

Trabajo Fin de Máster

Ingeniería Industrial

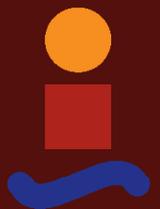
Análisis térmico de cables submarinos HVAC tripolares enterrados en el subsuelo marino

Autor: Manuel Seco Ruiz

Tutores: Pedro Cruz-Romero, Juan Carlos del Pino López

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

Sevilla, 2020



Trabajo Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Análisis térmico de cables submarinos HVAC tripolares enterrados en el subsuelo marino

Autor:

Manuel Seco Ruiz

Tutores:

Pedro Cruz-Romero

Juan Carlos del Pino López

Dpto. de Ingeniería Eléctrica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla
Sevilla, 2020

Trabajo Fin de Máster: Análisis térmico de cables submarinos HVAC tripolares enterrados en el subsuelo marino

Autor: Manuel Seco Ruiz

Tutores: Pedro Cruz-Romero,
Juan Carlos del Pino López

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

A mi familia.

A mis amigos.

A ella.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo supone el cierre de una larga (más de lo que debería haber sido) pero apasionante etapa universitaria de nueve años. Son demasiados los agradecimientos que tendría que formular a tantas personas con las que he tenido la suerte de coincidir a lo largo de estos años, así que voy a intentar recoger en este fragmento el mayor número posible de ellos.

En primer lugar, gracias a los tutores de este trabajo Pedro y Juan Carlos, por toda la ayuda prestada y todas las correcciones aportadas. Ellos me asignaron este trabajo cuando nadie daba un duro por nosotros y en unas condiciones de distanciamiento que han supuesto todo un reto, por lo que les estoy enormemente agradecido. Extiendo el agradecimiento a todos los profesores que nos han impartido clase tanto en el grado y como en el máster; a los buenos, por aportarnos conocimientos interesantes y despertar en nosotros la curiosidad, el asombro y el ingenio; a los malos, por enseñarnos lo que no hay que hacer. De todo se aprende.

Nueve años dan para hacer muchos amigos, y buenos. Cómo no acordarme de toda mi gente de Esiland, la Shavalería, los Máquinas, y tantos y tantos compañeros. Ha sido todo un honor compartir con ellos las innumerables horas de clase y biblioteca, pero sobre todo las horas de juerga, viajes y amistad. Una y mil veces volvería a escoger esta maravillosa carrera y a estos magníficos compañeros.

También quiero dar las gracias a todos aquellos que han compartido conmigo esta etapa, aunque no desde dentro. A mi familia, mis padres y mis hermanos, por apoyarme siempre y por no cansarse de que les explique qué son los elementos finitos. A todos los amigos de otras carreras y ramas de la Universidad, sobre todo a Álvaro Pereira, el capellán de la universidad, y a todos los amigos del SARUS. Y por supuesto, a ella, que me ha alegrado cada día de estos últimos años de carrera y siempre me ha sostenido cuando quería tirar la toalla.

Pido perdón a todo el que se haya sentido ofendido en algún momento por mi culpa y, por último, doy gracias a Dios por ser ese Padre bueno que nos ama y nos regala esta vida apasionante que merece la pena ser vivida.

Manuel Seco Ruiz

Valencia, 2020

RESUMEN

Este trabajo aborda, mediante un modelo de elementos finitos, el problema térmico de cables tripolares de alta tensión enterrados bajo el lecho marino. El suelo marino es un terreno poroso saturado de agua, por lo que en él pueden originarse corrientes convectivas alrededor del cable. Estos movimientos de convección son provocados por las diferencias de densidad que sufre el agua al calentarse alrededor del cable. Dichas corrientes convectivas promueven una mayor refrigeración del cable y, por tanto, disminuyen la temperatura del mismo. Se pretende estudiar el comportamiento de este tipo de cables considerando el suelo marino como un medio poroso, y ver qué ventajas aporta este enfoque en comparación con los modelos más simplificados que suelen usarse comúnmente, en los que solo se considera transmisión de calor por conducción.

ABSTRACT

This work addresses, through a finite element model, the thermal problem of high voltage three-pole cables buried under the seabed. The sea floor is a porous terrain saturated with water, so convective currents can originate around the cable. These convection movements are caused by the differences in density that the water suffers when it heats up around the cable. These convective currents promote a greater cooling of the cable and, therefore, decrease its temperature. The aim is to study the behaviour of this type of cable considering the sea floor as a porous medium and see what advantages this approach provides compared to the more simplified models commonly used, where only heat transmission by conduction is considered.

ÍNDICE

Agradecimientos.....	ix
Resumen.....	xi
Abstract.....	xiii
Índice.....	xv
Índice de Tablas.....	xvii
Índice de Figuras.....	xix
1 Introducción.....	1
2 Cables submarinos.....	3
2.1 Principales aplicaciones.....	3
2.2 Elementos de un cable.....	4
2.2.1 Conductor.....	4
2.2.2 Pantalla del conductor y el aislamiento.....	5
2.2.3 Sistema de aislamiento.....	5
2.2.4 Cubierta impermeable.....	6
2.2.5 Armadura.....	6
2.2.6 Cubierta exterior.....	6
2.3 Tipologías.....	6
2.3.1 Cables HVAC.....	6
2.3.2 Cables HVDC.....	7
2.3.3 Otras tipologías.....	7
3 Estado del arte.....	9
3.1 Modelos de Elementos Finitos.....	9
3.2 Modelos de lecho marino.....	11
4 Módulo “Subsurface Flow” de COMSOL Multiphysics.....	15
4.1 Interfaz de flujo libre y flujo en medios porosos.....	16
4.1.1 Introducción.....	16
4.1.2 Formulación de las ecuaciones.....	16
4.2 Interfaz de transferencia de calor en medios porosos.....	17
4.2.1 Criterios para aplicar equilibrio/desequilibrio térmico local.....	17
4.2.2 Equilibrio térmico local.....	17
5 Modelo de elementos finitos.....	19
5.1 Modelo electromagnético.....	20
5.2 Modelo termofluido.....	21
5.3 Modelo acoplado.....	23
5.4 Análisis de convergencia para diferentes mallas.....	24
5.4.1 Modelo electromagnético.....	24
5.4.2 Modelo termofluido.....	25
5.5 Condiciones de contorno consideradas.....	25
6 Resultados.....	27
6.1 Validación del modelo con otras publicaciones.....	27
6.2 Comparación de los resultados con un modelo simplificado.....	29
7 Conclusiones.....	33
Apéndice I – Aproximación de Boussinesq.....	35
Definición de la aproximación de Boussinesq.....	35
Cambio de presión.....	35
Apéndice II – Propiedades del agua salada.....	37

Glosario de símbolos y conceptos	40
Glosario de acrónimos y siglas.....	42
Referencias.....	43

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades térmicas de algunos suelos submarinos [3].....	1
Tabla 2. Cinco tipos genéricos de cables submarinos, [3]	8
Tabla 3. Propiedades térmicas del agua y del lecho marino [2].....	11
Tabla 4. Rango de algunas propiedades utilizadas en [5]	13
Tabla 5. Modelos empleados en este trabajo	19
Tabla 6. Propiedades del suelo marino en seco.....	20
Tabla 7. Propiedades de algunos materiales del cable.....	21
Tabla 8. Valores de algunas propiedades significativas en las simulaciones ilustradas en la Figura 22 y la Figura 23	27

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución de los cables submarinos que alimentan a la isla de Vancouver, en Canadá [3].....	3
Figura 2. Instalación del cable de suministro de una planta petrolífera [3].....	3
Figura 3. Sección transversal de un cable tripolar	4
Figura 4. Tipos de configuraciones del conductor, [3].....	5
Figura 5. Cable HVAC tripolar sumergido	7
Figura 6. Cable HVDC bipolar utilizado en la conexión NorNed entre Noruega y los Países Bajos [3].....	7
Figura 7. Equivalente eléctrico utilizado para la resolución del problema térmico, en el que se ha tenido en cuenta la presencia de una junta [7]	9
Figura 8. Modelo 2D empleado para calcular la distribución de temperaturas en el interior de un cable HVAC [9].....	10
Figura 9. Modelo 2.5D con el circuito eléctrico equivalente que conecta los cables de la armadura [10]	10
Figura 10. Comparación entre un modelo periódico completo (a) y un modelo simplificado (b), [11].....	10
Figura 11. Modelo 2D de [5]	13
Figura 12. Esquema del modelo utilizado para resolver el problema electromagnético	20
Figura 13. Detalle del cable utilizado en el modelo y sus materiales.....	21
Figura 14. Esquema del primer modelo que se quiso implementar, con las interfaces de COMSOL aplicadas en cada dominio	22
Figura 15. Esquema del modelo termofluido utilizado finalmente en las simulaciones. Solo se ha hecho uso de dos físicas: “Heat Transfer in Porous Media”, aplicada en todo el modelo, y “Free and Porous Media Flow”, aplicada solo en el exterior del cable.....	23
Figura 16. Comparativa entre el calor generado en el modelo electromagnético (a) y en el modelo acoplado (b) para una intensidad nominal de 1100 A.....	23
Figura 17. Ejemplos de mallas de tamaño “Normal” utilizadas para el análisis de la convergencia. La malla del modelo electromagnético (a) tiene 53382 elementos y la del modelo termofluido (b) tiene 34700 elementos. .24	24
Figura 18. Representación gráfica de la diferencia relativa entre una solución y la anterior para dos parámetros del modelo electromagnético.....	25
Figura 19. Representación gráfica de la diferencia relativa entre una solución y la anterior para dos parámetros del modelo termofluido.....	25
Figura 20. Esquema representativo de las condiciones de contorno aplicadas en los modelos.	26
Figura 21. Representaciones de la temperatura y la velocidad calculadas sobre la línea discontinua. Se aprecia que ninguna de las magnitudes varía bruscamente cerca de los extremos, lo que indica que es apropiado utilizar una imposición de temperatura fija (10 °C) y velocidad nula sobre los contornos.	26
Figura 22. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para un valor de permeabilidad de 10^{-10} m ² . Los contornos representan la temperatura, las flechas verdes representan la velocidad del agua y las flechas rojas, el flujo de calor convectivo.....	27
Figura 23. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para un valor de permeabilidad de 10^{-14} m ²	28
Figura 24. Esquema ilustrativo de la línea sobre la que se ha realizado la integración lineal del flujo convectivo	28
Figura 25. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para una simulación de barrido paramétrico.....	29
Figura 26. Comparativa entre el modelo 1 y el modelo 2. En la gráfica de la izquierda (a) se muestra la temperatura máxima a 0.2 m de la interfaz entre el suelo marino y el agua. La línea discontinua azul representa la temperatura en la interfaz. En la gráfica de la derecha (b) se muestra la temperatura máxima alcanzada en el conductor.....	30
Figura 27. Detalles de la distribución de temperaturas en algunas de las simulaciones realizadas para comparar el modelo 1, (a) y (c), y el modelo 2, (b) y (d).....	31
Figura 28. Representación gráfica de los valores de las propiedades del material de agua salada desarrollado para COMSOL.....	38

1 INTRODUCCIÓN

El modelado y análisis mediante elementos finitos de cables de potencia enterrados es una práctica habitual desde hace años, por ejemplo en [1]. Es utilizado de manera frecuente por los ingenieros eléctricos para realizar cálculos más precisos de ampacidad (intensidad máxima operativa del cable) y disipación de calor en el suelo circundante. Esto permite realizar el dimensionado de cables en situaciones específicas o de manera más ajustada, ya que es bien conocido que las normas técnicas, como el IEC 60287, tienden a un sobredimensionamiento de las secciones [2].

Existe una gran cantidad de literatura acerca del modelado de cables subterráneos mediante el método de los elementos finitos. Ocurre de manera similar para el caso de los cables submarinos, cables generalmente enterrados bajo el lecho marino, aunque bien es cierto que no de una forma tan frecuente.

El conocimiento preciso de lo que ocurre en el interior y alrededor de un cable submarino es de vital importancia, ya que un mal dimensionamiento del cable debido a un modelo de cálculo alejado de la realidad puede tener importantes impactos, tanto económicos como medioambientales. Si el cable está sobredimensionado, es decir, la temperatura de operación se encuentra alejada de la máxima admisible, se podría haber ahorrado en el coste del mismo, lo cual supone una pérdida económica para la empresa que lo explote. Además, en ese caso el cable tiene margen para aumentar su ampacidad, lo cual evitaría que esa energía que no se está transportando por el cable tenga que ser suplida por fuentes provenientes de combustibles fósiles. Si el cable está subdimensionado, ocurre de forma similar. Las pérdidas eléctricas en el cable suponen su mayor impacto medioambiental, no tanto por el calentamiento local alrededor del cable, sino más bien por la cantidad de CO₂ liberada por las fuentes de energía basadas en los combustibles fósiles que deben suplir esa energía perdida a lo largo del cable [3].

El conocimiento preciso de las propiedades térmicas de los alrededores de un cable submarino enterrado puede tener una gran influencia sobre el dimensionado del mismo y, en última instancia, sobre los costes de instalación y de explotación del cable. Por tanto, es de capital importancia disponer de dicha información y de modelos térmicos avanzados.

La resistividad térmica del terreno depende del material que lo conforma, de la densidad seca, la distribución del tamaño de grano, la humedad y el contenido de materia orgánica. Por tener un orden de magnitud sobre la resistividad térmica de los suelos marinos, la Autoridad Marítima Alemana (*BSH, Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie*), asume una resistividad térmica de 0.7 K·m/W para suelos totalmente empapados. En el Mar del Norte, por otro lado, se han encontrado valores de 1.03 K·m/W. Otras mediciones arrojan valores de 0.5 K·m/W [3]. En la Tabla 1 se muestran más valores de diversas referencias que recoge [3].

Tabla 1. Propiedades térmicas de algunos suelos submarinos [3]

	Capacidad calorífica volumétrica, $\rho \cdot c_p$ (MJ/(m ³ K))	Resistividad térmica (K·m/W)
Grava	2.4	0.33 - 0.55
Arena	2.2 - 2.9	0.2 - 0.67
Arcilla/limo	1.6 - 3.4	0.56 - 1.11

Por lo tanto, la resistividad térmica del suelo marino depende fuertemente de la localización geográfica y de las características del terreno, anteriormente mencionadas. Esto hace que sea de vital importancia la realización de un estudio marino que aporte datos para el cálculo de la resistividad térmica a lo largo del recorrido del cable. Pero una colección precisa de datos sobre el terreno no soluciona completamente el problema. De las muestras extraídas del emplazamiento de la instalación se puede obtener información sobre el material, la distribución del tamaño de grano y la humedad, pero el grado de compactación in situ es difícil de reproducir en el laboratorio, y este puede variar significativamente entre tierra virgen y después de haber sido depositada sobre el cable enterrado. Además, los alrededores del cable pueden no ser homogéneos debido a factores geomorfológicos o antropogénicos. Por ejemplo, hay cables que son enterrados en zanjas que más tarde son rellenadas con material

que no es de la zona, y en ocasiones los cables son protegidos por losas de hormigón o rocas. Todos estos factores alteran el comportamiento térmico del terreno.

Tanto en las normas técnicas sobre cables eléctricos enterrados como en la amplia mayoría de las investigaciones consultadas, el terreno alrededor del cable es modelado como un suelo homogéneo y compacto, donde la transferencia de calor tiene lugar únicamente por conducción.

Es cierto que en la norma técnica IEC 60287-1-1, cláusula 1.4.2, se considera un modelo térmico de dos zonas para el estado estacionario del cable, [4]. En este modelo se tiene en cuenta el secado del terreno en el entorno del cable y se diferencian dos zonas con resistividades térmicas distintas, la zona seca alrededor del cable y la zona húmeda. No obstante, solo se considera transmisión de calor por conducción en ambas zonas.

El enfoque anterior es bastante aceptable para el caso de cables subterráneos, pero en el caso de cables submarinos, enterrados bajo un lecho marino saturado de agua y con propiedades muy cambiantes, esta asunción conduce, en la mayoría de los casos, a resultados alejados de la realidad.

Se hace necesaria, por tanto, la adopción de modelos de terreno más complejos, que tengan en cuenta las diferentes propiedades de los sedimentos y su porosidad, e incluyan las propiedades térmicas del agua que los empapa y fluye a través de ellos.

En el capítulo 4 se detalla el modelo de lecho marino utilizado en este trabajo, compuesto por una matriz sólida rígida y un fluido que la atraviesa, con una fracción volumétrica de sólido θ_p que gobierna los balances de energía. En el modelo se considera un terreno saturado, es decir, que está siempre empapado de agua, ya que se encuentra varios metros bajo el nivel del mar. No se considera ninguna corriente marina, por lo que el movimiento del agua a través de la matriz es provocado únicamente por los cambios de densidad generados por el calentamiento alrededor del cable.

El modelo utilizado en este trabajo es muy parecido al empleado en [5], para el cual se hace uso de la ley de Darcy para el cálculo de la velocidad del fluido, y se tiene en cuenta una transferencia de calor por convección, además de la conductiva.

