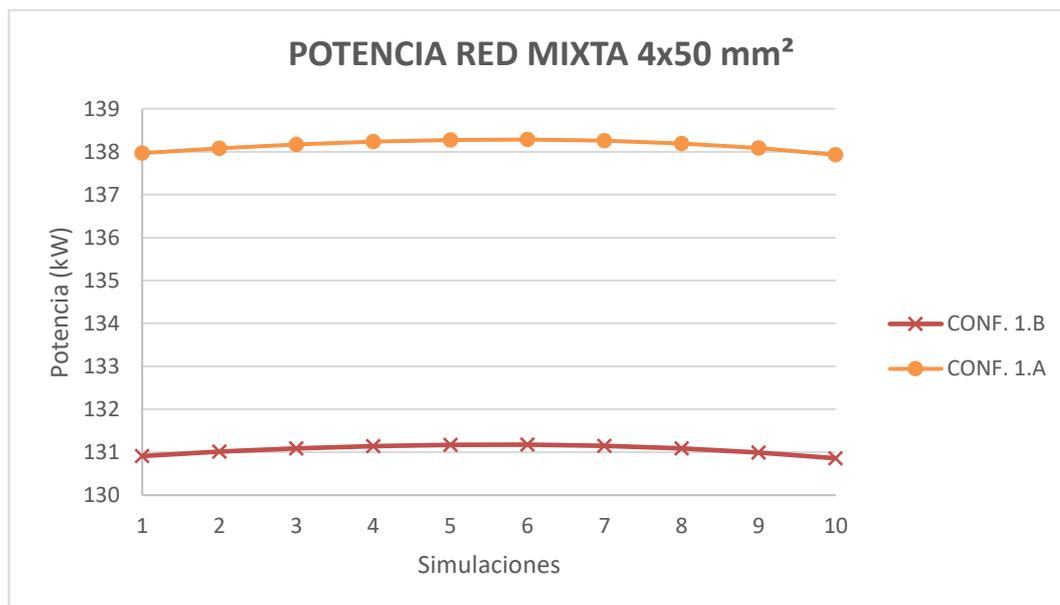


Figura 56. Comparativa potencias red mixta sección 4x50 mm².

La diferencia de potencia entre ambas configuraciones es de 7.1 kW.

$$\Delta P^{50 \text{ mm}^2} (\text{kW}) = 138.28 \text{ kW} - 131.18 \text{ kW} = 7.1 \text{ kW}$$

Al igual que para las otras dos secciones menores de esta geometría, la configuración diagonal aporta más participación de la corriente continua respecto a la configuración paralelo. Estos números se presentan en la Figura 57.

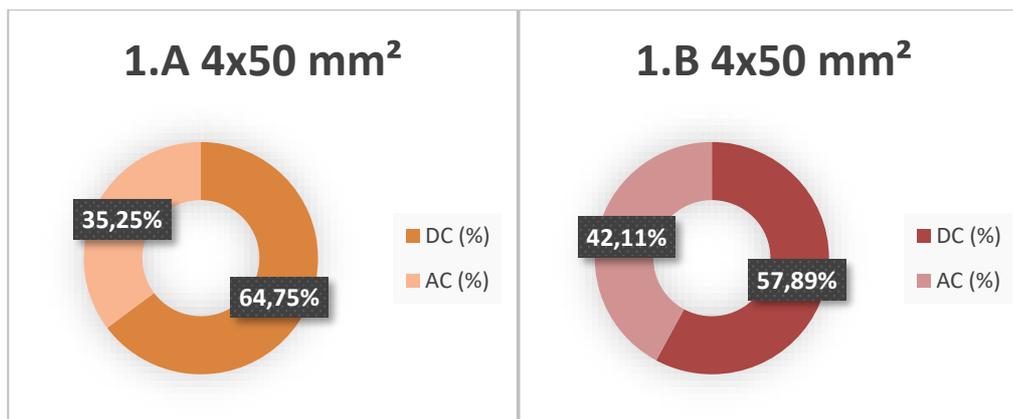


Figura 57. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=4x50mm²)

5.3.4 Resumen de resultados de la geometría 1

La Tabla 3 recoge un resumen de toda esta geometría. Se incluyen todos los resultados obtenidos, las corrientes DC/AC, las potencias de la red final y la ganancia porcentual conseguida.

	DC (A)	AC (A)	Potencia red mixta (kW)	Incremento de potencia (%)
CONF 1.A (s=4x16 mm ²)	78	43.47	68.50	48.17
CONF 1.A (s=4x25 mm ²)	107	58.17	93.63	50.77
CONF 1.A (s=4x50 mm ²)	158	86.01	138.28	50.68
CONF 1.B (s=4x16 mm ²)	75	52.26	68.27	47.67
CONF 1.B (s=4x25 mm ²)	103	69.09	93.14	49.98
CONF 1.B (s=4x50 mm ²)	143	104.03	131.18	42.94

Tabla 3. Resumen de resultados de la red mixta para la geometría 1.

5.4 Configuración diagonal geometría 2 (2.A)

En este apartado se estudia el cable cuyo neutro es de menor sección que el resto de los conductores, con una configuración tal cual se muestra en la Figura 47, y el modelo térmico resultante en la Figura 48. El código correspondiente se incluye en el Anexo E.

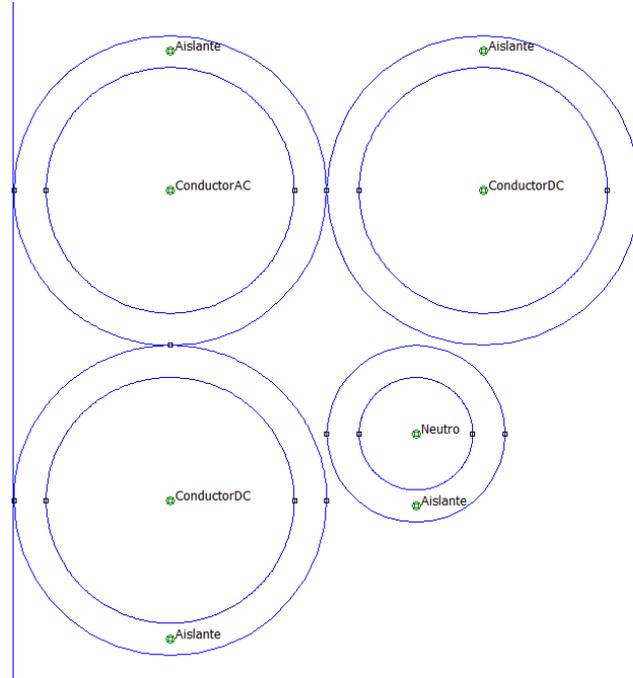


Figura 58. Geometría diagonal configuración 2.A.

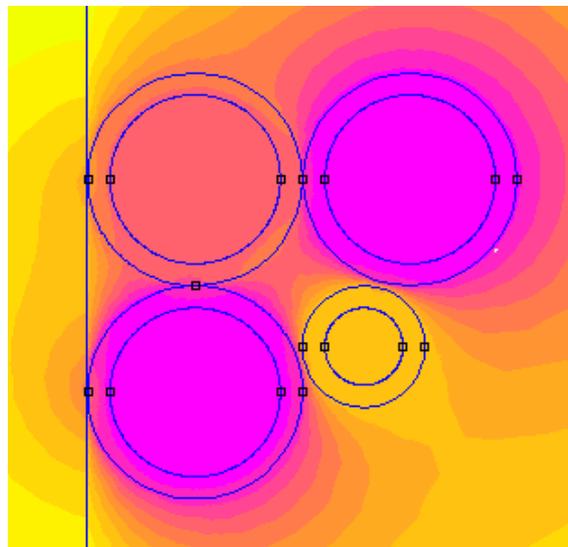


Figura 59. Modelo térmico configuración diagonal 2A.

5.4.1 Configuración diagonal (2.A) cable 3x95/50 mm²

En el gráfico de barras de la Figura 60 se representan la corriente continua en color más oscuro, y la corriente alterna en las barras más claras tal y como se indica en la leyenda. Se encuentra que la máxima transferencia de potencia está en el rango de corriente continua entre 213 A y 222 A, situándose el máximo en la sexta simulación con una potencia asociada de 194.45 kW. Las diferentes potencias obtenidas para estas diez

simulaciones quedan reflejadas en la Figura 61.

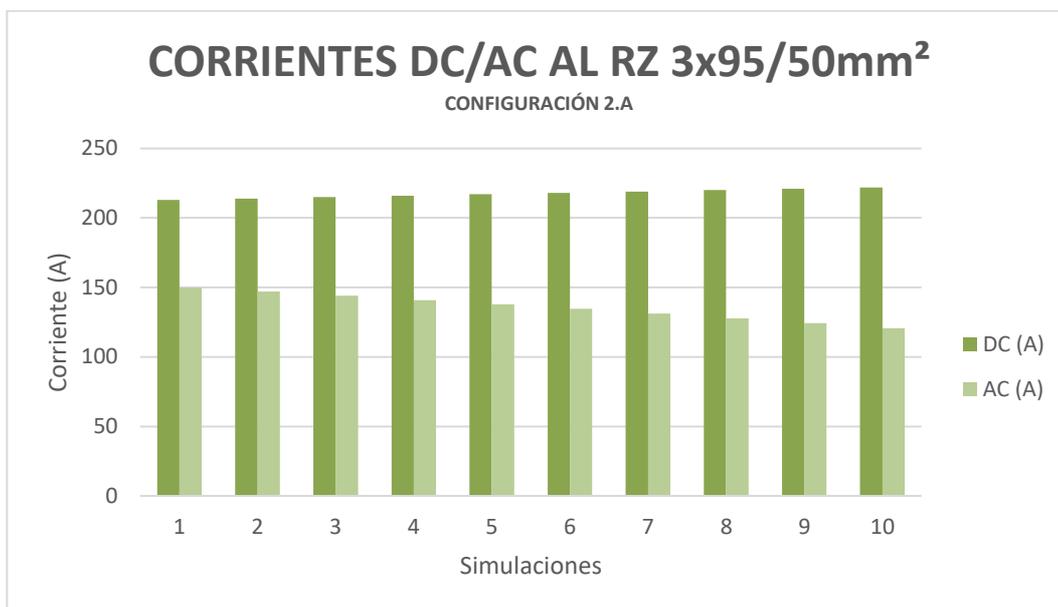


Figura 60. Corrientes DC/AC configuración 2.A sección 3x95/50 mm².

