

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

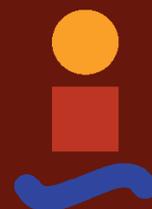
Sistema de carga para moto eléctrica de 2 kW basado  
en transferencia inalámbrica de potencia

Autor: Manuel Enrique García de la Rosa

Tutor: Pedro Luis Cruz Romero

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

Sevilla, 2020





Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Sistema de carga para moto eléctrica de 2 kW basado en transferencia inalámbrica de potencia**

Autor:

Manuel Enrique García de la Rosa

Tutor:

Pedro Luis Cruz Romero

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



Trabajo Fin de Grado: Sistema de carga para moto eléctrica de 2 kW basado en transferencia inalámbrica de potencia

Autor: Manuel Enrique García de la Rosa

Tutor: Pedro Luis Cruz Romero

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2020

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Me gustaría mencionar, en primer lugar, a la persona que más me ha animado y apoyado a lo largo de la consecución de este trabajo y en mi vida en general. Consigues que lo difícil sea mucho más fácil. Una gran parte de este TFG es gracias a ti, Mari Ángeles.

A mi madre, mi padre, mi abuela y mi hermano. Sustento en los momentos duros de mi etapa universitaria, y compañeros de alegría y felicidad en los buenos. Vuestro apoyo permanente ha sido unaparte básica en este trabajo y en mi camino personal.

A mis compañeros y amigos del equipo US Racing. El reto de diseñar y lograr la primera moto eléctrica de la historia del equipo ha sido un gran reservorio de experiencia en lo personal, engrandeciendo aún más mi amor por la movilidad eléctrica. Gracias por estos enormes años de ilusión y trabajo en equipo.

Quiero agradecer especialmente a Pedro Cruz. A pesar del gran reto que te planteé en la primera tutoría que tuvimos, no dudaste en apostar por este trabajo y comenzar a trabajar desde ese mismo día, así como seguir guiándome en tiempos de confinamiento.

Por último, quiero mostrar mi agradecimiento general a la Escuela Superior de Ingenieros, y a sus profesores. El paso por la ETSI no sólo me ha aportado conocimientos técnicos propios de un profesional de la ingeniería, si no que también me ha hecho crecer enormemente en lo personal.

*Manuel Enrique García de la Rosa*

*Sevilla, 2020*



# Resumen

---

Este trabajo tiene como finalidad diseñar un prototipo de cargador para una motocicleta eléctrica basado en transferencia inductiva de potencia. La pareja de bobinas, encargada del intercambio de energía, se construye en base a las medidas y características de la motocicleta del equipo universitario de US Racing. Teniendo en cuenta las condiciones de la batería y las necesidades de carga, se decide que la potencia de carga de diseño sea de 2 kW.

Para el diseño del cargador, se han creado diversas simulaciones en Matlab Simulink con el objetivo de relacionar los parámetros de las bobinas con las condiciones eléctricas del sistema. Se decide añadir resonancia en ambos terminales del cargador para mejorar las condiciones de carga.

Continuando con el diseño, se ha construido mediante Comsol Multiphysics 5.4 la pareja de bobinas que forman el cargador. Se ha realizado un conjunto de simulaciones para describir la relación entre la geometría de las bobinas y la resistencia e inductancia de estas.

Por último, teniendo diseñada la pareja de bobinas definitivas, se plantea un estudio sobre la incidencia que tiene el uso del cargador sobre la salud de las personas. Este estudio final sirve de apoyo de cara a las conclusiones del trabajo.



# Abstract

---

The purpose of this work is to design a prototype charger for an electric motorcycle based on inductive power transfer technology. The pair of coils, in charge of the energy exchange, is built based on the characteristics of the US Racing university team motorcycle. Considering the battery conditions and the charging needs, a 2 kW charging power is chosen.

To design the charger, various simulations are created in Matlab Simulink to relate the parameters of the coils with the electrical conditions of the system. It is decided to add resonance at both terminals of the charger to improve the charging conditions.

Continuing with the design, the pair of coils that make up the charger is built using Comsol Multiphysics 5.4. A set of simulations are performed to describe the relationship between the geometry of the inductors and their resistance and inductance.

Finally, having designed the final pair of coils, a study is proposed on the impact that the use of the charger has on people's health. This final study supports the conclusions of the work.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xvii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xix</b>
<b>Abreviaturas</b>	¡Error! Marcador no definido.
<b>Notación</b>	<b>xxv</b>
<b>1 Motivación y alcance</b>	<b>1</b>
<b>2 Introducción</b>	<b>3</b>
2.1 <i>El clima y el medio ambiente</i>	3
2.1.1 El cambio climático antropogénico	3
2.1.2 Evolución de la opinión científica	4
2.1.3 Políticas ambientales	5
2.1.4 Situación actual y futuro del clima	5
2.2 <i>Problemática asociada a los medios de transporte y posibles soluciones</i>	6
2.2.1 Gases de efecto invernadero y contaminación urbana	6
2.2.2 La movilidad eléctrica como solución	11
2.2.3 El vehículo compartido como solución	13
2.3 <i>El Proyecto Motostudent</i>	14
2.3.1 ¿Qué es?	14
2.3.2 Historia del equipo US Racing, actualidad y futuro	15
<b>3 Estado del arte</b>	<b>17</b>
3.1 <i>Historia de la carga inalámbrica</i>	17
3.2 <i>Modelos actuales en el mercado</i>	18
3.3 <i>Futuro y ventajas de la carga inalámbrica</i>	21
<b>4 Bases del diseño del cargador</b>	<b>23</b>
4.1 <i>Fundamentos de las bobinas acopladas</i>	23
4.2 <i>Necesidades de carga del sistema</i>	25
4.3 <i>Objetivos y pasos del estudio</i>	27
<b>5 Modelado y simulación del sistema en Matlab Simulink</b>	<b>29</b>
5.1 <i>Bloque de inductancia mutua y primera simulación</i>	29
5.1.1 Relación de las magnitudes eléctricas con la resistencia interna de las bobinas	31
5.1.2 Relación de las magnitudes eléctricas con la frecuencia, la inductancia y el acoplamiento	33
5.2 <i>Empleo de la resonancia para mejorar la transferencia inalámbrica de energía</i>	36
5.2.1 Concepto de resonancia en el ámbito eléctrico	36
5.2.2 La autorresonancia de una bobina	37
5.2.3 Sistema resonante escogido	39
5.2.4 Simulación del cargador con resonancia en Matlab y relación de las magnitudes eléctricas con	

la resistencia interna de las bobinas	41
5.2.5 Relación de las magnitudes eléctricas con la frecuencia, la inductancia y el acoplamiento	43
<b>6 Diseño de las bobinas en Comsol Multiphysics</b>	<b>53</b>
6.1 <i>Simulación de una bobina plana y circular</i>	54
6.1.1 Dependencia paramétrica de la resistencia interna	60
6.1.2 Dependencia paramétrica de la inductancia propia	61
6.2 <i>Simulación de una pareja de bobinas planas y circulares</i>	63
6.2.1 La inductancia mutua según la distancia entre bobinas	66
6.2.2 La inductancia mutua según el desalineamiento entre bobinas	69
6.2.3 Resultados obtenidos con la pareja de bobinas circulares	71
6.3 <i>Diseño final mejorado y adaptado a la motocicleta</i>	73
6.3.1 Mejora respecto a la distancia entre bobinas	76
6.3.2 Mejora respecto al desalineamiento entre bobinas	79
6.4 <i>Resultados finales</i>	83
6.5 <i>Estudio de incidencia sobre las personas</i>	85
<b>7 Conclusiones y líneas futuras</b>	<b>89</b>
<b>Referencias</b>	<b>91</b>

# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 2-1: Objetivos de reducción de emisiones de CO <sub>2</sub> para 2050 respecto a 1990 [6].	8
Tabla 4-1 Características de las celdas que conforman la batería	25
Tabla 6-1: Condiciones iniciales de diseño de las bobinas.	54
Tabla 6-2: Tabla de capacidad de corriente según el diámetro del conductor de cobre [53].	55
Tabla 6-3: Especificaciones de diseño de las bobinas circulares	71
Tabla 6-4: Valores de inductancias y acoplamientos obtenidos con las bobinas circulares	72
Tabla 6-5: Resultados del cargador con bobinas circulares	72
Tabla 6-6: Especificaciones de diseño de la bobina primaria mejorada.	83
Tabla 6-7: Especificaciones de diseño de la bobina secundaria mejorada.	83
Tabla 6-8: Valores de inductancias y acoplamientos obtenidos con las bobinas mejoradas.	84
Tabla 6-9: Resultados del cargador con bobinas mejoradas.	84
Tabla 6-10: Límites de campo magnético de baja frecuencia.	86



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

Figura 2-1: Emisiones de CO <sub>2</sub> por causas antropogénicas [2].	4
Figura 2-2: Aumento de la temperatura del planeta [5].	5
Figura 2-3: Emisiones de CO <sub>2</sub> del sector del transporte desde 1990 [10].	7
Figura 2-4: Emisiones de GEI por medio de transporte [10].	7
Figura 2-5: Concentración de NO <sub>2</sub> en la Península Ibérica [10].	8
Figura 2-6: Emisiones de motor gasolina y Diésel [10].	9
Figura 2-7: Descenso de la contaminación asociada al transporte desde el año 2000 [16].	10
Figura 2-8: Emisiones de CO <sub>2</sub> a lo largo de la vida de un vehículo según su tecnología [17]	11
Figura 2-9: Variación en el mercado de coches hasta 2030 y reducción de CO <sub>2</sub> lograda [17].	12
Figura 2-10: Equipos participantes en la competición Motostudent 2018.	14
Figura 2-11: Motocicleta de la V edición del equipo US Racing.	15
Figura 3-1: Carga inductiva aplicada a un teléfono móvil [24].	18
Figura 3-2: Sistema de carga inductiva estática en un vehículo [26].	19
Figura 3-3: Sistema de carga inductiva dinámica aplicado a un vehículo [32].	20
Figura 4-1: bobinas acopladas [36].	24
Figura 4-2: Esquema de bloques de sistema de transferencia inductiva [37].	26
Figura 4-3: Geometría de la bobina plana (a) y solenoide (b) [38].	27
Figura 5-1: Circuito equivalente de la inductancia mutua [39].	29
Figura 5-2: Esquema de bloques del sistema con bobinas acopladas.	30
Figura 5-3: Curva I-R característica de la batería.	31
Figura 5-4: Rendimiento del sistema con respecto a la resistencia interna de las bobinas.	32
Figura 5-5: Potencia del sistema con respecto a la resistencia interna de las bobinas	32
Figura 5-6: Relación entre el rendimiento y la frecuencia para L=300 μH.	33
Figura 5-7: Relación entre la potencia de carga y la frecuencia para L=300 μH.	33
Figura 5-8: Relación entre el factor de potencia a la entrada y la frecuencia para L=300 μH.	34
Figura 5-9: Relación entre el rendimiento y la frecuencia para L=100 μH.	34
Figura 5-10: Relación entre la potencia de carga y la frecuencia para L=100 μH.	34
Figura 5-11: Relación entre el factor de potencia a la entrada y la frecuencia para L=100 μH.	35
Figura 5-12: Ejemplo de circuito resonante serie	36
Figura 5-13: Circuito equivalente de una bobina real.	38
Figura 5-14: Impedancia de una bobina en autorresonancia.	38
Figura 5-15: Reactancia de una bobina en autorresonancia.	39
Figura 5-16: Sistema de transferencia resonante de potencia serie-serie.	39
Figura 5-17: Circuito resonante con bobinas acopladas como fuentes dependientes.	40
Figura 5-18: Circuito resonante con bobinas acopladas como fuentes dependientes 2.	41
Figura 5-19: Esquema de bloques del sistema con resonancia en Matlab Simulink.	42

Figura 5-20: Rendimiento del sistema con resonancia con respecto a la resistencia interna de las bobinas.	42
Figura 5-21: Potencia del sistema con resonancia con respecto a la resistencia interna de las bobinas	43
Figura 5-22: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	44
Figura 5-23: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	45
Figura 5-24: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	45
Figura 5-25: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	46
Figura 5-26: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=60\ \text{kHz}$ .	46
Figura 5-27: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=60\ \text{kHz}$ .	47
Figura 5-28: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=60\ \text{kHz}$ .	47
Figura 5-29: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con $L=200\ \mu\text{H}$ y $f_r=60\ \text{kHz}$ .	48
Figura 5-30: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=300\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	49
Figura 5-31: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con $L=300\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	49
Figura 5-32: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con $L=300\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	50
Figura 5-33: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con $L=300\ \mu\text{H}$ y $f_r=30\ \text{kHz}$ .	50
Figura 5-34: Esquema de bloques de sistema de carga completo con batería.	52
Figura 6-1: Ubicación de la bobina secundaria en la motocicleta.	53
Figura 6-2: Modelo de bobina circular y plana en dos dimensiones.	56
Figura 6-3: Malla de elementos finitos de la bobina circular y plana en dos dimensiones.	56
Figura 6-4: Densidad de corriente en el conductor a frecuencia de 20 kHz.	57
Figura 6-5: Densidad de corriente en el conductor a frecuencia de 100 kHz.	57
Figura 6-6: Modelo de bobina circular y plana en tres dimensiones.	58
Figura 6-7: Malla de elementos finitos de la bobina circular y plana en tres dimensiones.	59
Figura 6-8: Campo magnético alrededor de la bobina de estudio.	59
Figura 6-9: Relación entre la resistencia interna y la frecuencia del sistema.	60
Figura 6-10: Relación entre la resistencia interna y el número de vueltas.	61
Figura 6-11: Relación entre la inductancia propia y el número de vueltas.	62
Figura 6-12: Relación entre la inductancia propia y el radio interno.	63
Figura 6-13: Modelo de una pareja de bobinas circulares y planas en tres dimensiones.	64
Figura 6-14: Malla de elementos finitos de pareja de bobinas circulares y planas en tres dimensiones.	64
Figura 6-15: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas.	65
Figura 6-16: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas sobre el plano Y-Z.	65
Figura 6-17: Inductancia mutua según el número de vueltas de la bobina.	66
Figura 6-18: Modelo de una pareja de bobinas circulares y planas a 15 cm de distancia.	67
Figura 6-19: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas a 15 cm de distancia.	67
Figura 6-20: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas a 15 cm sobre el plano Y-Z.	68
Figura 6-21: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas.	68
Figura 6-22: Modelo de una pareja de bobinas circulares desplazadas 15 cm entre sí.	69
Figura 6-23: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas con 10 cm de desalineamiento.	70