Este trabajo es la continuación del Trabajo de Fin de Grado “MODELADO TÉRMICO DE CABLES TRÍFASICOS SUBMARINOS”, de Alberto Rina Carpintero, [6]. El citado trabajo aborda el análisis térmico de un cable HVAC (*High Voltage Alternating Current*) de tres núcleos, enterrado bajo el lecho marino, mediante un modelo de elementos finitos 2D tomado de un tutorial de COMSOL sobre cables submarinos. Este modelo utiliza una descripción bastante realista del comportamiento electromagnético del cable para el cálculo de las pérdidas térmicas, pero asume un terreno circundante homogéneo y constante, en el cual la transmisión del calor tiene lugar únicamente por conducción.

El presente trabajo pretende ir un paso más allá del alcance del TFG anteriormente mencionado, ahondando en los aspectos teóricos y mejorando el modelado del problema. Para ello, se ha considerado un comportamiento más complejo del terreno circundante al cable y se ha hecho uso del módulo “Subsurface Flow” del software COMSOL, utilizado para simular flujos bajo superficie en materiales permeables, como puede ser el lecho marino.

2 CABLES SUBMARINOS

Este capítulo aborda brevemente los cables submarinos, sus principales funciones, los elementos que los componen y las diferentes tipologías que existen. La mayor parte de la información contenida en este capítulo ha sido obtenida de [3].

2.1 Principales aplicaciones

Los cables submarinos son los que se instalan bajo el mar y, generalmente, bajo el lecho marino con objeto de protegerlo ante los diferentes agentes que puedan dañarlo, principalmente la pesca de arrastre y los fondeos [4]. Estos cables pueden tener varios propósitos, sobre todo las comunicaciones y el transporte de energía eléctrica. Este trabajo se centra en el estudio de cables submarinos de energía, por lo que de ahora en adelante solo se hará referencia a ellos.

Los cables submarinos han sido empleados en múltiples aplicaciones desde hace más de cien años. En sus primeros tiempos, se utilizaban para suministrar energía a instalaciones aisladas en el mar, como los faros. Más tarde, el principal objetivo de los cables submarinos fue el suministro de energía a islas cercanas a la costa (Figura 1). Desde los años sesenta del siglo pasado, han sido empleados también para conectar redes de potencia autónomas para mejorar su estabilidad. Hoy en día, la conexión de instalaciones en alta mar es de nuevo la principal aplicación, sobre todo el suministro de energía a plataformas petrolíferas (Figura 2) y la conexión de parques eólicos “offshore” para transportar la energía generada a tierra firme.

Los principales usos que se dan a los cables submarinos, pues, son:

- Suministro de energía a islas
- Enlace entre redes continentales
- Conexión de redes autónomas
- Parques eólicos marinos
- Suministro de plataformas petrolíferas

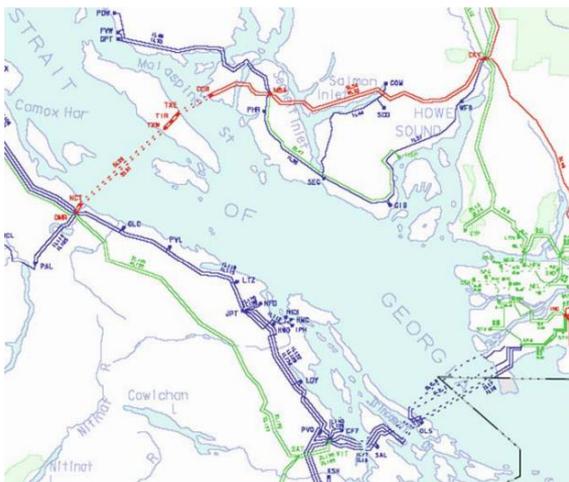


Figura 1. Distribución de los cables submarinos que alimentan a la isla de Vancouver, en Canadá [3]



Figura 2. Instalación del cable de suministro de una planta petrolífera [3]

2.2 Elementos de un cable

Tanto si se trata de cables HVDC (*High Voltage Direct Current*) como HVAC, todo cable submarino está formado por una serie de elementos comunes, que pueden apreciarse en la Figura 3.

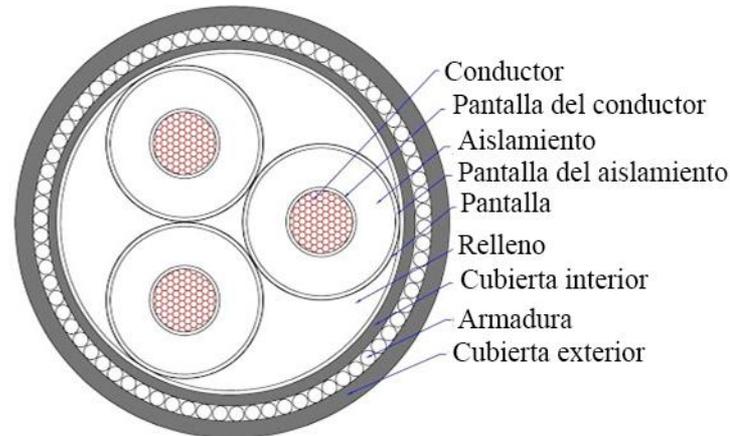


Figura 3. Sección transversal de un cable tripolar

En las siguientes secciones de este subcapítulo se describen los siguientes elementos:

- Conductor
- Pantalla del conductor y el aislamiento
- Sistema de aislamiento
- Cubierta impermeable
- Armadura
- Cubierta exterior

2.2.1 Conductor

Es la parte que conduce la corriente eléctrica y está hecha de cobre o aluminio. A pesar de que el cobre es más caro que el aluminio en relación a su conductividad ($59.6 \cdot 10^6$ S/m del cobre frente a $37.8 \cdot 10^6$ S/m del aluminio), es el más utilizado, debido precisamente a su mayor conductividad eléctrica, que permite secciones de conductor más pequeñas para transportar la misma corriente. De todas maneras, no existe una opción mejor que la otra en general; en cada situación debe evaluarse qué conductor es más conveniente. De hecho, no es inusual utilizar ambos materiales en diferentes tramos de una misma conducción.

La resistividad eléctrica (la propiedad inversa de la conductividad eléctrica) es la propiedad más importante del conductor. Dicha propiedad depende de la temperatura a la cual está sometido el conductor:

$$R_{\theta} = R_{20}(1 + \alpha(\theta - 20)) \quad (1)$$

Donde R_{θ} (Ωm) es la resistividad a una temperatura θ ($^{\circ}\text{C}$), R_{20} es la resistividad a 20°C y α es el coeficiente térmico de la resistividad eléctrica. Los principales factores que afectan a la resistividad específica o unitaria de un conductor son su sección transversal, su configuración y su proceso de fabricación. Las secciones de los conductores y sus resistencias están tabuladas en la norma IEC 60228, pero en los proyectos de conexiones submarinas suelen utilizarse cables hechos a la medida del proyecto, para ajustarse más a los requerimientos y a la casuística particular de cada ruta. Solo en raras ocasiones se pueden obtener cables submarinos de secciones estandarizadas en stock.

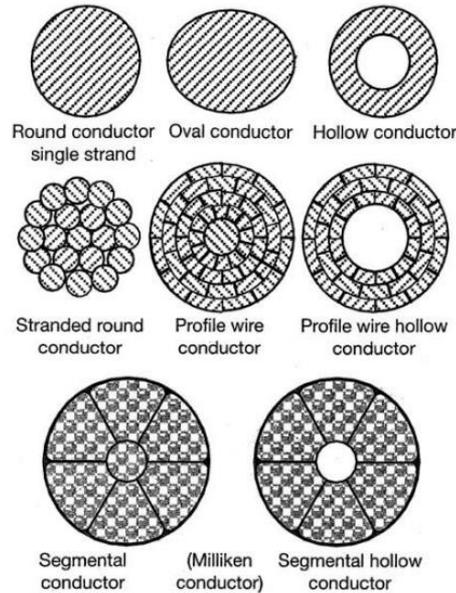


Figura 4. Tipos de configuraciones del conductor, [3]

2.2.2 Pantalla del conductor y el aislamiento

Es una delgada capa de XLPE semiconductor que asume las irregularidades en la superficie del conductor y evita que la capa de aislamiento esté sometida a concentración de tensiones, lo cual aumenta la resistencia del aislamiento a la ruptura dieléctrica. Además, proporciona una transición dieléctrica suave entre el conductor y el aislante.

Una capa igual es interpuesta entre el aislamiento y la pantalla exterior del cable, generalmente de cobre. Estas tres capas (pantalla del conductor – aislamiento – pantalla del aislamiento) conforman el sistema dieléctrico del cable. Para obtener un cable de alta calidad, estas tres capas son fabricadas simultáneamente en un sistema de extrusión triple.

Estas capas semiconductoras de XLPE están hechas de copolímeros basados en polietileno mezclados con un 40 % de carbono, suelen tener entre 1 y 2 mm de espesor y suponen una parte significativa del coste del cable debido al coste de los materiales de los que están hechas.

2.2.3 Sistema de aislamiento

El sistema de aislamiento proporciona una barrera eléctrica efectiva entre superficies sometidas a una alta diferencia de potencial (el conductor y el ambiente). En la fabricación de cables submarinos se emplean los mismos materiales que para cables terrestres, los cuales hoy en día son, básicamente, polietileno (PE) y polietileno reticulado (XLPE, *cross-linked polyethylene*).

Sin duda, el XLPE es el material mayoritariamente empleado por los fabricantes de cables submarinos. El XLPE se fabrica entrelazando las largas cadenas moleculares del polietileno para formar una red tridimensional. Esto provoca que el material deje de ser termoplástico y sea estable a temperaturas mucho más altas, al contrario que el polietileno de baja densidad, que comienza a derretirse a partir de los 80 °C. El XLPE se destruye por pirólisis a los 300 °C.

Los cables con aislamiento de XLPE presentan un amplio rango de tensión de ruptura dieléctrica, la cual depende de la formulación concreta del material, las condiciones de fabricación, la temperatura, la curva de tensión aplicada en el test, etc. Se pueden encontrar cables resistentes a voltajes superiores a 550 kV. Pero el elemento que limita esta tensión máxima de las líneas subacuáticas son las uniones, las cuales no suele tener una resistencia superior a 245-345 kV.

Existen otras tecnologías de aislamiento más antiguas, como los cables aislados con papel y rellenos de aceite o gas, pero sin duda están cada vez más en desuso, en favor de los cables aislados con XLPE.

2.2.4 Cubierta impermeable

El aislamiento dieléctrico debe estar protegido del contacto con el agua. La mayoría de los cables submarinos tienen una cubierta metálica para proporcionar protección y estanqueidad al cable. Estas cubiertas suelen estar fabricadas de aluminio, plomo, cobre u otros metales, aunque también existen cubiertas poliméricas recubiertas de un agente absorbente bajo ella, consiguiendo estanqueidades y niveles de humedad similares a las metálicas.

2.2.5 Armadura

El elemento constructivo más destacado de un cable submarino es la armadura, que proporciona tanto estabilidad eléctrica como protección mecánica. Los cables submarinos están sometidos a fuerzas de tracción mecánica durante su instalación debido al peso del tramo de cable colgante y a los movimientos verticales de la embarcación. Por tanto, los cables submarinos deben estar provistos de una armadura que aporte la rigidez necesaria para soportar estas fuerzas. Además, debe proteger el conjunto del cable de otras agresiones externas como los aparejos de pesca y las anclas.

La armadura presenta un principal inconveniente: si se fabrica de un material magnético puede contribuir de forma muy significativa a las pérdidas originadas en el cable. Para evitar o disminuir este problema se adoptan dos soluciones típicamente. La primera es el uso de materiales no magnéticos en la armadura, como cobre, aleaciones de cobre o aluminio, pero tiene el inconveniente de estos materiales son más caros y tienen peores propiedades mecánicas que el acero. La segunda solución consiste en colocar una gran pantalla de cobre alrededor del conductor, la cual conduce una corriente inducida igual pero de sentido contrario a la del conductor, de tal manera que se cancelan sus campos magnéticos. La desventaja de esta última son las pérdidas que se generan en la pantalla.

Últimamente también se emplean materiales compuestos (a base de fibras de Kevlar, Vectran o Twaron) como armadura, que consiguen aportar la misma rigidez tensional que una armadura de cables de acero.

La armadura, que generalmente se hace de cables de acero, necesita protección ante la corrosión del agua marina. Para ello, se aplica una fina capa de zinc a los cables y un recubrimiento de betún.

2.2.6 Cubierta exterior

Por último, la protección anticorrosión de la armadura es protegida por una capa exterior generalmente fabricada de polímeros extruidos o fibras enrolladas. Su función es proteger la capa de zinc y betún que recubre los cables de la armadura durante la fabricación, transporte e instalación del cable, así como durante el servicio bajo el agua, donde el cable puede verse sometido a diversos impactos.

2.3 Tipologías

Existen múltiples tipos de cables submarinos, pero actualmente se pueden diferenciar dos grandes grupos: los cables de corriente continua bipolares HVDC y los cables de corriente alterna tripolares HVAC.

2.3.1 Cables HVAC

Transportan corriente alterna trifásica de alta tensión. Se pueden presentar en dos configuraciones diferentes: tres cables unipolares individuales (en adelante, 1C), o un solo cable tripolar (en adelante, 3C). Cada configuración tiene sus ventajas e inconvenientes, y dependerá de cada proyecto en concreto la idoneidad de una u otra.

La configuración de tres cables 1C ofrece una mejor evacuación del calor generado en el cable (lo cual aumenta su ampacidad) y más facilidades en la instalación, ya que al ser un cable con un solo núcleo tiene un menor radio de flexión y puede almacenarse de manera más compacta. Además, su fabricación es mucho más sencilla y económica, lo cual permite fabricar longitudes de cable sin corte mucho mayores que en un cable 3C.

Sin embargo, los cables 1C tienen una serie de desventajas en relación a los 3C. En un cable 3C, los campos electromagnéticos de las tres fases se cancelan unos a otros en gran medida, lo cual permite dotar al cable de una armadura, generalmente de acero, mucho más sencilla sin que las pérdidas generadas en ella sean grandes. En cambio, un cable 1C necesita tener una armadura que minimice las pérdidas electromagnéticas, mediante las técnicas que se explican en el punto 2.2.5. Además, un cable 3C puede instalarse en una sola pasada, mientras

que tres cables 1 C necesitan tres pasadas.

Por otro lado, en el caso de tres cables 1C es mucho más sencillo y económico tener un cuarto cable de repuesto, por si alguno de los otros tres conductores sufriese algún daño. En el caso de un cable 3C, esto solo puede darse tendiendo otro cable 3C entero en paralelo al primero.



Figura 5. Cable HVAC tripolar sumergido

2.3.2 Cables HVDC

Los cables de corriente continua de alta tensión son cables bipolares, presentando un conductor para la corriente en un sentido y otro conductor para el retorno en el otro sentido. La principal ventaja de los cables de corriente continua es que, en una situación de operación estable, no producen campos electromagnéticos variables, lo cual no genera pérdidas electromagnéticas en la armadura ni corrientes inducidas. Además, si ambas fases tienen voltajes opuestos (como el cable de la Figura 6, que tiene unos voltajes de ± 450 kV), los campos magnéticos de ambas prácticamente se anulan el uno al otro.



Figura 6. Cable HVDC bipolar utilizado en la conexión NorNed entre Noruega y los Países Bajos [3]

2.3.3 Otras tipologías

Existe una gran multitud de tipologías y diseños diferentes de cables submarinos. De hecho, generalmente los cables submarinos no son productos estandarizados. Gran parte de los proyectos utilizan cables diseñados específicamente para ellos, en función de las condiciones del mismo. Sin embargo, sí que existen algunas tipologías genéricas de cables representativas de la mayoría de los cables submarinos instalados. Estas tipologías se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Cinco tipos genéricos de cables submarinos, [3]



Voltaje nominal	33 kV corriente alterna	150 kV corriente alterna	420 kV corriente alterna	320 kV corriente continua	450 kV corriente continua
Aislamiento	XLPE, EPR	XLPE	Aceite/papel o XLPE	Extruido	Impregnado en masa
Aplicación típica	Suministro a islas de tamaño reducido, conexión de parques eólicos marinos	Conexión con islas de gran tamaño y población, plantas petrolíferas	Cruce de ríos o estrechos con amplia capacidad de transmisión	Conexiones de larga distancia con plataformas o parques eólicos en alta mar	Conexiones de larga distancia con redes de potencia autónomas
Longitud máxima	20-30 km	70-150 km	Menos de 50 km	Más de 500 km	Más de 500 km
Capacidad	30 MW	180 MW	700 MW, tres cables	1000 MW, dos cables	600 MW

3 ESTADO DEL ARTE

3.1 Modelos de Elementos Finitos

Esta revisión se centra en la resolución de problemas que tienen como objeto de estudio cables tripolares HVAC, debido a dos motivos. En primer lugar, porque es el tipo de cable que más adelante se empleará en las simulaciones en este trabajo. En segundo lugar, porque los problemas en los que se trata con cables HVDC son significativamente más sencillos de resolver, mientras que los cables HVAC ofrecen una configuración mucho más compleja, con corrientes inducidas tanto entre fases como en las pantallas de las mismas y en la armadura, fruto de los campos eléctricos y magnéticos variables.

En la actualidad, la amplia mayoría de los problemas de modelado de pérdidas electromagnéticas y de transmisión de calor en cables de potencia enterrados son abordados mediante el uso de herramientas de cálculo numérico, sobre todo empleando códigos comerciales de elementos finitos y, en menor medida, el método de diferencias finitas o el método de elementos de contorno.

