



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento: Ingeniería Eléctrica

Área de Conocimiento: Ingeniería Eléctrica

PROYECTO/TRABAJO FIN DE MÁSTER

**Análisis de corrientes parásitas en la transferencia inalámbrica
de potencia para entornos acuáticos**

Máster en Ingeniería Industrial

Autora: Ruth Cueto García

Tutora: Alicia Triviño Cabrera

Cotutora: Inmaculada Concepción Casaucao Tenllado

MÁLAGA, septiembre de 2025

Análisis de corrientes parásitas en la transferencia
inalámbrica de potencia para entornos acuáticos

Ruth Cueto García

Resumen

El presente trabajo titulado *Análisis de corrientes parásitas en la transferencia inalámbrica de potencia para entornos acuáticos* busca estudiar los efectos que aparecen en un cargador inductivo inalámbrico cuando la transmisión de potencia se realiza en agua salada.

Para ello, se realiza un modelo de las bobinas en ANSYS Maxwell para dimensionar el circuito eléctrico de un sistema de carga, considerando las corrientes parásitas que se inducen en el agua. También se efectúan variaciones de la cantidad de sal en el agua, estudiando las repercusiones sobre el modelo. Además, se implementan las bobinas de forma experimental considerando las especificaciones de diseño. Gracias a esta validación, se comprueba la idoneidad de los resultados arrojados por el programa a partir de la comparación de los resultados obtenidos con el modelo previamente con los medidos en el laboratorio.

Por último, se resuelve el circuito obtenido con la ayuda de una aplicación desarrollada en *App Designer*, en el entorno de MATLAB. Con ella, se llevan a cabo una serie de pruebas para determinar el efecto del agua salada en las tensiones y corrientes, así como en la eficiencia del sistema de transferencia de potencia.

Palabras clave: carga inalámbrica, agua salada, corrientes parásitas, salinidad, capacidades parásitas, ANSYS Maxwell, *App Designer*, MATLAB.

Abstract

The present work entitled *Analysis of eddy currents in the Wireless Power Transfer for Aquatic Environments* studies the effects that appear in an inductive wireless loader when the power transmission takes place in salt water.

To do this, a model of the coils is made in ANSYS Maxwell to size the electrical circuit of a charging system, considering the parasitic currents that are induced in water. Variations in the amount of salt are also carried out, studying the repercussions about the model. In addition, the coils are implemented experimentally, taking into account the design specifications. Thanks to this validation, the suitability of the results produced by the programme is verified by comparing the results obtained with the model previously with those measured in the laboratory.

Finally, the circuit obtained with the help of an application is solved developed in *App Designer*, in the MATLAB environment. With it, it is possible to carry out a series of tests to determine the effect of salt water in the voltages and currents, as well as in the efficiency of the power transfer.

Keywords: wireless charging, seawater, eddy currents, salinity, parasitic capacitances, ANSYS Maxwell, *App Designer*, MATLAB.

Índice general

1. Introducción	15
1.1. Objetivos	16
2. Transferencia inalámbrica de potencia	19
2.1. Antecedentes	19
2.2. Características	20
2.3. Ventajas e inconvenientes	22
2.4. Topologías de compensación	23
2.5. Geometría de las bobinas	25
2.6. Transmisión de potencia en aire	26
2.6.1. Circuito equivalente	26
2.7. Transmisión de potencia en agua salada	28
2.7.1. Efecto del agua	29
2.7.1.1. Capacidades parásitas	30
2.8. Circuito en agua salada	36
2.8.1. Caso 1. Circuito con corrientes parásitas	37
2.8.2. Caso 2. Circuito con corrientes y capacidades parásitas	38
3. Modelado de las bobinas	43
3.1. Programas de simulación	43
3.1.1. ANSYS Maxwell	43
3.1.2. MATLAB	44
3.2. Especificaciones de diseño	44
3.3. Diseño de las bobinas en ANSYS	45
3.3.1. Configuración del modelo	49
3.3.1.1. Corrientes parásitas	49
3.3.1.2. Condensador parásito	52
3.4. Análisis previos	52
4. Resultados	57
4.1. Comparación de los modelos	59
4.2. Implementación experimental	62
4.3. Estudio de la salinidad	65
4.3.1. Estudio 1: bobinas de 150 mm	66

ÍNDICE GENERAL

4.3.2. Estudio 2: bobinas de 300 mm	73
4.4. Dimensionamiento del circuito acuático	78
4.4.1. Cálculo de la resistencia	78
4.4.2. Cálculo de la inductancia	83
4.4.3. Comparación con la simulación en agua salada	88
4.5. Comportamiento del cargador inductivo	89
5. Conclusiones y líneas futuras	95
5.1. Conclusiones	95
5.2. Líneas futuras	96
6. Bibliografía	99

Índice de figuras

2.1.	Diagrama genérico de bloques del proceso de carga inductiva básica. . .	21
2.2.	Diferentes topologías de compensación. (a) Serie-Serie. (b) Serie-Paralelo. (c) Paralelo-Serie. (d) Paralelo-Paralelo.	24
2.3.	Circuito eléctrico de un cargador inductivo en el aire.	26
2.4.	Condensadores parásitos en el circuito equivalente de WPT en agua salada.	31
2.5.	Circuito equivalente en T de un cargador inductivo en agua salada con un solo condensador parásito.	31
2.6.	Circuito equivalente en T simplificado.	33
2.7.	Transformación de triángulo a estrella del circuito.	34
2.8.	Circuito equivalente en T simplificado con dos condensadores.	34
2.9.	Transformación de triángulo a estrella del circuito con dos condensa- dores.	35
2.10.	Diagrama de un cargador inductivo en agua salada.	36
2.11.	Circuito del sistema de carga bajo el agua considerando solo las co- rrientes parásitas.	37
2.12.	Circuito del sistema de carga bajo el agua.	38
2.13.	Circuito equivalente en agua salada con compensación SS.	40
2.14.	Circuito equivalente en T en agua salada con compensación SS.	40
3.1.	Propiedades de la bobina primaria.	45
3.2.	Propiedades de la bobina secundaria.	46
3.3.	Modelado de las bobinas primaria y secundaria.	46
3.4.	Bobinas primaria y secundaria.	47
3.5.	Bobinas en un entorno acuático.	47
3.6.	Listado de materiales.	48
3.7.	Propiedades del hilo de Litz y el agua de mar.	48
3.8.	Configuración de la solución.	49
3.9.	Obtención de la sección de la bobina.	49
3.10.	Secciones de las bobinas.	50
3.11.	Dirección del devanado.	50
3.12.	Configuración de la frontera del sistema.	51
3.13.	Configuración del campo <i>Optimetrics</i>	51
3.14.	Modelo completo con una lámina metálica [36].	53

ÍNDICE DE FIGURAS

3.15. Modelo completo con un objeto de aluminio.	53
3.16. Distribución de las corrientes parásitas en el artículo [36].	54
3.17. Distribución de las corrientes parásitas en la lámina de aluminio.	54
3.18. Modelo con una lámina de agua salada entre las bobinas.	55
3.19. Modelo con una lámina de agua salada entre las bobinas.	55
4.1. Diagrama de flujo.	58
4.2. Variación de la resistencia con la distancia entre las bobinas.	60
4.3. Variación de la inductancia con la distancia entre las bobinas.	61
4.4. Variación del coeficiente de acoplamiento con la distancia entre las bobinas.	62
4.5. Variación del condensador parásito con la distancia entre las bobinas.	62
4.6. Disposición de las bobinas en agua salada.	62
4.7. Configuración del medidor LCR.	63
4.8. Conexión para medir la inductancia total.	63
4.9. Comparativa del coeficiente de acoplamiento en agua salada y aire.	65
4.10. Definición del barrido de la conductividad en el agua salada	66
4.11. Introducción de la variable definida en la definición del agua de mar.	66
4.12. Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del primario para unas bobinas de 150 mm.	67
4.13. Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del secundario para unas bobinas de 150 mm.	68
4.14. Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del primario para unas bobinas de 150 mm.	68
4.15. Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del secundario para unas bobinas de 150 mm.	69
4.16. Impacto de la conductividad del agua en β_{R1}	70
4.17. Impacto de la conductividad del agua en β_{R2}	70
4.18. Impacto de la conductividad del agua en β_{L1}	71
4.19. Impacto de la conductividad del agua en β_{L2}	71
4.20. Variación de la inducción mutua con la conductividad del agua.	72
4.21. Impacto de la conductividad en $\beta_{M_{air}}$	72
4.22. Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del primario para unas bobinas de 300 mm.	73
4.23. Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del secundario para unas bobinas de 300 mm.	74
4.24. Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del primario para unas bobinas de 300 mm.	74
4.25. Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del secundario para unas bobinas de 300 mm.	75
4.26. Relación entre la resistencia del primario de ambos estudios.	76
4.27. Relación entre la resistencia del secundario de ambos estudios.	76
4.28. Relación entre la inductancia del primario de ambos estudios.	77
4.29. Relación entre la inductancia del secundario de ambos estudios.	78

4.30. Cálculo de las pérdidas óhmicas en ANSYS.	79
4.31. Distribución de las pérdidas óhmicas en las bobinas para un Gap = 50 mm.	80
4.32. Distribución de las pérdidas óhmicas en las bobinas para un Gap = 50 mm.	80
4.33. Distribución de las pérdidas óhmicas en el agua de mar para un Gap = 50 mm.	81
4.34. Distribución de las pérdidas óhmicas en el agua salada para un Gap = 50 mm.	81
4.35. Cálculo de la corriente en ANSYS.	82
4.36. Cálculo de la energía en el agua en ANSYS.	84
4.37. Distribución de la energía en las bobinas para un Gap = 50 mm.	85
4.38. Distribución de la energía en el agua de mar para un Gap = 50 mm.	85
4.39. Densidad de energía en las bobinas para un Gap = 50 mm.	86
4.40. Densidad de energía en el agua para un Gap = 50 mm.	86
4.41. Vista de la aplicación para el circuito en aire.	90
4.42. Vista de la aplicación para el circuito en agua salada, considerando solo las corrientes eddy.	91
4.43. Vista de la aplicación para el circuito en agua salada completo.	91
4.44. Corriente y tensión del primario para una compensación SS.	93
4.45. Eficiencia del primario para una compensación SS.	94

Índice de tablas

3.1. Especificaciones de diseño	44
3.2. Valores asignados a las variables.	46
3.3. Comparación entre ambos modelos.	53
3.4. Valores con agua en medio de las bobinas.	55
4.1. Resultados de la simulación en agua.	59
4.2. Valores del condensador parásito.	59
4.3. Resultados de la simulación en aire.	59
4.4. Mediciones realizadas en el laboratorio.	64
4.5. Resultados obtenidos a partir de las mediciones.	64
4.6. Pérdidas óhmicas en el agua según la distancia de separación de las bobinas.	80
4.7. Corriente en el agua según la distancia de separación de las bobinas.	82
4.8. Resistencia en el agua según la distancia de separación de las bobinas en ANSYS Maxwell.	83
4.9. Resistencia en el agua según la distancia de separación de las bobinas.	83
4.10. Energía en el agua según la distancia de separación de las bobinas.	84
4.11. Inductancia en el agua según la distancia de separación de las bobinas en ANSYS Maxwell.	87
4.12. k según la distancia de separación de las bobinas.	87
4.13. Inductancia en el agua en función de la distancia de separación de las bobinas.	88
4.14. Error absoluto máximo con respecto a los valores en ANYS Maxwell.	89
4.15. Comparativa de tensiones y corrientes en agua y agua salada considerando solo las corrientes parásitas.	92
4.16. Comparativa de tensiones y corrientes en aire y agua salada.	92
4.17. Intensidad en el agua salada.	93

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de los años, el vehículo eléctrico (VE) ha ganado protagonismo en el ámbito de la movilidad gracias a su baja huella de carbono y su elevada eficiencia energética con respecto a los vehículos de combustión. De hecho, las emisiones durante el ciclo de vida de los coches eléctricos con batería son casi cuatro veces menores que las de los coches de gasolina [1]. Por estas y otras ventajas, se erige como la alternativa idónea a la movilidad tradicional.

Por ello, su expansión se ha convertido en un objetivo estratégico; es decir, una meta a largo plazo en España. Esto se demuestra en las ayudas dispuestas tanto para su fabricación como para su compra, así como en el despliegue de la infraestructura de recarga para estos vehículos [2]. Todo ello impulsado por el Programa MOVES III, recogido en el Real Decreto 821/2023 [3].

Uno de sus puntos débiles es su limitada autonomía, que oscila entre 250 y 800 km conducidos tras una carga [4]. Habitualmente, la carga se efectúa mediante un cable, lo que se conoce como carga conductiva. Sin embargo, dicha topología de carga entraña riesgos por contacto directo e indirecto para el usuario, por el aumento de los voltajes de funcionamiento del vehículo [5]. Aunque existen diferentes normas sobre la protección que debe existir en los puntos de carga, se están explorando otras posibilidades en vista de la seguridad como la transferencia inalámbrica de potencia.

Asimismo, dicha tecnología permite la carga de dispositivos en espacios donde la conexión entre el dispositivo y el punto de recarga puede ser especialmente complicada, como en entornos acuáticos [6]. De ahí, surge el interés por el desarrollo de sistemas que posibiliten la carga de dispositivos submarinos sin la necesidad de intervención humana.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

No obstante, hay que tener en cuenta la distancia para llegar al punto de recarga y el trabajo que deben realizar. Luego, un punto clave a considerar es su autonomía. Por ello, se están investigando diferentes soluciones como los sistemas de almacenamiento de energía, que incluyen celdas de combustible, semiceldas de combustible y baterías primarias y secundarias. Además, la energía térmica oceánica y la energía undimotriz también se utilizan para alimentar los AUV [7] (vehículos submarinos autónomos). Pero, a largo plazo, la transferencia inalámbrica de potencia se convertirá en una solución más eficiente.

Al estar en un entorno acuático, es decir, en contacto con el agua salada, existen otros elementos que afectan a la transferencia de potencia como la presión, la temperatura o las corrientes marinas. Asimismo, la variación del medio en el que se produce la carga genera una serie de efectos que habrán de tenerse en consideración y que afectarán al rendimiento del sistema.

1.1. Objetivos

El objeto principal de este trabajo es la creación de un modelo para el análisis de los efectos que producen las corrientes parásitas en la transferencia inalámbrica de potencia en agua salada. En concreto, se persiguen los siguientes objetivos:

1. **Modelar el cargador inductivo en ANSYS Maxwell, estudiando los efectos que produce el agua en el sistema.**

Se diseñan las bobinas y se introduce entre ellas un bloque de agua salada. Esto permitirá el dimensionamiento de las bobinas, analizando los cambios producidos con respecto a un entorno aéreo.

2. **Estudiar el efecto que produce la variación de la salinidad en la transferencia de potencia.**

Con el modelo, se efectúan iteraciones con la conductividad del agua con el fin de estudiar los cambios ocasionados en la resistencia e inductancia de la bobina.

3. **Modelar las corrientes parásitas, analizando los efectos que producen en la transferencia de potencia.**

Teniendo como base el modelo realizado, se dimensionan las corrientes parásitas como una resistencia y una bobina, acoplada a los devanados del primario y del secundario.

4. **Diseñar una aplicación en MATLAB para el cálculo de las tensiones y corrientes, así como la eficiencia del sistema.**

Se crea una plataforma que, mediante la introducción por parte del usuario de los valores necesarios, muestre por pantalla la tensión e intensidad que circula por el primario, así como la eficiencia del sistema calculado.

5. **Analizar el comportamiento del sistema considerando solo las corrientes parásitas y teniendo también en cuenta las capacidades parásitas.**

Se estudia por separado solo el efecto de las corrientes parásitas en la transferencia, comparando los resultados con el sistema que considera también las capacidades parásitas.

CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Capítulo 2

Transferencia inalámbrica de potencia

2.1. Antecedentes

La aparición de la transferencia inalámbrica de potencia se asocia a Nikola Tesla a finales del siglo XIX y principios del siglo XX [8] - [9]. Sin embargo, tiene como precedente los trabajos de James Maxwell y Heinrich Hertz en el siglo XIX. Las famosas ecuaciones de Maxwell en su «Tratado sobre electricidad y magnetismo», publicado en 1873, predijeron que la energía podía transmitirse de un punto a otro en el espacio libre mediante ondas electromagnéticas [10]. Después, Hertz se encargó de realizar una serie de experimentos (1885-1889) que permitieron validar el trabajo de Maxwell [10] - [11].

A principios del siglo XX, Tesla desarrolló un proyecto acuñado con el nombre " *Wardencllyffe Tower* ", conocido también como *Tesla Tower* [12]. Efectuado en Long Island (Nueva York), consistió en una bobina de grandes dimensiones. Dicha bobina estaba atada a un mástil de 200 pies de altura, en cuya cúspide se había dispuesto una bola. Desgraciadamente, el experimento fracasó porque la potencia transmitida se difundió en todas direcciones utilizando ondas de radio de 150 kHz con una longitud de onda de 21 km [13].

Posteriormente, la falta de interés hacia la transferencia inalámbrica de energía puede explicarse por la falta de medios técnicos, especialmente generadores de alta potencia y alta frecuencia [14]. No sería hasta la década de los 50 cuando se retomaría su investigación a raíz del desarrollo de conflictos bélicos.

En 1968, Peter Glaser llevó a cabo el proyecto *Solar Power Satellite* para la trans-

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

misión de elevadas potencias. Su objetivo era disponer de un satélite que almacenara energía solar y la transportara después mediante ondas microondas. Sin embargo, nunca se llevó a la práctica debido al gran tamaño del satélite propuesto [14].

En cuanto a la transferencia de potencia inductiva, objeto del presente trabajo, los ingenieros Maurice Hautin y Maurice Le-Blanc crearon un prototipo para la carga inductiva de un vehículo eléctrico en 1894 [15]. Sin embargo, debido al auge del motor de combustión, la investigación de la carga inductiva no prosperó.

De hecho, no fue hasta la segunda mitad del siglo XX cuando se desarrolló un vehículo con carga inductiva en la Universidad de Auckland. Don Otto adoptó dos conductores de sección transversal circular de cobre, uno de los cuales se colocó en la carretera como transmisor y el otro se colocó en la carrocería del vehículo eléctrico a una altura de 20 cm por encima de la superficie de la carretera [16]. También se ejecutaron otros proyectos en Estados Unidos, Francia y Alemania en los años 80 y 90.

Más adelante, en 2006, un equipo del MIT propone la resonancia magnética fuertemente acoplada, permitiendo la transmisión de 60 W de forma inalámbrica con una eficiencia de aproximadamente el 40 % a distancias superiores a 2 metros [17].

2.2. Características

La transferencia inalámbrica de potencia, a diferencia de los sistemas convencionales de carga conductiva, aboga por una mejor experiencia para el usuario al no requerir un contacto físico con el dispositivo. Además, permite una disminución del mantenimiento del sistema, prolongando así la vida del mismo. También posibilita la carga del equipo en movimiento.

En la literatura ([18], [19], [20], [21], [22], [23]), la transferencia inalámbrica se divide en dos categorías: campo lejano (radiativo) y campo cercano (no radiativo). Se diferencian según el mecanismo de transmisión de energía [23]. En [18], se establecen dos subcategorías dentro de cada tipología: acoplamiento magnético (MC-WPT) y eléctrico (EC-WPT) en el campo cercano y, dentro del campo lejano, ultrasonido (US-WPT) y óptico/láser (L-WPT). Los subtipos mencionados en el campo cercano también se conocen como acoplamiento inductivo y capacitivo, respectivamente [23].

La transferencia en campo cercano (distancias medias-bajas respecto a la longitud de onda) posee una mayor eficiencia, siendo superior al 80 % [22]. Además, el rango de potencias transmitidas es mayor, especialmente el acoplamiento inductivo resonante [21]. En sendos casos, el campo eléctrico (EF) y el campo magnético (MF)

se utilizan en la transferencia inalámbrica de energía. En el método de transferencia de energía por acoplamiento inductivo (*Inductively Coupled Power Transfer*, ICPT), la energía se transfiere de forma inalámbrica entre bobinas separadas a través del MF, mientras que la transferencia de energía capacitiva (*Capacitive Power Transfer*, CPT) se basa en el EF para transferir energía entre dos pares de placas metálicas [24]. En concreto, el presente trabajo se centra en la carga inductiva resonante, representada en la Figura 2.1. En primera instancia, se ubica una fuente de alimentación en alterna y a la frecuencia de la red. Posteriormente, mediante un rectificador, la corriente pasa a ser continua. Luego, pasa por un inversor, volviendo a estar en alterna. Esta etapa inversora es fundamental para adaptar los parámetros de la tensión a la bobina primaria, consiguiendo corriente alterna de alta frecuencia [25]. Después, se colocan uno o varios condensadores con el fin de compensar el sistema. También se disponen aguas abajo de la bobina secundaria con el mismo objetivo. En el circuito secundario y posterior al sistema de compensación elegido, se localiza un rectificador para transformar la tensión a continua. Por último, para un óptimo proceso de carga de la batería, se introduce un convertidor de potencia para adaptar la tensión de salida al valor requerido por la carga [26].

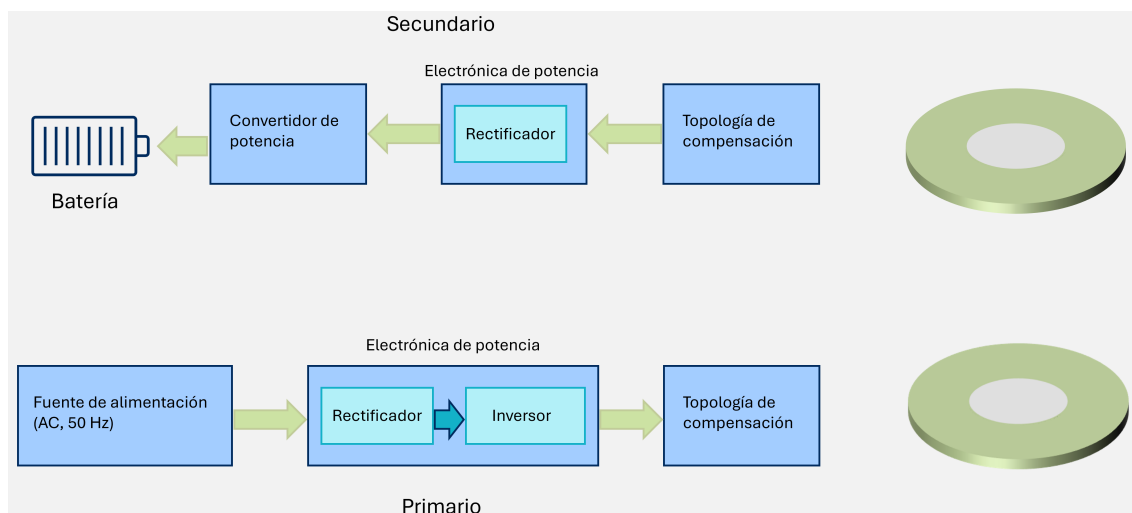


Figura 2.1: Diagrama genérico de bloques del proceso de carga inductiva básica.

Durante la carga, la corriente pasa por la bobina primaria, que produce un campo magnético variable. Al estar las bobinas acopladas, se induce una corriente en la bobina secundaria debido al campo magnético del secundario. Esto hace posible la carga de la batería [26].

El sistema de carga inductiva se puede clasificar o bien según la movilidad o no del secundario o bien en función del grado de acoplamiento existente entre las bobinas, k . En este trabajo, el secundario siempre va a estar fijo al ser un sistema estático. En cuanto al acoplamiento entre las bobinas, el sistema se puede clasificar en:

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

- **Sistemas fuertemente acoplados:** las bobinas están arrolladas sobre núcleos magnéticos del alto factor de acoplamiento; es decir, el devanado secundario concatena prácticamente todo el flujo creado por el primario [27]. Aunque el coeficiente de acoplamiento es cercano a la unidad (distancia de separación baja), esto ocasiona una intolerancia al desalineamiento.
- **Sistemas de proximidad:** el flujo creado por el devanado primario, concatena al devanado secundario cuando éste es aproximado [27]. El acoplamiento entre las bobinas es menor, si bien requiere una alineación perfecta entre bobinas y necesita una separación entre los devanados baja.
- **Sistemas débilmente acoplados:** la distancia de separación entre las bobinas es proporcional a sus dimensiones. Esto hace que el acoplamiento sea relativamente bajo (en torno a 0,2 [27]), reduciendo la eficiencia del sistema. Por ello, es necesario se debe aumentar la frecuencia de operación del campo magnético generado para inducir una gran cantidad de voltaje en la bobina secundaria [28].

En el presente trabajo, se emplea un sistema con bobinas débilmente acopladas. Dadas sus características, es esencial la utilización de frecuencias de operación elevadas. En este caso, será necesario recurrir a fuentes de tensión de frecuencia variable porque la frecuencia es muy superior a la de la red. Además, es fundamental el uso de hilo de Litz en las bobinas para mitigar el efecto piel en los conductores.

2.3. Ventajas e inconvenientes

La transferencia inalámbrica de potencia se encuentra en pleno auge, centrándose en diferentes ámbitos de la industria. En [18], se citan aplicaciones relacionadas con el vehículo eléctrico, la medicina, la electrónica o el espacio, incluso con la IA [29]. Asimismo, se investiga su aplicación en vehículos aéreos no tripulados [30] o bajo el agua [21]. También se estudia su empleo en los sistemas ferroviarios [31].

La amplia variedad de aplicaciones viene impulsada por la posibilidad de cargar los aparatos en estático o en movimiento debido a la no utilización de cables durante el proceso. Entre las bondades de esta tecnología, destacan los siguientes puntos:

- a) Aporta una protección contra contactos eléctricos.
- b) Robustez, ya que carecen de piezas metálicas a conectar entre sí.
- c) No se ve mermado su funcionamiento por la presencia de polvo o suciedad.

- d) Disminuye el mantenimiento requerido, alargando su duración.
- e) Permite la transmisión de elevadas potencias.
- f) Poseen un buen aislamiento galvánico, lo que proporciona seguridad.

En cuanto a sus puntos débiles, resaltan estas características:

- a) Aparición de pérdidas por desalineamiento de las bobinas.
- b) Limitación en la distancia de separación entre las bobinas para que el sistema sea eficiente.
- c) Presencia de pérdidas debidas a las corrientes de Foucault en las bobinas.

Teniendo en cuenta las consideraciones precedentes, la transferencia inalámbrica de potencia es una tecnología muy útil gracias a la seguridad que proporciona al usuario, disminuyendo la probabilidad de contactos directos e indirectos. Especialmente en dispositivos acuáticos, donde la presencia del agua supone un riesgo añadido. Aunque existen pérdidas en el sistema, se pueden transmitir elevadas potencias, concediendo una alta eficiencia.

2.4. Topologías de compensación

Los sistemas de compensación consisten en unas bobinas y/o condensadores dispuestos tanto en el primario como en el secundario con el propósito de contrarrestar la potencia reactiva que demandan las bobinas. Dicha potencia viene dada por la inductancia de fuga.

La potencia reactiva puede ser incluso superior a la potencia activa transmitida a la carga conectada, lo que afecta a la eficiencia del sistema. Es decir, no permite alcanzar la potencia máxima durante el proceso de carga. De ahí, deriva la importancia de los sistemas de compensación.

En la Figura 2.2, se reflejan las topologías básicas: Serie- Serie (SS), Serie-Paralelo (SP), Paralelo-Serie (PS) o Paralelo-Paralelo (PP). Los nombres asignados a cada tipo vienen dados a partir del conexionado de cada condensador con la bobina en cada devanado; en serie o en paralelo. Para todas las configuraciones, el sistema es resonante, tanto el primario como el secundario. Mientras que en el primario es esencial para disminuir la corriente absorbida por el convertidor, el secundario lo está para que la potencia que alimenta a la carga sea máxima [27].

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

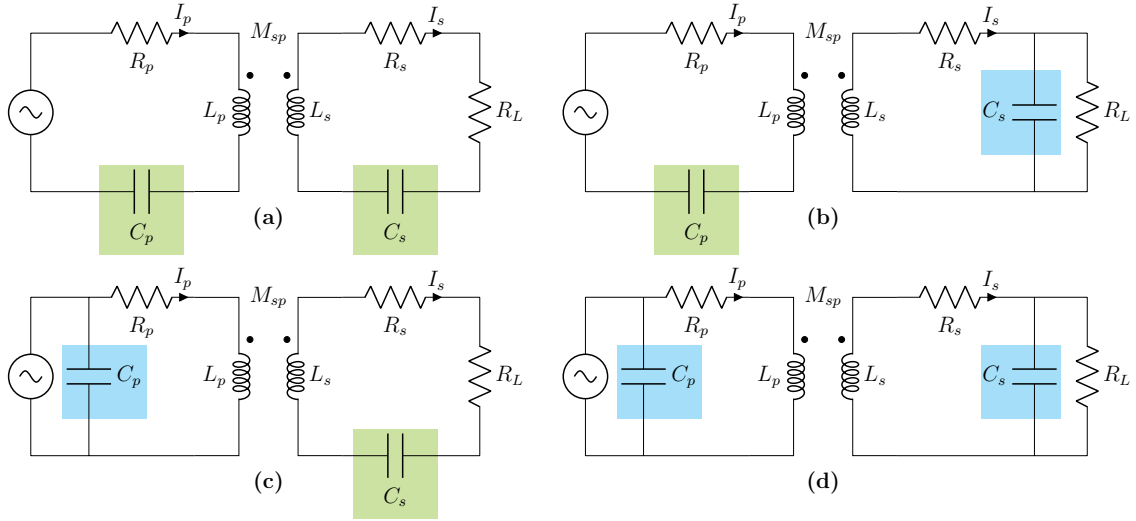


Figura 2.2: Diferentes topologías de compensación. (a) Serie-Serie. (b) Serie-Paralelo. (c) Paralelo-Serie. (d) Paralelo-Paralelo.