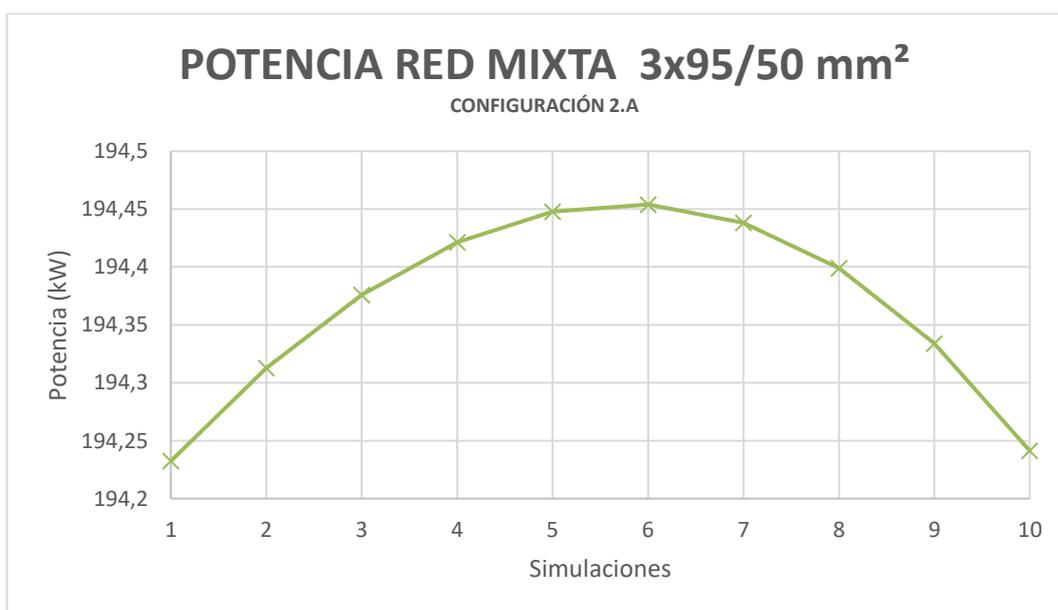


Figura 61. Potencia red mixta configuración 2.A sección 3x95/50 mm².

Los tres cálculos siguientes proporcionan los datos de la potencia de la red AC que es de 142.83 kW, de la red DC/AC que asciende a 194.45 kW, y el incremento entre ambas que es del 36.14 %.

$$P_{AC}^{95/50\text{mm}^2} = 3 \cdot 230\text{ V} \cdot 207\text{ A} = 142.83\text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{95/50\text{mm}^2} = (230\text{ V} \cdot 134.58\text{ A}) + (750\text{ V} \cdot 218\text{ A}) = 194.45\text{ kW}$$

$$\Delta P^{95/50 \text{ mm}^2} (\%) = \frac{|194.45 \text{ kW} - 142.83 \text{ kW}|}{142.83 \text{ kW}} \cdot 100 = 36.14\%$$

5.4.2 Configuración diagonal (2.A) cable 3x150/95 mm²

Las parejas de intensidades DC/AC para esta configuración diagonal se muestran en la Figura 62. En concreto, el óptimo para esta sección se da entre 296 A y 305 A de corriente continua.

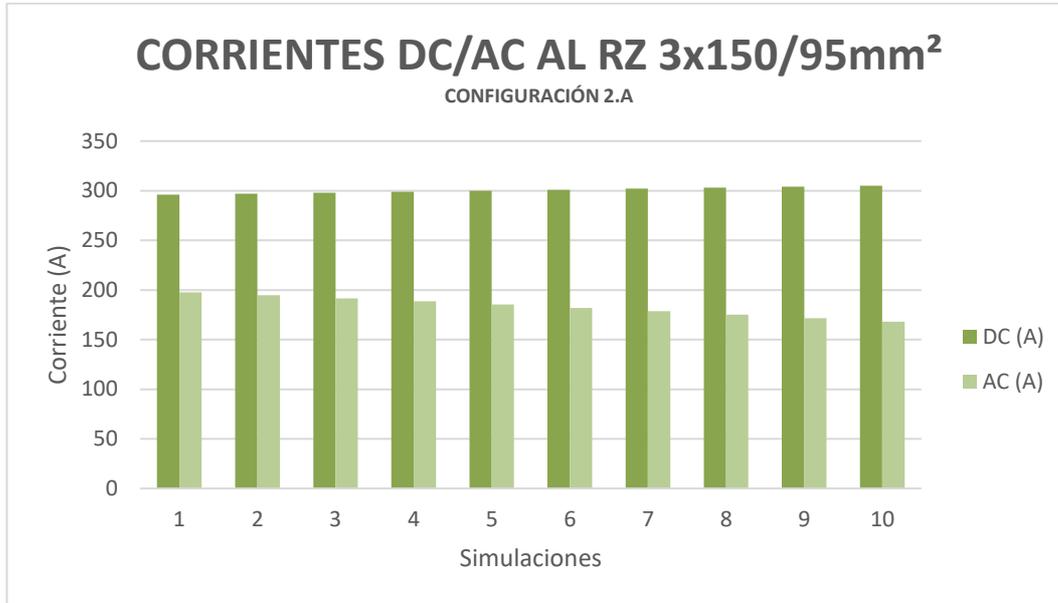


Figura 62. Corrientes DC/AC configuración 2.A sección 3x150/95 mm².

La Figura 63 recoge los valores de potencia, donde se alcanza la máxima transferencia en esta red mixta para la sexta simulación con un valor asociado de 267.62 kW.

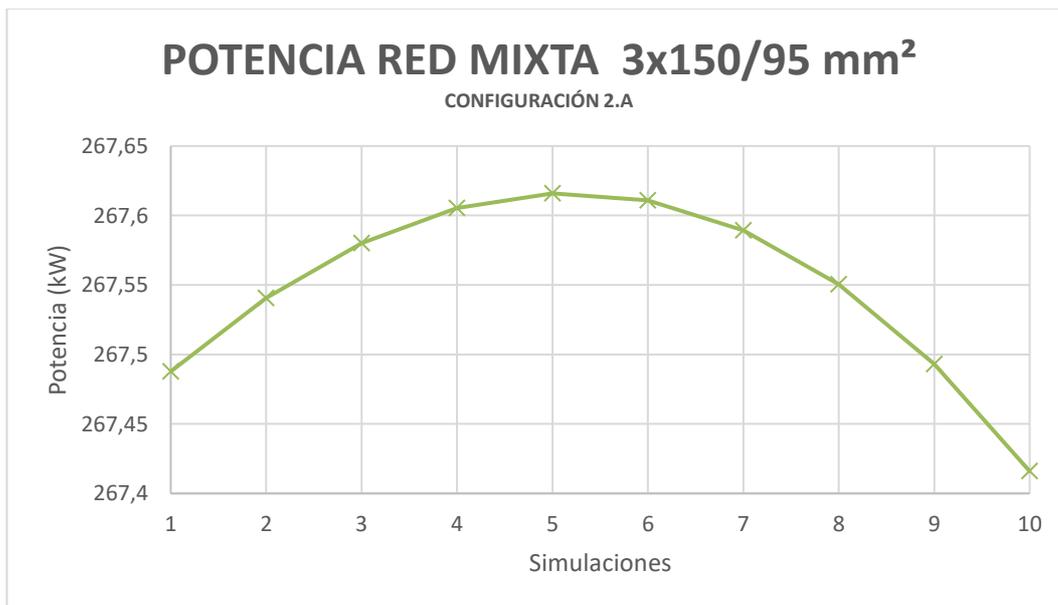


Figura 63. Potencia red mixta configuración 2.A sección 3x150/95 mm².

Para esta sección la potencia de la red AC es de 191.13 kW, la de la red mixta de 267.62 kW, y el incremento

entre ambas es del 40.02 %.

$$P_{AC}^{150/95 \text{ mm}^2} = 3 \cdot 230 \text{ V} \cdot 277 \text{ A} = 191.13 \text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{150/95 \text{ mm}^2} = (230 \text{ V} \cdot 185.29 \text{ A}) + (750 \text{ V} \cdot 300 \text{ A}) = 267.62 \text{ kW}$$

$$\Delta P^{150/95 \text{ mm}^2} (\%) = \frac{|267.62 \text{ kW} - 191.13 \text{ kW}|}{191.13 \text{ kW}} \cdot 100 = 40.02 \%$$

5.5 Configuración paralelo geometría 2 (2.B)

En esta última disposición se estudia la geometría 2 con la configuración paralelo como se muestra en la Figura 64. El modelo térmico resultante queda reflejado en la Figura 65. Este último código se muestra en el Anexo F.

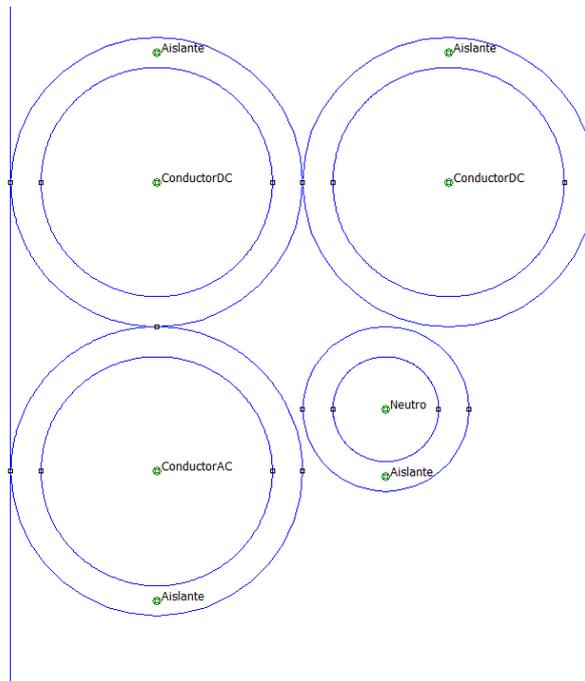


Figura 64. Geometría paralelo configuración 2.B.

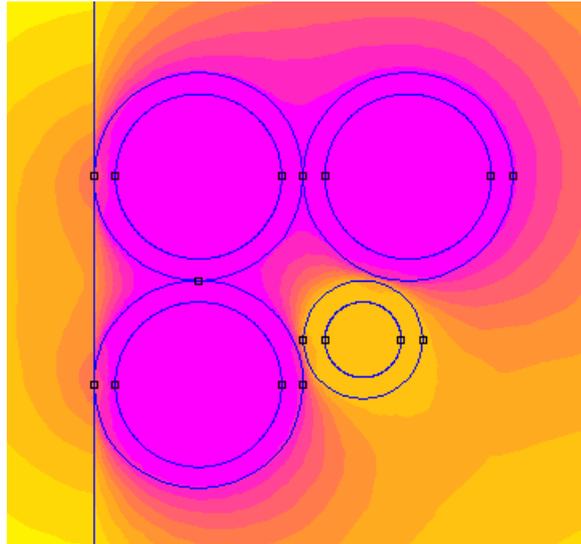


Figura 65. Modelo térmico configuración paralelo 2.B.

5.4.1 Configuración paralelo (2.B) cable 3x95/50 mm²

En este gráfico de barras de la Figura 66 se busca en un rango de corriente continua desde 191 A hasta 200 A, ya que el análisis previo general proporcionó que el punto máximo de potencia se encontraba dentro de estos límites.