Pero también existen otro tipo de planteamientos, como modelar el problema térmico de cables y sus juntas utilizando un circuito eléctrico equivalente no lineal [7]. Otras investigaciones se limitan al uso de expresiones analíticas presentes en las normas técnicas, como la IEC 60853, la IEC 1042, la IEEE 835 y, principalmente, la IEC 60287 [8].

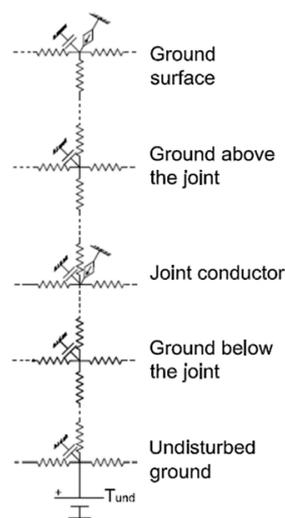


Figura 7. Equivalente eléctrico utilizado para la resolución del problema térmico, en el que se ha tenido en cuenta la presencia de una junta [7]

En cuanto a las simulaciones mediante elementos finitos, se encuentran tres tipos de modelos en la literatura:

- Modelos 2D: Son modelos muy simplificados que consideran únicamente una sección transversal del cable. En estos modelos se asume que todos los elementos del cable discurren de forma paralela unos a otros, es decir, sin estar enrollados de forma helicoidal alrededor del eje del cable, como ocurre realmente. De esta manera, solo la componente del vector del campo magnético coplanaria con la sección del cable es tenida en cuenta, ignorando la componente paralela a los cables de la armadura. Esta simplificación es una gran fuente de imprecisiones, ya que esta última componente es la principal causante de las corrientes inducidas en la armadura, las cuales aumentan las pérdidas térmicas en el conjunto del cable. Estas corrientes inducidas dependen claramente de la torsión relativa entre los núcleos y la armadura.

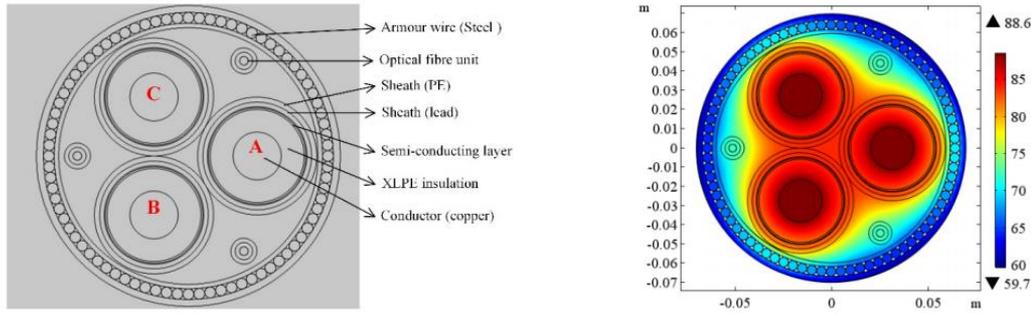


Figura 8. Modelo 2D empleado para calcular la distribución de temperaturas en el interior de un cable HVAC [9]

- Modelos 2.5D: En estos modelos, los cables de la armadura están conectados en serie por un circuito eléctrico externo, acoplado con el modelo de elementos finitos. De esta manera, se incluye el giro entre conductores activos y pasivos en el modelo y se asegura que la corriente total en la armadura es cero.

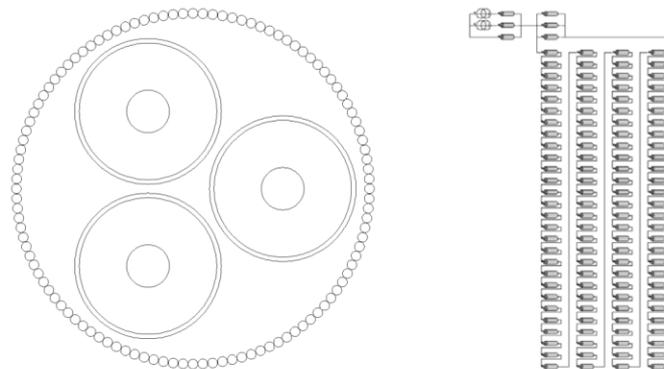


Figura 9. Modelo 2.5D con el circuito eléctrico equivalente que conecta los cables de la armadura [10]

- Modelos 3D: Son utilizados en menor medida debido a alto coste computacional que suponen, en oposición a los modelos 2D. Por el contrario, reproducen con mayor fidelidad los campos electromagnéticos producidos por las trayectorias helicoidales que siguen los conductores activos y pasivos, y aportan información de gran valor acerca de todos los fenómenos que ocurren en el interior de cables de tres núcleos con armadura. Para obtener resultados con la mayor precisión posible, los modelos 3D consideran la menor geometría periódica del cable, es decir, la longitud de cable tal que ambas secciones extremas del mismo son idénticas, presentando todas las fases y todos los cables de la armadura en la misma posición. Esto puede llevar a longitudes de cable demasiado largas para ser malladas y resueltas por códigos FEM, ya que los ratios de giro de las fases y de la armadura son diferentes y en sentidos opuestos, para conseguir estabilidad torsional. Sin embargo, los autores de la referencia [11] proponen una nueva metodología según la cual, atendiendo a la simetría axial que presentan las pérdidas en el cable, es posible reducir la geometría del modelo de una manera muy significativa, manteniendo los umbrales de error por debajo del 5%, [11].

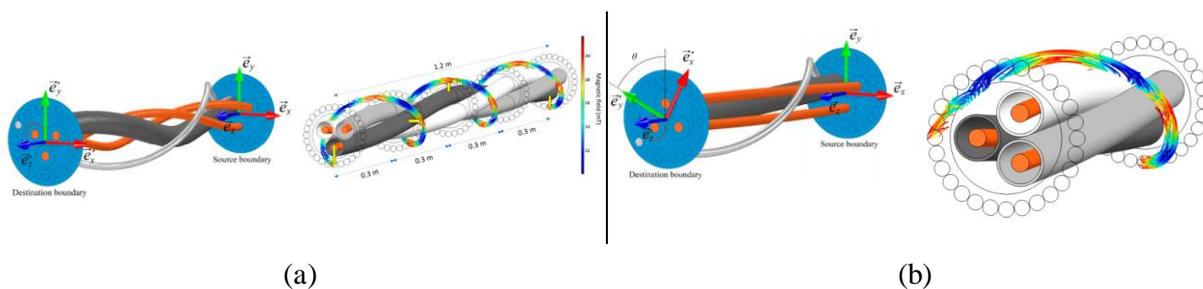


Figura 10. Comparación entre un modelo periódico completo (a) y un modelo simplificado (b), [11]

3.2 Modelos de lecho marino

En cuanto a la caracterización del suelo marino, prácticamente toda la literatura consultada asume que el entorno del cable enterrado es un medio continuo, con unos valores de capacidad calorífica volumétrica ($\rho \cdot c_p$) y resistividad térmica constantes, a través del cual se disipa calor únicamente por conducción (como se propone en las normas 60287-1-1 y 60287-2-1 de la IEC, [12]). Por ejemplo, en [13] se modela el suelo marino como un rectángulo semiinfinito, con una temperatura de 12 °C en la parte inferior representando la temperatura remota del suelo, una temperatura de 15 °C en la superficie del lecho marino, una profundidad de enterramiento de 1 m y una resistividad térmica de 0.7 KmW⁻¹.

En [9] también se considera que la transmisión de calor a través del suelo solo tiene lugar por conducción, no introduciendo el término convectivo hasta la interfaz suelo-agua marina. Este último término suele ser pequeño debido a las profundidades de enterramiento usuales, que propician una disipación de calor casi total antes de llegar al lecho marino, debido a exigencias medioambientales como el criterio 2K¹.

Muy pocas son las publicaciones que proponen un enfoque más cercano a la realidad del problema de transferencia de calor en el suelo submarino. En [2] se recurre a cálculos básicos de ampacidad presentes en las normas técnicas, pero descarta el comportamiento homogéneo del subsuelo en el que solo actúa la conducción, en favor de un modelo algo más realista de los sedimentos. Los autores de [2] proponen dos principales mejoras en el modelo del suelo.

En primer lugar, introducen una conductividad térmica efectiva de los sedimentos, resultante de la combinación de la conductividad térmica del suelo y la conductividad térmica del agua, calculada a través de la expresión

$$k = (\theta_p)k_w + (1 - \theta_p)k_s \quad (2)$$

donde k es la conductividad térmica efectiva del medio, k_w y k_s son las conductividades térmicas del agua y del suelo, respectivamente, y θ_p es la porosidad. Además, k_w depende de la velocidad del agua, la cual es gobernada por efectos gravitatorios y las diferencias de densidad generadas por las diferencias de temperatura.

En segundo lugar, aplican un comportamiento de convección natural según la aproximación de Boussinesq (ver Apéndice I – Aproximación de Boussinesq).

Las propiedades térmicas del lecho marino y del agua empleadas en esta publicación se recogen en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades térmicas del agua y del lecho marino [2]

Parámetro	Lecho marino	Agua
Densidad (kg/m ³)	2020	1024
Conductividad térmica (W/(m·K))	1.4 - 2.2	0.6
Capacidad calorífica (J/kgK)	2512	3930
Difusividad térmica (mm ² /s)	1.15e-6	0.143e-6

La porosidad de los sedimentos, su permeabilidad y la profundidad de enterramiento juegan un papel vital en la transferencia de calor y, por tanto, en la ampacidad del cable, [2].

En [5] se propone un modelo más completo del lecho submarino. Los autores realizan una serie de modelos en COMSOL 4.3² a través de los cuales estudian el efecto de la variación de tres parámetros (permeabilidad, conductividad térmica de la fase sólida y profundidad de enterramiento) sobre la temperatura máxima del cable y los mecanismos de disipación de calor que gobiernan el problema. Según los mismos, “se presta especial

¹ El criterio 2K es un criterio adoptado por las autoridades marítimas alemanas según el cual la temperatura del lecho marino, a una profundidad de 0,2 m en las proximidades de un cable submarino, no debe aumentar más de 2 grados kelvin respecto a la temperatura que habría sin la presencia del cable.

² Por comparación, la versión utilizada para las simulaciones de este trabajo es COMSOL 5.4

atención al papel que juega la transferencia de calor convectiva, con un método que está siendo desarrollado para definir escenarios de instalación en los que esta puede ser significativa”, [5].

El modelo empleando en [5] es muy similar al utilizado en este trabajo, el cual se detalla en el capítulo 4. Los autores realizan un estudio estacionario, acoplado la velocidad del fluido con la transferencia de calor. La transferencia de calor en estado estacionario es gobernada por la ecuación (3):

$$Q_{in} = -\lambda \nabla^2 T + \rho_f c_{pf} \mathbf{u} \cdot \nabla T \quad (3)$$

Donde T ($^{\circ}\text{C}$) es la temperatura, λ ($\frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$) es la conductividad térmica global, ρ_f (kg/m^3) es la densidad del fluido, c_{pf} ($\frac{\text{J}}{\text{kg}^{\circ}\text{C}}$) es la capacidad calorífica específica del fluido y \mathbf{u} (m/s) es la velocidad del fluido. La conductividad térmica del medio es calculada ponderando la de la fase sólida y la fase fluida mediante la porosidad (aunque existen otros métodos para calcularla):

$$\lambda = \lambda_s(1 - n) + \lambda_f n \quad (4)$$

Se emplea la ecuación de Darcy (ecuación (5)) para el cálculo de la velocidad del agua que aparece en el término convectivo del balance de energía (3). Según los autores de [5], “se asume que la ley de Darcy describe bien el fluido permeante”.

$$\mathbf{u} = -\frac{1}{n\mu} \mathbf{k}(\nabla p + \mathbf{g}\rho_f) \quad (5)$$

Donde n es la porosidad, μ ($\text{Pa}\cdot\text{s}$) es la viscosidad dinámica, \mathbf{k} (m^2) es el tensor de permeabilidad intrínseca, p (Pa) es la presión y \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad. Los autores, además, tienen en cuenta las fuerzas de flotación introduciendo una expresión de la densidad dependiente de la temperatura, $\rho = \rho_0(1 - \beta\Delta T)$, donde β (K^{-1}) es el coeficiente de expansión térmica volumétrica. De esta manera introducen una aproximación de Boussinesq, según la cual las variaciones de densidad son suficientemente pequeñas como para ser despreciadas, excepto cuando se calculan las fuerzas de flotación en el término de la fuerza gravitatoria, aunque no está claro qué perjuicio tendría utilizar la expresión anterior de la densidad en todos los términos. Los autores reducen la descripción de la permeabilidad de tensor a escalar, asumiendo que es una propiedad isotrópica en los sedimentos. Además, asumen que los sedimentos permanecen siempre totalmente saturados gracias al agua existente sobre ellos, independientemente de las propiedades de los mismos.

Los autores de [5] emplean el solver “double dogleg” de COMSOL 4.3, que combina dinámicamente aspectos del método Newton-Raphson y métodos de descenso más pronunciados.

Si bien en [5] se introducen importantes novedades en relación al modelo del subsuelo, el cálculo del calor generado en el cable es realizado a través de las expresiones presentes en la norma IEC 60287. Este trabajo pretende avanzar en este último campo, añadiendo al modelo electromagnético complejo del cable utilizado en [6] un modelo de suelo poroso, muy similar al utilizado en [5].

Es interesante resaltar también las condiciones de contorno adoptadas en [5]. Tanto en los límites laterales como en el límite inferior, se ha impuesto flujo de fluido nulo y transferencia de calor nula. Por otro lado, entre el cable y el subsuelo se ha impuesto una condición de flujo nulo (debido a que la cubierta exterior del cable es impermeable) y transferencia de calor libre. En el interior del cable se ha impuesto una generación de calor constante, resultado de las expresiones de la norma IEC 60287. La interfaz superior tiene una condición de presión constante igual a la presión hidrostática producida por el mar, y libertad de flujo de fluido a través de ella. En cuanto a la transferencia de calor entre la matriz porosa y el agua marina superior, se considera un flujo convectivo función del gradiente térmico entre ambas partes de la interfaz y la velocidad del agua marina.

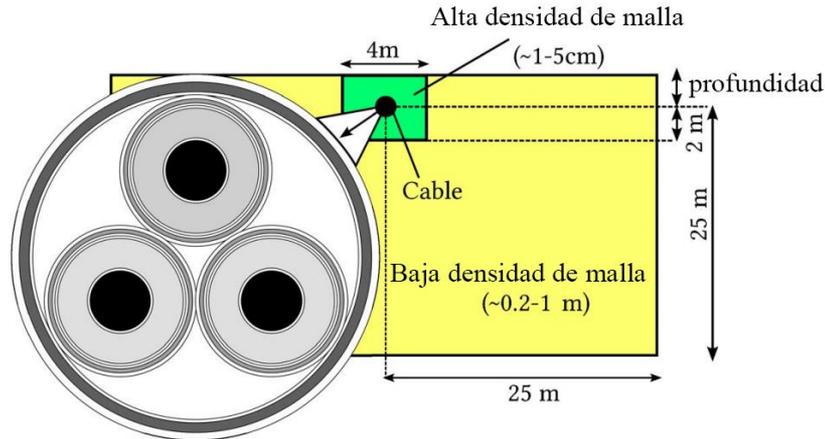


Figura 11. Modelo 2D de [5]

En cuanto al valor de las propiedades de los sedimentos, básicamente pueden obtenerse mediante dos métodos: analizando muestras del subsuelo en laboratorio o a través relaciones empíricas o semiempíricas en función de otras propiedades. Los autores de [5] utilizan el segundo, concretamente la ecuación de Kozeny-Carman:

$$k = \frac{1}{180} \frac{n^3}{(1-n)^2} d_m^2 \quad (6)$$

Donde n es la porosidad y d_m es un parámetro representativo del tamaño de partícula medio. Este último también puede obtenerse de maneras diferentes. Aunque se puede hacer teniendo en cuenta la distribución de los tamaños de partícula, los autores han optado por elegir el diámetro de la partícula medio, suponiendo que las partículas son perfectamente esféricas e iguales entre sí. La porosidad se ha tomado como $n = 0.4$, valor representativo de un empaquetamiento aleatorio de esferas. Este es un modelo simplificado de sedimento, los cuales son mucho más complejos en la realidad.

En la Tabla 4 se muestran los rangos que adoptan algunas de las propiedades del estudio realizado en [5], los cuales pueden servir de referencia para este trabajo.

Tabla 4. Rango de algunas propiedades utilizadas en [5]

	Valor mínimo	Valor máximo
Permeabilidad del terreno (m^2)	10^{-18}	10^{-7}
Tamaño de grano (mm)	10^{-4}	10
Corriente (A)	1000	1500
Conductividad térmica del terreno ($\frac{W}{m \cdot K}$)	0.5	4

Existen tres fuentes potenciales de imprecisiones en [5]. La primera de ellas es el cálculo del calor generado por el cable mediante de la norma IEC 60287, el cual puede arrojar resultados significativamente alejados de la situación real del modelo. La segunda es el uso de la aproximación de Boussinesq para el cálculo del flujo de convección libre del agua alrededor del cable, la cual no tiene sentido teniendo en cuenta la potencia de cálculo de los ordenadores actuales. La tercera es que no se hace ninguna referencia a la salinidad del agua marina, parámetro del cual dependen muchas otras de sus propiedades de manera significativa. De hecho, consideran que la densidad del agua toma valores entre 965.3 kg/m^3 y 999.7 kg/m^3 , lo cual indica que probablemente hayan considerado agua dulce en su modelo, ya que los valores de densidad del agua marina, para una salinidad de 35 g/kg (valor de salinidad medio de los océanos, [14]), están entre 984 kg/m^3 y 1028 kg/m^3 . Esta diferencia en los valores de la densidad, de casi el 3%, supone otra posible fuente de errores.