Las topologías PS y PP garantizan una mayor seguridad al estar alimentado el primario en todo momento, aunque el secundario esté desconectado. También poseen una menor sensibilidad a la variación de la separación entre las bobinas, si bien se modifica la frecuencia de resonancia. A pesar de ello, al estar el condensador primario conectado en paralelo, depende fuertemente de la carga. Por este motivo, la fase no va a ser igual a cero para cualquier condición de carga [7].

En cambio, en la compensación en serie en el primario (SS y SP), el condensador del primario es independiente de la carga conectada [21]. También cabe destacar que permiten disminuir la tensión, adaptándose a las condiciones requeridas. Sin embargo, no cuenta con protección contra cortocircuitos o ante un circuito abierto, proporcionando cierta inseguridad cuando no hay ningún elemento conectado en el secundario [7].

$$C_p = \frac{1}{L_p \omega} \quad (2.1)$$

$$C_s = \frac{1}{L_s \omega} \quad (2.2)$$

Al estudiar la transferencia de potencia en el agua salada, uno de los problemas que aparece con frecuencia es el desalineamiento debido a las corrientes marinas. En este caso, la opción más idónea es la compensación SS, ya que el condensador no depende ni de la carga ni de la inducción mutua, M (Ecuación (2.1) y (2.2)). Además, a diferencia del sistema SP, la impedancia reflejada tiene una parte imaginaria cero

para el secundario compensado en serie, mientras que el secundario compensado en paralelo refleja un componente capacitivo al primario [7].

2.5. Geometría de las bobinas

El objetivo principal de un sistema de transferencia de potencia es transmitir la máxima potencia al dispositivo conectado en todo momento. Es decir, maximizar el coeficiente de acoplamiento inductivo entre la bobina transmisora y receptora [32]. Dicho coeficiente mide cuánta potencia del campo electromagnético (EM) generado se induce en la bobina secundaria. El coeficiente de acoplamiento está relacionado con la impedancia reflejada del secundario en el lado primario [33].

$$k = \frac{M_{ps}}{\sqrt{L_p L_s}} \quad (2.3)$$

Para conseguirlo, uno de los factores fundamentales a tener en cuenta es el coeficiente de acoplamiento, descrito con la Ecuación (2.3). Dicha expresión establece una relación entre la inducción mutua de las bobinas y la autoinducción de cada una. Para que la potencia transferida sea máxima, el coeficiente de acoplamiento tiene que ser lo más alto posible. Luego, a raíz de la Ecuación (2.3), interesa una baja inducción mutua y una elevada autoinducción de las bobinas.

Si se incrementa el número de vueltas de las bobinas, aumenta la autoinducción de las bobinas. Esto mejora la intensidad del campo magnético y, por lo tanto, mejora la eficiencia, pero también puede introducir mayores pérdidas debido a la mayor resistencia y características parásitas [34].

Luego, se deduce que la geometría de las bobinas influye sobre el campo magnético generado, afectando al valor del coeficiente de acoplamiento. Con el paso del tiempo, se han diseñado bobinas con distintas geometrías: rectangular [35], circular ([36], [37]) o hexagonal [38]. Las más comunes son las circulares.

En [27], se comparan la geometría cuadrada, rectangular y circular mediante el cálculo del coeficiente de autoinducción. En este estudio, la geometría circular es la que presenta un menor coeficiente, si bien presenta la mayor inducción mutua. En cuanto al coeficiente de acoplamiento, la geometría circular presenta unos valores superiores con respecto a la geometría cuadrada y rectangular, siendo esta última la que posee menor capacidad de transmisión de potencia. Por ello, se escoge como solución la geometría circular a la hora de diseñar las bobinas en el Capítulo 3.

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

Asimismo, en [27], se ha considerado la manera de bobinar los devanados: horizontal, en filas, vertical y circular. Dentro de las disposiciones, se deduce que mayor es el coeficiente de autoinducción cuanto más circular es la colocación de las espiras. Por otra parte, en disposición horizontal se obtiene el mayor coeficiente de acoplamiento, si bien el coeficiente de autoinducción es menor y la inducción mutua mayor.

2.6. Transmisión de potencia en aire

A lo largo de los años, los mayores avances producidos en el estudio de la transferencia inalámbrica de potencia se han dado en el entorno aéreo; es decir, en presencia de aire entre los devanados. Cabe destacar la aplicación de esta tecnología en la carga de vehículos eléctricos, especialmente en estático. En [39], se recogen casos de estudio aplicados a coches o autobuses públicos. Se ha conseguido la transmisión de potencias con eficiencias superiores al 90 % en estático y en el rango 72 - 83 % en movimiento. En [40], se consigue un cargador que transmite 7 kW con una eficiencia del 93 % gracias a la optimización de la topología de compensación y la geometría de las bobinas.

Estos sistemas son sostenibles; la reducción del tamaño de las baterías compensa en términos energéticos y de emisiones la infraestructura de carga necesaria. El principal obstáculo para seguir mejorando la sostenibilidad de la carga inalámbrica radica en la eficiencia de la carga de la red a la batería [39].

2.6.1. Circuito equivalente

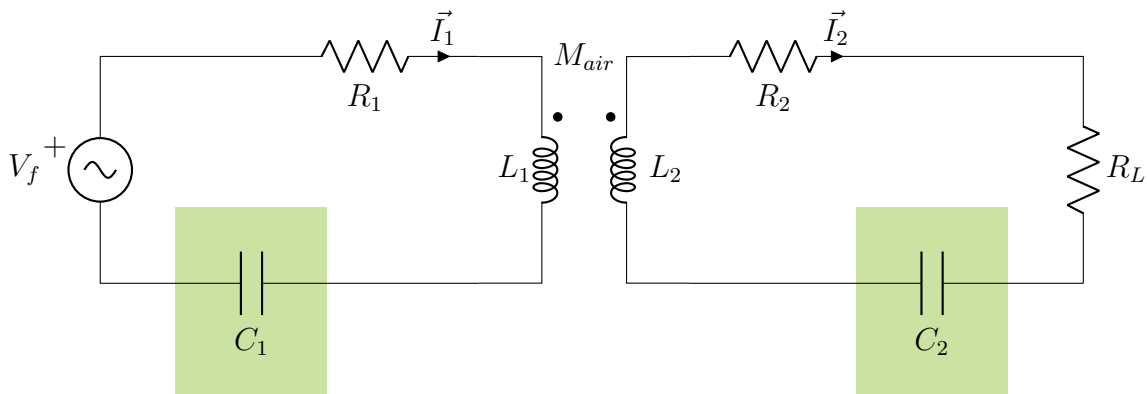


Figura 2.3: Circuito eléctrico de un cargador inductivo en el aire.

donde:

V_f	Valor eficaz de la fuente de alimentación senoidal conectada a los bornes del circuito primario, [V].
R_1	Resistencia del circuito primario, [Ω].
R_2	Resistencia del circuito secundario, [Ω].
L_1	Inductancia de la bobina en el circuito primario, [H].
L_2	Inductancia de la bobina en el circuito secundario, [H].
M_{air}	Inducción mutua presente entre las bobinas, [H].
C_1	Condensador en el circuito primario, [F].
C_2	Condensador en el circuito secundario, [F].
R_L	Resistencia de la carga conectada al secundario, [Ω].
\vec{I}_1	Corriente que circula por el primario, [A].
\vec{I}_2	Corriente que circula por el secundario, [A].

En la Figura 2.3, se muestra el circuito correspondiente a un cargador inductivo cuando el medio de transmisión de potencia es el aire. Se observa que se ha añadido un condensador en serie a cada bobina (compensación SS). El sistema está alimentado por una fuente de tensión en alterna a la frecuencia de operación que, en este caso, es de 85 kHz. Es el valor medio del rango recomendado por la directiva SAE-J2954 para la carga de vehículos (79-90 kHz) [41].

Los condensadores dependen de la inductancia de las bobinas y se calculan a partir de las Ecuaciones (2.1) y (2.2). Para estos valores, la frecuencia de trabajo es igual a la frecuencia de resonancia. Así, la potencia transferida a la carga es máxima. La resistencia de la carga se obtiene a partir de las especificaciones de la batería seleccionada (tensión y potencia) con la Ecuación (2.4).

$$R_b = \frac{U_b^2}{P_b} \quad (2.4)$$

$$R_L = \frac{8}{\pi^2 \cdot R_b} \quad (2.5)$$

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

Con el valor hallado de la resistencia de la batería, se obtiene el valor de la resistencia de la carga existente antes del rectificador mediante la Ecuación (2.5). La inducción mutua se obtiene despejando la Ecuación (2.3). Así, aplicando las leyes de Kirchhoff, se obtienen unas expresiones que relacionan las tensiones y las corrientes (Ecuaciones (2.6) y (2.7)). En este caso, la corriente en el secundario es conocida, ya que se puede calcular con la potencia de la batería y la resistencia de la carga (Ecuación (2.8)).

$$\vec{V}_1 = (R_1 + j\omega L_1 - \frac{1}{C_1\omega j}) \cdot \vec{I}_1 - j\omega M \cdot \vec{I}_2 \quad (2.6)$$

$$0 = -j\omega M \cdot \vec{I}_1 + (R_2 + R_L + j\omega L_2 - \frac{1}{C_2\omega j}) \cdot \vec{I}_2 \quad (2.7)$$

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_b}{R_L}} \quad (2.8)$$

La eficiencia del cargador se expresa mediante la Ecuación (2.9), que relaciona la potencia útil (la transmitida a la carga) y la potencia de entrada.

$$\eta_{aire} = \frac{R_L I_2^2}{R_L I_2^2 + R_1 I_1^2 + R_2 I_2^2} \quad (2.9)$$

2.7. Transmisión de potencia en agua salada

Con el paso de los años, la investigación de la transferencia inalámbrica de potencia se ha adentrado en entornos acuáticos. La necesidad de dispositivos no tripulados capaces de explorar los océanos ha llevado al desarrollo de soluciones que permitan la carga de los equipos sin la intervención humana [42] - [43]. Entre ellos se encuentran el vehículo submarino acuático (AUV), vehículo operado a distancia (ROV), planeador submarino autónomo (AUG) y boya sumergida [21].

Sin embargo, ante el rápido crecimiento de la demanda de estos vehículos, los métodos de carga tradicionales no son sostenibles a largo plazo. Además, la utilización de la carga inalámbrica elimina por completo la manipulación humana, salvo para las labores de mantenimiento. Es por ello que se han contemplado diversas opciones para la carga de las baterías que llevan adosadas:

- **Cambio de batería:** esta es la solución más predecible, si bien requiere la intervención del usuario. También acarrea un mayor coste, no siendo sostenible a medio y largo plazo. Aunque se ahorra tiempo en la recarga de la batería, se contrarresta con el tiempo dedicado al cambio de la batería. Además del requerido para la salida y el retorno del equipo.
- **Carga solar:** este sistema necesita que el dispositivo se mantenga en la superficie durante la recarga, lo que implica perder un tiempo en la subida y en el retorno al trabajo [7]. Luego tiene la misma limitación que el caso anterior. Asimismo, se pierde eficiencia en la carga cuando se producen fenómenos meteorológicos adversos.
- **Recarga con enchufe:** necesita unos cables protegidos frente a la humedad que se conecten con el equipo, siendo imprescindible un perfecto acoplamiento entre el dispositivo y el conector. Sin embargo, este sistema no es adecuado debido a su limitada vida útil (problemas de corrosión y acoplamiento) y su coste [44].
- **Plataforma sumergida:** posee como elemento principal una estación de acoplamiento, esencial para evitar el movimiento del dispositivo debido a la presencia de corrientes marinas [7]. Actualmente, hay diferentes modelos disponibles, siendo la de tipo embudo la más frecuente. Estas cuentan con una protección adicional para el dispositivo (embudo).
- **Contacto eléctrico directo (DEC):** al igual que ocurre con la recarga con cable, el acoplamiento entre el equipo y el contacto debe ser preciso. A pesar de contar con una elevada eficiencia, existen problemas de alineación y de variación de distancias entre el contacto y el dispositivo durante el proceso [7]. Adicionalmente, se producen muchos fallos de conexión y la duración de las conexiones es baja, debido a fenómenos de corrosión.

Tras analizar todos los métodos existentes para la carga subacuática, se observa que la transferencia inalámbrica de potencia elimina el problema del aislamiento y el desgaste de los cables debido a la fricción por contacto y mejora significativamente la seguridad y la fiabilidad de los sistemas de carga [21].

2.7.1. Efecto del agua

Con respecto al aire, el agua presenta una mayor permitividad relativa (1,0006 frente a 81). Especialmente, se nota en el agua salada, donde la conductividad aumenta de manera considerable. Aunque la permitividad no varíe con la salinidad del agua, la sal afecta bastante al valor de la conductividad (0,014 S/m frente a 4 S/m).

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

Este incremento de la conductividad y de la permitividad adquiere especial relevancia al aparecer unas corrientes parásitas (eddy currents) en el agua, que ocasionan pérdidas de potencia en el sistema. Por tanto, esto acarrea la disminución de la eficiencia de la transferencia de potencia a la carga. Las pérdidas por corrientes parásitas aumentan con el incremento de la frecuencia y la corriente de las bobinas [45].

Adicionalmente, también se traduce en la aparición de capacidades parásitas entre las dos bobinas. Así, el agua tiene una capacidad mayor para almacenar energía, lo que repercute en las capacidades parásitas originadas.

En cuanto al grado de salinidad del agua, la transferencia de potencia decrece conforme aumenta el contenido de sal en el agua, afectando al rendimiento del sistema. La tendencia a la disminución de la eficiencia se acelera cuando la salinidad supera el 10 % [46]. Según la NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), la cantidad media de sal es de 3,5 %, oscilando entre 3,3 % y 3,7 % [47].

Sumado a todo lo anterior, se debe considerar el cambio de la temperatura y la presión, así como la presencia de las corrientes marinas y los microorganismos. Mientras que la temperatura del agua aumenta la transferencia de potencia al actuar como refrigerante de las bobinas, la presión del agua disminuye la eficiencia. Las corrientes marinas provocan desalineamientos entre las bobinas, afectando a la eficacia del proceso. La proliferación de microorganismos alrededor de las bobinas también produce desalineamientos, además de incrementar la separación entre los devanados.

2.7.1.1. Capacidades parásitas

En el análisis de la transferencia inalámbrica de potencia en agua salada, aparece el efecto de unas capacidades parásitas entre las dos bobinas debido a la elevada conductividad del agua salada con respecto a la del aire [48], que es nula. Asimismo, también se ven afectadas por la permitividad relativa. Es decir, por sus propiedades dieléctricas, que son mayores en agua salada que en aire. Así, en el agua tiene una capacidad mayor para almacenar energía, lo que repercute en las capacidades parásitas originadas.

Dichas capacidades parásitas se traducen en uno o varios condensadores entre las bobinas (Figura 2.4), que afectan a la tensión y corriente en el sistema, incluso a la impedancia equivalente. Esto hace que la eficiencia del sistema de carga se vea mermada. Por ello, es esencial minimizar el efecto de las capacidades parásitas en los procesos de carga inductiva en entornos acuáticos con el objetivo de tener unas condiciones próximas al aire.

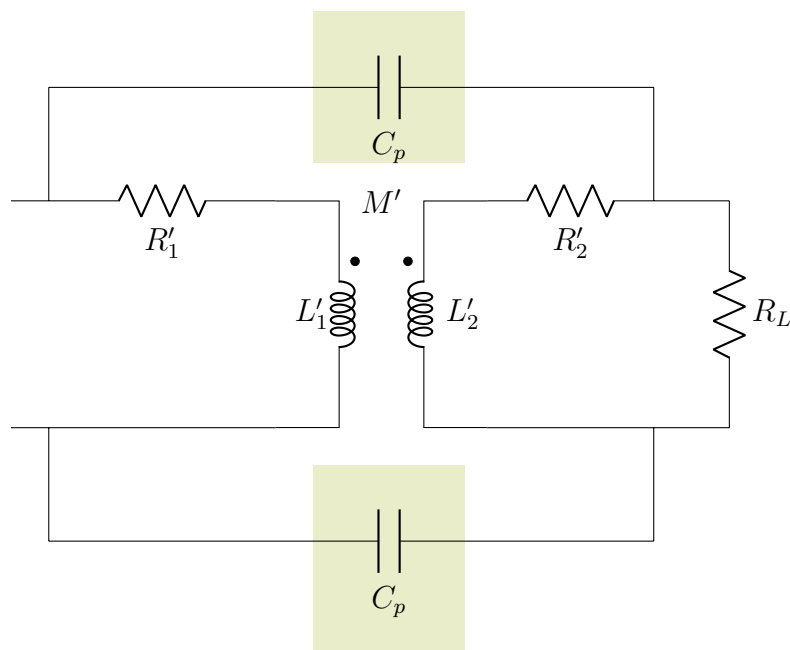


Figura 2.4: Condensadores parásitos en el circuito equivalente de WPT en agua salada.

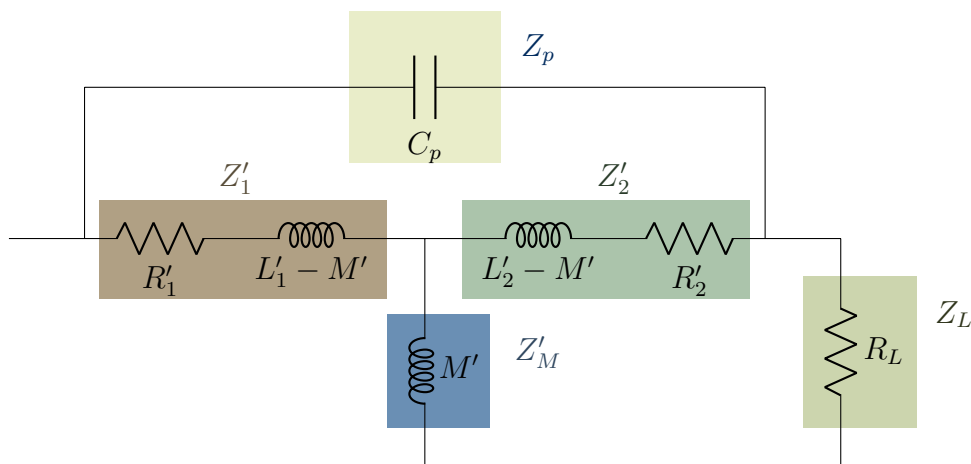


Figura 2.5: Circuito equivalente en T de un cargador inductivo en agua salada con un solo condensador parásito.

En la bibliografía, se emplean modelos con uno o dos condensadores, siendo el segundo el más empleado. En [49] y en [21], las capacidades parásitas se representan mediante un condensador mientras que en [50] utilizan dos. Estas dos capacitancias parásitas representan un único condensador, pero la representación se realiza en dos ramas para tener en cuenta la ruta de retorno [49].

Para establecer si existe alguna diferencia o no entre el uso de un modelo con uno o dos condensadores, se va a proceder al cálculo de la impedancia equivalente en

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

cada caso. Dicha estimación permitirá conocer si se puede emplear indistintamente cualquiera de las dos configuraciones objeto de estudio. En este análisis, no se han considerado los condensadores de compensación.

En primera instancia, se calcula la impedancia equivalente cuando solo hay un condensador en paralelo, C_p . En la Figura 2.5, se muestra el circuito equivalente considerando un único condensador. Para facilitar el cálculo de la impedancia, se agrupan los diferentes componentes en impedancias. En la Ecuación (2.10) y en la Ecuación (2.11), se representan las impedancias del devanado primario y secundario, respectivamente. En la Ecuación (2.12), se representa la impedancia que considera únicamente la inducción mutua entre las bobinas.

$$Z'_1 = R_1 + j\omega(L'_1 - M') \quad (2.10)$$

$$Z'_2 = R_2 + j\omega(L'_2 - M') \quad (2.11)$$

$$Z'_M = j\omega M' \quad (2.12)$$

La impedancia de la resistencia de carga se expresa mediante la Ecuación (2.13) mientras que la impedancia del condensador parásito se define con la Ecuación (2.14).

$$Z_L = R_L \quad (2.13)$$

$$Z_p = \frac{1}{j\omega C_p} \quad (2.14)$$

Así, el circuito equivalente se representa con la Figura 2.6. En él, se destaca la configuración en triángulo que forman las impedancias Z'_M , Z'_2 y Z_L . Para determinar con mayor facilidad la impedancia equivalente, se efectúa una transformación triángulo-estrella.

Para ello, se recurre al Teorema de Kennelly, que propone la Ecuación (2.15) para relacionar la configuración estrella con la disposición en triángulo. En dicha expresión, se establece que la impedancia conectada a un nudo j es el cociente del producto de las impedancias conectadas al nudo y el sumatorio de todas las impedancias.

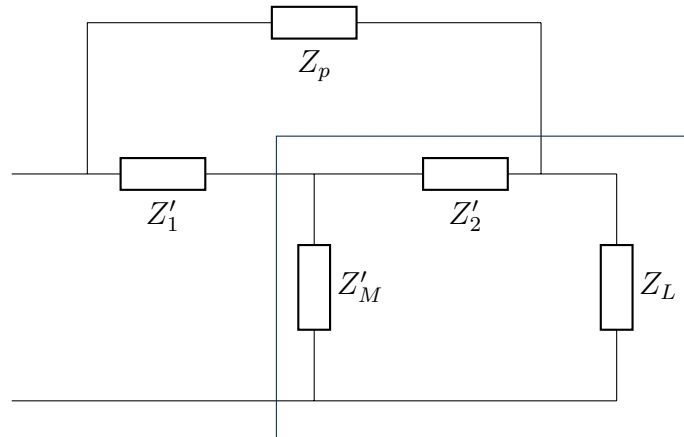


Figura 2.6: Circuito equivalente en T simplificado.

$$Z_j = \frac{Z_{ij} \cdot Z_{jk}}{(Z_{ij} + Z_{jk} + Z_{ki})} \quad (2.15)$$

Aplicando la Ecuación (2.15) a cada caso:

$$Z_{2L} = \frac{Z_L \cdot Z_2}{(Z'_M + Z_L + Z'_2)} \quad (2.16)$$

$$Z_{M2} = \frac{Z'_M \cdot Z_2}{(Z'_M + Z_L + Z'_2)} \quad (2.17)$$

$$Z_{ML} = \frac{Z'_M \cdot Z_L}{(Z'_M + Z_L + Z'_2)} \quad (2.18)$$

Una vez realizada la transformación, el circuito resultante se muestra en la Figura 2.7. Entonces, mediante la asociación de las impedancias en serie o paralelo según la conexión, se obtiene la impedancia equivalente del circuito a través de la Ecuación (2.19).

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

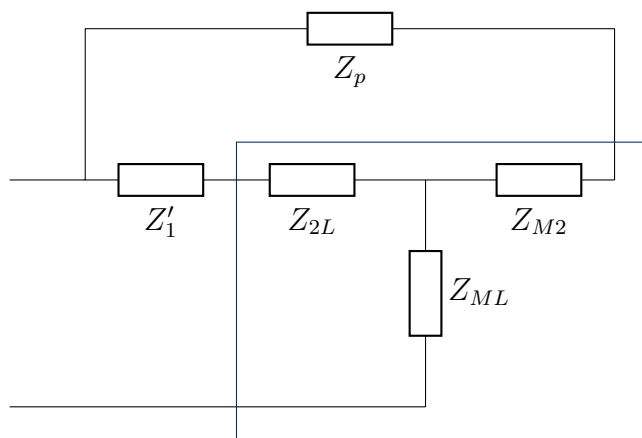


Figura 2.7: Transformación de triángulo a estrella del circuito.

$$Z_{eq1} = Z_{ML} + (Z_p + Z_{M2}) \parallel (Z'_1 + Z_{2L}) = Z_{ML} + \frac{(Z_p + Z_{M2}) \cdot (Z'_1 + Z_{2L})}{(Z_p + Z_{M2} + Z'_1 + Z_{2L})} \quad (2.19)$$

Seguidamente, se evalúa la impedancia equivalente cuando hay dos condensadores en paralelo a las bobinas de igual valor (Figura 2.8). En concreto, cada condensador es la mitad del condensador parásito utilizado en el caso anterior.

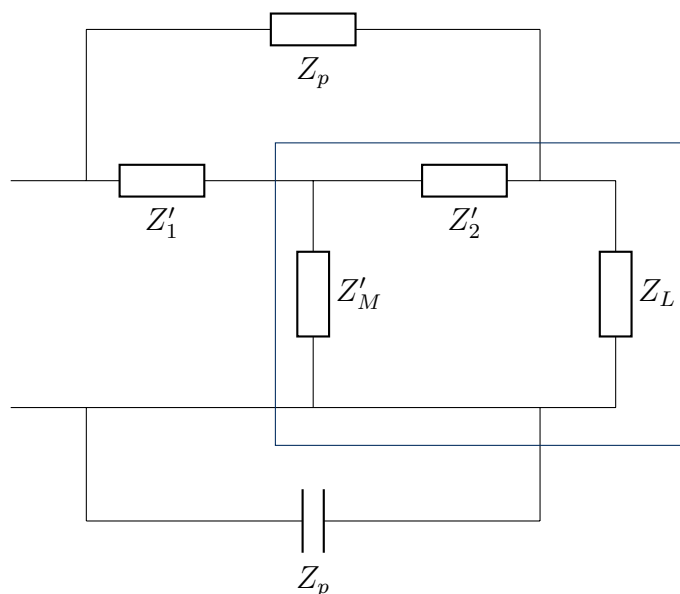


Figura 2.8: Circuito equivalente en T simplificado con dos condensadores.

Luego, la única variación se da en la impedancia del condensador parásito, estando expresada mediante la Ecuación (2.20). A diferencia del circuito con un condensador

parásito C_p , ahora hay dos condensadores con una capacidad igual a $C_p/2$. Luego, la impedancia de cada uno es dos veces la empleada cuando solo existía un condensador.

$$Z_p = \frac{1}{\frac{C_p}{2}\omega j} \quad (2.20)$$

Aplicando del mismo modo una transformación triángulo-estrella, se obtiene el circuito de la Figura 2.9. Al observar detenidamente el circuito, se advierte que la impedancia del condensador parásito de la parte inferior se encuentra en cortocircuito. Por tanto, a la hora de obtener la impedancia equivalente, dicha impedancia se anula y no se tiene en cuenta.

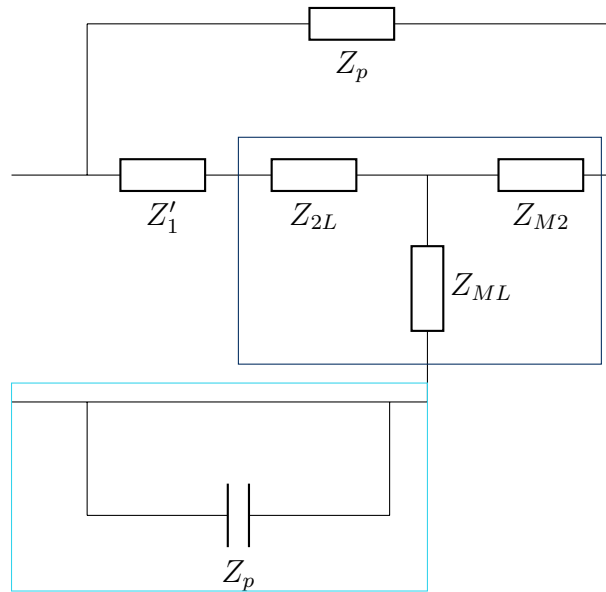


Figura 2.9: Transformación de triángulo a estrella del circuito con dos condensadores.

Por tanto, la impedancia equivalente se expresa también mediante la Ecuación (2.19). Sin embargo, la impedancia Z_p en este caso es el doble que en el circuito con un único condensador. En cambio, si los dos condensadores empleados fueran iguales a C_p , las dos impedancias equivalentes serían iguales. Luego, se deduce que, a la hora de considerar las capacidades parásitas, se puede emplear un condensador o dos condensadores de valor C_p indistintamente porque el resultado va a ser el mismo. En caso contrario, los valores del sistema serían distintos.

2.8. Circuito en agua salada

Como se ha explicado en el apartado anterior, la presencia del agua entre las bobinas provoca la aparición de corrientes parásitas y capacidades parásitas entre las bobinas. Como se muestra en la Figura 2.10, las corrientes parásitas en el agua se modelan mediante una resistencia e inductancia del agua, que está acoplada tanto con el circuito primario como con el secundario. Por otra parte, las capacidades parásitas se modelan con un condensador entre los devanados primario y secundario, siguiendo la demostración realizada en el Apartado 2.7.1.1.