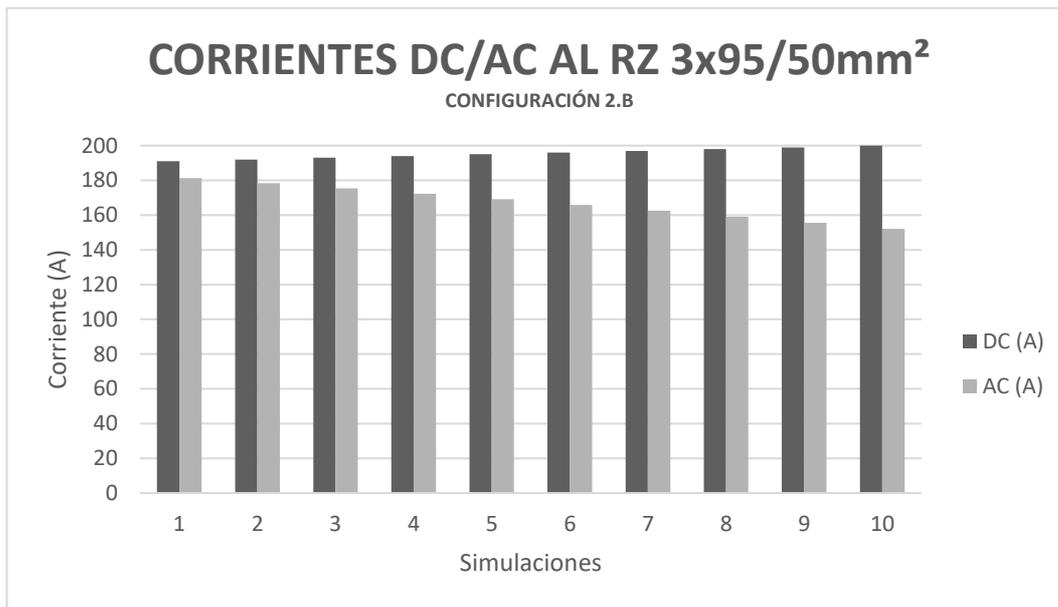


Figura 66. Corrientes DC/AC configuración 2.B sección 3x95/50 mm².

En la Figura 67 puede observarse la caída de potencia tras alcanzar el máximo. Para este cable se obtiene este punto en la sexta simulación, con 185.15 kW.

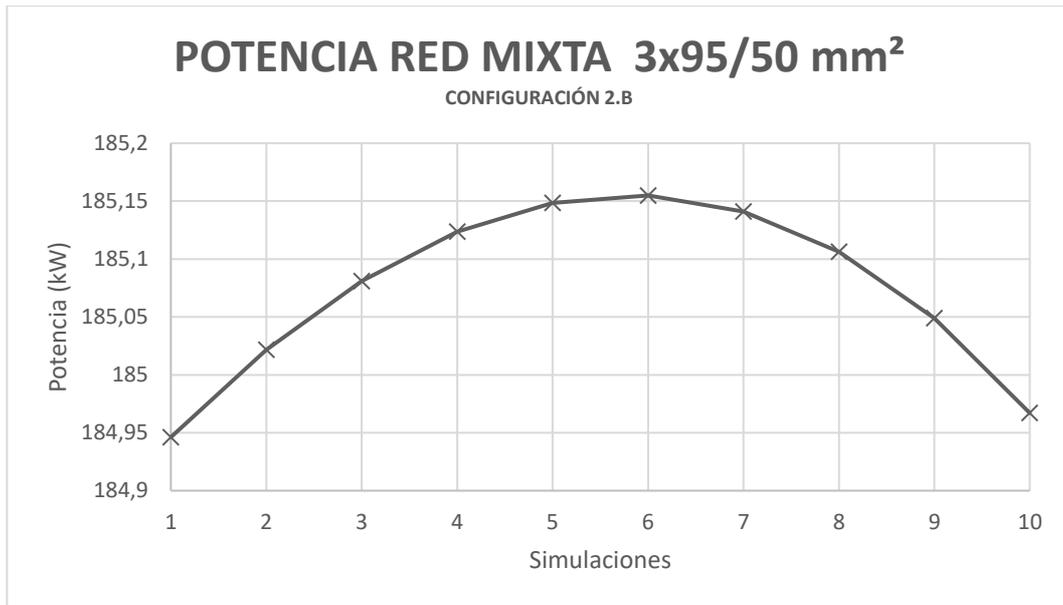


Figura 67. Potencia red mixta configuración 2.B sección 3x95/50 mm².

La potencia de la red AC es de 142.83 kW, la de la red DC/AC de 185.15 kW, y el incremento de potencia es del 29.63 %.

$$P_{AC}^{95/50 \text{ mm}^2} = 3 \cdot 230 \text{ V} \cdot 207 \text{ A} = 142.83 \text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{95/50 \text{ mm}^2} = (230 \text{ V} \cdot 165.89 \text{ A}) + (750 \text{ V} \cdot 196 \text{ A}) = 185.15 \text{ kW}$$

$$\Delta P^{95/50 \text{ mm}^2} (\%) = \frac{|185.15 \text{ kW} - 142.83 \text{ kW}|}{142.83 \text{ kW}} \cdot 100 = 29.63\%$$

5.4.2 Configuración paralelo (2.B) cable 3x150/95 mm²

Por último, al igual que en todos los casos anteriores, se han realizado diez simulaciones dentro de los valores en los que previamente se ha visto que se iba a alcanzar el máximo. Ahora la máxima transferencia se encuentra entre 310 A y 319 A, como queda reflejado en la Figura 68.

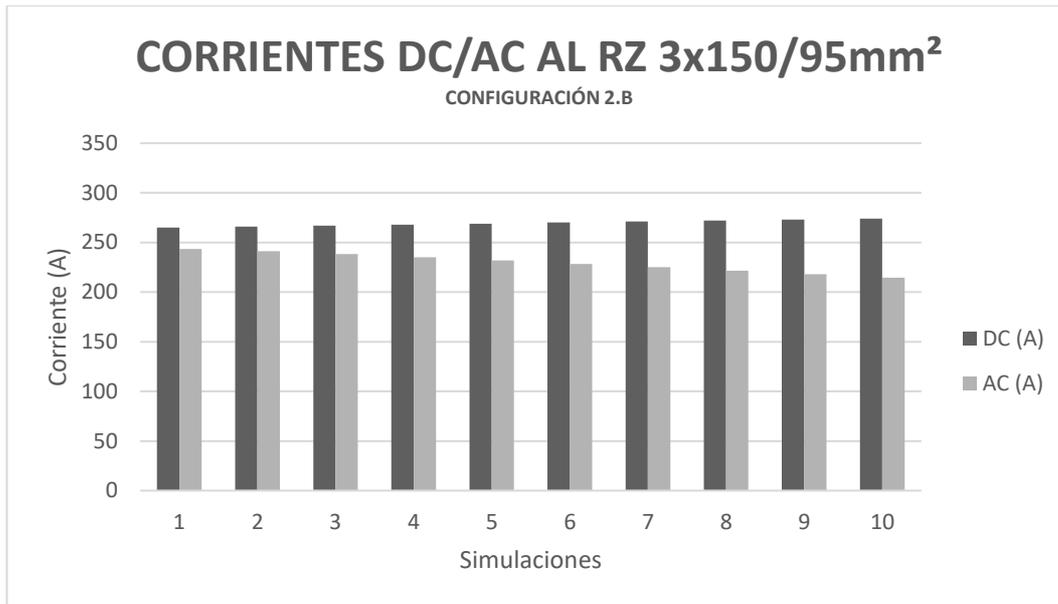


Figura 68. Corrientes DC/AC configuración 2.B sección 3x150/95 mm².

Se alcanza la máxima transferencia de potencia en esta red mixta en la cuarta simulación con un valor asociado de 255.07 kW. Esto puede verse en la Figura 69.

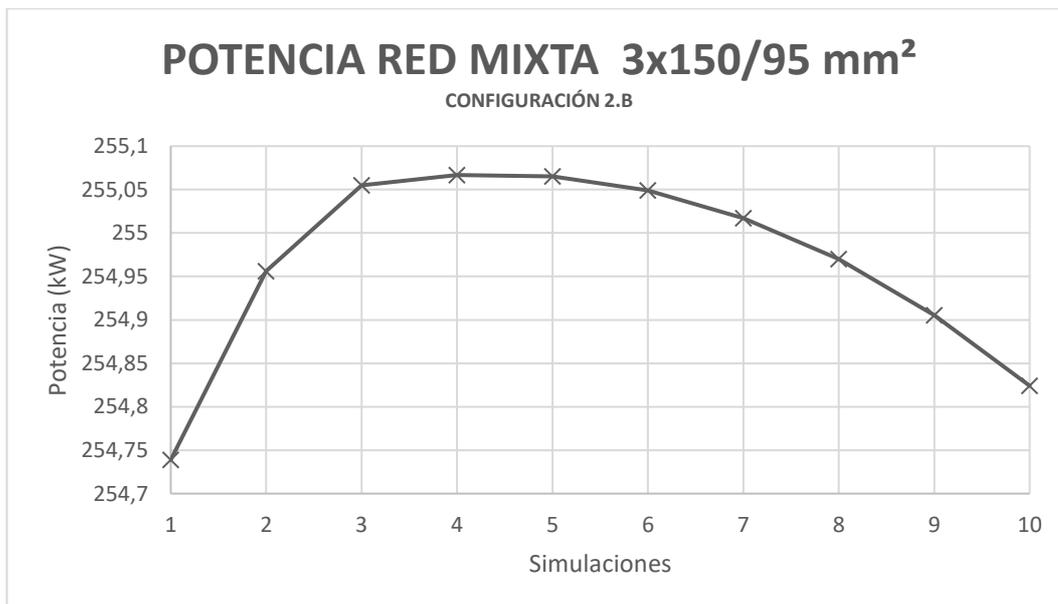


Figura 69. Potencia red mixta configuración 2.B sección 3x150/95 mm².

Para esta sección, la potencia de la red AC es de 191.13 kW, la de la red DC/AC de 255.07 kW, y el incremento porcentual entre ambas resulta del 33.45 %.

$$P_{AC}^{150/95 \text{ mm}^2} = 3 \cdot 230 \text{ V} \cdot 277 \text{ A} = 191.13 \text{ kW}$$

$$P_{DC/AC}^{150/95 \text{ mm}^2} = (230 \text{ V} \cdot 235.07 \text{ A}) + (750 \text{ V} \cdot 268 \text{ A}) = 255.07 \text{ kW}$$

$$\Delta P^{150/95 \text{ mm}^2} (\%) = \frac{|255.07 \text{ kW} - 191.13 \text{ kW}|}{191.13 \text{ kW}} \cdot 100 = 33.45 \%$$

5.6 Comparativa geometría 2

5.6.1 Comparativa de la sección 3x95/50 mm²

En la Figura 70 están representadas ambas curvas para la sección menor de este cable. En verde queda definida la configuración diagonal, que es la que ha permitido obtener mayores valores de potencia, y en negro, la configuración paralela.