Este trabajo pretende proponer mejoras en estos ámbitos, combinando el modelo electromagnético utilizado en

[6] con un modelo térmico más complejo, similar al empleado en [5], que tenga en cuenta la transferencia de calor convectiva y los flujos que tienen lugar en el subsuelo marino y cómo estos afectan a la distribución de temperaturas dentro y en el entorno del cable.

4 MÓDULO “SUBSURFACE FLOW” DE COMSOL MULTIPHYSICS

“Subsurface Flow” es un módulo de COMSOL Multiphysics® ideado para simular y analizar el flujo de un fluido bajo el suelo o a través de algún otro medio poroso, ofreciendo la posibilidad de conectar este flujo con otros fenómenos, como poroelasticidad, transmisión de calor o transporte de especies químicas, entre otros.

Las diferentes interfaces del módulo son las siguientes:

- Transporte de especies químicas
 - Transporte de especies diluidas
 - Transporte de especies diluidas en medio poroso
 - Transporte de especies diluidas en fracturas
- Flujo de reacción
 - Flujo laminar con especies diluidas
- Flujo monofásico
 - Flujo de filtración
 - Flujo laminar
 - Transporte de fase
- Medios porosos y flujo subterráneo
 - Ecuaciones de Brinkman
 - Ley de Darcy
 - Flujo de fractura
 - Ecuaciones de Richards
 - Flujo multifase en medios porosos
 - Ley de Darcy bifásica
 - Flujo libre y en medios porosos
 - Transporte de fases en medios porosos
- Transferencia de calor
 - Transferencia de calor en sólidos
 - Transferencia de calor en fluidos
 - Transferencia de calor en sólidos y fluidos
 - Transferencia de calor en medios porosos
- Mecánica estructural
 - Poroelasticidad

Para modelar el flujo de un fluido monofásico a través de un medio poroso saturado, es decir, cubierto completamente por este fluido, se pueden aplicar dos tipos de ecuaciones: la ley de Darcy o las ecuaciones de Brinkman. La ley de Darcy es válida para flujos con velocidades relativamente bajas, mientras que cuando se consideran números de Reynolds más altos las ecuaciones de Brinkman arrojan resultados más precisos.

La ley de Darcy puede aplicarse a flujos compresibles o incompresibles, en función de si el fluido se trata de un gas o un líquido. En el caso de estudio de este trabajo, al estar compuesto el fluido por una sola fase líquida

(agua marina), se considerará un flujo incompresible.

Asimismo, COMSOL Multiphysics implementa otros modelos para flujos no Darcianos, como las ecuaciones de Ergun, Forcheimer, Burke-Plummer o Klinkenberg [15]. Sin embargo, por las condiciones del problema que aborda este trabajo, el flujo puede considerarse darciano, por lo que este trabajo va a centrarse en la interfaz “Ley de Darcy” para la simulación del flujo subterráneo, vinculada con la interfaz “Transferencia de calor en medios porosos” a través de la velocidad del agua, que será variable de entrada para el cálculo del coeficiente convectivo de la transferencia de calor.

Se ha tomado esta decisión atendiendo la guía de usuario del módulo Subsurface Flow de COMSOL [16], la cual propone que la interfaz de la Ley de Darcy es apropiada “para flujos a través de medios porosos que son relativamente lentos”, [16], el cual será el caso de estudio de este trabajo. Asimismo, según [16], “la Interfaz de Transferencia de Calor en Medios Porosos permite describir el calor transferido con o sin el flujo de fluidos. Además, es posible definir la velocidad en el término convectivo a través de cualquiera de las ecuaciones de fluido”, como la ecuación de Darcy.

La intención de los apartados 4.1 y 4.2 es que este trabajo sea autocontenido en la medida de lo posible y aporte una explicación sobre la física y las ecuaciones que implementa el modelo de elementos finitos.

4.1 Interfaz de flujo libre y flujo en medios porosos

La primera intención a la hora de desarrollar el modelo de elementos finitos en COMSOL para este trabajo fue la inclusión del agua como un dominio fluido que interactuara tanto material como térmicamente con el suelo marino, aunque finalmente se ha descartado esta opción por los motivos que se detallan en el subcapítulo 5.2. Es por esta razón que se ha hecho uso de esta interfaz (“Free and Porous Media Flow”) en el modelo. Esta interfaz modela el movimiento de un flujo tanto en un medio libre como en un medio poroso, aplicando las ecuaciones de Navier-Stokes en el primer caso y las ecuaciones de Brinkman en el segundo. Al haber descartado el medio libre y haber simulado solo el flujo en el medio poroso, las ecuaciones que se han aplicado en el modelo son únicamente las ecuaciones de Brinkman, y por ello este subcapítulo está basado en el capítulo “Teoría de las Ecuaciones de Brinkman” de la guía de usuario [16] (pág. 146 - 147).

4.1.1 Introducción

Las ecuaciones de Brinkman son la extensión de las ecuaciones de Darcy para incluir la disipación de energía cinética debido a la viscosidad, como ocurre en las ecuaciones de Navier-Stokes. Por lo tanto, estas ecuaciones son adecuadas para describir el movimiento de un fluido a través de un medio poroso y en las zonas próximas a la interfaz con un medio fluido libre. En medios porosos, tanto las variables de flujo como las propiedades del fluido en cada punto son definidas mediante una media de dichos valores dentro de un cierto volumen de control alrededor de cada punto. Este volumen de control debe ser pequeño comparado con las dimensiones del problema pero suficientemente grande como para que incluya varios poros y elementos de la matriz sólida.

4.1.2 Formulación de las ecuaciones

Las variables dependientes en las ecuaciones de Brinkman son la velocidad de Darcy y la presión. El flujo en el medio poroso está gobernado por una combinación de la ecuación de continuidad y la ecuación de conservación del momento, y juntas forman las ecuaciones de Brinkman:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\theta_p \rho) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = Q_{br} \quad (7)$$

$$\frac{\rho}{\theta_p} \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + (\mathbf{u} \cdot \nabla) \frac{\mathbf{u}}{\theta_p} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \frac{1}{\theta_p} \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \cdot \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) - \left(\frac{\mu}{\mathbf{k}} + \frac{Q_{br}}{\theta_p^2} \right) \mathbf{u} + \mathbf{F} \quad (8)$$

4.2 Interfaz de transferencia de calor en medios porosos

Este subcapítulo está basado en [17].

La Interfaz de Transferencia de Calor en Sólidos de COMSOL Multiphysics, en su forma específica para medios porosos, resuelve una ecuación compuesta por una mezcla entre el balance de energía en el sólido y el balance de energía en el fluido, ambas partes ponderadas por la porosidad θ_p . Para sólidos indeformables, el balance de energía se simplifica en:

$$\rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} + \nabla \mathbf{q}_s = Q_s \quad (9)$$

Y para un dominio fluido donde el trabajo ejercido por la presión y la disipación por viscosidad son despreciados, el balance de energía se expresa como:

$$\rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \rho_f c_{p,f} \mathbf{u}_f \nabla T_f + \nabla \mathbf{q}_f = Q_f \quad (10)$$

La regla de la mezcla de balances de energía se aplica multiplicando la ecuación (9) por $1 - \theta_p$ y la ecuación (10) por θ_p , y sumándolas.

La hipótesis de equilibrio térmico local asume una igualdad de temperaturas entre ambas fases, sólido y fluido:

$$T_f = T_s = T \quad (11)$$

4.2.1 Criterios para aplicar equilibrio/desequilibrio térmico local

La hipótesis clásica de equilibrio local al modelar transferencia de calor en medios porosos considera una igualdad puntual de las temperaturas del sólido y el fluido, como se expresa en la ecuación (11). Según [17], en los problemas de conducción estacionaria, donde solo se aplican las condiciones de temperatura prescritas, la temperatura es igual para sólido y para fluido. La mayoría de los problemas de bajas velocidades pueden también asumir la igualdad de temperaturas en la interfaz, si el calentamiento volumétrico interno no difiere de un material al otro.

En el caso de conducción en placas porosas, existe un criterio basado en el número de Sparrow, Sp , para indicar si la temperatura de equilibrio es válida o si se debería adoptar un punto de vista de no equilibrio. Por otro lado, el número de Darcy, Da , y el ratio entre las conductividades de ambas fases tienen también influencia sobre los transitorios en la transferencia de calor en sedimentos. Los números de Sparrow y Darcy son:

$$Sp = \frac{h_{sf} L^2}{k_{eff} r_h}; Da = \frac{k}{d^2} \quad (12)$$

Según [17], valores pequeños del número de Sparrow (entre 100 y 500) y valores altos del número de Darcy (del orden de 10^7) indican discrepancia entre las temperaturas de ambas fases. Sin embargo, por regla general, evaluar la validez de esta hipótesis de equilibrio local no es sencillo para situaciones específicas. El enfoque de no equilibrio local, por otro lado, emplea dos ecuaciones de energía, una por cada fase, que se resuelven para dos campos de temperatura diferentes. Esto hace que el número de grados de libertad del problema sea el doble, pero proporciona un marco general para la transmisión de calor en medios porosos donde no es necesario evaluar la validez de la hipótesis de equilibrio.

En las simulaciones de este trabajo, se va a hacer uso de la hipótesis de equilibrio térmico local, debido a que las velocidades del fluido son bajas y no hay cambios bruscos de temperatura dentro de la matriz porosa.

4.2.2 Equilibrio térmico local

La hipótesis de equilibrio térmico local implica que la temperatura de ambas fases, sólido y fluido, es la misma en la interfaz. La Interfaz de Transferencia de Calor en Medios Porosos resuelve la siguiente ecuación:

$$(\rho C_p)_{\text{eff}} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \mathbf{u} \nabla T + \nabla \mathbf{q} = Q \quad (13)$$

$$\mathbf{q} = -k_{\text{eff}} \nabla T \quad (14)$$

Para un problema estacionario, la temperatura no cambia con el tiempo, por lo que las derivadas temporales en (13) desaparecen.

La conductividad térmica efectiva del sistema sólido-fluido, k_{eff} , está relacionada con la conductividad del sólido, k_s , y con la conductividad del fluido, k_f , y depende en gran medida de la geometría del medio. En [18] se proponen tres modelos para un medio isótropo:

- Si la conducción de calor ocurre en paralelo en el sólido y el fluido, entonces la conductividad térmica efectiva es la media aritmética ponderada de las conductividades k_f y k_s . Este modelo proporciona un límite superior para k_{eff} .

$$k_{\text{eff}} = \theta_p k_f + (1 - \theta_p) k_s \quad (15)$$

- Si la conducción tiene lugar en serie, con todo el flujo de calor atravesando tanto el sólido como el fluido, entonces k_{eff} es la media armónica ponderada de k_f y k_s . Este modelo proporciona un límite inferior.

$$\frac{1}{k_{\text{eff}}} = \frac{\theta_p}{k_f} + \frac{(1 - \theta_p)}{k_s} \quad (16)$$

- Una última estimación se obtiene mediante la media geométrica ponderada entre k_f y k_s :

$$k_{\text{eff}} = k_f^{\theta_p} \cdot k_s^{1-\theta_p} \quad (17)$$

5 MODELO DE ELEMENTOS FINITOS

Todos los modelos de elementos finitos empleados en este trabajo han sido elaborados en el software COMSOL Multiphysics 5.4. Se han desarrollado tres modelos: un modelo electromagnético, un modelo termofluido, y un modelo que acopla los dos anteriores. En la Tabla 5 se ofrece un resumen de los modelos que intervienen en este trabajo.

Tabla 5. Modelos empleados en este trabajo

Nombre	Hipótesis de cálculo	Ventajas	Inconvenientes	Elaboración propia
Modelo de [6]	Electromagnético y térmico acoplados. Solo transferencia de calor por conducción. Intensidad como variable de entrada. Suelo no poroso y agua dulce (sin movimiento).	Simplicidad.	Descripción alejada de la realidad.	No
Modelo electromagnético	Igual que el modelo de [6] pero con suelo poroso y agua salada.	Agilidad para calcular las pérdidas térmicas en el cable.	No tiene en cuenta la refrigeración provocada por los movimientos convectivos del agua.	Sí
Modelo termofluido	Modela solo el problema termofluido. Toma como variable de entrada el calor generado en el cable, calculado por el modelo electromagnético. Suelo poroso y agua salada bajo el subsuelo. Transferencia de calor entre suelo y agua sobre el subsuelo modelada a través de flujo convectivo. Ecuaciones de Brinkman para el movimiento del fluido sin ninguna simplificación.	Velocidad de cálculo y posibilidad de aplicar simetría.	Inexactitud en los resultados por no estar acoplada la generación de calor en el cable con el problema termofluido.	Sí
Modelo acoplado	Combina el modelo electromagnético y el termofluido. Intensidad como variable de entrada y cálculo de todo el problema electromagnético y termofluido acoplado.	Descripción mucho más fiel de la realidad.	Complejidad y alta no linealidad. Altos costes computacionales.	Sí

Modelo de [5]	Suelo poroso. Ecuaciones de Darcy y aproximación de Boussinesq para el movimiento del fluido. Transferencia de calor en la interfaz agua-subsuelo modelada a través de flujo convectivo.	Simplicidad.	Calor generado en el cable calculado a través de norma técnica. Uso de la aproximación de Boussinesq. Uso de agua dulce.	No
---------------	--	--------------	--	----

5.1 Modelo electromagnético

El modelo a partir del cual se ha comenzado a trabajar y que, finalmente, se ha utilizado para resolver el problema electromagnético, es el modelo empleado en [6], que a su vez está basado en el modelo que proporciona COMSOL como tutorial para modelar un cable submarino. Este modelo consiste en un cable tripolar enterrado en el subsuelo marino a una cierta profundidad de enterramiento, como puede observarse en la Figura 12.

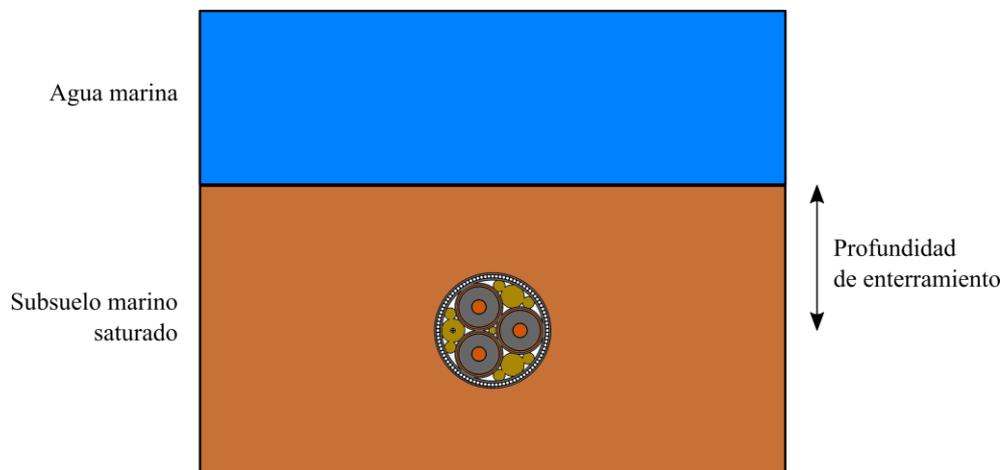


Figura 12. Esquema del modelo utilizado para resolver el problema electromagnético

El modelo electromagnético desarrollado en este trabajo modifica el de [6] de tal manera que implementa las interfaces “Magnetic Fields” y “Heat Transfer in Porous Media”, así como el acoplamiento entre ambas, “Electromagnetic Heating”. Al no resolverse el campo de velocidades, solo se considera la transmisión de calor por conducción en todos los dominios. La variable de entrada del modelo es la intensidad nominal que circula por los conductores. Mediante un estudio estacionario en frecuencia (50 Hz), se resuelve el problema electromagnético para conseguir el dato de interés, el calor generado en el cable, que se empleará como variable de entrada en el modelo termofluido.

El modelo de partida se ha modificado ligeramente, sobre todo en lo relativo a las propiedades del agua y del suelo. Como se detalla en el subcapítulo 5.2, se ha cambiado el material utilizado para modelar el agua por un material creado a propósito de este trabajo, que incorpora las propiedades del agua marina en función de la temperatura. Además, se han cambiado las propiedades térmicas del suelo. En la Tabla 6 se detallan estas propiedades.