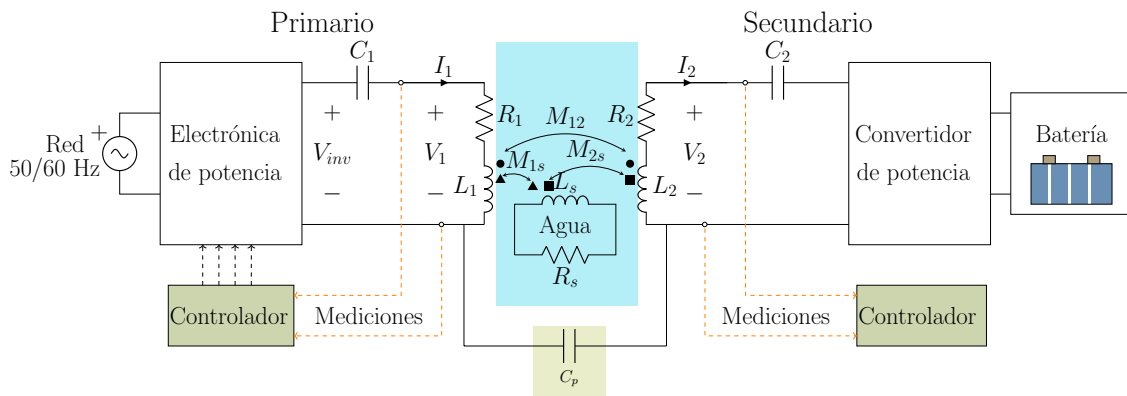


Figura 2.10: Diagrama de un cargador inductivo en agua salada.

siendo

M_{12} Inducción mutua presente entre los devanados primario y secundario, [H].

R_s Resistencia del agua salada, [Ω].

L_s Inductancia del agua salada, [H].

M_{1s} Inducción mutua entre la bobina primaria y el agua salada, [H].

M_{2s} Inducción mutua entre la bobina secundaria y el agua salada, [H].

C_p Condensador parásito entre las bobinas, [F].

V_{inv} Tensión a la salida del inversor, [V].

V_1 Tensión en el primario, [V].

V_2 Tensión en el secundario, [V].

En este trabajo, se va a analizar el comportamiento del sistema en agua salada, por un lado, cuando se consideran únicamente las corrientes parásitas (resistencia e inductancia del agua). Por otra parte, se va a tener en cuenta ambos efectos (se incluye el condensador parásito). Sendos estudios permiten cuantificar el fenómeno que posee una mayor influencia en la transferencia de potencia.

2.8.1. Caso 1. Circuito con corrientes parásitas

En este supuesto, solo se incluye la bobina y la resistencia del agua en el diagrama del cargador (Figura 2.11). En este caso, la tensión en el circuito primario se representa con una fuente en continua, V_1 . El sistema se compensa con un condensador en serie en cada devanado.

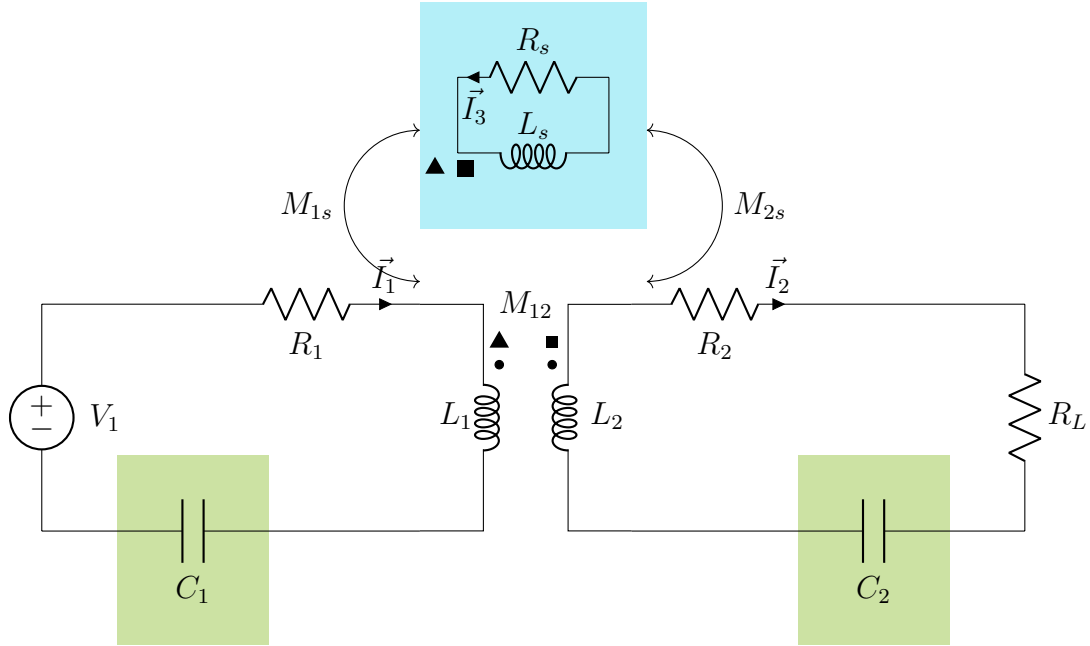


Figura 2.11: Circuito del sistema de carga bajo el agua considerando solo las corrientes parásitas.

El valor de la resistencia de la carga y la intensidad que circula por el secundario se obtienen con las Ecuaciones (2.5) y (2.8), respectivamente. Mediante las leyes de Kirchoff, se puede calcular la corriente del agua (I_3), la tensión y la corriente del primario, siendo los demás valores conocidos (Ecuaciones (2.21), (2.22) y (2.23)).

$$\vec{V}_1 = (R_1 + j\omega L_1 - \frac{1}{C_1 \omega j}) \cdot I_1 - j\omega M_{12} \cdot I_2 + j\omega M_{1s} \cdot I_3 \quad (2.21)$$

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

$$0 = -j\omega M_{12} \cdot I_1 + (R_2 + R_L + j\omega L_2 - \frac{1}{C_2 \omega j}) \cdot I_2 - j\omega M_{2s} \cdot I_3 \quad (2.22)$$

$$0 = j\omega M_{1s} \cdot I_1 - j\omega M_{2s} \cdot I_2 + (R_s + j\omega L_s) \cdot I_3 \quad (2.23)$$

Obtenida la corriente del primario y del agua, se puede calcular la eficiencia del sistema con la Ecuación (2.24). Con respecto a la eficiencia del aire (Ecuación (2.9)), se suma en el denominador las pérdidas de las corrientes parásitas producidas en la resistencia del agua.

$$\eta_{agua} = \frac{R_L I_2^2}{R_L I_2^2 + R_2 I_2^2 + R_1 I_1^2 + R_s I_3^2} \quad (2.24)$$

2.8.2. Caso 2. Circuito con corrientes y capacidades parásitas

En la Figura 2.12, se representa el circuito eléctrico del cargador inductivo en agua salada, teniendo en cuenta todos los efectos debidos a la presencia del agua.

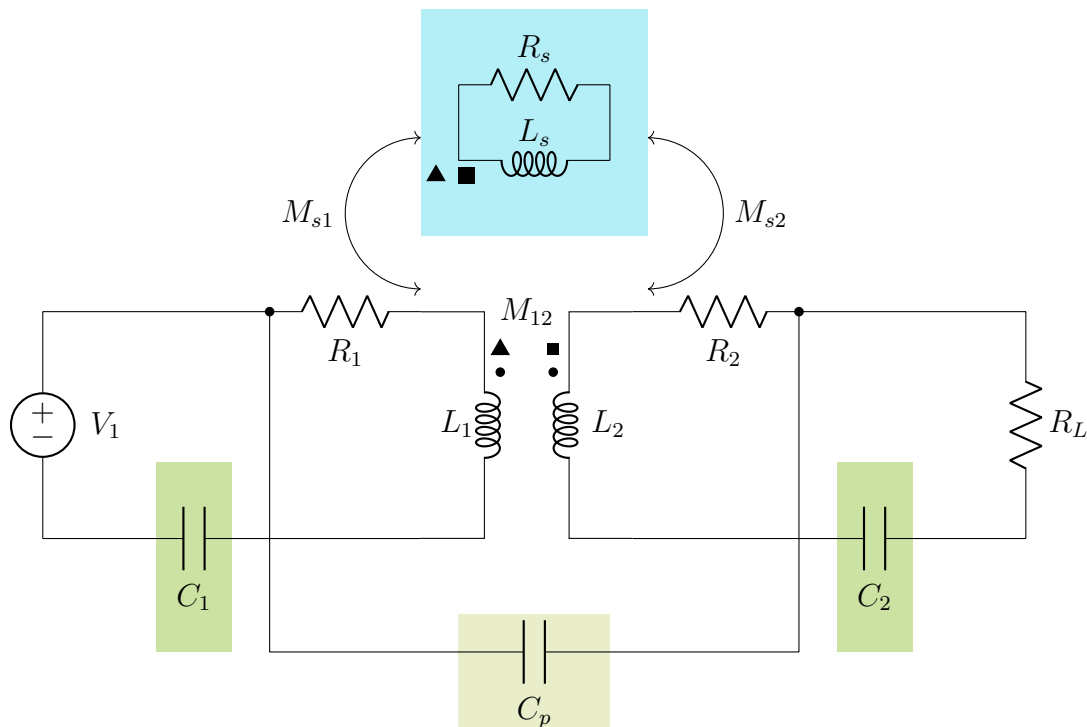


Figura 2.12: Circuito del sistema de carga bajo el agua.

En [51], se emplean un conjunto de expresiones para simplificar el circuito de un cargador cuando hay un objeto metálico entre las bobinas, modelado también como una resistencia e inductancia. Particularizando dichas expresiones para el agua salada, se puede obtener un circuito equivalente del diagrama del cargador. Seguidamente, se formulan las ecuaciones necesarias:

$$M'_{12} = M_{12} \left(1 - \frac{K_{1s}K_{2s}}{K_{12}} \right) = M_{12} \cdot \beta_M \quad (2.25)$$

$$Real(Z'_1) = R'_1 = R_1 + \frac{\omega^2 M_{1s}^2}{|Z_{sea}|^2} \cdot R_s = R_1 \cdot \beta_{R1} \quad (2.26)$$

$$L'_1 = L_1 - \frac{\omega^2 M_{1s}^2}{|Z_{sea}|^2} \cdot L_s = L_1 \cdot \beta_{L1} \quad (2.27)$$

$$Real(Z'_2) = R'_2 = R_2 + \frac{\omega^2 M_{2s}^2}{|Z_{sea}|^2} \cdot R_s = R_2 \cdot \beta_{R2} \quad (2.28)$$

$$L'_2 = L_2 - \frac{\omega^2 M_{2s}^2}{|Z_{sea}|^2} \cdot L_s = L_2 \cdot \beta_{L2} \quad (2.29)$$

Así, se obtiene el circuito representado en la Figura 2.13. Con las expresiones anteriores, se ha modificado el valor de la resistencia e inductancia del devanado primario y secundario, así como la inducción mutua existente entre las bobinas, M'_{sea} . Ahora, estos valores incluyen el efecto de las corrientes parásitas dadas en el agua salada.

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

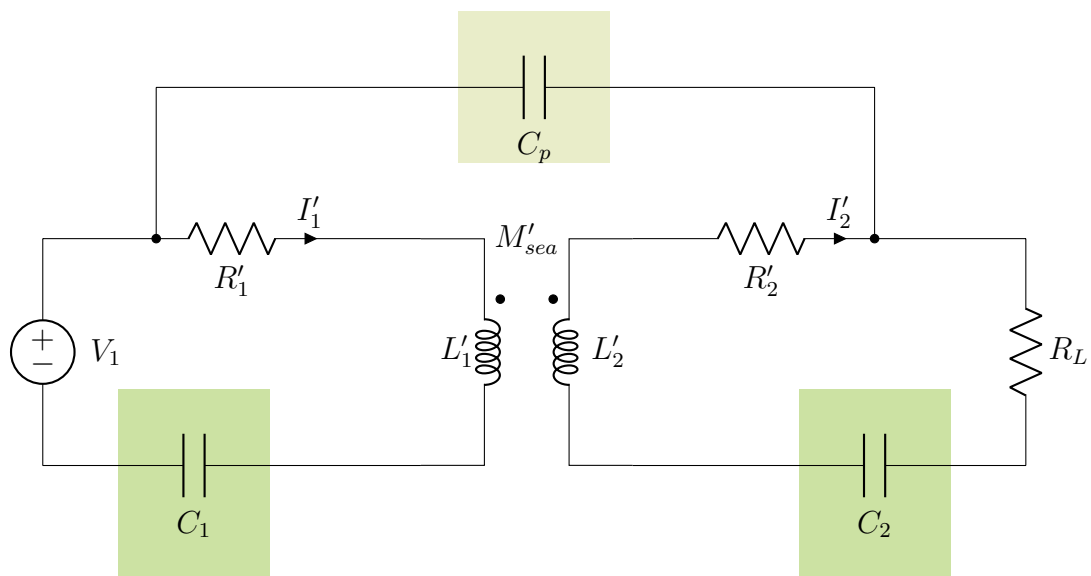


Figura 2.13: Circuito equivalente en agua salada con compensación SS.

A la hora de determinar la tensión e intensidad del primario, se emplea el modelo en T, mostrado en la Figura 2.14. En él, se colocan las bobinas del primario y secundario a cuyo valor se le resta la inducción mutua. Entre ellas, se dispone una rama con una inductancia cuyo valor es igual a la inducción mutua entre los devanados.

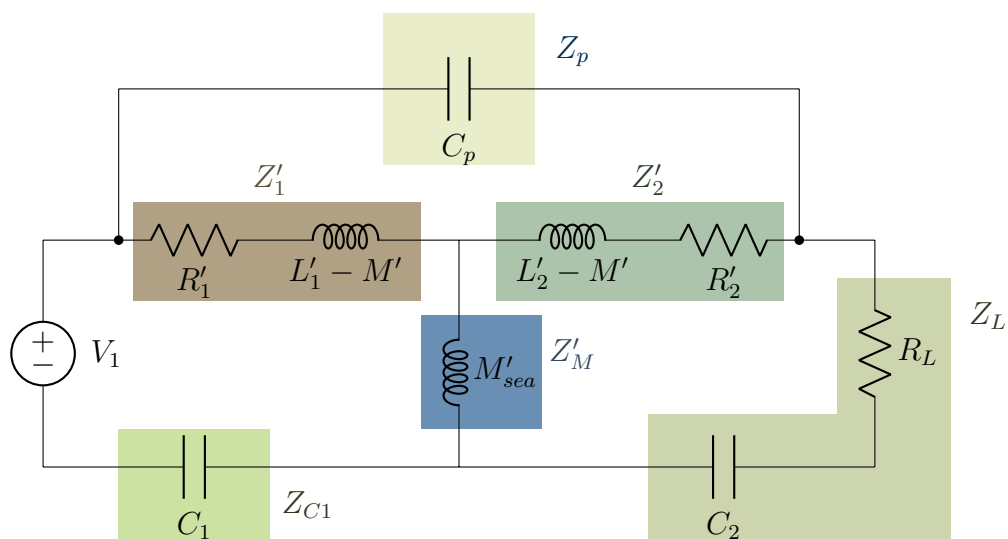


Figura 2.14: Circuito equivalente en T en agua salada con compensación SS.

En el circuito, se agrupan los diferentes elementos en impedancias para facilitar la resolución de las ecuaciones. Estas se expresan mediante las Ecuaciones (2.10), (2.11), (2.12) y (2.14). La impedancia del condensador en el primario y la corres-

pendiente al secundario (resistencia de la carga y condensador de compensación) se expresan con las Ecuaciones (2.30) y (2.31).

$$Z_{C1} = \frac{1}{C_1 \omega j} \quad (2.30)$$

$$Z_L = R_L + \frac{1}{C_2 \omega j} \quad (2.31)$$

Aplicando el método de mallas, se obtienen tres ecuaciones que relacionan las tensiones y corrientes del circuito. Así, se obtienen las siguientes expresiones:

$$\vec{V}_1 = Z_{C1} \vec{I}_1 + Z'_M (\vec{I}_1 - \vec{I}_2) + Z'_1 (\vec{I}_1 - \vec{I}_3) \quad (2.32)$$

$$0 = Z_L \vec{I}_2 + Z'_M (\vec{I}_2 - \vec{I}_1) + Z'_2 (\vec{I}_2 - \vec{I}_3) \quad (2.33)$$

$$0 = Z_p \vec{I}_3 + Z'_1 (\vec{I}_3 - \vec{I}_1) + Z'_2 (\vec{I}_3 - \vec{I}_2) \quad (2.34)$$

En este caso, la eficiencia del sistema se cuantifica con la Ecuación (2.35), considerando las corrientes halladas con las expresiones precedentes.

$$\eta_{agua} = \frac{R_L I_2'^2}{R_L I_2'^2 + R_1 (I_1' - I_3')^2 + R_2 (I_2' - I_3')^2} \quad (2.35)$$

CAPÍTULO 2. TRANSFERENCIA INALÁMBRICA DE POTENCIA

Capítulo 3

Modelado de las bobinas

3.1. Programas de simulación

En primer lugar, para el diseño de las bobinas se ha empleado el software *ANSYS Maxwell* [52], dimensionando tanto el efecto del condensador parásito como las pérdidas derivadas de las eddy currents. Asimismo, se podrán dimensionar los diferentes elementos que componen el circuito equivalente, como las inductancias o las resistencias.

Posteriormente, con los datos obtenidos en el modelo, se ha empleado el entorno de *MATLAB* [53] para representar gráficamente los resultados. Asimismo, se ha desarrollado una aplicación para el cálculo de las tensiones y corrientes en el primario para los diferentes casos de estudio (en aire y agua salada) tratados en el Capítulo 2.

A continuación, se proporciona una explicación de cada uno de los programas empleados en la elaboración del diseño del prototipo de cargador eléctrico para entornos acuáticos.

3.1.1. ANSYS Maxwell

ANSYS Maxwell es un programa que permite el modelado y simulación tanto de sistemas eléctricos como electrónicos. Resuelve campos magnéticos y eléctricos estáticos, en el dominio de la frecuencia y variables en el tiempo [52]. Dentro de los módulos que ofrece el software, se ha empleado *ANSYS Electronics*. Con él, se han diseñado las bobinas en el entorno acuático, dimensionando el circuito eléctrico en

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

agua salada. Asimismo, elabora representaciones gráficas sobre el propio modelo con los valores calculados tras la resolución de las iteraciones. Además de esto, permite el cálculo de valores adicionales gracias a la plataforma *Calculator*.

3.1.2. MATLAB

MATLAB es un software de programación con multitud de funcionalidades, desde el desarrollo de modelos mecánicos o eléctricos en *Simulink* hasta el análisis de datos. Específicamente, en este trabajo se ha empleado el entorno de MATLAB para la representación gráfica de los valores obtenidos previamente en ANSYS, además de efectuar otros cálculos. Adicionalmente, se ha empleado el entorno *App Designer*, que permite crear apps profesionales aunque no sea un desarrollador de software profesional. *App Designer* integra las dos tareas principales en la creación de una app: la distribución de los componentes visuales de una interfaz gráfica de usuario (GUI) y la programación del comportamiento de la app [54].

3.2. Especificaciones de diseño

A la hora de modelar e implementar las bobinas, es necesario considerar ciertos requisitos tanto eléctricos como dimensionales. Esto es esencial para poder aplicar los resultados obtenidos mediante los diferentes programas de simulación utilizados en el prototipo del laboratorio. En la Tabla 3.1, se recogen los diferentes parámetros a tener en cuenta en este trabajo.

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
Diámetro de las bobinas	15	cm
Tensión nominal	14,8	V
Corriente nominal	18	A
Potencia	266,4	W

Tabla 3.1: Especificaciones de diseño

Las características eléctricas vienen dadas por la batería elegida para el cargador inductivo. En concreto, se trata del modelo *Lithium-ion Battery (14.8 V, 18 Ah)* del fabricante *BlueRobotics* [55].

3.3. Diseño de las bobinas en ANSYS

En primera instancia, se efectúa el modelo empleado en las simulaciones en *ANSYS Maxwell*. Con dicho diseño, se podrá analizar los efectos de las corrientes parásitas en la transferencia inalámbrica de potencia, así como determinar las capacidades parásitas existentes. Los valores obtenidos permitirán obtener unos valores estimados con los que dimensionar teóricamente el efecto del agua en la transferencia de potencia.

Previo al modelado, se han definido una serie de variables locales para simplificar la utilización del programa. A continuación, se proporciona un listado de las variables empleadas:

A_{cable}	Ancho del hilo de Litz (mm)
Gap	Distancia de separación entre las bobinas (mm)
N	Número de vueltas de la bobina
R_{int}	Radio del hueco interior de la bobina (mm)
R_{ext}	Radio del exterior de la bobina (mm)

Para el diseño de las bobinas, se crea un modelo 3D empleando sendos cilindros para parametrizar ambas bobinas. Sus dimensiones se ciñen a las especificaciones de diseño, recogidas en la Tabla 3.1.

Properties: Bobinas_eddy_agua_total_RZ - Design - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate ...	Global		
Center Posi...	0mm,0mm,-Ancho_cable/2		0mm,0mm,-1.5mm
Axis	Z		
Radius	$R_{ext} + (N \cdot Ancho_cable)$		75mm
Height	Ancho_cable		3mm
Number of ...	0		0

Figura 3.1: Propiedades de la bobina primaria.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

Properties: Bobinas_eddy_agua_total_RZ - Design - Modeler

Command

Name	Value	Unit	Evaluated Value
Command	CreateCylinder		
Coordinate ...	Global		
Center Posi...	0mm,0mm,gap + Ancho_cable/2 + Ancho_cable - 4mm		0mm, 0mm, 50.5mm
Axis	Z		
Radius	$R_{ext} + (\text{Ancho_cable} * N)$		75mm
Height	Ancho_cable		3mm
Number of ...	0		0

Figura 3.2: Propiedades de la bobina secundaria.

Primero, se crea la bobina primaria, centrada en el origen en las coordenadas X e Y. Después, se añade la bobina secundaria a una distancia marcada por la variable *Gap*. En la pestaña *Properties* de cada cilindro, se parametriza cada bobina empleando las variables anteriormente definidas (Figura 3.1 y Figura 3.2). Los valores asignados a cada variable se recogen en la Tabla 3.2.

<i>Variables</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
A_{cable}	3	mm
<i>Gap</i>	50	mm
<i>N</i>	20	
R_{int}	10	mm
R_{ext}	15	mm

Tabla 3.2: Valores asignados a las variables.

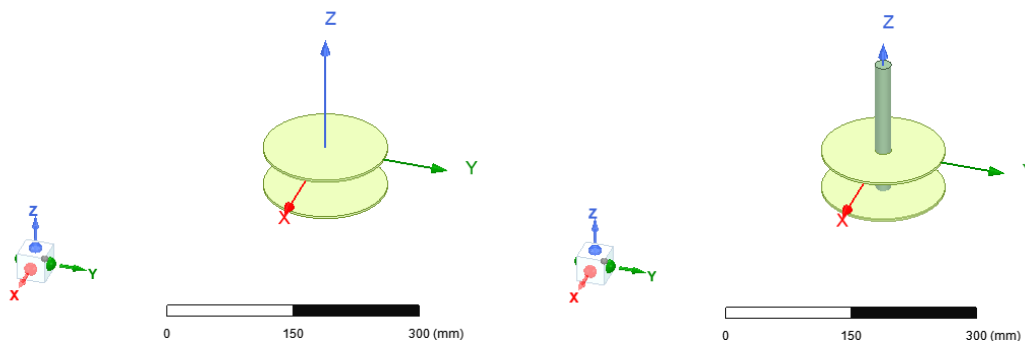


Figura 3.3: Modelado de las bobinas primaria y secundaria.

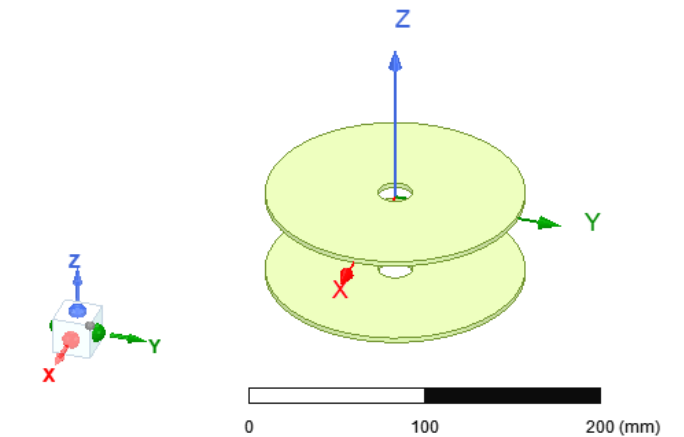


Figura 3.4: Bobinas primaria y secundaria.

Posteriormente, mediante otro cilindro, se realiza el hueco central de ambas bobinas. Dicho cilindro debe tener un radio igual al radio interior definido y contar con una altura suficiente para atravesar ambas bobinas. En la Figura 3.3 y en la Figura 3.4, se puede observar el proceso llevado a cabo.

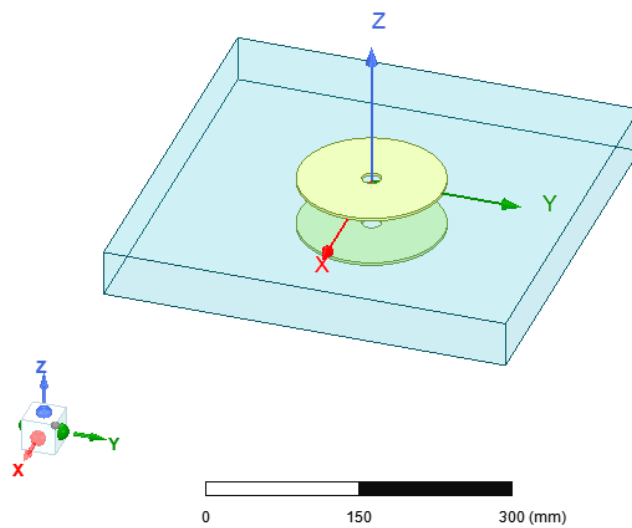


Figura 3.5: Bobinas en un entorno acuático.

Para modelar el agua de mar, se emplea una caja. Se define con un tamaño adecuado para simular las condiciones de los ensayos experimentales, pudiendo comparar los resultados obtenidos. El modelo completo se muestra en la Figura 3.5. Es fundamental que la superficie definida sea suficiente para que el campo magnético generado por las bobinas recorra el agua de mar en su totalidad.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

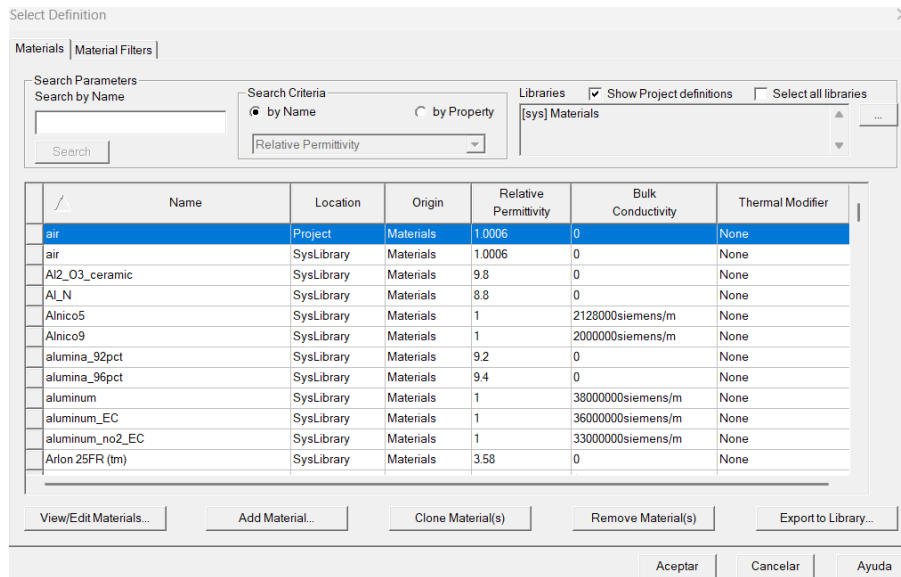


Figura 3.6: Listado de materiales.

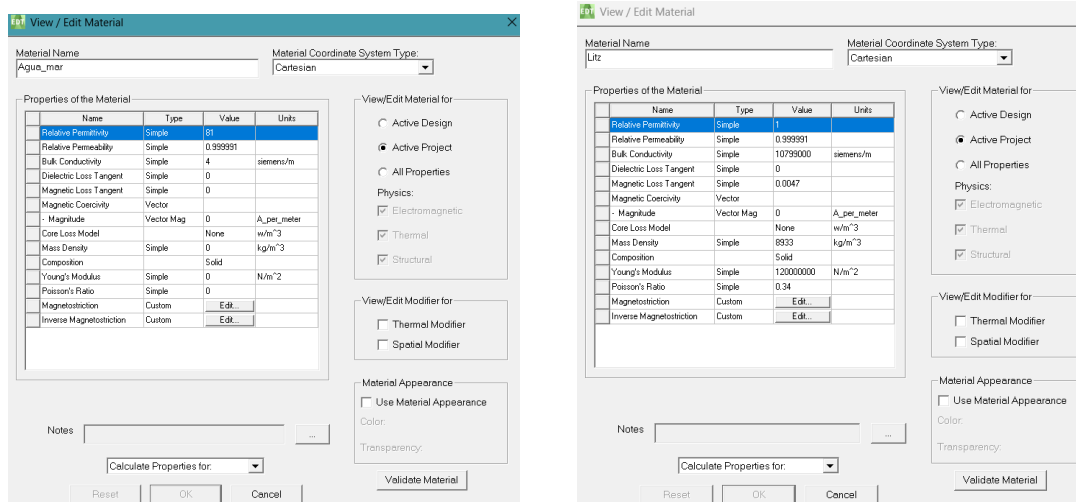


Figura 3.7: Propiedades del hilo de Litz y el agua de mar.