Figura 6-24: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas con desalineamiento sobre el plano Y-Z.	70
Figura 6-25: Inductancia mutua según el desalineamiento entre las bobinas.	71
Figura 6-26: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas.	73
Figura 6-27: Malla de elementos finitos de pareja de bobinas mejoradas.	74
Figura 6-28: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas.	75
Figura 6-29: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas sobre el plano Y-Z.	75
Figura 6-30: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia.	76
Figura 6-31: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia.	77
Figura 6-32: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia sobre el plano Y-Z.	77
Figura 6-33: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas mejoradas.	78
Figura 6-34: Caída de inductancia mutua de ambos casos respecto la distancia.	78
Figura 6-35: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento en el eje mayor.	79
Figura 6-36: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento en el eje menor.	80
Figura 6-37: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento.	80
Figura 6-38: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento sobre el plano Y-Z.	81
Figura 6-39: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas mejoradas.	81
Figura 6-40: Caída de inductancia mutua de ambos casos respecto el desalineamiento.	82
Figura 6-41: Modelo de estudio sobre la salud en las personas.	86
Figura 6-42: Malla de elementos finitos de estudio de salud sobre las personas.	87
Figura 6-43: Incidencia de flujo magnético sobre una pierna humana a 25 cm de distancia.	87



# Siglas y acrónimos

---

RAE	Real Academia Española
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
OMM	Organización Meteorológica Mundial
PIB	Producto Interior Bruto
GEI	Gases de Efecto Invernadero
BEV	Battery Electric Vehicle
FCEV	Full Cell Electric Vehicle
PMSM	Permanent Magnet Synchronous Machine
WPC	Wireless Power Consortium
V2G	Vehicle to Grid
IPT	Inductive Power Transfer
RIPT	Resonant Inductive Power Transfer
SAE	Society of Automotive Engineers
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection



$L_1$	Inductancia propia de la bobina primaria [H]
$L_2$	Inductancia propia de la bobina secundaria [H]
$M$	Inductancia mutua entre las bobinas [H]
$r_1$	Resistencia interna de la bobina primaria [ $\Omega$ ]
$r_2$	Resistencia interna de la bobina secundaria [ $\Omega$ ]
$f$	Frecuencia del sistema [Hz]
$C_1$	Condensador del circuito primario [F]
$C_2$	Condensador del circuito secundario [F]
$k$	Coefficiente de acoplamiento entre bobinas
$Q$	Factor de calidad de la bobina
$E$	Campo eléctrico [V/m]
$J$	Densidad de corriente [ $A/m^2$ ]
$B$	Densidad de flujo magnético [T]
$\Phi$	Flujo magnético [Wb]
$\varepsilon$	Fuerza electromotriz inducida [V]
$N$	Número de vueltas de la bobina
$f_r$	Frecuencia de resonancia del sistema [Hz]
$n$	Coefficiente de relación entre primario y secundario de las bobinas acopladas
$\eta$	Rendimiento del cargador
$P_e$	Potencia de entrada [W]
$P_L$	Potencia de carga [W]
$R_L$	Resistencia de carga [ $\Omega$ ]
$Q_e$	Potencia reactiva de entrada [var]
$S_e$	Potencia aparente de entrada [VA]
$\cos(\varphi_e)$	Factor de potencia a la entrada
$\delta$	Profundidad del efecto pelicular [m]
$\sigma$	Conductividad eléctrica [S/m]
$\mu$	Permeabilidad magnética [H/m]
$l$	Longitud de la bobina [m]
$R_e$	Radio externo de la bobina [m]
$R_i$	Radio interno de la bobina [m]
$d_c$	Distancia entre conductores [m]
$d$	Diámetro del conductor [m]
$dis$	Distancia vertical entre bobinas [m]
$des$	Desalineamiento horizontal entre bobinas [m]

$\theta$	Ángulo entre bobinas [rad]
$I_e$	Corriente de entrada [A]
$I_L$	Corriente de carga [A]
$V_L$	Tensión de carga [V]

# 1 MOTIVACIÓN Y ALCANCE

---

*Existe una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: la voluntad.*

*- Albert Einstein -*

La movilidad eléctrica es una de las áreas de la ingeniería eléctrica que más está evolucionando en la actualidad. Cada vez es más habitual ver coches y motocicletas eléctricas en las ciudades, así como nuevos medios de transporte como los patinetes urbanos.

El problema del calentamiento global y la contaminación de las ciudades está impulsando este cambio de tendencia. Gran parte de los avances tecnológicos e industriales del ser humano en los últimos siglos no se ha visto influido por las consecuencias de estos en el planeta, resultando esto en el Cambio climático que se comienza a apreciar en nuestros días.

La motivación de este trabajo reside en buscar nuevos avances tecnológicos que ayuden en la lucha contra el calentamiento global y la contaminación urbana que sufre el planeta en la actualidad. Dado esto, en la introducción de este trabajo se trata el problema actual del Cambio climático, estudiando la implicación del sector del transporte en las emisiones tanto en la contaminación urbana como a nivel global, analizando el papel del vehículo eléctrico en la mejora de la situación y sus consecuencias en el futuro, y tratando otras posibles soluciones al problema.

La finalidad de este trabajo es diseñar un sistema de transferencia de carga inalámbrica, con el que cargar la batería de una motocicleta eléctrica. El diseño se basa en la construcción, mediante software de elementos finitos, de una pareja de bobinas, estando estos a distancia a través del aire, sin conexión eléctrica. De esta manera, se pretende impulsar el desarrollo de esta tecnología para la carga de vehículos eléctricos. Más concretamente, esta forma de carga se está comenzando a desarrollar en coches, pero su inclusión en motos es aún escasa. Por ello, se quiere comprobar mediante este estudio si la transferencia inalámbrica de potencia es una tecnología aplicable para cargar una motocicleta eléctrica.

Por último, en cuanto al alcance de este estudio, se trata la implementación del cargador inalámbrico en dos ámbitos diferentes. En primer lugar, las bobinas se diseñan y construyen en base a las medidas de la motocicleta eléctrica de competición del equipo universitario US Racing. Por otro lado, se estudia si las bobinas pudieran ser empleadas en las motocicletas eléctricas compartidas que se encuentran en las calles de las ciudades, con el fin de ser cargadas mientras estén aparcadas sin ser usadas.



# 2 INTRODUCCIÓN

---

*¿Qué mayor rechazo a aquellos que quisieran acabar  
con nuestro mundo que unir nuestros mejores esfuerzos  
para salvarlo?*

*- Barack Obama -*

## 2.1 El clima y el medio ambiente

Según la RAE, el clima es: “el conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región”. Las condiciones de vida en nuestro planeta, tanto de los seres humanos como de los demás seres vivos, así como el medio ambiente que nos rodea, están fuertemente relacionadas con dichas condiciones climáticas.

El estado de las condiciones terrestres no ha sido constante a lo largo de la historia. Por el contrario, nuestro planeta ha sufrido diferentes etapas de calentamiento y enfriamiento generalizado. Son diversos los factores naturales que han sido culpables de estos cambios, entre los cuales se incluye las alteraciones en la rotación terrestre, las variaciones en la radiación solar, y erupciones volcánicas entre otros [1]. Principalmente, el factor que más ha influido en la temperatura global media es la concentración de dióxido de carbono en el aire.

### 2.1.1 El cambio climático antropogénico

La característica común de las alteraciones previamente referidas a lo largo de la vida de nuestro planeta es la lenta inercia temporal con la que han sucedido. Las variaciones históricas en el clima debidas a causas naturales han ocurrido siempre de forma gradual y paulatina. En cambio, esta estabilidad se ha quebrado manifiestamente en las últimas décadas, observándose un calentamiento terrestre generalizado, con una celeridad nunca conocida. Esta coyuntura ha coincidido con el auge de la civilización a lo largo de la geografía mundial, hecho por el cual, se le ha denominado a este proceso acelerado como cambio climático antropogénico.

Son diversas las causas relacionadas con las últimas etapas de desarrollo del ser humano: los procesos de combustión en los que se han basado la generación de energía y el transporte, la deforestación de bosques, el desarrollo de la ganadería, el uso de fertilizantes nitrogenados y el brusco aumento de la población mundial, entre otros muchos factores [2]. Todas estas han producido efectos similares: un excepcional aumento en las emisiones de gases de efecto invernadero, tales como CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y CH<sub>4</sub>. La concentración atmosférica de dióxido de carbono alcanza récord absoluto anualmente, llegando hasta las 415.26 ppm este mismo año.

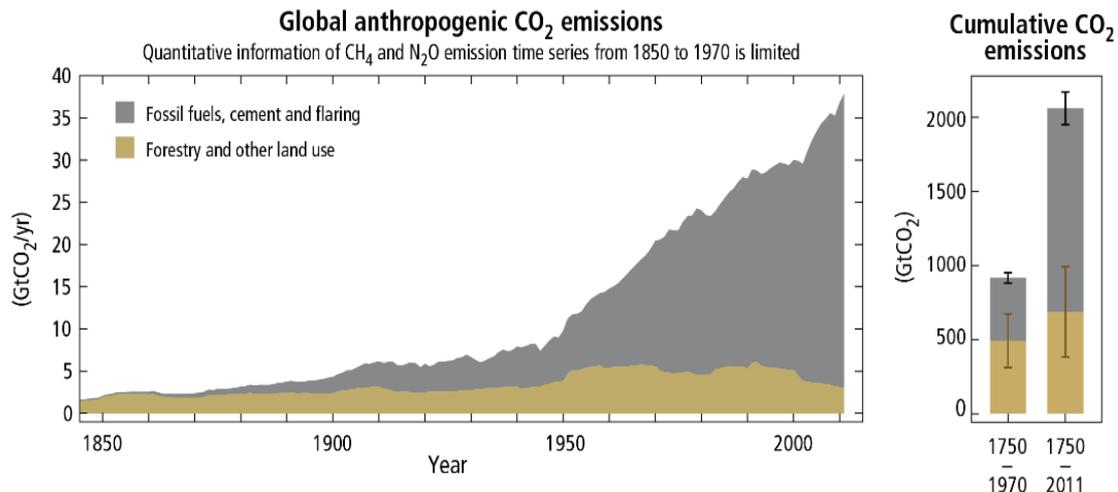


Figura 2-1: Emisiones de CO<sub>2</sub> por causas antropogénicas [2].

### 2.1.2 Evolución de la opinión científica

Las variaciones en las condiciones ambientales, así como los efectos que esta tiene sobre los seres humanos, ha sido objeto de estudio por parte de la comunidad científica a lo largo de los últimos tiempos. Uno de los pioneros en dicho ámbito fue Svante Arrhenius, el cual fue uno de los primeros en percatarse de la relación entre la temperatura ambiental y la concentración atmosférica de CO<sub>2</sub>, plasmado en sus estudios a finales del siglo XIX.

El comienzo de la preocupación científica general en este tema se produjo a partir de la segunda mitad del siglo XX, cuando se comenzó a encontrar evidencias sobre el aumento en la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera terrestre [3].

No obstante, el consenso científico respecto al cambio climático estaba aún lejos de alcanzarse. El nivel de discrepancia en la comunidad fue tal, que existieron, principalmente durante los años setenta, dos corrientes principales y contrarias sobre lo que estaba aconteciendo en el planeta: se debatía sobre la existencia de un calentamiento o un enfriamiento global. La idea del descenso térmico, aun siendo de opinión científica minoritaria, logró tener impacto en la opinión pública, por el infundio de parte de la prensa de la época [4].

La idea del enfriamiento global fue desvaneciéndose en los años posteriores, en base a los últimos experimentos científicos. Se descubrieron nuevos gases de efecto invernadero más allá de los ya conocidos, los clorofluorocarbonos (CFC), los cuales fueron también uno de los principales causantes del agujero de la capa de ozono. En la época reciente, existe un consenso científico generalizado en torno a la idea de calentamiento global, y se ha creado una conciencia colectiva con el pensamiento de combatir los orígenes del problema.

