

Proyecto Fin de Carrera Ingeniería de la Energía

Análisis térmico y diseño de redes mixtas AC/DC

Autor: José Blas Marín

Tutor: Juan Manuel Mauricio Ferramola

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

Sevilla, 2019



Proyecto Fin de Carrera
Ingeniería de la Energía

Análisis térmico y diseño de redes mixtas AC/DC

Autor:

José Blas Marín

Tutor:

Juan Manuel Mauricio Ferramola

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2019

Proyecto Fin de Carrera: Análisis térmico y diseño de redes mixtas AC/DC

Autor: José Blas Marín

Tutor: Juan Manuel Mauricio Ferramola

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2019

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Se me quedan cortas las palabras para describir lo agradecido que estoy de haber realizado esta carrera que llega a su fin con la realización de este trabajo fin de grado. No puedo evitar acordarme de mi familia, por esas palabras de ánimo y apoyo que de vez en cuando he necesitado; de mis profesores, que me han hecho desarrollarme como ingeniero tanto en conocimientos como en valores; y de mis compañeros, que me han regalado anécdotas, viajes y emociones inolvidables.

Quiero destacar la figura de mi tutor, Juan, que me guio desde el primer día y, aunque a veces era algo pesado, siempre ha estado dispuesto a ayudarme con una sonrisa.

Sin embargo, también quiero acordarme de esos malos momentos, y como gracias a algunas personas conseguí avanzar en la vida. Nunca se darán cuenta realmente de lo que me han ayudado y aportado.

Sin ellos, la realización de este trabajo fin de grado no hubiera sido posible, y es por ello por lo que les doy las gracias.

José Blas Marín

Sevilla, 2019

Resumen

El presente proyecto tiene el objetivo de definir el diseño de una red mixta AC/DC haciendo uso de un código informático en lenguaje Python, implementado en el programa de simulación de elemento finito “FEMM”, que resuelva el problema térmico de un cable de baja tensión subterráneo cuando circula corriente alterna y corriente continua simultáneamente. Posteriormente se analizará la potencia eléctrica transmitida por el sistema y se buscará las condiciones óptimas de diseño que la maximicen.

Para ello, se comenzará con la elección de un determinado modelo de cable, el cual se dibujará su estructura y se introducirán sus propiedades en el programa usado. FEMM realizará un mallado automáticamente que le será necesario para resolver, mediante elementos finitos, el problema térmico del sistema.

Antes de aplicar la idea de redes mixtas en el código formulado, se estudiará la validación de este haciendo circular la intensidad máxima admisible para una determinada sección y midiendo la temperatura que alcanza el seno de dicho cable, que debería de ser la temperatura máxima de operación en régimen de servicio continuo. Este proceso se realizará también haciendo variaciones en los parámetros de diseño y, por tanto, aplicando los factores correctores correspondientes.

Tras verificar el correcto funcionamiento del código programado, se aplicará la idea de redes mixtas al sistema, evaluándose la potencia transmitida y determinándose la disposición y la intensidad, tanto de corriente continua como de corriente alterna, que maximice dicha potencia.

Posteriormente, se comentará una posible aplicación de esta tecnología dirigida al sector residencial, concluyendo con una comparación entre redes mixtas y la red trifásica actual en factores como su eficiencia o el máximo de cargas que pueden ser alimentadas por cada sistema.

Abstract

This project has the objective of defining the design of a mixed network AC/DC developing a computer code in Python language, implemented in the finite element simulation program "FEMM", which solves the thermal problem of a low voltage underground wire when alternating current and direct current circulate simultaneously. Then, the electrical power transmitted by the system will be analyzed and optimal design conditions for maximization will be studied.

To do this, the first step will be the choice of a specific wire model, whose structure will be drawn and whose properties will be introduced in the program used. FEMM will create a mesh automatically that will be necessary in order to solve, through finite elements, the thermal problem of the system.

Before applying the idea of mixed networks in the formulated code its validation will be studied by circulating the maximum admissible intensity for a certain section and measuring the temperature that it reaches inside of this wire, which should be the maximum operating temperature in continuous service. This process will also be done by making changes in the design parameters and, therefore, applying the corresponding correction factors.

After verifying the correct functioning of the programmed code, the idea of mixed networks will be applied to the system, evaluating the transmitted power and determining the arrangement and intensity, of both direct current and alternating current, that maximizes the aforementioned power.

Subsequently, a possible application of this technology aimed at the residential sector will be discussed, concluding with a comparison between mixed networks and the current three-phase network in factors such as its efficiency or the maximum loads that can be powered by each system.

Índice

Agradecimientos	ix
Resumen	xi
Abstract	xiii
Índice	xiv
Índice de Tablas	xvi
Índice de Figuras	xviii
1 Introducción	1
2 Modelado Térmico	7
2.1 <i>Clasificación</i>	7
2.2 <i>Estructura</i>	7
2.1.1 Conductor	8
2.1.2 Aislante	9
2.1.3 Cubierta	9
2.3 <i>Pérdidas Térmicas</i>	9
2.4 <i>Disposiciones</i>	10
2.4.1 Directamente enterrados	10
2.4.2 Bajo tubo	10
2.4.3 Línea Aérea	11
2.5 <i>Mecanismos de transferencia de calor</i>	12
2.5.1 Conducción	12
2.5.2 Convección	13
2.5.3 Radiación	13
2.6 <i>Criterio térmico convencional</i>	14
3 Metodología	19
3.1 <i>FEMM</i>	19
3.2 <i>Modelado del problema</i>	20
3.2.1 Dibujo del sistema	20
3.2.2 Especificación de los materiales usados	21
3.2.3 Definir los límites del problema	23
3.2.4 Realizar mallado	24
3.2.5 Simulación	24
4 Validación del Código	27
5 Aplicación a redes mixtas ac/dc	37
5.1 <i>Aplicación doméstica de redes mixtas</i>	45
5.2 <i>Eficiencia</i>	47

6 Conclusiones	50
Referencias	52
Glosario	54
ANEXOS	55
<i>ANEXO A</i>	<i>55</i>
<i>ANEXO B</i>	<i>60</i>
<i>ANEXO C</i>	<i>67</i>
<i>ANEXO D</i>	<i>74</i>
<i>ANEXO E</i>	<i>81</i>
<i>ANEXO F</i>	<i>89</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Temperaturas máximas de operación según aislamiento	10
Tabla 2-2. Valores típicos del coeficiente de película	13
Tabla 2-3. Condiciones estándar según IEC 60364-5-52	15
Tabla 2-4. Condiciones estándar según PRYSMIAN	15
Tabla 2-5. Aproximación de la resistividad térmica del terreno dependiendo de su naturaleza	17
Tabla 2-6. Presupuesto de una instalación eléctrica	18
Tabla 3-1. Valores típicos del coeficiente de película	21
Tabla 4-1. Intensidades máximas obtenidas en condiciones estándar	28
Tabla 4-2. Intensidades máximas obtenidas en condiciones estándar	29
Tabla 4-3. Intensidades máximas obtenidas con temperatura del suelo de 25 ° C	30
Tabla 4-4. Intensidades máximas obtenidas con temperatura del suelo de 25 ° C	30
Tabla 4-5. Intensidades máximas obtenidas con resistividad del terreno 2 m · k/W	31
Tabla 4-6. Intensidades máximas obtenidas con resistividad del terreno 2 m · k/W	31
Tabla 4-7. Intensidades máximas obtenidas con proximidad a otro circuito	33
Tabla 4-8. Intensidades máximas obtenidas con proximidad a otro circuito	33
Tabla 4-9. Intensidades máximas obtenidas a profundidad de 1.2 m	34
Tabla 4-10. Intensidades máximas obtenidas a profundidad de 1.2 m	35
Tabla 4-11. Resumen de los máximos errores cometidos en cada sistema	36
Tabla 5-1. Análisis de potencia en la disposición 1	39
Tabla 5-2. Análisis de potencia en la disposición 2	41
Tabla 5-3. Análisis de potencia en la disposición 3	42
Tabla 5-4. Análisis de potencia en la disposición 4	44
Tabla 5-5. Resumen de las disposiciones analizadas	44
Tabla 5-6. Pérdidas térmicas de los sistemas simulados	48

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Porcentaje de emisiones de GEI según sectores (España 2017)	1
Figura 1-2 Número de vehículos eléctricos en España desde 2012 a 2017	2
Figura 1-3 Previsión de la demanda de energía eléctrica mundial	2
Figura 1-4. Desglose por sectores del consumo eléctrico español	4
Figura 1-5. Desglose del consumo energético residencial según el uso	4
Figura 1-6. Esquema de una red mixta incluyendo nuevos conductores	5
Figura 1-7. Esquema de una red mixta utilizando los conductores existentes	5
Figura 2-1. Cable de baja tensión unipolar	8
Figura 2-2. Disposición de filamentos en el conductor	8
Figura 2-3. Zanja con cables subterráneos entubados	11
Figura 2-4. Soporte de línea aérea en baja tensión	12
Figura 2-5. Intensidad máxima admisible para conductores de cobre enterrados en condiciones estándar	16
Figura 3-1. Geometría de ambos sistemas dibujada en FEMM	21
Figura 3-2. Evolución de temperatura del cable en el proceso iterativo en condiciones estándar	22
Figura 3-3. Representación del efecto pelicular en un cable	22
Figura 3-4. Mallado de un sistema trifásico en FEMM	24
Figura 3-5. Análisis térmico de los dos sistemas citados anteriormente	25
Figura 4-1. Influencia de circuitos cercanos en la refrigeración de calor	32
Figura 5-1. Posible disposición de cables en una red híbrida.	37
Figura 5-2. Posible disposición de cables en una red híbrida.	40
Figura 5-3. Influencia de los polos DC en el problema térmico	40
Figura 5-4. Posible disposición de cables en una red híbrida.	41
Figura 5-5. Posible disposición de cables en una red híbrida.	43
Figura 5-6 .Cargador SCAME WLL-BX-WRT2	46

1 INTRODUCCIÓN

Con el paso de los años, la realidad del cambio climático no deja de verificarse en el mundo. Aumentos en el nivel del mar, en la temperatura media terrestre, condiciones ambientales extremas y otras grandes consecuencias, dejan claro la necesidad de una rápida y eficaz actuación. Una de las medidas más comunes ha sido los pactos y protocolos entre países para llegar a ciertos objetivos, entre los que se destaca los objetivos del 2030 y 2050, firmado por los países integrantes de la UE. Estos, estipulan ciertos objetivos referentes a energías renovables, eficiencia energética y reducción de gases de efecto invernadero, entre otros. Especificando en este último, los objetivos del 2030 marcan una reducción de gases de efecto invernadero de un 40 % respecto 1990; y, para el 2050, una reducción de un 80 %, también respecto 1990.

La situación de España respecto ante esta situación significa tener que cambiar su huella de carbono de 329 MtCO₂ a 88 MtCO₂ y 14 MtCO₂ en 2030 y 2050, respectivamente.

En la ayuda para cumplir estos convenios europeos, el sector transporte juega un papel fundamental, siendo la actividad con mayor volumen de GEI y, adicionalmente, siendo la actividad con menor disminución de gases contaminantes en estos últimos 15 años, con una reducción de un 8 %, insuficiente para llegar a las metas de 2030 y 2050, mientras que la generación de energía eléctrica y la industria alcanzan una disminución de un 31% y 32 %, respectivamente. [1]

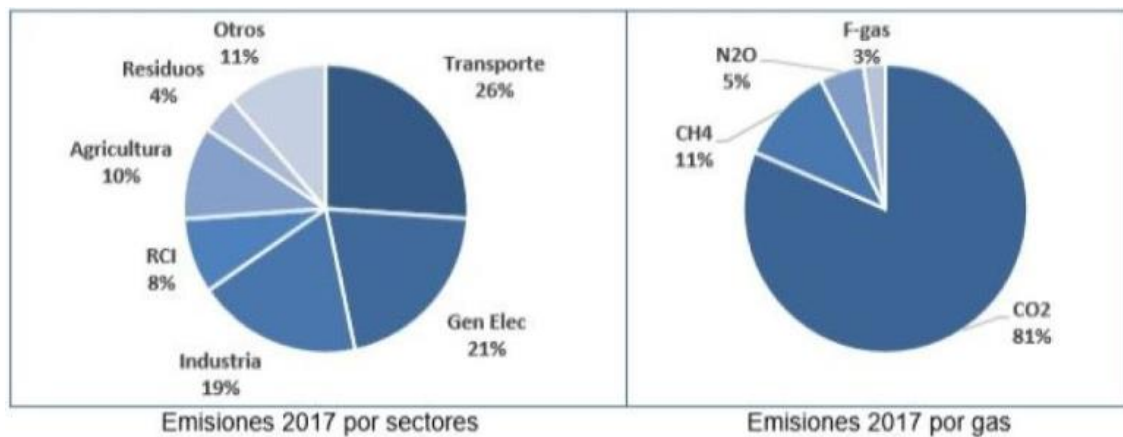


Figura 1-1 Porcentaje de emisiones de GEI según sectores (España 2017)

Como se puede apreciar en la figura 1-1 [2], el transporte es el principal sector de emisiones GEI en España.

En el 2014, el transporte alcanzo un nivel de emisiones de dióxido de carbono de 80 MtCO₂, además de una abultada generación de gases contaminantes como NO_x, SO_x, y CO. Esta situación garantiza la necesidad de buscar una forma alternativa de bajo nivel de emisiones GEI para el transporte, tanto de mercancías como de pasajeros, para poder cumplir los objetivos de 2030 y 2050.

Se estima que, para 2030, un 25 % de los automóviles en circulación debe de ser eléctrico, y de un 90 % para el 2050. Esta electrificación también se debe de dar en el sector del transporte de mercancías, mediante el uso de camiones y ferrocarriles electrificados, aunque esta tecnología no está tan avanzada como la del automóvil.

Poco a poco, la idea de coches de combustión interna, privados y conducidos por una persona va desplazándose a coches eléctricos inteligentes, limpios y cada vez más económicos. Para 2030 y 2050, se espera unos 6 y 24 millones de vehículos eléctricos en España.

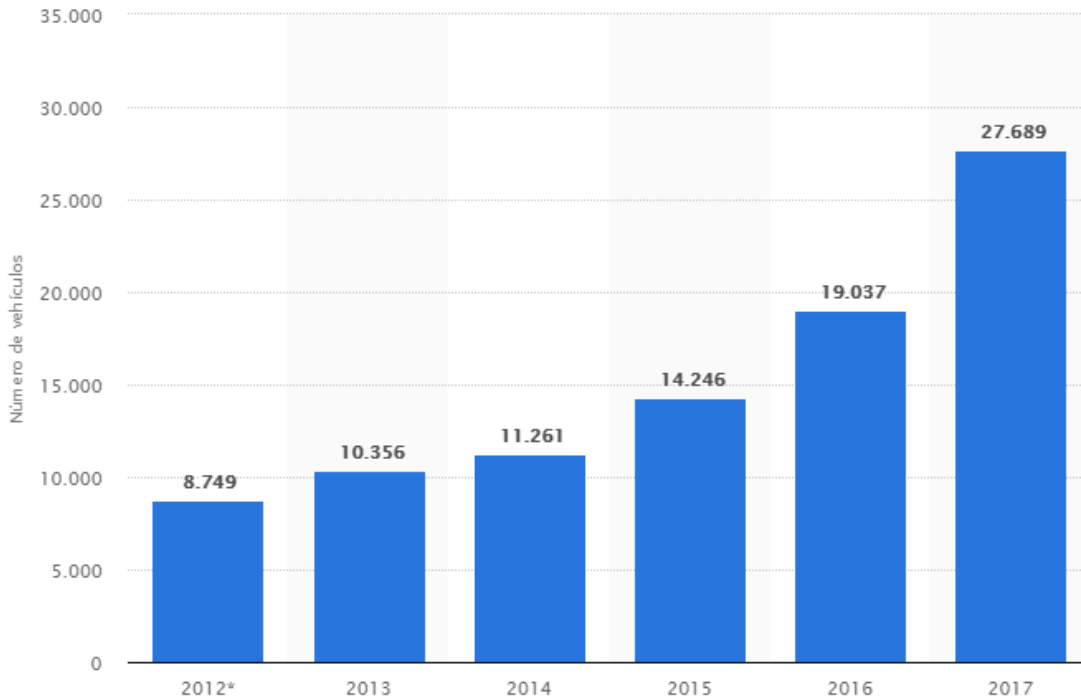


Figura 1-2 Número de vehículos eléctricos en España desde 2012 a 2017

Como se ve en la figura 1-2 [3], aunque la tendencia respecto al número de vehículos eléctricos es positiva, el cambio debe de ser mucho mayor. Lejos está los 27689 vehículos que había en 2017 de los 6 y 24 millones que se espera para 2030 y 2050, respectivamente

No se puede negar que la movilidad eléctrica cambiara muchos aspectos de la red eléctrica convencional, como la curva de demanda, dándose ahora consumos mucho más altos en los horarios nocturnos donde se tiene previsto una abultada carga debido a las recargas de los vehículos. La red eléctrica sufrirá un cambio importante, teniendo que soportar una mayor cantidad de dispositivos conectados con un alto consumo eléctrico y, por tanto, sería consecuente el adaptar la red a este gran cambio.

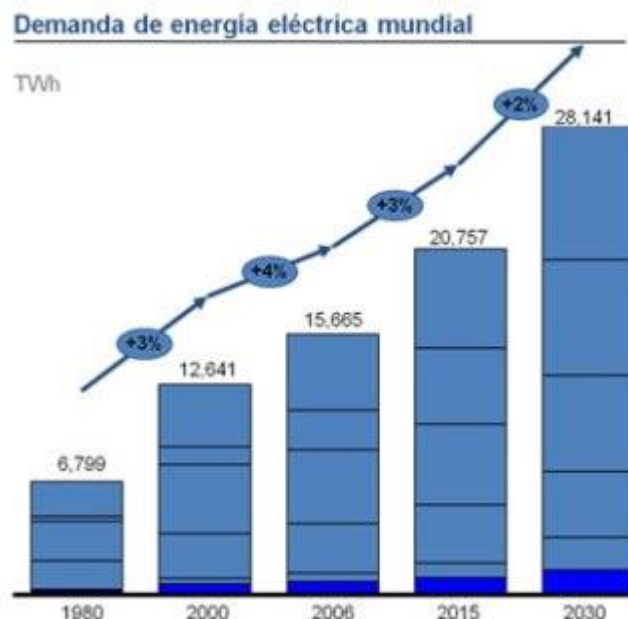


Figura 1-3 Previsión de la demanda de energía eléctrica mundial

En la figura 1-3, se puede observar ese aumento de demanda eléctrica que las redes de todo el mundo tendrán que soportar.

El futuro de la red eléctrica, además del impacto de la movilidad eléctrica, va a estar muy caracterizado por un cambio en los consumidores desde un carácter pasivo a un carácter activo, donde los clientes serán consumidores y productores, mediante el uso de placas fotovoltaicas y sistemas de almacenamiento. IRENA prevé un aumento de potencia instalada, en sistema de almacenamiento, desde 1 GW a 250 GW en 2030. [4]

Por tanto, con el paso de los años, se espera que el consumo energético individual del ciudadano medio aumente cuantitativamente, además de una fuerte dependencia mundial del recurso eléctrico y una reducción en su consumo basado en combustibles fósiles.

Dentro de este contexto descrito, es innegable el impacto en la red eléctrica en estos próximos años donde se puede destacar una red de baja tensión que tendrá que abastecer un gran consumo eléctrico, tanto diurno como nocturno, con ciertas consecuencias en dicha red:

- Aumento de la carga de la red.
- Caídas de tensión adicionales
- Aumento de las pérdidas
- Disminución de la vida útil de activos
- Aumento de los niveles de desequilibrio: Cargadores monofásicos
- Empeoramiento de la calidad de suministro debido a un aumento en la distorsión armónica

Todos estos problemas hacen ver la necesidad de estrategias adecuadas para integrar y gestionar una de las principales fuentes de este futuro consumo: la recarga de vehículos. Algunas de las estrategias que se podrían aplicar para este caso son [5]:

- Refuerzos clásicos de la red. Se podría instalar nuevos transformadores MT/BT y líneas de baja tensión que sirvan como refuerzo a las actuales. Es una solución algo complicada de aplicar en ciudades, donde el espacio es reducido.
- Localización óptima de estaciones de recarga. Con un estudio y planificación sobre este aspecto, se conseguiría minimizar costes de inversión y explotación, como, por ejemplo, una reducción en pérdidas eléctricas; además de ser un pilar fundamental en el concepto de las “Smart cities”.
- Control de carga del vehículo. Usar el parque de vehículos eléctricos como apoyo en la red actuando como consumidores y productores.
- Nuevos sistemas. Ante los grandes cambios, es necesario pensar en nuevos sistemas de organización y nuevas tecnologías que no haga quedar a el sistema obsoleto. En este aspecto se fundamenta la realización de este proyecto.

Sumado al control en las nuevas cargas consumidoras de energía que surgirán en el futuro, también se ha de adoptar una posición de ahorro energético global, buscando así reducir la demanda energética actual que, con una tendencia creciente, se estima que llegue a valores de 29000 tWh en 2030.