Por último, falta asignar los materiales a los elementos generados, que tienen asignado *vacuum* por defecto; es decir, sin material. Haciendo clic derecho en un elemento, se selecciona la opción *Assign Material*. Esto nos lleva a un menú (Figura 3.6) en el que se puede seleccionar uno de los materiales por defecto del programa o bien añadir uno nuevo. En este caso, es necesario definir dos materiales: hilo de Litz y agua de mar. El aire ya está incluido en la librería.

En la Figura 3.7, se muestran las propiedades del hilo de Litz y el agua de mar. Cabe destacar entre ellas la permitividad relativa, la permeabilidad relativa y la conductividad.

3.3.1. Configuración del modelo

Para configurar las soluciones, dentro del *Project Manager* se añade y personaliza el solver haciendo clic con el botón derecho en la pestaña *Analysis* (Figura 3.8). Ambas soluciones cuentan con la misma configuración. La frecuencia es de 85 kHz (en el solver del condensador parásito no es necesario al ser en estado estacionario), con un número de iteraciones máximo de 50 y un error del 1 %. En cambio, el tipo de solver elegido es diferente. Mientras que para el cálculo de las corrientes parásitas se emplea el solver **Eddy Current**, para el condensador parásito se recurre al tipo **Electrostatic**.

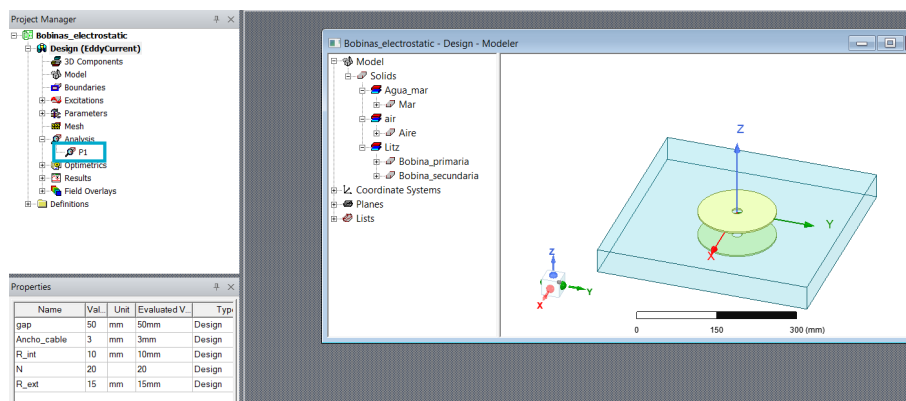


Figura 3.8: Configuración de la solución.

3.3.1.1. Corrientes parásitas

Para determinar el efecto de las corrientes parásitas, al modelo propuesto se deben insertar unos terminales para poder excitar las bobinas. Para ello, se hace uso de un plano que permita separar una de las secciones de cada bobina. Una vez hecho esto, se podrán insertar los diversos terminales.

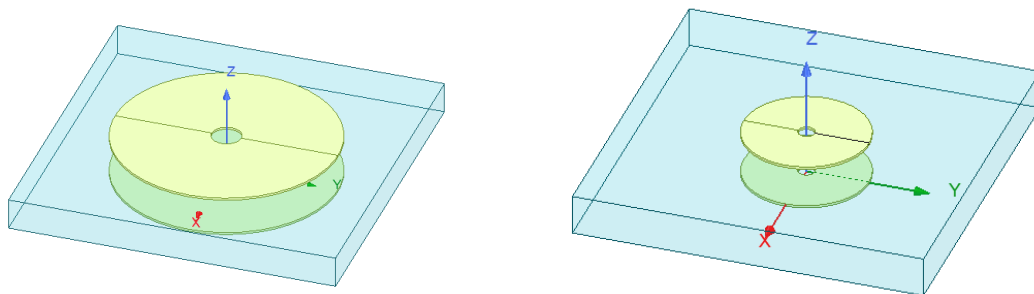


Figura 3.9: Obtención de la sección de la bobina.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

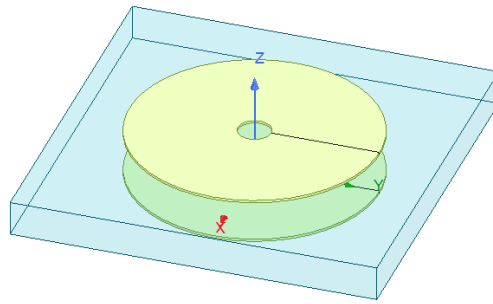


Figura 3.10: Secciones de las bobinas.

En primer lugar, se selecciona la bobina. En la pestaña *Modeler* de la barra de herramientas, se hace clic en la opción *Surface*, opción *Section*. Se elige la opción **YZ**, generándose así un plano que corta la bobina en la dirección escogida (Figura 3.9).

Después, se selecciona el plano creado previamente y, en la pestaña *Modeler*, se hace clic en *Boolean*, *Separate Bodies*. Esto permite crear un corte de la sección de la bobina, separando ambas mitades. Como solo se necesita un terminal por cada una, se elimina una de las secciones obtenidas. Dicho proceso se repite en la otra bobina, obteniendo las diferentes secciones, como se observa en la Figura 3.10.

A continuación, se inserta el devanado en cada terminal. En el *Project Manager*, se selecciona con el botón derecho la opción *Add Winding* dentro del menú *Excitations*. Se escoge en ambos casos una excitación de tipo corriente, siendo el bobinado trenzado (*Stranded*). En el caso del primario, será de un Amperio y con una fase de cero grados. Para el secundario, será también de un Amperio, pero con 90° de fase.

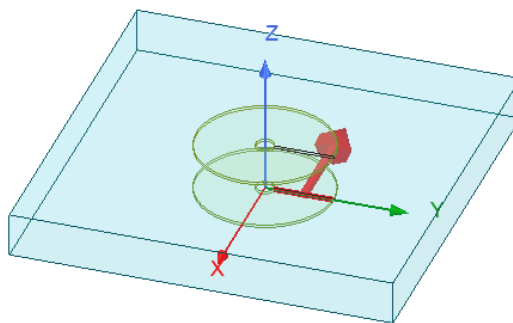


Figura 3.11: Dirección del devanado.

Posteriormente, se introduce el terminal de cada bobina, haciendo clic en cada devanado dentro de la pestaña *Excitations*. El número de conductores será igual

al número de vueltas de la bobina, N . La dirección del bobinado se muestra en la Figura 3.11.

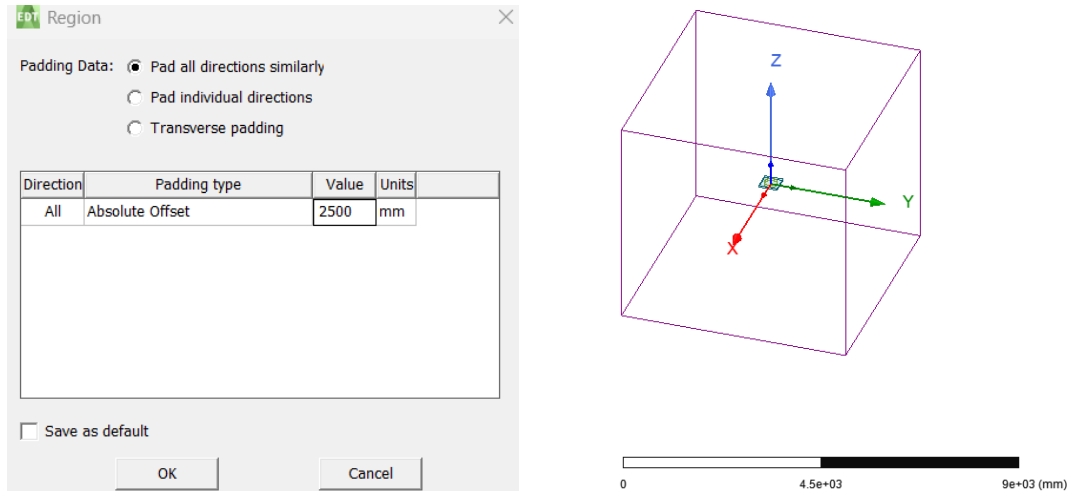


Figura 3.12: Configuración de la frontera del sistema.

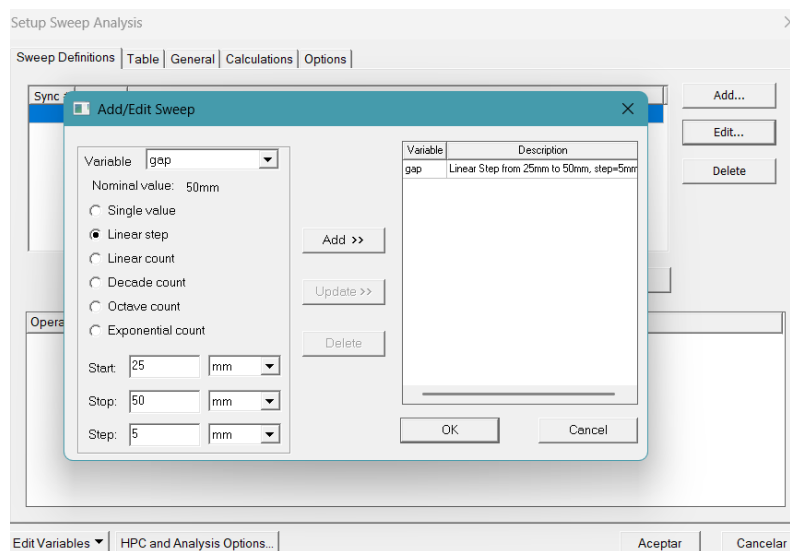


Figura 3.13: Configuración del campo *Optimetrics*.

Una vez incorporados los terminales, es necesario terminar la configuración del modelo. Se introduce la frontera del sistema mediante la incorporación de una región de aire. Con este propósito, se selecciona la última opción dentro del desplegable *Draw* de la barra de herramientas. La configuración de la región se muestra en la Figura 3.12, introduciendo un offset de 2500 mm en todas las direcciones. Esto asegura una región frontera lo suficientemente amplia para el análisis.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

Asimismo, se inserta una matriz de parámetros dentro de la pestaña *Parameters* del *Project Manager*. La matriz incluye tanto al primario como al secundario.

Finalmente, dentro de la pestaña *Optimetrics* del *Project Manager*, se incorpora la definición del barrido que se quiere efectuar. En este caso, se van a realizar las iteraciones mediante la variación de la variable local *Gap* entre los 25 mm y los 50 mm con un paso de 5 mm. La configuración del barrido se muestra en la Figura 3.13.

Se emplearán dos versiones del modelo, que divergen en el medio en el que se encuentran las bobinas: aire y agua de mar. Así, se podrá apreciar con mayor nitidez el efecto del agua de mar en el modelo. Los resultados obtenidos en cada uno de los modelos se detallan en el Apartado 4.1, en el Capítulo 4.

3.3.1.2. Condensador parásito

En este caso, se incorpora una excitación de tensión en una superficie de cada bobina para que se produzca una diferencia de potencial entre ambas. Para ello, en la pestaña *Excitations* del menú *Project Manager* se añade una tensión una vez se haya seleccionado la superficie. En el secundario, la tensión es de 1 V mientras que en el primario es de 0 V.

Posteriormente, se inserta una matriz de parámetros en la pestaña *Parameters* del *Project Manager*. Dicha matriz contiene las tensiones previamente añadidas. Asimismo, se introduce la frontera del sistema, que será una región de aire de las mismas dimensiones que en el caso anterior. Al igual que en el caso anterior, los valores del condensador parásito se especifican en el Apartado 4.1, en el Capítulo 4.

3.4. Análisis previos

Antes de realizar las simulaciones con las soluciones configuradas previamente, se ha efectuado una comparación con el estudio [36] en *ANSYS Maxwell*. En dicho trabajo, se analizan las corrientes parásitas ocasionadas al colocar una placa metálica entre dos bobinas. Este análisis permite comprobar el buen funcionamiento del modelo diseñado, además de observar el comportamiento del sistema con otras condiciones. Mientras que en el modelo diseñado se ha simulado con aire o agua entre las bobinas, en [36] se dispone un objeto metálico. Esta diferencia repercute en las corrientes parásitas que se producen. Así, se podrá determinar el mayor o menor efecto que tiene el agua salada en la aparición de dichas corrientes con respecto a un elemento metálico.

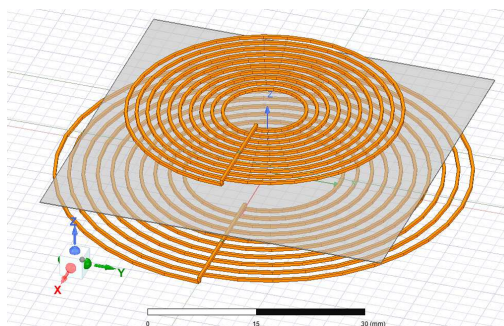


Figura 3.14: Modelo completo con una lámina metálica [36].

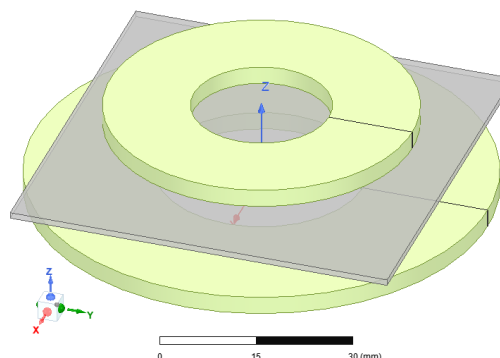


Figura 3.15: Modelo completo con un objeto de aluminio.

Para ello, se ha replicado el modelo del artículo de manera aproximada a partir de la Figura 3.14. Así, en la Figura 3.15 se muestra el modelo realizado, suponiendo que el objeto metálico presente entre las bobinas es de aluminio.

	Paper	Análisis
L1 (μH)	4,21	3,10
L2 (μH)	2,30	2,55
R1 (Ω)	0,138	0,052
R2 (Ω)	0,0869	0,0420
M12 (μH)	1,03	0,025

Tabla 3.3: Comparación entre ambos modelos.

En la Tabla 3.3, se muestran los valores de inductancia y resistencia tanto en el primario como en el secundario, así como la inducción mutua entre las bobinas para ambos modelos. Así, se observa que los valores del lado secundario son similares entre sí. En cambio, aunque entre la inductancia en el primario de cada modelo no existe tanta diferencia, en la resistencia del secundario y en la inducción mutua es considerable. Sobre todo en esta última, siendo en el modelo aproximado muy baja con respecto a la obtenida en el artículo.

Si bien es necesario considerar que sendos modelos son diferentes, ya que no se especifica el material ni de la chapa metálica ni de las bobinas en el artículo. Luego, en el modelo realizado se ha supuesto que las bobinas son de hilo de Litz y la chapa es de aluminio. Asimismo, tampoco son conocidas las dimensiones de las bobinas ni las distancias de separación; es decir, ningún parámetro que defina sus dimensiones. También cabe mencionar que el modelo utilizado es macizo, mientras que en el artículo se han empleado unas bobinas formadas por hilos.

Para comparar ambos modelos, se representan las corrientes parásitas en la chapa

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

en la Figura 3.16 y en la Figura 3.17. En el artículo, las corrientes se distribuyen con la forma de una bobina. Los valores máximos se producen en la mitad exterior de cada lado de la lámina metálica mientras que los valores más bajos se dan en el centro y en las esquinas. En el modelo creado, la disposición de las corrientes es similar. Sin embargo, las corrientes son inferiores en este caso; el máximo es cinco veces menor aproximadamente.

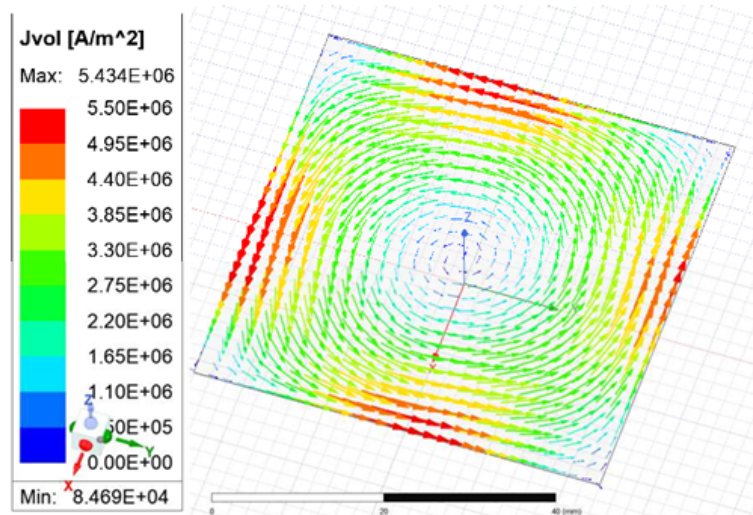


Figura 3.16: Distribución de las corrientes parásitas en el artículo [36].

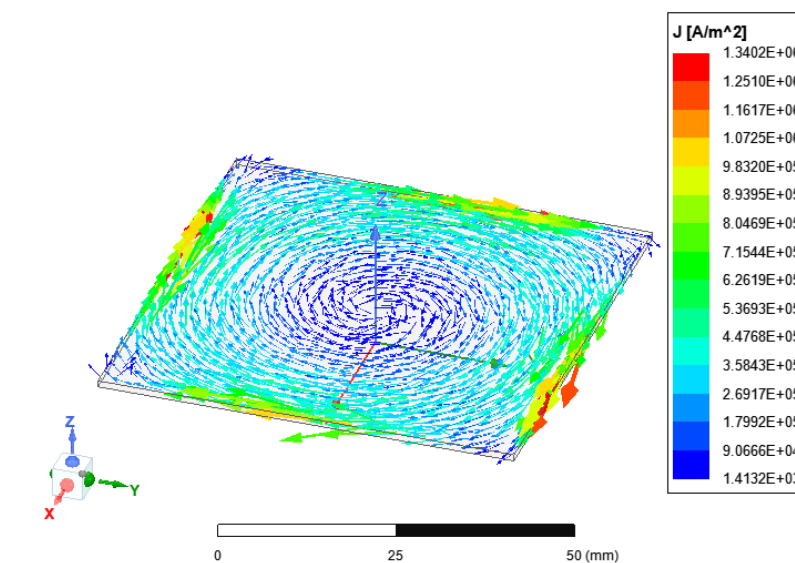


Figura 3.17: Distribución de las corrientes parásitas en la lámina de aluminio.

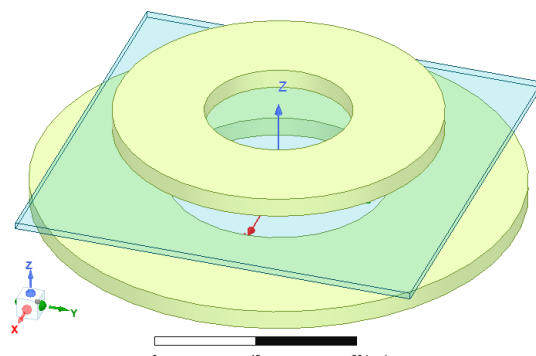


Figura 3.18: Modelo con una lámina de agua salada entre las bobinas.

A fin de determinar las corrientes parásitas que se generan en agua salada, se simula el mismo modelo cambiando el aluminio por agua salada con una conductividad de 4 S/m (Figura 3.18).

	L1 (μH)	L2 (μH)	R1 (Ω)	R2 (Ω)	M12 (μH)
Agua	5,96	3,84	0,0271	0,0268	1,70

Tabla 3.4: Valores con agua en medio de las bobinas.

En la Tabla 3.4, se recogen los valores de la inductancia y resistencia de las bobinas, así como la inducción mutua entre ellas. Comparando estos resultados con los obtenidos previamente (Tabla 3.3), se aprecia que la inductancia en el agua es mayor que con una chapa metálica entre las bobinas. En cambio, la resistencia en ambos devanados es inferior aunque sean muy parecidos. Por otra parte, la inducción mutua en agua se acerca más al valor dado en el artículo, siendo incluso superior.

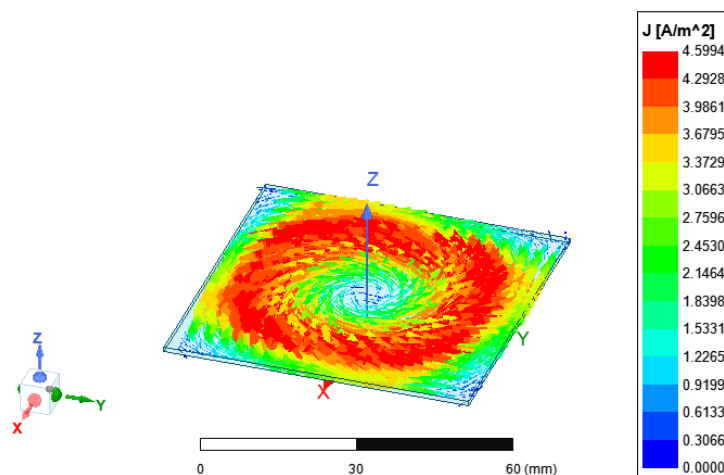


Figura 3.19: Modelo con una lámina de agua salada entre las bobinas.

CAPÍTULO 3. MODELADO DE LAS BOBINAS

En la Figura 3.19, se representan las corrientes parásitas producidas en el agua salada. A diferencia del metal, las corrientes se concentran de manera uniforme a lo largo del agua formando una circunferencia inscrita en su interior. Los valores máximos de corriente se distribuyen por la circunferencia en sentido antihorario. Los valores mínimos recaen en el centro y en las esquinas, al igual que en los otros modelos. En cuanto al rango de las corrientes, la corriente generada en el agua es bastante menor que en el metal; $4,59 \text{ A/m}^2$ frente a $1,34 \cdot 10^{-6} \text{ A/m}^2$.

Capítulo 4

Resultados

En este capítulo, se recogen los resultados arrojados por el modelo creado previamente en *ANSYS Maxwell*, definido en el Capítulo 3. En primera instancia, se procede a comparar el modelo en agua y aire, analizando los efectos que produce sobre el sistema la presencia del agua salada entre las bobinas.

Para verificar los valores de la resistencia e inductancia de las bobinas mediante el modelo, se implementa experimentalmente, considerando las especificaciones de diseño.

Después, se ha realizado un análisis sobre el efecto que tiene la variación de la salinidad del agua sobre el cargador inductivo, tanto en la resistencia como en la inductancia de las bobinas.

Posteriormente, se dimensiona la resistencia e inductancia en el agua, obteniendo también la inducción mutua entre las bobinas. Con el modelo eléctrico considerando tanto las capacidades parásitas como las corrientes parásitas, se determina la tensión y corriente del primario. También se obtiene la eficiencia del sistema. Estos resultados se comparan con los obtenidos en el modelo en aire y con el modelo en agua sin considerar las capacidades parásitas. A continuación, se representa el diagrama de flujo del presente trabajo en la Figura 4.1.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

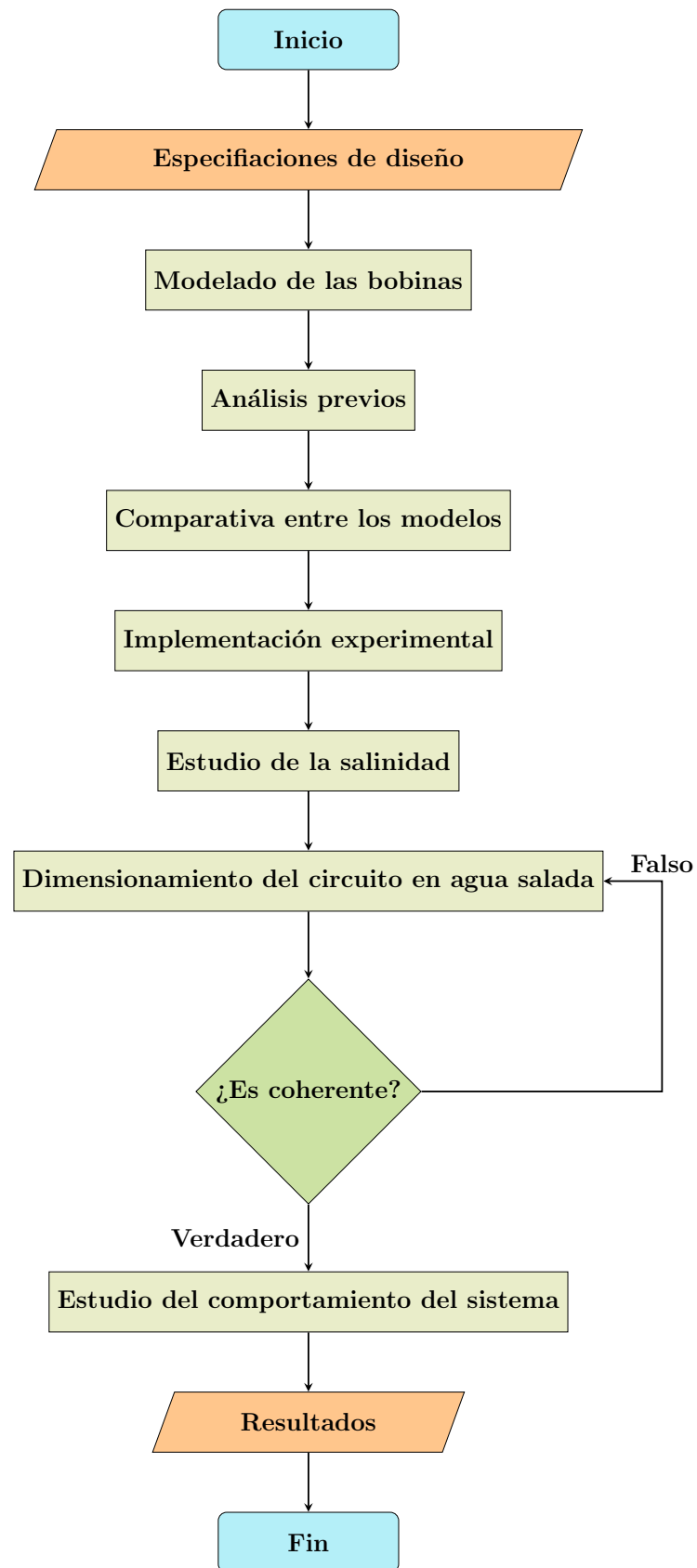


Figura 4.1: Diagrama de flujo.

4.1. Comparación de los modelos

Con el solver **Electrostatic** se calcula el valor del condensador parásito mientras que con el solver **EddyCurrent** se calculan inductancias y resistencias de los devanados, así como el coeficiente de acoplamiento, k . Tras compilar los diferentes modelos y efectuar las correspondientes simulaciones, se obtienen los resultados tanto en el entorno acuático (Tabla 4.1) como en aire (Tabla 4.3). Asimismo, en la Tabla 4.3 se recogen los valores del condensador parásito en función de la distancia entre las bobinas.

Gap (mm)	R1 (m Ω)	L1 (μ H)	R2 (m Ω)	L2 (μ H)	k
25	56,782	26,577	56,819	26,582	0,425
30	56,390	26,574	56,436	26,586	0,366
35	56,252	26,549	56,237	26,541	0,317
40	56,144	26,587	56,351	26,642	0,275
45	56,008	26,537	56,030	26,547	0,240
50	56,159	26,689	55,974	26,591	0,210

Tabla 4.1: Resultados de la simulación en agua.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
Cp (pF)	330,83	330,25	330,05	330,86	330,23	330,18

Tabla 4.2: Valores del condensador parásito.

Gap (mm)	R1 (m Ω)	L1 (μ H)	R2 (m Ω)	L2 (μ H)	k
25	56,391	26,663	56,136	26,581	0,425
30	56,222	26,687	56,395	26,767	0,366
35	55,977	26,705	56,995	26,684	0,317
40	55,584	26,585	55,650	26,608	0,276
45	55,770	26,667	55,249	26,431	0,240
50	55,654	26,639	55,580	26,629	0,210

Tabla 4.3: Resultados de la simulación en aire.

Comparando los resultados en agua y en aire, se observa que el coeficiente de acoplamiento es prácticamente igual en ambos casos. En cuanto a la resistencia (Figura 4.2), las resistencias del primario y secundario son superiores en el agua que en el aire. En el caso del agua, la diferencia es mínima para bajos valores de la distancia, incrementándose notablemente a partir de 35 mm. La máxima diferencia se produce con un *Gap* de 40 mm, como se puede observar en la Figura 4.2. Mientras que la resistencia del primario decrece, la resistencia del secundario alcanza un valor pico

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

a una distancia de 40 mm. Posteriormente, a 45 mm, ambos valores se asimilan, siendo la resistencia en el secundario ligeramente superior. Aunque después la resistencia del primario tiende a aumentar mientras que en la resistencia del secundario decrece.

En el caso del aire, al inicio, la resistencia del primario es superior al secundario. Después, el valor en el primario tiende a disminuir progresivamente mientras que en el secundario aumenta hasta alcanzar un máximo en 30 mm. En dicho punto, la resistencia del secundario supera levemente el valor del primario en el agua. A continuación, sendos valores decrecen aunque el secundario lo hace con mayor rapidez. A una distancia de 45 mm, se produce una diferencia significativa entre ambos valores, siendo la resistencia del primario mayor.