Tabla 6. Propiedades del suelo marino en seco

Densidad [kg/m ³]	1631 ([19], [20])
Capacidad calorífica a presión constante [J/(kg·K)]	830 ([21], [22])
Conductividad térmica [W/(m·K)]	1 - 4

En lo que respecta al cable, no se ha introducido ninguna modificación. La estructura del cable y sus componentes internos pueden observarse en la Figura 13. Todos los materiales empleados en el interior del cable han sido obtenidos de la biblioteca de materiales de COMSOL, excepto el aislamiento de XLPE y el material semiconductor. Las propiedades de estos materiales se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7. Propiedades de algunos materiales del cable

	Conductividad eléctrica [S/m]	Permitividad relativa	Conductividad térmica [W/(m·K)]	Densidad [kg/m ³]	Capacidad calorífica a presión constante [J/(kg·K)]
XLPE	1e-18	2.5	0.46	930	2302
Semiconductor	2	2.25	10	1055	2405

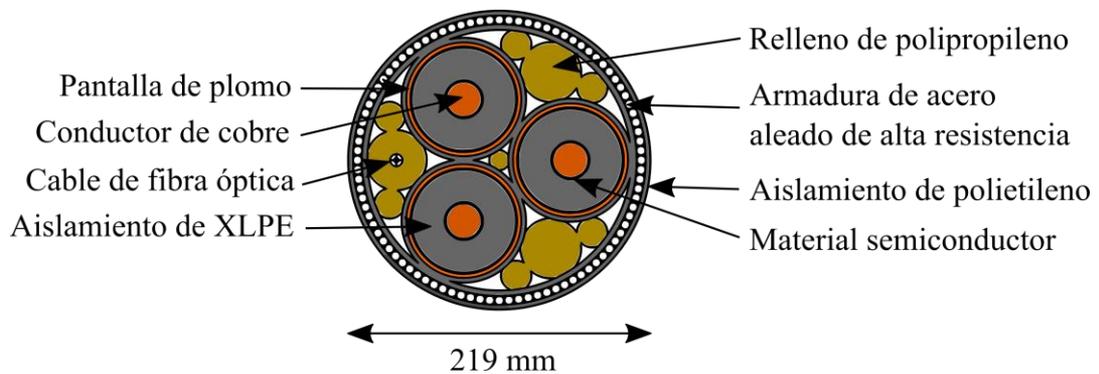


Figura 13. Detalle del cable utilizado en el modelo y sus materiales

En este modelo no se ha introducido ninguna condición de simetría debido a la naturaleza de la corriente trifásica que circula por el cable, que provoca que en todo instante tanto el campo eléctrico como el magnético sean asimétricos respecto a cualquier eje.

5.2 Modelo termofluido

La elaboración de este modelo ha sido una tarea realmente ardua. Han sido necesarias muchas horas de investigación y auto aprendizaje sobre el software COMSOL Multiphysics. También han sido varios los enfoques adoptados hasta finalmente encontrar una solución aproximada.

En un primer momento se intentó modelar el problema en su conjunto, es decir, acoplando el problema electromagnético con el termofluido, introduciendo como variable de entrada la intensidad nominal del cable. Además, se pretendía incluir en el modelo el agua marina sobre el subsuelo y resolver la convección natural en esa zona, como se puede ver en la Figura 14. Se intentó resolver el modelo mediante un estudio estacionario, pero no fue posible conseguir que la solución convergiera. Más tarde se descubrió que los problemas de convergencia estaban provocados por el dominio fluido (zona azul en la Figura 14), en el cual se intenta resolver un sistema de ecuaciones altamente no lineal (ecuaciones de Navier-Stokes). Muchas veces los problemas de convección natural para condiciones de contorno complejas no tienen una solución estacionaria debido a la naturaleza oscilatoria del movimiento resultante, por lo que deben resolverse con estudios no estacionarios.

Se intentó, por tanto, resolver el modelo mediante un estudio no estacionario hasta llegar a una solución cuasi estacionaria, pero de nuevo no fue posible. El coste computacional de las simulaciones era inasumible para el equipo disponible para la realización de este trabajo. Una simulación con un horizonte temporal de 10 horas no llegó a completarse ni al 50 % en 12 horas de cálculo, por lo que se decidió que este enfoque no era viable, teniendo en cuenta que en el futuro habría que realizar un número considerable de simulaciones.

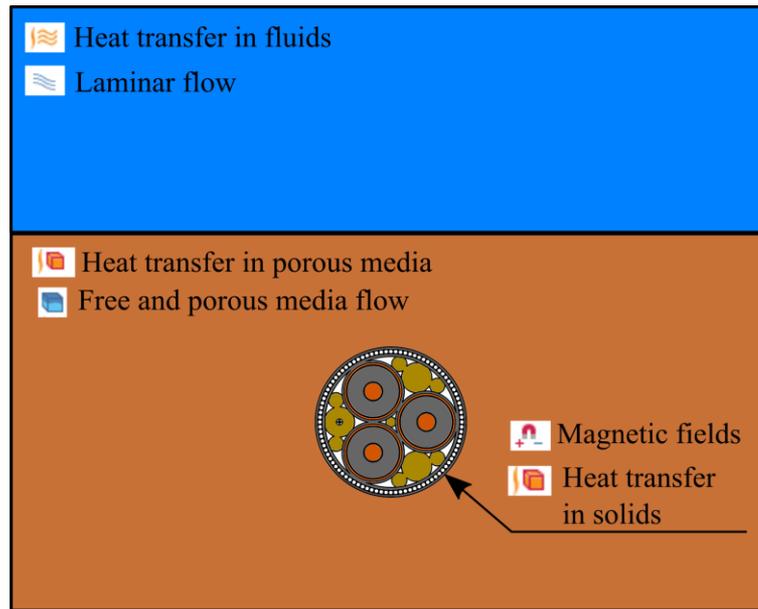


Figura 14. Esquema del primer modelo que se quiso implementar, con las interfaces de COMSOL aplicadas en cada dominio

En una segunda aproximación, se intentó reducir la complejidad del modelo desacoplando el problema termofluido del electromagnético. De esta manera, mediante el modelo electromagnético utilizado en [6], se obtenían las pérdidas caloríficas generadas en el cable, y estas eran posteriormente introducidas en un segundo modelo, que solo modelaba el problema termofluido. Este segundo modelo conservaba tanto el dominio poroso como el dominio puramente fluido, de manera idéntica al modelo de la Figura 14. Se intentó resolver este modelo tanto con un estudio estacionario como con uno no estacionario, pero de nuevo no fue posible por problemas de convergencia, en el primer caso, y por el alto tiempo de computación, en el segundo.

Finalmente se ha optado por eliminar del modelo el dominio de agua marina, que originaba los problemas de convergencia, y se ha modelado la transferencia de calor entre el subsuelo marino y el agua mediante un flujo de calor convectivo, de manera similar al modelo empleado en [5]. El coeficiente de convección ha sido calculado a través de la siguiente correlación:

$$h = \frac{\lambda}{x} \text{Nu} = 0.332 \frac{\lambda}{x} \left(\frac{C_{p_f} \mu}{\lambda_f} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\rho_f u_0 x}{\mu} \right)^{1/2}, [5] \quad (18)$$

Para dotar de consistencia y precisión a este modelo termofluido, se ha creado un material *ex proffeso* que caracteriza el agua marina, pues la biblioteca de materiales de COMSOL solo incluye agua dulce. Las propiedades del agua marina han sido obtenidas de la herramienta SEAWATER_VBA, [23] y [24], un complemento para Excel y otras herramientas de cálculo elaborado y distribuido de forma gratuita por el MIT (Massachusetts Institute of Technology). Los detalles de la implementación del material y el valor de sus propiedades pueden consultarse en el Apéndice II – Propiedades del agua salada.

Por tanto, en el modelo termofluido final se han utilizado las siguientes físicas: “Free and Porous Media Flow” para modelar el flujo a través del medio poroso y “Heat Transfer in Porous Media” para modelar la transferencia de calor tanto en el medio poroso como en cable, ya que esta interfaz permite también modelar la transferencia de calor en sólidos. Para acoplar ambas interfaces físicas se ha hecho uso de la multifísica “Non-isothermal Flow”, que enlaza ambas físicas a través de la temperatura. En la Figura 15 se puede observar un esquema del modelo y las físicas aplicadas en cada dominio.

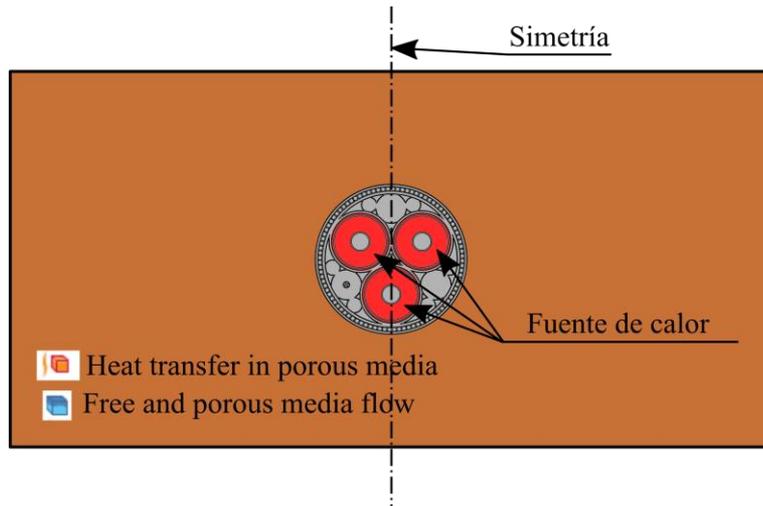


Figura 15. Esquema del modelo termofluido utilizado finalmente en las simulaciones. Solo se ha hecho uso de dos físicas: “Heat Transfer in Porous Media”, aplicada en todo el modelo, y “Free and Porous Media Flow”, aplicada solo en el exterior del cable.

5.3 Modelo acoplado

En una última etapa del trabajo, se ha creado un modelo que incorpora los mencionados en los subcapítulos 5.1 y 5.2 y acopla el problema electromagnético con el termofluido. Las condiciones de contorno empleadas en este modelo son las mismas que las impuestas en el modelo termofluido, con la salvedad de que la generación de calor ya no es una magnitud impuesta, sino que es calculada directamente a través de la interfaz “Electromagnetic Heating”.

La creación de este modelo ha permitido la validación de los dos anteriores. Se ha puesto de manifiesto que, en lo que a resultados finales se refiere, no existe una gran diferencia entre resolver el problema a través de los dos modelos desacoplados (electromagnético y termofluido) y resolver el problema a través del modelo acoplado. Sin embargo, sí existe una diferencia significativa en el tiempo de computación. La resolución de los dos modelos desacoplados toma unos pocos minutos, mientras que el modelo acoplado tarda alrededor de una hora en resolver. Esto se debe al mayor acoplamiento entre ecuaciones y a la imposibilidad de imponer condiciones de simetría en el modelo acoplado.

En la Figura 16 puede apreciarse la diferencia entre el modelo electromagnético (a) y el acoplado (b) en términos de generación de calor en el interior del cable. Para una intensidad nominal de 1100 A, en el primer modelo se generan 96.2 W/m de calor, mientras que en el segundo se generan 88.1 W/m, una diferencia del 8 %.

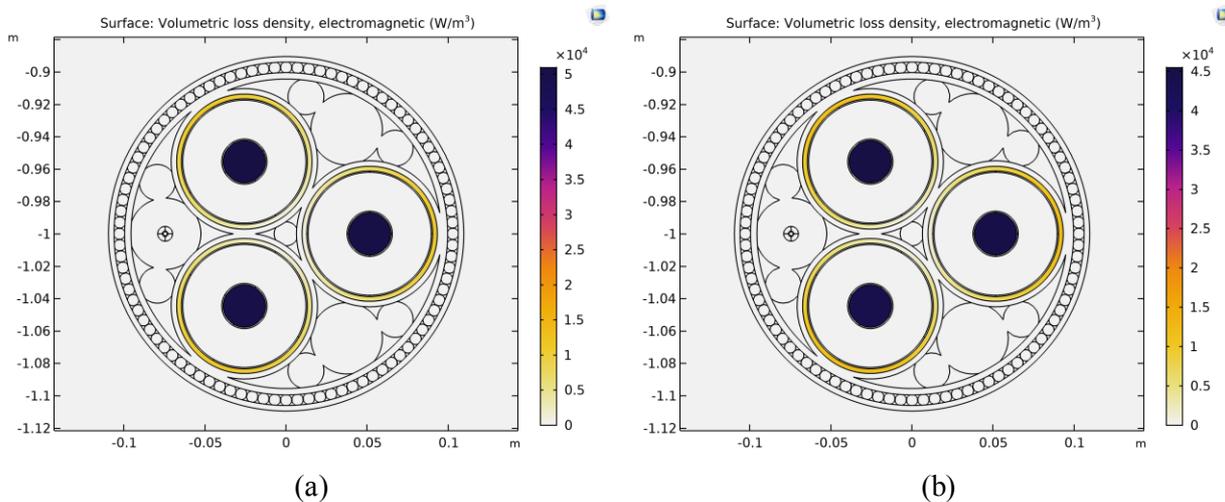


Figura 16. Comparativa entre el calor generado en el modelo electromagnético (a) y en el modelo acoplado (b) para una intensidad nominal de 1100 A.

Esta diferencia en la generación de calor se debe a la ausencia de movimiento convectivo del agua en el modelo electromagnético. Al no haber corrientes convectivas alrededor del cable, la refrigeración es menor y, por ende, la temperatura en el interior del cable es mayor. Al aumentar la temperatura en los conductores, aumenta su resistividad eléctrica. Por tanto, al conducir la misma intensidad de corriente en ambos modelos, los conductores del modelo electromagnético generan más calor que los del modelo acoplado, ya que estos primeros están a mayor temperatura y ofrecen mayor resistencia a la conducción de la corriente eléctrica.

Teniendo en cuenta el alcance de este trabajo, y debido a la escasa potencia de cálculo de la que se dispone, se ha considerado asumible la diferencia entre ambos modelos, ya que realizar todas las simulaciones con el modelo acoplado llevaría un tiempo en torno a dos órdenes de magnitud mayor que si se realizan con los modelos desacoplados. Además, existe un buen número de parámetros del modelo que pueden estar introduciendo un error aún mayor que esta diferencia, como pueden ser las condiciones de contorno o las propiedades del terreno. Si se tuviese una descripción detallada de la situación que se pretende modelar sí se podría considerar que un modelo introduce un error respecto al otro.

5.4 Análisis de convergencia para diferentes mallas

Para validar que el número de elementos que componen la malla utilizada en las simulaciones es suficiente para aportar una solución precisa, se ha realizado un análisis de convergencia de la solución para mallas de diferentes tamaños. Se ha llevado a cabo el mismo análisis sobre ambos modelos, el electromagnético y el termofluido, que son los que se han utilizado en las simulaciones. Para visualizar la convergencia de la solución, se han seleccionado algunos parámetros importantes de cada modelo y se ha representado gráficamente la diferencia relativa entre una solución y la anterior en tanto por ciento.

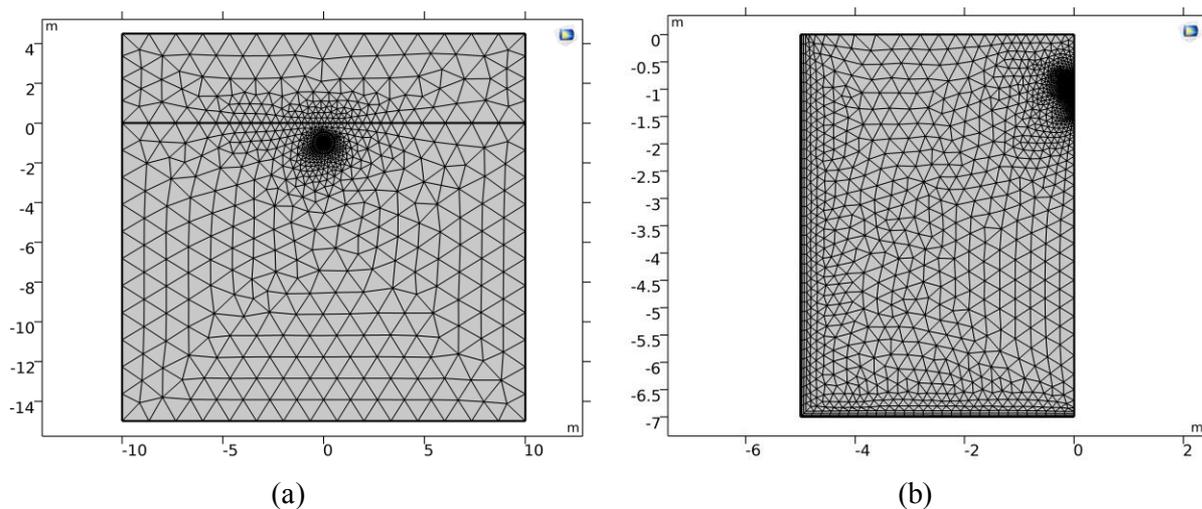


Figura 17. Ejemplos de mallas de tamaño “Normal” utilizadas para el análisis de la convergencia. La malla del modelo electromagnético (a) tiene 53382 elementos y la del modelo termofluido (b) tiene 34700 elementos.

La malla utilizada en todos los casos ha sido la generada automáticamente por COMSOL en función de las físicas presentes en el modelo. Solo se ha variado el tamaño de elemento, para lo cual el programa, en esta configuración, ofrece nueve opciones de finura de la malla: extremadamente gruesa, extra gruesa, más gruesa, normal, fina, más fina, extra fina y extremadamente fina.