En la realización de este trabajo fin de grado, es interesante destacar el papel del sector residencia, siendo uno de los mayores consumidores de la red eléctrica. Este hecho, se puede apreciar en la figura 1-4 donde el sector residencial alcanza valores parecidos a los sectores industriales y terciarios. [6]

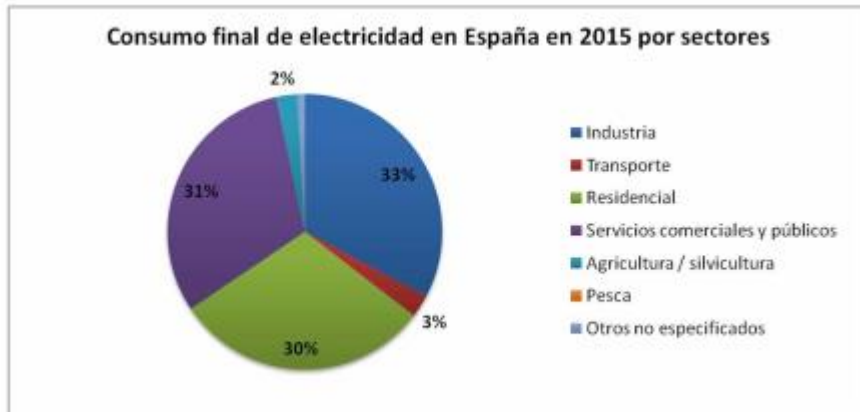


Figura 1-4. Desglose por sectores del consumo eléctrico español

Este elevado uso energético por parte residencial ha sido uno de los motivos por el que se ha comenzado a buscar nuevas tecnologías y métodos para sacar partido del gran potencial de mejora que posee dicho sector. Un correcto plan de ahorro doméstico en todos los hogares del sector causaría una disminución considerable de la demanda, que significaría una posición más cómoda para el país respecto los objetivos del 2030 y 2050 ya comentados anteriormente.

A la hora de abordar un procedimiento de ahorro de energía, el primer paso que se ha de realizar es abordar los elementos que tienen mayor consumo. En la figura 1-5, expuesta a continuación, se observa los consumos de los diferentes sistemas que se puede encontrar en un hogar ubicado en Madrid según el IDAE.

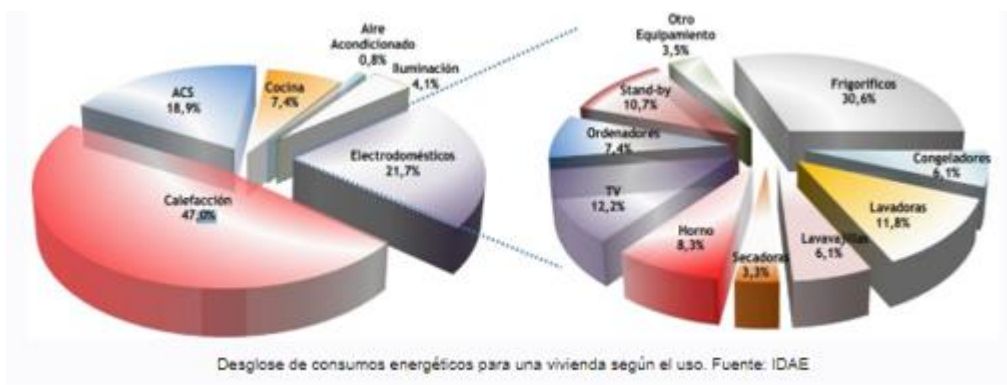


Figura 1-5. Desglose del consumo energético residencial según el uso

En dicha ilustración, se destaca el gran aporte al consumo residencial de los sistemas de climatización que llegan a ocupar casi un 50 por ciento. En segundo lugar, se encuentran los electrodomésticos, seguido por los sistemas de agua caliente sanitaria. [7]

Estos elementos del hogar deben de ser el punto de partida en el ahorro energético residencial, con el fin de disminuir la demanda eléctrica, y reducir así el peso en la red eléctrica.

Es innegable que una gran cantidad de dispositivos conectados a la red de baja tensión se puedan alimentar directamente con corriente continua, por lo que surge la idea de que una red de baja tensión de corriente alterna trifásica puede llegar a no ser la manera más eficiente.

Con el objetivo de sacarle el máximo provecho a la red eléctrica actual, aparecen nuevas ideas con las que poder hacer frente a un futuro donde habrá un cambio energético importante. En este documento se tratará y estudiará la posibilidad de una red de baja tensión híbrida en donde la corriente alterna (AC) y corriente continua (DC) coexistan para intentar llevar el máximo de potencia.

A demás de las ventajas eléctricas que se espera de este sistema, se destaca una reducción en costes de productos electrónicos, una mejor calidad de onda en AC y una gran posibilidad de eficiencia eléctrica en los sistemas fotovoltaicos con almacenamiento.

Esta idea es aplicable desde diferentes puntos de vista: [8]

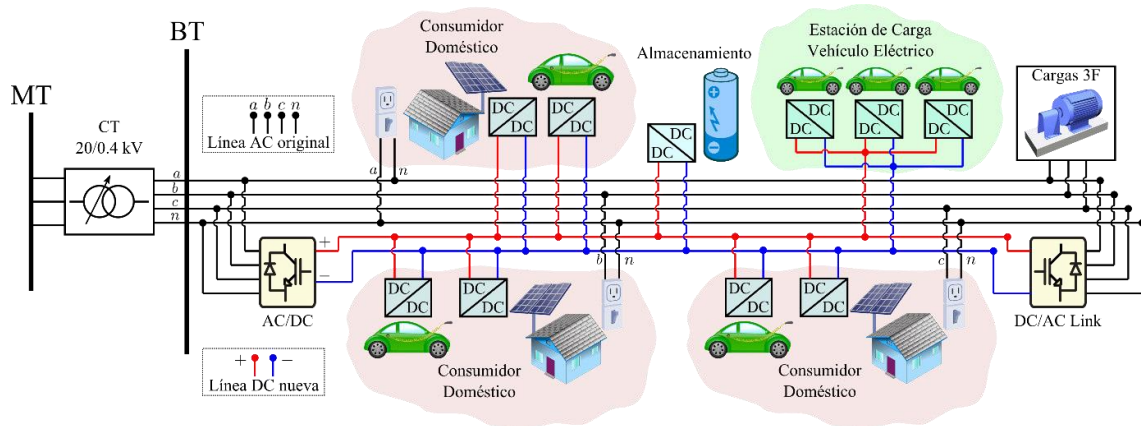


Figura 1-6. Esquema de una red mixta incluyendo nuevos conductores

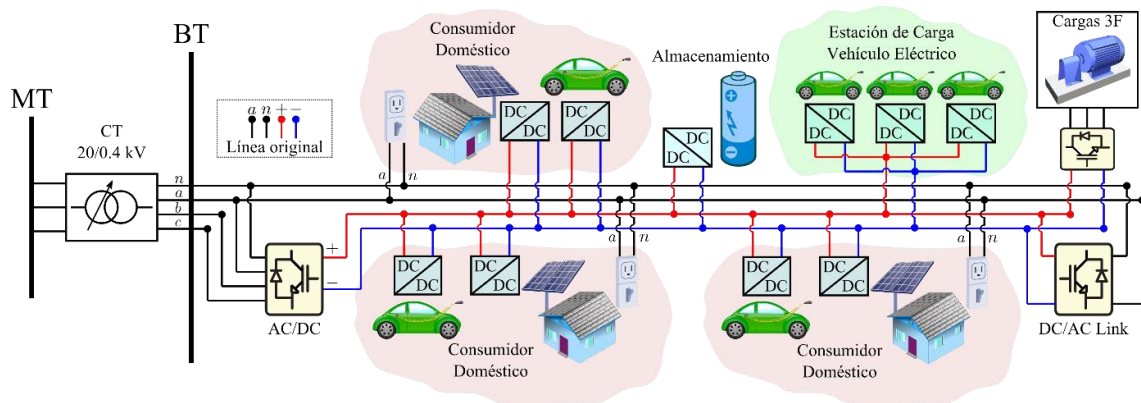


Figura 1-7. Esquema de una red mixta utilizando los conductores existentes

Estas dos propuestas se mueven entre dos maneras de ejecutar el proyecto.

El esquema representado por la figura 1-6 hay una mayor complejidad, que, con un control del sistema, se espera sacar unos mejores resultados de esta tecnología, aunque lo haría con un coste mayor. En cambio, el sistema de la figura 1-7, se priorizaría en una reducción de costes y equipos electrónicos, habiendo así una reducción de prestaciones. Este debate entre coste y control será muy importante a la hora de ejecutar el sistema, pues, además del tipo de esquema que se vaya a usar, será muy importante en la elección de los convertidores AC/DC, DC/DC y DC/AC, que juegan un papel fundamental en esta tecnología. Estos, pueden ser controlados o no controlados.

Los convertidores controlados se basan en transistores IGBTs, que permiten un mayor control del sistema, lo que se traduce en mejores prestaciones. Mientras que los no controlados, basados en diodos, sacrifican control por una reducción en el coste. La potencia, tensiones y otros parámetros de estos dispositivos variaran según la aplicación a la que se vaya a aplicar esta tecnología.

El objetivo principal del uso de la tecnología mixta AC/DC en una red eléctrica es maximizar la potencia que circula por un cable sin realizar ninguna modificación estructural en él. Esto significa un mayor

aprovechamiento del sistema, pues por el mismo cable se podría llevar más potencia, además de ser un elemento de apoyo para la descongestión de la red o para el uso de las “smarts cities”.

Este proyecto estudiará la viabilidad de esta tecnología desde un punto de vista térmico, siendo aplicada a una línea de baja tensión.

Aunque este trabajo fin de grado este proyectado en dichas líneas, el uso de redes mixtas AC/DC no se limita solo a baja tensión. Para su viabilidad térmica en otras aplicaciones como líneas de alta o media tensión, sería necesario hacer algunas modificaciones en la simulación, pues la tipología y propiedades de un cable para alta tensión no son las mismas que en un cable de baja tensión.

Con algunas modificaciones dependiendo de la aplicación, este proyecto fin de grado permitirá averiguar las condiciones térmicas de cualquier sistema, con cualquier intensidad aportada y en cualquier condición. Este hecho es de gran utilidad en esta nueva tecnología y donde no existe mucha información sobre ella.

El proyecto que se está realizando viene inspirado de un proyecto nacional, en el cual se recoge una serie de actividades a realizar. Entre ellas, sale la necesidad de ejecutar un análisis térmico del sistema para que, a la hora de realizar el criterio térmico para la elección del cableado, se escoja con certeza el tipo y sección de cable sin ningún problema térmico en su uso. Este análisis será realizado mediante un programa de simulación basado en el método de elementos finitos llamado “FEMM”.

A demás de esto, se analizará las mejores condiciones de trabajo del sistema, con el fin de alcanzar la máxima potencia en el transporte eléctrico, y su posterior aplicación al sector doméstico del futuro.

2 MODELADO TÉRMICO

En este capítulo, se evaluará los diferentes aspectos que determinan un análisis térmico en un cable eléctrico. Para ello, se comenzará con una profundización en el sistema que se está tratando, diferenciando las partes que lo componen, tipos y las diferentes disposiciones que puede adoptar un cable en una línea eléctrica.

Posteriormente, se explicará los diferentes intercambios de calor que sufre el cableado en su operación, tanto su generación de calor como los diversos flujos de calor con el ambiente que lo rodea. Con todo lo anteriormente explicado, se procede a exponer el criterio térmico actual para la elección de un cable, resaltando su problemática y concluyendo en la necesidad de otro razonamiento para realizar el problema térmico.

2.1 Clasificación

Atiendo al voltaje aplicado a un cable eléctrico, este puede ser:

- Muy baja tensión: Menos de 50 V.
- Baja tensión. Hasta 1000 V.
- Media tensión. Entre 1 kV y 50 kV.
- Alta tensión. Más de 50 kV

Debido a que el proyecto nacional de redes mixtas DC/AC [8], del cual se ve motivado este documento, es aplicado a una línea de baja tensión, a continuación, se detallará en profundidad algunos detalles sobre un cable de baja tensión. [9]

2.2 Estructura

El cable es el sistema que se encarga de un correcto y eficiente transporte de energía eléctrica de un punto a otro. En este elemento se basa la tecnología del mundo actual, permitiendo que la energía eléctrica producida en las centrales eléctricas sea transportada a consumidores a grandes distancias, permitiendo satisfacer su demanda eléctrica.

Un cable de baja tensión se compone principalmente de un elemento conductor y de un material de aislamiento a modo de protección, aunque hay variantes en las que, algunos cables diseñados para aplicaciones específicas pueden tener otros elementos como cubiertas. Dicho esquema queda reflejado en la figura 2-1, donde se puede ver un cable unipolar de baja tensión [10].



Figura 2-1. Cable de baja tensión unipolar

Los elementos que forman dicho cable tienen diferentes propiedades y funciones, y es por ello por lo que se debe de realizar un análisis más profundo en ellos.

2.1.1 Conductor

Es el encargado de llevar la corriente a través del cable. Está alojado en el seno del cable y, comúnmente, tiene una estructura circular dividida en dos zonas bien diferenciadas: una de acero y otra de un metal o aleación altamente conductivo. Esta disposición es reflejada en la figura 2-2, donde se puede observar una zona de acero en el centro del sistema y, alrededor de este, varios cables de conductor. Esta alma de acero se coloca para tensionar el cableado a la hora del montaje, cuestión necesaria en el momento de la instalación.

Dependiendo de la aplicación, el conductor puede o no llevar dicha alma de acero que en ciertas ocasiones no es beneficioso pues incrementa en cierta medida las pérdidas eléctricas, aunque, por otro lado, el efecto corona del cable hace que el efecto de colocar el alma no sea tan relevante. [11]

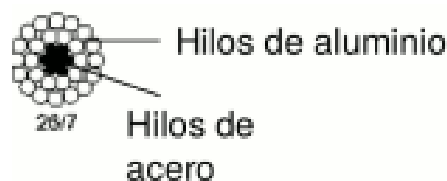


Figura 2-2. Disposición de filamentos en el conductor

El efecto corona es un fenómeno que se da al introducir cierta intensidad por un cable. Los electrones que circulan por el cable tienden a circular por el exterior de este debido a una ionización del aire exterior, haciendo que en el interior del conductor haya menos densidad de electrones. Este efecto se incrementa a medida que se aumenta la tensión. [12]

En aplicaciones subterráneas, el alma de acero se elimina pues las necesidades estructurales de añadir este elemento desaparecen, dejando paso a sistemas donde el alma de acero se sustituye por cables de fibra óptica o más material metálico conductor.

El material metálico conductor puede ser:

- Cobre recocido. Es el material más usado. Para este análisis térmico, se puede destacar una conductividad térmica de $390 \frac{W}{m \cdot K}$

- Aluminio. Junto con el cobre, son los dos materiales más usados. Tiene una conductividad térmica de $210 \frac{W}{m \cdot K}$
- Almelec. Aleación de aluminio con pequeñas proporciones de magnesio y silicio. Su conductividad térmica se aproxima a unos $225 \frac{W}{m \cdot K}$
- Otros. Materiales como plomo y acero pueden llegar a ser usados para esta finalidad, aunque no son muy comunes

2.1.2 Aislante

Los materiales más usados en este aspecto suelen ser a base de materiales plásticos. Pueden ser:

- Termoplásticos. Tienen una resistencia al calor baja, reblandeciéndose con el calor. Se destaca el policloruro de vinilo (PVC) o el polietileno (PE)
- Termoestables. No funden al subir la temperatura. Los más usados en este aspecto son el etileno propileno (HEPR) y el polietileno reticulado (XLPE)
- Otros. Materiales a base de siliconas y plásticos resistentes a altas temperaturas.

En años atrás, un tipo de aislamiento muy usado consistía en papel impregnado en aceite que se adhería al conductor desnudo. Se ha dejado de usar pues las pérdidas eléctricas de este sistema son más elevadas que un aislamiento plástico.

2.1.3 Cubierta

Respecto a la cubierta, se encarga de proteger al cable de efectos atmosféricos que puedan afectar a la vida útil del dispositivo. Además, dota de protección ante daños mecánicos. Principalmente, están fabricadas con diferentes tipos de plásticos:

- Policloruro de vinilo (PVC)
- Polietileno (PE)
- Poliolefina
- Otros materiales menos usados, como neopreno o hypalon.

2.3 Pérdidas Térmicas

En un cable, al pasar una cierta intensidad por él, aparece un término de pérdidas eléctricas que se va a convertir en pérdidas térmicas, llamadas pérdidas Joule. Estas, hacen que el dispositivo se caliente y su temperatura vaya aumentando. Se puede definir las pérdidas Joule mediante la ecuación:

$$P_{Joule} = R \cdot I^2$$

Siendo:

- Pérdidas Joule, expresadas en vatios.
- R la resistencia térmica del cable a dicha temperatura, expresada en ohmios.
- I la intensidad que recorre en cable, expresada en amperios.

Un cable eléctrico tiene una temperatura de operación máxima que, si es superada, pone en alto riesgo su vida útil. Su temperatura máxima dependerá del tipo de aislamiento que lo recubra siendo los más comunes:

Tabla 2-1. Temperaturas máximas de operación según aislamiento

Material	Temperatura de operación máxima
PVC	70 °C
XLPE	90 °C
HEPR	105 °C

2.4 Disposiciones

La disposición de cables es un aspecto muy importante para la realización del problema térmico pues, dependiendo de las condiciones en las que se encuentre el sistema, tendrá diferentes intercambios de calor, que influirán en el criterio térmico del sistema

Una línea de baja tensión, a la que esta aplicada este proyecto, puede desarrollarse de las siguientes formas:

2.4.1 Directamente enterrados

La instalación comienza con una excavación de una zanja donde se aloja el cableado a una profundidad de menos de un metro, generalmente. El cableado tendrá que tener elementos que sirvan como protección ante humedades y otros factores. La zanja es diseñada para poder reabrirse sin problemas en caso de futuras instalaciones.

En algunas aplicaciones de una alta tensión se coloca una cinta de advertencia a unos 25 cm de profundidad para indicar la existencia de dichos cables.

2.4.2 Bajo tubo

Al igual que anteriormente, se cava una zanja que alojara al cableado, pero , esta vez , entubado. Este tubo dota al cable de mejores resistencias a la humedad, agentes externos y esfuerzos, pero lo penaliza en cuestiones de potencia debido a una reducción en la intensidad conducida por el cable, al dificultar la liberación de calor hacia el exterior. Dependiendo del sistema que se esté trabajando, se escogerá un cable entubado o no.

En la figura 2-3 se puede ver una esquematización de un cable eléctrico de baja tensión en una zanja. Dentro de esta, se suele introducir otros cableados como fibra óptica u otros. [13]

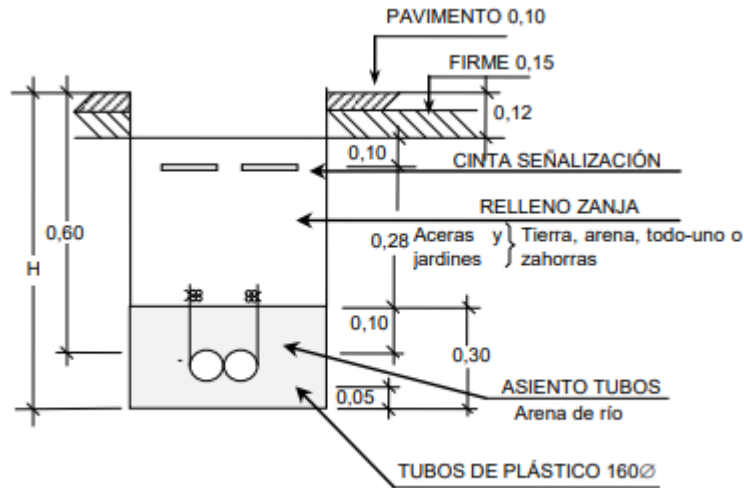


Figura 2-3. Zanja con cables subterráneos entubados

2.4.3 Línea Aérea

En este caso, la disposición de cables es totalmente distinta. El cable de baja tensión va desde un centro de transformación MT/BT hasta la acometida eléctrica del usuario. Esta disposición se da gracias a unos soportes metálicos que sujetan al sistema en el aire. Estos soportes son llamados postes y tiene los siguientes elementos en su estructura:

- Conductores. Estos llevan la electricidad a lo largo de la línea.
- Aisladores. Evitan pérdidas eléctricas entre uniones. Tienen forma de campana y pueden estar hechos de vidrio, cerámica, plásticos o, en algunos casos, metálicos.
- Apoyos. Como el fuste o la cruceta.
- Auxiliares. Dentro de este grupo se engloba a elementos como pararrayos u otros.

Un poste eléctrico puede ser de varios tipos según el material con el que este realizado. Se destaca:

- Metálicos
- Hormigón
- Madera. Aplicaciones eventuales, no permanentes

En la figura 2-4 se puede observar un ejemplo de un poste metálico que transporta corriente a baja tensión. [14].



Figura 2-4. Soporte de línea aérea en baja tensión

Las distribuciones de cables más seguidas en este sistema son en tresbolillo o en bandera. [15]

Térmicamente hablando, este sistema es totalmente distinto a los anteriormente descritos pues la evacuación de calor se realiza hacia el exterior a través de un proceso convectivo entre la cubierta, zona más externa del cable, y el aire a temperatura ambiente.