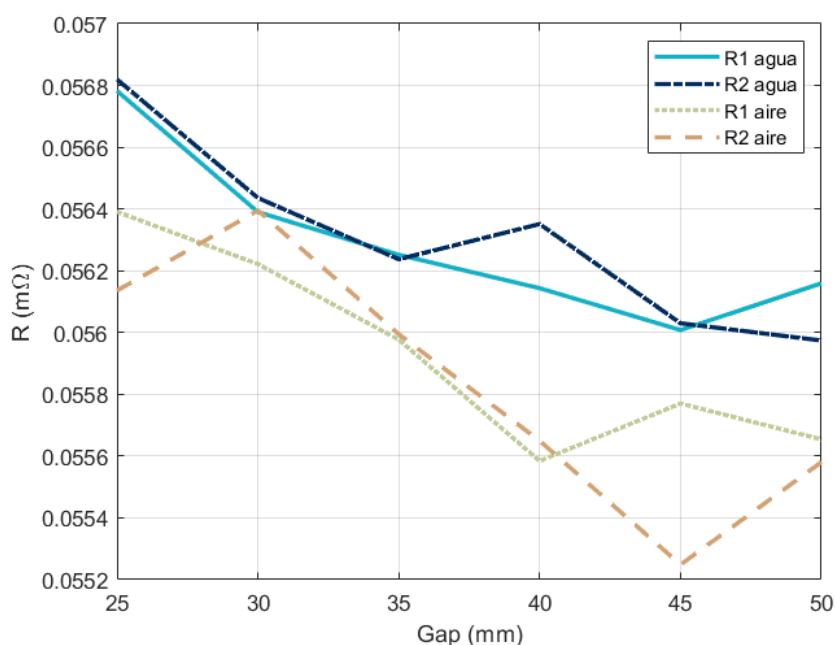


Figura 4.2: Variación de la resistencia con la distancia entre las bobinas.

En lo que respecta a la inductancia (Figura 4.3), los resultados en el aire son mayores que en agua de mar salvo en dos intervalos: 39,04 mm - 48,75 mm (primario) y 48,61 mm - 50 mm (secundario).

En agua de mar, la inductancia en el secundario es inferior a la inductancia en el secundario excepto a una distancia de 35 mm, donde es ligeramente superior, y a partir de 46 mm, cuando la inductancia en el secundario crece rápidamente. En el caso del primario, la máxima inductancia se obtiene a una distancia de 40 mm mientras que en el secundario se produce a una separación de 50 mm. Por otra parte, los valores mínimos se dan a una separación de 35 mm en la bobina primaria y a 45

mm en la secundaria.

En aire, la respuesta tiene también un carácter oscilante. En un principio, la inductancia es mayor en el primario aunque posteriormente el valor en el secundario sobrepasa al obtenido en la bobina primaria al contar con una pendiente más acusada. Así, alcanza un máximo en 30 mm. Luego, dicho valor decrece hasta tomar un valor mínimo a una distancia de 45 mm, inferior al valor mínimo hallado en el agua de mar. En cambio, la variación en la inductancia del primario no es tan pronunciada, estando el máximo a 35 mm. En esta ocasión, el mínimo se encuentra a una distancia de 40 mm, coincidiendo prácticamente con el valor de la inductancia del secundario en agua.

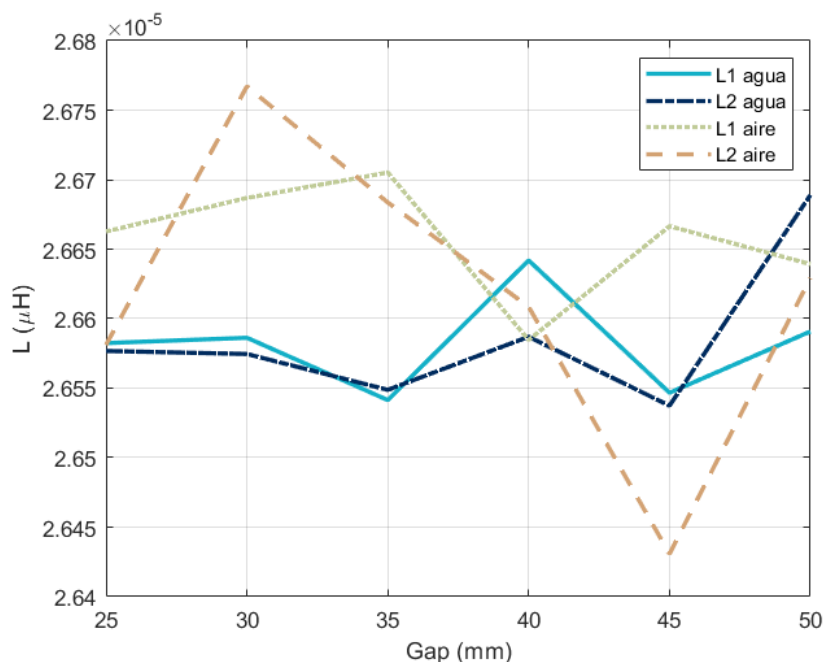


Figura 4.3: Variación de la inductancia con la distancia entre las bobinas.

Por otro lado, el acoplamiento entre las bobinas decrece con la distancia en ambos casos, como se muestra en la Figura 4.4. La diferencia entre los dos modelos es del orden de las centésimas. En cuanto al condensador parásito, la capacidad sufre una importante variación con la distancia. Decrece con la distancia, hasta tomar un valor mínimo a una distancia de 40 mm. Seguidamente, el valor vuelve a aumentar hasta los 45 mm, donde la respuesta disminuye otra vez. En la Figura 4.5 se puede comprobar dicho comportamiento.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

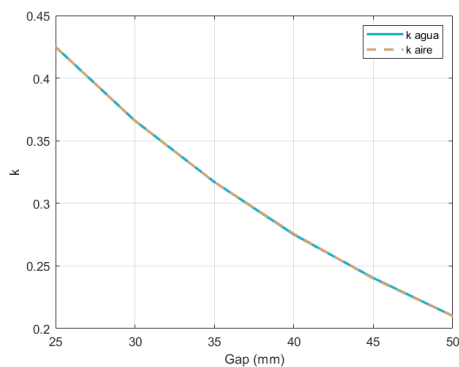


Figura 4.4: Variación del coeficiente de acoplamiento con la distancia entre las bobinas.

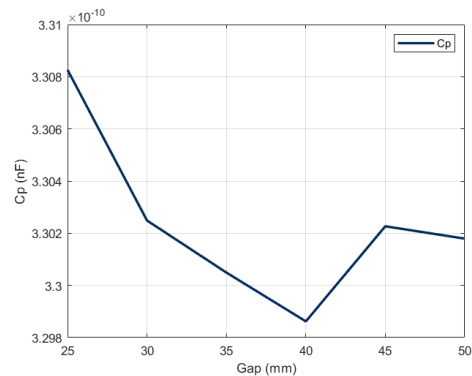


Figura 4.5: Variación del condensador parásito con la distancia entre las bobinas.

4.2. Implementación experimental

Una vez obtenidos los valores de la resistencia, inductancia y el coeficiente de acoplamiento de las bobinas tanto en aire como en agua en ANSYS, se obtienen de manera experimental en el laboratorio. Así, se pueden comparar dichos valores con los proporcionados por el programa. En la Figura 4.6, se muestra el sistema empleado. Se ha dispuesto una pecera en la que se han dispuesto las bobinas enfrentadas dentro de una carcasa de plástico, separadas una distancia de 30 mm aproximadamente. De cada una de ellas salen los bornes que permitirán medir la inductancia y la resistencia. Se han considerado tres supuestos: aire, agua y agua con una salinidad del 4 %. En los dos últimos, se ha llenado la pecera con 15 litros de agua, aproximadamente. Para el agua salada, se introducen 600 g de sal, que equivaldrían al 4 % de contenido en sal.

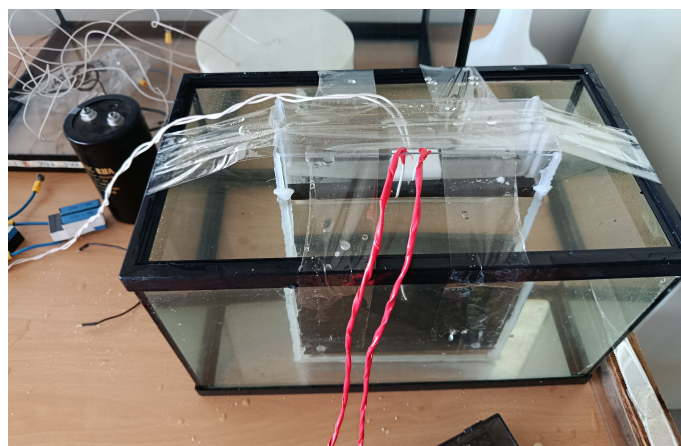


Figura 4.6: Disposición de las bobinas en agua salada.

En primera instancia, se configura adecuadamente el medidor (Figura 4.7). En esta ocasión, se ha establecido una frecuencia de operación de 80 kHz. Aunque en las simulaciones se ha utilizado una frecuencia de 85 kHz, el medidor no contaba con ese valor. También se podrían haber realizado las mediciones a 80 kHz y a 90 kHz y después, calcular la media de los dos valores. Posteriormente, se debe seleccionar el botón L-R (opción 2), lo que permitirá medir la inductancia y la resistencia.



Figura 4.7: Configuración del medidor LCR.

Antes de realizar cualquier medición, es necesario calibrar el aparato de medida. Hay que realizar el proceso tanto en circuito abierto (*Open*) como en circuito cerrado (*Short*), uniendo los dos terminales de cada uno de los devanados.

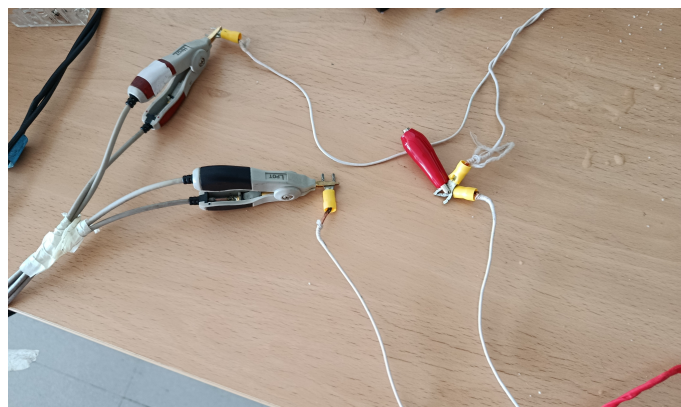


Figura 4.8: Conexión para medir la inductancia total.

Se miden la inductancia y resistencia del primario por un lado y el secundario por otro. Posteriormente, se hace lo mismo con la inductancia medida (Figura 4.8, donde se conectan en cada pinza del medidor un extremo de cada bobina y otra pinza adicional se unen los dos extremos restantes de ambas bobinas. Así, se obtiene la

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

inductancia y resistencia de cada bobina, además de la total. Dichos valores vienen recogidos en la Tabla 4.4.

	R1 (mΩ)	L1 (μH)	R2 (mΩ)	L2 (μH)	Rmed (mΩ)	Lmed (μH)
Aire	160,60	26,32	152,38	26,72	594,34	71,83
Agua	154,59	26,18	160,00	26,79	340,00	68,03
Agua salada	248,75	26,28	174,57	26,85	343,53	71,74

Tabla 4.4: Mediciones realizadas en el laboratorio.

Comparando estos resultados con los proporcionados por el programa (Tabla 4.1 y Tabla 4.3), se comprueba que los valores de inductancia proporcionados por el programa son algo mayores tanto en aire como en agua salada. Por el contrario, existe una gran diferencia entre los valores de la resistencia tanto en el primario como el secundario, siendo mayores los dados por el medidor. Concretamente, son casi tres veces superiores a los obtenidos en ANSYS.

Para calcular la inducción mutua entre las bobinas a partir de los datos extraídos del medidor, se emplea la Ecuación (4.1). Con el valor de la inducción mutua, se obtiene el coeficiente de acoplamiento entre las bobinas mediante la Ecuación (2.3), definida en el Apartado 2.5.

$$M = \frac{L_{Medida} - L_1 - L_2}{2} \quad (4.1)$$

En la Tabla 4.5, se disponen los valores de la inducción mutua, M, y el coeficiente de acoplamiento, k, para cada supuesto. Cabe mencionar que el valor del agua es el más bajo, pero a la hora de realizar las mediciones, la distancia entre las bobinas era superior en el fondo de la pecera. Por tanto, los valores obtenidos para ese caso se han visto afectados por esta variación de distancia. Si se observan los valores calculados para el aire y el agua salada, tanto el coeficiente de acoplamiento como la inducción mutua son ligeramente inferiores en agua salada.

	M (μH)	k
Aire	9,39	0,3542
Agua	7,53	0,2843
Agua salada	9,31	0,3503

Tabla 4.5: Resultados obtenidos a partir de las mediciones.

Si se comparan los valores del coeficiente de acoplamiento para el agua y el aire

con los hallados en ANSYS (Tabla 4.1 y Tabla 4.3), se observa que ambos valores se dan para un *Gap* situado entre 30 mm y 35 mm.

gap [mm]	Matrix_1 CplCoeff(Primario,Secundario) P1 : LastAdaptive Freq='85kHz'	
1	30.000000	0.365965
2	30.500000	0.362172
3	31.000000	0.355905
4	31.500000	0.350204
5	32.000000	0.345741
6	32.500000	0.340763
7	33.000000	0.336020
8	33.500000	0.331144
9	34.000000	0.326254
10	34.500000	0.321679
11	35.000000	0.317045

gap [mm]	Matrix_1 CplCoeff(Primario,Secundario) P1 : LastAdaptive Freq='85kHz'	
1	30.000000	0.365798
2	30.500000	0.360553
3	31.000000	0.355512
4	31.500000	0.351649
5	32.000000	0.346585
6	32.500000	0.341761
7	33.000000	0.335226
8	33.500000	0.330813
9	34.000000	0.326816
10	34.500000	0.321481
11	35.000000	0.317026

Figura 4.9: Comparativa del coeficiente de acoplamiento en agua salada y aire.

Para mayor precisión, se lleva a cabo una simulación en la que se efectúa un barrido del parámetro *Gap* entre 30 mm y 35 mm, con un paso de 0,5 mm. En la Figura 4.9, se muestran los valores del coeficiente de acoplamiento para cada distancia tanto en agua salada como en aire. Se comprueba que el valor obtenido experimentalmente para el agua salada se encuentra en el rango 31,5 mm - 32 mm en ANSYS. Por otra parte, el valor del aire se ubica en el intervalo 31 mm - 31,5 mm en la simulación.

4.3. Estudio de la salinidad

Al ser el agua de mar el medio en el que se produce la transferencia inalámbrica de potencia, hay que considerar el efecto que posee la sal en el proceso. De ella, depende la conductividad; es decir, la capacidad para transmitir la corriente eléctrica.

Por ello, se han efectuado diversos estudios para comprobar el efecto de la salinidad en el sistema. En el primer caso, se ha considerado el diámetro de las bobinas de 150 mm mientras que en el segundo se han empleado unas bobinas con 300 mm de diámetro. En sendos estudios, se ha iterado con el valor de la distancia entre las bobinas, *Gap*, entre 25 mm y 50 mm, con un step de 5 mm. Asimismo, se han hecho iteraciones al mismo tiempo con la conductividad del agua, entre 2 *S/m* y 10 *S/m*, con un paso de 1 *S/m* (Figura 4.10).

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

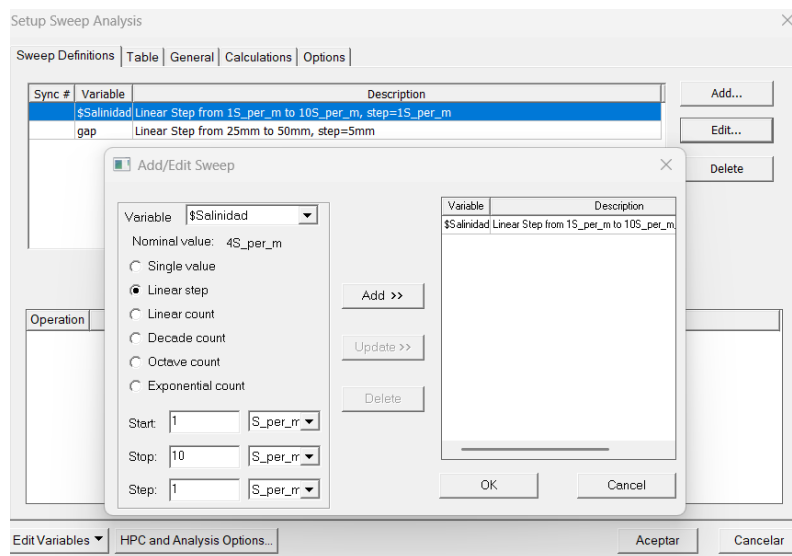


Figura 4.10: Definición del barrido de la conductividad en el agua salada

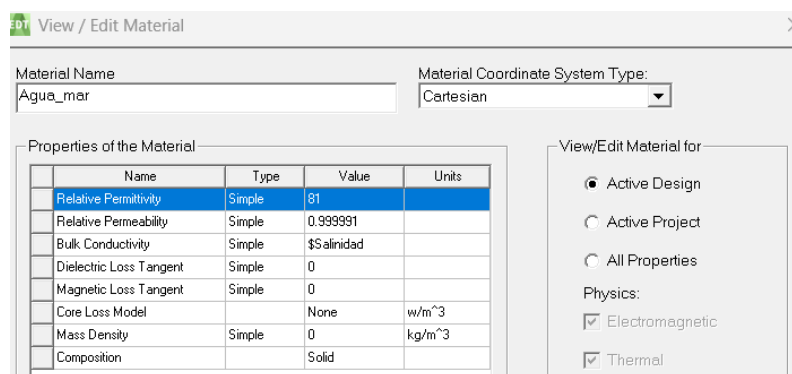


Figura 4.11: Introducción de la variable definida en la definición del agua de mar.

Para hacer más sencillo el proceso, se ha definido una variable llamada *Salinidad*. Dicha variable es global para todo el proyecto; es decir, para todos los diseños que contenga. Por ello, se introduce el símbolo del dólar al emplearla. Así, en las propiedades del agua de mar, se introduce esta variable en el apartado *Bulk Conductivity* en vez de un valor concreto (Figura 4.11).

4.3.1. Estudio 1: bobinas de 150 mm

En la Figura 4.12, se muestra la variación de la resistencia del primario con la conductividad del agua para cada distancia de separación de las bobinas. El valor máximo se da a una separación de 25 mm cuando la conductividad es de 10 S/m y el

mínimo se encuentra a un gap de 35 mm y 2 S/m de conductividad. Por lo general, se observa que, a mayor contenido de sal en el agua, la resistencia del primario, R_1 , aumenta. Sin embargo, para un gap de 30 mm y conductividad de 9 S/m , el valor de la resistencia es inferior a la obtenida para esa misma distancia con 8 S/m de conductividad.

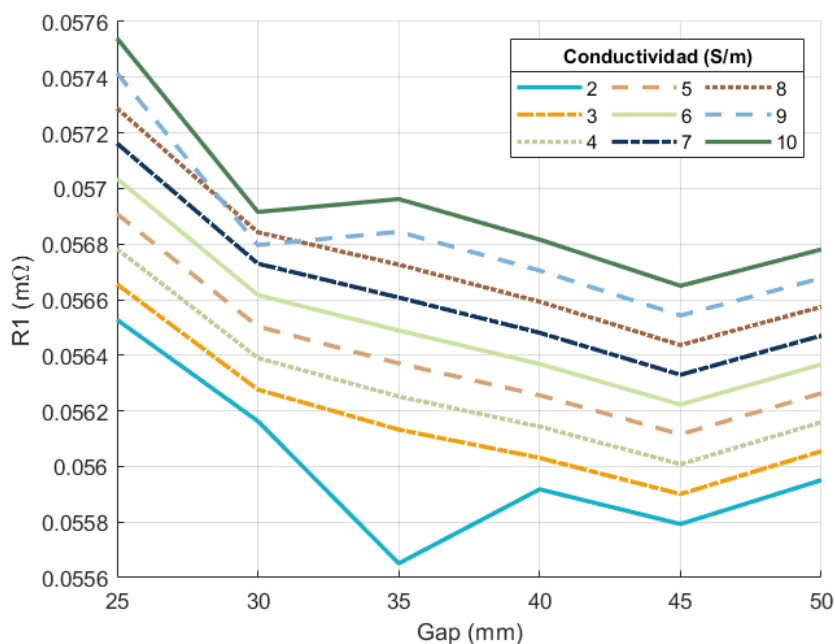


Figura 4.12: Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del primario para unas bobinas de 150 mm.

Este mismo fenómeno se produce también en la resistencia del secundario (Figura 4.13) aunque afecta también a la resistencia cuando la conductividad es de 10 S/m . De hecho, para una conductividad de 9 S/m , la resistencia en el secundario es incluso inferior a la proporcionada con 7 S/m de conductividad. Asimismo, en este caso el mínimo tiene lugar también a una distancia de 35 mm y una conductividad de 2 S/m .

En cuanto a la inductancia en el primario (Figura 4.14), el valor se incrementa a medida que disminuye la conductividad en el medio; es decir, en el agua. Excepto a una distancia de 35 mm, donde el valor de la inductancia alcanza un valor mínimo para una conductividad de 2 S/m .

Asimismo, para una distancia de 30 mm y conductividad de 9 S/m y 10 S/m , el valor de la inductancia toma un valor bajo con respecto al resto de valores obtenidos en la simulación. En los demás casos, la inductancia disminuye ligeramente a una distancia de 35 mm y 45 mm, aumentando de manera notable a una distancia de 50

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

mm.

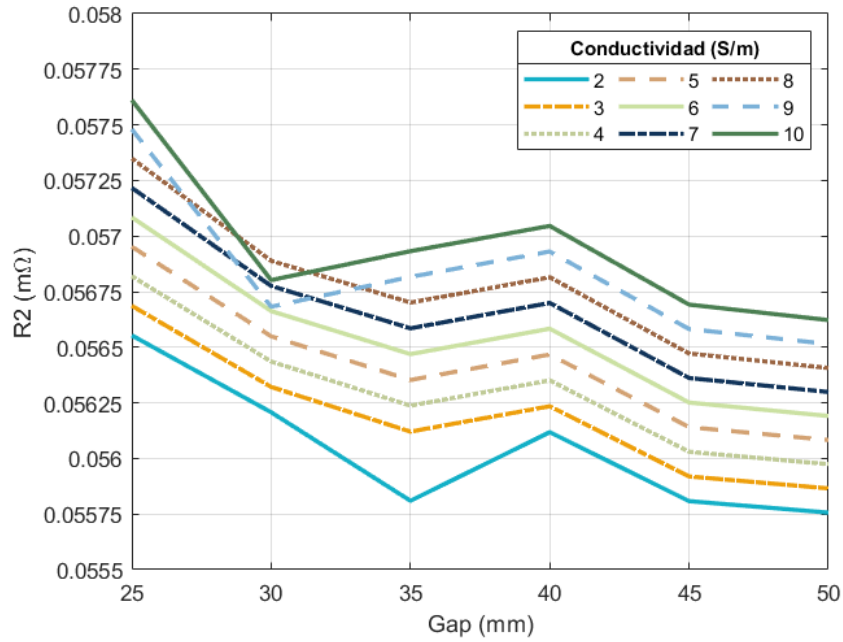


Figura 4.13: Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del secundario para unas bobinas de 150 mm.

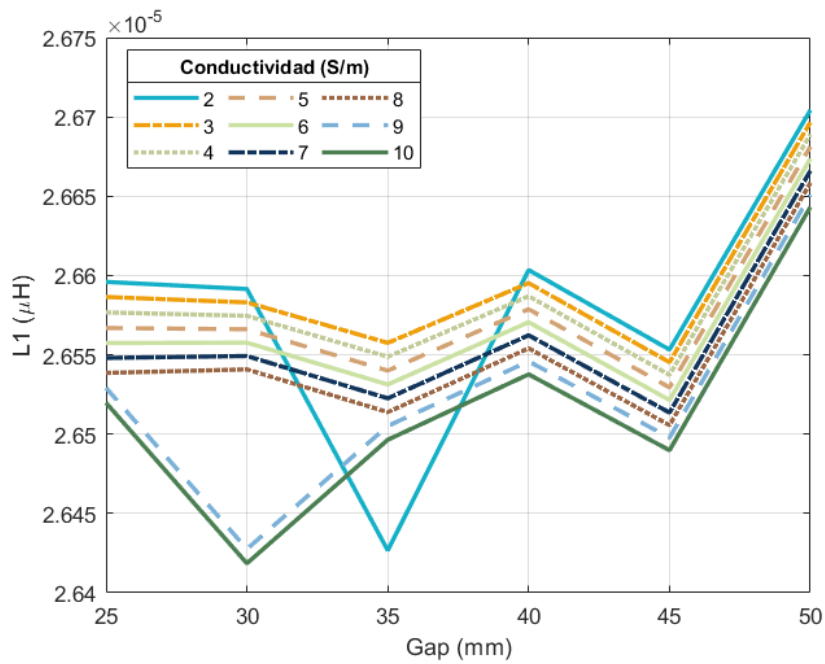


Figura 4.14: Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del primario para unas bobinas de 150 mm.

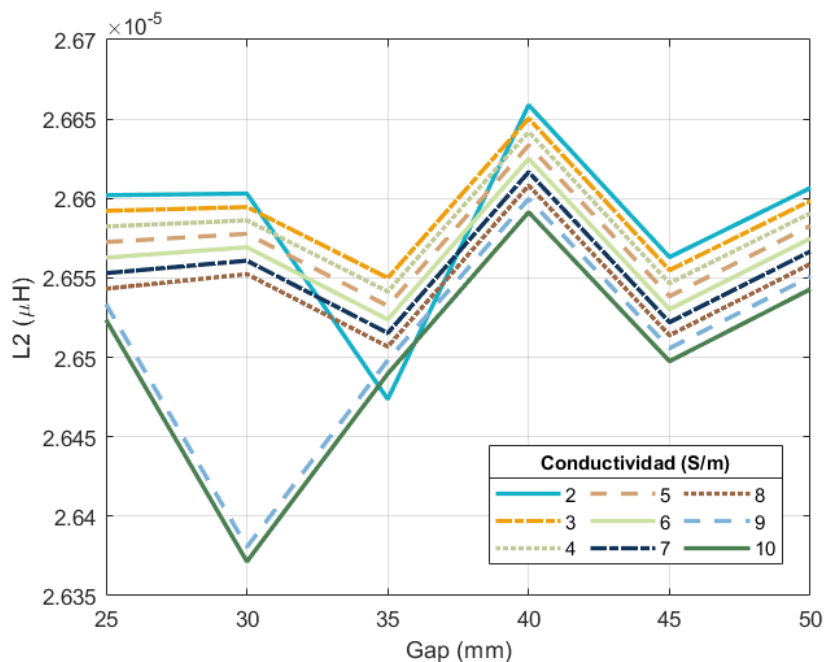


Figura 4.15: Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del secundario para unas bobinas de 150 mm.

En el secundario (Figura 4.15), la inductancia también aumenta a menor conductividad. Dicho valor disminuye levemente en 35 mm, alcanzando el valor máximo en 40 mm para todos los valores de conductividad estudiados. Posteriormente, vuelve a decrecer a 45 mm, aumentando nuevamente en 50 mm. En este caso, a 35 mm también la inductancia para una conductividad de 2 S/m toma el menor valor en esas condiciones. Además, al igual que en el primario, la inductancia a 30 mm y conductividad de 9 S/m y 10 S/m se reduce considerablemente.

A continuación, se representa gráficamente la relación entre los valores hallados en aire y en agua salada. Para ello, se emplea el parámetro β ; el cociente entre el valor en agua y aire, respectivamente.

En la Figura 4.16 y en la Figura 4.17, se contemplan los valores del parámetro β de las resistencias para cada conductividad considerada en un rango de distancias de separación, Gap .

En ambos devanados, el valor de β crece con la conductividad del agua, salvo a una distancia de 30 mm y una conductividad de 9 S/m . En esas condiciones, β es ligeramente inferior al valor obtenido para una conductividad de 8 S/m . El parámetro β es mayor a la unidad, excepto a una distancia de 35 mm y una conductividad de 2 S/m . En dicho punto, el valor es de 0,995. Además, en ambos casos los valores hallados son prácticamente idénticos en todos los puntos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

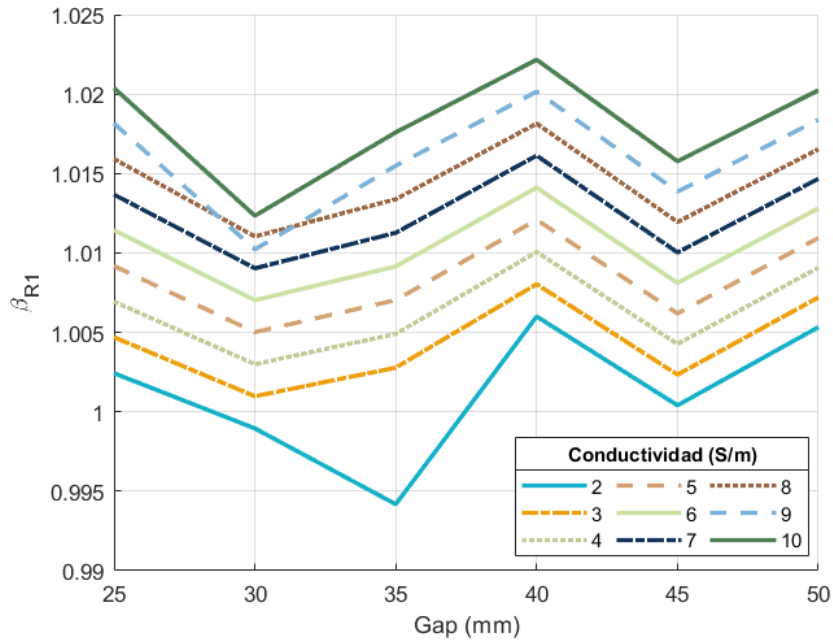


Figura 4.16: Impacto de la conductividad del agua en β_{R1} .