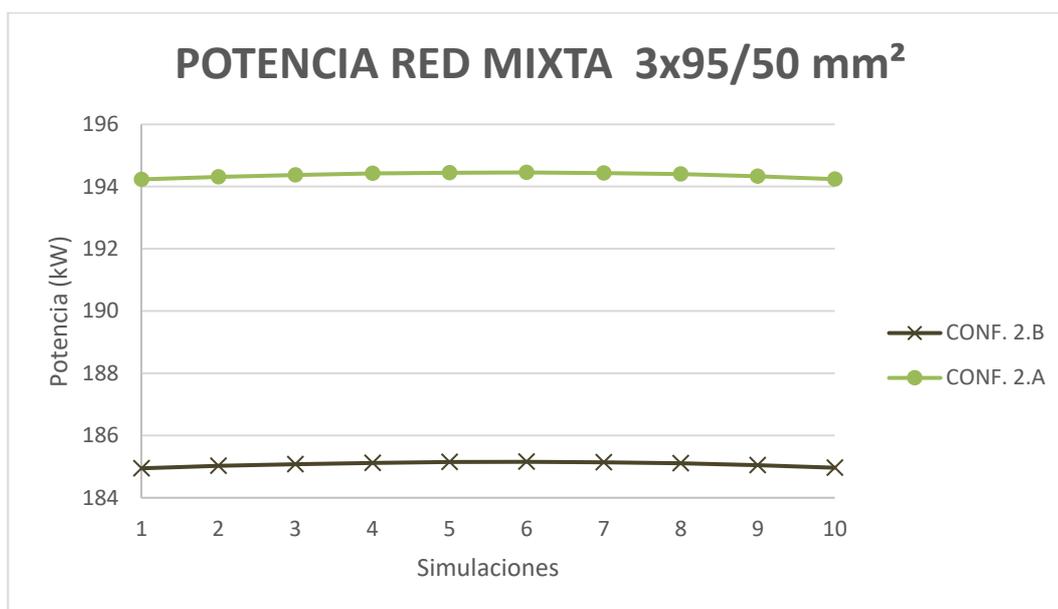


Figura 70. Comparativa geometría 2 sección 3x95/50 mm².

La diferencia entre ambos valores de máxima potencia es de 9.3 kW.

$$\Delta P^{95/50 \text{ mm}^2} (\text{kW}) = 194.45 \text{ kW} - 185.15 \text{ kW} = 9.3 \text{ kW}$$

En la Figura 71 se muestran los dos gráficos que representan el aporte de cada uno de los dos tipos de corriente al total de la red híbrida. Para la configuración diagonal (1.A) se obtiene una mayor participación de corriente continua.

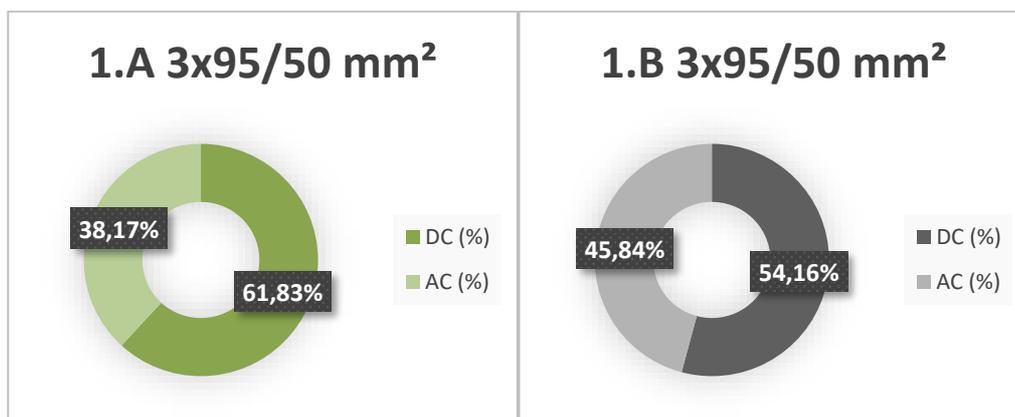


Figura 71. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=3x95/50mm²)

5.6.2 Comparativa de la sección 3x150/95 mm²

Para concluir con las comparaciones, se muestran las dos curvas de potencia en la Figura 72 para la mayor sección de este cable. Como se dijo que era de esperar, se alcanza mayor potencia también en este caso para la configuración en diagonal.

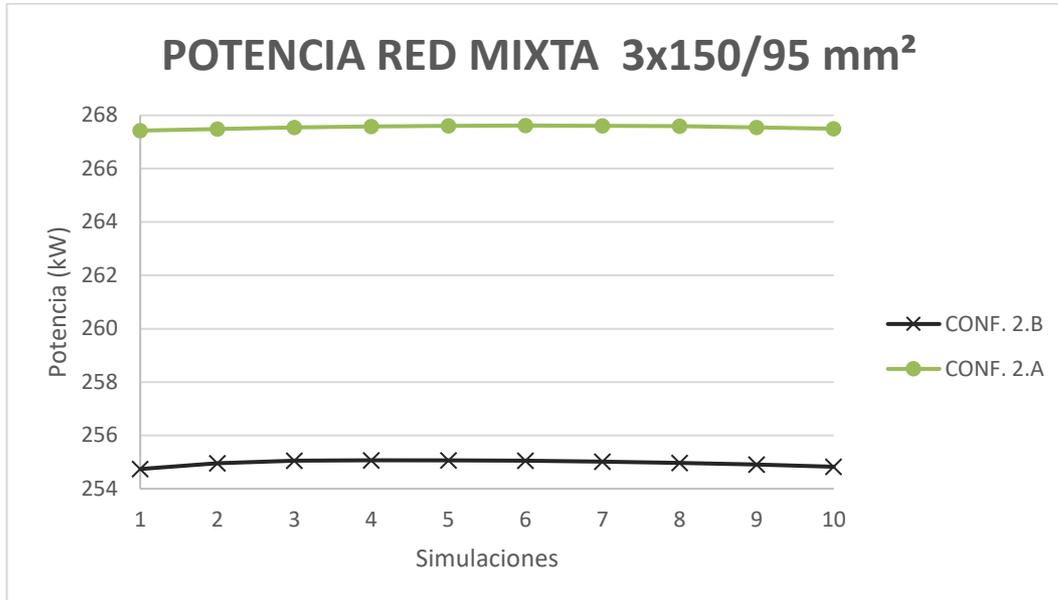


Figura 72. Comparativa geometría 2 sección 3x150/95 mm².

La diferencia entre los máximos de potencia para ambas configuraciones resulta de 12.55 kW.

$$\Delta P^{150/95 \text{ mm}^2} (\text{kW}) = 267.62 \text{ kW} - 255.07 \text{ kW} = 12.55 \text{ kW}$$

Las aportaciones de cada corriente para cada configuración de esta sección quedan reflejadas en los gráficos de la Figura 73. Sucede lo mismo que en el resto de los casos, la configuración diagonal permite más participación de continua que la de alterna, que como se verá en el capítulo final de conclusiones, esto no tiene porqué ser ni mejor ni peor, si no que dependerá de cada circunstancia.

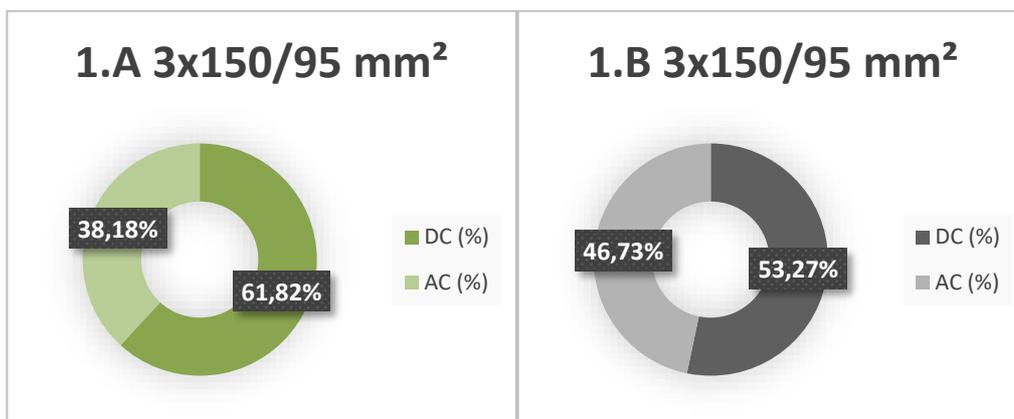


Figura 73. Aportación de cada corriente en la red mixta. (s=3x150/95mm²)

5.6.3 Resumen de resultados de la geometría 2

A modo de conclusión de este capítulo, y con el fin de recoger de manera sencilla todos los resultados calculados para este último cable, se muestra la Tabla 4. En ella se incluyen todos los números obtenidos para este estudio del sistema híbrido, las corrientes DC/AC, las potencias de la red final y la ganancia porcentual conseguida.

	DC (A)	AC (A)	Potencia red mixta (kW)	Incremento de potencia (%)
CONF 2.A (s=3x95/50 mm ²)	218	134.58	194.45	36.14
CONF2.A(s=3x150/95 mm ²)	300	185.29	267.62	40.02
CONF 2.B (s=3x95/50 mm ²)	196	165.89	185.15	29.63
CONF2.B(s=3x150/95 mm ²)	268	235.07	255.07	33.45

Tabla 4. Resumen de resultados de la red mixta para la geometría 2.

Analizando la última columna de la tabla anterior (Tabla 4), y de la Tabla 3, correspondiente al otro cable, se ve que para todos los casos se consigue un aumento en la potencia transferida por la red con este sistema híbrido.

6 CONCLUSIONES

Este trabajo ha presentado el estudio termoeléctrico de redes mixtas DC/AC para cables posados sobre fachada. Para ello se ha planteado un algoritmo cuyo objetivo ha sido comprobar si la configuración de red mostrada en la Figura 16, donde se combinan corriente continua y alterna en un mismo cable, es más eficiente en términos de potencia que las existentes, que solo transportan esta última, con el fin de conseguir un modelo eléctrico en ciudades óptimo para el despliegue masivo de la generación renovable distribuida y de la movilidad eléctrica.

Mediante el algoritmo propuesto, en el que se definen todas las características del cable y de su entorno para obtener la corriente circulante cuando se alcanza la temperatura de régimen permanente, se ha conseguido simular la red de partida, adquiriendo valores muy similares a los indicados por los fabricantes de los cables de estudio. El siguiente paso ha consistido en modificar esa red, haciendo que circulara también por ella corriente continua, ya que teóricamente se especulaba que permitiría mejorar la eficiencia de la red, y de esta forma se han analizado cinco secciones de cable en dos posibles configuraciones, denominadas por su disposición geométrica, diagonal y paralelo. Los resultados obtenidos han confirmado lo esperado, como puede comprobarse en la Tabla 3 y en la Tabla 4, en las que se recogen todas las soluciones numéricas para cada una de las configuraciones planteadas, la red mixta propuesta supone siempre una mejora en términos de transferencia de potencia, con además un incremento significativo en torno al 40% de media.