Una buena medida de la unificación actual de la comunidad científica en torno al calentamiento global es la similitud de los datos obtenidos en cuanto al aumento de la temperatura media del planeta a lo largo del último siglo por parte de 5 de las instituciones científicas con más relevancia en el tema, mostrados en la Figura 2-2.

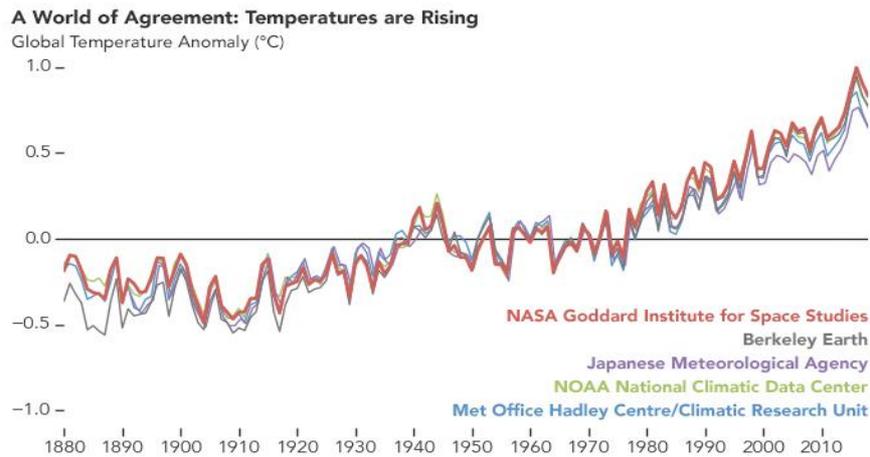


Figura 2-2: Aumento de la temperatura del planeta [5].

### 2.1.3 Políticas ambientales

La postura de acuerdo científico mayoritario alcanzado a finales de siglo, unido a las evidencias del calentamiento global, produjo que el asunto del cambio climático dejara de tener lugar en el ámbito meramente científico para convertirse en una cuestión de gran relevancia a nivel político y social.

El primer logro gubernamental con respecto a la cuestión fue la creación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio climático (IPCC), creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) en conjunto con el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). El IPCC es una institución de carácter científico-político, cuyo objetivo es dar a conocer la veracidad de las bases físicas, el impacto y la mitigación del cambio en el clima, estudiando y analizando las diversas investigaciones científicas sobre el tema.

Hoy en día, el número de países que forman parte del IPCC es de 195. Desde su fundación, el grupo de expertos ha redactado 5 informes de evaluación periódicos, siendo el último de estos el quinto informe de evaluación, a finales de 2014. Además, ha preparado diversos informes especiales, entre los que destaca el último de ellos, que trata sobre los impactos que tendría un calentamiento global de 1.5°C por encima de la época preindustrial.

En paralelo con el IPCC, surgió en 1992 la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio climático, con el fin de actuar de manera efectiva sobre los orígenes del calentamiento global, desde una perspectiva política común entre los países integrantes. Los hitos más significativos de este grupo son la consecución del Protocolo de Kioto, en 1997, y el Acuerdo de París, en 2015, ambos políticamente vinculantes por los países firmantes [6].

Anualmente, el órgano superior de la Convención se reúne, en la denominada Conferencias de las Partes, en la que se evalúan las medidas adoptadas por los distintos países y sus efectos, así como los progresos globales en materia de Cambio climático. La última cumbre del clima se ha dado cita en Madrid en diciembre de 2019.

### 2.1.4 Situación actual y futuro del clima

Hoy en día, la mayor parte de la población mundial es consciente de la magnitud del problema ambiental de nuestro planeta. La situación climática se ha convertido en una cuestión universal, siendo tratada por científicos, políticos y medios de comunicación. Existe una preocupación general sobre los efectos que el calentamiento puede causar, y las medidas, tanto individuales como colectivas, que son necesarias para paliar la situación. Es un hecho, por tanto, que el Cambio climático es uno de los asuntos más relevantes y mediáticos en la actualidad.

El Calentamiento global, al nivel que ha llegado, está ocasionando desastres y catástrofes a lo largo de la geografía mundial. Sus efectos se han multiplicado en los últimos años, lejos de reducirse. Se ha acelerado el

incremento del nivel del mar. 18 de los 19 años más calurosos en la historia global ha sucedido desde 2001. Se ha incrementado la rapidez de reducción de hielo en el Ártico, y en la extensión de la Antártida y Groenlandia. El calentamiento de los océanos alcanza máximos históricos, ocasionando una reducción en la concentración de oxígeno, y se tiene mayor constancia de fenómenos meteorológicos extremos, y suceden con mayor devastación. [7]

Hoy en día, la temperatura media global ha aumentado 0.8°C, y se ha argumentado que un incremento de 1.5°C es el límite más seguro para el planeta, y se ha tomado un umbral máximo de 2°C antes de que el problema se agrave irremediablemente para el año 2100. No obstante, la situación actual puede ser todavía mucho más catastrófica si no se logra paliar los efectos en los próximos años. Según los últimos estudios, se apunta a que la fecha límite para evitar una futura catástrofe global es el año 2030.

Con las políticas implantadas actualmente, se tendría un aumento de temperatura de 3.6°C, además, si los estados no actúan respecto al problema, aumentaría la temperatura media global 4.5°C, triplicando el límite de estabilidad fijado en este siglo. Incluso si los países acatan y aplican las medidas del acuerdo de París del pasado 2015, el aumento de temperatura sería de 2.7°C, por encima del límite propuesto [8].

## 2.2 Problemática asociada a los medios de transporte y posibles soluciones

Anteriormente, se ha tratado la problemática actual del clima en su conjunto, sin profundizar en las distintas causas que lo vienen provocando a lo largo de los últimos tiempos. No obstante, en adelante, este estudio se centra en el transporte y la movilidad. Se trata los distintos problemas relacionados con el transporte, dando especial importancia a su grado de implicación en la contaminación y el Calentamiento global.

En la actualidad, el sector del transporte es uno de los más relevantes para la sociedad. A diario, se producen millones de desplazamientos a lo largo de la geografía mundial, tanto de personas, como de materias primas y productos. Actos tan cotidianos como ir a estudiar o al trabajo, el servicio postal o de paquetería o los viajes están basados en la actividad de los distintos medios disponibles. Se estima que las necesidades del sector se vean incrementadas hasta el año 2050. Según la Comisión Europea, las necesidades de movilidad de mercancías aumenten un 60%, mientras que las de movilidad de pasajeros lo hará un 40%.

Además, La industria del transporte no sólo es básica desde el punto de vista de comunidad, sino que es uno de los mayores motores de la economía, tanto en España como en Europa. El sector representa el 5 % del PIB de la Unión Europea, siendo un gran pilar en cuanto al empleo, con más de 11 millones de trabajadores. Con respecto a la economía española, el peso de esta industria es mayor. Su actividad representa el 10 % del PIB, y en torno al 20% de las exportaciones. España es el segundo país europeo, y el octavo mundial en fabricación de turismos, dando este sector empleo al 9% de la población activa del país [9].

### 2.2.1 Gases de efecto invernadero y contaminación urbana

Asociado al sector transportista, existen dos problemas medioambientales diferentes. Por un lado, los distintos medios de transporte constituyen una importante fuente de emisiones de gases de efecto invernadero, principalmente de CO<sub>2</sub>, contribuyendo al cambio climático global. Por el otro, el sector es uno de los principales culpables de la contaminación en las áreas metropolitanas de las grandes ciudades, por ser emisor de gases nocivos como los NO<sub>x</sub>.

#### 2.2.1.1 Contribución del transporte al Calentamiento global

En Europa, el sector del transporte tiene un peso del 21% del total de las emisiones de efecto invernadero a nivel europeo, siendo el segundo mayor productor. El 94% de dichas emisiones fueron producidas por vehículos por carretera. Profundizando en la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en Europa a lo largo de las últimas décadas, el total de emisiones ha ido descendiendo paulatinamente, mientras que las emisiones ocasionadas por los medios de transporte que se ha visto aumentada, siendo el único de todos los sectores que no ha reducido sus producciones. Se ha pasado de una proporción de 19% a principios de la década de 1990 al 21 % de la actualidad. [10].

En cuanto a España, el transporte es el causante del 30.3 % del total de emisiones de efecto invernadero, siendo el principal agente productor. Con respecto a la evolución en las últimas décadas, las emisiones del

sector se han incrementado un 45.6 % desde 1990, siendo el transporte por carretera el principal culpable [10].



Figura 2-3: Emisiones de CO<sub>2</sub> del sector del transporte desde 1990 [10].

Uno de los factores que ha propiciado la disminución de los gases de efecto invernadero ha sido la crisis económica de 2008. No obstante, en lo referente a la movilidad, su actividad no se vio influenciada por dicho evento económico, con lo que sus emisiones siguieron en aumento, ya que las personas necesitaban de transporte sin depender si la situación económica.

En cuanto a los distintos medios de transporte de los que se dispone actualmente, no todos contribuyen de igual forma ni proporción al Calentamiento global. El medio de transporte más emisor es el avión, con 285 gramos de CO<sub>2</sub> por pasajero y kilómetro. En cuanto al coche, basado en motor de combustión, sus emisiones por pasajero y kilómetro son aproximadamente un tercio que, en el caso del avión, 104 gramos de CO<sub>2</sub>. El medio de transporte menos contaminante de la actualidad es el tren, con 14 gramos de CO<sub>2</sub> por pasajero y kilómetro, 20 veces menos que el avión. [10]

Sin embargo, los turismos son los máximos responsables de las emisiones atmosféricas, debido a que son el medio de transporte más empleado:



Figura 2-4: Emisiones de GEI por medios de transporte [10].

En España, la mayor cantidad de emisiones se produce en las grandes ciudades metropolitanas. La gran concentración de turismos y la necesidad de desplazamiento a lo largo de la zona urbana y la periferia hace que

la producción de gases de efecto invernadero sea muy elevada. Las 6 áreas metropolitanas españolas (Madrid, Barcelona, Valencia, Sevilla, Málaga y Bilbao) son responsables del 43.7% del total de emisiones a causa de turismos del país [11]. La falta de alternativas, como el transporte público o el transporte de empresa, y el alto grado de carbonización de los vehículos actuales, son causa directa de estos altos niveles.

Para cumplir los objetivos fijados en el Acuerdo de París, la reducción de carbonización en el campo de la movilidad es fundamental. Se ha ideado una hoja de ruta para ir reduciendo las emisiones paulatinamente hasta la mitad de siglo:

Tabla 2-1: Objetivos de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> para 2050 respecto a 1990 [6].

Medio	2020	2030	2050
Transporte (sin aviación ni marítimo)	+ 30%	+20 a -9%	-54 a -67%

### 2.2.1.2 Contaminación asociada al transporte

Más allá de los efectos globales de la actividad del transporte con respecto al Cambio climático, esta produce también impactos dañinos a nivel local. Hoy en día, el empleo de medios de movilidad basados en motores de combustión ha producido que los niveles de contaminación de las principales urbes a lo largo del mundo aumenten drásticamente. La combustión incompleta de los vehículos origina compuestos más allá del CO<sub>2</sub>. A nivel europeo, este sector es el responsable del 50% del total de emisiones de partículas sólidas y del 60% de la producción de NO<sub>2</sub>, siendo el origen principal de ambas sustancias [9].

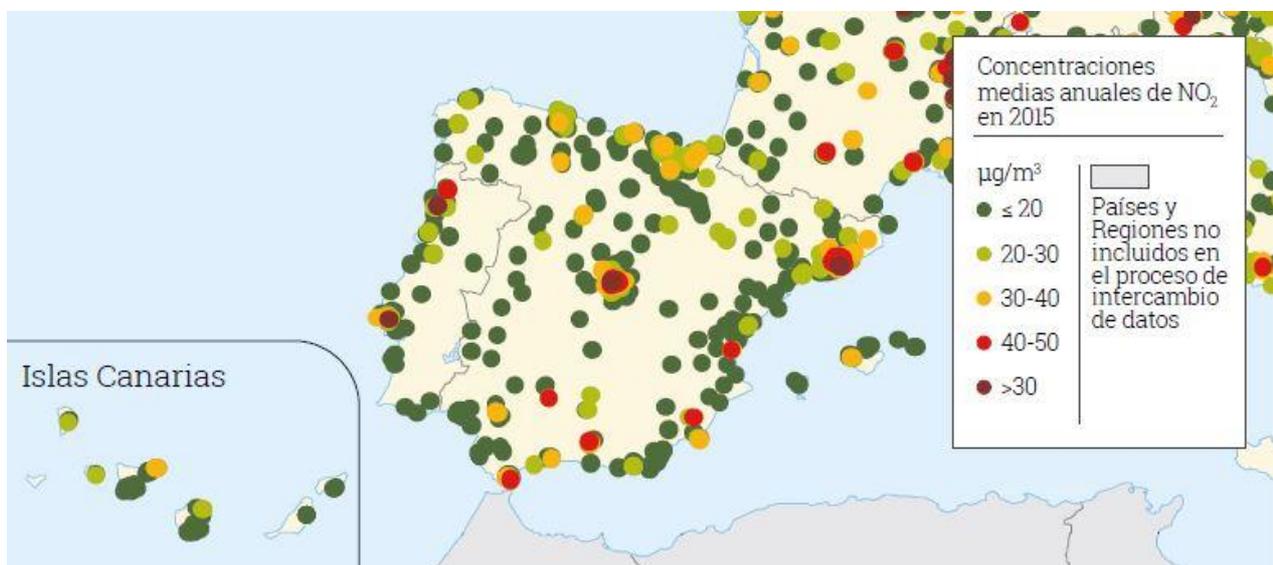


Figura 2-5: Concentración de NO<sub>2</sub> en la Península Ibérica [10].