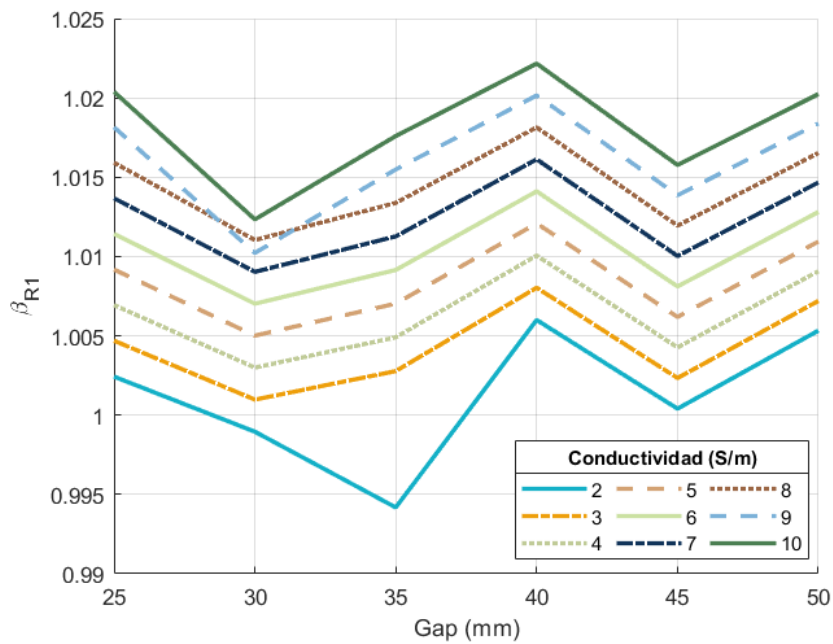


Figura 4.17: Impacto de la conductividad del agua en β_{R2} .

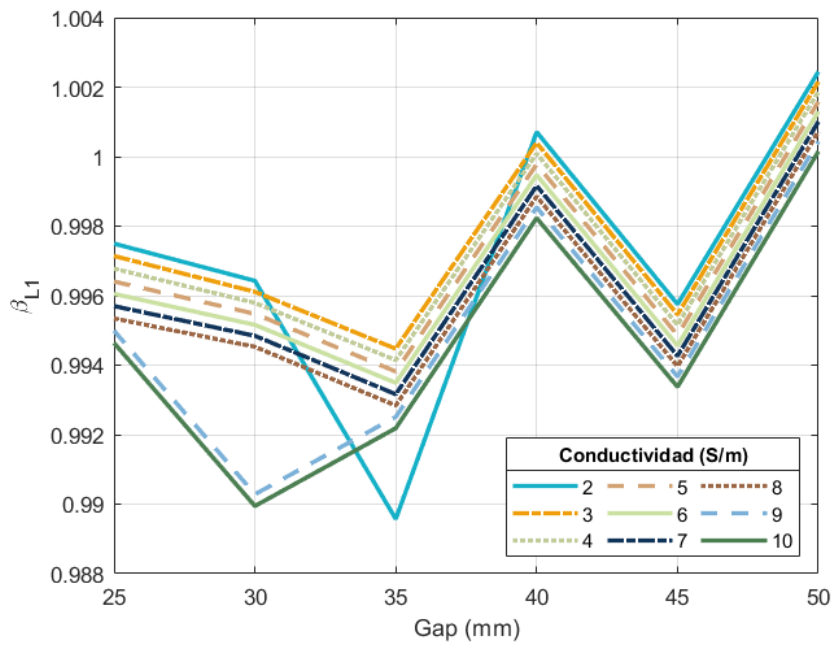


Figura 4.18: Impacto de la conductividad del agua en β_{L1} .

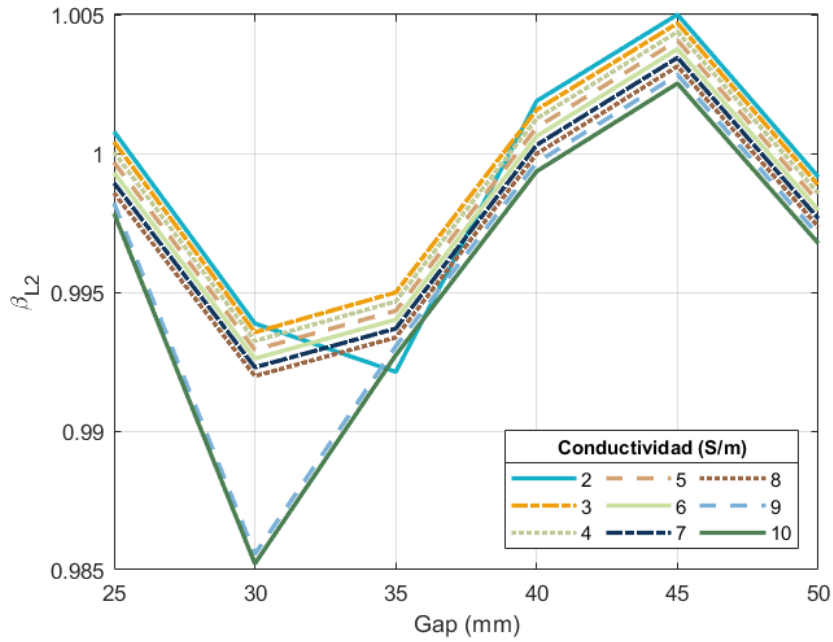


Figura 4.19: Impacto de la conductividad del agua en β_{L2} .

En la Figura 4.18 y en la Figura 4.19, se muestran los valores del parámetro β de las inductancias para cada conductividad considerada en un rango de distancias de

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

separación, Gap .

En sendos devanados, mayor valor de β a menor conductividad del agua, salvo a una distancia de 35 mm y conductividad de 2 S/m . Si bien en el primario representa el valor mínimo, en el secundario dicho valor es algo mayor. Cabe destacar que, a una distancia de separación de 30 mm y con una conductividad de 9 S/m y 10 S/m , se da una disminución de β . De hecho, en el secundario es más acusada, siendo el valor mínimo hallado.

En esta ocasión, la mayor diferencia entre las inductancias de los devanados radica en los valores obtenidos a 45 mm y 50 mm de separación entre las bobinas. A 45 mm, β oscila entre 0,994 y 0,996 en el primario mientras que en el secundario se alcanzan los valores más elevados, rondando el valor de 1,005. En cambio, a 50 mm, ocurre el efecto contrario. En el primario se obtienen los valores pico, 1,002, mientras que en el secundario los valores son sutilmente inferiores a la unidad.

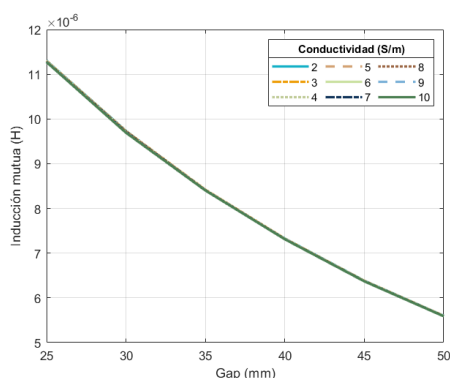


Figura 4.20: Variación de la inducción mutua con la conductividad del agua.

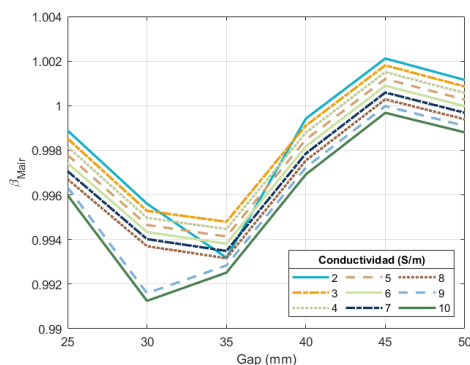


Figura 4.21: Impacto de la conductividad en β_{Mair} .

En cuanto a la inducción mutua entre las bobinas, la variación con la conductividad del agua es muy baja, como se aprecia en la Figura 4.20. En todos los casos, la inducción mutua se reduce con la distancia de separación entre las bobinas. Por otra parte, al relacionar la inducción mutua en el agua salada y en el aire con el parámetro β (Figura 4.21), el aumento de la conductividad produce una disminución de dicho parámetro. Se observa una excepción a 35 mm de separación, donde el valor para una conductividad de 2 S/m prácticamente coincide con el obtenido para 8 S/m .

4.3.2. Estudio 2: bobinas de 300 mm

En la Figura 4.22 y en la Figura 4.23, se presentan los valores de la resistencia del primario y secundario para diferentes valores de conductividad en el agua.

En ambas resistencias, aumenta su valor con la conductividad y disminuye con la distancia de separación de las bobinas. La evolución de la resistencia en ambos casos es prácticamente idéntica, salvo en el rango 45 mm - 50 mm. Aunque la resistencia decrece en ambos, en el secundario disminuye con una mayor pendiente.

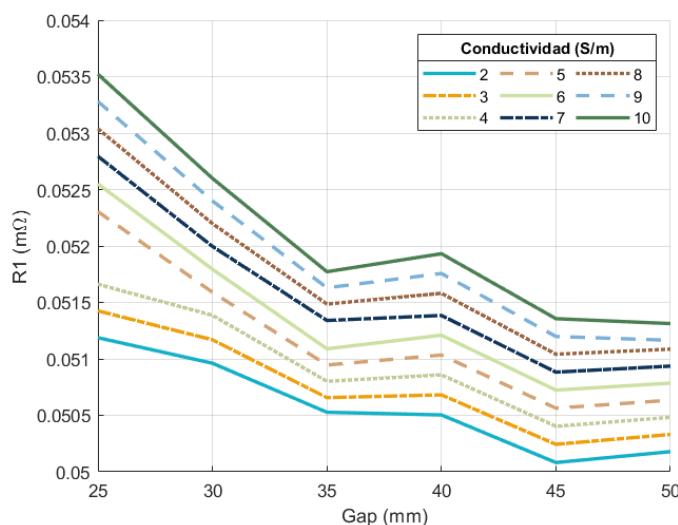


Figura 4.22: Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del primario para unas bobinas de 300 mm.

En la Figura 4.24 y en la Figura 4.25, se representan los valores de la inductancia del primario y secundario para diferentes valores de conductividad en el agua.

Por un lado, en el lado primario (Figura 4.24), se detectan diferentes tendencias:

- En el intervalo 25 mm -30 mm, la inductancia aumenta para un conductividad de 2 S/m , 3 S/m y 4 S/m mientras que se reduce en el resto de casos.
- En el rango 30 mm - 35 mm, la inductancia crece para todas los valores de conductividad considerados. Aunque el incremento es mayor para el intervalo 7 S/m - 10 S/m . De hecho, el valor de la inductancia con una conductividad de 7 S/m es prácticamente igual al obtenido con 2 S/m .
- Dentro del intervalo 35 mm - 40 mm, la inductancia crece para valores de conductividad entre 2 S/m y 6 S/m mientras que desciende para el resto de casos.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

- A partir de un *gap* de 40 mm, la inductancia decrece hasta una distancia de 45 mm para toda conductividad y vuelve a aumentar, logrando el valor máximo.

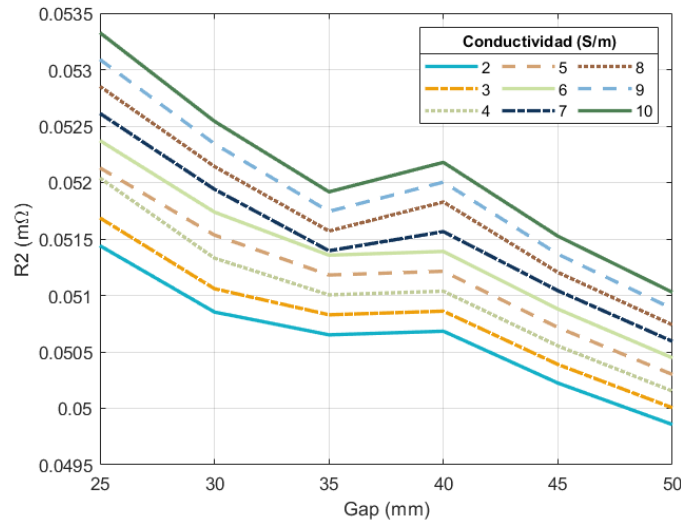


Figura 4.23: Efecto de la conductividad del agua en la resistencia del secundario para unas bobinas de 300 mm.

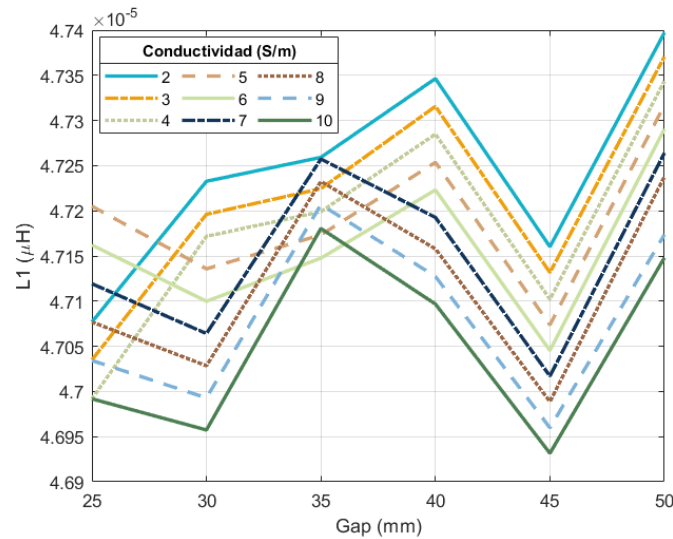


Figura 4.24: Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del primario para unas bobinas de 300 mm.

Por otro lado, en el lado secundario (Figura 4.25) el valor máximo de inductancia se consigue para un *gap* de 40 mm, salvo para una conductividad de $3 S/m$, que se produce a 50 mm de separación. En cuanto a la inductancia mínima, se produce a

una distancia de 25 mm para una conductividad $3 S/m$ y para el rango $7 S/m - 10 S/m$ y a una distancia de 50 mm en los demás casos.

A excepción del intervalo 25 mm - 30 mm, la evolución de la inductancia es parecida en todos los casos estudiados. En el mencionado intervalo, la inductancia disminuye rápidamente para bajos valores de conductividad ($2 S/m - 4 S/m$) mientras que crece lentamente a partir de $5 S/m$.

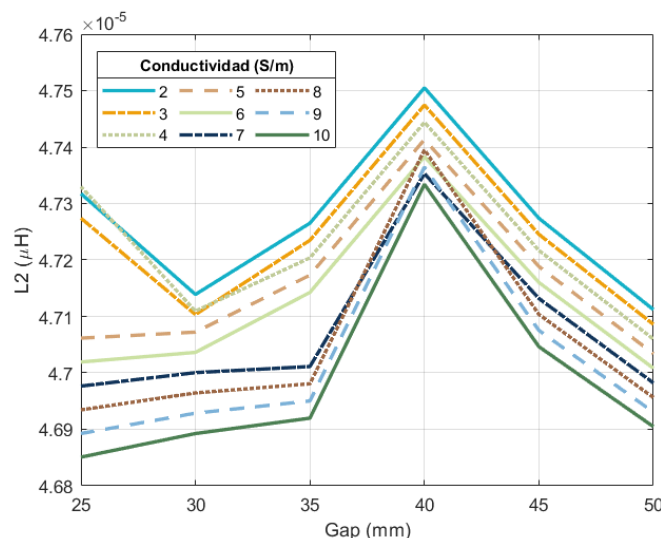


Figura 4.25: Efecto de la conductividad del agua en la inductancia del secundario para unas bobinas de 300 mm.

Seguidamente, se muestra el cociente entre los valores hallados en los respectivos estudios mediante el parámetro α . Dicho parámetro representa el cociente entre el valor obtenido para unas bobinas de 300 mm en el presente estudio y el hallado con unas bobinas de 150 mm en el estudio anterior.

Por una parte, en la Figura 4.26 y en la Figura 4.27 se muestra el parámetro α de la resistencia del primario y del secundario, respectivamente. En ambos casos, su valor es inferior a la unidad para toda conductividad y distancia de separación considerada. El valor de α oscila entre 0,93 y 0,894. Luego, la resistencia en ambos devanados es menor para unas bobinas de 300 mm de diámetro. En otras palabras, doblando el tamaño de las bobinas, se reduce la resistencia como mínimo en un 7 % y como máximo en un 10 %.

En el primario, si la conductividad es mayor de $2 S/m$, el máximo se da a una distancia de 25 mm y el mínimo a 50 mm de separación entre las bobinas. α_{R1} disminuye hasta 35 mm de distancia (excepto para $2 S/m$ y $3 S/m$, donde se incrementa), aumenta hasta 40 mm y vuelve a decrecer.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En cambio, para una conductividad igual a 2 S/m , el parámetro α_{R1} crece hasta 35 mm de distancia (valor pico), descendiendo progresivamente. A partir de un *gap* de 40 mm, sigue la misma evolución que los demás.

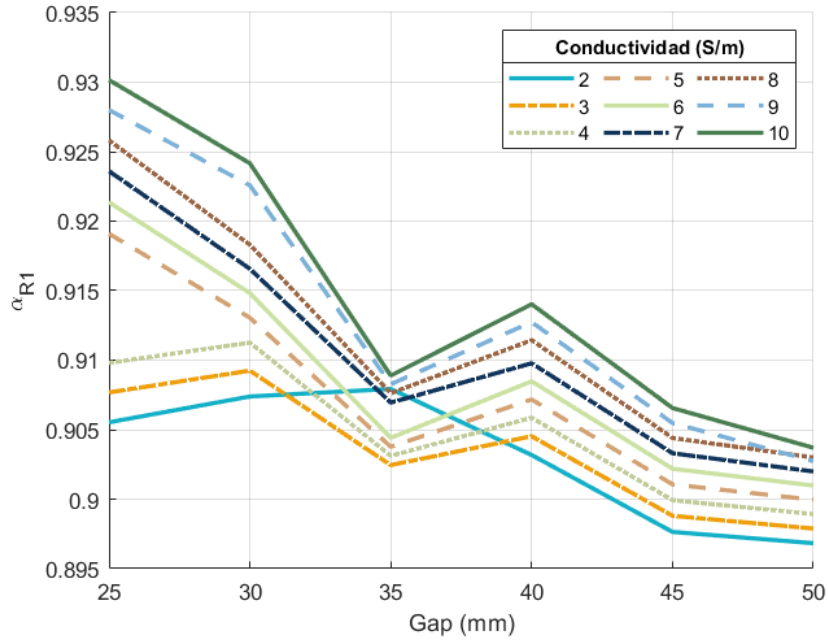


Figura 4.26: Relación entre la resistencia del primario de ambos estudios.

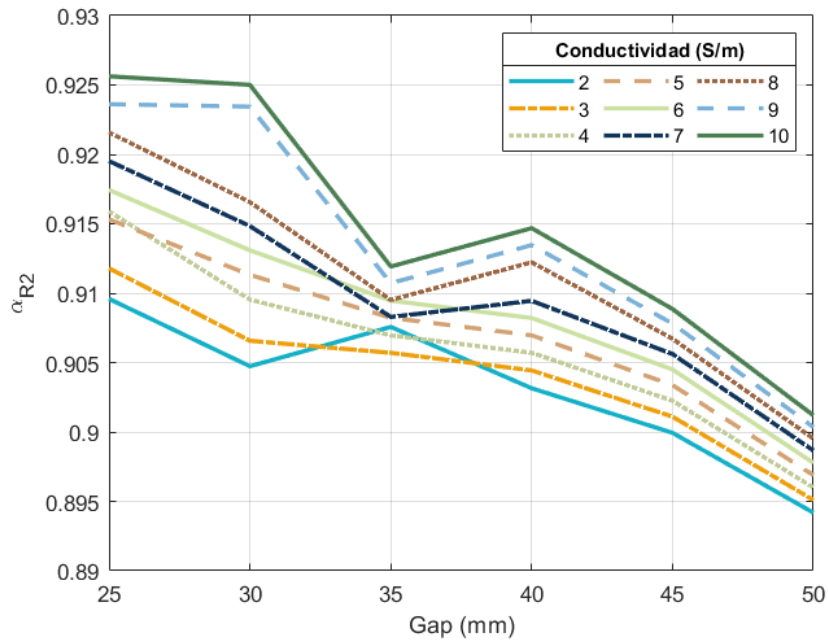


Figura 4.27: Relación entre la resistencia del secundario de ambos estudios.

En el secundario, a diferencia del primario, la inductancia decrece para todos los valores de conductividad en el tramo 25 mm - 30 mm. El valor máximo se da a un *gap* de 25 mm menos para $\sigma = 2 \text{ S/m}$, que se produce a 35 mm. El valor mínimo se genera a la mayor distancia considerada; es decir, a 50 mm.

Comparando los valores de las correspondientes gráficas, se concluye que los valores más elevados se producen en el primario mientras que los valores mínimos son ligeramente menores en el secundario.

Por otro lado, en la Figura 4.28 y en la Figura 4.29 se representa el parámetro α para la inductancia del primario y del secundario, respectivamente. Examinando sendas gráficas, se contempla que α es superior a la unidad para toda conductividad y distancia. Los valores obtenidos se encuentran entre 1,788 y 1,766. Esto indica que, con bobinas dos veces más grandes, la inductancia en ambos devanados es casi un 80 % más elevada.

En cuanto a α_{L1} (Figura 4.28), el máximo se encuentra a 35 mm de separación para una conductividad de 2 S/m y para el rango $7 - 10 \text{ S/m}$. Cuando *gap* = 40 mm, se produce para el intervalo $3 - 6 \text{ S/m}$. Por otra parte, el valor mínimo se da a 25 mm para bajos niveles de conductividad ($< 4 \text{ S/m}$) y a 50 mm para el resto.

En la gráfica, se contempla que, desde una distancia de 40 mm, la evolución para toda conductividad estudiada es similar. En dicho tramo, el parámetro α disminuye con el incremento de la conductividad.

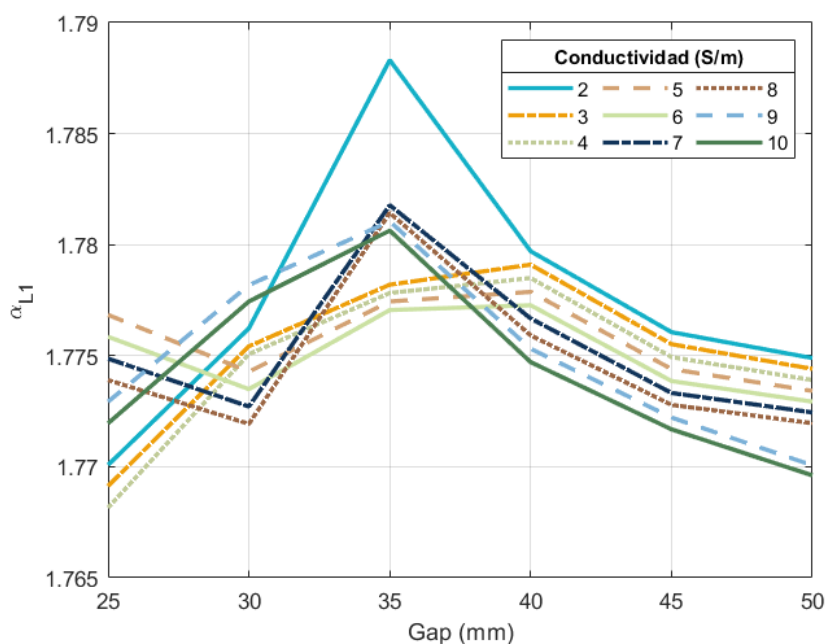


Figura 4.28: Relación entre la inductancia del primario de ambos estudios.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

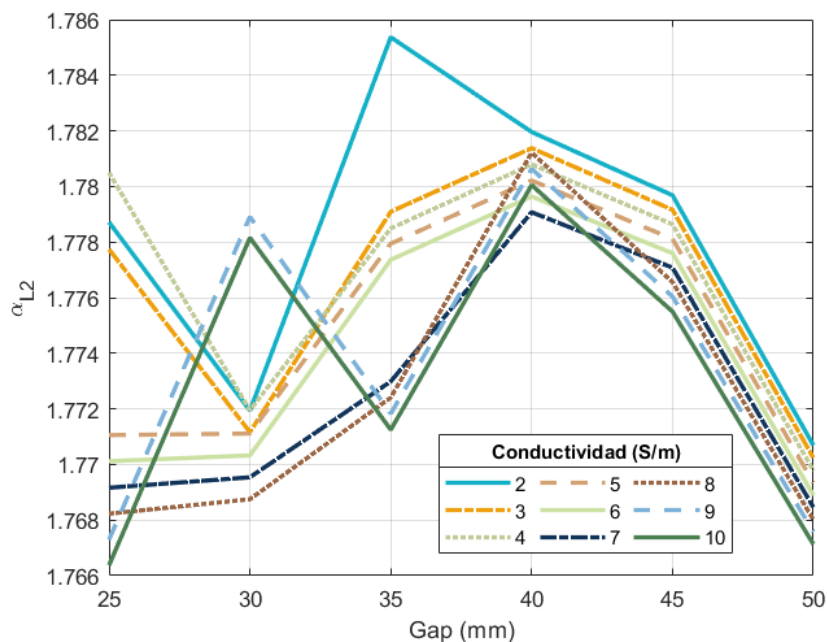


Figura 4.29: Relación entre la inductancia del secundario de ambos estudios.

En lo que respecta a α_{L2} (Figura 4.29), a partir de un *gap* de 45 mm, el comportamiento del parámetro en toda conductividad es similar. Luego, en este intervalo, α se reduce con la conductividad. En las demás distancias, la variación de la relación de inductancias en el secundario sufre oscilaciones. Especialmente para una conductividad de 2 S/m y el rango 9 - 10 S/m.

4.4. Dimensionamiento del circuito acuático

A continuación, se caracteriza el agua salada existente entre las bobinas. En concreto, se modela mediante una resistencia e inductancia, que está acoplada a las bobinas del primario y del secundario. Por ello, se debe determinar el valor de la resistencia y la inductancia, así como el coeficiente de acoplamiento entre el agua y cada bobina.

4.4.1. Cálculo de la resistencia

Para determinar la resistencia debido al agua de mar, R_s , se emplean las pérdidas óhmicas en el agua. Para ello, se accede al menú *Project Manager*. Con el botón

derecho sobre la pestaña *Fields Overlays*, se accede al menú *Calculator*. En dicho entorno se pueden efectuar diferentes cálculos con los resultados obtenidos tras la simulación.

$$R_s = \frac{\iiint_V P_{Ohm} dV}{I_s^2} \quad (4.2)$$

$$P_{ohm} = \frac{1}{2} \iiint_V \text{Re}(E \cdot E^*) dV \quad (4.3)$$

Con el objetivo de cuantificar la resistencia generada debido a la existencia de agua entre las bobinas, se implementa la Ecuación (4.2) en el programa. Así, el valor de la resistencia depende de la integral de las pérdidas óhmicas en el volumen de agua y del cuadrado de la corriente que circula a través de ella. ANSYS calcula las pérdidas mediante la Ecuación (4.3), en función del campo magnético.

$$P_{ohm} = \frac{1}{2\sigma} \int_V J \cdot J^* dV \quad (4.4)$$

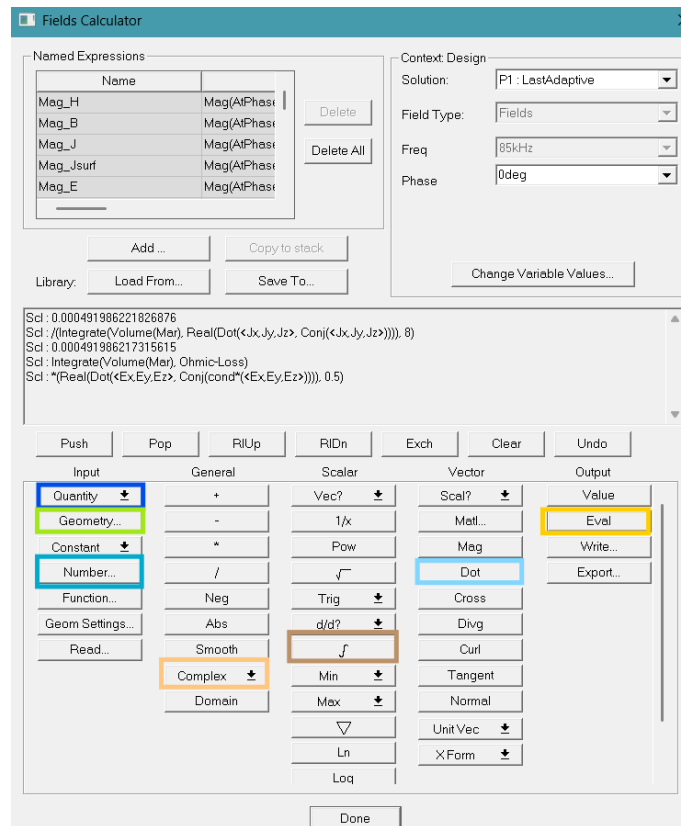


Figura 4.30: Cálculo de las pérdidas óhmicas en ANSYS.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

Para ello, se selecciona en el botón *Quantity* las pérdidas, *OhmicLoss*, que dependen del campo eléctrico. Después, se elige el volumen en el botón *Geometry*. Luego se presiona el símbolo de la integral y se pulsa el botón *Eval*. Las pérdidas óhmicas también pueden obtenerse aplicando la Ecuación (4.4) en el *calculator*. En la Figura 4.30 se puede observar el procedimiento seguido para el cálculo de las pérdidas.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
P_s (mW)	1,734	1,602	1,41	1,313	0,374	0,492

Tabla 4.6: Pérdidas óhmicas en el agua según la distancia de separación de las bobinas.