Aunque la configuración diagonal proporcione para todas las secciones una mayor transferencia de potencia, en función de las necesidades de cada instalación puede resultar más interesante la configuración paralela, ya que con esta se alcanza mayor porcentaje de participación de la corriente alterna, por lo que en función de los requerimientos de cada caso sería un punto que considerar.

A falta de otros muchos estudios detallados, como puede ser el económico, los resultados mostrados en el capítulo anterior demuestran un aumento en la transferencia de potencia para todas las secciones y disposiciones. Por lo que, como se está analizando la configuración en que no había que añadir nuevos cables a la red (Figura 16), en primera aproximación, puede afirmarse que esta propuesta puede suponer una mejora tanto en términos de rendimientos, como económicos.

Como trabajos futuros posibles a raíz de este, cabría destacar el interés en realizar este mismo estudio, pero para la otra topología de red propuesta en la Figura 15, en la que se respeta la configuración de la red de distribución de alterna, y se añaden dos conductores adicionales para el suministro de continua. Esta implicaría una mayor inversión inicial, pero habría que ver qué resultados proporciona, por si en el conjunto supera a esta red estudiada. Otros posibles trabajos podrían ser el análisis económico detallado, un estudio de los niveles de tensión DC, las protecciones eléctricas necesarias, o los campos magnéticos generados entre ambas corrientes. Todos estos estudios permitirían corroborar la viabilidad de este tipo de redes, que a priori, parecen ser eficientes.

Finalmente, si se consigue desarrollar correctamente esta tecnología con todas las ventajas que conlleva para los tres puntos fundamentales que se han visto (GD, almacenamiento, y VE), podría contribuir a un adelanto en la implantación de la generación distribuida y la adquisición de vehículos eléctricos, contribuyendo así a lograr alcanzar los objetivos marcados en los acuerdos de 2030 y 2050, y fomentando la economía tras la crisis que está generando la pandemia del coronavirus.

REFERENCIAS

- [1] “Población, total | Data.” <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL> (accessed Dec. 03, 2020).
- [2] “Acceso a la electricidad (% de población) | Data.” <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.ELC.ACCTS.ZS> (accessed Dec. 03, 2020).
- [3] “Consumo de energía eléctrica (kWh per cápita) | Data.” <https://datos.bancomundial.org/indicador/EG.USE.ELEC.KH.PC> (accessed Dec. 03, 2020).
- [4] “Emisiones de gases de efecto invernadero totales (% de cambio desde 1990) | Data.” <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.ZG> (accessed Dec. 03, 2020).
- [5] “Protocolo de Kioto | ONG Manos Unidas.” <https://www.manosunidas.org/observatorio/cambio-climatico/protocolo-kioto> (accessed Dec. 07, 2020).
- [6] “Finalizado el Protocolo de Kioto ¿Cumplió España?” http://www.medioambienteycambioclimatico.org/index.php?option=com_acymailing&ctrl=archive&task=view&mailid=30&key=435b37f900510fab9497c5726bebbbaeb&subid=1093-4d9ebb3678576991755702cd281971fa (accessed Dec. 07, 2020).
- [7] “Acuerdo de París | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/international/negotiations/paris_es (accessed Dec. 03, 2020).
- [8] “Paquete de medidas sobre clima y energía hasta 2020 | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2020_es (accessed Dec. 03, 2020).
- [9] “Marco sobre clima y energía para 2030 | Acción por el Clima.” https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2030_es (accessed Dec. 03, 2020).
- [10] “Un Pacto Verde Europeo | Comisión Europea.” https://ec.europa.eu/info/strategy/priorities-2019-2024/european-green-deal_es#acciones (accessed Dec. 03, 2020).
- [11] “La nueva regulación permite el despliegue del autoconsumo en España – UNEF.” <https://unef.es/2020/02/la-nueva-regulacion-permite-el-despliegue-del-autoconsumo-en-espana/> (accessed Dec. 03, 2020).
- [12] “BOE.es - Documento consolidado BOE-A-2000-24019.” <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2000-24019> (accessed Dec. 03, 2020).
- [13] “BOE.es - Documento BOE-A-2011-19242.” <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2011-19242> (accessed Dec. 03, 2020).
- [14] “BOE.es - Documento BOE-A-2014-6123.” https://www.boe.es/diario_boe/txt.php?id=BOE-A-2014-6123 (accessed Dec. 03, 2020).
- [15] “BOE.es - Documento BOE-A-2018-13593.” <https://www.boe.es/buscar/doc.php?id=BOE-A-2018-13593> (accessed Dec. 03, 2020).
- [16] “rd 244/19 - Buscar con Google.” https://www.google.com/search?q=rd+244%2F19&rlz=1C1WPZC_enES919ES919&oq=RD+244&aqs=chrome.l.69i57j69i59j0l3j69i61.3336j0j4&sourceid=chrome&ie=UTF-8 (accessed Dec. 03, 2020).
- [17] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, “Sección HE 5 Contribución fotovoltaica mínima de energía eléctrica,” *Doc. Básico HE Ahorr. Energía*, pp. 1–17, 2009, [Online]. Available: https://www.coit.es/system/files/link_group/he_5_contribucion_fotovoltaica_minima_de_energia_elec_trica_77f479a7.pdf.
- [18] “PLAN MOVES II | IDAE.” <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y->

- vehiculos/plan-moves-ii (accessed Dec. 03, 2020).
- [19] “Red Eléctrica de España | Vehículo eléctrico.” <https://www.ree.es/es/red21/vehiculo-electrico#> (accessed Dec. 03, 2020).
- [20] “Los efectos del coronavirus sobre la demanda y el precio de la electricidad.” https://www.uv.es/uvweb/uv-noticias/es/noticias/efectos-del-coronavirus-demanda-precio-electricidad-1285973304159/Novetat.html?id=1286125458359&plantilla=UV_Noticias/Page/TPGDetailNews (accessed Dec. 03, 2020).
- [21] “Vuelve la corriente continua gracias a renovables y off-grid – *faircompanies.” <https://faircompanies.com/articles/vuelve-la-corriente-continua-gracias-a-renovables-y-off-grid/> (accessed Dec. 07, 2020).
- [22] C. P. Científica, “MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DE PROYECTOS INDIVIDUALES (TIPO A o B),” no. i, pp. 14–20, 2014.
- [23] BOE, *Reglamento Electrotécnico para Baja Tensión e ITC*. 2020.
- [24] Prysmian, “Soluciones para Baja Tensión cables y accesorios 2016.” 2016.
- [25] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetics: HomePage,” *Femm.Info*, 2019.
- [26] “Apuntes de la asignatura Transmisión de Calor, GIE.” 2017.
- [27] “Apuntes de la asignatura Instalaciones y Máquinas Eléctricas, GIE.” 2017.
- [28] “Método de bisección - Wikipedia, la enciclopedia libre.” https://es.wikipedia.org/wiki/Método_de_bisección (accessed Dec. 06, 2020).
- [29] “FisicaNet - Tabla de conductividad térmica TB02 [Física - Termodinámica].” <https://www.fisicanet.com.ar/fisica/termodinamica/tb02-conductividad-termica.php> (accessed Dec. 03, 2020).

Anexo A

```
clc
clear
corriente=bisect(35,150,0.001);

%CÓDIGO GEOMETRÍA 1
function data = Temp_cable(Iac)

cable_data = struct(...
    'Alpolirret_4x16', struct('I_zf',67, 'I_zt',72, 'd_ext',0.018, 'peso',285, 'espesor_aisl',0.0012,
    'd_conductor',0.0079, 'R',1.91,'alpha',0.000023, 'seccion',16,'seccion_neutro',16),...
    'Alpolirret_4x25', struct('I_zf',90, 'I_zt',97,'d_ext',0.0231, 'peso',445, 'espesor_aisl',0.0014,
    'd_conductor',0.0096, 'R',1.2,'alpha',0.000023, 'seccion',25,'seccion_neutro',25),...
    'Alpolirret_4x50', struct('I_zf',133, 'I_zt',144,'d_ext',0.0296, 'peso',770, 'espesor_aisl',0.0016,
    'd_conductor',0.0123, 'R',0.641,'alpha',0.000023, 'seccion',50,'seccion_neutro',50));
%Selección del cable de alterna posado sobre fachada
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x16;
selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x25;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x50;

%Selección de los datos de la sección elegida
% I_z1=selected_cable1.I_zf;
% d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
% peso1=selected_cable1.peso;
seccion1 = selected_cable1.seccion;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
r1=d_conductor1/2;

Profpared=0.3;
Longpared=3;
Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;

openfemm;
pause(0.1)
newdocument(2);
%hi_probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,20);

%DEFINICIÓN DE LAS GEOMETRÍAS
% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
```

```

hi_drawline(0,0,0,Longpared);

% DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);
hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);

% DIBUJO DE LOS CABLES
% NODOS DEL AISLAMIENTO
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

% NODOS DE LOS CONDUCTORES
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);

```

```

%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2
hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
%Cable 3
%Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
%Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);

```

```

hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Neutro
%Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
%Etiquetas de los 4 conductores
%hi addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%Etiquetas de los 4 aislantes
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);

% Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

%DEFINICIÓN DE LOS MATERIALES
%Fachada
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
%Ambiente
T_amb=40+273.15; %Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;
AireKy=AireKx;
%Cable
T_cable=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
AislanteKy=AislanteKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('Conductor',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);

```

```

hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

% TRANSMISIÓN DE CALOR
% hi_addboundprop("boundpropname", BdryFormat, Tset, qs, Tinf, h, beta)
hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
%qs: Densidad de flujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
%dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cable-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,6,0);
%h:coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)
hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3

    T_ref=293.15;
    At1=T_cable-T_ref;
    rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));

%GENERACION DEL CABLE (J/m³)
    CableGen1=rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6);

%hi_modifymaterial("BlockName",propnum,value)
    hi_modifymaterial('Conductor',3,CableGen1);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
%hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
%hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
%hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
%hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

%CONDUCTORES
%CONDUCTOR 1
    hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
    hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
    hi_clearselected()
    hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 2
    hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
    hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
    hi_clearselected()
    hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 3
    hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
    hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
    hi_clearselected()
    hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 4
    hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
    hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
    hi_clearselected()
    hi_zoomnatural()
% AISLANTES

```

```

% AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()

% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)
% Cable 1
% CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Pared

```

```

hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

%hi setsegmentprop("proprname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Aire
hi_selectsegment(Profpared*2,0);
hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
hi_clearselected()

savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
hi_saveas(savefile);

hi_analyze()
hi_loadsolution()

%ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode.Valid
entries for mode are "point", "contour", and "area".
ho_seteditmode('area');
%ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).

ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
Tcablevec=ho_blockintegral(0);
T_cable=Tcablevec(1);

end
data=T_cable-273.15;
end
function y = fun(x1)
y = Temp_cable(x1)-90;
end

%MÉTOD0 DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol)
% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

fa = fun(a);
fb = fun(b);