Las grandes ciudades y áreas metropolitanas son las que más sufren los efectos de la contaminación atmosférica. Las causas son la alta densidad de población, la necesidad de usar vehículo para transportarse a diario, y la falta de alternativas no contaminantes, como, por ejemplo, la incursión de la movilidad eléctrica. El 90% de la población de ciudades de la Unión Europea convive con niveles de contaminación peligrosos para la salud. En la Península Ibérica, las 3 ciudades con mayor población, Madrid, Barcelona y Lisboa, son las que tienen mayor concentración de estos agentes contaminantes.

Entre estos compuestos, encontramos sustancias que son contaminantes y afectan a la salud de los habitantes, y otras que no lo son. Entre las que no afectan a los humanos, se encuentra el  $N_2$  y el vapor de agua, mientras que las que afectan son, entre otras, los óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ), el monóxido de carbono y las distintas partículas sólidas.

Cada día se tienen más evidencias del peligro que supone para la salud estar expuesto a estos compuestos contaminantes, incluso en bajas concentraciones. La contaminación a causa de estos agentes origina 8.8 millones de muertes en el mundo, y 800.000 solamente en Europa. Respirar aire contaminado es la primera causa de fallecimiento prematuro a nivel mundial, habiendo superado recientemente al tabaco. Este estado afecta en mayor grado a las enfermedades cardiovasculares, estando hasta el 80% de los casos de fallecimiento prematuro por contaminación relacionados con dichas enfermedades [12].

Convivir con el ambiente contaminado supone para los europeos perder 2.2 años de esperanza de vida. De entre todos los agentes contaminantes, últimamente el que se ha encontrado mayor constancia de peligrosidad son las partículas finas menores de  $2.5 \mu m$  de diámetro, pues se incrustan en el interior de los pulmones, en los alveolos, pasando al torrente sanguíneo. Pueden causar diabetes, hipertensión arterial, distintos tipos de cáncer e incluso infartos [12].

En los últimos años se ha puesto en evidencia un nuevo problema en este aspecto. Se encontró que el vehículo basado en motor Diésel tenía menores emisiones de efecto invernadero que el de gasolina. Este hecho, unido a que el coche de gasolina resultaba más caro, hizo que las ventas de coches Diésel superara ampliamente a los de gasolina durante las dos últimas décadas. No obstante, se ha descubierto recientemente que los motores Diésel producen más contaminantes perjudiciales para la salud, principalmente, las citadas partículas sólidas.

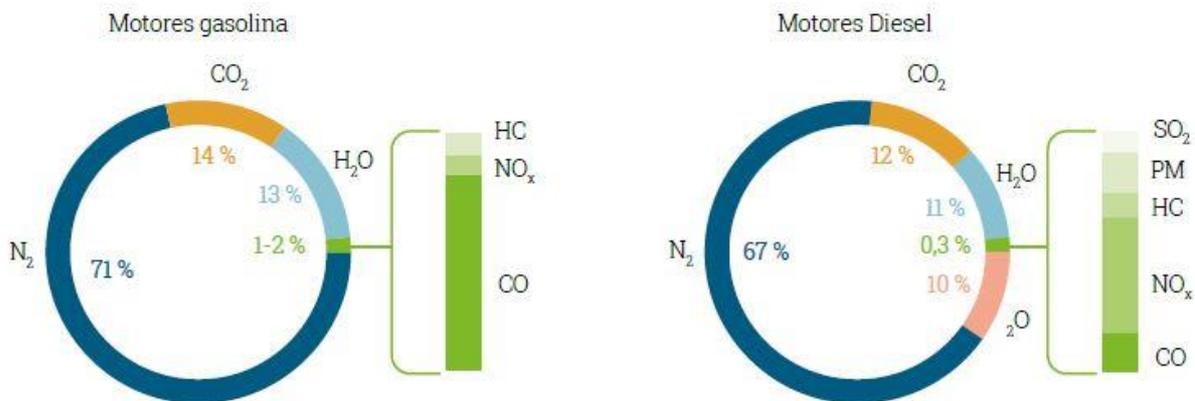


Figura 2-6: Emisiones de motor gasolina y Diésel [10].

Según los últimos datos del sector, los vehículos Diésel han reducido su cuota de mercado de un 42% al 29% actual, en gran parte a causa de la fuerte penetración en la opinión pública de la peligrosidad de estos. No obstante, Los coches basados en tecnología de combustión siguen copando el 89% del sector. Si se pretende reducir las emisiones contaminantes en la ciudad, la consigna está clara: reducir el peso de los motores de combustión del transporte urbano, apostando por medios de transporte limpios y no perjudiciales para la salud humana: los vehículos eléctricos.

### 2.2.1.3 Medidas para solventar el problema de la movilidad

A pesar de que en los últimos años se hayan descubierto nuevos efectos y consecuencias más específicas sobre cómo afecta la emisión de compuestos asociados a la movilidad, tanto a nivel global como local, desde finales del siglo pasado ya se tenía conocimiento sobre los peligros de estas emisiones. No obstante, el problema del transporte estaba muy lejos de resolverse. Se empezaron a buscar alternativas a los combustibles tradicionales, se comenzaron a realizar estudios para entender la profundidad del asunto y la relación con la salud, y se comenzó a trabajar en mejorar las tecnologías de propulsión de los vehículos.

La primera medida a nivel europeo vino en 1987, con la directiva 88/77/CE de la Comisión Europea, cuyas futuras modificaciones darían lugar a las actuales normas Euro. Estas directivas limitan la cantidad máxima de emisiones que puede generar cualquier tipo de vehículo que se adquiera, y es de obligado cumplimiento para todos los vehículos que se saquen al mercado a partir de la aplicación de esta.

La primera de esta serie de normas, la Euro 1, entró en vigor en el año 1992. Desde entonces, cada ciertos años se ha ido actualizando la misma, hasta llegar a la Euro 6 actual, en vigor desde 2014. Se prevé que en el próximo 2020, la norma se actualice a la nueva Euro 7. Con cada actualización, la normativa se ha ido endureciendo, con el fin de reducir emisiones, tanto de gases de efecto invernadero como de agentes contaminantes. [13]

Más allá de las acciones de organismos gubernamentales, como los mencionados previamente por parte de la Comisión Europea, a lo largo de los últimos años se han ido ideando y poniendo en marcha distintos planes anticontaminación en grandes ciudades del planeta, con el objetivo de reducir los niveles de contaminación ambientales.

Una de las primeras ciudades españolas en acometer una acción local de estas características fue Sevilla, con su denominado como “plan Centro”, en el año 2010. La medida consistía en regular el tiempo máximo que un vehículo podía estar en el interior del centro de la capital en 45 minutos, controlando las salidas y entradas de estos mediante 21 cámaras. A pesar de que la medida fue socialmente muy discutida, se logró una reducción de contaminación de un 48.5% [14]. Finalmente, el plan fue cancelado en 2011.

El último gran plan interurbano de limitación de transporte fue el acometido por la ciudad de Madrid a finales de 2018, el denominado “Madrid Central”. Tuvo un gran éxito en cuanto a la reducción de contaminación en el centro de la capital, disminuyendo la concentración de NO<sub>2</sub> en un 40% en tan sólo unos meses de ejecución, consiguiendo así ser el 2019 el año con menor concentración atmosférica de dicho agente en la última década [15].

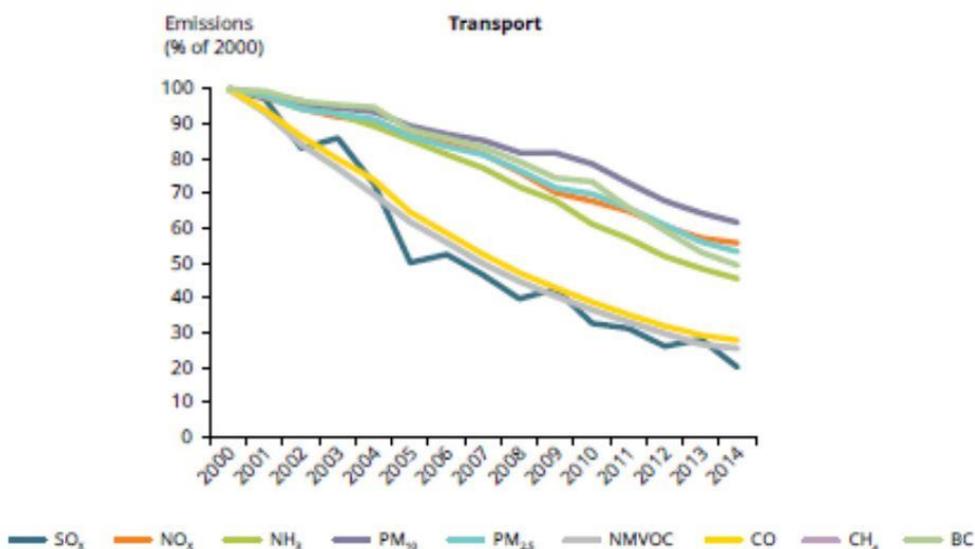


Figura 2-7: Descenso de la contaminación asociada al transporte desde el año 2000 [16].

Gracias a estas medidas, y a diferencia de lo que ha ocurrido con la emisión de gases de efecto invernadero, las emisiones de agentes contaminantes a causa de la movilidad se ha reducido imparablemente los últimos años.

## 2.2.2 La movilidad eléctrica como solución

Con la finalidad de superar el problema del calentamiento global y de las emisiones contaminantes en las zonas urbanas, es necesaria una transición ecológica que sea capaz de romper con la tendencia de las últimas décadas. Uno de los pilares donde más debe profundizar esta evolución es en el ámbito el transporte. En este aspecto, la movilidad eléctrica es la gran candidata para convertirse en la solución a la problemática previamente descrita.

La electrificación del transporte no es simplemente una solución propuesta para el futuro, sino que, ya en el presente, se está produciendo un cambio de tendencia a nivel global en torno al mismo. No obstante, hoy en día el cambio se está produciendo aún de forma paulatina, donde los vehículos híbridos e híbridos enchufables están copando mercado previamente perteneciente al vehículo puramente de combustión interna. Esto está suponiendo un gran ahorro de emisiones de gases de efecto invernadero a nivel global, ya que los vehículos híbridos emiten menor cantidad de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que los basados en motor de combustión interna:

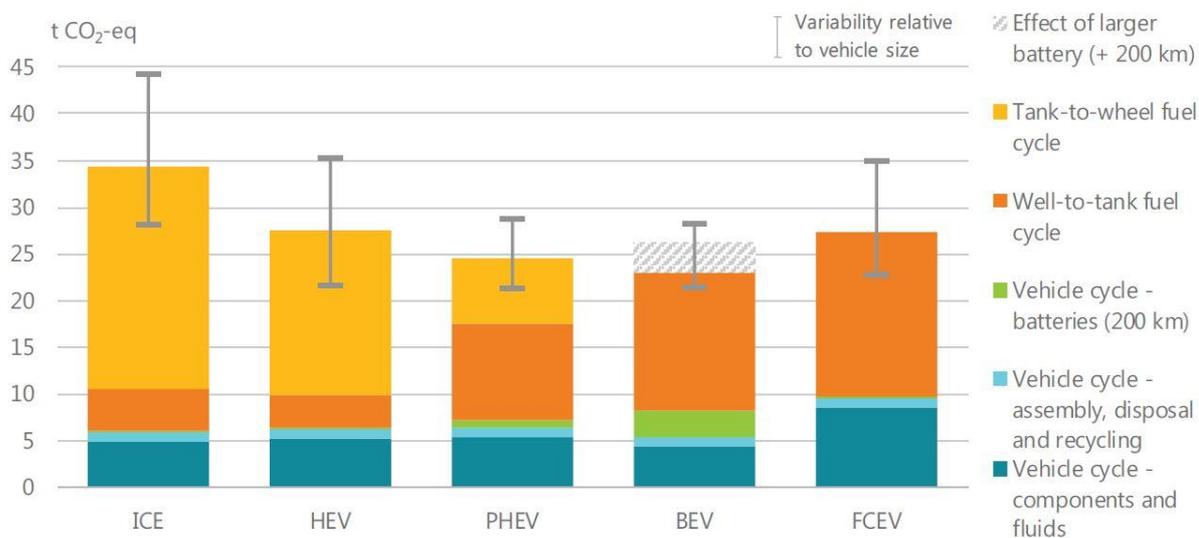


Figura 2-8: Emisiones de CO<sub>2</sub> a lo largo de la vida de un vehículo según su tecnología [17]

En la Figura 2-8 se observa como, a mayor electrificación de la flota, menor rango de emisiones de efecto invernadero se tiene. Además, las emisiones de CO<sub>2</sub> asociada a los vehículos de hidrógeno (FCEV) son mayores que en el caso de los vehículos eléctricos a batería (BEV), a causa del gasto energético necesario para conseguir el hidrógeno. De esta manera, el vehículo eléctrico basado en celdas de batería es el que logra la menor cantidad de CO<sub>2</sub> a lo largo de su vida útil y fabricación.