En la Tabla 4.6, se muestran los diferentes valores de las pérdidas óhmicas para cada distancia considerada. Se observa que las pérdidas decrecen con la distancia hasta los 45 mm de separación, donde se da el valor mínimo. Sin embargo, para un $Gap = 50$ mm, las pérdidas se incrementan levemente.

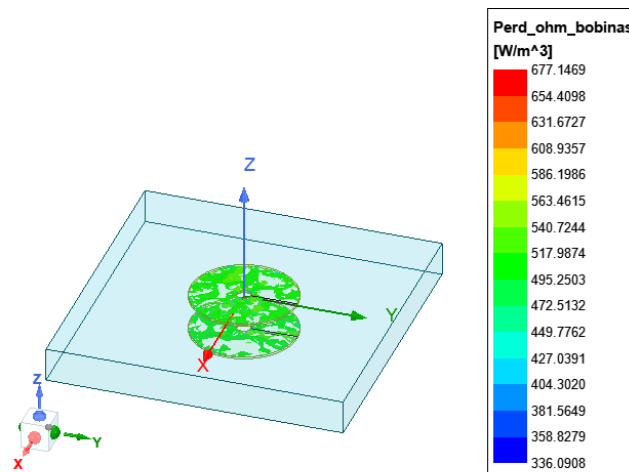


Figura 4.31: Distribución de las pérdidas óhmicas en las bobinas para un Gap = 50 mm.

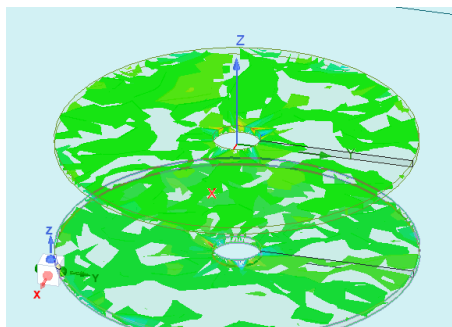


Figura 4.32: Distribución de las pérdidas óhmicas en las bobinas para un Gap = 50 mm.

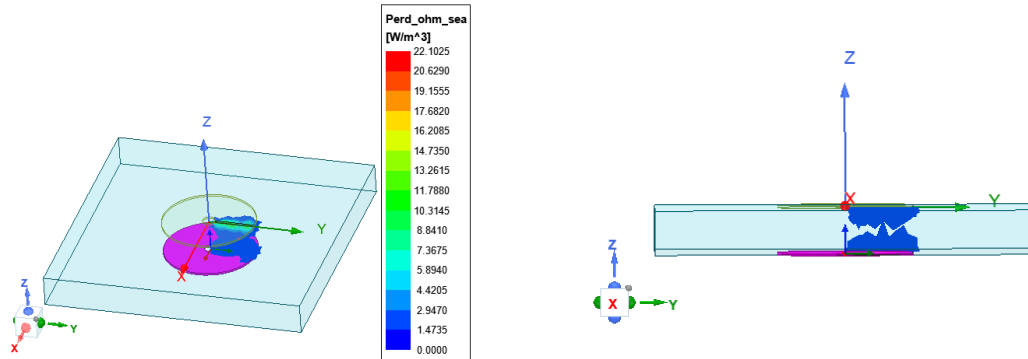


Figura 4.33: Distribución de las pérdidas óhmicas en el agua de mar para un Gap = 50 mm.

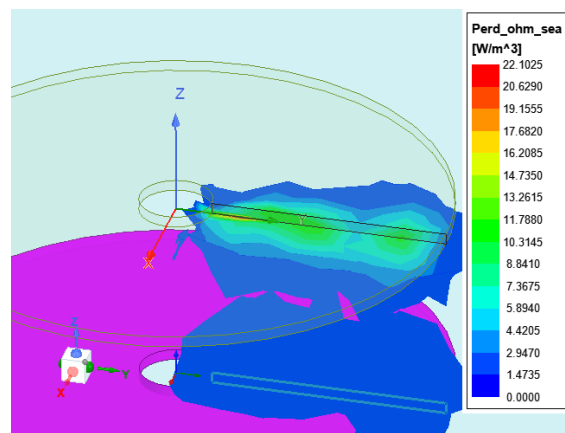


Figura 4.34: Distribución de las pérdidas óhmicas en el agua salada para un Gap = 50 mm.

En la Figura 4.31, se representa la distribución de las pérdidas óhmicas en sendas bobinas sin considerar las producidas por el agua de mar. Así, se contempla que las pérdidas superan los 500 W/m^3 en la mayor parte de las bobinas, si bien no son uniformes. Las mayores pérdidas se registran alrededor del hueco existente en el centro de las mismas, dándose picos de 677 W/m^3 .

En cambio, si se contemplan las pérdidas óhmicas en el agua (Figura 4.33), como máximo toman un valor de $22,1 \text{ W/m}^3$ en una zona concreta cercana a la sección de la bobina (Figura 4.34). Asimismo, las mayores pérdidas se concentran alrededor de las secciones de las bobinas. En concreto, en la zona más cercana al hueco interior de las bobinas. Además, si se observan las pérdidas en el plano YZ (Figura 4.34), éstas se producen únicamente en el volumen de agua salada dispuesto entre ambas

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

secciones, con valores en torno a $1,4 \text{ W/m}^3$.

$$I_s = \int_S J dS \quad (4.5)$$

Para hallar la corriente que circula a través del agua, se emplea la Ecuación (4.5). Así, la corriente se obtiene a partir de la integral de la densidad de corriente en la superficie del bloque de agua de mar. En el menú *Calculator*, se introduce el parámetro J, dentro de las opciones del botón *Quantity*. Después, se selecciona la componente Z del vector en el botón *Scal?*, siendo la dirección perpendicular a la corriente. Posteriormente, se elige la opción *CmplxMag* dentro del botón *Complex* para considerar solo la magnitud del valor. Luego, se selecciona la superficie del mar en el botón *Geometry* y se hace clic en el símbolo de la integral. Finalmente, se pulsa la opción *Eval*. En la Figura 4.35 se muestra todo el proceso detallado anteriormente.

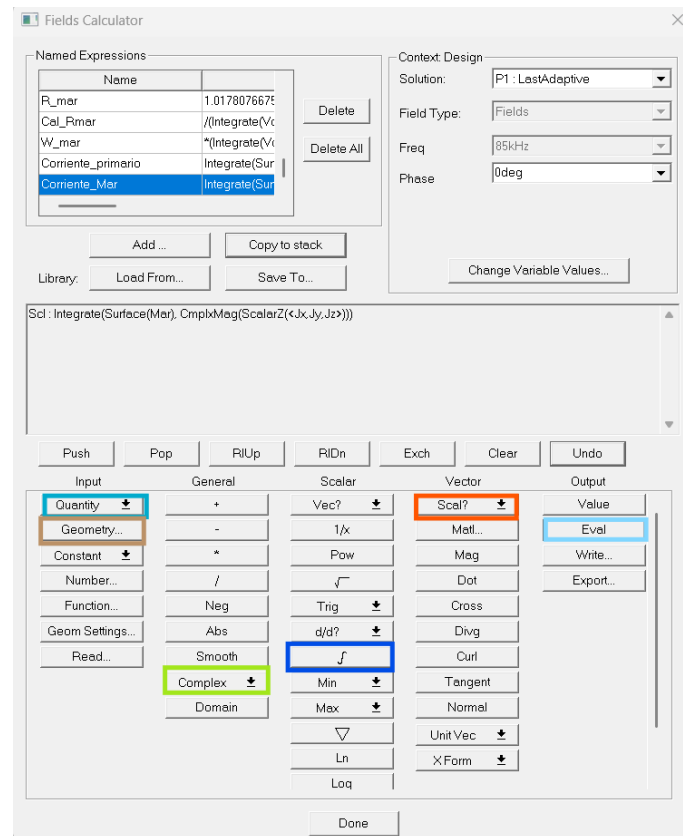


Figura 4.35: Cálculo de la corriente en ANSYS.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
I_s (A)	0,0039	0,289	0,251	0,226	0,043	0,068

Tabla 4.7: Corriente en el agua según la distancia de separación de las bobinas.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
R_s (Ω)	0,0156	0,0191	0,0224	0,0257	0,1443	0,1050

Tabla 4.8: Resistencia en el agua según la distancia de separación de las bobinas en ANSYS Maxwell.

En la Tabla 4.6 y en la Tabla 4.8, se recogen los valores de las corrientes y de la resistencia en el agua de mar en función de la distancia entre las bobinas. En el comportamiento de la corriente con la distancia, se aprecia un fenómeno parecido al de las pérdidas óhmicas. En este caso, la corriente aumenta hasta los 30 mm (máximo), decrece hasta los 45 mm y crece ligeramente a 50 mm de distancia.

Estas variaciones repercuten en la resistencia del agua hallada para cada distancia. Por tanto, en vez de aumentar o disminuir linealmente con la distancia entre las bobinas, la resistencia viene dada por una función parabólica convexa.

$$R_s = \rho \frac{L}{S} \quad (4.6)$$

Ante estos resultados, se ha decidido descartar los valores obtenidos y la resistencia del agua se ha calculado a partir de la Ecuación (4.6). Así, la resistencia depende de la inversa de la conductividad del agua, ρ , de la superficie del agua, S , y de la distancia entre las bobinas, L .

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
R_s (Ω)	0,0354	0,0425	0,0496	0,0567	0,0638	0,0709

Tabla 4.9: Resistencia en el agua según la distancia de separación de las bobinas.

En la Tabla 4.9, se expone la resistencia del agua para cada distancia de separación considerada. Tanto la conductividad del agua como el área del bloque del agua son iguales en todos los casos. Luego, la diferencia existente entre ellos se debe a la variación del *Gap*. A mayor distancia de separación, mayor resistencia presente en el agua.

4.4.2. Cálculo de la inductancia

Con el objetivo de determinar el valor de la inductancia en el agua, L_s , para cada distancia considerada, se emplea la Ecuación (4.7). Así, la inductancia depende de la corriente, I_s , que circula a través de ella y de la energía magnética almacenada,

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

W_m , expresada mediante la Ecuación (4.8). B es la densidad de flujo magnético, H es el campo magnético, E es el campo eléctrico y D , el desplazamiento eléctrico.

$$L_s = \frac{2 \cdot W_m}{I_s^2} \quad (4.7)$$

$$W_m = \frac{1}{4} \cdot \iiint_V \text{Re}((B \cdot H^*) + (E \cdot D^*)) dV \quad (4.8)$$

Para calcular W_m , se emplea nuevamente la herramienta "Fields Calculator". En primera instancia, se selecciona dentro de la categoría *Quantity* la opción *energy*. Después, en el botón *Geometry*, se elige el volumen del agua de mar. Posteriormente, se selecciona el símbolo de integral. Luego, se añade el número dos en *Number* y se multiplica con la integral. Así, se evalúa la expresión con la opción *Eval*.



Figura 4.36: Cálculo de la energía en el agua en ANSYS.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
$2W_s$ (μJ)	14,11	15,81	17,19	18,36	11,24	11,47

Tabla 4.10: Energía en el agua según la distancia de separación de las bobinas.

En la Tabla 4.10, se recogen los valores de la energía en el agua de mar en función de la distancia. Hay que tener en cuenta que los valores mostrados están multiplicados por un factor de dos, por lo que sería el numerador de la Ecuación (4.7). La energía no sigue un comportamiento lineal, sino que se sigue una función parabólica convexa. El máximo se produce para un $Gap = 40$ mm.

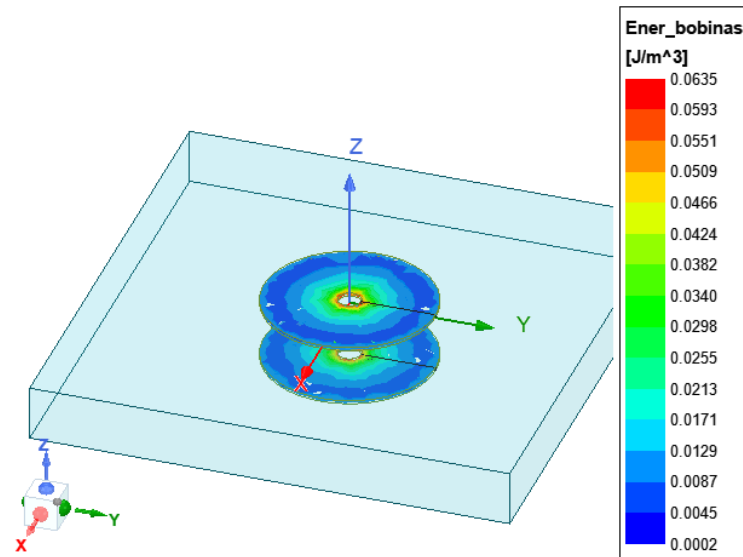


Figura 4.37: Distribución de la energía en las bobinas para un Gap = 50 mm.

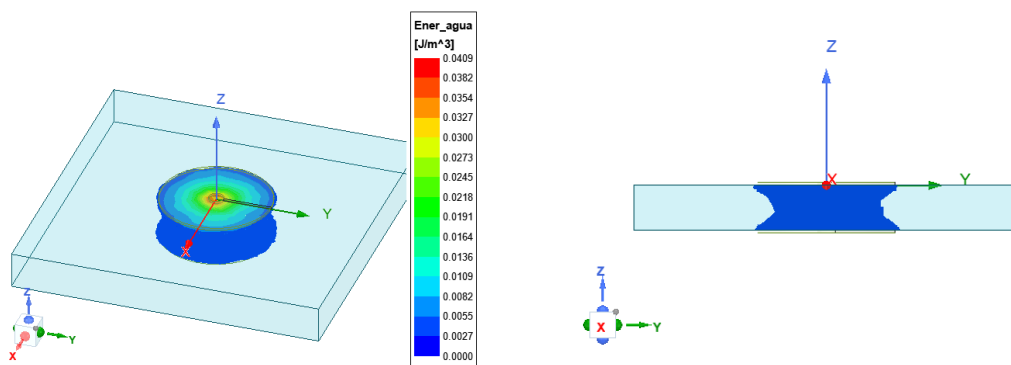


Figura 4.38: Distribución de la energía en el agua de mar para un Gap = 50 mm.

En la Figura 4.37, se representa la energía magnética almacenada en el volumen de las bobinas mientras que en la Figura 4.38, se plasma la energía existente en el volumen de agua. En ambos casos, la energía máxima por unidad de volumen se encuentra en la región próxima al hueco central de las bobinas. No obstante, el valor pico en las bobinas es de $0,0635 \text{ J/m}^3$ mientras que en el agua es de $0,0409 \text{ J/m}^3$.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

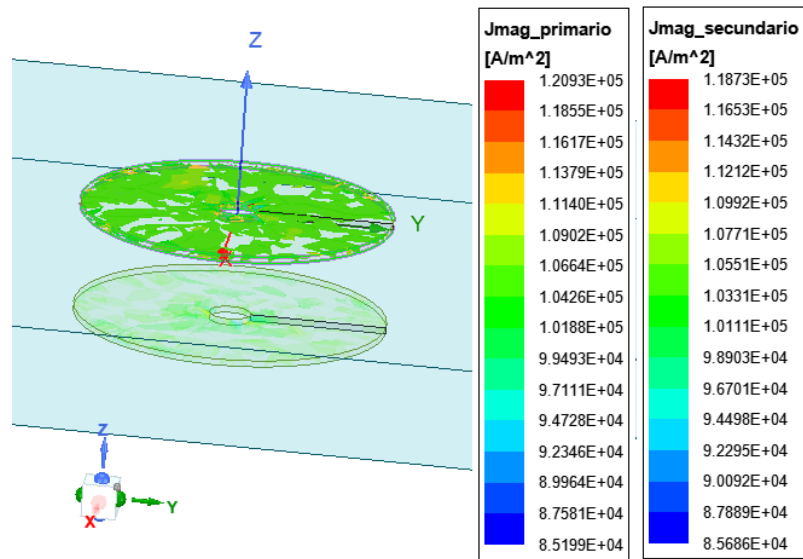


Figura 4.39: Densidad de energía en las bobinas para un Gap = 50 mm.

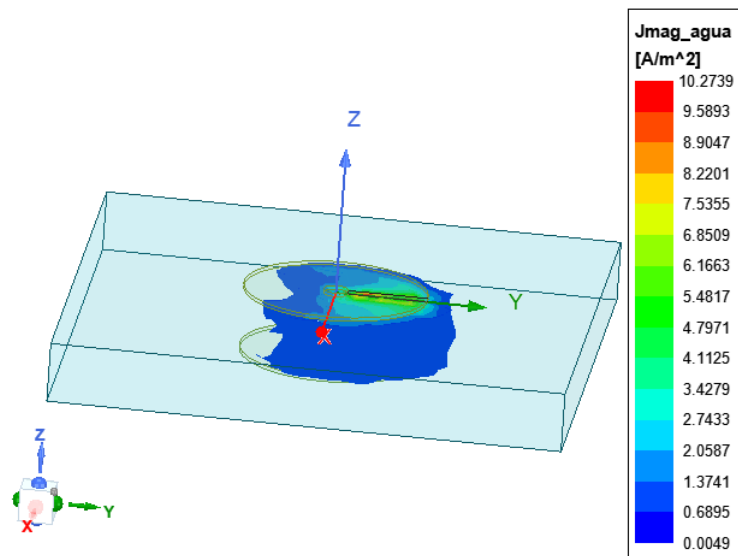


Figura 4.40: Densidad de energía en el agua para un Gap = 50 mm.

En la Figura 4.39 y en la Figura 4.40, se muestra la densidad de energía, J , en las bobinas y en el agua, respectivamente. Se aprecia claramente que la densidad de corriente en el agua es menor a la producida en cada bobina.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
L_s (mH)	0,126	0,188	0,273	0,359	5,259	2,456

Tabla 4.11: Inductancia en el agua según la distancia de separación de las bobinas en ANSYS Maxwell.

En la Tabla 4.11, se muestra la inductancia en el agua para cada distancia estimada. Los valores de la corriente empleados se encuentran en la Tabla 4.7. Se advierte que la inductancia crece conforme aumenta la distancia hasta los 45 mm, cuando el valor disminuye prácticamente a la mitad para una distancia de 50 mm.

Además, al confrontar la inductancia del agua con la inductancia de las bobinas, se advierte que los valores hallados en el agua son muy elevados en comparación a las bobinas, ya que en las bobinas es del orden de μH mientras que en el agua se expresa en mH . En teoría, la inductancia en agua de mar debería ser muy baja comparada con el valor de una bobina. Luego, frente a estos resultados, se ha decidido no emplear estos valores, al igual que sucedía con la resistencia.

Para determinar la inductancia en el agua salada, L_s , se emplean las expresiones que vinculan la inductancia, resistencia e inducción mutua del cargador con los del circuito equivalente en agua, presentes en el Capítulo 2. Considerando que las bobinas poseen las mismas dimensiones y que están rodeadas por la misma cantidad de agua, se puede suponer que son simétricas. Dicha simplificación permite establecer que el coeficiente de acoplamiento entre la inductancia del agua con la bobina primaria, K_{13} , y con la bobina secundaria, K_{23} , son iguales.

$$K_{1s}K_{2s} = K_{12} \cdot \frac{(M_{12} - M'_{12})}{M_{12}} \quad (4.9)$$

De la Ecuación (4.9), se despeja el producto del coeficiente de acoplamiento del agua con cada bobina. Como ambos son iguales, el coeficiente de acoplamiento será la mitad del valor dado por la expresión anterior. En la Tabla 4.12, se registran los coeficientes de acoplamiento en función de la distancia de separación de las bobinas. Dichos valores están multiplicados por 10^{-3} .

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
$k_{1s,2s}$ ($\cdot 10^{-3}$)	0,3917	0,9201	0,8771	0,1665	0,1805	0,0595

Tabla 4.12: k según la distancia de separación de las bobinas.

Para hallar la inductancia en el agua, se recurre a la Ecuación (2.26), presente en el Capítulo 2. De dicha expresión, se despeja el valor de la inductancia en función de

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

valores conocidos. En las Ecuaciones (4.10), (4.11) y (4.12), se muestra el proceso seguido.

$$R'_1 = R_1 + \frac{\omega^2 M_{1s}^2}{|Z_{sea}|^2} \cdot R_s = R_1 + \frac{R_s \omega^2 K_{1s}^2 \cdot (L_1 L_s)}{(R_s^2 + \omega^2 L_s^2)} \quad (4.10)$$

$$(R'_1 - R_1) \cdot (R_s^2 + \omega^2 L_s^2) = R_s \omega^2 K_{1s}^2 \cdot (L_1 L_s) \quad (4.11)$$

$$(R'_1 - R_1) \cdot R_s^2 + (R'_1 - R_1) \cdot \omega^2 L_s^2 - R_s \omega^2 K_{1s}^2 \cdot (L_1 L_s) = 0 \quad (4.12)$$

Así, se llega a una ecuación de segundo grado (Ecuación (4.13)), donde la incógnita es la inductancia del agua, L_s . Dicha expresión aportará dos soluciones, de las que se escogerá la que arroje un valor positivo.

$$L_s^2 - \left(\frac{K_{1s}^2 \cdot L_1 R_s}{(R'_1 - R_1)} \right) \cdot L_s + \left(\frac{R_s}{\omega} \right)^2 = 0 \quad (4.13)$$

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
L_s (μH)	0,0663	0,0796	0,0929	0,1061	0,1194	0,1327

Tabla 4.13: Inductancia en el agua en función de la distancia de separación de las bobinas.

En la Tabla 4.13, se recogen los valores de la inductancia del agua para cada distancia, una vez despejada la Ecuación (4.13). Al contemplar los diferentes valores, se advierte que la inductancia del agua aumenta con la distancia de separación existente entre las bobinas.

4.4.3. Comparación con la simulación en agua salada

Al estimar la inductancia en el agua, se ha caracterizado por completo el circuito de un cargador inductivo en agua salada. Por consiguiente, se pueden comparar los valores obtenidos en la simulación en ANSYS Maxwell en el mar con los hallados tras el dimensionamiento del agua salada.

Para ello, se emplean los valores calculados en los Apartados 4.4.1 y 4.4.2. Junto a la resistencia e inductancia del circuito primario y secundario, se sustituyen los diferentes valores en las Ecuaciones (2.26), (2.27), (2.28) y (2.29). Este procedimiento se

lleva a cabo para todas las distancias objeto de estudio. Así, se procede a cuantificar el error absoluto entre el valor dado por la simulación y el calculado.

R1 (mΩ)	L1 (μH)	R2 (mΩ)	L2 (μH)
$5,5928 \cdot 10^{-4}$	$5,7286 \cdot 10^{-8}$	$7,8150 \cdot 10^{-4}$	$1,0660 \cdot 10^{-7}$

Tabla 4.14: Error absoluto máximo con respecto a los valores en ANYS Maxwell.

En la Tabla 4.14, se muestra el máximo error absoluto para la resistencia e inductancia de ambos devanados. En el primario, el máximo se produce para una separación entre bobinas de 40 mm. En el secundario, se da a una distancia de 45 mm. Se observa que en las resistencias el error máximo es superior al de las inductancias.

4.5. Comportamiento del cargador inductivo

A continuación, se calculan la tensión y corriente en el primario, considerando los diversos valores obtenidos para cada valor del parámetro *Gap*. Asimismo, se obtendrá la eficiencia del sistema para cada caso. Este procedimiento se efectúa para la topología de compensación SS.

A la hora de realizar los cálculos, se empleará una aplicación diseñada en el entorno *App Designer* de MATLAB. En ella, el usuario podrá introducir los datos del sistema (resistencia, inductancia, condensador, coeficiente de acoplamiento), así como los parámetros iniciales (frecuencia de operación, tensión y potencia de la batería).

Además, podrá elegir entre varias opciones: circuito en aire, agua (considerando únicamente las corrientes parásitas) y agua (incluyendo el efecto del condensador parásito). Según la elección del usuario, se habilitarán o no los datos del sistema (solo estarán disponibles los estrictamente necesarios) y se modificará el circuito en pantalla. Esto permitirá al usuario verificar lo que va a calcular. También, la aplicación cuenta con un botón de encendido, estando apagado por defecto. En las Figuras 4.41, 4.42 y 4.43, se muestra la aplicación en función de la opción seleccionada.

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

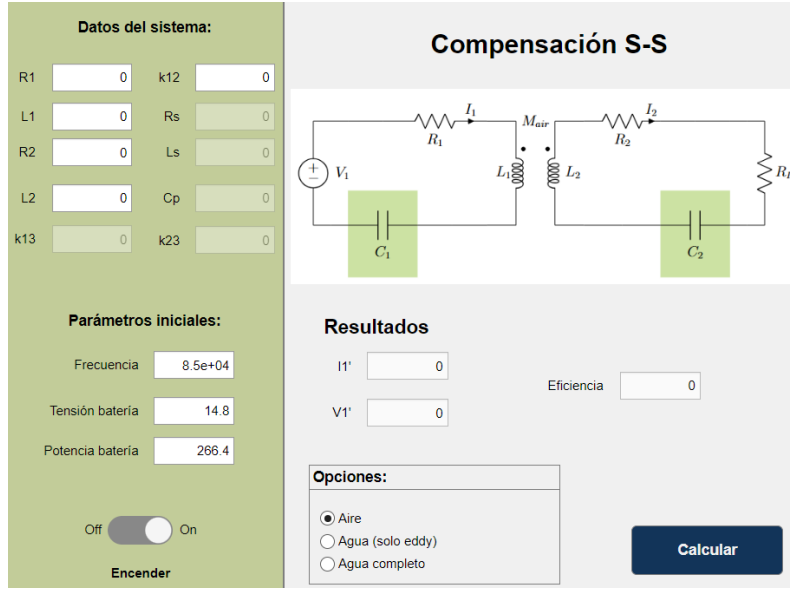


Figura 4.41: Vista de la aplicación para el circuito en aire.

$$I_1 = I_2 \cdot \frac{R_2 + R_L + L_2\omega j + \frac{1}{C_2\omega j}}{M_{12}\omega j} \quad (4.14)$$

En el circuito en aire (Figura 4.41), se emplea la Ecuación (4.14) para el cálculo de la corriente que circula por el primario, deducida a partir de la Ecuación (2.6). Para determinar la tensión del primario y la eficiencia del sistema, se utilizan las Ecuaciones (2.7) y (2.9), respectivamente. Sendas expresiones se reflejan en el Apartado 2.6.1.

$$I_1 = I_2 \cdot \frac{(Z_{23}^2 - Z_{33}Z_{22})}{(Z_{23}Z_{13} - Z_{33}Z_{12})} \quad (4.15)$$

$$I_3 = \frac{(Z_{23}I_{2p} - Z_{13}I_1)}{Z_{33}} \quad (4.16)$$

En el circuito en agua salada en el que no se han tenido en cuenta los efectos del condensador parásito (Figura 4.42), la corriente y la tensión del primario se han estimado mediante las Ecuaciones (4.15) y (2.21). Para cuantificar la tensión, es necesario calcular previamente la corriente que circula por el circuito del agua con la Ecuación (4.16). Las corrientes se han deducido de las Ecuaciones (2.22) y (2.23), presentes en el Apartado 2.8.1. Asimismo, el cálculo de la eficiencia viene dado por la Ecuación (2.24).

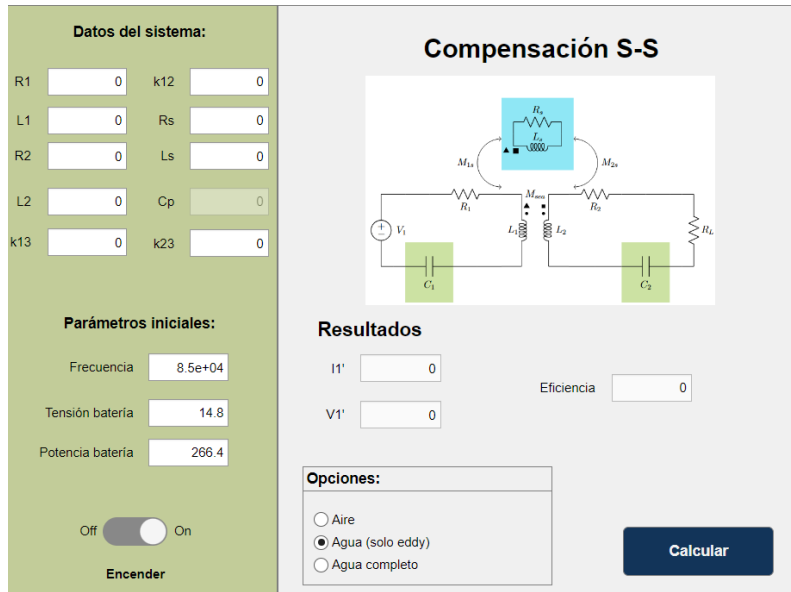


Figura 4.42: Vista de la aplicación para el circuito en agua salada, considerando solo las corrientes eddy.