5.4.1 Modelo electromagnético

Para analizar la convergencia de la malla del modelo electromagnético se ha prestado atención a la evolución de dos parámetros a medida que se ha aumentado el número de elementos en la malla: la máxima temperatura generada en el cable y las pérdidas térmicas totales. En la Figura 18 se puede comprobar que con la malla generada por COMSOL con la opción “Más gruesa”, que genera 23.842 elementos, la mayor diferencia para estos dos parámetros representativos es del 1.5 %, lo cuales un error bastante aceptable. En la siguiente iteración, con la malla “Gruesa” y 40.162 elementos, la diferencia relativa de ambos parámetros con los valores de la malla anterior es inferior al 0.5 %. Queda comprobado que la malla utilizada para las simulaciones realizadas en este trabajo, que se han llevado a cabo con una malla de unos 70.000 elementos, es suficientemente fina.

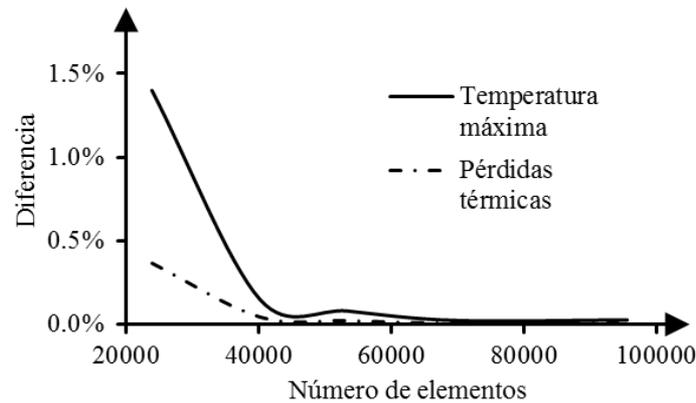


Figura 18. Representación gráfica de la diferencia relativa entre una solución y la anterior para dos parámetros del modelo electromagnético

5.4.2 Modelo termofluido

En el caso del modelo termofluido se ha estudiado la convergencia de dos parámetros significativos: la temperatura máxima en todo el dominio y el flujo de calor que atraviesa la línea discontinua azul de la Figura 24. Como se puede comprobar en la Figura 19, ambos parámetros no presentan una gran diferencia respecto a la solución anterior a partir de los 34.700 elementos que genera la opción “Normal” de tamaño de malla. La malla empleada en las simulaciones ha sido generada con un tamaño “Extra fino” (70.000 elementos), por lo que la solución obtenida puede considerarse precisa.

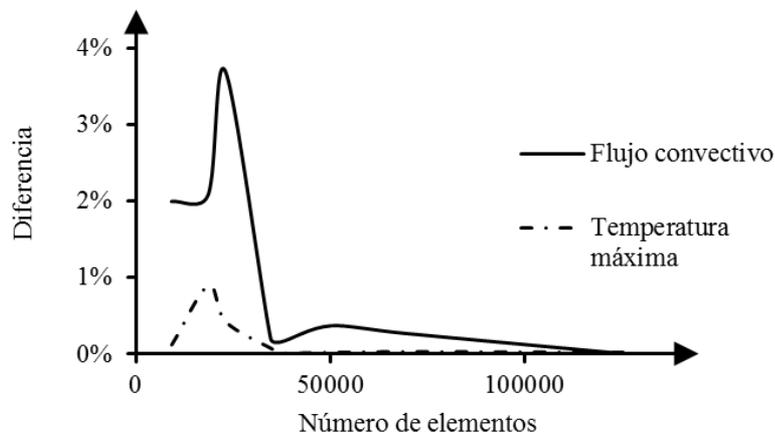


Figura 19. Representación gráfica de la diferencia relativa entre una solución y la anterior para dos parámetros del modelo termofluido

5.5 Condiciones de contorno consideradas

Las condiciones de contorno aplicadas en el modelo termofluido son similares a las aplicadas en [5]. Debido al desacoplamiento entre el modelo electromagnético y el termofluido, es posible imponer la condición de simetría en el eje central del modelo. En los demás contornos se han impuesto las condiciones térmicas y fluidas que se representan en la Figura 20.

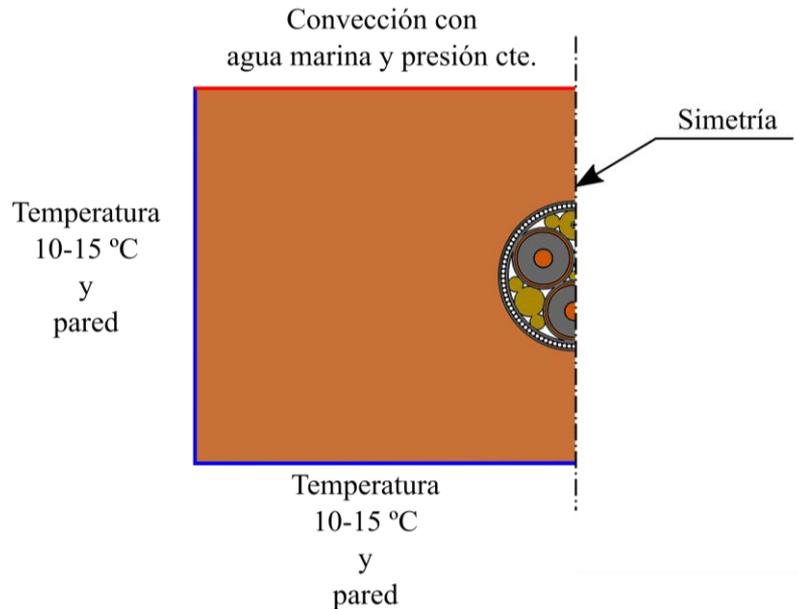


Figura 20. Esquema representativo de las condiciones de contorno aplicadas en los modelos.

Por la parte térmica del modelo, en los contornos lateral e inferior se ha impuesto una temperatura propia del entorno marino (entre 10 °C y 15 °C). Esta condición sólo es válida si los contornos están suficientemente alejados del cable, de tal manera que cerca de ellos el gradiente de temperaturas no debe ser muy pronunciado. Puede comprobarse que la condición de temperatura es válida en la gráfica de la Figura 21, que muestra la variación de temperatura desde el cable hasta el contorno del modelo y cómo esta es insignificante cerca del contorno. Por otro lado, en el contorno superior del modelo (la interfaz entre el suelo marino y el agua) se ha impuesto un flujo de calor convectivo, gobernado por la ecuación (18).

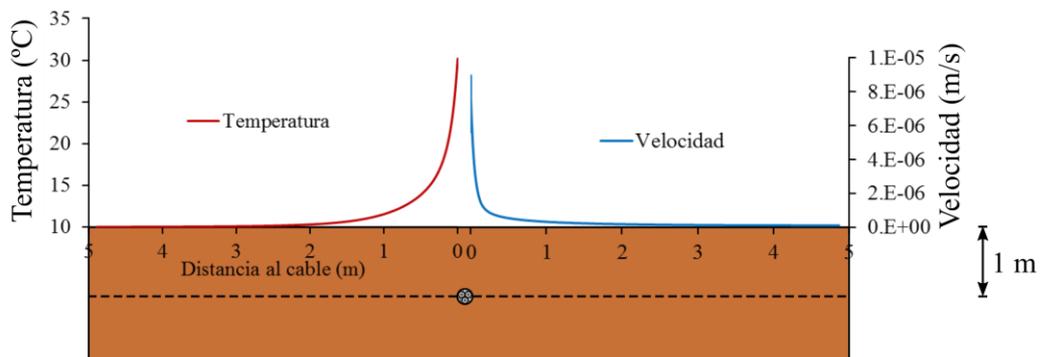


Figura 21. Representaciones de la temperatura y la velocidad calculadas sobre la línea discontinua. Se aprecia que ninguna de las magnitudes varía bruscamente cerca de los extremos, lo que indica que es apropiado utilizar una imposición de temperatura fija (10 °C) y velocidad nula sobre los contornos.

En cuanto a la parte fluida del modelo, en los contornos lateral e inferior se ha impuesto una condición de pared sin deslizamiento, es decir, una condición de flujo nulo, tanto normal como tangencial al contorno. De nuevo, esta condición solo es válida si el gradiente de velocidad es pequeño cerca del contorno. Lo contrario indicaría que el contorno está demasiado cerca del cable y que el fluido está desacelerando debido a su encuentro con el contorno y no a su comportamiento natural a través del medio poroso. Puede comprobarse que la aplicación de esta condición es válida atendiendo al gradiente de velocidad representado en la Figura 21. En el contorno superior se ha impuesto una condición de contorno abierto y presión constante e igual a la presión atmosférica más la presión hidrostática ejercida por la columna de agua sobre la superficie del suelo marino. Tiene sentido que el contorno permita libremente el flujo en ambas direcciones, puesto que esto es precisamente lo que ocurre debido a los movimientos convectivos del agua.

6 RESULTADOS

6.1 Validación del modelo con otras publicaciones

Para validar el modelo se han resuelto dos problemas similares a dos situaciones resueltas en [5] y se han comparado los resultados. Las condiciones en ambas situaciones son las mismas, excepto la permeabilidad del subsuelo, que en un caso es $1E-10 \text{ m}^2$ y en otro $1E-14 \text{ m}^2$. El valor de las variables de interés se recoge en la Tabla 8.

Tabla 8. Valores de algunas propiedades significativas en las simulaciones ilustradas en la Figura 22 y la Figura 23

Porosidad	0.4
Coefficiente de difusividad térmica del terreno	$1 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$
Calor generado en el interior del cable	100 W/m
Temperatura de los alrededores	10 °C

En la Figura 22 se muestra la comparación de los resultados de la primera simulación, en la cual la permeabilidad del terreno ha tomado un valor de 10^{-10} m^2 . Los contornos representan la distribución de temperatura, las flechas verdes representan el campo de velocidad y las flechas rojas representan el flujo de calor total. Puede apreciarse que, en cuanto a su forma, los tres campos representados son casi idénticos y muestran un mismo comportamiento del modelo, en el cual está predominando la convección.

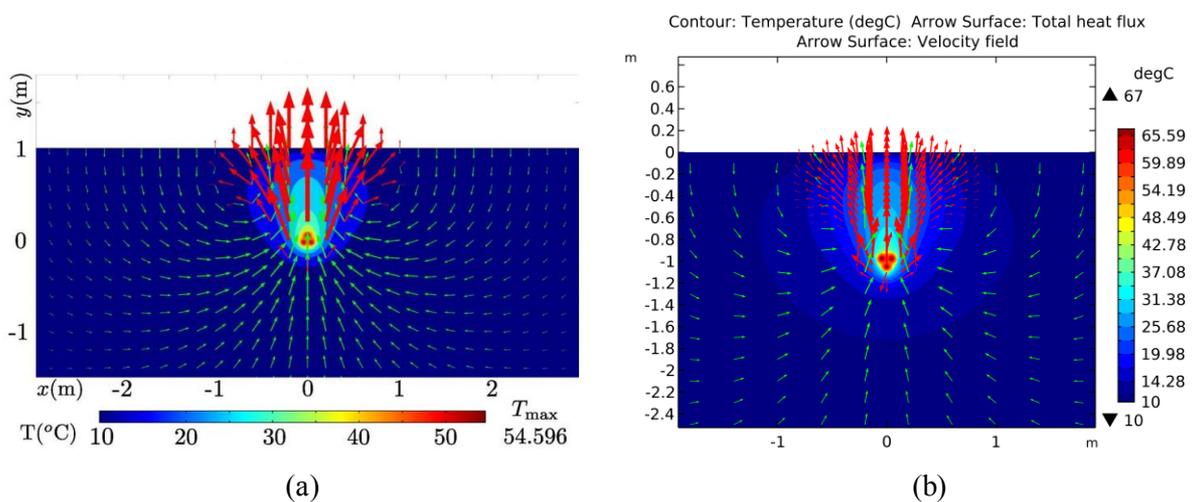


Figura 22. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para un valor de permeabilidad de 10^{-10} m^2 . Los contornos representan la temperatura, las flechas verdes representan la velocidad del agua y las flechas rojas, el flujo de calor convectivo.

Por otro lado, en la Figura 23 se muestran los resultados de una simulación idéntica a la anterior, con la excepción de que la permeabilidad del terreno toma esta vez un valor de 10^{-14} m^2 . En este caso solo se representan la distribución de temperatura y el campo de flujo de calor, puesto que la velocidad en cualquier punto del dominio es prácticamente nula. De nuevo se aprecia una gran similitud entre ambos modelos, pero existe una diferencia significativa entre ambos resultados en la temperatura máxima, por ejemplo.

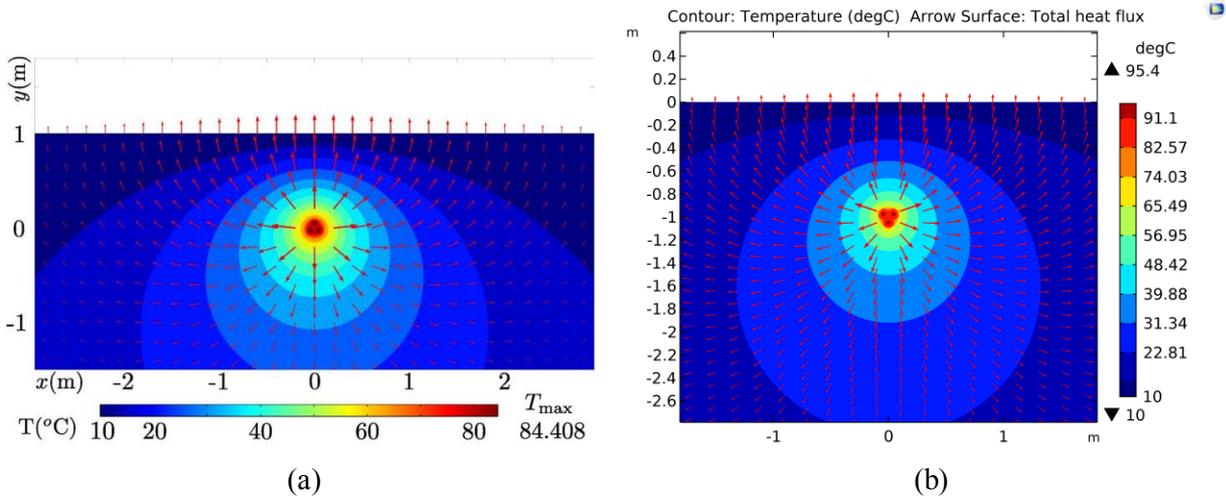


Figura 23. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para un valor de permeabilidad de 10^{-14} m^2

Por último, se ha comprobado la validez del modelo realizando una simulación de barrido paramétrico parecida a la realizada en [5]. En ella se han realizado diversas simulaciones, variando la permeabilidad del terreno entre 10^{-13} m^2 y 10^{-10} m^2 y la conductividad del terreno entre $1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ y $4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, y se ha calculado el flujo convectivo total que atraviesa la línea discontinua azul representada en la Figura 24.

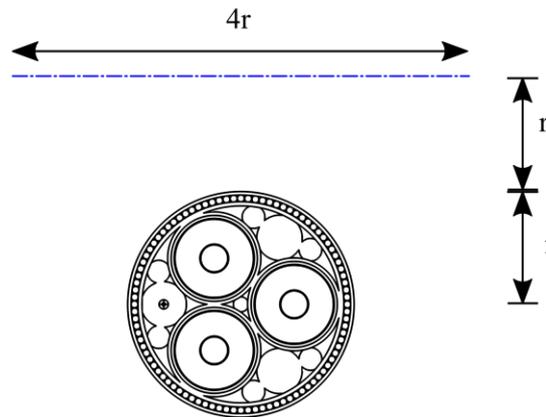


Figura 24. Esquema ilustrativo de la línea sobre la que se ha realizado la integración lineal del flujo convectivo

La comparativa de los resultados puede observarse en la Figura 25. Los autores de [5] han representado los resultados en una superficie tridimensional, donde la permeabilidad y la conductividad toman valores en los ejes horizontales, y el flujo convectivo toma valores en el eje vertical. Esta representación, si bien es muy visual, hace difícil saber en algunas ocasiones el valor del flujo convectivo en cada punto. Es por ello por lo que se ha optado por la representación en un gráfico bidimensional de los resultados obtenidos por el modelo termofluido (Figura 25 (b)) en el que la permeabilidad toma valores en el eje horizontal y el flujo convectivo en el eje vertical. En el gráfico se han representado lo que serían cortes de una superficie similar a la de la Figura 25 (a) para diferentes conductividades del terreno. Se puede apreciar la similitud entre ambas gráficas, lo que indica de nuevo que ambos modelos se comportan de manera muy similar.