2.5 Mecanismos de transferencia de calor

Según la disposición del cableado, este tendrá diferentes mecánicas de transmisión de calor con su entorno. Las tres formas de intercambio de calor existentes son:

2.5.1 Conducción

Transferencia de calor por contacto directo. Si los sistemas en contacto son líquido y sólido, habría conducción cuando el fluido este en reposo. Es el único mecanismo de transmisión de calor de sistemas opacos.

Se rige por la ley de Fourier que, matemáticamente, se representa:

$$q_{cond} = -K \cdot \nabla T$$

Siendo:

- q_{cond} : Flujo de calor intercambiado por conducción por metro cuadrado. Se expresa en $\frac{W}{m^2}$.
- K: conductividad térmica. Expresa la facilidad que tiene el calor para ser transferido. Se mide en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. Los conductores tienen una alta K, al contrario que los materiales aislantes. Aunque la conductividad varía con la temperatura, este efecto no se tendrá en cuenta en el modelado.
- ∇T : Gradiente de temperaturas. Se expresa en $\frac{K}{m}$.

El signo negativo indica que el flujo de calor (q) se transfiere en dirección de la temperatura decreciente.

Esta forma de transmisión cobra gran importancia en cables enterrados donde evacua el calor a el suelo que

actúa como foco frío.

Este mecanismo es fundamental en el uso del cable. A través de este, se realiza una refrigeración del conductor, que está a una alta temperatura, hacia el exterior, de menor temperatura. Gracias a esto, se consigue no llegar a una alta temperatura que pueda afectar a las prestaciones del cable.

2.5.2 Convección

Se realiza entre dos fluidos en movimiento y en contacto. Se rige por la ley de Newton:

$$q_{conv} = h \cdot (T_1 - T_2)$$

Siendo:

- q_{conv} : Flujo de calor intercambiado por convección por metro cuadrado. Su unidad es $\frac{W}{m^2}$.
- h : Coeficiente de película. Se expresa en $\frac{W}{m^2 \cdot K}$.
- T_1 : Temperatura del fluido a mayor temperatura. Se expresa en K.
- T_2 : Temperatura, en K, de un cuerpo a menor temperatura. En este caso, es la temperatura ambiental que se puede representar como T_{∞} .

Los problemas convectivos, es decir, donde la convección juega un papel fundamental en la transmisión de calor, son problemas complejos debido a la dificultad de calcular el parámetro de coeficiente de película. Para ello, hay que realizar estudios analíticos, numéricos, experimentales y/o analógicos, consiguiendo así un valor con cierta exactitud. [16]

Los problemas convectivos se clasifican:

- Según origen de movimiento: Forzada o libre.
- Según el régimen de flujo: Laminar o turbulento.
- Según el confinamiento: Flujo interno o externo.
- Según la naturaleza del proceso. Con cambio de fase o sin cambio de fase

Este mecanismo de transmisión de calor no es muy determinante en líneas subterráneas, pero sí en líneas aéreas donde hace un intercambio de calor convectivo mediante el aire. Este flujo de calor queda caracterizado por el coeficiente de película que varía según las condiciones. Estos son algunos valores típicos de dicho parámetro:

Tabla 2-2. Valores típicos del coeficiente de película

Fluido en contacto con el cable	Coeficiente de película
Aire Libre	$5 \frac{W}{m \cdot K}$
Aire Forzado	$50 \frac{W}{m \cdot K}$

2.5.3 Radiación

Se da entre dos sistemas a diferente temperatura. No necesita que haya contacto, pues la transferencia se produce por el vacío. La ley que caracteriza este procedimiento es la ley de Stefan Boltzmann. Su expresión es la siguiente:

$$q = \sigma \cdot \varepsilon \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Siendo:

- q : Flujo de calor intercambiado por radiación. Se expresa en $\frac{W}{m^2}$.
- δ : Constante de Stefan Boltzmann. Tiene un valor de $5.678 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.
- ε : Emisividad del cuerpo que irradia calor. Se trata de un número adimensional y puede adoptar un valor entre 0 y 1.
- T_1 : Temperatura, en K, de un cuerpo a mayor temperatura.
- T_2 : Temperatura, en K, de un cuerpo a menor temperatura. En este caso, es la temperatura ambiental que se puede representar como T_∞ .

Este efecto no es tan importante en cables subterráneos, pero sí en líneas aéreas donde, el cable, intercambiara calor con todos los elementos que “vea” en el ambiente.

El término de la emisividad se trata de lo parecido que es el cuerpo emisor de calor a un cuerpo negro, cuya emisividad es 1.

El intercambio de calor por radiación de más peso en este sistema es el realizado con el sol, aunque también hay que tener en cuenta el calor irradiado del cable al ambiente.

2.6 Criterio térmico convencional

A la hora de la elección de un cable, se debe de consultar el catálogo del fabricante, u otra fuente fiable, donde se aporte la intensidad de servicio continuo máxima que soporta dicho cable en unas condiciones estándar. Esta intensidad máxima es aquella intensidad que hace que el sistema llegue a la temperatura máxima que soporta el aislamiento que envuelve al conductor, como se puede apreciar en la **figura 1**. Esta intensidad depende de varios factores como:

- Tipo de cable
- Tipo de instalación
- Resistividad del terreno
- Temperatura de terreno y ambiente
- Condiciones ambientales
- Proximidad de otros circuitos
- Disposición del cableado

Las condiciones estándar a la que están expresadas las intensidades máximas admisibles dependen del tipo de línea escogida, aérea o subterránea y del fabricante, que expresa esta intensidad en los parámetros que vea conveniente.

Respecto a líneas aéreas definen un cable en un sistema infinito de aire a temperatura ambiente. En el caso de líneas subterráneas, se definen más parámetros de diseño.

Tabla 2-3. Condiciones estándar según IEC 60364-5-52

Parámetro de diseño	Condiciones estándar
Línea aérea	
Temperatura ambiente	30°C
Línea subterránea	
Temperatura ambiente	20°C
Resistividad del terreno	$2.5 \frac{m \cdot K}{W}$
Circuitos próximos	Ninguno

[17]

Tabla 2-4. Condiciones estándar según PRYSMIAN

Parámetro de diseño	Condiciones estándar
Línea aérea	
Temperatura ambiente	30°C
Línea subterránea	
Temperatura ambiente	20°C
Resistividad del terreno	$2.5 \frac{m \cdot K}{W}$
Circuitos próximos	Ninguno

[18]

Con estas condiciones estándar, el fabricante da una intensidad de servicio continuo máxima por sección que, en caso de ser superada, reduciría la vida útil del cable considerablemente. El valor de dicha intensidad depende proporcionalmente de la sección del cable, secciones mayores se relacionan con intensidades máximas grandes y secciones menores con intensidades pequeñas.

TABLA C.3 - CONDUCTORES DE COBRE

Sección nominal mm ²	Terna de cables unipolares		1 cable trípolar		2 cables unipolares		1 cable bipolar	
	Tipo de aislamiento							
Cobre	A	B	A	B	A	B	A	B
6	72	70	66	64	88	85	90	78
10	96	94	88	85	117	115	107	104
16	125	120	115	110	153	147	140	134
25	160	155	150	140	196	189	183	171
35	190	185	180	175	232	226	220	214
50	230	225	215	205	281	275	263	251
70	280	270	260	250	343	330	318	306
95	335	325	310	305	410	398	374	373
120	380	375	355	350	465	459	434	428
150	425	415	400	390	520	508	490	477
185	480	470	450	440	588	575	551	539
240	550	540	520	505	673	661	637	618
300	620	610	590	565	759	747	722	692
400	705	690	665	645	863	845	814	79

Figura 2-5. Intensidad máxima admisible para conductores de cobre enterrados en condiciones estándar

[18]

En el caso que la corriente de diseño sea mayor que la corriente máxima admisible, se debe de incrementar la sección hasta que:

$$I_{diseño} > I_{max\ admisible}$$

Este es el procedimiento que se ha de realizar cuando las condiciones estándar coinciden con las condiciones de diseño, cosa muy improbable. Cuando no coincidan las condiciones, se aplican factores correctores.

$$I_{max\ admisible\ real} = I_{max\ admisible\ tabulada} \cdot F_1 \cdot \dots \cdot F_n$$

Los factores correctores existentes son:

- Temperatura ambiente: Se da cuando la temperatura es distinta a la estándar. Si la temperatura ambiente es mayor que la de condiciones estándar, el factor corrector será menor que la unidad, pues hay una mayor dificultad para evacuar el calor. Por ejemplo, una línea aérea donde el cable es refrigerado por interacción cubierta y aire se rige por la siguiente fórmula convectiva, en la que los términos que aparecen ya están explicados anteriormente:

$$q_{conv} = h \cdot (T_1 - T_{\infty})$$

Al aumentar la temperatura ambiente (T_{∞}), el flujo de calor convectivo es menor y, por tanto, la refrigeración decrece.

Aunque los valores de dicho factor están tabulados, se puede aproximar matemáticamente:

$$F = \sqrt{\frac{T_{max} - T_{amb}}{T_{max} - 40}}$$

Siendo:

- F: factor corrector por temperatura.
- T_{max}: temperatura máxima que soporta el cable.
- T_{amb}: temperatura ambiente a la que se quiere calcular el parámetro.

- Bajo tubo. Cuando una terna de cable es entubada, sus propiedades ante esfuerzos o agentes externos son mejores que anteriormente. En cambio, su refrigeración se ve penalizada al introducirse en un tubo de baja conductividad que deja pasar el calor en menor medida. Por ello, el factor corrector por ir bajo tubo es menor que la unidad, más concretamente, de un valor de 0.8. [18]
- Exposición al sol. Cuando un sistema es irradiado por el sol, hay un intercambio de calor por radiación desde el sol, foco caliente, hacia el sistema, que actúa como foco frío. Este hecho hace que la intensidad que pueda llevar el cable sea menor pues ha tenido ganancias energéticas adversas. Cuando un cable está expuesto al sol, se le aplica un factor corrector de 0.8
- Resistividad del terreno. Este parámetro evalúa la resistencia del terreno a la evacuación de calor. Se expresa, en unidades de sistema internacional, en $\frac{K \cdot m}{W}$.

Dependiendo del tipo de suelo que confina al cable, el valor de la resistividad varía siendo mayor para terrenos de piedras y rocas; y menor para terrenos húmedos. Esta tendencia es apreciable en la tabla 2-5 donde se puede ver algunos valores típicos de este parámetro dependiendo de la naturaleza del terreno. [19]

El valor de resistividad estándar es de 2.5, que va asociada a un terreno de piedra caliza.

Tabla 2-5. Aproximación de la resistividad térmica del terreno dependiendo de su naturaleza

Resistividad del terreno ($\frac{K \cdot m}{W}$)	Naturaleza del terreno
0.4	Inundado
0.5	Muy Húmedo
0.7	Húmedo
0.85	Poco húmedo
1	Seco
1.2	Arcilloso muy seco
1.5	Arenoso muy seco
2	De piedra arenisca
2.5	De piedra caliza
3	De piedra granítica

Estos valores son puramente orientativos. A la hora de realizar el diseño de una instalación eléctrica es consecuente el cálculo de la resistividad del terreno que alojará al cableado.

En términos de capacidad de transporte, no conviene una elevada resistividad del terreno, pues dificulta la refrigeración del cableado. Esto explica por qué a valores de resistividad térmica del terreno mayores que la estándar, el factor corrector es menor a la unidad y, al contrario, para valores de resistividad menores, el parámetro corrector sea mayor a la unidad.

- Proximidad de circuitos. Cuando dos cables están conduciendo una cierta intensidad generan un calor que será transmitido mutuamente. Este flujo de calor hace que la capacidad de transporte de ambos

cables sea menor dependiendo de la proximidad entre los sistemas, que influye drásticamente en el valor del corrector. A distancias cortas entre conductores hay un mayor intercambio de calor, haciendo que el factor corrector de proximidad sea de un valor más pequeño que en cables más distanciados.

De lo anteriormente descrito, se explica que el factor corrector de proximidad de circuitos solo pueda ser menor o igual a la unidad, siendo igual para circuitos muy distanciados donde la interacción térmica entre ellos es nula.

A la hora de realizar una instalación eléctrica, se debe de tener en cuenta todos los factores que puedan hacer variar el valor de las intensidades admisibles pues, en caso contrario, puede derivar en elevadas pérdidas económicas que pueden llevar a la ruina un proyecto, o incluso una empresa. Buen ejemplo de esto se puede observar en la tabla 2-6, donde se aprecia un presupuesto de una instalación eléctrica realizada en asignaturas anteriores. [19]

Tabla 2-6. Presupuesto de una instalación eléctrica

Capítulo	Importe
Luminaria y tomas	5962,69 €
Cableado	10197,60 €
Protecciones	3401,14 €
Transformadores y otros	28041,11 €

Debido a esta necesidad de ser preciso y correcto en el dimensionamiento del cableado, se realiza este trabajo de fin de grado, siendo aplicado al proyecto nacional de redes mixtas AC/DC.

3 METODOLOGÍA

La realización de un análisis térmico es un proceso complicado y laborioso debido a la cantidad de factores que intervienen en él. El objetivo de realizarlo de una manera precisa y exacta establece un cierto grado de complejidad que puede incrementarse si se realiza con ecuaciones realizadas manualmente por una persona. La metodología seguida en el proyecto consistirá en una serie de simulaciones computacionales, comprobando la veracidad de los resultados y posteriormente, su aplicación al proyecto nacional de redes mixtas.

No obstante, esto no significa que no se deba realizar ningún cálculo teórico manualmente. Tras las simulaciones realizadas en cualquier programa informático, se debe de validar el resultado obtenido pues en caso de algún fallo en los cálculos, las responsabilidades caerían sobre el ingeniero que ha realizado la instalación.

Por lo tanto, tras las simulaciones realizadas por ordenador, sería necesario un análisis manual con ecuaciones teóricas que acompañen a dichas simulaciones. En este documento, recogerá los cálculos realizados computacionalmente mediante el método de elementos finitos por el programa “FEMM” y su posterior aplicación AC/DC.

3.1 FEMM

El programa “FEMM” se fundamenta en el método de elementos finitos. Este, consiste en un método numérico que permite resolver ecuaciones diferenciales asociadas a un problema sobre geometrías complicadas. [20]

Tiene una gran versatilidad siendo aplicable para casi todos los aspectos de la ingeniería pudiendo resolver problemas:

- Magnéticos
- Electroestáticos
- Eléctricos
- De calor

FEMM se divide así mismo en tres bloques:

- Shell interactivo. Mediante una interfaz tipo CAD, define la geometría del problema a resolver, las propiedades de los materiales implicados y las condiciones de contorno.
- Triangule. Este bloque realiza una parte vital del proceso de elementos finitos diciendo la región en un gran número de triángulos.
- Solvers. dependiendo del tipo de problema escogido, resuelve las ecuaciones diferencias parciales relevantes para obtener valores del dominio de la solución.

3.2 Modelado del problema

A continuación, se procederá a validar la veracidad de los resultados de este programa. Se realizará varias simulaciones de un cable con aislamiento XLPE directamente enterrado en una zanja en determinadas condiciones y viendo cómo, a la intensidad máxima admisible, el conductor debe de llegar a los 90 grados Celsius, temperatura máxima de operación en régimen continuo para dicho cable. El objetivo recae en crear un código informático compatible con FEMM en lenguaje Python donde se redacte la geometría, se definan los materiales y límites; además de certificar su correcta programación haciendo que una intensidad aportada al conductor, que le hace llegar a los 90 grados Celsius, coincida con la intensidad máxima admisible tabulada en la norma IEC 60364-5-52. Este procedimiento se realizará para diferentes condiciones aparte de las estándar.

Los dos sistemas, en los que en un principio se trabajarán, son un modelo de corriente trifásica, formado por tres cables unipolares AL VOLTALENE FLAMEX CPRO, que irán enterrados en una zanja de 2x2 metros en condiciones estándar; y un modelo de corriente continua hecho por dos cables unipolares en las mismas condiciones que el citado anteriormente.

Es importante recalcar la poca importancia térmica del neutro en el sistema trifásico, pues no dificulta la refrigeración del cableado, ni aporta un calor que tenga que ser evacuado. Por ello, inicialmente, el sistema trifásico carecerá de neutro.

Los pasos realizados en dicha simulación son los siguientes:

3.2.1 Dibujo del sistema

En un principio se realizan dos sistemas: dos cables unipolares encargados de llevar corriente continua y tres cables unipolares encargados de llevar corriente alterna trifásica, sin neutro.

Se comienza por dibujar una zanja y el cableado que se compondrá de conductor, aislante y cubierta. Para ello, son necesarios algunas medidas de las cuales algunas se consiguen mediante los catálogos de la empresa, y otras se obtienen matemáticamente:

$$R_{conductor} = \sqrt{\frac{Sección \cdot 10^{-6}}{\pi}}$$

Siendo:

- $R_{conductor}$: indica el radio de la zona más interna del cable, donde reside el conductor encargado de transportar la corriente. Se expresa en metros.
- Sección: Indica los mm^2 de superficie que posee el cable. Se trata de un dato de diseño.

$$Envolvente = R_{ext} - R_{conductor} + Aislante$$

Siendo:

- Envolverte: Cantidad de cubierta que posee el cable.
- R_{ext} : Radio de todo el cable.
- Aislante: Espesor de material aislante que tiene cada cable.

A la hora de introducir estos parámetros en el código, es necesario expresarlos en metros ya que el sistema ha sido diseñado en unidades de sistema internacional. El valor del radio del cable y espesor de aislante son aportados por el fabricante a través de sus catálogos.

Tras estos cálculos, se dibuja la geometría de los dos sistemas que se están realizando: tres cables unipolares para llevar corriente alterna y dos cables unipolares para circular corriente continua, como se puede ver en la figura 3-1.

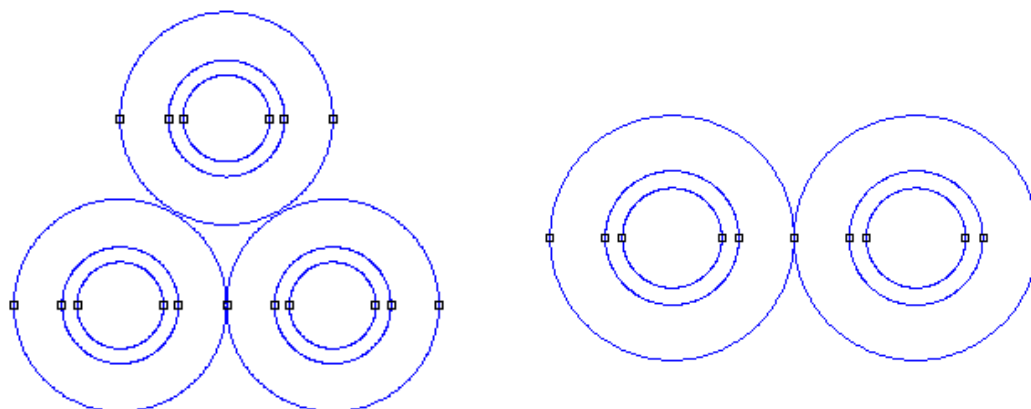


Figura 3-1. Geometría de ambos sistemas dibujada en FEMM

3.2.2 Especificación de los materiales usados

Después de dibujar correctamente nuestros sistemas, por separado, se procede a introducir el material que compone cada zona. Debido a que se está realizando una simulación de flujos de calor, se ha de introducir algunas características térmicas propias de cada material como conductividades térmicas o generaciones de calor. En la siguiente tabla se redacta las propiedades introducidas en el programa de simulación.

Tabla 3-1. Valores típicos del coeficiente de película

Material	Conductividad térmica ($\frac{W}{m \cdot K}$)	Generación de calor ($\frac{W}{m^3}$)
Conductor	210	$\frac{r_{tabulada} \cdot I_{diseño}^2}{\pi \cdot R_{conductor}^3}$
Aislante	0.3	-
Envolvente	0.35	-
Tierra	0.4	-

Respecto a la localización de cada material, el elemento conductor se encuentra en la circunferencia interior del sistema, el aislante en la región entre las dos circunferencias concéntricas de menor tamaño, y la envolvente en la porción de circunferencia que delimita la capa más externa.

Como se puede apreciar en la tabla 3-1, a la hora de introducir las características de los metales aparece un parámetro muy importante en el desarrollo del proyecto: La generación de calor. Es importante tener una exactitud plena en este parámetro, pues todo el sistema realizado se basa en la evacuación de esta energía calorífica producida. Como ya se ha comentado anteriormente, esta generación de calor se basa en las pérdidas por efecto Joule. Estas, son dependiente de la intensidad que circula por el cable y de la resistencia de este. Debido a que la intensidad es un parámetro modificable por el usuario, la precisión en el cálculo de las pérdidas joule recae en la exactitud en el valor de la resistencia del cableado.

Ante esta necesidad, se aprecia una dificultad que afecta considerablemente a la simulación: La dependencia térmica de la resistencia. A temperaturas mayores, el valor de este parámetro es más elevado. Esta dificultad se agrava con el hecho de, en los catálogos aportados por el fabricante, el parámetro de resistencia del cable viene

referido a 20 grados Celsius. Por ello surge la obligación de realizar un proceso iterativo, en el que se comienza con este valor de resistencia aportado por el fabricante, se le introduce un valor de intensidad, y se calcula la temperatura a la que ha llegado el cable en esas condiciones.