Sin embargo, este rango de emisiones de gases de efecto invernadero aún es susceptible de ser reducido. El volumen de emisiones de un vehículo eléctrico está directamente vinculado con el mix energético del país donde se cargue, pues la mayor parte del CO<sub>2</sub> es producido en la generación de la energía eléctrica que se almacena en la batería. Es indispensable la transición hacia energías bajas en estas emisiones, para reducir los niveles de CO<sub>2</sub> asociados al ciclo de la movilidad eléctrica, como las energías renovables o las centrales nucleares.

Mas allá de los gases de efecto invernadero, la transición hacia la movilidad eléctrica resulta ser la mejor solución al problema de la contaminación urbana. La mayor fuente de agentes contaminantes proviene del tubo de escape de los vehículos de combustión. Mientras que los basados en motor eléctrico carecen de tubo de escape, y por tanto de ningún tipo de emisiones asociadas al funcionamiento en conducción. Además, el coche eléctrico conlleva una reducción del ruido en las ciudades asociado al transporte, tiene mayor fiabilidad que un vehículo de combustión (por el menor número de componentes), tiene un coste asociado a la vida total del vehículo 4 veces menor (2 €/100 km el eléctrico vs 8 €/100 km el de combustión) y una eficiencia energética tres veces superior [18].

Hoy, existen numerosos modelos de vehículos eléctricos en el mercado, tanto de coches como de motocicletas. La autonomía de los coches eléctricos ronda en torno a los 300 km de media, mientras que los ciclomotores y motocicletas poseen una autonomía media de hasta 160 km [18]. El paso a la movilidad eléctrica también es apreciable en otros medios de transporte como autobuses, barcos, camiones e incluso aviones.

Las grandes empresas automovilísticas están apostando decididamente por la transición hacia el transporte electrificado. Además, los campeonatos mundiales de motociclismo y automovilismo tienen categorías basadas en tecnología 100% eléctrica, estos son la Moto e y la Formula e, logrando cada vez mayor relevancia tanto a nivel de marcas que compiten como a nivel de audiencia y seguimiento por parte de los espectadores.

La flota de coches eléctricos superó los 5 millones de modelos en 2018, con más de 2 millones de unidades vendidas en ese mismo año. China es el país con mayor penetración de este tipo de tecnología, vendiéndose allí casi 2 de cada 3 coches eléctricos a nivel mundial. Europa y Estados Unidos se reparten prácticamente el otro tercio del total, con entorno a 400 mil coches eléctricos cada uno. En cuanto a los vehículos eléctricos de dos y tres ruedas, el mercado global ha superado los 300 millones de unidades a final del 2018, siendo de nuevo China el país con mayor peso a nivel mundial, teniendo el 99% del total de vehículos eléctricos de dos y tres ruedas del mundo, principalmente motocicletas y bicicletas [17].

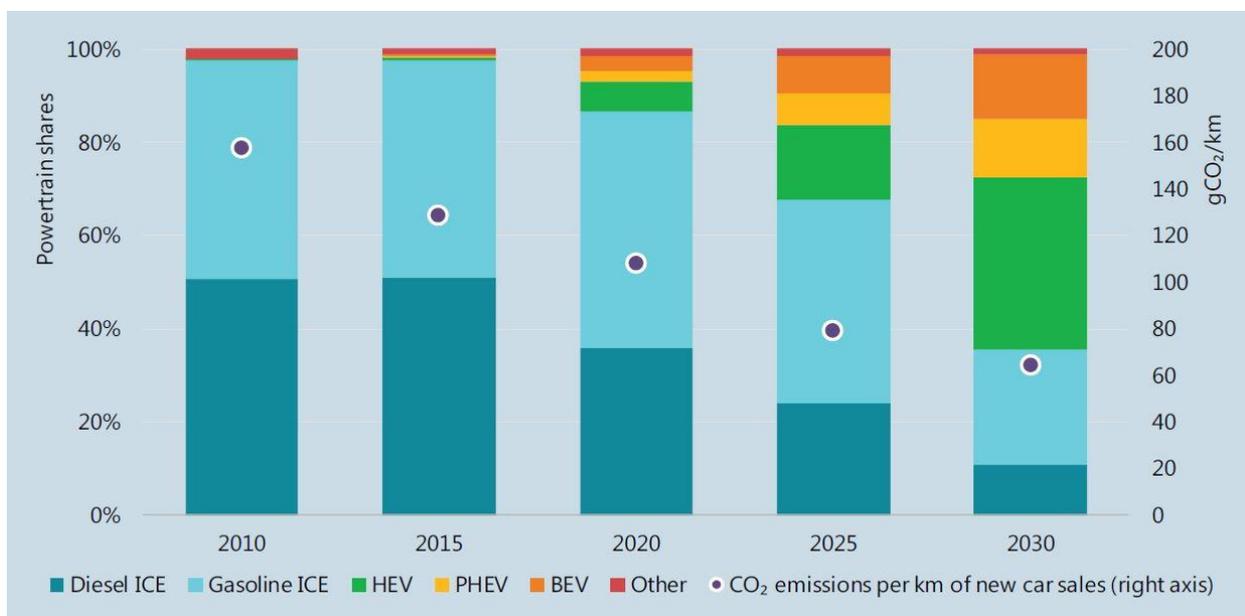


Figura 2-9: Variación en el mercado de coches hasta 2030 y reducción de CO<sub>2</sub> lograda [17].

Sin embargo, el porcentaje de vehículos eléctricos sigue siendo muy inferior a los de combustión interna. No obstante, se prevé que las ventas de coches y motos eléctricas aumenten de forma exponencial hasta el 2030. En coches, se prevé que para esa fecha el 63% de las unidades vendidas sea de tecnología híbrida o eléctrica, logrando 250 millones de modelos eléctricos en ese año. Para 2030, se alcanzaría el número de 560 millones de unidades de vehículos de 2 y 3 ruedas, 8.2 millones de autobuses, 3.3 millones de camiones [17].

Para conseguir una expansión definitiva en la movilidad eléctrica, es fundamental que exista una infraestructura suficiente para dar cabida a esta nueva tecnología. Será necesario aumentar la red eléctrica, así como la generación de energía, en consonancia con el aumento de consumo eléctrico asociado a los vehículos. Asimismo, se necesitará de una red de carga suficiente, de alta potencia y rapidez, que sea capaz de suplir las actuales gasolineras para viajes largos, y que también permita la carga de vehículos en zonas urbanas. A medida que se vaya avanzando en dichos ámbitos, más sencilla y efectiva será la transición hacia la movilidad eléctrica.

### 2.2.3 El vehículo compartido como solución

Al igual que el modelo clásico de movilidad basada en motores de combustión interna está cambiando en pro de la electrificación de los medios de transporte, el sistema actual establecido sobre el vehículo privado ha entrado en una revolución debida a la penetración del vehículo compartido como nueva opción en cuanto al transporte en las ciudades.

Los servicios de movilidad compartidos, o sharing, resulta en un conjunto de vehículos que se alquila por horas o por minutos, y cuyo conductor no es su dueño. Esto último es la gran diferencia de los servicios de sharing con respecto a los servicios “car-pooling”, en el cual se trata de compartir viaje para ahorrar gastos, pero el conductor o uno de los conductores sí es el dueño del vehículo.

En el todavía sistema actual, cada ciudadano tiene su vehículo personal, siendo este su medio de transporte principal en gran parte de los casos. No obstante, existen varios problemas asociados al método actual.

En primer lugar, el número de vehículos personales no ha cesado de crecer en las últimas décadas. Actualmente, el censo de vehículos en España es de 29.795.523 unidades, mientras que el censo de conductores es de 26.853.754 personas, lo cual supone que, de media, se tiene más de un coche por conductor [19].

Este sistema de coche particular tiene un gran inconveniente: los ciudadanos necesitan coche para poder trasladarse por la ciudad o fuera de ella. El problema el propietario no necesita su vehículo, este no se puede aprovechar, y permanece aparcado, sin otro uso posible. La magnitud del problema es tal, que, de media, un vehículo en España solamente se encuentra funcionando en movimiento el 3% del total del tiempo [20].

Además, España tiene un parque automovilístico muy viejo, lo cual causa que la contaminación y las emisiones de efecto invernadero sean mayores. El sistema de vehículo compartido supondría una renovación de este parque, ya que la flota de esta serie de servicios es 100% eléctrica.

Los servicios de sharing, junto con los novedosos vehículos de movilidad personal, como patinetes eléctricos, han supuesto una revolución en el transporte intraurbano, y se han convertido en una alternativa real a los vehículos privados, más allá del transporte público.

Este sistema de vehículo compartido conlleva una serie de ventajas a la hora de la movilidad en las ciudades:

1. Dan opción de trasladarse de manera sostenible sin vehículo propio a sitios sin acceso mediante transporte público. Proporciona de esta manera, a diferencia de los medios públicos, libertad de rutas y horarios.
2. Alivio del aparcamiento urbano: todas las moto-sharing y la mayoría de los car-sharing son “free floating”, lo que significa que se pueden aparcar libremente en cualquier espacio de la ciudad. Además, si se redujera el número de vehículos en las urbes, aumentaría proporcionalmente la facilidad de aparcamiento.
3. Reducción de emisiones contaminantes y de efecto invernadero: la incursión del vehículo compartido ayudaría a reducir la edad del parque automovilístico, cambiando estos vehículos con antigüedad por alquiler de vehículos 100 % eléctricos.
4. Son sencillos de alquilar y de usar. Estos sistemas se alquilan a través de una aplicación de móvil de forma rápida.
5. Son una opción viable para quien no pueda permitirse adquirir un vehículo propio. El elevado coste de un coche propio deja de ser un problema, en virtud del ahorro que supone usar servicios sharing. Ha de tenerse también en cuenta que esta serie de servicios incluye el mantenimiento y recarga del vehículo, el usuario solamente paga por usarlo.

## 2.3 El Proyecto Motostudent

En paralelo con los avances referentes a la movilidad actual, existen distintos proyectos promovidos por estudiantes universitarios que se encargan de estudiar, optimizar y mejorar prototipos de vehículos de competición. Uno de los campeonatos estudiantiles con más prestigio a nivel mundial de los últimos años es el proyecto Motostudent.



Figura 2-10: Equipos participantes en la competición Motostudent 2018.

### 2.3.1 ¿Qué es?

Motostudent es una competición universitaria a nivel internacional, en la que los distintos equipos estudiantiles tienen el reto de diseñar y fabricar una motocicleta desde cero. La meta es lograr el mejor prototipo de moto posible, y alzarse con la victoria en las distintas pruebas que componen el certamen, principalmente, la carrera final.

Este campeonato fue fundado en 2009, siendo la primera edición de la competición en el año 2010, y erigiéndose como una de las competiciones de estudiantes más longevas de las que existen hoy en día. La sede oficial del campeonato está situada en el circuito de Motorland de Aragón, en la provincia de Teruel, siendo este un circuito oficial del calendario de Moto GP.

La prueba más ilusionante y dificultosa es la carrera final, en la que todos los prototipos se batan en duelo. No obstante, el campeonato consta de más pruebas, como las pruebas estáticas, el plan de industrialización o el plan de negocio.

La competición trabaja constantemente mirando hacia el futuro de la tecnología en lo referente a la movilidad. Desde su cuarta edición, existen dos categorías diferentes: la Motostudent Petrol, con motos basadas en motores de combustión interna, y Motostudent Electric, con prototipos basados en motores eléctricos de máxima eficiencia en aplicaciones de competición: de imanes permanentes (PMSM).

### 2.3.2 Historia del equipo US Racing, actualidad y futuro

El equipo oficial de la Universidad de Sevilla, US Racing Team, fue uno de los fundadores de la competición en 2009, participando de forma ininterrumpida en los cinco campeonatos que se han celebrado hasta la fecha. A lo largo de los años de la competición, el equipo ha cosechado grandes logros, tanto en la carrera principal como en defender los proyectos que la conforman.



Figura 2-11: Motocicleta de la V edición del equipo US Racing.

La ingeniería conforma la parte principal del desempeño del equipo, con el diseño, pruebas, fabricación y montaje de los diferentes elementos mecánicos, electrónicos y aerodinámicos del conjunto. No obstante, Para el buen funcionamiento del conjunto estudiantil, es imprescindible la presencia de compañeros de ámbitos de comunicación, marketing y derecho entre otros. US Racing es, de esta manera, una especie de mediana empresa conformada y dirigida exclusivamente por el conjunto de estudiantes de la Universidad de Sevilla.

En la actualidad, el equipo trabaja en el diseño del nuevo prototipo para la sexta edición de la competición. La gran novedad de este es que, por primera vez en la historia del equipo sevillano, la motocicleta estará impulsada por motor eléctrico. Esto supone todo un reto, ya que es la primera vez que el equipo se enfrenta al gran cambio que supone el cambio de proyecto de motocicleta de combustión a motocicleta eléctrica, tanto a nivel presupuestario como ingenieril.