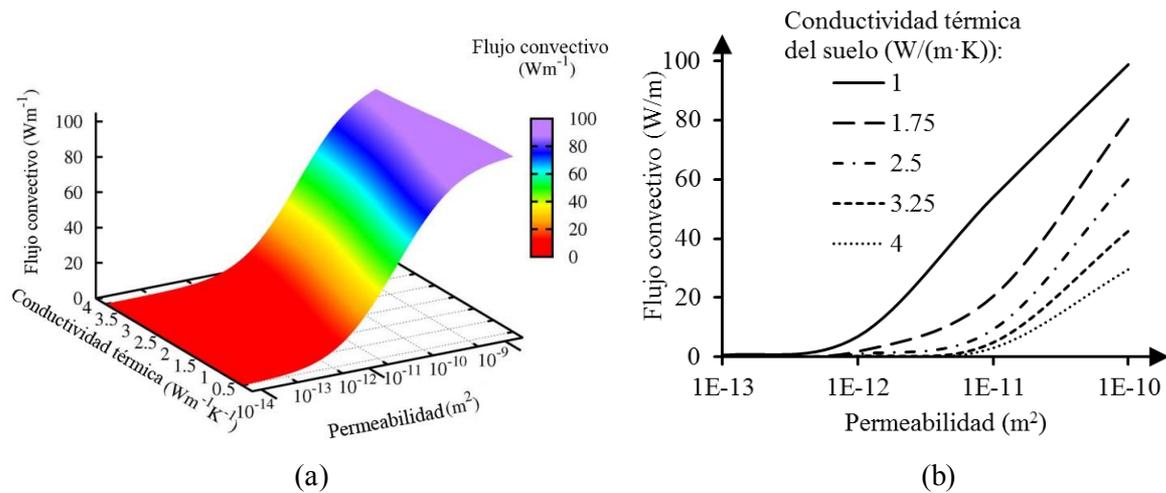


Figura 25. Comparativa entre el modelo desarrollado en [5], (a), y el modelo desarrollado en este trabajo, (b), para una simulación de barrido paramétrico

Las diferencias en los resultados numéricos se deben, entre otras razones que se explican a continuación, a que existen diferencias entre ambos modelos en cuanto a las propiedades de los materiales. Por ejemplo, en [5] no se especifica ni la densidad ni la capacidad calorífica del suelo que se ha empleado, por lo que muy probablemente sean diferentes a las empleadas en el modelo de este trabajo.

Por otro lado, los cables de ambos modelos son muy parecidos tanto en configuración como en los materiales utilizados, pero los valores de conductividad térmica de dichos materiales difieren entre ambos modelos. El caso más llamativo es el del cobre del conductor: se toma el mismo valor de conductividad térmica, 400 W/(m·K), pero en el modelo de este trabajo este valor se ha multiplicado por un factor de densidad de empaquetamiento térmica de 0.075 [25] (ver Glosario), mientras que en [5] no se ha adoptado este comportamiento.

También existen diferencias en la conductividad del aislante de XLPE (0.28 W/(m·K) en [5] frente a 0.46 W/(m·K)), en la conductividad del polipropileno (0.2 W/(m·K) en [5] frente a 0.25 W/(m·K)) y en otros materiales. Además, en [5] se ha empleado agua dulce, a pesar de que en todo momento se hace referencia al agua marina. En este trabajo se ha empleado agua salada, cuyas propiedades son significativamente diferentes a las del agua dulce.

La formulación de ambos modelos también es ligeramente distinta. En el modelo de [5] se emplean las ecuaciones de Darcy junto con la aproximación de Boussinesq para modelar el movimiento del agua a través del medio poroso, mientras que en el modelo desarrollado en este trabajo se han empleado las ecuaciones de Brinkman y no se ha hecho uso de la aproximación de Boussinesq.

Estas diferencias entre ambos modelos explican la desviación entre los resultados numéricos expuestos anteriormente. No obstante, ha quedado comprobado que ambos modelos aportan resultados muy similares al resolver el mismo problema, por lo que puede considerarse que el modelo desarrollado en este trabajo funciona correctamente.

6.2 Comparación de los resultados con un modelo simplificado

Uno de los principales objetivos de este trabajo es comprobar hasta qué punto difieren los resultados aportados por un modelo más complejo y cercano a la realidad, como el desarrollado en este trabajo, de los resultados obtenidos a partir de un modelo simplificado que solo contempla transmisión de calor por conducción y no incluye un suelo poroso, como el empleado en [6].

Esta comparación tiene dos intereses principalmente: uno económico y otro medioambiental. Por el lado económico, es interesante ver cómo influye el uso de un modelo u otro en la temperatura máxima alcanzada en los conductores; a mayor temperatura, mayor será la resistividad del material conductor y mayores las pérdidas térmicas generadas en el cable, lo que aumentará las pérdidas económicas. Por el lado medioambiental, resulta de interés ver la influencia que puede tener el uso de un modelo convectivo en la temperatura del lecho marino. Un modelo en el que se tenga en cuenta la convección puede arrojar valores de temperatura del lecho marino significativamente superiores a los aportados por un modelo puramente conductivo, lo que puede poner en riesgo

la viabilidad del proyecto por excesivo calentamiento del suelo.

Para llevar a cabo esta comparación, se han realizado una serie de simulaciones en las que se ha variado la profundidad de enterramiento del cable en dos modelos: un modelo similar al electromagnético descrito en el subcapítulo 5.1 (en adelante “modelo 1”), en el que solo se tiene en cuenta transferencia de calor por conducción y suelo no poroso, y el modelo termofluido descrito en el subcapítulo 5.2 (en adelante “modelo 2”), que contempla flujo a través del medio poroso y, por tanto, transferencia de calor convectiva. Ambos modelos se han simulado con las mismas condiciones de contorno: un flujo de calor convectivo en el contorno superior calculado a través de la ecuación (18) y una temperatura de 10 °C en el resto de contornos. La intensidad nominal que circula por el cable en todas las simulaciones es de 1100 A.

La comparación se ha llevado a cabo aplicando una permeabilidad de $1E-10 \text{ m}^2$ al suelo poroso del modelo 2, lo cual provoca un comportamiento bastante convectivo en el modelo. No tendría sentido comparar ambos modelos aplicando valores de permeabilidad bajos al modelo 2, ya que esto provocaría que el flujo a través del suelo poroso fuese prácticamente nulo y su comportamiento térmico puramente conductivo. Los modelos han sido comparados atendiendo a dos parámetros: la temperatura máxima alcanzada en los conductores y la temperatura máxima alcanzada a 0.2 m de profundidad bajo la superficie del lecho marino, para verificar el cumplimiento del criterio 2K (ver subcapítulo 3.2).

Los resultados muestran amplias diferencias en las temperaturas aportadas por ambos modelos. En la Figura 26 se muestra la evolución de las temperaturas anteriormente descritas en función de la profundidad de enterramiento del cable. Ambas gráficas aportan información muy interesante. Para ilustrar la relevancia de las diferencias entre ambos modelos, supóngase que se realiza un estudio para la instalación de un cable en un suelo marino como el del modelo 2, pero solo se dispone del modelo 1 para llevar a cabo dicho estudio. En ese supuesto, desde un punto de vista medioambiental parecería, atendiendo a la Figura 26 (a), que enterrando el cable a una profundidad de unos 4 m se estaría cumpliendo el criterio 2K (la línea discontinua azul representa la temperatura del lecho marino sin la influencia del cable); sin embargo, realmente la temperatura en ese punto será mucho mayor debido al comportamiento convectivo del terreno, y la influencia medioambiental será mucho mayor de lo prevista. Desde un punto de vista económico, la desviación sería igualmente de gran magnitud atendiendo a la Figura 26 (b), ya que según el modelo 1 se alcanzarían unos 90 °C a unos 2 m de profundidad para una intensidad de 1100 A, lo cual limitaría la producción de energía si el cable objeto de estudio fuese, por ejemplo, el cable de interconexión de un parque eólico marino. Conociendo los datos aportados por el modelo 2, se podría aumentar la intensidad que circula por el cable sabiendo que está supuesto a una mayor refrigeración y que no se sobrecalentará. De esta manera, se maximizaría el beneficio económico del proyecto.

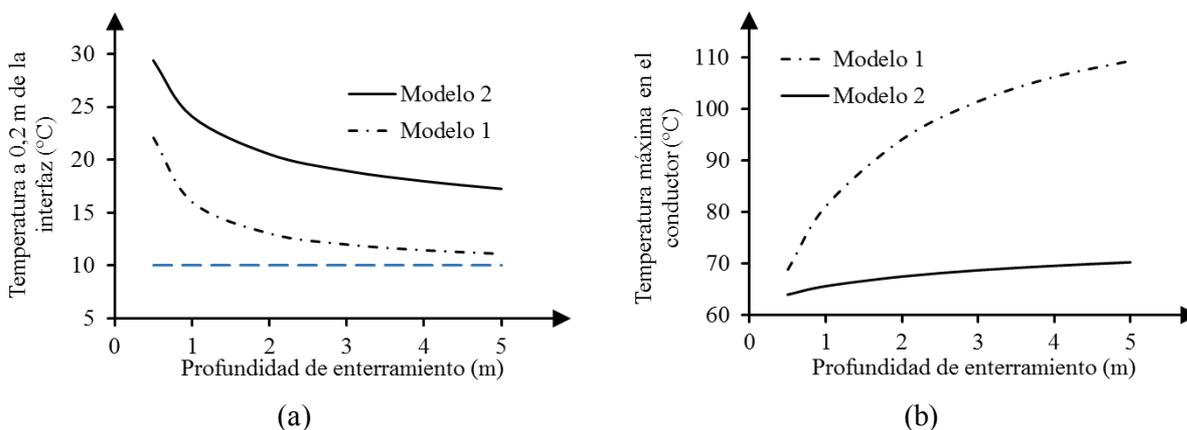


Figura 26. Comparativa entre el modelo 1 y el modelo 2. En la gráfica de la izquierda (a) se muestra la temperatura máxima a 0.2 m de la interfaz entre el suelo marino y el agua. La línea discontinua azul representa la temperatura en la interfaz. En la gráfica de la derecha (b) se muestra la temperatura máxima alcanzada en el conductor.

En definitiva, el hecho de disponer de un modelo que contempla el comportamiento poroso del suelo marino puede suponer una gran diferencia en términos económicos y medioambientales para terrenos con permeabilidades suficientemente altas como para que se genere un flujo convectivo. Esta situación puede ser bastante común. Según [26], el 41% de los suelos oceánicos son permeables, asumiendo como permeables suelos con permeabilidades superiores a $2.5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2$.

En la Figura 27 se puede apreciar cómo difiere la distribución de temperatura entre el modelo 1 y el modelo 2 para diferentes profundidades de enterramiento del cable. En el modelo 2, el calentamiento del agua alrededor del cable provoca una disminución de su densidad, lo cual hace que se genere un flujo hacia arriba promovido por fuerzas de flotación que puede intuirse fácilmente en la Figura 27 (d). Este flujo provoca una refrigeración del cable mucho mayor, de tal manera que para las mismas condiciones y una profundidad de enterramiento de 5 m en el modelo 2 se alcanzan solo 70.2 °C frente a los 109 °C del modelo 1.

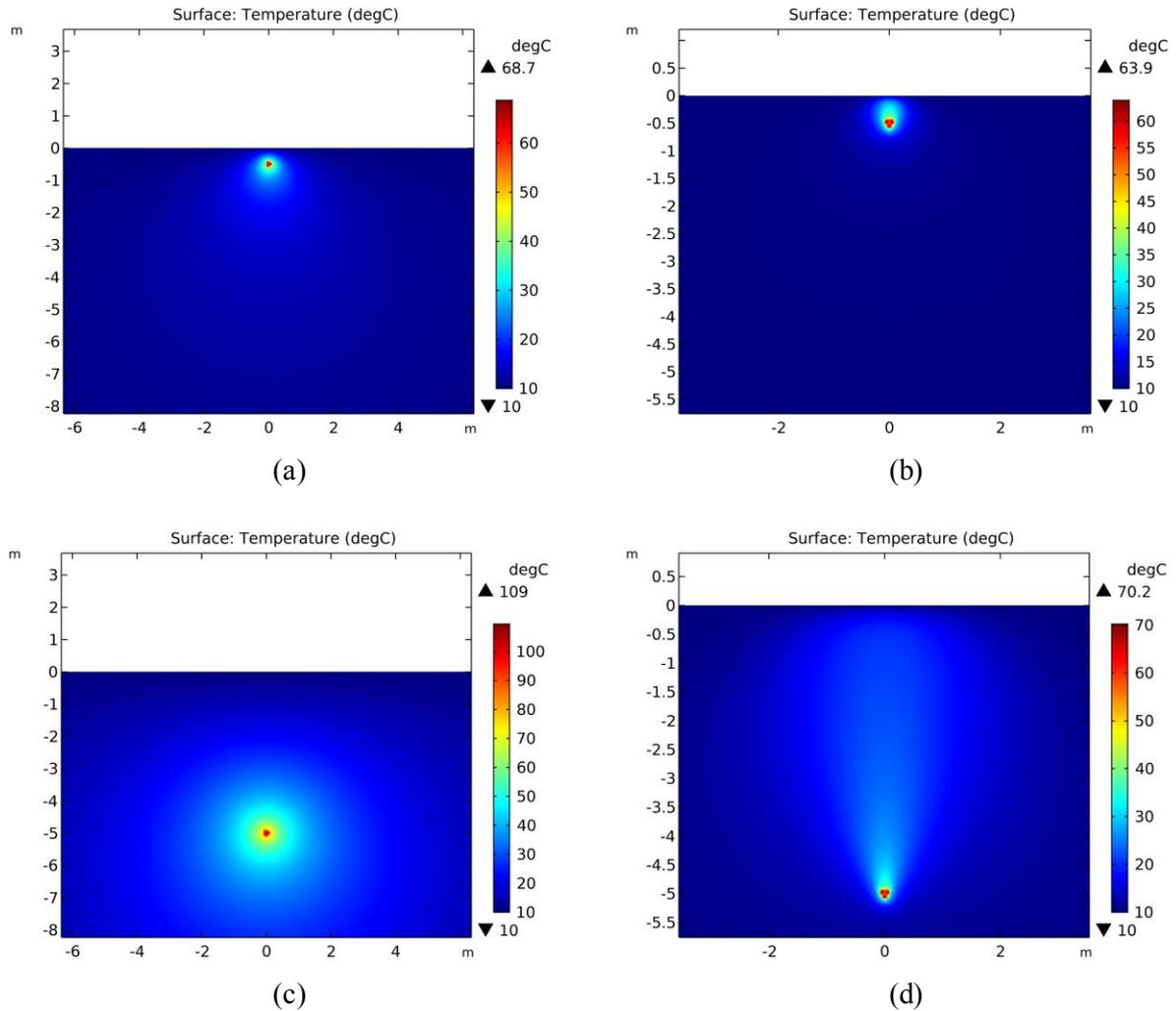


Figura 27. Detalles de la distribución de temperaturas en algunas de las simulaciones realizadas para comparar el modelo 1, (a) y (c), y el modelo 2, (b) y (d)

7 CONCLUSIONES

Este trabajo ha sido una tarea de grandes dimensiones y ha requerido una dedicación considerable: siete meses y más de 400 horas. En una primera fase, se ha realizado un importante trabajo de investigación bibliográfica para tratar de situar el trabajo en una posición acorde con el estado del arte. Más adelante se ha realizado el desarrollo del modelo de elementos finitos, lo cual ha requerido de una gran investigación y autoaprendizaje, no tanto sobre cuestiones relacionadas con el propio método de los elementos finitos, sino más bien con el software de COMSOL Multiphysics. A lo largo de todo este proceso, también se ha destinado una cantidad considerable de recursos a la redacción y realización de gráficos e ilustraciones para la memoria del trabajo, tratando de aportar la mayor calidad y claridad posible al texto.

El resultado ha sido satisfactorio. Se ha cumplido el principal objetivo del trabajo, que era el desarrollo de un modelo de elementos finitos que modelase el comportamiento térmico de un cable tripolar de alta tensión enterrado bajo un subsuelo marino poroso. El modelo ha sido validado con éxito, contrastando los resultados con los obtenidos por otros autores a partir de modelos similares. Además, se pretendía extender la complejidad del modelo más allá de lo presente en el estado del arte, y se ha conseguido. Tomando como referencia el modelo más completo encontrado en la literatura ([5]), se han realizado las siguientes mejoras:

- Se ha desarrollado un modelo que acopla los problemas electromagnético y termofluido (subcapítulo 5.3), el cual solo recibe como dato de entrada la intensidad nominal del cable. Esto supone una mejora sustancial respecto a calcular las pérdidas térmicas en el cable a través de normas técnicas como la IEC 60287, como se hace en [5].
- Se ha eliminado la aproximación de Boussinesq, de tal manera que todas las propiedades del agua salada presentes en las ecuaciones son evaluadas en función de la temperatura en cada punto (Apéndice I – Aproximación de Boussinesq).
- Se ha modelado el flujo poroso a través de las ecuaciones de Brinkman en vez de las ecuaciones de Darcy (ver subcapítulo 4.1).
- Se ha desarrollado un material de agua salada para COMSOL Multiphysics (Apéndice II – Propiedades del agua salada).

Otro de los objetivos era comparar los resultados obtenidos mediante el nuevo modelo desarrollado con los resultados obtenidos mediante un modelo más simple, como el empleado en el TFG que precede a este trabajo ([6]). En el subcapítulo 6.2 se ha detallado esta comparación y se ha puesto de manifiesto que, para terrenos con una permeabilidad alta donde se generan flujos convectivos a través del medio poroso, los resultados entre un modelo y otro difieren enormemente, lo que indica que el uso de un modelo excesivamente simplificado puede aportar una visión muy alejada de la realidad para este tipo de terrenos. En estos casos, un modelo como el desarrollado en este trabajo puede aportar enormes ventajas a la hora de realizar los cálculos para proyectos de cables enterrados bajo el lecho marino, siempre y cuando se tenga una descripción precisa y detallada sobre los sedimentos a lo largo de la ruta del cable.