Con esta temperatura, se calcula el nuevo valor de la resistencia:

$$r_{Temp} = r_{20^{\circ}C} + (1 + (\alpha \cdot (Temp - 20^{\circ}C)))$$

Siendo:

- r_{Temp} : Resistencia del cable a una temperatura. Se expresa en $\frac{\Omega}{Km}$.
- $r_{20^{\circ}C}$: Resistencia del cable a temperatura 20 °C expresada en $\frac{\Omega}{Km}$.
- Temp: Temperatura a la que se quiera calcular el nuevo valor de la resistencia.
- α : Coeficiente de variación de resistencia específica por temperatura del conductor en Celsius. Su valor depende del material usado en el conductor (0.00393 para el cobre y 0.00407 para el aluminio).

Tras calcular el nuevo valor de la resistencia, se vuelve a ejecutar el procedimiento, realizando así un proceso iterativo hasta que la temperatura del cable calculada no varíe significativamente de la interacción anterior.

En la figura 3-2 se puede apreciar la importancia de un correcto valor de la resistencia del cable, que hace variar los resultados del sistema considerablemente siendo la temperatura del cable en el instante inicial de unos 75 grados Celsius, y tras todo el proceso iterativo, de unos 90 grados Celsius.

```
La temperatura alcanzada es de 77.10071093760183
La temperatura alcanzada es de 87.67134244588493
La temperatura alcanzada es de 89.62455074458381
La temperatura alcanzada es de 89.9854463488598
La temperatura alcanzada es de 90.0521292402521
```

Figura 3-2. Evolución de temperatura del cable en el proceso iterativo en condiciones estándar

Sin embargo, el comportamiento de la resistencia depende de las condiciones en las que se opere, pues no será igual que circule por ella una corriente continua que una corriente alterna. Cuando se aplica una corriente continua a una resistencia, esta transforma la energía eléctrica en calor mediante el efecto joule. En cambio, al hacer pasar corriente alterna, su efecto dependerá de la frecuencia de la fuente. A frecuencias bajas, la resistencia actúa igual que si estuviera circulando corriente continua. A medida que se aumenta la frecuencia de la corriente de alterna, se ha de tener en cuenta los efectos inductivos del cable. Esto explica que, a la hora de analizar el circuito eléctrico, se introduzca una bobina ideal o, en algunos casos, un condensador, asociados en serie a la resistencia. [21]

Otro factor a tener en cuenta es el efecto pelicular o efecto skin. Este efecto, aparece cuando se aporta corriente alterna a un cable, siendo inexistente para corriente continua. Al circular una corriente alterna por el cable, los electrones tienden a circular por la capa más externa del sistema. Este hecho, se puede observar en la figura 3-3 donde se aprecia una predisposición de los electrones, de color rojizo, a ocupar la capa más externa del cable.

[22]

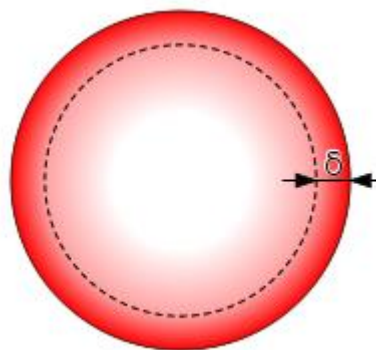


Figura 3-3. Representación del efecto pelicular en un cable

Tanto los efectos inductivos como el efecto pelicular van a ser despreciados en la realización de este proyecto. Esto es debido a la poca importancia en los resultados que tendría estos efectos en la corriente alterna monofásica de la red mixta, además de suponer una simplificación en la simulación ya que sería difícil introducir estos factores en la simulación en FEMM.

3.2.3 Definir los límites del problema

Tras establecer los materiales usados en esta simulación y sus propiedades, se realiza la definición de los límites. FEMM proporciona seis tipos de límites en la simulación de problemas de flujo de calor y son los siguientes:

- Fixed Temperature: La temperatura en el límite está fijada en un valor.
- Heat Flux: Se fija un flujo de calor en el límite. La ecuación matemática que representa este tipo es:

$$k \frac{dT}{dn} + f = 0$$

Siendo:

- F: Flujo de calor prefijado. Se expresa en $\frac{W}{m^2}$
- n: Vector normal al límite. Se expresa en metros
- K: Conductividad térmica. Su unidad es $\frac{W}{m \cdot K}$
- T: Temperatura del foco de calor en K.
- Convection: El límite intercambia calor con un fluido en movimiento. La ecuación por la que rige este límite es:

$$k \frac{dT}{dn} + h(T - T_0) = 0$$

Siendo:

- F: Flujo de calor prefijado. Se expresa en $\frac{W}{m^2}$
- n: Vector normal al límite. Se expresa en metros
- K: Conductividad térmica. Su unidad es $\frac{W}{m \cdot K}$
- T: Temperatura del foco de calor en K.
- h: Coeficiente de película. En este sistema, se escoge un valor típico de aire en convección libre ($5 \frac{W}{m^2 \cdot K}$)
- T_0 : Temperatura ambiente en K.
- Radiation: Realizado por dos cuerpos visibles entre ellos que no están en contacto a diferentes temperaturas. La fórmula usada por FEMM para este límite es:

$$k \frac{dT}{dn} + \varepsilon * \partial * (T^4 - T_0^4) = 0$$

- Siendo:
 - F: Flujo de calor prefijado. Se expresa en $\frac{W}{m^2}$
 - n: Vector normal al límite. Se expresa en metros
 - K: Conductividad térmica. Su unidad es $\frac{W}{m \cdot K}$
 - T: Temperatura del foco de calor en K.
 - ε : Emisividad de la superficie. Es adimensional y acotada entre 0 y 1.
 - ∂ : Constante de Stefan-Boltzmann. Tiene un valor de $\frac{W}{m^2 \cdot K^4}$.
 - T_0 : Temperatura ambiente en K.
- Periodic: Se establece igual los valores del límite en dos puntos distintos.
- Antiperiodic: Se establece valores opuestos del límite en dos puntos distintos.

El sistema con el que se está trabajando tendrá 4 límites en forma cuadrangular simulando a una zanja. Los límites de los laterales e inferior serán “fixed temperature”, con una temperatura fijada como la temperatura del suelo, moldeable por el usuario en los datos de entrada. En cambio, el límite superior será del tipo “Convection” con una temperatura ambiente también requerida en los inputs. [23]

3.2.4 Realizar mallado

El mallado es un paso fundamental en un análisis de elementos finitos. Este procedimiento consiste en la división en triángulos de pequeño tamaño donde se ejecutaría el “solver”. Dependiendo del tamaño de dichas zonas, se obtiene una exactitud concreta. Por ello, se suele realizar un mallado más exhaustivo en regiones donde convergen dos materiales o zonas cercanas a los límites; y un mallado menos concreto en zonas donde no hay variaciones significativas en los parámetros que intervienen en el problema. Esta tendencia se puede apreciar en la figura 3-4.

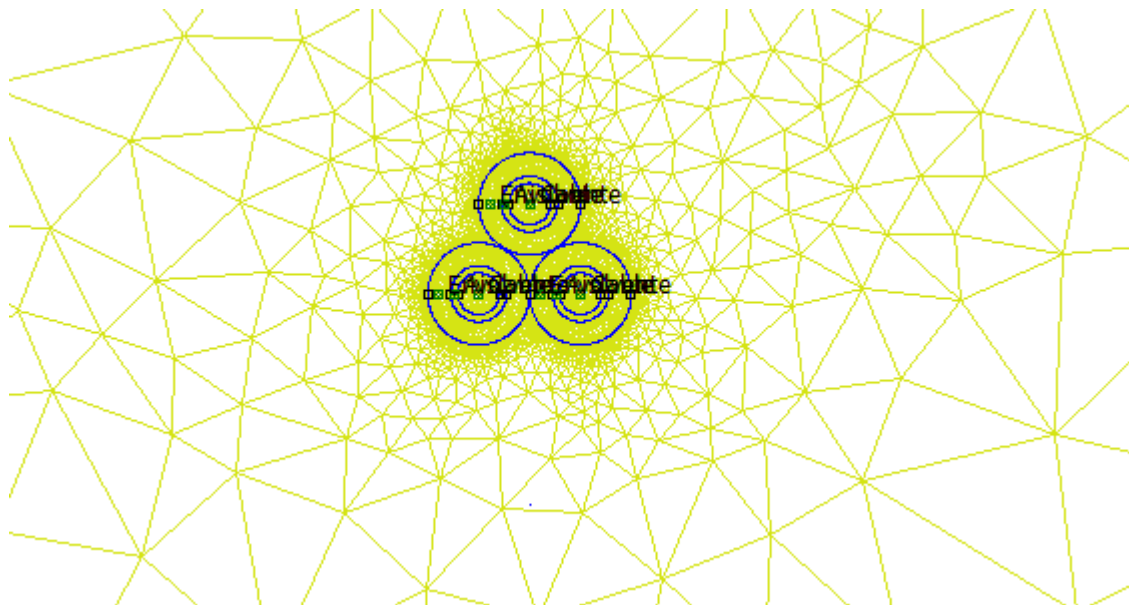


Figura 3-4. Mallado de un sistema trifásico en FEMM

FEMM tiene una opción de realizar un mallado automáticamente. Es una opción más rápida pero que no se amolda perfectamente al problema haciendo que la simulación sea rápida y exacta. En el código que se está realizando, el mallado es automático pues, como ya he dicho anteriormente, es una opción rápida y de una exactitud aceptable para el sistema modelado.

3.2.5 Simulación

Por último, después de realizar el mallado del sistema, se procede a resolver el problema planteado. Dependiendo del tipo de problema, FEMM ejecuta un solver u otro para resolver una serie de ecuaciones diferenciales y dar unos resultados numéricos y gráficos.

La figura 3-5 muestra el análisis térmico en los dos sistemas trabajados, hasta ahora, siendo dos cables unipolares transportando continua en la parte derecha y tres cables unipolares conduciendo alterna trifásica en la parte izquierda.



Figura 3-5. Análisis térmico de los dos sistemas citados anteriormente

4 VALIDACIÓN DEL CÓDIGO

Tras la codificación y, posteriormente, simulación del problema, es necesario validar si el procedimiento se ha realizado correctamente, aparte de una justificación argumentada de la lógica de los resultados.

Este proceso es necesario en todos los proyectos de ingeniería, y es algo obligatorio en el ingeniero un pensamiento crítico en la revisión de su trabajo con el fin de crecer intelectualmente y laboralmente.

En, este caso se revisará el trabajo realizado con una función anexa, realizada mediante el método de bisección.

El método de bisección es un procedimiento simple y fácil para resolver ecuaciones de una variable. Se basa en el teorema del valor intermedio realizando una serie de iteraciones. Si se trata de una función continua en un intervalo cerrado entre a y b, siendo f(a) y f(b) de signo opuesto, se puede declarar con certeza la existencia de, al menos, una solución en el sistema. Los pasos que ejecuta este método son los mostrados a continuación [24]:

1. Introducir una función continua.
2. Definir límites de la función “a” y “b”.
3. Comprobar que f(a)·f(b) sea menor que cero. Si no se cumple dicha condición, el método usado no es adecuado para resolver el sistema.
4. Se calcula el valor medio “c”, y su valor en la función.
5. En el caso que f(a) y f(c) sean del mismo signo se cambia el valor “a” por el “c”; en caso contrario, el valor “b” se convierte en el de “c”.
6. Se vuelve al paso 4 con los nuevos “a” y “b” del paso anterior hasta que estos valores sean muy parecidos.

Sabiendo que:

$$T_{conductor} = T_{cond\ amb} + (T_{max} - T_{cond\ amb}) \cdot \left(\frac{I_{diseño}}{I_{max}}\right)^2$$

La función sobre la que se trabaja es la siguiente:

$$T_{conductor} - T_{max} = 0$$

Siendo:

- $T_{conductor}$: Temperatura real estimada en el conductor en grados Celsius.
- $T_{cond\ amb}$: Temperatura ambiente del conductor sin carga. Se expresa en grados Celsius.
- T_{max} : Temperatura máxima a la que puede llegar el cable. Este parámetro depende del aislante que lo componga y tiene un valor recogido en la tabla 2-1.
- $I_{diseño}$: Intensidad prevista para el conductor. Se expresa en amperios.
- I_{max} : Intensidad máxima admisible del cable. Crece con la sección. Se define en amperios.

El código programado sobre este método y que ha sido utilizado en el desarrollo de este trabajo fin de grado está expuesto en el Anexo F.

Esta función, dado un rango de intensidades, calcula la intensidad que tiene que pasar por el cable para que este llegue a una temperatura de 90 grados Celsius, máxima temperatura de operación en régimen de servicio continuo para un cable con XLPE. Este resultado se comparará con la intensidad máxima admisible aportada

por PRYSMIAN y con la información aportada por la norma IEC 60364-5-52 en las condiciones en las que se encuentra los sistemas simulados.

Es importante recalcar, respecto a la norma IEC, la aplicación de un factor corrector de temperatura (de valor 1.1), debido a que las condiciones estándar referidos por esta son iguales que las de PRYSMIAN exceptuando la temperatura ambiente siendo de 30 grados Celsius en vez de los 40 marcados por PRYSMIAN.

$$Intensidad_{30^{\circ}C} = \frac{Intensidad_{40^{\circ}C}}{1.1}$$

A continuación, se tabulará los resultados obtenidos por el código realizado frente a las intensidades recogidas en PRYSMIAN e IEC. Para una mejor comparación, al final de cada tabla, se calculará el error relativo de los resultados obtenidos mediante FEMM respecto los tabulados en norma y catálogo. Todas las intensidades van expresadas en amperios

$$Error (\%) = \frac{|I_{FEMM} - I_{tabulada}|}{I_{tabulada}} \cdot 100$$

A demás, con el fin de realizar una mejor comparación, se va a ejecutar el procedimiento explicado anteriormente con dos tipos diferentes de secciones, siendo dos cables típicos en instalaciones eléctricas de baja tensión: 120 mm^2 y 240 mm^2 .

- En condiciones estándar

Respecto a tres cables unipolares transportando trifásica:

Tabla 4-1. Intensidades máximas obtenidas en condiciones estándar

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm^2	178 A	179 A	178 A
Sección 240 mm^2	261 A	263 A	262 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|178 - 178|}{178} \cdot 100 = 0 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|178 - 179|}{179} \cdot 100 = 0.55 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|262 - 261|}{261} \cdot 100 = 0.383 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|262 - 263|}{263} \cdot 100 = 0.38 \%$$

Para el caso de dos cables unipolares transportando continua:

Tabla 4-2. Intensidades máximas obtenidas en condiciones estándar

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	211 A	212 A	211 A
Sección 240 mm ²	309 A	312 A	310 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|211 - 211|}{211} \cdot 100 = 0 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|211 - 212|}{212} \cdot 100 = 0.471 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|310 - 309|}{309} \cdot 100 = 0.323 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|310 - 312|}{312} \cdot 100 = 0.64 \%$$

Los resultados obtenidos mediante FEMM se asemejan bastante a los aportados por PRYSMIAN y IEC llegando a un máximo de error respecto a los resultados tabulados de un 0.64 %. Este hecho muestra una correcta codificación del problema, llegando así a los resultados esperados. A continuación, con el fin de aumentar la confianza en el código y ver su comportamiento en otras condiciones, se procede a ejecutar el mismo procedimiento, pero variando un parámetro de diseño. Estos, hacen que se tenga que aplicar factores correctores a las intensidades recogidas tanto en el catálogo como en la norma. Los criterios de diseño que se van a variar son los siguientes:

- Temperatura del suelo: 25 grados Celsius.

$$Intensidad_{20^{\circ}C} = \frac{Intensidad_{25^{\circ}C}}{1.07}$$

Siendo 1.07 el corrector debido a una temperatura del terreno de 25 °C.

Sistema corriente alterna:

Tabla 4-3. Intensidades máximas obtenidas con temperatura del suelo de 25 ° C

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	167 A	168 A	174 A
Sección 240 mm ²	244 A	246 A	257 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|174 - 167|}{167} \cdot 100 = 4.19 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|174 - 168|}{168} \cdot 100 = 3.57 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|257 - 244|}{244} \cdot 100 = 5.32\%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|257 - 246|}{246} \cdot 100 = 4.87\%$$

Sistema corriente continua:

Tabla 4-4. Intensidades máximas obtenidas con temperatura del suelo de 25 ° C

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	198 A	199 A	207 A
Sección 240 mm ²	289 A	292 A	304 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|207 - 198|}{198} \cdot 100 = 4.54 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|207 - 199|}{199} \cdot 100 = 5.19\%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|304 - 289|}{289} \cdot 100 = 5.19 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|304 - 292|}{292} \cdot 100 = 4.10 \%$$

Los resultados obtenidos reflejan un cierto error de un 5 % aproximadamente. Esto puede deberse a fallos en el código que no le hace actuar bien ante el cambio de parámetros en el sistema. Esta conclusión no puede asumirse con solo un análisis, por lo que, es necesario realizar más variaciones en las condiciones y ver el comportamiento de la simulación de FEMM ante estas.

- Resistividad del terreno: $2 \frac{m \cdot k}{W}$.

$$Intensidad_{2.5 \frac{m \cdot k}{W}} = \frac{Intensidad_{2 \frac{m \cdot k}{W}}}{1.12}$$

Sistema corriente alterna:

Tabla 4-5. Intensidades máximas obtenidas con resistividad del terreno $2 \frac{m \cdot k}{W}$

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	199 A	200 A	197 A
Sección 240 mm ²	292 A	294 A	290 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|197 - 199|}{199} \cdot 100 = 1 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|197 - 200|}{200} \cdot 100 = 1.5 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|290 - 292|}{292} \cdot 100 = 0.685 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|290 - 294|}{294} \cdot 100 = 1.36\%$$

Sistema corriente continua:

Tabla 4-6. Intensidades máximas obtenidas con resistividad del terreno $2 \frac{m \cdot k}{W}$

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	236 A	237 A	233 A
Sección 240 mm ²	346 A	349 A	343 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|233 - 236|}{236} \cdot 100 = 1.27 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|233 - 237|}{237} \cdot 100 = 1.69 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|343 - 346|}{346} \cdot 100 = 0.86 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|343 - 349|}{349} \cdot 100 = 1.79 \%$$

En este análisis, se puede aceptar la validez de los resultados obtenidos por FEMM, con un error máximo de 1.79 %. Es un error aceptable, viendo que IEC y PRYSMIAN distinguen entre ellas en un porcentaje parecido. Es necesario destacar que el error suele ser menor cuando se compara los resultados obtenidos con PRYSMIAN. Esto puede llegar a ser entendible debido a que esta empresa es la fabricante del cableado y aporta resultados más precisos que la norma IEC.

- Próximo a otro circuito exactamente igual que él.

A la hora de ejecutar esta comparación, es necesario establecer las condiciones en las que se encuentran los cables a analizar. El sistema sobre el que se va a trabajar consiste en dos cables exactamente iguales separados entre ellos por una distancia igual a 0.125 metros. Con esas condiciones, el factor corrector que se ha de aplicar a las intensidades en condiciones estándar es de 0.85, es decir, se debe de multiplicar por 0.85, haciendo la intensidad máxima admisible de un valor menor. Este hecho, se debe a los intercambios de calor entre ambos cables, como se puede apreciar en la figura 4-1.

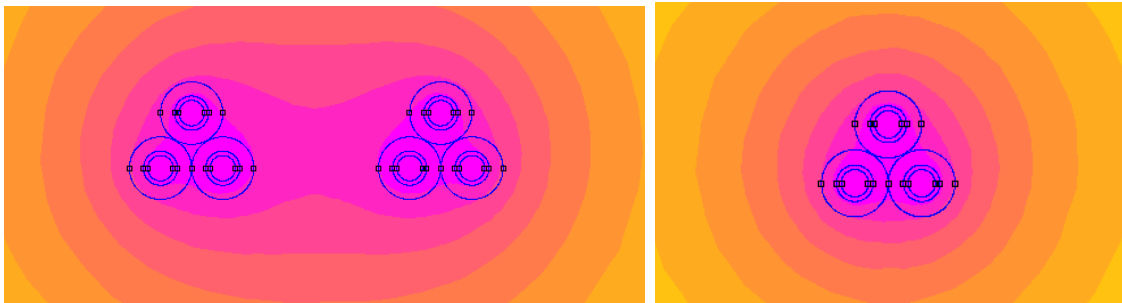


Figura 4-1. Influencia de circuitos cercanos en la refrigeración de calor

La figura 4-1 muestra el antes y el después de la evacuación de calor de un cable al verse influenciado por otro a distancias cercanas. En la parte derecha, se observa el flujo de calor del sistema siendo evacuado sin ningún problema. En cambio, en la parte izquierda, se aprecia una variación en los intercambios de calor de los sistemas. Dicha variación, es visible en las partes internas del cable, donde se tornan a un color morado más claro que indica una mayor temperatura. Este hecho se da debido a que un sistema calienta al otro y viceversa, dejando los puntos más cercanos entre ellos, a una mayor temperatura respecto a las demás zonas del cableado. Como es lógico, este efecto provoca una disminución de la intensidad admisible.

$$Intensidad_{2 \text{ cables } 0.125\text{m}} = \frac{Intensidad_{\text{estandar}}}{\frac{1}{0.85}}$$

En la simulación por FEMM, se medirá la temperatura del sistema en los puntos donde se prevé que se alcance una mayor temperatura.