```

```

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end

```

Anexo B

```

clc
clear

corriente=bisect(35,350,0.001);

% CÓDIGO GEOMETRÍA 2
function data = Temp_cable(Iac)

cable_data = struct(...
    'Alpolirret_3x95_50', struct('I_zf',207, 'I_zt',223,'d_ext',0.038, 'peso',1250, 'espesor_aisl',0.0018,
    'd_conductor',0.0161, 'R',0.32,'alpha',0.000023, 'seccion',95,'seccion_neutro',50),...
    'Alpolirret_3x150_95', struct('I_zf',277, 'I_zt',301,'d_ext',0.0465, 'peso',1800, 'espesor_aisl',0.002,
    'd_conductor',0.0193, 'R',0.206,'alpha',0.000023, 'seccion',150,'seccion_neutro',95));

%Selección del cable de alterna posado sobre fachada
selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x95_50;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x150_95;

%Selección de los datos de la sección elegida
seccion1 = selected_cable1.seccion;
I_z1=selected_cable1.I_zf;
d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
peso1=selected_cable1.peso;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
r_conductor1=d_conductor1/2;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
seccion1_n=selected_cable1.seccion_neutro;
r1=d_conductor1/2;
r1_n=sqrt(seccion1_n*1e-6/pi); %Radio del neutro fiador

```

```

Profpared=0.3;
Longpared=3;
Proficable=0;
Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;

openfemm;
pause(0.1)
newdocument(2);
%hi_probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,30);

% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
hi_drawline(0,0,0,Longpared);

% DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);
hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,Profpared,Longpared);

% AISLANTES DE LOS NODOS
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2

```

```

hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

%Nodos de los cables
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep-espesor_aisl1);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,Profpared+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2

```

```

hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
% Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
% Cable 3
% Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
% Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
% Neutro
% Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);
% Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);

% Etiquetas de los 4 conductores
%hi addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

% Etiquetas de los 4 aislantes
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1/2);

% Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

% MATERIALES
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
% Ambiente
T_amb=40+273.15; % Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;

```

```

AireKy=AireKx;
%Propiedades del cable
T_cable=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
AislanteKy=AislanteKx;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('Conductor',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);
hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

% TRANSMISIÓN DE CALOR
hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
%qs: Densidad de flujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
%dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cable-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,5.5,0);
% h:coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)
hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3

    T_ref=293.15;
    At1=T_cable-T_ref;
    rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));

% GENERACION DEL CABLE J/m³
    CableGen1=rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6);

%hi modifymaterial("BlockName",propnum,value)
%Modifico la propiedad 3 del cable, que sería el volumen de densidad de generacion de calor en W/m³
    hi_modifymaterial('Conductor',3,CableGen1);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS

%hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
%hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
%hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
%hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

% CONDUCTORES
% CONDUCTOR 1
    hi_selectlabel(Proppared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
    hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group

```

```

hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('Conductor',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 4
hi_selectlabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTES
% AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)
% Cable 1
% CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()

```

```

% Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Pared
hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

% hi setsegmentprop("proprname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

% Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

% Aire
hi_selectsegment(Profpared*2,0);
hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
hi_clearselected()

savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
hi_saveas(savefile);

hi_analyze()
hi_loadsolution()

% ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode. Valid
entries for mode are "point", "contour", and "area".
ho_seteditmode('area');
% ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).

ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);

Tcablevec=ho_blockintegral(0);
T_cable=Tcablevec(1);

```

```

end
data=T_cable-273.15;
end
function y = fun(x1)
y = Temp_cable(x1)-90;
end

% MÉTODO DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol)
% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

fa = fun(a);
% fb = fun(b);

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
    tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end

```

Anexo C

```

clc
clear

% CONFIGURACIÓN DIGAONAL GEOMETRÍA 1
% Para el conductor de 16mm2
for i = 1:15
    data(:,i) = bisect(25,375,0.001,(i*1)+71)
end

%Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 16mm2
res(1,:)= 1*(1:15)+71;
res(2,:)= data(1,:);
res(3,:)= data(2,:);

Potencia (1,:) = 230*data(1,:)+750*res(1,:);

```

```

% %Para el conductor de 25mm²
% for i = 1:15
%   data(:,i) = bisect(25,375,0.001,(i*1)+100)
% end
%
% %Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 25mm²
% res(1,:)= 1*(1:15)+100;
% res(2,:)= data(1,:);
% res(3,:)= data(2,:);
%
% Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,:);

% %Para el conductor de 50mm²
% for i = 1:2
%   data(:,i) = bisect(25,375,0.001,(i*1)+156)
% end
%
% % Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 50mm²
%
% res(1,:)= 1*(1:2)+156;
% res(2,:)= data(1,:);
% res(3,:)= data(2,:);
%
% Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,:);

function data = Temp_cable(Iac,Idc)

cable_data = struct(...
  'Alpolirret_4x16', struct('I_zf',67, 'I_zt',72, 'd_ext',0.018, 'peso',285, 'espesor_aisl',0.0012,
'd_conductor',0.0079, 'R',1.91,'alpha',0.000023, 'seccion',16,'seccion_neutro',16),...
  'Alpolirret_4x25', struct('I_zf',90, 'I_zt',97,'d_ext',0.0231, 'peso',445, 'espesor_aisl',0.0014,
'd_conductor',0.0096, 'R',1.2,'alpha',0.000023, 'seccion',25,'seccion_neutro',25),...
  'Alpolirret_4x50', struct('I_zf',133, 'I_zt',144,'d_ext',0.0296, 'peso',770, 'espesor_aisl',0.0016,
'd_conductor',0.0123, 'R',0.641,'alpha',0.000023, 'seccion',50,'seccion_neutro',50));
%Selección del cable de alterna posado sobre fachada
selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x16;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x25;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x50;

%Selección de los datos del cable elegido
seccion1 = selected_cable1.seccion;
I_z1=selected_cable1.I_zf;
% d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
% peso1=selected_cable1.peso;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
r1=d_conductor1/2;

Profpared=0.3;
Longpared=3;

```

```

Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;

openfemm;
pause(0.1)
newdocument(2);
%hi_probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,20);

% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
hi_drawline(0,0,0,Longpared);

% DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);
hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);

% NODOS DEL AISLAMIENTO
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);

```

```

%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

% NODOS DE LOS CONDUCTORES
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2

```

```

hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
% Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
% Cable 3
% Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
% Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
% Neutro
% Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
% Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
% Etiquetas de los 4 conductores
%hi addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

% Etiquetas de los 4 aislantes
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);

% %Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% %Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

% MATERIALES
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
% Ambiente
T_amb=40+273.15; % Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;
AireKy=AireKx;

```

```

% Propiedades del cable
T_cableAC=20+273.15;
T_cableDC=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
AislanteKy=AislanteKx;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('ConductorAC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('ConductorDC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);
hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

% TRANSMISIÓN DE CALOR
% hi addboundprop("boundproprname", BdryFormat, Tset, qs, Tinf, h, beta)

hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
%qs: Densidad de fujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
%dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cableAC-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,6,0);
%h:coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)
hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3

    T_ref=293.15;
    At1=T_cableAC-T_ref;
    At2=T_cableDC-T_ref;
    rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));
    rtcable2=Rtref1*(1+(alpha1*At2));
    % GENERACION DEL CABLE AC J/m³
    CableGen1=(rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6));
    %GENERACION DEL CABLE DC J/m³
    CableGen2=(rtcable2*1e-3*(Idc^2)/(seccion1*1e-6));
%hi modifymaterial("BlockName",propnum,value)
    hi_modifymaterial('ConductorAC',3,CableGen1);
    hi_modifymaterial('ConductorDC',3,CableGen2);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS

%hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
%hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
%hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
%hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

```

```

%CONDUCTORES
%CONDUCTOR 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorAC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 4 %En este caso poner cable ya que es el mismo conductor que
%el resto
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTES
% AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()

% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)

```

```

%Cable 1
%CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
%Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
%Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
%Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
%Pared
hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

%hi setsegmentprop("propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"propname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"propname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Aire
hi_selectsegment(Profpared*2,0);
hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
hi_clearselected()

savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
hi_saveas(savefile);

hi_analyze()
hi_loadsolution()

%ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode. Valid
entries for mode are "point", "contour", and "area".
ho_seteditmode('area');

```

```

%ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).
ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecAC1=ho_blockintegral(0);
T_cableAC=TcablevecAC1(1);
ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecDC1=ho_blockintegral(0);
T_cableDC1=TcablevecDC1(1);
ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
T_cableDC2=TcablevecDC2(1);
% ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% TcablevecAC2=ho_blockintegral(0);
% T_cableAC2=TcablevecAC2(1);

Tcable=T_cableDC1;
end

data=Tcable-273.15;

end

function y = fun(x1,x2)
y = Temp_cable(x1,x2)-90;

end

%MÉTODO DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol,x2)
% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

fa = fun(a,x2);
% fb = fun(b)

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c,x2);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
    tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end

```

Anexo D

```
clc
clear
```

```
%CONFIGURACIÓN PARALELO GEOMETRÍA 1
```

```
% Para el conductor de 16mm2
```

```
for i = 1:15
```

```
    data(:,i) = bisect(20,200,0.001,(i*1)+67)
```

```
end
```

```
%Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 16mm2
```

```
res(1,:)= 1*(1:15)+67;
```

```
res(2,:)= data(1,:);
```

```
res(3,:)= data(2,:);
```

```
Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,.);
```

```
% %Para el conductor de 25mm2
```

```
% for i = 1:15
```

```
%    data(:,i) = bisect(25,375,0.001,(i*1)+96)
```

```
% end
```

```
%
```

```
% %Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 25mm2
```

```
%
```

```
% res(1,:)= 1*(1:15)+96;
```

```
% res(2,:)= data(1,:);
```

```
% res(3,:)= data(2,:);
```

```
%
```

```
%
```

```
% Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,.);
```

```
% %Para el conductor de 50mm2
```

```
% for i = 1:2
```

```
%    data(:,i) = bisect(25,375,0.001,(i*1)+141)
```

```
% end
```

```
%
```

```
% %Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 50mm2
```

```
% res(1,:)= 1*(1:2)+141;
```

```
% res(2,:)= data(1,:);
```

```
% res(3,:)= data(2,:);
```

```
%
```

```
% Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,.);
```

```
function data = Temp_cable(Iac,Idc)
```

```
cable_data = struct(...
```

```
    'Alpolirret_4x16', struct('I_zf',67, 'I_zt',72, 'd_ext',0.018, 'peso',285, 'espesor_aisl',0.0012, 'd_conductor',0.0079, 'R',1.91,'alpha',0.0039, 'seccion',16,'seccion_neutro',16),...
```

```
    'Alpolirret_4x25', struct('I_zf',90, 'I_zt',97,'d_ext',0.0231, 'peso',445, 'espesor_aisl',0.0014, 'd_conductor',0.0096, 'R',1.2,'alpha',0.0039, 'seccion',25,'seccion_neutro',25),...
```

```
    'Alpolirret_4x50', struct('I_zf',133, 'I_zt',144,'d_ext',0.0296, 'peso',770, 'espesor_aisl',0.0016, 'd_conductor',0.0123, 'R',0.641,'alpha',0.0039, 'seccion',50,'seccion_neutro',50));
```

```
%Selección del cable de alterna posado sobre fachada
```

```

selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x16;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x25;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_4x50;

%Selección de los datos de la sección elegida
seccion1 = selected_cable1.seccion;
% I_z1=selected_cable1.I_zf;
% d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
% peso1=selected_cable1.peso;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
r1=d_conductor1/2;

Profpared=0.3;
Longpared=3;
Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;

openfemm;

pause(0.1)
newdocument(2);
%hi probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,20);

% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
hi_drawline(0,0,0,Longpared);

% %DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);
hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);

% NODOS DEL AISLAMIENTO
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);