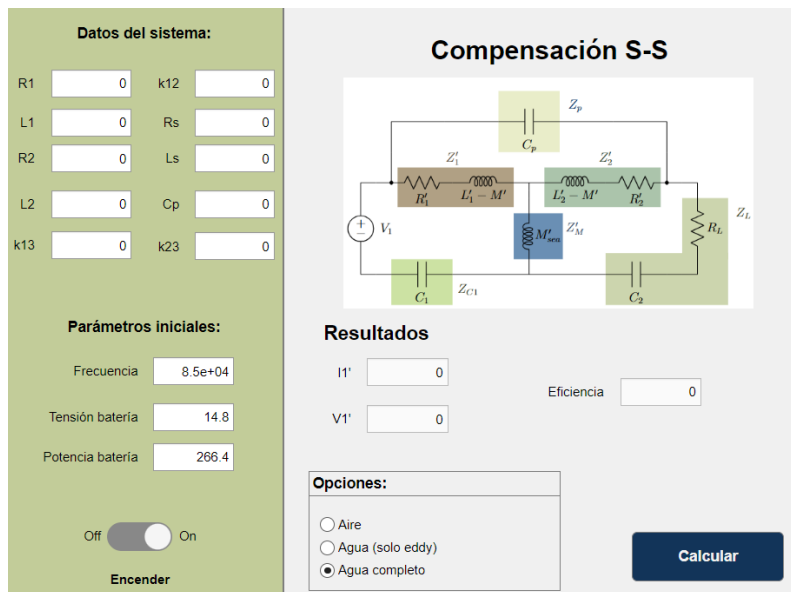


Figura 4.43: Vista de la aplicación para el circuito en agua salada completo.

$$I_3 = I_{2p} \cdot \frac{Z_{mp}Z_2 + Z_1 \cdot (Z_2 + Z_{mp} + Z_{RC2})}{Z_{mp} \cdot (Z_{cp} + Z_1 + Z_2) + Z_1Z_2} \quad (4.17)$$

$$I_1 = \frac{(I_3 \cdot (Z_{cp} + Z_1 + Z_2) - Z_2I_2)}{Z_1} \quad (4.18)$$

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

En el circuito en agua salada 4.43, se emplean las Ecuaciones (4.18) y (2.32) para obtener la corriente y la tensión en el primario. Con la Ecuación (4.17), se halla la corriente que circula por el condensador parásito. Las corrientes se han obtenido a partir de las Ecuaciones (2.33) y (2.34), expuestas en el Apartado 2.8.2. La eficiencia se calcula mediante la Ecuación (2.35).

Gap (mm)	Aire		Agua (eddy)		Diferencia	
	I1 (A)	V1 (V)	I1 (A)	V1 (V)	$\Delta I1$ (μA)	$\Delta V1$ (μV)
25	2,83	99,51	2,83	99,51	3,47	14,64
30	3,28	96,02	3,28	96,02	22,85	78,24
35	3,79	74,51	3,79	74,51	24,54	67,99
40	4,37	64,61	4,37	64,61	1,05	2,32
45	5,03	56,21	5,03	56,21	1,45	2,55
50	5,73	49,43	5,73	49,43	0,19	0,26

Tabla 4.15: Comparativa de tensiones y corrientes en agua y agua salada considerando solo las corrientes parásitas.

En cuanto a las tensiones y corrientes en el primario, en la Tabla 4.15 se recogen los resultados aportados por la aplicación desarrollada para las dos primeras opciones (Aire y Agua (solo eddy)) para cada distancia de separación. También se muestra la diferencia entre los valores obtenidos en cada caso.

Confrontando las tensiones y corrientes de cada caso, se observa que las diferencias son mínimas entre los resultados obtenidos para aire y agua. De hecho, son de un orden de magnitud de micras. Las mayores discrepancias se producen para las distancias de 30 y 35 mm, dándose en 50 mm las menores. Si no se mostrasen en la tabla estas diferencias, parecería que los valores obtenidos son idénticos.

Gap (mm)	Aire		Agua		Diferencia	
	I1 (A)	V1 (V)	I1 (A)	V1 (V)	$\Delta I1$ (mA)	$\Delta V1$ (V)
25	2,83	99,51	2,84	99,31	6,19	0,19
30	3,28	96,02	3,29	85,78	10,06	0,24
35	3,79	74,51	3,80	74,24	15,33	0,28
40	4,37	64,61	4,39	64,30	22,57	0,31
45	5,03	56,21	5,06	55,88	33,56	0,34
50	5,73	49,43	5,78	49,06	45,76	0,37

Tabla 4.16: Comparativa de tensiones y corrientes en aire y agua salada.

Por otro lado, en la Tabla 4.16 se muestran las tensiones y corrientes obtenidas con la primera y tercera opción escogidas en la aplicación (*aire y agua completo*). En esta ocasión, las diferencias existentes son apreciables al contemplar tanto las

tensiones como las corrientes en sendos circuitos. Especialmente se advierten en las tensiones, tal y como se atestigua en la diferencia entre ambos valores. Además, se observa que la diferencia entre la tensión y la corriente aumenta linealmente con la distancia.

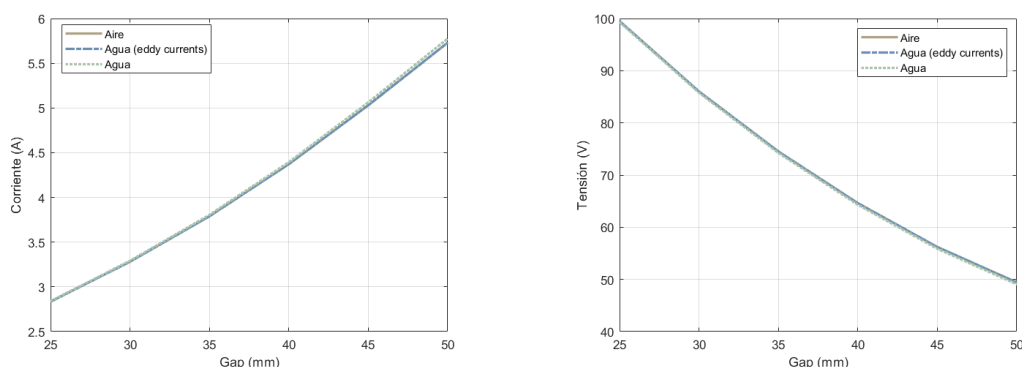


Figura 4.44: Corriente y tensión del primario para una compensación SS.

En la Figura 4.44, se muestra la corriente y tensión del primario para cada una de las opciones dadas en la aplicación. En cuanto a la corriente (derecha), crece con la distancia entre las bobinas para todos los casos. Las diferencias entre los valores no son apreciables en la gráfica, salvo la corriente en el circuito completo en agua salada a mayores distancias. En lo que respecta a las tensiones (izquierda), decrece con el incremento de la separación entre bobinas. Al igual que sucedía con la corriente, las diferencias entre los circuitos son apenas perceptibles. Si bien cabe destacar que las tensiones en el circuito en agua salada con todas las pérdidas son algo inferiores, apreciándose a mayores distancias.

Gap (mm)	25	30	35	40	45	50
I3 (A)	0,09	0,20	0,18	0,03	0,03	0,01

Tabla 4.17: Intensidad en el agua salada.

Por otra parte, en la Tabla 4.17 se muestran las corrientes en el agua considerando solo el efecto de las corrientes parásitas. Se aprecia que las corrientes son muy bajas con respecto a la que circula en el devanado primario y secundario. La intensidad carece de un comportamiento lineal con la variación de la separación de las bobinas. Crece hasta alcanzar el máximo a una distancia de 30 mm, disminuye ligeramente y después, decrece rápidamente. Cabe mencionar que la corriente en el intervalo 40 mm - 45 mm apenas sufre variación con la distancia.

En cuanto a la eficiencia del sistema, se muestran los valores hallados para cada caso y cada distancia considerada en la Figura 4.45. Se contempla que la eficiencia

CAPÍTULO 4. RESULTADOS

se reduce con el aumento de la separación entre las bobinas en todos los casos. Mientras que la diferencia entre el circuito en aire y en agua considerando sólo las corrientes parásitas es apenas perceptible, la eficiencia en el circuito en agua con todas las pérdidas disminuye ligeramente con respecto a los casos anteriores. Esto significa que la introducción del condensador parásito tiene mayor influencia en el comportamiento del sistema que la consideración de las corrientes parásitas.

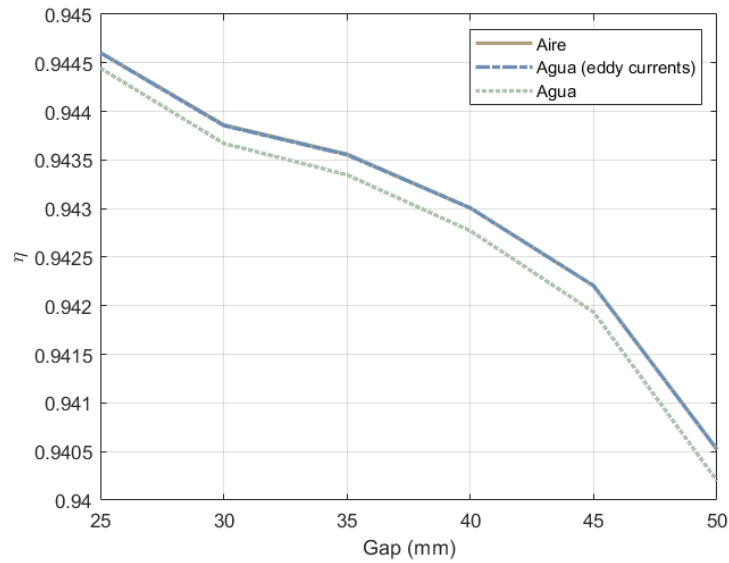


Figura 4.45: Eficiencia del primario para una compensación SS.

Capítulo 5

Conclusiones y líneas futuras

5.1. Conclusiones

De la realización del presente trabajo, se han obtenido las siguientes conclusiones:

- Los resultados aportados por ANSYS se corresponden en cierta medida con los obtenidos de manera experimental. Asimismo, al comparar el modelo con otro recogido en la literatura, los valores de resistencia e inductancia de las bobinas son similares.
- Colocando una lámina de metal y una lámina de agua entre las bobinas, se observa que el efecto del agua produce un aumento del coeficiente de auto-inducción de las bobinas, incrementándose así la inducción mutua. Además, aunque las corrientes parásitas en el agua salada son inferiores que en el metal, éstas se concentran adquiriendo la forma de una bobina.
- En cuanto a la salinidad del agua, se comprueba que el comportamiento de los parámetros de las bobinas (resistencia e inductancia) con el aumento de la conductividad no es lineal. Duplicando el tamaño de las bobinas, la resistencia disminuye entre un 7 - 10 % mientras que la inductancia crece casi un 80 %.
- En un entorno acuático, en comparación con el aire, el valor de la resistencia aumenta ligeramente y la inductancia decrece levemente. El coeficiente de acoplamiento entre los devanados disminuye en el agua salada, si bien la variación es mínima. A excepción del coeficiente de acoplamiento, que disminuye con la separación entre las bobinas, la resistencia, la inductancia y el condensador parásito tienen una evolución no lineal con la distancia.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

- A la hora de dimensionar la resistencia e inductancia en el agua salada a partir del modelo en ANSYS, la corriente en el agua proporcionada por el programa no posee un comportamiento lineal, sino que el máximo se produce con valores bajos de distancia. De repente, pasa de un valor de intensidad relativamente pequeño a alcanzar el valor máximo. Por ello, se desechan estos resultados y se emplea un modelo simplificado para obtener la inductancia en el agua salada a partir de la resistencia del agua y los correspondientes coeficientes de acoplamiento. Así, la resistencia e inductancia del agua crecen con la separación entre las bobinas. La resistencia obtenida es superior a la de las bobinas mientras que la inductancia es menor a la de los devanados.
- Al analizar las tensiones y corrientes del primario cuando se introduce la compensación SS, se observa que la intensidad aumenta en el agua salada mientras que la tensión disminuye. Especialmente, se advierte dicho fenómeno cuando se introduce el condensador parásito entre las bobinas. Dichas variaciones son imperceptibles al representar conjuntamente las tensiones y corrientes en los diferentes supuestos. En cuanto a la eficiencia del sistema de carga, siempre se mantiene en valores superiores al 94 % en todas las distancias consideradas. Se concluye que la capacidad parásita posee una mayor influencia sobre la eficiencia del cargador que las corrientes parásitas.

5.2. Líneas futuras

Tras el análisis de los resultados obtenidos en este TFM, se han identificado las siguientes líneas futuras de trabajo:

- Se puede implementar experimentalmente el circuito al completo, considerando los resultados obtenidos en el presente trabajo para así verificar la validez del modelado realizado en el entorno de simulación.
- Se pueden probar otras topologías de compensación como la LCC-S o LCC-LCC, que permitan mejorar las prestaciones del sistema para el tipo de aplicación considerada.
- Realizar un montaje en el laboratorio que se acerque lo más posible a la realidad. Para ello, se considerarían las corrientes marinas, la proliferación de microorganismos entre las bobinas o la cantidad de sal existente en el mar.
- En cuanto al modelo, también resulta de interés el explorar otras funcionalidades del ANSYS para simular todo el sistema dentro del software mediante el diseño del circuito eléctrico.

- El análisis de los campos magnéticos implicados y su compatibilidad con otros sistemas eléctricos submarinos.
- Para evitar la entrada de objetos u otros elementos, se puede diseñar un sistema de protección con el fin de impedir que alguna especie quede atrapada.

CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] M. Negri y G. Bieker. «Life-cycle greenhouse gas emissions from passenger cars in the European Union: A 2025 update and key factors to consider,» International Council on Clean Transportation (ICCT). (jul. de 2025), dirección: https://theicct.org/wp-content/uploads/2025/07/ID-392-%E2%80%93-Life-cycle-GHG_report_final.pdf.
- [2] «Programa MOVES III,» Instituto sobre la Diversificación y Ahorro de Energía (IDAE). (), dirección: <https://www.idae.es/ayudas-y-financiacion/para-movilidad-y-vehiculos/programa-moves-iii>.
- [3] «Real Decreto 821/2023, de 14 de noviembre, por el que se adapta al marco europeo de ayudas de estado el Real Decreto 266/2021, de 13 de abril, por el que se aprueba la concesión directa de ayudas a las comunidades autónomas y a las ciudades de Ceuta y Melilla para la ejecución de programas de incentivos ligados a la movilidad eléctrica (MOVES III) en el marco del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia Europeo, y se amplía su vigencia.» (), dirección: <https://www.boe.es/eli/es/rd/2023/11/14/821>.
- [4] V. Nişulescu, F. Ivan, M. F. Toma, G. Bancă y C. Renţea, «Experimental research regarding the autonomy of electric cars in real driving conditions,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1303, n.º 1, pág. 012 001, mar. de 2024. DOI: 10.1088/1757-899X/1303/1/012001. dirección: <https://dx.doi.org/10.1088/1757-899X/1303/1/012001>.
- [5] F. Freschi, M. Mitolo y R. Tommasini, «Electrical safety of electric vehicles,» en *2017 IEEE/IAS 53rd Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference (I&CPS)*, 2017, págs. 1-5. DOI: 10.1109/ICPS.2017.7945109.
- [6] S. Niu, Q. Zhao, H. Chen, H. Yu, S. Niu y L. Jian, «Underwater Wireless Charging System of Unmanned Surface Vehicles with High Power, Large Misalignment Tolerance and Light Weight: Analysis, Design and Optimization,»

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- Energies*, vol. 15, n.º 24, 2022, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15249529. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/24/9529>.
- [7] C. R. Teeneti, T. T. Truscott, D. N. Beal y Z. Pantic, «Review of Wireless Charging Systems for Autonomous Underwater Vehicles,» *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, vol. 46, n.º 1, págs. 68-87, 2021. DOI: 10.1109/JOE.2019.2953015.
- [8] D. Ng y D. W. K. Ng, *Wireless information and power transfer : theory and practice* (THEi Wiley ebooks.), eng, First edition. Hoboken, New Jersey: Wiley, 2019, ISBN: 1-119-47683-6.
- [9] L. Xie, Y. Shi, Y. T. Hou y A. Lou, «Wireless power transfer and applications to sensor networks,» *IEEE Wireless Communications*, vol. 20, n.º 4, págs. 140-145, 2013. DOI: 10.1109/MWC.2013.6590061.
- [10] W. C. Brown, «The history of wireless power transmission,» *Solar Energy*, vol. 56, n.º 1, págs. 3-21, 1996, *Wireless Power Transmission*, ISSN: 0038-092X. DOI: [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(95\)00080-B](https://doi.org/10.1016/0038-092X(95)00080-B). dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X9500080B>.
- [11] T. E. of Encyclopaedia Britannica, «Heinrich Hertz,» *Encyclopedia Britannica*, feb. de 2025. dirección: <https://www.britannica.com/biography/Heinrich-Hertz>.
- [12] S. Chhawchharia, S. K. Sahoo, M. Balamurugan, S. Sukchai y F. Yanine, «Investigation of wireless power transfer applications with a focus on renewable energy,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 91, págs. 888-902, 2018, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.101>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118303162>.
- [13] N. Shinohara, «History and Innovation of Wireless Power Transfer via Microwaves,» *IEEE Journal of Microwaves*, vol. 1, n.º 1, págs. 218-228, 2021. DOI: 10.1109/JMW.2020.3030896.
- [14] J. I. Agbinya, *Wireless power transfer* (River Publishers Series in Communications), eng, 1st ed. Gistrup, Denmark: River Publishers, 2012, ISBN: 1-00-334006-7.
- [15] M. Hutin y M. LeBlanc, «Transformer system for electric railways,» *US Patent No. US527857A*, 2018.
- [16] N. Shinohara, *Wireless power transfer via radiowaves* (Waves series), eng, 1.ª ed. London: Wiley, 2014, ISBN: 184821605X.
- [17] X. Wei, Z. Wang y H. Dai, «A Critical Review of Wireless Power Transfer via Strongly Coupled Magnetic Resonances,» *Energies*, vol. 7, n.º 7, págs. 4316-4341, 2014, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en7074316. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/7/7/4316>.

- [18] M. M. Rahman, M. S. I. Shanto, N. Sarker, T. Rani y L. C. Paul, «A comprehensive review of wireless power transfer methods, applications, and challenges,» *Engineering Reports*, vol. 6, n.º 10, e12951, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/eng2.12951>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/eng2.12951>.
- [19] D. Kishan y P. S. R. Nayak, «Wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging — A state of the art,» en *2016 International Conference on Signal Processing, Communication, Power and Embedded System (SCOPES)*, 2016, págs. 2069-2073. DOI: 10.1109/SCOPES.2016.7955812.
- [20] Y. Kumawat, S. Shukla, D. Verma y P. S. Rathore, «Wireless Energy Harvesting and Transfer: A Comprehensive Review of Recent Developments,» en *2023 IEEE Renewable Energy and Sustainable E-Mobility Conference (RESEM)*, 2023, págs. 1-4. DOI: 10.1109/RESEM57584.2023.10236286.
- [21] D. Wang, J. Zhang, S. Cui, Z. Bie, F. Chen y C. Zhu, «The state-of-the-arts of underwater wireless power transfer: A comprehensive review and new perspectives,» eng, *Renewable & sustainable energy reviews*, vol. 189, págs. 113910-, 2024, ISSN: 1364-0321.
- [22] Z. Liu, T. Li, S. Li y C. C. Mi, «Advancements and challenges in wireless power transfer: A comprehensive review,» *Nexus*, vol. 1, n.º 2, pág. 100014, 2024, ISSN: 2950-1601. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ynexs.2024.100014>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2950160124000123>.
- [23] K. Detka y K. Górecki, «Wireless Power Transfer—A Review,» *Energies*, vol. 15, n.º 19, 2022, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en15197236. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/19/7236>.
- [24] A. Lassioui, H. El Fadil, F. Belhaj y A. Rachid, «Battery Charger for Electric Vehicles Based ICPT and CPT - A State of the Art,» en *2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE)*, 2018, págs. 1-6. DOI: 10.1109/REPSGIE.2018.8488834.
- [25] C. Panchal, S. Stegen y J. Lu, «Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system,» *Engineering Science and Technology, an International Journal*, vol. 21, n.º 5, págs. 922-937, 2018, ISSN: 2215-0986. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2018.06.015>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S221509861830154X>.
- [26] M. Ghovanloo, F. Silveira y P. Pérez-Nicoli, «Introduction to Wireless Power Transfer,» eng, en *Inductive Links for Wireless Power Transfer*, Switzerland: Springer International Publishing AG, 2021, págs. 1-14, ISBN: 9783030654764.
- [27] J. L. Villa Gazulla, «Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos Eléctricos mediante Acoplamiento Inductivo,» Presentado: 31 03 2009, Tesis doct., Universidad de Zaragoza, 2009.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [28] B. Sim, S. Jeong, Y. Kim et al., «A Near Field Analytical Model for EMI Reduction and Efficiency Enhancement Using an n th Harmonic Frequency Shielding Coil in a Loosely Coupled Automotive WPT System,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 63, n.º 3, págs. 935-946, 2021. DOI: 10.1109/TEMC.2020.3039412.
- [29] K. Li, J. Chen, X. Sun, G. Lei, Y. Cai y L. Chen, «Application of wireless energy transmission technology in electric vehicles,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 184, pág. 113 569, 2023, ISSN: 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113569>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032123004264>.
- [30] T. Ojha, T. P. Raptis, A. Passarella y M. Conti, «Wireless power transfer with unmanned aerial vehicles: State of the art and open challenges,» *Pervasive and Mobile Computing*, vol. 93, pág. 101 820, 2023, ISSN: 1574-1192. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmcj.2023.101820>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1574119223000780>.
- [31] G. Lee, M. Y. Kim, C. Lee, D. Jang, B.-S. Lee y J. H. Kim, «Electromagnetic Field Tests of a 1-MW Wireless Power Transfer System for Light Rail Transit,» *Energies*, vol. 14, n.º 4, 2021, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en14041171. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/1171>.
- [32] J. Bao, S. Hu, Z. Xie, G. Hu, Y. Lu y L. Zheng, «Optimization of the Coupling Coefficient of the Inductive Link for Wireless Power Transfer to Biomedical Implants,» *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2022, n.º 1, pág. 8 619 514, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1155/2022/8619514>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2022/8619514>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2022/8619514>.
- [33] R. Mendes Duarte y G. Klaric Felic, «Analysis of the Coupling Coefficient in Inductive Energy Transfer Systems,» *Active and Passive Electronic Components*, vol. 2014, n.º 1, pág. 951 624, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/951624>. eprint: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1155/2014/951624>. dirección: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2014/951624>.
- [34] G. Alli, P. W. Elesbão, J. P. S. Cipriani, L. M. Ilha, L. Roggia y Á. R. Seidel, «A Comparative Study Regarding Different Coil Structures for Low Power Device WPT Systems,» en *2023 IEEE 8th Southern Power Electronics Conference and 17th Brazilian Power Electronics Conference (SPEC/COBEP)*, 2023, págs. 1-8. DOI: 10.1109/SPEC56436.2023.10408591.
- [35] E. Yıldırım, «Optimal Design with Generalized Inductance Calculation for IPTs Using a Spiral Rectangular Coil Pair,» *Electric Power Components and Systems*, vol. 50, n.º 19-20, págs. 1212-1222, 2022. DOI: 10.1080/15325008.2022.2151057.

- [36] H. Zhang y D. Beetner, «An Equivalent Coil Model of a Wireless Power Transfer System Including Eddy Loss,» en *2024 IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Signal & Power Integrity (EMC+SIPI)*, 2024, págs. 544-549. DOI: 10.1109/EMCSIPI49824.2024.10705641.
- [37] J. Kim, K. Kim, H. Kim, D. Kim, J. Park y S. Ahn, «An Efficient Modeling for Underwater Wireless Power Transfer Using Z-Parameters,» *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, vol. 61, n.º 6, págs. 2006-2014, 2019. DOI: 10.1109/TEM.2019.2952320.
- [38] P. Tan, B. Song, X. Shangguan y H. Liu, «Optimal Design of Transmission Characteristics for Hexagonal Coil Wireless Power Transfer System Based on Genetic Algorithm,» *Chinese Journal of Electrical Engineering*, vol. 9, n.º 2, págs. 94-106, 2023. DOI: 10.23919/CJEE.2023.000013.
- [39] Z. Bi, T. Kan, C. C. Mi, Y. Zhang, Z. Zhao y G. A. Keoleian, «A review of wireless power transfer for electric vehicles: Prospects to enhance sustainable mobility,» *Applied Energy*, vol. 179, págs. 413-425, 2016, ISSN: 0306-2619. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.07.003>. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261916309448>.
- [40] J. Deng, F. Lu, S. Li, T.-D. Nguyen y C. Mi, «Development of a high efficiency primary side controlled 7kW wireless power charger,» en *2014 IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC)*, 2014, págs. 1-6. DOI: 10.1109/IEVC.2014.7056204.
- [41] «Wireless Power Transfer for Light-Duty Plug-in/Electric Vehicles and Alignment Methodology J2954_202408,» *SAE International*, pág. 198, ago. de 2024. DOI: https://doi.org/10.4271/J2954_202408.
- [42] V. Bana, M. Kerber, G. Anderson, J. D. Rockway y A. Phipps, «Underwater wireless power transfer for maritime applications,» en *2015 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2015, págs. 1-4. DOI: 10.1109/WPT.2015.7139142.
- [43] C. Yu, H. Zhu, B. Han et al., «Wireless Power Transfer Technology for Shore-to-Ship Applications,» en *2022 5th International Conference on Power and Energy Applications (ICPEA)*, 2022, págs. 157-163. DOI: 10.1109/ICPEA56363.2022.10052116.
- [44] I. Martínez de Alegría, I. Rozas Holgado, E. Ibarra, E. Robles y J. L. Martín, «Wireless Power Transfer for Unmanned Underwater Vehicles: Technologies, Challenges and Applications,» *Energies*, vol. 17, n.º 10, 2024, ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en17102305. dirección: <https://www.mdpi.com/1996-1073/17/10/2305>.

CAPÍTULO 6. BIBLIOGRAFÍA

- [45] S. A. H. Mohsan, M. A. Khan, A. Mazinani, M. H. Alsharif y H.-S. Cho, «Enabling Underwater Wireless Power Transfer towards Sixth Generation (6G) Wireless Networks: Opportunities, Recent Advances, and Technical Challenges,» *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. 10, n.º 9, 2022, ISSN: 2077-1312. DOI: 10.3390/jmse10091282. dirección: <https://www.mdpi.com/2077-1312/10/9/1282>.
- [46] L. Yu, H. Sun, S. Su, H. Tang, H. Sun y X. Zhang, «Review of Crucial Problems of Underwater Wireless Power Transmission,» *Electronics*, vol. 12, n.º 1, 2023, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics12010163. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/12/1/163>.
- [47] «Sea water,» National Oceanic y Atmospheric Administration (NOAA). (mar. de 2023), dirección: [https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/sea-water#:~:text=Sea%20water%20salinity%20is%20expressed,liter%20\(33ppt%20%2D%2037ppt\)](https://www.noaa.gov/jetstream/ocean/sea-water#:~:text=Sea%20water%20salinity%20is%20expressed,liter%20(33ppt%20%2D%2037ppt)).
- [48] Y. Dou, D. Zhao, Z. Ouyang y M. A. E. Andersen, «Investigación y diseño de un sistema inalámbrico de transferencia de energía para vehículos submarinos autónomos,» en *Conferencia y Exposición de Electrónica de Potencia Aplicada IEEE 2019 (APEC)*, 2019, págs. 3144-3150. DOI: 10.1109/APEC.2019.8721879.
- [49] I. Casaucao, A. Linares y A. Triviño, «Coils Optimisation to Avoid Parasitic Capacitance Effects in an Inductive Wireless Charger for Underwater Vehicles,» *Electronics*, vol. 14, n.º 4, 2025, ISSN: 2079-9292. DOI: 10.3390/electronics14040654. dirección: <https://www.mdpi.com/2079-9292/14/4/654>.
- [50] L. Mingwei, Z. Feng y C. e. a. Yang, «Design of bidirectional power converters coupled with coils for wireless charging of AUV docking systems,» *J Mar Sci Technol*, vol. 27, págs. 873-886, 2022. DOI: 10.1007/s00773-022-00877-7.
- [51] A. Triviño, E. Villagrasa, F. Corti, G. M. Lozito y A. Reatti, «Effective Electrical Model of a Beverage Can as a Foreign Object in EV Wireless Charging,» *IEEE Access*, vol. 11, págs. 134887-134898, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3336942.
- [52] «ANSYS Maxwell,» ANSYS. (2025), dirección: <https://www.ansys.com/en-gb/products/electronics/ansys-maxwell>.
- [53] «MATLAB,» MathWorks. (2025), dirección: <https://es.mathworks.com/products/matlab.html>.
- [54] «App Designer,» MathWorks. (2025), dirección: <https://es.mathworks.com/products/matlab/app-designer.html>.
- [55] «Lithium-ion Battery (14.8V, 18Ah),» Blue Robotics. (), dirección: <https://bluerobotics.com/store/comm-control-power/powersupplies-batteries/battery-li-4s-18ah-r3/>.