Respecto a tres cables unipolares transportando trifásica:

Tabla 4-7. Intensidades máximas obtenidas con proximidad a otro circuito

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	151 A	152 A	148 A
Sección 240 mm ²	221 A	223 A	218 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|148 - 151|}{151} \cdot 100 = 1.98 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|148 - 152|}{152} \cdot 100 = 2.61 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|218 - 221|}{221} \cdot 100 = 1.35 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|218 - 223|}{223} \cdot 100 = 2.24 \%$$

Para el caso de dos cables unipolares transportando continua:

Tabla 4-8. Intensidades máximas obtenidas con proximidad a otro circuito

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	179 A	180 A	179 A
Sección 240 mm ²	262 A	265 A	263 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|179 - 179|}{179} \cdot 100 = 0 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|179 - 180|}{180} \cdot 100 = 0.55 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|263 - 262|}{262} \cdot 100 = 0.38 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|263 - 265|}{265} \cdot 100 = 0.75 \%$$

Respecto a los resultados obtenidos en esta comparación, destaca la exactitud del código referido a dos cables unipolares transportando corriente continua donde ninguno de los errores calculados supera el 1 %, incluso llegando a errores de un 0 %.

En el ámbito de la terna de cables unipolares trifásicos, el error es algo mayor que el anteriormente mencionado, pero también de un valor bastante bajo.

- Profundidad del cableado 1.5 metros.

La profundidad a la que es enterrado el cable es un tema muy importante, térmicamente hablando. Como ya se ha explicado anteriormente, la zanja diseñada en el programa FEMM, se compone por un cuadrado donde los dos laterales y arista inferior se caracterizan por estar permanentemente a la misma temperatura, simulando la infinitud del suelo. En cambio, la arista vertical se trata de un proceso convectivo con el aire exterior, que en condiciones estándar se encuentra a 40 grados Celsius.

En termodinámica, Clausius expresó que *“No es posible ningún proceso cuyo único resultado sea la extracción de calor de un reservorio de a una cierta temperatura y la absorción de una cantidad igual de calor por un reservorio a una temperatura más elevada”*. Esto significa no se puede dar un intercambio de calor de un foco frío a un foco caliente sin aporte de trabajo de un reservorio de trabajo. [25]

Este enunciado muestra que, al ser el sistema sobre el que se está trabajando libre de reservorios de trabajo, el flujo de calor se da siempre desde el foco caliente al frío. Esto aplicado al proceso convectivo anteriormente explicado, hace que el aire actúe como foco caliente y el suelo como foco frío, habiendo una transmisión de calor entre ellos. Este hecho suele ser al revés en los horarios nocturnos, donde aire y suelo intercambian los papeles.

A demás de este hecho, es necesario explicar la importancia de las temperaturas de estos focos, pues cuanto más diferencia haya entre ellos, el flujo de calor será mayor. Esto se debe a un aumento en el término de la diferencia de temperaturas que hay reflejada en las ecuaciones de los procesos.

Tras lo anteriormente explicado, se puede deducir que un cable a una profundidad baja evacua menos calor debido a la influencia de la temperatura del aire. Al contrario, a una profundidad mayor, el cable refrigeraría mejor por la influencia de la temperatura del suelo. Por todo esto, al estar a una profundidad de 1.5 metros, en vez de 0.7 metros, el término de intensidad máxima admisible se verá incrementado.

$$Intensidad_{1.5 \text{ m}} = \frac{Intensidad_{0.7 \text{ m}}}{0.93}$$

Respecto a tres cables unipolares transportando trifásica:

Tabla 4-9. Intensidades máximas obtenidas a profundidad de 1.2 m

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	191 A	192 A	195 A
Sección 240 mm ²	281 A	283 A	287 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|195 - 191|}{191} \cdot 100 = 2.09 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|195 - 192|}{192} \cdot 100 = 1.56 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|287 - 281|}{281} \cdot 100 = 2.13 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|287 - 283|}{283} \cdot 100 = 1.41 \%$$

Para el caso de dos cables unipolares transportando continua:

Tabla 4-10. Intensidades máximas obtenidas a profundidad de 1.2 m

	PRYSMIAN	IEC 60364-5-52	Simulación FEMM
Sección 120 mm ²	218 A	219 A	215 A
Sección 240 mm ²	319 A	321 A	316 A

$$Error_{120}^{PRYS} = \frac{|215 - 218|}{218} \cdot 100 = 1.37 \%$$

$$Error_{120}^{IEC} = \frac{|215 - 219|}{219} \cdot 100 = 1.82 \%$$

$$Error_{240}^{PRYS} = \frac{|316 - 319|}{319} \cdot 100 = 0.94 \%$$

$$Error_{240}^{IEC} = \frac{|316 - 321|}{321} \cdot 100 = 1.55 \%$$

En este análisis, se vuelve a ver unos errores de 1-2 % en ambos sistemas simulados. Este error, aunque es reducido, se ha ido dando en el resto de los análisis por lo que es necesario tomar una decisión sobre la validez y exactitud del código. Para ello, a modo de ayuda, se realiza un pequeño resumen sobre cuáles son los errores más elevados en los diferentes análisis:

Tabla 4-11. Resumen de los máximos errores cometidos en cada sistema

Tipo de análisis	Máximo error AC	Máximo error DC
Condiciones estándar	0.55 %	0.64 %
Temperatura del suelo	5.32 %	5.19 %
Resistividad del suelo	1.5 %	1.79 %
Proximidad a otro circuito	2.6 %	0.75 %
Profundidad del terreno	2.13 %	1.82 %

Con estos resultados se puede llegar a la conclusión de que los códigos realizados se asemejan en gran cantidad a la realidad, con una exactitud aceptable. Como se observa en los valores aportados por IEC y PRYSMIAN, la intensidad máxima admisible no es un parámetro fácil de medir de una manera totalmente precisa pues los resultados de ambos no son exactamente iguales. En la puesta en servicio de un cable hay muchos parámetros que van a afectar en su evacuación de calor, y la manera en que van a influir no siempre es fácil de predecir por sistemas computacionales.

Esto hace que el error que se comete en ambos sistemas pueda ser despreciable para admitir la validez del modelo pues es de lógica que dos resultados, uno calculado de forma experimental en un banco de ensayo y otro realizado mediante programas informáticos; puedan llegar a ser diferentes.

La solución para esto puede ser que, a la hora de la elección del cableado, se escoja una sección de cableado que pudiera aguantar un 5-7 % más de la intensidad admisible aportada. Esto funcionaría como medida de seguridad para que no se sobrepase la temperatura máxima de operación en servicio continuo en cualquiera de las condiciones.

El código programado para realizar este apartado queda recogido en el Anexo A, para el sistema de dos cables unipolares donde circula corriente continua, y en el Anexo B, para el sistema de tres cables unipolares donde circula corriente alterna trifásica.

5 APLICACIÓN A REDES MIXTAS AC/DC

Tras realizar las simulaciones recogidas en el capítulo anterior, se puede aceptar la validez del código programado. Este paso es fundamental para el desarrollo de este trabajo fin de grado pues, a continuación, se procederá a la aplicación en una red híbrida AC/DC usando el código trabajado. Para ello, se comienza con el dibujo de un sistema trifásico con neutro directamente enterrado en una zanja.

Se hace circular una corriente continua por dos cables de dicho sistema, simulando el polo positivo y negativo de esta intensidad; y se pasa corriente alterna monofásica por los otros dos cables restantes. Esta disposición queda reflejada en la figura 5-1, expuesta a continuación:

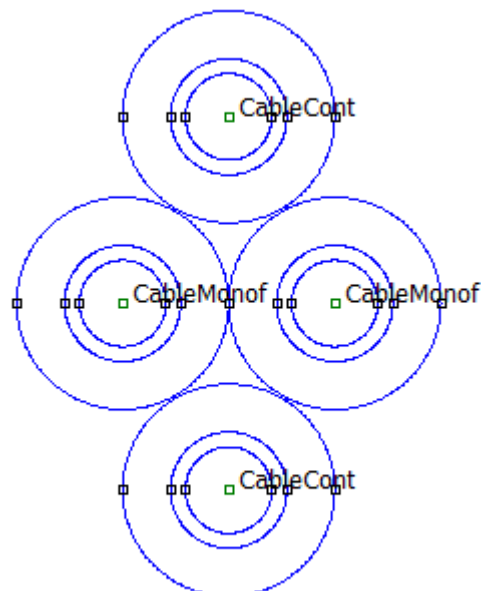


Figura 5-1. Posible disposición de cables en una red híbrida.

Esta es una de las posibilidades que se puede adoptar en la estructura de una red mixta, pero varias son las disposiciones de corriente en el cable. Este aspecto es muy importante en la caracterización térmica del problema, pues la potencia transmitida varía según el sistema escogido. Por ello es necesario realizar un análisis sobre la forma en la cual se conseguiría maximizar la potencia.

El correcto cálculo de la potencia suministrada es muy importante para este trabajo fin de grado, pues determina el objetivo global de dicho trabajo: Demostrar, térmicamente hablando, un aumento de la potencia eléctrica transmitida haciendo uso de la tecnología de redes mixtas AC/DC. Las ecuaciones usadas para verificar el cumplimiento de dicho objetivo son las siguientes:

Caso de red trifásica convencional:

$$Potencia_{elec} = 3 \cdot Tensión \cdot Intensidad_{servicio}$$

Siendo:

- $Potencia_{elec}$: Potencia eléctrica transmitida por el cable. Se mide en W.
- Tensión: Nivel de tensión de la línea en Voltios.

- $Intensidad_{servicio}$: Intensidad que circula por el cable en régimen de servicio continuo.

El nivel de tensión queda fijado por el tipo de línea a la que pertenezca. En el capítulo 2-1 de este trabajo, se puede ver los diferentes valores de tensión dependiendo si pertenece a muy baja, baja, media o alta tensión. En este caso, se está trabajando con una línea de baja tensión de fase de 230 V, típica de la redes eléctricas españolas.

Caso de una red mixta AC/DC:

$$Potencia_{elec} = V_{alterna} \cdot Intensidad_{servicio\ alt} + V_{continua} \cdot Intensidad_{servicio\ cont}$$

Siendo:

- $Potencia_{elec}$: Potencia eléctrica que recorre el cable. Se mide en W.
- $V_{alterna}$: Voltaje de la corriente alterna monofásica en V.
- $Intensidad_{servicio\ alt}$: Intensidad de corriente alterna monofásica que recorre el cable. Se expresa en A.
- $V_{continua}$: Voltaje de la corriente continua en V.
- $Intensidad_{servicio\ cont}$: Intensidad de corriente continua. Se mide en A.

En este caso, la potencia transmitida por el cable es suma de los términos de corriente continua y alterna donde el nivel de voltaje en el cable de corriente alterna no varía de los 230 V de la red trifásica. Respecto al nivel de tensión adoptado en corriente continua, se elige un voltaje de 750 V. Como ya se ha dicho anteriormente, el hecho de una red mixta donde coexistan corriente alterna y continua puede ser de gran ayuda en la implantación de la movilidad eléctrica, que demanda corriente continua mediante los cargadores de estos vehículos.

A continuación, se procede a ejecutar un análisis de las condiciones en las cuales se consigue el máximo de potencia transmitida. Para ello, se ira buscando parejas de intensidades DC/AC que provoquen a los 4 polos del cableado llegar a una temperatura cercana a los 90 grados Celsius sin excederlo. Esta búsqueda de parejas se realizará fijando un valor de intensidad de corriente continua y averiguar qué intensidad de corriente alterna cumple el criterio anteriormente contado en el que los cables llegan a su máxima temperatura de operación. Estos pares de intensidades serán recogidos en cada disposición analizada, junto con su potencia transmitida por el cable.

Es importante resaltar que, en la realización del análisis, se irá variando el valor de la intensidad de continua de diez en diez hasta llegar a un punto donde se aprecie un máximo de potencia, en el que se ejecutará un procedimiento más exhaustivo.

Para todos los análisis que se van a ejecutar en este capítulo se ha escogido cuatro cables Voltalene AL de 240 mm² en condiciones estándar. Con dicha sección de cable constante en la ejecución de este capítulo, se puede obtener la potencia que transmite dicho cable transportando corriente trifásica y colocándose a una temperatura de 90 grados Celsius, hecho que ocurrirá cuando se haga pasar la intensidad máxima admisible en condiciones estándar, que, en el caso de ese determinado cable, es de 261 A

$$Potencia_{elec} = 3 \cdot 230\ V \cdot 261\ A$$

$$Potencia_{elec} = 180.09\ KW$$

Este valor será comparado con los valores máximos de potencia resultantes en las disposiciones analizadas.

$$\% \text{ más de potencia} = \frac{Pot_{red\ mixta} - Pot_{red\ trifasica}}{Pot_{red\ trifasica}} \cdot 100$$

A demás, se calculará la participación de corriente alterna respecto a la corriente total que circula por el cable en cada disposición.

$$\% \text{ participación intensidad AC} = \frac{I_{alt}}{I_{alt} + I_{cont}} \cdot 100$$

- Disposición 1

Este apartado corresponde al sistema descrito en la figura 5-1. En dicha figura, se puede observar una estructura en forma de rombo con los dos polos de corriente continua situados en los cables superior e inferior del sistema. Por otro lado, la corriente monofásica alterna se encuentra circulando por el cable derecho e izquierdo.

Los pares de intensidades obtenidos son los siguientes:

Tabla 5-1. Análisis de potencia en la disposición 1

Intensidad DC	Intensidad AC	Potencia
330 A	54 A	259.92 kW
325 A	75 A	261.00 kW
324 A	80 A	261.40 kW
322 A	87 A	261.45 kW
320 A	94 A	261.62 kW
318 A	99 A	261.27 kW
310 A	121 A	260.33 kW
300 A	142 A	257.66 kW
290 A	161 A	254.53 kW
280 A	176 A	250.48 kW
270 A	191 A	246.43 kW
260 A	203 A	241.69 kW

Como se puede ver en la tabla 5-1, el sistema presenta un máximo de potencia de 261.62 kW para intensidades de 320 A de continua y 94 A de alterna monofásica. Esto significaría un aumento en la potencia de:

$$\% \text{ más de potencia} = \frac{261.62 - 180.09}{180.09} \cdot 100 = 45.22 \%$$

$$\% \text{ participación intensidad AC} = \frac{94}{94 + 320} \cdot 100 = 22.7 \%$$

Esta puede ser la disposición de mayores prestaciones, pues sitúa a los polos de continua lo más alejado posible entre ellos, favoreciendo así llevar más corriente continua en el cable.

Como ya se ha dicho anteriormente, en el cálculo de la potencia transmitida por el cable, el término de corriente continua tiene mayor peso debido a su tensión de 750 V frente a los 230 V de alterna. Por tanto, con el fin de maximizar la potencia, se busca transportar más corriente continua que de alterna monofásica. Esto causa una generación de calor elevada, que se traducirá en altas temperaturas en el seno de los propios cables de corriente continua y en los demás cables de su alrededor al intercambiar calor con ellos; siempre sin alcanzar su temperatura máxima de operación.

Es necesario destacar que, en este caso, los polos DC están en contacto con dos cables, frente a 3 cables en contacto si estuviera en un lateral; y, por tanto, teniendo una menor transferencia de calor con focos de alta temperatura.

Por todo ello, en esta disposición se obtendrá valores de potencia muy elevados.

- Disposición 2

En este sistema, los cables de corriente continua se encuentran situados en la parte derecha e inferior del

sistema mientras que los polos de alterna se sitúan en la parte superior e izquierda, como se puede observar en la figura 5-2.

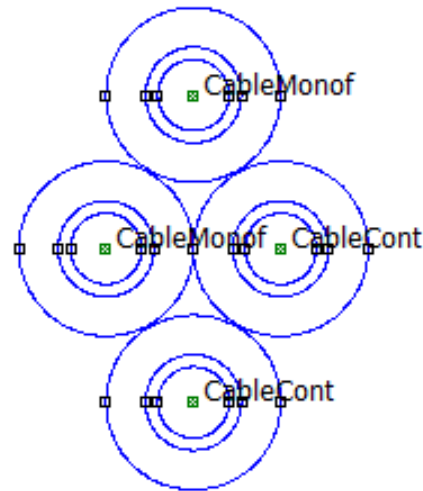


Figura 5-2. Posible disposición de cables en una red híbrida.

En este caso, los polos de corriente continua se encuentran muy próximos entre ellos. Como ya se ha explicado en la anterior disposición, este hecho no es muy recomendable pues habría un flujo de calor entre ellos que significaría menos potencia en el sistema. Este flujo se puede apreciar en la figura 5-3, donde de un color rosado claro se puede observar el intercambio de calor entre los cables que transportan continua.

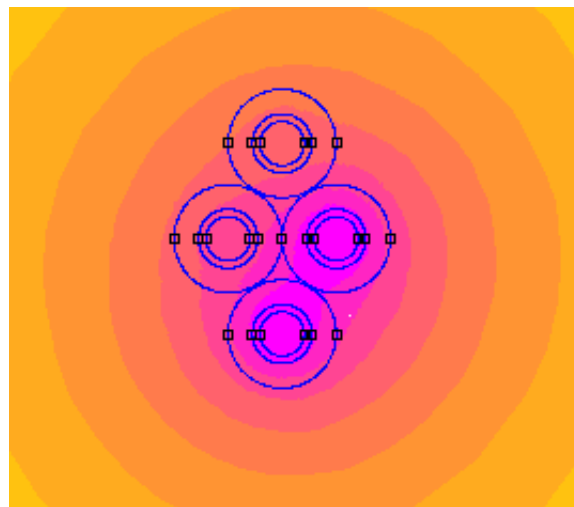


Figura 5-3. Influencia de los polos DC en el problema térmico

Sin embargo, se coloca uno de los polos DC en la zona inferior del esquema, y que con lo contando anteriormente en el capítulo 4 de este trabajo, significa un aumento en la intensidad transportada por dicho cable y por tanto en su potencia. Al haber sucesos contradictorios es necesario realizar el siguiente análisis:

Tabla 5-2. Análisis de potencia en la disposición 2

Intensidad DC	Intensidad AC	Potencia
310 A	37 A	241.01 kW
300 A	94 A	246.62 kW
298 A	102 A	246.96 kW
295 A	112 A	247.01 kW
293 A	118 A	246.89 kW
290 A	128 A	246.94 kW
280 A	153 A	245.19 kW
270 A	173 A	242.29 kW
260 A	191 A	238.93 kW

En este caso, el punto de máxima potencia se da para intensidad DC/AC de 295 A / 112 A.

$$\% \text{ más de potencia} = \frac{247.01 - 180.09}{180.09} \cdot 100 = 37.16 \%$$

$$\% \text{ participación intensidad AC} = \frac{112}{112 + 295} \cdot 100 = 27.51 \%$$

▪ Disposición 3

En tercer lugar, se trabaja con una disposición donde los polos de corriente continua se sitúan en la parte derecha e izquierda, y los polos de corriente alterna en la zona inferior y superior del dibujo. Este sistema queda reflejado en la figura 5-3.

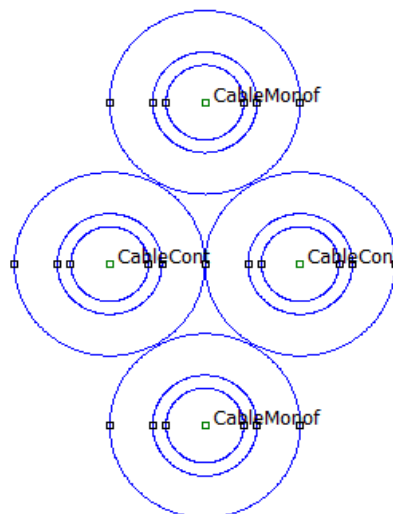


Figura 5-4. Posible disposición de cables en una red híbrida.

Es una disposición parecida a la anterior donde los cables DC se encuentran juntos. Como ya se ha dicho con anterioridad, esto provoca una disminución en la intensidad transportada por dicho cable y por ello, menos potencia suministrada por el sistema.

Su tabla intensidades-potencia es la siguiente:

Tabla 5-3. Análisis de potencia en la disposición 3

Intensidad DC	Intensidad AC	Potencia
310 A	35 A	240.55 kW
300 A	94 A	246.62 kW
297 A	104 A	246.67 kW
295 A	112 A	247.01 kW
293 A	118 A	246.89 kW
290 A	127 A	246.71 kW
280 A	153 A	244.90 kW
270 A	173 A	242.29 kW
260 A	190 A	238.70 kW

Como se aprecia en la tabla 5-3, el máximo de potencia para este sistema, 247.01 kW, se da para 112 A de corriente alterna y 295 de corriente continua.

$$\% \text{ más de potencia} = \frac{247.01 - 180.09}{180.09} \cdot 100 = 37.16 \%$$

$$\% \text{ participación intensidad AC} = \frac{112}{112 + 295} \cdot 100 = 27.51 \%$$

Estos resultados son muy parecidos a los obtenidos en el apartado anterior. Con estas dos últimas disposiciones analizadas, se puede llegar a la conclusión de que colocar los dos cables de corriente continua juntos no sea la mejor idea para maximizar la potencia del sistema. Esto provoca que la disposición 1 tenga muchas posibilidades de ser la estructura buscada para cumplir los objetivos del proyecto. Por último, se analizará un sistema donde se separe los polos DC, pero, en vez de forma de rombo como se ha analizado anteriormente, con un perfil parecido a un cuadrado.