```

```

%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%NODOS DE LOS CONDUCTORES
%hi_addnode(x,y)
% %Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
% %Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
% %Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);

```

```

%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2
hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
%Cable 3
%Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
%Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Neutro
%Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-
sep,180,1);
%Etiquetas de los 4 conductores
%hi_addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);

%Etiquetas de los 4 aislantes

```

```

hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);

% Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

%MATERIALES
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
% Ambiente
T_amb=40+273.15; %Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;
AireKy=AireKx;
%Propiedades del cable
T_cableAC=20+273.15;
T_cableDC=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
AislanteKy=AislanteKx;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('ConductorAC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('ConductorDC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);
hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

%TRANSMISIÓN DE CALOR
% hi addboundprop("boundproprname", BdryFormat, Tset, qs, Tinf, h, beta)

hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
%qs: Densidad de fujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
%dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cableAC-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,6,0);
%h:coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)
hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3

```

```

T_ref=293.15;
At1=T_cableAC-T_ref;
At2=T_cableDC-T_ref;
rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));
rtcable2=Rtref1*(1+(alpha1*At2));
% GENERACION DEL CABLE AC J/m³
CableGen1=rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6); % corriente de alterna pasando
% GENERACION DEL CABLE DC J/m³
CableGen2=rtcable2*1e-3*(Idc^2)/(seccion1*1e-6); % corriente de continua pasando
%hi modifymaterial("BlockName",propnum,value)
hi_modifymaterial('ConductorAC',3,CableGen1);
hi_modifymaterial('ConductorDC',3,CableGen2);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS

%hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
%hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
%hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
%hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

%CONDUCTORES
%CONDUCTOR 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorAC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 4 %En este caso poner cable ya que es el mismo conductor que
%el resto
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%AISLANTES
%AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group

```

```

hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()

% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)
% Cable 1
% CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Pared
hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

%hi setsegmentprop("propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"propname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

% Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

```

```

    hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"propname", elementsize, automesh, hide, group,
    "inconductor")
    hi_clearselected()

    %Aire
    hi_selectsegment(Profpared*2,0);
    hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
    hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
    hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
    hi_clearselected()

    savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
    hi_saveas(savefile);

    hi_analyze()
    hi_loadsolution()

    %ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode.Valid
    entries for mode are "point", "contour", and "area".
    ho_seteditmode('area');
    %ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).

    ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
    TcablevecAC1=ho_blockintegral(0);
    T_cableAC1=TcablevecAC1(1);
    % ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
    % TcablevecAC2=ho_blockintegral(0);
    % T_cableAC2=TcablevecAC2(1);
    ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
    TcablevecDC1=ho_blockintegral(0);
    T_cableDC1=TcablevecDC1(1);
    ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1-sep);
    TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
    T_cableDC2=TcablevecDC2(1);

    Tcable=T_cableDC2;
end

data=Tcable-273.15;

end

function y = fun(x1,x2)
y = Temp_cable(x1,x2)-90;
end

%MÉTODO DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol,x2)
% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

```

```

fa = fun(a,x2);
fb = fun(b,x2);

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c,x2);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end

```

Anexo E

```

clc
clear

%CONFIGURACIÓN DIAGONAL GEOMETRÍA 2
% %Para el conductor de 95/50mm2
for i = 1:2
    data(:,i) = bisect(25,300,0.001,(i*1)+216)
end
%Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 95/50mm2
res(1,:)= 1*(1:2)+216;
res(2,:)= data(1,:);
res(3,:)= data(2,:);
Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,:);

% %Para el conductor de 150/95mm2
% for i = 1:2
% data(:,i) = bisect(20,500,0.001,(i*1)+298)
% end
% %Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 150/95mm2
% res(1,:)= 1*(1:2)+298;
% res(2,:)= data(1,:);
% res(3,:)= data(2,:);
% Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,:);

% %CÓDIGO PARA ALTERNA CABLES SOBRE FACHADA
function data = Temp_cable(Iac,Idc)

cable_data = struct(...
    'Alpolirret_3x95_50', struct('I_zf',207, 'I_zt',223,'d_ext',0.038, 'peso',1250, 'espesor_aisl',0.0018,
    'd_conductor',0.0161, 'R',0.32,'alpha',0.0039, 'seccion',95,'seccion_neutro',50),...

```

```
'Alpolirret_3x150_95', struct('I_zf',277, 'I_zt',301,'d_ext',0.0465, 'peso',1800, 'espesor_aisl',0.002,
'd_conductor',0.0193, 'R',0.206,'alpha',0.0039, 'seccion',150,'seccion_neutro',95));
```

```
%Selección del cable de alterna posado sobre fachada
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x95_50;
selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x150_95;
```

```
%Selección de los datos de la sección elegida
seccion1 = selected_cable1.seccion;
I_z1=selected_cable1.I_zf;
d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
peso1=selected_cable1.peso;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
r_conductor1=d_conductor1/2;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
seccion1_n=selected_cable1.seccion_neutro;
r1=d_conductor1/2;
r1_n=sqrt(seccion1_n*1e-6/pi); %Radio del neutro fiador
```

```
Profpared=0.3;
Longpared=3;
Profcable=0;
Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;
```

```
openfemm;
pause(0.1)
newdocument(2);
%hi probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,30);
```

```
% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
hi_drawline(0,0,0,Longpared);
```

```
%DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);
hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,Profpared,Longpared);
```

```
% AISLANTES DE LOS NODOS
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
```

```

hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

%Nodos de los cables
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4

```

```

hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep-espesor_aisl1);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,Profpared+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2
hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
%Cable 3
%Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
%Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Neutro
%Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);
%Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);

%Etiquetas de los 4 conductores

```

```

%hi addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

%Etiquetas de los 4 aislantes
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1/2);

% Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

%MATERIALES
%Fachada
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
% Ambiente
T_amb=40+273.15; %Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;
AireKy=AireKx;
%Propiedades del cable
T_cableAC=20+273.15;
T_cableDC=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
AislanteKy=AislanteKx;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('ConductorAC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('ConductorDC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);
hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

%TRANSMISIÓN DE CALOR
hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
%qs: Densidad de flujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
%dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cable-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,5,0);
% %h:coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)

```

```

hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3
    T_ref=293.15;
    At1=T_cableAC-T_ref;
    At2=T_cableDC-T_ref;

    rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));
    rtcable2=Rtref1*(1+(alpha1*At2));

    %CORRIENTE DC GENERADA AC (J/m2)
    CableGen1=(rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6));
    %CORRIENTE AC GENERADA DC (J/m2)
    CableGen2=(rtcable2*1e-3*(Idc^2)/(seccion1*1e-6));

    %hi modifymaterial("BlockName",propnum,value)
    hi_modifymaterial('ConductorAC',3,CableGen1);
    hi_modifymaterial('ConductorDC',3,CableGen2);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS

%hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
%hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
%hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
%hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

%CONDUCTORES
%CONDUCTOR 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorAC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
%CONDUCTOR 4
hi_selectlabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTES
% AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_ais1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()

```

```

% AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)
% Cable 1
% CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
  hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()

% Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
  hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()

% Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
  hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()

% Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()

% Pared
hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);

```

```

hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

%hi setsegmentprop("proprname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Aire
hi_selectsegment(Profpared*2,0);
hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
hi_clearselected()

savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
hi_saveas(savefile);

hi_analyze()
hi_loadsolution()

%ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode.Valid
entries for mode are "point", "contour", and "area".
ho_seteditmode('area');
%ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).
ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecAC1=ho_blockintegral(0);
T_cableAC1=TcablevecAC1(1);
ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecDC1=ho_blockintegral(0);
T_cableDC1=TcablevecDC1(1);
ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
T_cableDC2=TcablevecDC2(1);
% ho_selectblock(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
% TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
% T_cableDC2=TcablevecDC2(1);

T_cable=max(T_cableDC1,T_cableDC2);
end
data=T_cable-273.15;

end
function y = fun(x1,x2)
y = Temp_cable(x1,x2)-90;
end

% MÉTODO DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol,x2)

```

```

% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

fa = fun(a,x2);
fb = fun(b,x2);

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c,x2);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end

```

Anexo F

```

clc
clear

```

```

%CONFIGURACIÓN PARALELO GEOMETRÍA 2

```

```

%Conductor 95/50mm2

```

```

for i = 1:2
    data(:,i) = bisect(25,300,0.001,(i*1)+194)
end

```

```

%Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 95/50mm2

```

```

res(1,:)= 1*(1:2)+194;
res(2,:)= data(1,:);
res(3,:)= data(2,:);

```

```

Potencia (1,:) = 230*data(1,.)+750*res(1,:);

```

```

% %Conductor 150/95mm2

```

```

% for i = 1:2
% data(:,i) = bisect(25,500,0.001,266+(i*1))
% end
%

```

```

% %Resultados de corrientes DC y AC, temperatura, y potencia para 150/95mm2
%