# 3 ESTADO DEL ARTE

---

*El presente es el resultado necesario de todo el pasado,  
la causa necesaria de todo el futuro*

*- Robert Green Ingersoll -*

## 3.1 Historia de la carga inalámbrica

Tal y como se ha visto antes, los diferentes avances en el ámbito de la tecnología eléctrica, como el coche eléctrico o las energías renovables, han permitido avanzar en la lucha de problemas globales como el cambio climático o la contaminación urbana. En sintonía con esto, existen multitud de campos complementarios en plena investigación, cuyo desarrollo puede suponer una ayuda complementaria a la solución de dicha problemática. De este modo, surge la causa del ámbito de este estudio: el avance de la carga inalámbrica aplicada a la movilidad eléctrica.

La transmisión inalámbrica de energía eléctrica tiene su base en los propios inicios del conocimiento de la energía eléctrica. Esto es, entre otros, el experimento de Michael Faraday, en el que observa la inducción existente a causa de la interacción magnética de un imán y una bobina. Ello desembocó en la ley de inducción de Faraday y la ley de Ampère, las cuales fueron posteriormente aunadas entre las leyes de Maxwell del electromagnetismo.

La transmisión eléctrica a distancia, durante sus inicios, estuvo íntimamente ligada con el comienzo de los sistemas de comunicaciones, con respecto al envío de paquetes de datos. Así, en 1887, Heinrich Rudolf Hertz fue el primero en lograr transmitir energía a través del aire, lo cual supuso la primera piedra en el ámbito de las telecomunicaciones modernas, que años más tarde se consolidaría con la invención de la radio [21].

El ingeniero Nikola Tesla fue también uno de los pioneros en el estudio de la transferencia de energía a través del aire, a través de la llamada “Torre de Tesla”. Su objetivo era el intercambio de comunicaciones y electricidad sin necesitar cableado y a través de amplias distancias. Tesla imaginaba una forma de transmisión de electricidad desde las cataratas del Niágara hasta las ciudades sin necesidad de cableado. Finalmente, el ambicioso plan de Tesla no pudo hacerse realidad, principalmente por la enorme dificultad de transmitir electricidad una distancia tan amplia a través del aire. De esta forma, la idea de transmitir energía eléctrica inalámbricamente se fue desvaneciendo, quedando relegada del ámbito de la investigación durante prácticamente todo el siglo XX [22].

La transferencia inalámbrica de energía no levantó apenas interés durante todo el pasado siglo, hasta que, en los años 80, una serie de experimentos en la materia volvieron a despertar el interés de la comunidad investigadora. En esta década, se desarrolló en California un proyecto basado en el estudio de la cantidad de energía que se podía intercambiar entre un carril y un vehículo, a través de la transferencia inductiva de potencia, basada en una bobina en el emisor y otra en el receptor. El proyecto logró hasta un 60% de rendimiento en la transmisión. Esta fue una de las investigaciones pioneras sobre la aplicación de esta tecnología en el ámbito del transporte [23].

Los avances en el campo de la electrónica de potencia fueron fundamentales para el avance de esta tecnología. Así, numerosas investigaciones se llevaron a cabo los años siguientes. Investigadores e ingenieros comenzaron a interesarse por el potencial que tenía esta forma de transmitir la electricidad, aumentando a lo largo de los experimentos la potencia de estos sistemas. Se puso la lupa en solventar los grandes problemas de esta tecnología, principalmente, la pérdida de energía a través del aire entre el emisor y el receptor, y la falta de control que se tenía sobre la electricidad en estos sistemas.

Originalmente, estos sistemas estaban basados en acción inductiva mutua entre dos bobinas a una cierta distancia entre sí. Las investigaciones a lo largo de los últimos años han tratado de mejorar la eficiencia y capacidad de transferencia entre emisor y receptor a través de la adición de nuevos elementos, tales como condensadores o más bobinas en distintas configuraciones [23].

En la actualidad, la transferencia inductiva de potencia está mucho más presente, tanto en la industria como en el día a día. Existen numerosos ejemplos de aplicaciones que tienen estos sistemas: en la carga de los cepillos eléctricos de dientes, robots guía en la industria que se cargan a lo largo de un carril mientras se desplazan, cargadores inalámbricos para teléfono móvil, o incluso algo tan normalizado por la población como es el bonobús electrónico. No obstante, la aplicación en la carga en vehículos eléctricos está, aún en nuestros días, en fase de investigación y desarrollo por parte del sector automovilístico.

### 3.2 Modelos actuales en el mercado

En los últimos tiempos, la carga inalámbrica se ha introducido en los mercados de diversos campos y tecnologías. En concreto, la gran mayoría de tecnologías han introducido esta transferencia inalámbrica de potencia basándose en la transmisión inductiva, a través de dos bobinas.

Uno de los mercados que fue pionero en la inclusión de este sistema de carga innovadora fue el sector de la telefonía móvil. Las compañías de teléfonos inteligentes son conocidas por llevar constantemente al mercado los últimos progresos tecnológicos, y tal fue el pasó que se dio cuando, en 2009, se lanzó el primer teléfono móvil con esta funcionalidad. Desde aquel momento, los grandes fabricantes se han interesado cada vez más por el potencial de esta tecnología, conllevando esto que, hoy en día, una gran parte de los teléfonos de gama media-alta tengan incluida la capacidad de cargarlos de forma inalámbrica.



Figura 3-1: Carga inductiva aplicada a un teléfono móvil [24].

La institución que se ha encargado de crear el estándar de carga inalámbrica en el campo de la telefonía es la Wireless Power Consortium (WPC). A través del protocolo Qi, es posible transferir la energía hasta a 4 centímetros de distancia. Grandes compañías del sector forman parte de esta institución, como son Google, Apple, LG o Samsung, entre otras. Este hecho demuestra que las grandes empresas investigan y apuestan por la capacidad de la carga inductiva como una tecnología de futuro en el campo de la telefonía.

Aparte del estándar en la telefonía, el protocolo Qi, la WPC ha abierto la idea de la transmisión inductiva de potencia a otros sectores. Entre ellos, hay dos grandes campos: el “estándar de media potencia”, y el “estándar de cocina sin cables”. Los dispositivos de potencia media son aquellos que se cargan a una potencia de entre 30 y 65 W, entre los que se incluyen robots limpiadores, bicicletas eléctricas, drones y herramientas de bricolaje. Por otra parte, una de las apuestas más innovadoras de WPC es la denominada “cocina sin cables”, que está capacitada para transmitir hasta 2,2 kW de potencia de forma inalámbrica. La idea es dejar de tener la necesidad de conectar todos los pequeños electrodomésticos con cable a la red eléctrica, disponiendo en la encimera de la cocina pequeñas superficies inductoras donde poner sobre ellas elementos como el tostador, cafetera o hasta directamente la sartén [25].

Estos últimos ejemplos son una clara muestra de que esta tecnología tiene un gran potencial. Además de ser una tecnología extrapolable a cualquier campo que tenga que ver con la ingeniería eléctrica a modo de consumo.

La aplicación de este concepto tecnológico a los vehículos eléctricos se encuentra unos pasos atrás que en el caso de la telefonía móvil, estando aún, principalmente, en fase de investigación y desarrollo. Existen distintos motivos por el cual sucede esto: en primer lugar, el terreno de la telefonía moderna se renueva con mucha mayor brevedad de lo que lo hace el parque automovilístico, tardando más en llegar al mercado los avances en este último sector. En segundo lugar, el sector telefónico está totalmente basado en baterías eléctricas, mientras que el peso de los vehículos eléctricos en el cómputo global de la movilidad es aún demasiado bajo, siendo necesario una mayor electrificación en el transporte para que madure este tipo de tecnología en el mercado. Por último, la transferencia inductiva de potencia tiene un problema concreto añadido en el ámbito automovilístico: para cargar un vehículo se requiere una enorme transferencia de potencia, así como salvar una distancia mucho mayor entre emisor y receptor de energía, hechos por los que la carga inductiva aplicada a los vehículos se vuelve más compleja que en otros ámbitos.

No obstante, a pesar de que la revolución de la carga inalámbrica esté llegando de forma más tardía a los vehículos eléctricos, multitud de empresas del sector automovilístico se encuentran desarrollando en la actualidad esta tecnología.

En los automóviles eléctricos, la transferencia inductiva de potencia se puede realizar de dos maneras distintas. La primera opción, es la carga inductiva estática, la cual supone cargar el vehículo mientras este está estacionado. Por otra parte, se encuentra la carga inductiva dinámica, que trata sobre transferir energía eléctrica con el vehículo en movimiento, a través de la interacción electromagnética entre el asfalto y el propio automóvil. Las distintas compañías del sector han venido desarrollando avances en ambos tipos de tecnologías.

La carga inalámbrica estática es el primer paso del proceso hasta llegar a la dinámica. Como tal, el desarrollo actual de esta tecnología es mucho más maduro a día de hoy. Numerosas empresas importantes del sector, así como nuevas startups, han hecho evolucionar esta tecnología en los últimos años.

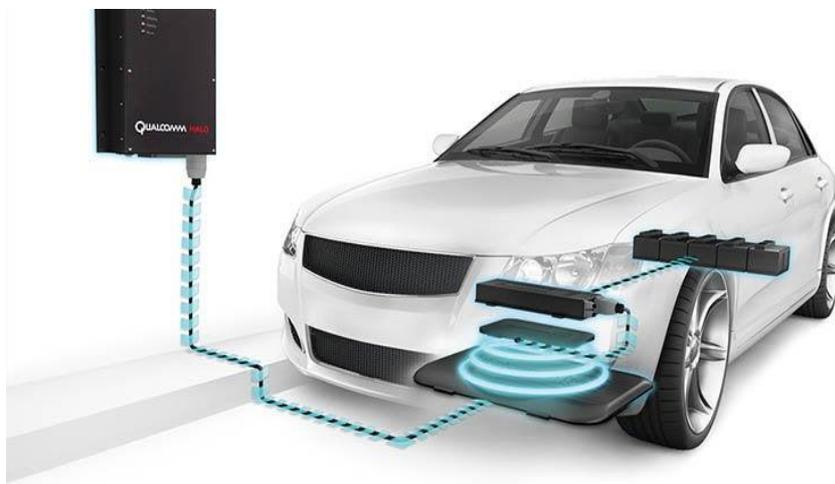


Figura 3-2: Sistema de carga inductiva estática en un vehículo [26].

Las investigaciones de las distintas empresas del sector comenzaron a ver la luz a principios de la pasada década, cuando se comenzaron a ver los primeros prototipos de cargadores inductivos para vehículos. La primera gran compañía en sacar al mercado uno de estos cargadores fue Bosch, en el año 2013, para ser implementado en un Nissan Leaf [27]. Posteriormente, en los últimos años, otras grandes empresas como BMW han sacado al mercado su propio cargador inalámbrico para ser empleado en los modelos eléctricos e híbridos de la propia marca, en este caso con una potencia de 3,2 kW [28]. Otras grandes marcas que han apostado por esta tecnología de carga han sido Audi, Qualcomm y Continental, entre otras.

En paralelo, han surgido startups específicamente enfocadas en desarrollar y abrir al mercado esta tecnología al mundo de la automoción, siendo este el caso de Witricity y Evaltran. Ambas llevan desde 2018 lanzando al mercado cargadores inalámbricos, haciendo aumentar la potencia de carga del vehículo hasta los 11 kW en los últimos modelos disponibles, y logrando un rendimiento máximo del 93 % [29].

Asimismo, España está teniendo también un papel protagonista en la investigación y desarrollo de esta tecnología. Entre los proyectos más destacados, se encuentran el proyecto “UNPLUGGED”, donde se logró transferir inalámbricamente con una 50 kW de potencia [30], así como el proyecto “VICTORIA”, liderado por ENDESA en el año 2017 en la Smart City de Málaga, con el objetivo de adaptar un autobús de línea de la capital a ser capaz de cargar de forma inalámbrica en las distintas paradas de su ruta [31].

Por otro lado, la teoría que hay detrás del intercambio de energía eléctrica mediante la interacción de dos bobinas permite ir un paso más allá: la transmisión de energía en movimiento, técnicamente denominado como transferencia dinámica de potencia. Aunque esta es una tecnología que ha venido llamando mucho la atención tanto de los consumidores como de las grandes marcas del sector, su implementación real requiere un mayor nivel de control y conocimiento del comportamiento de la inducción a través del emisor y el receptor.



Figura 3-3: Sistema de carga inductiva dinámica aplicado a un vehículo [32].

Entre los mayores avances que se han producido con respecto a esta tecnología en los últimos años, destaca el programa de investigación “FABRIC”, promovido por la Unión Europea, con la colaboración de Qualcomm y Renault. El estudio engloba el campo de transmisión de energía, así como el intercambio de comunicaciones que es necesario para llevarlo a cabo. Se logró satisfactoriamente cargar el automóvil a una potencia máxima de 20 kW, siendo la longitud del carril de pruebas de 100 metros, y con una velocidad máxima del vehículo de 100 km/h [32], demostrando así que esta tecnología es extrapolable e integrable en las carreteras y autopistas del futuro.