- Disposición 4

En esta disposición, se adopta una estructura parecida a un cuadrado en el que los cables de corriente continua se encuentran en las esquinas superior derecha e inferior izquierda, y los cables de corriente alterna monofásica en las esquinas superior izquierda e inferior derecha, esquema reflejado en la figura 5-5.

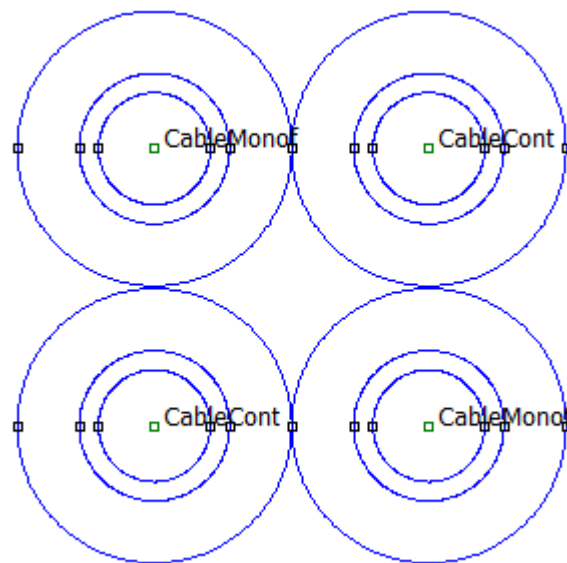


Figura 5-5. Posible disposición de cables en una red híbrida.

Este sistema puede ser una opción a ser la disposición donde se transmita mayor cantidad de potencia eléctrica, pues los polos de DC no se encuentran pegados entre sí y, en este caso, cada cable del sistema está en contacto con otros dos cables que significa una mejor refrigeración del cable. En cambio, los cables de corriente continua se encuentran más cercanos que en la disposición 1. Ante estos efectos, es necesario analizar cuál es la potencia máxima que puede suministrar el sistema:

Tabla 5-4. Análisis de potencia en la disposición 4

Intensidad DC	Intensidad AC	Potencia
320 A	75 A	257.25 kW
317 A	87 A	257.76 kW
315 A	104 A	260.17 kW
313 A	106 A	259.13 kW
310 ^a	109 A	257.57 kW
300 A	134 A	255.82 kW
290 A	155 A	253.15 kW
280 A	173 A	249.70 kW

Esta disposición presenta un máximo de potencia con 260.17 kW para 315 A de corriente continua y 104 A de corriente alterna.

$$\% \text{ más de potencia} = \frac{260.17 - 180.09}{180.09} \cdot 100 = 44.46 \%$$

$$\% \text{ participación intensidad AC} = \frac{104}{104 + 315} \cdot 100 = 24.82 \%$$

Tras la realización de este análisis, se llega a la idea de no profundizar más en otras disposiciones pues, en teoría no habrá mejores opciones que cumplan con el objetivo de maximizar la potencia del sistema respetando la compacidad del propio cable.

En conclusión, como muestra la tabla 5-5, la disposición 1 y 4 analizadas son las mejores opciones para su aplicación en redes mixtas AC/DC, con valores de potencia transmitida muy parecidos. Otro efecto que se puede apreciar en dicha tabla es la colaboración de corriente alterna en el total del sistema, siendo comúnmente de una participación de un cuarto siendo de menor valor para las disposiciones de mayor potencia.

Tabla 5-5. Resumen de las disposiciones analizadas

Disposición	% más de potencia	% participación _{alt}
1	45.22 %	22.7 %
2	37.16 %	27.55 %
3	37.16 %	27.55 %
4	44.46 %	24.82 %

Como el objetivo de este capítulo es encontrar aquella disposición que maximice la potencia, se afirma que la geometría ideal para esta tecnología es la recogida en la disposición 1.

El código programado para realizar este apartado está recogido en el Anexo C para el esquema rómbico y en el Anexo D para la forma cuadrada.

5.1 Aplicación doméstica de redes mixtas

En la introducción de este trabajo fin de grado, se ha comentado la necesidad de un cambio hacia una tecnología más eficiente y respetuosa ante el medio ambiente con el fin del cumplimiento de los objetivos 2030 y 2050 de los cuales, actualmente, la situación europea está lejos de satisfacer. Es por ello por lo que recientemente se estén investigando nuevas ideas y sistemas con los que intentar reducir la dependencia de los combustibles fósiles y el creciente consumo eléctrico mundial.

La tecnología de redes mixtas AC/DC es una de estas opciones de futuro que se está desarrollando en la actualidad. Su aplicación podría ser muy significativa para los objetivos anteriormente citados, destacando su uso en el sector residencial.

Este sector, tal y como se puede observar en la figura 1-4, representa un tercio del consumo eléctrico en España, igualado con el sector de la industria y los servicios públicos.

Este elevado peso en el consumo eléctrico se traduce en una intensificación en los esfuerzos por formar un sector más eficiente. En la figura 1-5 se puede ver un desglose de cuáles son los sistemas de mayor consumo en un hogar de Madrid según el IDAE, donde se puede apreciar que los bloques de mayor consumo son la climatización, los sistemas de agua caliente sanitaria y los electrodomésticos. En la búsqueda por reducir el consumo proveniente del sector residencial, se debe comenzar abordando los sistemas que más influencia tienen en dicho consumo.

Por lo expuesto anteriormente, se trabaja en la idea de alimentar el consumo eléctrico residencial con corriente continua y corriente alterna monofásica, haciendo uso de redes mixtas.

El modo de aplicación de esta tecnología podría ser el siguiente: conectar mediante corriente continua los elementos que mayor potencia y consume representen, como climatizadoras, termos eléctricos para ACS o lavadoras; y alimentar, haciendo uso de corriente alterna monofásica, el resto de las cargas, con un consumo y potencia individual menor.

En una red eléctrica futurista donde se espera una gran tendencia hacia el autoconsumo mediante paneles fotovoltaicos, que producen electricidad en corriente continua, y donde se prevé un gran consumo de corriente continua por parte de la movilidad eléctrica, la opción de alimentar estas grandes cargas como climatizadoras, cargadores, lavadores en corriente continua puede ser una gran idea.

A continuación, con el fin de ver cuál es el sistema que mejor se amolda a este nuevo comportamiento en la red eléctrica, se realiza un balance de potencia para calcular cuántos cargadores de vehículos eléctricos se podría alimentar mediante corriente trifásica convencional y mediante redes mixtas AC/DC.

- Sistema trifásico convencional

Como ya se ha analizado anteriormente en el capítulo 5, tres cables unipolares AL VOLTALENE de 240 mm^2 transportando corriente alterna trifásica pueden llegar a aportar 180.09 kW.

En este punto del balance, se realiza el cálculo de la influencia, en términos de potencia, de la carga de los vehículos eléctricos en la red eléctrica del futuro. Suponiendo una potencia contratada en un hogar tipo de 5 kW, y tomando como referencia el cargador de vehículos eléctricos SCAME WLL-BX-WRT2 [26] que posee una potencia de 7.4 kW, se obtiene que, en un hogar tipo de 5 kW de potencia contratada con un cargador de este tipo, el 60 % de la potencia del sistema sería para la carga de vehículos y el 40 % para el resto de sistemas del hogar.

Esto significaría que, de los 180.09 kW de la red trifásica convencional, 108 kW sería resultante de la

movilidad eléctrica y 72 kW del resto de cargas.

Por tanto, los cargadores eléctricos que se podrían poner en este sistema son:

$$N^{\circ} \text{cargadores} = \frac{\text{Potencia para vehiculos}}{\text{Potencia del cargador SCAME}}$$

$$N^{\circ} \text{cargadores} = \frac{108 \text{ kW}}{7.4 \text{ kW}} = 14.324$$

Se podrían colocar 24 SCAME WLL-BX-WRT2, cargador óptimo para vehículos como Nissan Leaf , Renault Zoe o Tesla Model X según el fabricante. En la figura 5-6 se puede observar dicho cargador.



Figura 5-6 .Cargador SCAME WLL-BX-WRT2

- Sistema mixto AC/DC

La idea de aplicación de este sistema ya ha sido expuesta anteriormente: los vehículos eléctricos y las cargas de mayor potencia de la vivienda, como climatizadoras o lavadoras, se alimentan en corriente continua mientras que el resto de las cargas son alimentadas con corriente alterna monofásica.

Para el balance de potencia en este tipo de red, se necesita los cálculos realizados anteriormente en el capítulo 5, donde se llegaba a un máximo de potencia de 261.62 kW para 320 A de corriente continua y 94 A de corriente alterna monofásica. De estos datos, se obtiene la influencia de la potencia transmitida en alterna frente a la total transmitida

$$\% \text{ Potencia AC} = \frac{\text{Potencia AC}}{\text{Potencia DC} + \text{Potencia AC}} \cdot 100$$

$$\% \text{ Potencia AC} = \frac{3 \cdot 230 \cdot 94}{750 \cdot 320 + 3 \cdot 230 \cdot 94} \cdot 100 = 21.27 \%$$

Este porcentaje significa que para los 261.62 kW que puede transmitir el sistema mixto, 55.64 kW son de

corriente alterna monofásica y 205.97 kW corresponden al término de corriente continua.

Esos 55.64 kW correspondiente a la corriente alterna monofásica pueden no ser suficiente para satisfacer las cargas domésticas que demandan corriente alterna. La solución a este problema pasa por la conexión de cargas como climatizadoras, sistemas de agua caliente sanitaria o frigoríficos, mediante corriente continua.

Observando que para el sistema trifásico convencional se ha dado un valor de 72 kW para las cargas domésticas, se tendría que aportar 16.36 kW en corriente continua para satisfacer las cargas eléctricas del hogar en su totalidad.

Estos 16.36 kW deben de ser restados al término de potencia correspondiente a la corriente continua, y posteriormente, se calcula cuantos cargadores de vehículos eléctricos se podría colocar haciendo uso de esta tecnología.

$$\text{Potencia DC disponible} = 205.97 - 16.36 = 189.61 \text{ kW}$$

$$N^{\circ} \text{ cargadores} = \frac{\text{Potencia para vehiculos}}{\text{Potencia del cargador SCAME}}$$

$$N^{\circ} \text{ cargadores} = \frac{189.61 \text{ kW}}{7.4 \text{ kW}} = 25.623$$

El resultado final del análisis realizado es que un total de 14 cargadores SCAME podrían ser instalados haciendo uso de la red trifásica convencional frente a los 25 cargadores que se podrían colocar con la aplicación de redes mixtas en la red eléctrica. Este es un resultado muy positivo para la tecnología mixta pues casi duplica los cargadores eléctricos capaz de alimentar la red.

Este es un punto favorable más que deja ver la necesidad de un estudio más profundo en la aplicación de las redes mixtas, analizando todos los parámetros que interferirían en el sistema y evaluando la viabilidad tecnológica y económica de dicha implantación.

Un aspecto desfavorable para esta tecnología está recogido en el documento [27], donde habla de la alimentación de un hogar haciendo uso de corriente continua de 12 o 24 V como aplicación de un sistema fotovoltaico. En el desarrollo de dicho proyecto, el autor habla varias veces de la imposibilidad, en su año de realización, de encontrar dispositivos “domésticos” que se pudieran alimentar mediante corriente continua, pues todos estaban diseñados para ser alimentados con corriente alterna. Es por ello por lo que en muchos de estos dispositivos necesitan alguna modificación para ser alimentados con corriente continua, que a veces es muy complicada o imposible.

Aunque dicho estudio se realizará hace 20 años, en la actualidad, también es complicado encontrar sistemas que permitan su alimentación mediante corriente continua. Sin embargo, el creciente desarrollo en tecnología fotovoltaica está siendo uno de los principales aspectos por lo cual se están desarrollando más este tipo de dispositivos.

5.2 Eficiencia

Este sistema de redes mixtas AC/DC es una tecnología muy reciente, y es por ello por lo que surge la necesidad de su estudio y comprensión teórica para su posterior aplicación en la realidad. Este estudio debe de abarcar la totalidad de aspectos que puedan afectar al funcionamiento de estas redes, como caídas de tensión, calidades de ondas... etc.

En este apartado se trata la eficiencia de las redes mixtas siendo comparadas con una red trifásica convencional. Esta comparación se realiza para sistemas de cables Voltalene AL 120 mm², y en condiciones

estándar. Respecto a la red AC/DC, se adopta la disposición 1 anteriormente estudiada.

El procedimiento realizado para juzgar la eficiencia de ambos sistemas es el siguiente:

1. Se dibujan los sistemas a estudiar, además de definir límites y materiales.
2. Se calcula la potencia de la red trifásica convencional para su intensidad de diseño en condiciones estándar.
3. Para igualdad de potencia transmitida y de intensidad de corriente alterna, se calcula la intensidad de corriente continua que debería de transcurrir en dichas condiciones.

$$I_{diseño_{DC}} = \frac{Potencia\ del\ sistema - Tension_{AC} \cdot Idiseño_{AC}}{Tension_{AC}}$$

Siendo:

- Potencia del sistema: Medida en W, es la potencia entregada por el sistema trifásico.
 - $Tension_{AC}$: Voltaje en la red de corriente alterna. Tiene un valor de 230 V.
 - $Tension_{DC}$: Voltaje en la red de corriente continua. Tiene un valor de 750 V.
 - $Idiseño_{AC}$: Intensidad de la red trifásica convencional en condiciones estándar. Se expresa en A.
 - $Idiseño_{DC}$: Intensidad, en A, de corriente continua en la red mixta trabajada.
4. Se simula el sistema
 5. Para juzgar si un sistema es más eficiente que otro se utiliza como factor de comparación las pérdidas térmicas del sistema que, como ya se ha dicho anteriormente se rige por la ecuación reflejada en el capítulo 2-6 de este trabajo.

Tras realizar este procedimiento, se llegan a los resultados de:

Tabla 5-6. Pérdidas térmicas de los sistemas simulados

Sistema	Pérdidas Térmicas
Trifásico	31992.84 W
Mixto	29388.27 W

Para mejor comparación, se procede a calcular cuánto de eficiente es el sistema de redes mixtas respecto al sistema trifásico.

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{Pérdidas\ térmicas\ trifásicas - Perdidas\ térmicas\ mixtas}{Pérdidas\ térmicas\ trifásicas} \cdot 100$$

$$\% \text{ Pérdidas} = \frac{31992.84 - 29388.27}{31992.84} \cdot 100 = 8.14 \%$$

Este resultado refleja que el uso de una red mixta frente a una red trifásica convencional para igualdad de potencia sería un 8.14 % más eficiente, térmicamente hablando.

Este hecho, sumado al aumento de potencia transmitida por el cable haciendo uso de esta tecnología, evidencia el potencial de las redes mixtas como sistema de transporte eléctrico; y deja clara la necesidad de una profundización en su estudio para analizar la viabilidad tecnológica y económica para su aplicación en un sistema real.

El código programado para realizar este apartado queda recogido en el anexo E

6 CONCLUSIONES

Actualmente, la situación europea se encuentra lejos de satisfacer los objetivos estipulados por la unión europea para 2030 y 2050, debido a un contexto de creciente demanda eléctrica mundial e insuficiente reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero. Sumado a esto, las expectativas de futuro basadas en la movilidad eléctrica, el autoconsumo mediante paneles fotovoltaicos y la reconversión de las ciudades a las denominadas “Smart cities” ; surge la necesidad de buscar nuevos modelos de operación, tecnologías y mentalidades acordes a un futuro no muy lejano.

Las redes mixtas AC/DC es una de estas opciones para hacer frente al contexto anteriormente descrito. En este trabajo fin de grado se ha realizado su análisis y viabilidad térmica en una línea de baja tensión con el objetivo de averiguar los puntos fuertes y débiles de esta tecnología.

Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- **Mayor potencia**

La aplicación de redes mixtas en una línea de baja tensión en las condiciones estudiadas ha significado un aumento en la potencia eléctrica transmitida por el cable respecto a la red trifásica. Dependiendo de la disposición adoptada y de las intensidades transmitidas de corriente continua y alterna se consigue un aumento de potencia que oscila entre 20-45 %.

- **Disposición óptima**

El uso del programa FEMM ha aportado mucha versatilidad a este trabajo fin de grado, permitiendo analizar diferentes geometrías y disposiciones. Tras realizar un análisis exhaustivo de dichas condiciones, se llega a la conclusión de que una forma rómbica donde los polos de corriente continua se encuentran en la parte superior e inferior del cable, y los polos de corriente alterna monofásica en la zona derecha e izquierda. Esta disposición queda reflejada en la figura 5-1.

Otra disposición a tener en cuenta es la observada en la figura 5-5, que posee una potencia eléctrica transmitida muy parecida, aunque inferior a la anteriormente descrita.

- **Proporción de intensidades óptima**

El porcentaje de cuanta intensidad de corriente alterna o de corriente continua circula por el cablea hace variar en gran medida la potencia eléctrica. Haciendo varias simulaciones, para la disposición óptima anteriormente comentada, la proporción de intensidades por el cual se maximiza la potencia transmitida es de 22.7 % de AC y 77.3 % de DC.

- **Competitividad**

El uso de redes mixtas en una línea de baja tensión mejoraría la capacidad de respuesta de la red ante futuros problemas como, por ejemplo, el auge de la movilidad eléctrica. Mediante un balance de potencia realizado en el capítulo 5, se llega al resultado de que al implantar la tecnología de redes mixtas en una línea de baja tensión se conseguiría colocar 25 cargadores SCAME frente a los 14 que podría alimentar la red trifásica convencional.

Por ello, se puede admitir la competitividad, eléctricamente hablando, de las redes mixtas respecto a las redes

trifásica.

- **Eficiencia**

En el capítulo 5, se ha llegado a la conclusión de que las redes mixtas son más eficientes, térmicamente hablando, que las redes trifásicas. A esta afirmación se ha llegado igualando la potencia transmitida de ambas redes, y calculando posteriormente las pérdidas por efecto joule de ambos sistemas. El resultado es que las redes mixtas tienen un 8.14 % menos de pérdidas térmicas respecto a la red trifásica convencional. Este hecho se debe a la existencia de corriente continua en la red mixta, que con menos intensidad aporta más potencia al sistema.

- **Tecnología sin desarrollar**

A pesar de los puntos favorables descritos anteriormente, esta tecnología tiene aspectos negativos que se han de tener en cuenta. Todos estos aspectos vienen con un precedente común: es una tecnología muy novedosa y poco estudiada. La documentación sobre aplicaciones de redes mixtas es casi inexistente y es por ello por lo que, para que se haga un correcto uso de este sistema, se ha de realizar un gran número de estudios para determinar el comportamiento de las redes mixtas y su viabilidad tecnológica y económica. Algunos de estos estudios podrían ser las caídas de tensión tanto como de corriente alterna como continua en el propio cableado, interacción de los campos magnéticos de ambas corrientes, costes de implantación de esta tecnología, etc.

Otro aspecto a tener en cuenta en la implantación de redes mixtas en líneas de baja tensión es el consumo inexistente de corriente continua de los hogares, al alimentar las cargas mediante corriente alterna. Este hecho es un problema para la aplicación de redes AC/DC pues las condiciones óptimas de esta tecnología se basan en la poca participación de la corriente alterna.

Una posible solución a este problema es que los dispositivos que representen mayor consumo en el sector residencia, como climatizadoras o sistemas de ACS, sean alimentados con corriente continua. Esta solución es complicada de ejecutar actualmente debido a la escasez de dispositivos que permitan su alimentación mediante corriente continua. Sin embargo, con el crecimiento del autoconsumo en los hogares, está comenzando a aparecer más de estos dispositivos.

REFERENCIAS

- [1] M. Deloitte, «Un modelo de transporte descarbonizado para España en 2050,» 2017.
- [2] I. E. Agency-IEA, «World Energy Outlook,» 2014.
- [3] Centro estadístico STATISTA, «Evolución anual del parque de vehículos eléctricos,» 2017.
- [4] IRENA, «Electricity storage and renewables,» 2016.
- [5] J. M. Maza, «II jornada de economía eléctrica ETSI,» 2017.
- [6] I. E. Agency-IEA, «World Energy Outlook,» 2018.
- [7] IDAE, «Análisis del consumo energético residencial en España,» 2017.
- [8] Universidad de Sevilla, «Distribucion eficiente de energía electrica en baja tensión mediante redes mixtas AC/DC, con referencia ENE2017-84813-R,» 2018.
- [9] J. G. Trasancos, Instalaciones eléctricas en media y baja tensión, 2006.
- [10] Prysmian, AL Voltalene XZ1, 2018.
- [11] Apuntes, *Asignatura : Centrales hidroeléctricas*, 2019.
- [12] L. M. Checa, "Líneas de transporte de energía", 1988.
- [13] Iberdrola, «Proyecto tipo de línea subterránea de baja tensión,» 2013.
- [14] Elecnor, «Postes reforzados con fibra de vidrio para baja tensión,» 2018.
- [15] Endesa, «Control en líneas aéreas,» 2016.
- [16] Apuntes, *Asignatura: Transmisión de calor*, 2016.
- [17] Norma, «IEC 60364-5-52».
- [18] PRYSMIAN, «Catalogo para baja tensión cables y accesorios,» 2016.