```

```

% res(1,:)= 266+1*(1:2);
% res(2,:)= data(1,:);
% res(3,:)= data(2,:);
%
% Potencia (1,:) = 230*data(1,;)+750*res(1,;);

function data = Temp_cable(Iac,Idc)
cable_data = struct(...
    'Alpolirret_3x95_50', struct('I_zf',207, 'I_zt',223,'d_ext',0.038, 'peso',1250, 'espesor_aisl',0.0018,
'd_conductor',0.0161, 'R',0.32,'alpha',0.0039, 'seccion',95,'seccion_neutro',50),...
    'Alpolirret_3x150_95', struct('I_zf',277, 'I_zt',301,'d_ext',0.0465, 'peso',1800, 'espesor_aisl',0.002,
'd_conductor',0.0193, 'R',0.206,'alpha',0.0039, 'seccion',150,'seccion_neutro',95));

%Selección del cable posado sobre fachada
selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x95_50;
% selected_cable1 = cable_data.Alpolirret_3x150_95;

%Selección de los datos de la sección elegida
seccion1 = selected_cable1.seccion;
I_z1=selected_cable1.I_zf;
d_ext1 = selected_cable1.d_ext;
peso1=selected_cable1.peso;
espesor_aisl1=selected_cable1.espesor_aisl;
d_conductor1 = selected_cable1.d_conductor;
r_conductor1=d_conductor1/2;
Rtref1 = selected_cable1.R;
alpha1 = selected_cable1.alpha;
seccion1_n=selected_cable1.seccion_neutro;
r1=d_conductor1/2;
r1_n=sqrt(seccion1_n*1e-6/pi); %Radio del neutro

Profpared=0.3;
Longpared=3;
Profcable=0;
Poscable=Longpared/2;
sepp=0.01/1000;
sep=0.01/1000;

openfemm;
pause(0.1)
newdocument(2);
%hi_probdef(units,type,precision,(depth),(minangle)) changes the problem definition.
hi_probdef('meters','planar',1e-8,1,30);

% DIBUJO DE LA PARED
%hi_drawline(x1,y1,x2,y2) Adds nodes at (x1,y1) and (x2,y2) and adds a line between the nodes.
hi_drawline(0,Longpared,Profpared,Longpared);
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,0,0);
hi_drawline(0,0,0,Longpared);

%DIBUJO DE LA ZONA DE AIRE
hi_drawline(Profpared,Longpared,Profpared*10,Longpared);

```

```

hi_drawline(Profpared*10,Longpared,Profpared*10,0);
hi_drawline(Profpared*10,0,Profpared,0);
hi_drawline(Profpared,0,Profpared,Longpared);

% AISLANTES DE LOS NODOS
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

%Nodos de los cables
%hi_addnode(x,y)
%Nodo 1.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 1.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);
%Nodo 1.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.1
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1-espesor_aisl1+sep);
%Nodo 2.2
hi_addnode(Profpared+4*r1-espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 2.3
% hi_addnode(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+espesor_aisl1+sep);

```

```

%Nodo 2.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
%Nodo 3.1
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.2
hi_addnode(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 3.3
% hi_addnode(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1-sep);
%Nodo 3.4
hi_addnode(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep);
%Nodo 4.1
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep-espesor_aisl1);
%Nodo 4.2
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);
%Nodo 4.3
% hi_addnode(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1);
%Nodo 4.4
hi_addnode(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep);

%Dibujo de los cables
%hi_addarc(x1,y1,x2,y2,angle,maxseg) Add a new arc segment from the nearest node to (x1,y1) to the
nearest node to (x2,y2) with angle 'angle' divided into 'maxseg' segments
%Cable 1
%Conductor 1
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1-
espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Aislante 1
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable+r1,Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable+r1,Profpared+sepp,Poscable+r1,180,1);
%Cable 2
%Conductor 2
hi_addarc(Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+se
p,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1-
espesor_aisl1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,180,1);
%Aislante 2
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
hi_addarc(Profpared+4*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep,
180,1);
%Cable 3
%Conductor 3
hi_addarc(Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+espesor_aisl1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1-espesor_aisl1+sepp,Poscable-
r1-sep,180,1);
%Aislante 3
hi_addarc(Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+sepp,Poscable-r1-sep,Profpared+2*r1+sepp,Poscable-r1-sep,180,1);
%Neutro
%Conductor neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);

```

```

hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep,180,1);
% Aislante neutro
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);
hi_addarc(Profpared+2*r1+2*sep+sepp+espesor_aisl1,Poscable-r1_n-
sep,Profpared+2*r1+2*r1_n+2*sep+sepp-espesor_aisl1,Poscable-r1_n-sep,180,1);

%Etiquetas de los 4 conductores
%hi addblocklabel(x,y) Add a new block label at (x,y)
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);

%Etiquetas de los 4 aislantes
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep+espesor_aisl1/2);
hi_addblocklabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep+espesor_aisl1/2);

% %Etiqueta de la pared
hi_addblocklabel(Profpared/2,Longpared/2);
% %Etiqueta del aire
hi_addblocklabel(Profpared*5,Longpared/2);

%MATERIALES
%Fachada
T_pared=40+273.15;
ParedKx=0.5;
ParedKy=ParedKx;
% Ambiente
T_amb=40+273.15; %Para Tª distintas de 40°C -> Tabla 7 ITC-BT-06
AireKx=0.02;
AireKy=AireKx;
%Propiedades del cable
T_cableAC=20+273.15;
T_cableDC=20+273.15;
AislanteKx=0.3;
AislanteKy=AislanteKx;
ConductorKx=210;
ConductorKy = ConductorKx;
%hi addmaterial("materialname", kx, ky, qv, kt) adds a new material with called "materialname" with the
material properties:
%kx Thermal conductivity in the x- or r-direction.
%ky Thermal conductivity in the y- or z-direction.
%qv Volume heat generation density in units of W/m3
%kt Volumetric heat capacity in units of MJ/(m3*K)
hi_addmaterial('ConductorAC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('ConductorDC',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Neutro',ConductorKx,ConductorKy,0,0);
hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);
hi_addmaterial('Pared',ParedKx,ParedKy,0,0);
hi_addmaterial('Aire',AireKx,AireKy,0,0);

```

```

% TRANSMISIÓN DE CALOR
hi_addboundprop('Pared',0,T_pared,0,0,0);
hi_addboundprop('CDpared',1,0,3,0,0,0);
% qs: Densidad de flujo de calor (W/m²)=-k*(dT/dx)
% dT/dx: Gradiente de temperaturas=(T2-T1)/(x2-x1)
% dT_dx=(T_cable-T_pared)/(r1+sepp);
% qs=-AislanteKx*dT_dx;
hi_addboundprop('CVaire',2,0,0,T_amb,5,0);
% h: coef. de trans. de calor del aire. CV natural:5-25 W/(m²K)
hi_addboundprop('Aire',0,T_amb,0,0,0);

for i = 1:3

    T_ref=293.15;
    At1=T_cableAC-T_ref;
    At2=T_cableDC-T_ref;

    rtcable1=Rtref1*(1+(alpha1*At1));
    rtcable2=Rtref1*(1+(alpha1*At2));

% GENERACION DEL CABLE AC (J/m²)
CableGen1=rtcable1*1e-3*(Iac^2)/(seccion1*1e-6);
% GENERACION DEL CABLE DC (J/m²)
CableGen2=rtcable2*1e-3*(Idc^2)/(seccion1*1e-6);

% hi modifymaterial("BlockName",propnum,value)
% Modifico la propiedad 3 del cable, que sería el volumen de densidad de generacion de calor en W/m³
    hi_modifymaterial('ConductorAC',3,CableGen1);
    hi_modifymaterial('ConductorDC',3,CableGen2);

% AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS

% hi_selectlabel(x,y) Select the label closet to (x,y). Returns the coordinates of the selected label.
% hi_setblockprop("blockname", automesh, meshsize, group)
% hi_clearselected() Clear all selected nodes, blocks, segments and arc segments.
% hi_zoomnatural() zooms to a "natural" view with sensible extents.

% CONDUCTORES
% CONDUCTOR 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% CONDUCTOR 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
hi_setblockprop('ConductorDC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% CONDUCTOR 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
hi_setblockprop('ConductorAC',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% CONDUCTOR 4

```

```

hi_selectlabel(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
hi_setblockprop('Neutro',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTES
% AISLANTE 1
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 2
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep-espesor_aisl1/2);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 3
hi_selectlabel(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AISLANTE 4
hi_selectlabel(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable-2*r1+espesor_aisl1/2-sep);
hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% PARED
hi_selectlabel(Profpared/2,Longpared/2);
hi_setblockprop('Pared',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% AIRE
hi_selectlabel(Profpared*5,Longpared/2);
hi_setblockprop('Aire',0,0.05,0);% #"blockname", automesh, meshsize, group
hi_clearselected()
hi_zoomnatural()
% DEFINO LOS LIMITES
%hi selectsegment(x,y) Select the line segment closest to (x,y)
% Cable 1
% CONVECCION
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable+sep);
    hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 2
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+2*r1+sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+sep);
    hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Cable 3
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-sep);
hi_selectarcsegment(Profpared+r1+sepp,Poscable-2*r1-sep);
    hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
% Neutro
hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-sep);

```

```

hi_selectarcsegment(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-2*r1_n-sep);
hi_setarcsegmentprop(90,'CVaire',0,0,'<None>')
hi_clearselected()
%Pared
hi_selectsegment(Profpared/2,0);
hi_selectsegment(0,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared/2,Longpared);

%hi setsegmentprop("proprname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
hi_setsegmentprop('Pared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Frontera pared-aire
hi_selectsegment(Profpared,Longpared/2);

hi_setsegmentprop('CDPared',0,1,0,0,'<None>');% #"proprname", elementsize, automesh, hide, group,
"inconductor")
hi_clearselected()

%Aire
hi_selectsegment(Profpared*2,0);
hi_selectsegment(Profpared*11,Longpared/2);
hi_selectsegment(Profpared*2,Longpared);
hi_setsegmentprop('Aire',0,1,0,0,'<None>')
hi_clearselected()

savefile = ('auto-CodigoTermico.feh');
hi_saveas(savefile);

hi_analyze()
hi_loadsolution()

%ho seteditmode(mode) Sets themode of the postprocessor to point, contour, or area mode.Valid
entries for mode are "point", "contour", and "area".
ho_seteditmode('area');
%ho selectblock(x,y) Select the block that contains point (x,y).

ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecDC1=ho_blockintegral(0);
T_cableDC1=TcablevecDC1(1);
ho_selectblock(Profpared+3*r1+2*sep+sepp,Poscable+r1+sep);
TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
T_cableDC2=TcablevecDC2(1);
ho_selectblock(Profpared+r1+sepp,Poscable-r1-sep);
TcablevecAC1=ho_blockintegral(0);
T_cableAC=TcablevecAC1(1);
% ho_selectblock(Profpared+2*r1+r1_n+2*sep+sepp,Poscable-r1_n-sep);
% TcablevecDC2=ho_blockintegral(0);
% T_cableDC2=TcablevecDC2(1);

T_cable=max(T_cableDC1,T_cableDC2);
end
data=T_cable-273.15;
end

```

```
function y = fun(x1,x2)
y = Temp_cable(x1,x2)-90;
end

%MÉTODO DE LA BISECCIÓN
function y = bisect(lb,ub,tol,x2)
% Entradas
a = lb;
b = ub;

% Procedimiento
tramo = b-a;

fa = fun(a,x2);
fb = fun(b,x2);

while (abs(tramo)>tol)
    c = (a+b)/2;
    fc = fun(c,x2);
    sprintf('a = %d, b = %d, c = %d', a,b,c)

    if isequal(sign(fa),sign(fc))
        a = c;
    else
        b = c;
    end
    tramo = b-a;
end

y = [c,fc+90];
end
```