Una posible continuación y mejora de este trabajo podría ser la modelización de la transferencia de calor entre el suelo marino y el agua utilizando las herramientas de COMSOL, en concreto incluyendo el agua marina como un medio fluido en la interfaz “Free and porous media flow”, que permite simular flujo libre, flujo poroso y la interacción entre ambos. Se ha intentado en este trabajo, pero no ha sido viable debido a la complejidad del modelo y la potencia de cálculo requerida, como se detalla en el subcapítulo 5.2. Asimismo, otra posible futura línea de investigación puede ser continuar la elaboración del modelo acoplado descrito en el subcapítulo 5.3.

APÉNDICE I – APROXIMACIÓN DE BOUSSINESQ

La aproximación de Boussinesq se emplea en la resolución de flujos no isotérmicos, como los problemas de convección libre, con el objetivo de no tener que resolver las ecuaciones de Navier-Stokes completas [27]. Esta aproximación era un método ampliamente utilizado hace algunos años, cuando los ordenadores no disponían de tanta potencia de cálculo como hoy en día y, por tanto, el uso de aproximaciones como esta podía suponer unos costes computacionales significativamente menores. Sin embargo, hoy en día el coste computacional ha dejado de ser un problema, salvo por algunos modelos 3D de alta complejidad y tamaño, por lo que su uso ha ido disminuyendo.

La aproximación de Boussinesq asume que las variaciones de densidad no tienen efecto sobre el flujo, excepto sobre las fuerzas de flotación, es decir, el término de las ecuaciones de Navier-Stokes en el que la densidad multiplica a la gravedad. La aproximación es precisa cuando las variaciones de densidad son pequeñas, típicamente en movimiento de fluidos a temperatura ambiente, ventilación natural de edificios, etc.

Definición de la aproximación de Boussinesq

Las ecuaciones de Navier-Stokes para un fluido compresible general son:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) - \frac{2}{3} \mu (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I} \right) + \rho \mathbf{g} \quad (19)$$

donde \mathbf{u} es la velocidad del fluido, p es la presión, ρ es la densidad, μ es la viscosidad dinámica, \mathbf{I} es la matriz identidad y \mathbf{g} es la aceleración de la gravedad. Las ecuaciones de Navier-Stokes se resuelven junto con la ecuación de continuidad:

$$\frac{1}{\rho} \frac{D\rho}{Dt} + \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (20)$$

La aproximación de Boussinesq establece que la variación de densidad solo es relevante en el término de flotabilidad, $\rho \mathbf{g}$, y despreciable en el resto de la ecuación, donde ρ es sustituido por una densidad constante ρ_0 . De esta forma, (20) se reduce a su forma incompresible, $\nabla \cdot \mathbf{u} = 0$. El término $-\frac{2}{3} \mu (\nabla \mathbf{u}) \mathbf{I}$ también es igual a cero, y la viscosidad dinámica μ normalmente se considera constante, por lo que el término difusivo $\nabla \cdot \left(\mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T) \right)$ puede ser reescrito como $\mu \nabla^2 \mathbf{u}$, quedando las ecuaciones de Navier-Stokes de la siguiente manera:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho \mathbf{g} \quad (21)$$

El término de flotabilidad puede expresarse en función de la variación de densidad, $\Delta \rho = \rho - \rho_0$. Expresando, a su vez, la variación de densidad en función del coeficiente de expansión térmica ($\Delta \rho = -\rho_0 \beta (T - T_0)$), se tiene finalmente:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + (\rho_0 - \rho_0 (T - T_0) \beta) \mathbf{g} \quad (22)$$

Cambio de presión

La aproximación de Boussinesq solo es válida cuando $\Delta p \ll p$. Para evitar errores de redondeo en el cálculo del término de flotabilidad, la presión y el término de flotabilidad, $-\nabla p + (\rho_0 - \rho_0 (T - T_0) \beta) \mathbf{g}$, son habitualmente reescritos como $-\nabla P + \Delta \rho \mathbf{g}$, con $P = p + \rho_0 g h$, donde h es la elevación. Las ecuaciones de Navier-Stokes quedan, pues, así:

$$\rho_0 \left(\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla \mathbf{u} \right) = -\nabla P + \mu \nabla^2 \mathbf{u} + \rho_0 (T - T_0) \beta \mathbf{g} \quad (23)$$

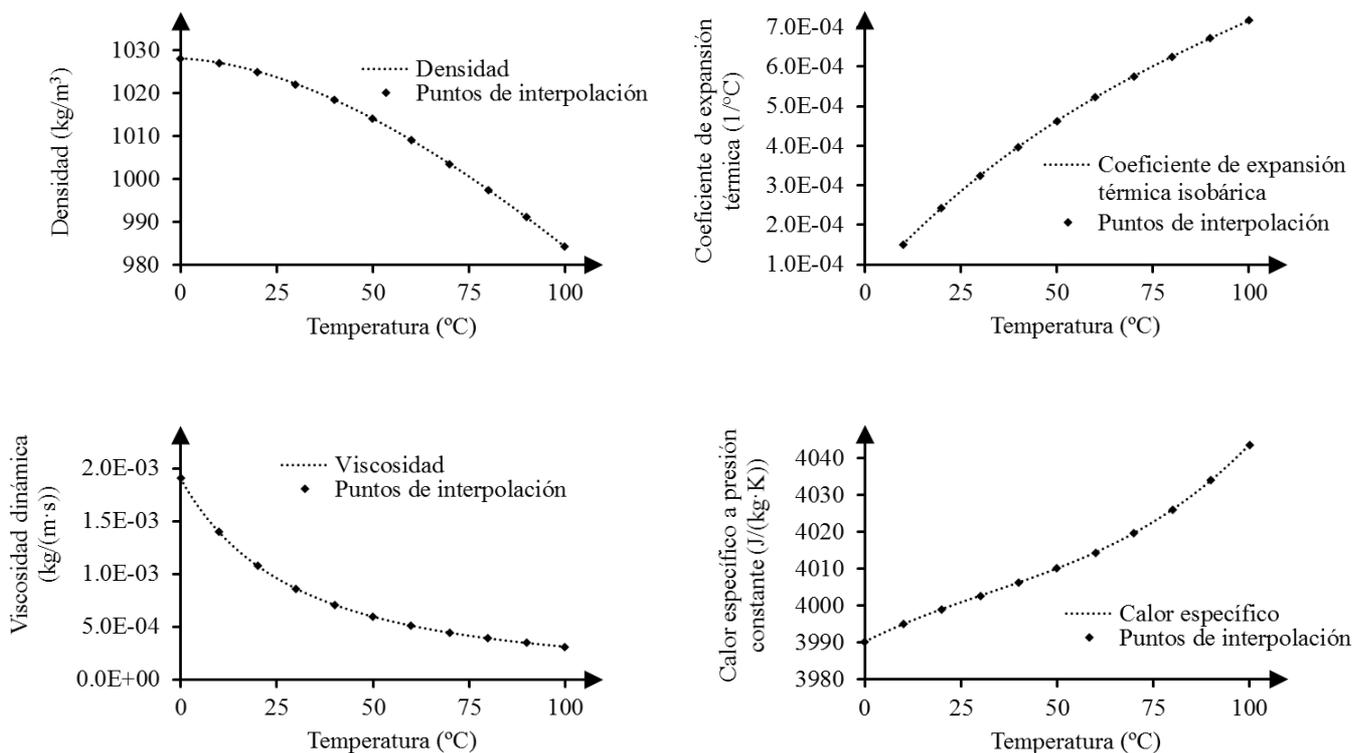
Este cambio se conoce como cambio de presión.

APÉNDICE II – PROPIEDADES DEL AGUA

SALADA

Si bien existen situaciones donde puede ser de interés estudiar el comportamiento térmico de cables HVAC tripolares enterrados bajo agua dulce (cruces de ríos o grandes lagos), en la amplia mayoría de los casos estos cables son instalados bajo el agua marina. Por tanto, para añadir precisión y consistencia a los modelos elaborados en este trabajo se ha desarrollado un material en COMSOL que modela el agua salada. Se ha modelado la variación de las diferentes propiedades con respecto a la temperatura a través de funciones de interpolación por tramos de 10 °C, como puede apreciarse en la Figura 28. De esta manera se posibilita que en el modelo termofluido los valores de propiedades como la densidad, la viscosidad o la capacidad calorífica sean evaluados en cada punto en función de la temperatura.

Los valores de las propiedades del agua salada han sido obtenidos de una herramienta desarrollada y distribuida de forma gratuita por el MIT (Massachusetts Institute of Technology) llamada SEAWATER_VBA ([23] y [24]). Esta herramienta consiste en un complemento para Excel y otras herramientas de cálculo como Matlab o EES, y proporciona el valor de múltiples propiedades del agua salada en función de la temperatura, la presión y la salinidad. Para la elaboración del material en COMSOL se ha supuesto una salinidad de 35 g/kg [14] y una presión de 1 atm.



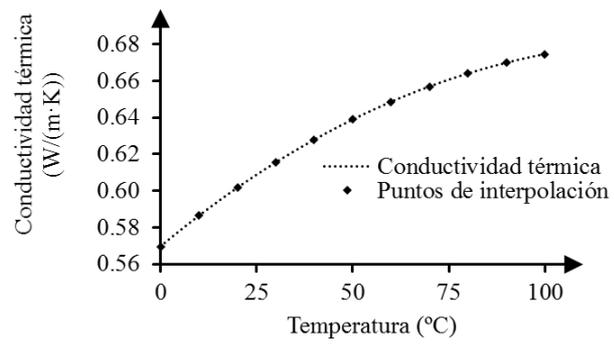


Figura 28. Representación gráfica de los valores de las propiedades del material de agua salada desarrollado para COMSOL

GLOSARIO DE SÍMBOLOS Y CONCEPTOS

- **Densidad seca:** es la densidad de los sedimentos sin tener en cuenta su contenido en agua, es decir, una vez han sido secados.
- m^2 : metros cuadrados, unidad de superficie.
- **K:** Kelvin, unidad de temperatura.
- **Pa:** Pascal, unidad de presión.
- **s:** segundo, unidad de tiempo.
- **Porosidad (θ_p):** es la fracción de volumen en tanto por uno que está ocupada por poros. Por tanto, puede variar entre 0 para dominios puramente sólidos y 1 para dominios puramente fluidos.
- **Nu:** número de Nusselt.
- u_0 (m/s): velocidad del agua sobre la superficie del subsuelo marino.
- x (m): coordenada horizontal, tomando como origen el centro del cable.
- $C_p \left(\frac{J}{kg \cdot K} \right)$: capacidad calorífica a presión constante.
- $k_f \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$: conductividad térmica del fluido.
- $k_s \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$: conductividad térmica del sólido.
- $k_{eff} \left(\frac{W}{m \cdot K} \right)$: conductividad térmica efectiva.
- **Factor de densidad de empaquetamiento:** es un coeficiente que multiplica a la conductividad térmica del material del cual está hecho el conductor de un cable. Varía entre 0 y 1 según la configuración interna del conductor. Se aplica para modelar la resistencia térmica global que ofrece intrínsecamente un conductor que no es un material uniforme y continuo en todo su dominio, sino que está formado por múltiples hilos aislados eléctricamente entre sí.
- μ (Pa · s): es la viscosidad dinámica del fluido.
- u (m/s): es el vector de velocidad.
- ρ (kg/m³): es la densidad del fluido.
- p (Pa): es la presión.
- k es el tensor de permeabilidad del medio poroso
- Q_{br} es el flujo másico
- F (N): representa el vector de fuerzas externas en Newtons.
- $h_{sf} \left(\frac{W}{m^2 K} \right)$: es coeficiente de transferencia de calor intersticial entre la fase sólida y la fase fluida.
- r_h (m): es el radio hidráulico, es decir, el área dividida entre el perímetro.
- k (m²): es el tensor de permeabilidad.
- d (m): es el diámetro medio de grano.

GLOSARIO DE ACRÓNIMOS Y SIGLAS

- HVAC – High Voltage Alternating Current.
- HVDC – High Voltage Direct Current.
- XLPE – Cross-linked Polyethylene.

REFERENCIAS

- [1] F. Aras y C. Oysu, «An Assessment of the Methods for Calculating Ampacity of Underground Power Cables,» *Electric Power Components and Systems*, n° 33, pp. 1385-1402, Diciembre 2005.
- [2] N. Duraisamy, H. Gooi, H. Tian y A. Ukil, «Ampacity and Electro-Magnetic Modeling for High-Voltage Subsea Cables Installed in Saturated Seabed,» *IEEE*, pp. 1664-1668, 2018.
- [3] T. Worzyk, *Submarine Power Cables*, Rödeby: Springer, 2009.
- [4] B1.35, Working Group, «A Guide for Rating Calculations of Insulated Cables,» Cigré, 2015.
- [5] T. J. H. J. A. P. M. I. J. K. D. T. M. G. a. C. E. L. T. Timothy J. Hughes, «Effect of Sediment Properties on the Thermal Performance of Submarine HV Cables,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 30, n° 6, pp. 2443 - 2450, DECEMBER 2015.
- [6] A. Rina Carpintero y J. del Pino López, «Modelado térmico de cables trifásicos submarinos,» *Departamento de Ingeniería Eléctrica, Escuela Politécnica Superior, Universidad de Sevilla*, 2019.
- [7] T. Bragatto, M. Cresta, F. Gatta, A. Geri, M. Maccioni y M. Paulucci, «A 3-D nonlinear thermal circuit model of underground MV power cables and their joints,» *Electric Power Systems Research*, 2019.
- [8] L. Wang, X. Zhang, Y. Zhao, J. Zhang, M. Hu y Z. Yan, «Research on improving the ampacity of high voltage single core submarine cable,» *10th International Conference on Insulated Power Cables*, 2019.
- [9] W. Wang, Z. Wang, Y. Hu y L. Zhang, «Modeling of thermal distribution of submarine three-core XLPE cable with respect to the buried depth and thermal conductivity of the soil,» *10th International Conference on Insulated Power Cables*, 2019.
- [10] J. J. BREMNES, G. EVENSET y R. STØLAN, «Power loss and inductance of steel armoured multi-core cables: comparison of IEC values with “2,5D” FEA results and measurements,» *Cigre*, 2010.
- [11] J. C. del-Pino-López, M. Hatlo y P. Cruz-Romero, «On Simplified 3D Finite Element Simulations of Three-Core Armored Power Cables,» *Energies*, n° 3081, 2018.
- [12] C.-H. Bonnard, A. Blavette, S. Bourguet y A. Charmetant, «Modeling of a wave farm export cable for electro-thermal sizing studies,» *Renewable Energy*, 2019.
- [13] D. Chatzipetros y J. Pilgrim, «Review of the Accuracy of Single Core Equivalent Thermal Model for Offshore Wind Farm Cables,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, vol. 33, n° 4, 2018.
- [14] N. W. Service, «JetStream,» National Oceanic and Atmospheric Administration, [En línea]. Available: <https://www.weather.gov/jetstream/seawater>. [Último acceso: 3 5 2020].
- [15] E. Ruiz Reina, «Addlink,» Addlink Software Científico, Universidad de Málaga, 19 2 2020. [En línea]. Available: <https://addlink.webex.com/recordingservice/sites/addlink/recording/68f6c9f6ef724e679ccb957da3ed0>

64. [Último acceso: 17 3 2020].

- [16] COMSOL, Subsurface Flow Module User's Guide, 2018.
- [17] C. Multiphysics, The Heat Transfer Module User's Guide, 2018.
- [18] D. N. a. A. Bejan, Convection in Porous Media, Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2013.
- [19] «Aqua-Calc,» [En línea]. Available: <https://www.aqua-calc.com/page/density-table/substance/sand-coma-and-blank-dry>.
- [20] «Engineering Toolbox,» [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/density-solids-d_1265.html. [Último acceso: 4 2020].
- [21] «Engineering Toolbox, Cp,» [En línea]. Available: https://www.engineeringtoolbox.com/specific-heat-capacity-d_391.html. [Último acceso: 4 2020].
- [22] «Physics World,» [En línea]. Available: http://www.hk-phy.org/contextual/heat/tep/temch02_e.html [Último acceso: 4 2020].
- [23] M. S. L. B. a. J. L. V. K.G. Nayar, «Thermophysical properties of seawater: A review and new correlations that include pressure dependence,» *Desalination*, vol. 390, pp. 1-24, 2016.
- [24] J. H. L. V. a. S. M. Z. Mostafa H. Sharqawy, «Thermophysical properties of seawater: A review of existing correlations and data,» *Desalination and Water Treatment*, vol. 16, pp. 354-380, Abril 2010.
- [25] COMSOL Multiphysics, Submarine Cable 6 - Thermal Effects.
- [26] S. & B. B. & B. B. Forster, «Permeability of Sands in the Coastal Areas of the Southern Baltic Sea: Mapping a Grain-size Related Sediment Property,» *Aquatic Geochemistry*, vol. 9, pp. 171-190, 2003.
- [27] COMSOL Multiphysics, «Multiphysics Cyclopedia,» [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/multiphysics/boussinesq-approximation>. [Último acceso: 12 Marzo 2020].