- [19] Apuntes, *Asignatura: Instalaciones y maquinas eléctricas*, 2018.
- [20] «Wikipedia,» 2018. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Método_de_los_elementos_finitos. [Último acceso: 25 4 2019].
- [21] J. Douglas-Young, *Diccionario enciclopédico de la electrónica*, 1992.
- [22] «Wikipedia,» 2018. [En línea]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Skin_effect. [Último acceso: 1 5 2019].
- [23] D. Meeker, *Manual FEMM*, 2018.
- [24] «Wikipedia,» 2019. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/Método_de_bisección. [Último acceso: 1 5 2019].
- [25] C. G. Camacho, *Termodinámica*, 2009.
- [26] PRISMICA, *SCAME WLL-BX-WRT2*, 2019.
- [27] J.Pellis, «The DC-low voltage house,» 1997.
- [28] Prysmian, «Al Voltalene XZ1,» 2018.

GLOSARIO

AC: Alternating Current. Corriente alterna

DC: Direct Current. Corriente continua

Red mixta: Sistema eléctrico en el que corriente continua y alterna son transportados por el mismo cable

ANEXOS

ANEXO A

```
import numpy as np

import femm

cable_data={'Voltalene_16':{'I_z':58,'espesor':0.0007,'r':1.91,'d_ext':0.0083,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':16},
'Voltalene_25':{'I_z':74,'espesor':0.0009,'r':1.2,'d_ext':0.0099,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':25},
'Voltalene_35':{'I_z':90,'espesor':0.0009,'r':0.868,'d_ext':0.0108,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':35},
'Voltalene_50':{'I_z':107,'espesor':0.001,'r':0.641,'d_ext':0.0125,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':50},
'Voltalene_70':{'I_z':132,'espesor':0.0011,'r':0.443,'d_ext':0.0145,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':70},
'Voltalene_95':{'I_z':157,'espesor':0.0011,'r':0.32,'d_ext':0.0158,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':95},
'Voltalene_120':{'I_z':178,'espesor':0.0012,'r':0.253,'d_ext':0.0174,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':120},
'Voltalene_150':{'I_z':201,'espesor':0.0014,'r':0.206,'d_ext':0.0193,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':150},
'Voltalene_185':{'I_z':226,'espesor':0.0016,'r':0.164,'d_ext':0.0214,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':185},
'Voltalene_240':{'I_z':261,'espesor':0.0017,'r':0.125,'d_ext':0.0242,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':240},
'Voltalene_300':{'I_z':295,'espesor':0.0018,'r':0.1,'d_ext':0.0267,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':300},
}
selected_cable ='Voltalene_120' #Seccion de cable
```

```

Seccion=cable_data[selected_cable]['seccion'];

#Datos condiciones del cableado

rhotierra=2.5;
Profzanja=2;
Longzanja=2;
Profcable=1; #en m
Tamb=273.15+40; #kelvin en la norma 30 y en el catalogo 40
Tsuelo=273.153+20;#kelvin
NumCables=1
def Temp_cable(Idiseño,Tcable=273.15+90):

    Tprev=Tcable;
    #Propiedades del cable

    AislanteKx=0.3;
    EnvolverteKx=0.35;
    TierraKx=1/rhotierra;
    TierraKy=TierraKx;
    AislanteKy=AislanteKx;
    EnvolverteKy=EnvolverteKx;

    femm.openfemm()

    Espesor=cable_data[selected_cable]['espesor']
    rtref=cable_data[selected_cable]['r']
    Dext=cable_data[selected_cable]['d_ext']
    CableKx=cable_data[selected_cable]['k_conductor']
    alfa=cable_data[selected_cable]['alfa']
    SepCabl=0.125

    n=0;
    y=2*Dext+SepCabl

    Rcable=np.sqrt(Seccion*1e-6)/(3.1416)
    Envolverte=(Dext/2)-(Rcable+Espesor)
    CableKy=CableKx;
    # define problem parameters

    femm.newdocument(2);
    femm.hi_probdef('meters','planar',1e-8,20,30);

    #for it in range(NumTernas):
    for it in range(NumCables):

        # DIBUJO LA ZANJA
        femm.hi_drawline(Longzanja,0,-Longzanja,0)
        femm.hi_drawline(-Longzanja,0,-Longzanja,-Profzanja)
        femm.hi_drawline(-Longzanja,-Profzanja,Longzanja,-Profzanja)
        femm.hi_drawline(Longzanja,-Profzanja,Longzanja,0)
        #Cable NODOS

```

```

femm.hi_addnode (Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (-Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable)

#Aislante NODOS
femm.hi_addnode (Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable)
femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable)

#Envolvente NODOS
femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable)
femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable)
femm.hi_addnode (+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-
Proficable)
femm.hi_addnode (+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable)

#dibujo 1 cable
femm.hi_addarc (Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (Dext/2-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
#DIBUJO 2 CABLE
femm.hi_addarc (-Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (-Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)

#el aislante del primero
femm.hi_addarc (Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable-Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
#el aislante del segundo
femm.hi_addarc (-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,180,1)

#envolvente del primero
femm.hi_addarc (Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
#envolvente del segundo
femm.hi_addarc (-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc (-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)

```

```

#Tres cables
femm.hi_addblocklabel (Dext/2+n*y,-Proficable)
femm.hi_addblocklabel (-Dext/2+n*y,-Proficable)

#Tierra
femm.hi_addblocklabel (0,-Proficable/2)
#aislante
femm.hi_addblocklabel (-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
femm.hi_addblocklabel (+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)

#envolvente
femm.hi_addblocklabel (+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
femm.hi_addblocklabel (-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)

# DEFINO LOS LIMITES
femm.hi_selectsegment (Longzanja,-Profzanja/2);
femm.hi_selectsegment (-Longzanja,-Profzanja/2);
femm.hi_selectsegment (0,-Profzanja);
femm.hi_setsegmentprop ('TierraLimite',0,1,0,0,'<None>');
#propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
femm.hi_clearselected()

femm.hi_selectsegment (0,0);
femm.hi_setsegmentprop ('ConvecAire',0,1,0,0,'<None>')
femm.hi_clearselected()

#ABRO FEMM
for it in range (5): #PROCESO ITERATIVO

    Tref=293.15;
    At=Tcable-Tref;
    rtcable=rtref*(1+(alfa*At))

#GENERACION DEL CABLE JOULE/M*3

CableGen=rtcable*(Idiseño*Idiseño)/((Rcable*Rcable*3.1416)*1000)

femm.hi_addmaterial ('Cable',CableKx,CableKy,CableGen,0);
femm.hi_addmaterial ('Tierra',TierraKx,TierraKy,0,0);

```

```

femm.hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('Envolvente',EnvolventeKx,EnvolventeKy,0,0);

    femm.hi_addboundprop('TierraLimite',0,Tsuelo,0,0,0,0);
    femm.hi_addboundprop('ConvecAire',2,0,0,Tamb,5,0);

    # AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
    femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Profcable);
    femm.hi_setblockprop('Cable',0,0.0005,0);    #"blockname",
automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

    femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Profcable);
    femm.hi_setblockprop('Cable',0,0.0005,0);    #"blockname",
automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

    femm.hi_selectlabel(0,-Profcable/2);
    femm.hi_setblockprop('Tierra',0,0.05,0);    #"blockname",
automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

    femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
    femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

    femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
    femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

    femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Profcable);
    femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
    femm.hi_clearselected()
    femm.hi_zoomnatural()

```

```

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        if(n==(NumCables-1)):
            femm.hi_saveas('auto-CodigoTermico.feh')

            femm.hi_analyze()

            femm.hi_loadsolution()

            femm.ho_seteditmode('area');
            femm.ho_selectblock(Dext/2+n*y,-Proficable)
            Tcablevec1=femm.ho_blockintegral(0)
            Tcable1=Tcablevec1[0]

            if (abs(Tcable1-Tprev)<0.5):
                break

        n=n+1;

    return(Tcable1-273.15)

```

ANEXO B

```

import numpy as np

import femm
cable_data={'Voltalene_16':{'I_z':58,'espesor':0.0007,'r':1.91,'d_ext':0.0083,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':16},

'Voltalene_25':{'I_z':74,'espesor':0.0009,'r':1.2,'d_ext':0.0099,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':25},

'Voltalene_35':{'I_z':90,'espesor':0.0009,'r':0.868,'d_ext':0.0108,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':35},

'Voltalene_50':{'I_z':107,'espesor':0.001,'r':0.641,'d_ext':0.0125,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':50},

'Voltalene_70':{'I_z':132,'espesor':0.0011,'r':0.443,'d_ext':0.0145,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':70},

'Voltalene_95':{'I_z':157,'espesor':0.0011,'r':0.32,'d_ext':0.0158,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':95},

```



```

'Voltalene_120':{'I_z':178,'espesor':0.0012,'r':0.253,'d_ext':0.0174,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':120},

'Voltalene_150':{'I_z':201,'espesor':0.0014,'r':0.206,'d_ext':0.0193,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':150},

'Voltalene_185':{'I_z':226,'espesor':0.0016,'r':0.164,'d_ext':0.0214,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':185},

'Voltalene_240':{'I_z':261,'espesor':0.0017,'r':0.125,'d_ext':0.0242,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':240},

'Voltalene_300':{'I_z':295,'espesor':0.0018,'r':0.1,'d_ext':0.0267,'k_
conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':300},
    }
    selected_cable = 'Voltalene_240' #Seccion de cable
    Seccion=cable_data[selected_cable]['seccion'];

#Datos condiciones del cableado

rhotierra=2.5
Profzanja=2;
Longzanja=2;
Profcable=0.7; #en m
Tamb=273.15+40; #kelvin en la norma 30 y en el catalogo 40
Tsuelo=273.153+20;#kelvin
NumCables=1;
def Temp_cable(Idiseño,Tcable=273.15+90):

    Tprev=Tcable;
    #Propiedades del cable

    AislanteKx=0.3;
    EnvolverteKx=0.35;
    TierraKx=1/rhotierra;
    TierraKy=TierraKx;
    AislanteKy=AislanteKx;
    EnvolverteKy=EnvolverteKx;
    V=400;

    femm.openfemm()

    Espesor=cable_data[selected_cable]['espesor']
    rtref=cable_data[selected_cable]['r']
    Dext=cable_data[selected_cable]['d_ext']
    CableKx=cable_data[selected_cable]['k_conductor']
    alfa=cable_data[selected_cable]['alfa']
    SepCabl=0.125
    NumTernas=NumCables;
    n=0;
    y=2*Dext+SepCabl

    Rcable=np.sqrt(Seccion*1e-6)/(3.1416)

```

```

Envolvente=(Dext/2)-(Rcable+Espesor)
CableKy=CableKx;

femm.newdocument(2);
femm.hi_probdef('meters','planar',1e-8,20,30);

for it in range(NumTernas):

    # DIBUJO LA ZANJA
    femm.hi_drawline(Longzanja,0,-Longzanja,0)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,0,-Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,-Profzanja,Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(Longzanja,-Profzanja,Longzanja,0)
    #Cable NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #Aislante NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+Espesor+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable-Espesor+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #Envolvente NODOS
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Profcable)
    femm.hi_addnode(+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-
Profcable)
    femm.hi_addnode(+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Dext/2+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #dibujo 1 cable
    femm.hi_addarc(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable,Dext/2-
Rcable+n*y,-Profcable,180,1)

```

```

femm.hi_addarc(Dext/2-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
#DIBUJO 2 CABLE
femm.hi_addarc(-Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
# Dibujo 3 cable

femm.hi_addarc(-Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
femm.hi_addarc(+Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)

#el aislante del primero
femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable-Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
#el aislante del segundo
femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
#El aislante del tercero
femm.hi_addarc(-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
femm.hi_addarc(+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)

#envolvente del primero
femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
#envolvente del segundo
femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
#Envolvente del tercero
femm.hi_addarc(-Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
femm.hi_addarc(+Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)

#Tres cables
femm.hi_addblocklabel(Dext/2+n*y,-Proficable)
femm.hi_addblocklabel(-Dext/2+n*y,-Proficable)
femm.hi_addblocklabel(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

```

```

#Tierra
femm.hi_addblocklabel(0,-Profcable/2)
#aislante
femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable)
femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable)
femm.hi_addblocklabel(-(Espesor/2)-Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

#envolvente
femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Profcable)
femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Profcable)
femm.hi_addblocklabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

# DEFINO LOS LIMITES
femm.hi_selectsegment(Longzanja,-Profzanja/2);
femm.hi_selectsegment(-Longzanja,-Profzanja/2);
femm.hi_selectsegment(0,-Profzanja);
femm.hi_setsegmentprop('TierraLimite',0,1,0,0,'<None>');
#propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
femm.hi_clearselected()

femm.hi_selectsegment(0,0);
femm.hi_setsegmentprop('ConvecAire',0,1,0,0,'<None>')
femm.hi_clearselected()

#ABRO FEMM
for it in range (5): #PROCESO ITERATIVO

    Tref=293.15;
    At=Tcable-Tref;
    rtcable=rtref*(1+(alfa*At))

#GENERACION DEL CABLE JOULE/M*3

CableGen=rtcable*(Idiseño*Idiseño)/((Rcable*Rcable*3.1416)*1000)

femm.hi_addmaterial('Cable',CableKx,CableKy,CableGen,0);
femm.hi_addmaterial('Tierra',TierraKx,TierraKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);

```

```
femm.hi_addmaterial('Envolvente',EnvolventeKx,EnvolventeKy,0,0);

femm.hi_addboundprop('TierraLimite',0,Tsuelo,0,0,0,0);
femm.hi_addboundprop('ConvecAire',2,0,0,Tamb,5,0);

# AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Profcable);
femm.hi_setblockprop('Cable',0,0.0005,0); # "blockname",
automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Profcable);
femm.hi_setblockprop('Cable',0,0.0005,0); # "blockname",
automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)));
femm.hi_setblockprop('Cable',0,0.0005,0); # "blockname",
automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(0,-Profcable/2);
femm.hi_setblockprop('Tierra',0,0.05,0); # "blockname",
automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
```

```

femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

if(n==(NumTernas-1)):
    femm.hi_saveas('auto-CodigoTermico.feh')

femm.hi_analyze()

femm.hi_loadsolution()

femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(-Dext/2+n*y,-Proficable)
Tcablevec1=femm.ho_blockintegral(0)
Tcable1=Tcablevec1[0]
print(Tcable1-273.15)
if (abs(Tcable1-Tprev)<0.5):
    break

n=n+1;

return(Tcable1-273.15)

```

ANEXO C

```

import numpy as np

import femm
cable_data={'Voltalene_16':{'I_z':58,'espesor':0.0007,'r':1.91,'d_ext':0.0083,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':16},

'Voltalene_25':{'I_z':74,'espesor':0.0009,'r':1.2,'d_ext':0.0099,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':25},

'Voltalene_35':{'I_z':90,'espesor':0.0009,'r':0.868,'d_ext':0.0108,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':35},

'Voltalene_50':{'I_z':107,'espesor':0.001,'r':0.641,'d_ext':0.0125,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':50},

'Voltalene_70':{'I_z':132,'espesor':0.0011,'r':0.443,'d_ext':0.0145,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':70},

'Voltalene_95':{'I_z':157,'espesor':0.0011,'r':0.32,'d_ext':0.0158,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':95},

'Voltalene_120':{'I_z':178,'espesor':0.0012,'r':0.253,'d_ext':0.0174,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':120},

'Voltalene_150':{'I_z':201,'espesor':0.0014,'r':0.206,'d_ext':0.0193,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':150},

'Voltalene_185':{'I_z':226,'espesor':0.0016,'r':0.164,'d_ext':0.0214,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':185},

'Voltalene_240':{'I_z':261,'espesor':0.0017,'r':0.125,'d_ext':0.0242,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':240},

'Voltalene_300':{'I_z':295,'espesor':0.0018,'r':0.1,'d_ext':0.0267,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':300},
    }
    selected_cable = 'Voltalene_240' #Seccion de cable
    Seccion=cable_data[selected_cable]['seccion'];

#Datos condiciones del cableado

rhotierra=2.5
Profzanja=2;
Longzanja=2;
Profcable=0.7; #en m
Tamb=273.15+40; #kelvin en la norma 30 y en el catalogo 40
Tsuelo=273.153+20;#kelvin
NumCables=1;
def Temp_cable(Idiseñocont,Idiseñoalt,Tcable=293.15):

    Tcablecont=Tcable
    Tcablealt=Tcable
    Tprev=Tcable;
    #Propiedades del cable

```

```

AislanteKx=0.3;
EnvolventeKx=0.35;
TierraKx=1/rhotierra;
TierraKy=TierraKx;
AislanteKy=AislanteKx;
EnvolventeKy=EnvolventeKx;

femm.openfemm()

Ialtantes=cable_data[selected_cable]['I_z']
Espesor=cable_data[selected_cable]['espesor']
rtref=cable_data[selected_cable]['r']
Dext=cable_data[selected_cable]['d_ext']
CableKx=cable_data[selected_cable]['k_conductor']
alfa=cable_data[selected_cable]['alfa']
SepCabl=2*Dext
NumTernas=NumCables;
n=0;
y=2*Dext+SepCabl

Rcable=np.sqrt(Seccion*1e-6)/(3.1416)
Envolvente=(Dext/2)-(Rcable+Espesor)
CableKy=CableKx;

femm.newdocument(2);
femm.hi_probdef('meters','planar',1e-8,20,30);

for it in range(NumTernas):

    # DIBUJO LA ZANJA
    femm.hi_drawline(Longzanja,0,-Longzanja,0)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,0,-Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,-Profzanja,Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(Longzanja,-Profzanja,Longzanja,0)
    #Cable NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(Rcable+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    #Aislante NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+Espesor+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

```



```

        femm.hi_addnode(-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(Rcable+Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(-Rcable-Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
                #Envolvente NODOS
        femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(-Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(-Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
                #Dibujo 1 cable
        femm.hi_addarc(Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(Dext/2-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
                #Dibujo 2 CABLE
        femm.hi_addarc(-Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
                # Dibujo 3 cable
        femm.hi_addarc(-Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        femm.hi_addarc(+Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
                #Dibujo 4 cable
        femm.hi_addarc(-Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        femm.hi_addarc(+Rcable+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Rcable+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
                #el aislante del primero
        femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable-Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
                #el aislante del segundo
        femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
                #El aislante del tercero

```

```

    femm.hi_addarc(-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #El aislanto del cuarto
    femm.hi_addarc(-Rcable-Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -Rcable-Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #envolvente del primero
    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #envolvente del segundo
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #Envolvente del tercero
    femm.hi_addarc(-Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -
Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #Envolvente del cuarto
    femm.hi_addarc(-Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Dext/2+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -
Dext/2+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #Tres cables
    femm.hi_addblocklabel(Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addblocklabel(+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    #Tierra
    femm.hi_addblocklabel(0,-Proficable/2)
    #aislante
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-(Espesor/2)-Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addblocklabel(-(Espesor/2)-Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    #envolvente
    femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)

```

```

        femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
        femm.hi_addblocklabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addblocklabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        # DEFINO LOS LIMITES
        femm.hi_selectsegment(Longzanja,-Profzanja/2);
        femm.hi_selectsegment(-Longzanja,-Profzanja/2);
        femm.hi_selectsegment(0,-Profzanja);
        femm.hi_setsegmentprop('TierraLimite',0,1,0,0,'<None>');
#propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
        femm.hi_clearselected()

        femm.hi_selectsegment(0,0);
        femm.hi_setsegmentprop('ConvecAire',0,1,0,0,'<None>')
        femm.hi_clearselected()
        #ABRO FEMM
        for it in range (5):      #PROCESO ITERATIVO

                Tref=293.15;
                Atalt=Tcablealt-Tref;
                Atcont=Tcablecont-Tref;

                rtcablealt=rtref*(1+(alfa*Atalt))
                rtcablecont=rtref*(1+(alfa*Atcont))

                #GENERACION DEL CABLE JOULE/M*3

CableGenAlt=rtcablealt*(Idiseñoalt*Idiseñoalt)/((Rcable*Rcable*3.1416)
*1000)

CableGenCont=rtcablecont*(Idiseñocont*Idiseñocont)/((Rcable*Rcable*3.1
416)*1000)

femm.hi_addmaterial('CableMonof',CableKx,CableKy,CableGenAlt,0);
        femm.hi_addmaterial('Tierra',TierraKx,TierraKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('CableCont',CableKx,CableKy,CableGenCont,0);

femm.hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('Envolvente',EnvolventeKx,EnvolventeKy,0,0);

        femm.hi_addboundprop('TierraLimite',0,Tsuelo,0,0,0,0);
        femm.hi_addboundprop('ConvecAire',2,0,0,Tamb,5,0);
        # AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
        femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group

```

```

        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)));
        femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)));
        femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(0,-Proficable/2);
        femm.hi_setblockprop('Tierra',0,0.05,0);      #"blockname",
automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()