Más allá del citado estudio, en los últimos años se ha avanzado también en otra característica fundamental para la progresión de esta tecnología: mejorar la inducción a su paso por el suelo de la carretera. En este orden, la compañía Magment logró desarrollar el pasado 2018 un nuevo tipo de hormigón con capacidad de transmitir las ondas electromagnéticas. De esta manera, sería el propio asfalto el que transmitiría en este caso la corriente eléctrica, haciendo la función de bobina primaria, suprimiendo los cables enterrados bajo el asfalto y aumentando, así, la eficiencia global del sistema. En investigaciones sobre dicho asfalto, se ha llegado a obtener un rendimiento de hasta un 95 %, a una distancia de la bobina secundaria de 20 cm (pensado para los coches) y del 86 % para una distancia de 40 cm (pensado para camiones) [33].

A finales de 2019 se comenzó a construir en la ciudad sueca de Gotlam la primera carretera con capacidad de carga inalámbrica del mundo, especialmente diseñada para camiones y autobuses eléctricos. En los meses posteriores, el sistema se ha testado satisfactoriamente con un camión eléctrico de 40 toneladas, transfiriendo una potencia de 45 kW sin significativos problemas. Se espera que en los próximos meses se logre alcanzar una potencia de 125 kW, la máxima para la que se diseñó la vía. La empresa encargada de la construcción también ha podido estudiar como las condiciones climatológicas adversas, como nieve o lluvia, apenas afectaba a la transferencia de potencia [34].

Finalmente, la carga inalámbrica se ha venido implementando, en su mayoría, con vistas de uso en camiones, autobuses y coches, estando alejadas las motocicletas de esta tecnología. BMW ha sido uno de los pocos fabricantes que han investigado como aplicar la carga inductiva a una moto, siendo muy innovadores en la solución final propuesta. La idea es que la bobina receptora de potencia esté alojada en la pata de cabra, disminuyendo así en gran medida la distancia entre ambas bobinas, aumentando la eficiencia y capacidad de transferencia del conjunto.

### 3.3 Futuro y ventajas de la carga inalámbrica

Aunque los últimos tiempos han supuesto un auge en la tecnología de carga inalámbrica, esta aún tiene un enorme potencial que puede ser altamente beneficioso para la revolución de los automóviles eléctricos.

En primer lugar, el mayor hecho que hace avanzar esta tecnología de carga es la mejora y los constantes adelantos en el ámbito de la electrónica de potencia, ya que esta es una de las piedras fundamentales donde se sustenta la practicidad de la transferencia inductiva de potencia. No sólo en cuanto a dispositivos con mejores prestaciones, si no que el progreso en electrónica de potencia supondría también una consecuente reducción de costes.

Uno de los mayores beneficios que podría conllevar esta tecnología es la conexión del vehículo a la red. Este concepto resulta en la conexión bidimensional tanto de energía eléctrica como de datos entre la red y vehículos eléctricos de cierto lugar, teniendo de esta forma posibilidad de almacenamiento de la red mediante la posibilidad de cargar o descargar las baterías de los usuarios. El V2G tiene como base que los automóviles se encuentren de manera regular conectados a la red eléctrica. Si hubiera puntos de recarga inalámbrica en los distintos aparcamientos de las ciudades, los conductores estarían conectados a la red de forma automática, sin tener que conectar y desconectar cables, con lo que la simplicidad de este método conllevaría que muchos más usuarios estuvieran conectados a la red.

De esta manera, en una ciudad donde cada aparcamiento transfiriera potencia de forma inalámbrica con cada coche o moto, y donde las distintas carreteras fueran capaces de cargar los automóviles de forma dinámica, supondría que el tiempo de recarga de los medios de transporte eléctricos urbanos se redujera de forma considerable, solucionando así uno de los principales problemas de la movilidad eléctrica en la actualidad.

Más allá de la ventaja indirecta en el tiempo de recarga, existen otras muchas ventajas entorno a un sistema extendido de recarga inductiva.

- Mayor comodidad para el conductor, al no tener que conectar ningún conductor externo en el vehículo. Esta simplicidad podría ser especialmente de ayuda para los conductores mayores.

- Al no tener conexión cableada, el sistema de recarga sería ostensiblemente más seguro en el caso de la carga inalámbrica, ya que el usuario no estaría en ningún momento en contacto con ningún cable en tensión externo.
- Menor posibilidad de fallos, principalmente por dos motivos. En primer lugar, el usuario carece prácticamente de posibilidad de romper ningún elemento, ya que no tendría más que aparcar encima de la bobina emisora. Por otro lado, la transmisión de energía de esta forma no se ve afectada por las condiciones meteorológicas externas, al contrario que la recarga por cable.
- Al disponer de menor probabilidad de fallo o rotura de sus elementos, el coste de mantenimiento de esta tecnología resultaría menor de cara al propietario de la red o de los puntos de recarga de cierto lugar.

# 4 BASES DEL DISEÑO DEL CARGADOR

---

*Innovar es encontrar nuevos o mejorados usos a los recursos que ya disponemos*

*- Peter Drucker -*

## 4.1 Fundamentos de las bobinas acopladas

La transferencia inductiva consiste en la transmisión de energía desde un bobinado primario hacia un bobinado secundario de forma inalámbrica, sin que estos estén conectados eléctricamente. Los fundamentos en los que se basa esta tecnología son los mismos en los que se basan otras como los transformadores o los motores de inducción.

Según la ley de Ampère, al circular una corriente eléctrica por un conductor, se genera un campo magnético proporcional a esta. De esta manera, aplicado al propio cargador, un campo magnético es generado en torno a la bobina primaria, siendo este proporcional a la intensidad que circula por su interior [35].

Según la ley de inducción de Faraday, la variación del flujo magnético que atraviesa una superficie cerrada genera una fuerza electromotriz inducida proporcional a este. En el caso de estudio, se hace circular una corriente variable por el terminal primario, creándose así en consecuencia un campo magnético variable en torno a la bobina 1. El flujo magnético que atraviesa la superficie de la bobina secundaria induce una tensión proporcional en consecuencia.

$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \int_S \vec{J} d\vec{S} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{E} d\vec{S} \quad (4-1)$$

$$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S} = B S \cos(\theta) \quad (4-2)$$

$$\epsilon = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (4-3)$$

En concreto, aplicando la Ec. 4-1 y Ec. 4-3 en una bobina de inductancia L y con N número de vueltas de devanado, es posible hallar la tensión de esta a través de la variación de corriente que circula por la misma:

$$N\phi = Li(t) \quad (4-4)$$

$$v(t) = L \cdot \frac{di(t)}{dt} \quad (4-5)$$

Dos bobinas están acopladas entre sí cuando la variación del flujo magnético de una de ellas induce una fuerza electromotriz en la otra. El flujo concatenado entre ambas bobinas viene definido por la inductancia mutua, mientras que la parte del flujo que no se comparte entre ambas viene hecho por la inductancia propia. De esta forma, las ecuaciones que caracterizan las bobinas acopladas son las siguientes:

$$\begin{aligned} u_1 &= L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ u_2 &= L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (4-6 \text{ y } 4-7)$$

En el caso anterior, los flujos se restan debido a la configuración tomada de los terminales correspondientes de las bobinas, que es la siguiente:

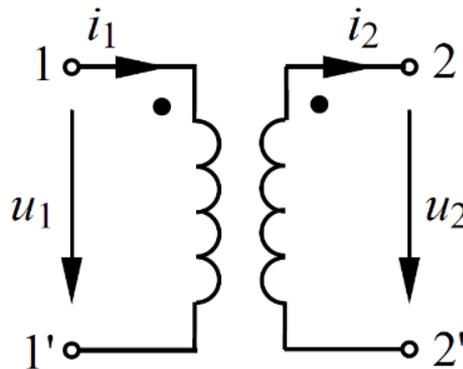


Figura 4-1: Bobinas acopladas [36].

Existen dos magnitudes de gran importancia de cara al estudio de bobinas acopladas. El coeficiente de acoplamiento da una muestra de cuanto peso tiene la inductancia mutua sobre la propia, siendo el valor máximo de este coeficiente igual a 1 cuando ambas inductancias tienen el mismo valor. Esta es una de las magnitudes que más condiciona la respuesta de la bobina, como se puede comprobar en los resultados obtenidos en las simulaciones, en los capítulos siguientes. Por otro lado, el factor de calidad de la bobina muestra la relación entre la reactancia y la resistencia interna de esta, siendo igualmente un coeficiente importante a la hora de su diseño.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (4-8)$$

$$Q = \frac{\omega L}{R} \quad (4-9)$$

Por último, una magnitud a tener en cuenta tanto en estudios de bobinas acopladas como de transformadores es la relación de transformación, que muestra la relación entre las magnitudes eléctricas del terminal primario y secundario:

$$n = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}} \quad (4-10)$$

A lo largo de las simulaciones realizadas, se ha estudiado la dependencia de estos parámetros con magnitudes eléctricas tales como la potencia del sistema de carga y el rendimiento, así como la variación de estos parámetros en función de la geometría de las bobinas y de otros tales como la distancia entre ambos terminales o desalineamiento entre estos.

## 4.2 Necesidades de carga del sistema

Para que el diseño de los devanados sea el correcto, es necesario conocer las necesidades de la batería que va a ser cargada, así como los demás elementos del cargador.

El acumulador se conforma uniendo entre sí distintas pilas de Ion Litio mediante conexiones en serie y paralelo hasta llegar a la capacidad y tensión conjunta deseada.

Tabla 4-1 Características de las celdas que conforman la batería

Magnitud de la batería	Características de operación
Tensión nominal	<b>3.6 V</b>
Capacidad	<b>2.5 Ah</b>
Corriente de carga	<b>1.25 A (0.5C)</b>
Tensión de carga	<b>4.1-4.2 V</b>

Para cumplir con las especificaciones que dicta la competición, y que la motocicleta sea capaz de finalizar la carrera en buenas condiciones, se conexionan 28 celdas en serie y 32 en paralelo. Por tanto, la tensión nominal del acumulador es de 100.8 V, con capacidad global de 8.06 kWh. A la hora de la carga, el fabricante de celdas recomienda, para una carga estándar, una corriente de 1.25 A, no obstante, este valor tiene carácter referencial, ya que es posible realizar la carga a una corriente menor o mayor, con un valor máximo de 2.5 A y sin valor mínimo. Sin embargo, la tensión de carga sí supone una magnitud crítica y necesaria de mantener en los límites establecidos. Para diseñar el cargador, se ha tomado una tensión de carga de la batería completa de 116 V y una corriente de carga de 17 A (un poco más de 0.5 Amperios por celda), dando como resultado una potencia de carga de referencia de en torno a 2 kW. La elección de la corriente de carga escogida tiene como objetivo el aumento de la vida útil de la batería y la menor degradación de esta a lo largo de los ciclos de carga. No obstante, esta decisión implica que el tiempo de carga será más elevado.

Debido a que la potencia de diseño no es muy elevada, se propone que el cargador sea monofásico en su alimentación a red eléctrica. No obstante, el estudio se centra en el diseño de las bobinas y su dependencia en otros parámetros eléctricos del cargador, con lo que de cara a las simulaciones planteadas no existe apenas variación entre un cargador monofásico y uno trifásico.

Desde la conexión a red, en corriente alterna, hasta la recarga de la batería, en corriente continua, existen diversas etapas de conversión de energía mediante electrónica de potencia. En primer lugar, la baja frecuencia de la red eléctrica no permitiría una transferencia eficaz de potencia. Para poder transferir energía de forma inductiva es necesario una frecuencia de conmutación mucho mayor. Por ello, se conecta un rectificador seguido de un inversor, con el fin de lograr tensión alterna de alta frecuencia gracias a la conmutación de los MOSFET o IGBT.

A continuación, en la Figura 4-2, se muestra un esquema que resume las etapas que componen la transferencia inductiva de potencia. La energía se transmite desde el primario hacia el secundario, donde se encuentra la carga, en este caso la batería de la motocicleta eléctrica. Tras el terminal secundario, la corriente es rectificadora de nuevo para convertirla, por último, en corriente continua.

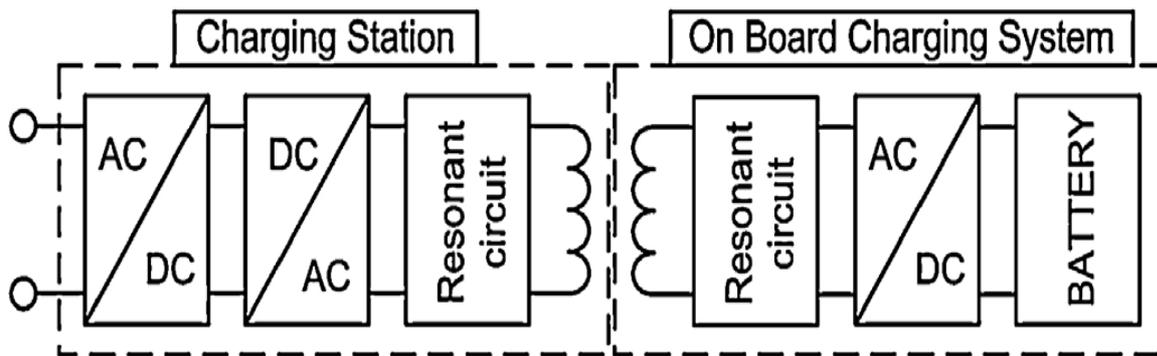


Figura 4-2: Esquema de bloques de sistema de transferencia inductiva [37].