```

```

        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

    if (n==(NumTernas-1)):
        femm.hi_saveas('auto-CodigoTermico.feh')
        femm.hi_analyze()
        femm.hi_loadsolution()

        femm.ho_seteditmode('area');
        femm.ho_selectblock(Dext/2+n*y,-Proficable)
        Tcablevec1=femm.ho_blockintegral(0)
        Tcablecont=Tcablevec1[0]
        femm.ho_seteditmode('area');
        femm.ho_selectblock(-Dext/2+n*y,-Proficable)
        Tcablevec2=femm.ho_blockintegral(0)
        Tcablecont2=Tcablevec2[0]
        femm.ho_seteditmode('area');
        femm.ho_selectblock(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        Tcablevec3=femm.ho_blockintegral(0)
        Tcablealt=Tcablevec3[0]
        femm.ho_seteditmode('area');
        femm.ho_selectblock(+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        Tcablevec4=femm.ho_blockintegral(0)
        Tcablealt2=Tcablevec4[0]

        Tcable_todos=[Tcablecont-273.15,Tcablecont2-
273.15,Tcablealt-273.15,Tcablealt2-273.15]
        print(Tcable_todos)

    n=n+1;
    Pvieja=3*230*Ialtantes
    Pnueva=230*Idiseñoalt+750*Idiseñocont
    print(Pvieja,Pnueva)

```

```
return(Tcablecont-273.15)
```

ANEXO D

```
import numpy as np

import femm
cable_data={'Voltalene_16':{'I_z':58,'espesor':0.0007,'r':1.91,'d_ext':0.0083,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':16},

'Voltalene_25':{'I_z':74,'espesor':0.0009,'r':1.2,'d_ext':0.0099,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':25},

'Voltalene_35':{'I_z':90,'espesor':0.0009,'r':0.868,'d_ext':0.0108,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':35},

'Voltalene_50':{'I_z':107,'espesor':0.001,'r':0.641,'d_ext':0.0125,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':50},

'Voltalene_70':{'I_z':132,'espesor':0.0011,'r':0.443,'d_ext':0.0145,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':70},

'Voltalene_95':{'I_z':157,'espesor':0.0011,'r':0.32,'d_ext':0.0158,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':95},

'Voltalene_120':{'I_z':178,'espesor':0.0012,'r':0.253,'d_ext':0.0174,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':120},

'Voltalene_150':{'I_z':201,'espesor':0.0014,'r':0.206,'d_ext':0.0193,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':150},

'Voltalene_185':{'I_z':226,'espesor':0.0016,'r':0.164,'d_ext':0.0214,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':185},

'Voltalene_240':{'I_z':261,'espesor':0.0017,'r':0.125,'d_ext':0.0242,'k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':240},

'Voltalene_300':{'I_z':295,'espesor':0.0018,'r':0.1,'d_ext':0.0267,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':300},
    }
    selected_cable = 'Voltalene_240' #Seccion de cable
    Seccion=cable_data[selected_cable]['seccion'];

#Datos condiciones del cableado

rhotierra=2.5
Profzanja=2;
Longzanja=2;
Profcable=0.7; #en m
Tamb=273.15+40; #kelvin
Tsuelo=273.153+20;#kelvin
NumCables=1;
```

```

def Temp_cable(Idiseñocont, Idiseñoalt, Tcable=293.15):

    Tcablecont=Tcable
    Tcablealt=Tcable
    Tprev=Tcable;
    #Propiedades del cable

    AislanteKx=0.3;
    EnvolventeKx=0.35;
    TierraKx=1/rhotierra;
    TierraKy=TierraKx;
    AislanteKy=AislanteKx;
    EnvolventeKy=EnvolventeKx;

    femm.openfemm()

    Ialtantes=cable_data[selected_cable]['I_z']
    Espesor=cable_data[selected_cable]['espesor']
    rtref=cable_data[selected_cable]['r']
    Dext=cable_data[selected_cable]['d_ext']
    CableKx=cable_data[selected_cable]['k_conductor']
    alfa=cable_data[selected_cable]['alfa']
    SepCabl=2*Dext
    NumTernas=NumCables;
    n=0;
    y=2*Dext+SepCabl

    Rcable=np.sqrt(Seccion*1e-6)/(3.1416)
    Envolvente=(Dext/2)-(Rcable+Espesor)
    CableKy=CableKx;

    femm.newdocument(2);
    femm.hi_probdef('meters','planar',1e-8,20,30);

    for it in range(NumTernas):

        # DIBUJO LA ZANJA
        femm.hi_drawline(Longzanja,0,-Longzanja,0)
        femm.hi_drawline(-Longzanja,0,-Longzanja,-Profzanja)
        femm.hi_drawline(-Longzanja,-Profzanja,Longzanja,-Profzanja)
        femm.hi_drawline(Longzanja,-Profzanja,Longzanja,0)
        #Cable NODOS
        femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
        femm.hi_addnode(Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
        femm.hi_addnode(-Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
        femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
        femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode(Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode(-Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable+1.01*Dext)

```

```

        #Aislante NODOS
        femm.hi_addnode (Dext/2-Espesor-Rcable+n*y, -Profcable)
        femm.hi_addnode (Dext/2+Rcable+Espesor+n*y, -Profcable)
        femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y, -Profcable)
        femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y, -Profcable)
        femm.hi_addnode (Dext/2-Espesor-Rcable+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (Dext/2+Rcable+Espesor+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        #Envolvente NODOS
        femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y, -
Profcable)
        femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y, -
Profcable)
        femm.hi_addnode (+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y, -
Profcable)
        femm.hi_addnode (+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y, -
Profcable)
        femm.hi_addnode (-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)
        femm.hi_addnode (+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y, -
Profcable+1.01*Dext)

        #dibujo 1 cable
        femm.hi_addarc (Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable, Dext/2-
Rcable+n*y, -Profcable, 180, 1)
        femm.hi_addarc (Dext/2-Rcable+n*y, -
Profcable, Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable, 180, 1)
        #DIBUJO 2 CABLE
        femm.hi_addarc (-Dext/2-Rcable+n*y, -Profcable, -
Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable, 180, 1)
        femm.hi_addarc (-Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable, -Dext/2-
Rcable+n*y, -Profcable, 180, 1)
        # Dibujo 3 cable

        femm.hi_addarc (Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, Dext/2-
Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, 180, 1)
        femm.hi_addarc (Dext/2-Rcable+n*y, -
Profcable+1.01*Dext, Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, 180, 1)
        #DIBUJO 4 CABLE
        femm.hi_addarc (-Dext/2-Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, -
Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, 180, 1)
        femm.hi_addarc (-Dext/2+Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, -
Dext/2-Rcable+n*y, -Profcable+1.01*Dext, 180, 1)

        #el aislante del primero

```



```

    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable-Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
    #el aislante del segundo
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
    #el aislante del tercero
    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,Dext/2-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    #el aislante del cuarto
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    #envolvente del primero
    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #envolvente del segundo
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #envolvente del tercero
    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    #envolvente del cuarto
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable+1.01*Dext,180,1)

    #Tres cables
    femm.hi_addblocklabel(Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(Dext/2+n*y,-Proficable+1.01*Dext)
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2+n*y,-Proficable+1.01*Dext)

    #Tierra
    femm.hi_addblocklabel(0,-Proficable/2)

```

```

        #aislante
        femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
        femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
        femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+1.01*Dext)
        femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+1.01*Dext)
        #envolvente
        femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
        femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
        femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable+1.01*Dext)
        femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable+1.01*Dext)
        # DEFINO LOS LIMITES
        femm.hi_selectsegment(Longzanja,-Profzanja/2);
        femm.hi_selectsegment(-Longzanja,-Profzanja/2);
        femm.hi_selectsegment(0,-Profzanja);
        femm.hi_setsegmentprop('TierraLimite',0,1,0,0,'<None>');
#propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
        femm.hi_clearselected()

        femm.hi_selectsegment(0,0);
        femm.hi_setsegmentprop('ConvecAire',0,1,0,0,'<None>')
        femm.hi_clearselected()

#ABRO FEMM
for it in range (5):    #PROCESO ITERATIVO

        Tref=293.15;
        Atalt=Tcablealt-Tref;
        Atcont=Tcablecont-Tref;

        rtcablealt=rtref*(1+(alfa*Atalt))
        rtcablecont=rtref*(1+(alfa*Atcont))

#GENERACION DEL CABLE JOULE/M*3

CableGenAlt=rtcablealt*(Idiseñoalt*Idiseñoalt)/((Rcable*Rcable*3.1416)
*1000)

CableGenCont=rtcablecont*(Idiseñocont*Idiseñocont)/((Rcable*Rcable*3.1
416)*1000)

femm.hi_addmaterial('CableMonof',CableKx,CableKy,CableGenAlt,0);
        femm.hi_addmaterial('Tierra',TierraKx,TierraKy,0,0);

```

```

femm.hi_addmaterial('CableCont',CableKx,CableKy,CableGenCont,0);

femm.hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('Envolvente',EnvolventeKx,EnvolventeKy,0,0);

        femm.hi_addboundprop('TierraLimite',0,Tsuelo,0,0,0,0);
        femm.hi_addboundprop('ConvecAire',2,0,0,Tamb,5,0);

        # AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
        femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Profcable);
        femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Profcable);
        femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Profcable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Profcable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(0,-Profcable/2);
        femm.hi_setblockprop('Tierra',0,0.05,0);      #"blockname",
automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group

```

```

        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable+1.01*Dext);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        if(n==(NumTernas-1)):
            femm.hi_saveas('auto-CodigoTermico.feh')

        femm.hi_analyze()

        femm.hi_loadsolution()

        femm.ho_seteditmode('area');

```

```

femm.ho_selectblock(Dext/2+n*y,-Proficable)
Tcablevec1=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablecont=Tcablevec1[0]

#Tprev=Tcable;
femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(-Dext/2+n*y,-Proficable)
Tcablevec2=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablecont2=Tcablevec2[0]

femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(Dext/2+n*y,-Proficable+1.01*Dext)
Tcablevec3=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablealt=Tcablevec3[0]

#Tprev=Tcable;
femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(-Dext/2+n*y,-Proficable+1.01*Dext)
Tcablevec4=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablealt2=Tcablevec4[0]

Tcable_todos=[Tcablecont-273.15,Tcablecont2-
273.15,Tcablealt-273.15,Tcablealt2-273.15]
print(Tcable_todos)
n=n+1;
Pvieja=3*230*Ialtantes
Pnueva=230*Idiseñoalt+750*Idiseñocont
print(Pvieja,Pnueva)

return(Tcablecont-273.15)

```

ANEXO E

```

import numpy as np

import femm
cable_data={'Voltalene_16':{'I_z':58,'espesor':0.0007,'r':1.91,'d_ext':0.0083,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':16},
'Voltalene_25':{'I_z':74,'espesor':0.0009,'r':1.2,'d_ext':0.0099,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':25},
'Voltalene_35':{'I_z':90,'espesor':0.0009,'r':0.868,'d_ext':0.0108,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':35},
'Voltalene_50':{'I_z':107,'espesor':0.001,'r':0.641,'d_ext':0.0125,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':50},
'Voltalene_70':{'I_z':132,'espesor':0.0011,'r':0.443,'d_ext':0.0145,'k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':70},

```

```

'Voltalene_95':{'I_z':157,'espesor':0.0011,'r':0.32,'d_ext':0.0158,'k_
conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':95},

'Voltalene_120':{'I_z':178,'espesor':0.0012,'r':0.253,'d_ext':0.0174,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':120},

'Voltalene_150':{'I_z':201,'espesor':0.0014,'r':0.206,'d_ext':0.0193,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':150},

'Voltalene_185':{'I_z':226,'espesor':0.0016,'r':0.164,'d_ext':0.0214,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':185},

'Voltalene_240':{'I_z':261,'espesor':0.0017,'r':0.125,'d_ext':0.0242,'
k_conductor':210,'alfa':0.00407, 'seccion':240},

'Voltalene_300':{'I_z':295,'espesor':0.0018,'r':0.1,'d_ext':0.0267,'k_
conductor':210,'alfa':0.00407,'seccion':300},
    }
    selected_cable = 'Voltalene_240' #Seccion de cable
    Seccion=cable_data[selected_cable]['seccion'];

#Datos condiciones del cableado

rhotierra=2.5
Profzanja=2;
Longzanja=2;
Profcable=0.7; #en m
Tamb=273.15+40; #kelvin en la norma 30 y en el catalogo 40
Tsuelo=273.153+20;#kelvin
NumCables=1;
def Temp_cable(Tcable=293.15):

    Tcablecont=Tcable
    Tcablealt=Tcable
    Tprev=Tcable;
    #Propiedades del cable

    AislanteKx=0.3;
    EnvolverteKx=0.35;
    TierraKx=1/rhotierra;
    TierraKy=TierraKx;
    AislanteKy=AislanteKx;
    EnvolverteKy=EnvolverteKx;

    femm.openfemm()

    Ialtantes=cable_data[selected_cable]['I_z']
    Espesor=cable_data[selected_cable]['espesor']
    rref=cable_data[selected_cable]['r']
    Dext=cable_data[selected_cable]['d_ext']
    CableKx=cable_data[selected_cable]['k_conductor']
    alfa=cable_data[selected_cable]['alfa']

```

```

SepCabl=2*Dext
NumTernas=NumCables;
n=0;
y=2*Dext+SepCabl

Rcable=np.sqrt(Seccion*1e-6)/(3.1416)
Envolvente=(Dext/2)-(Rcable+Espesor)
CableKy=CableKx;

femm.newdocument(2);
femm.hi_probdef('meters','planar',1e-8,20,30);

for it in range(NumTernas):

    # DIBUJO LA ZANJA
    femm.hi_drawline(Longzanja,0,-Longzanja,0)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,0,-Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(-Longzanja,-Profzanja,Longzanja,-Profzanja)
    femm.hi_drawline(Longzanja,-Profzanja,Longzanja,0)
    #Cable NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(Rcable+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #Aislante NODOS
    femm.hi_addnode(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Profcable)
    femm.hi_addnode(Rcable+Espesor+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable-Espesor+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(Rcable+Espesor+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addnode(-Rcable-Espesor+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #Envolvente NODOS
    femm.hi_addnode(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Profcable)
    femm.hi_addnode(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Profcable)

```

```

        femm.hi_addnode(+Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(+Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable)
        femm.hi_addnode(Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(-Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
        femm.hi_addnode(-Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

        #dibujo 1 cable
        femm.hi_addarc(Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(Dext/2-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        #DIBUJO 2 CABLE
        femm.hi_addarc(-Dext/2-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        # Dibujo 3 cable

        femm.hi_addarc(-Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        femm.hi_addarc(+Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -
Rcable+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        #neutro
        femm.hi_addarc(-Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        femm.hi_addarc(+Rcable+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -
Rcable+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        #el aislante del primero
        femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+n*y,-Proficable,Dext/2-
Rcable-Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
        #el aislante del segundo
        femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,-
Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,180,1)
        femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable,-Dext/2-
Espesor-Rcable+n*y,-Proficable,180,1)
        #El aislante del tercero
        femm.hi_addarc(-Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        femm.hi_addarc(+Rcable+Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -Rcable-Espesor+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
        #El aislante del neutro

```



```

    femm.hi_addarc(-Rcable-Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Rcable+Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)), -Rcable-Espesor+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #envolvente del primero
    femm.hi_addarc(Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(Dext/2+Espesor+Rcable+Envolvente+n*y,-
Proficable,Dext/2-Rcable-Espesor-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #envolvente del segundo
    femm.hi_addarc(-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    femm.hi_addarc(-Dext/2+Rcable+Espesor+Envolvente+n*y,-
Proficable,-Dext/2-Espesor-Rcable-Envolvente+n*y,-Proficable,180,1)
    #Envolvente del tercero
    femm.hi_addarc(-Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),Dext/2+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Dext/2+n*y,-Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    #Envolvente del neutro
    femm.hi_addarc(-Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)),Dext/2+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)
    femm.hi_addarc(+Dext/2+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3)/2)),-
Dext/2+n*y,-Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)),180,1)

    #Tres cables
    femm.hi_addblocklabel(Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addblocklabel(+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

    #Tierra
    femm.hi_addblocklabel(0,-Proficable/2)
    #aislante
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-(Espesor/2)-Rcable+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    femm.hi_addblocklabel(-(Espesor/2)-Rcable+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    #envolvente
    femm.hi_addblocklabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable)
    femm.hi_addblocklabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))

```

```

    femm.hi_addblocklabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
    # DEFINO LOS LIMITES
    femm.hi_selectsegment(Longzanja,-Profzanja/2);
    femm.hi_selectsegment(-Longzanja,-Profzanja/2);
    femm.hi_selectsegment(0,-Profzanja);
    femm.hi_setsegmentprop('TierraLimite',0,1,0,0,'<None>');
#propname", elementsize, automesh, hide, group, "inconductor")
    femm.hi_clearselected()

    femm.hi_selectsegment(0,0);
    femm.hi_setsegmentprop('ConvecAire',0,1,0,0,'<None>')
    femm.hi_clearselected()

#ABRO FEMM
for it in range (5):    #PROCESO ITERATIVO

    Tref=293.15;
    Atalt=Tcablealt-Tref;
    Atcont=Tcablecont-Tref;

    rtcablealt=rtref*(1+(alfa*Atalt))
    rtcablecont=rtref*(1+(alfa*Atcont))

#GENERACION DEL CABLE JOULE/M*3
    Idiseñoalt=Ialtantes

    #a igualdad de potencia
    Pvieja=3*230*Ialtantes;
    Pnueva=Pvieja
    Idiseñocont=(Pnueva-230*Ialtantes)/750

    Perdvieja=3*rtcablealt*(Ialtantes*Ialtantes)

Perdnueva=2*rtcablealt*(Ialtantes*Ialtantes)+2*rtcablecont*(Idiseñocon
t*Idiseñocont)

CableGenAlt=rtcablealt*(Idiseñoalt*Idiseñoalt)/((Rcable*Rcable*3.1416)
*1000)

CableGenCont=rtcablecont*(Idiseñocont*Idiseñocont)/((Rcable*Rcable*3.1
416)*1000)

femm.hi_addmaterial('CableMonof',CableKx,CableKy,CableGenAlt,0);
    femm.hi_addmaterial('Tierra',TierraKx,TierraKy,0,0);

femm.hi_addmaterial('CableCont',CableKx,CableKy,CableGenCont,0);

femm.hi_addmaterial('Aislante',AislanteKx,AislanteKy,0,0);

```

```

femm.hi_addmaterial('Envolvente',EnvolventeKx,EnvolventeKy,0,0);

    femm.hi_addboundprop('TierraLimite',0,Tsuelo,0,0,0,0);
    femm.hi_addboundprop('ConvecAire',2,0,0,Tamb,5,0);

# AÑADO LOS MATERIALES A LOS PUNTOS
femm.hi_selectlabel(Dext/2+n*y,-Profcable);
femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Dext/2+n*y,-Profcable);
femm.hi_setblockprop('CableMonof',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+n*y,-
Profcable+(Dext*(np.sqrt(3)/2)));
femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+n*y,-Profcable-
(Dext*(np.sqrt(3)/2)));
femm.hi_setblockprop('CableCont',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(0,-Profcable/2);
femm.hi_setblockprop('Tierra',0,0.05,0);      #"blockname",
automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(+Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

femm.hi_selectlabel(-Dext/2-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Profcable);
femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
femm.hi_clearselected()
femm.hi_zoomnatural()

```

```

        femm.hi_selectlabel(-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-(Espesor/2)+n*y-Rcable,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Aislante',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(+Dext/2-Espesor-Rcable-
(Envolvente/2)+n*y,-Proficable);
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

        femm.hi_selectlabel(-Espesor-Rcable-(Envolvente/2)+n*y,-
Proficable-(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)));
        femm.hi_setblockprop('Envolvente',0,0.0005,0);
#"blockname", automesh, meshsize, group
        femm.hi_clearselected()
        femm.hi_zoomnatural()

if(n==(NumTernas-1)):
        femm.hi_saveas('auto-CodigoTermico.feh')

        femm.hi_analyze()

        femm.hi_loadsolution()

        femm.ho_seteditmode('area');
        femm.ho_selectblock(Dext/2+n*y,-Proficable)
        Tcablevec1=femm.ho_blockintegral(0)

```

```

Tcablecont=Tcablevec1[0]

#Tprev=Tcable;
femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(-Dext/2+n*y,-Proficable)
Tcablevec2=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablecont2=Tcablevec2[0]

femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(+n*y,-
Proficable+(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
Tcablevec3=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablealt=Tcablevec3[0]

femm.ho_seteditmode('area');
femm.ho_selectblock(+n*y,-Proficable-
(Dext*(np.sqrt(3.1)/2)))
Tcablevec4=femm.ho_blockintegral(0)
Tcablealt2=Tcablevec4[0]

Tcable_todos=[Tcablecont-273.15,Tcablecont2-
273.15,Tcablealt-273.15,Tcablealt2-273.15]
print(Tcable_todos)

n=n+1;

print(Perdvieja,Perdnueva,Pvieja)

return(Tcablecont-273.15)

```

ANEXO F

```

def fun(x,Imax=cable_data[selected_cable]['I_z']):
    T_0 = 70*(x**2)/(Imax**2)+20
    fx = Temp_cable(x, Tcable=T_0+273.15)-90
    return fx

def bisect(fun,lb,ub, tolera=0.001):
    # INGRESO
    a = lb
    b = ub
    tramo = b-a

    fa = fun(a)
    fb = fun(b)
    while (abs(tramo)>tolera):

```

```
c = (a+b)/2
fc = fun(c)
print(f'a = {a}, b = {b}, c = {c}')

if(np.sign(fa) == np.sign(fc)):
    a=c;
else:
    b=c;
tramo = b-a
raiz = c
return raiz
```