Una de las mejoras más comunes y utilizadas en estos sistemas de carga consiste en conectar un circuito resonante con las bobinas acopladas, normalmente tanto en el primario como en el secundario. De esta forma la transferencia de potencia es mucho mayor, tal y como se puede comprobar mediante las simulaciones y resultados que se muestran en el capítulo correspondiente a la resonancia en transferencia inductiva de energía.

Un factor clave de cara a dicha transmisión de potencia resulta tanto la geometría de ambas bobinas, como su disposición en el espacio. De esta manera, parámetros como la distancia entre ambos terminales, y el desalineamiento longitudinal o de ángulo entre ambos resultan de gran importancia de cara al diseño del conjunto y de las propias bobinas.

El objetivo de este cargador resulta en cargar la batería de la motocicleta eléctrica de competición de estudiantes de la Universidad de Sevilla. La bobina primaria estaría en el suelo, o apoyado en este a cierta altura, mientras que la bobina receptora se encontraría en la quilla de la motocicleta, siendo esta laparte recta paralela al suelo más cercana a este, con superficie suficiente como para lograr el objetivo.

El control del cargador se podría realizar en el elemento primario, en el secundario o en ambos al mismo tiempo. En el primario, el control se lleva a cabo a través de los IGBT del inversor. Por el contrario, el elemento secundario tendría capacidad de control mediante un rectificador basado en tiristores, o al añadirle un convertidor DC/DC entre el rectificador y la BMS o batería. Este convertidor es empleado para ajustar la corriente continua con la que se carga la batería a unos límites deseados de picos o rizado de intensidad o tensión, y así mejorar la vida útil de esta, a la vez de poder elevar o reducir la tensión que le llega a la batería si fuese necesario o deseado. En este caso, el control se realizaría regulando el Duty Cycle del IGBT (o de los IGBT, si tiene más de uno) de dicho convertidor.

El cargador, asimismo, se podría diseñar de tal forma que fuese unidireccional, si la corriente sólo fluye desde la red hacia la batería, o bidireccional, si la corriente también puede fluir desde la batería hacia la red. La diferencia entre ambas opciones se basa en la elección del convertidor DC/DC tras el rectificador. De esta manera, si el DC/DC es unidireccional, el cargador lo será, y si el DC/DC permite la bidireccionalidad o el cargador carece de este convertidor, entonces la electricidad podrá fluir en ambos sentidos.

En concreto, con respecto a las bobinas que se van a modelar y tratar, estas pueden ser bobinas planas o en forma de solenoide. El estudio y la colocación de estos elementos dentro de la motocicleta cambiarían drásticamente según se emplea uno u otro modelo. En la gran mayoría de casos, en las aplicaciones de transferencia inalámbrica de potencia se emplea una pareja de bobinas planas y paralelas entre sí.

Este estudio se basa en bobinas planas y circulares. Una de las mayores dificultades reside en hallar las características inductivas de la bobina que se emplea. Por ello, en lugar del uso de ecuaciones matemáticas para hallar parámetros como la inductancia propia de la bobina, se emplea software de elementos finitos para tal fin. De esta forma, es posible estudiar como varía este parámetro en función de otros como el diámetro del conductor, el número de vueltas de la bobina o la geometría de esta.

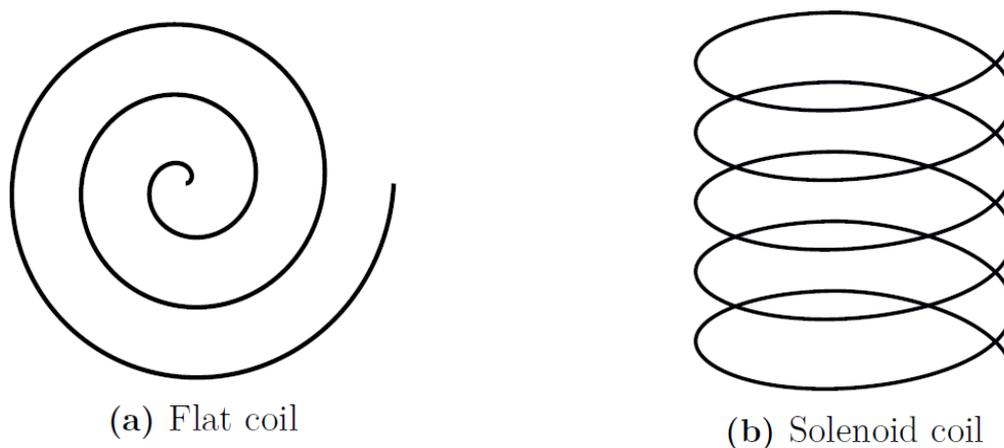


Figura 4-3: Geometría de la bobina plana (a) y solenoide (b) [38].

### 4.3 Objetivos y pasos del estudio

La finalidad de este trabajo es diseñar un cargador inalámbrico, según las necesidades explicadas anteriormente, de 2 kW de potencia. Para llegar al cargador definitivo, se ha propuesto una serie de simulaciones con el fin de encontrar los valores de diversas magnitudes eléctricas como la frecuencia, la inductancia propia y mutua, la resistencia interna y el número de vueltas de las bobinas y su relación con características del sistema, tales como la potencia de carga o el rendimiento del conjunto.

De esta manera, hay dos grandes grupos de simulaciones propuestas. En primer lugar, se emplea Matlab Simulink para simular el sistema eléctrico del cargador. Estas simulaciones tienen como objetivo principal entender la relación entre las magnitudes propias de las bobinas acopladas (inductancia mutua, inductancia propia y resistencia interna) y las magnitudes eléctricas que caracterizan el sistema, como la potencia activa y reactiva o el rendimiento del sistema. Se propone asimismo el empleo de resonancia mediante condensadores en el primario y secundario de ambos devanados, para mejorar el funcionamiento global.

El objetivo de este trabajo es proponer un diseño de cargador genérico, como el descrito en la Figura 4-2, centrándose en el diseño de las bobinas y la relación entre todos sus componentes y las características eléctricas del conjunto. Esto supone que el diseño de elementos como el inversor de la parte emisora del sistema, o el convertidor DC/DC anterior a la batería, no han sido tomados en consideración a la hora de las simulaciones y los resultados, al no ser ámbito de estudio de este trabajo. De esta manera, en las simulaciones de Matlab Simulink, se parte de una fuente de tensión de alta frecuencia, sustituyendo esta al conjunto formado por la fuente de 50 Hz junto con el inversor. Además, en consecuencia, no se ha tenido en cuenta control ni referencias en el sistema, de forma que los resultados obtenidos en la simulación eléctrica del conjunto tienen la finalidad de dar una idea del funcionamiento global, centrándose en los parámetros de los devanados.

Por otro lado, para el estudio de las características de ambos devanados es necesario emplear un software de elementos finitos, con el que poder obtener distintas simulaciones en base a un modelado previo de los devanados y su entorno. Para tal finalidad, se emplea COMSOL Multiphysics, en su versión 5.4. Esta serie de simulaciones tienen como objetivo la obtención de la inductancia (propia y mutua) y la resistencia interna de ambas bobinas en función de las siguientes variables: el número de vueltas de la bobina, el diámetro de conductor de cobre, las dimensiones de los devanados, la frecuencia de conmutación, la distancia entre bobinas, el desalineamiento longitudinal entre ellas y el ángulo entre sus planos.

De esta manera, en primer lugar, se proponen las distintas simulaciones realizadas en Matlab Simulink. Una vez entendidas las relaciones entre magnitudes eléctricas del sistema y las características de las bobinas, se pasa a la simulación en COMSOL Multiphysics, para obtener y, posteriormente, optimizar los parámetros de las bobinas para alcanzar las necesidades propuestas de la carga. Una vez se disponga del diseño final de los devanados, se obtendrán los resultados finales de potencia y rendimiento de nuevo mediante la simulación de Matlab Simulink. De esta forma, para ambos programas y grupos de simulación, se propone un diseño optimizado del conjunto en base al modelado y simulaciones previas.

# 5 MODELADO Y SIMULACIÓN DEL SISTEMA EN MATLAB SIMULINK

*El gran motor del cambio es la tecnología*

*- Alvin Toffler -*

## 5.1 Bloque de inductancia mutua y primera simulación

En primer lugar, se plantea el sistema de bobinas acopladas con una resistencia como carga. La fuente de tensión alterna se toma de 230 V, al ser el cargador monofásico. Esta, en lugar de funcionar a 50 Hz, trabaja a una frecuencia variable y mayor, de tal modo que esta fuente de alta frecuencia sustituye en la simulación a la fuente de 50 Hz en conjunto con el inversor de alta frecuencia. De esta manera, la resistencia interna de los IGBT del inversor no se ha tenido en cuenta de cara a los resultados obtenidos en ninguna de las simulaciones siguientes. Para modelar el acoplamiento entre bobinas, se emplea el bloque “Mutual Inductance” de Simulink. Este bloque modela el comportamiento de dos o más bobinas acopladas entre sí, teniendo como magnitudes de entrada la resistencia interna de las bobinas y su inductancia propia y mutua. El circuito equivalente de dicho bloque se muestra en la Figura 5-1:

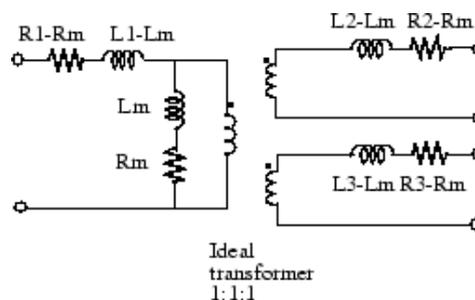


Figura 5-1: Circuito equivalente de tres bobinas acopladas [39].

$L_1$ ,  $L_2$  y  $L_3$  son las inductancias propias, y  $L_m$  es la inductancia mutua entre los devanados.  $R_1$ ,  $R_2$  y  $R_3$  son las resistencias internas de cada inductor, mientras que  $R_m$  es la resistencia mutua. En prácticamente la totalidad de los artículos referenciados, la resistencia mutua se considera despreciable con respecto al resto de magnitudes, con lo que a lo largo de este estudio se ha considerado de igual modo. Asimismo, El esquema de la Figura 5-1 muestra un sistema de tres bobinas acopladas, mientras que el sistema propuesto en este trabajo consta solamente de un par de estas: la bobina primaria, que absorbe energía eléctrica de la red, y la transmite hacia el devanado secundario, al cual se conecta la batería.

Teniendo la fuente de frecuencia variable, el bloque de inductancia mutua y la resistencia como carga, el esquema de bloques en Matlab Simulink es el siguiente:

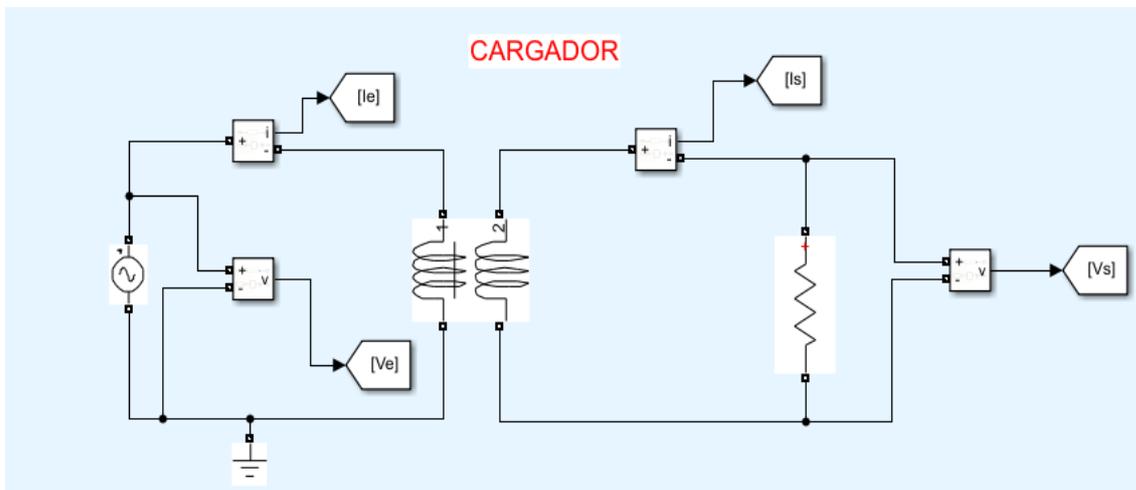


Figura 5-2: Esquema de bloques del sistema con bobinas acopladas.

Inicialmente, se considera, con el fin de simplificar el estudio, que ambas bobinas son idénticas. Esto es, tienen ambas la misma inductancia propia y la misma resistencia interna. En cuanto a la resistencia de carga, esta se escoge de  $8 \Omega$ , tal y como se determinó en el apartado anterior. El objetivo de las siguientes simulaciones es el de determinar cuál es el comportamiento del sistema cuando existe bobinas acopladas, en función de la resistencia interna, la frecuencia, la inductancia propia y el coeficiente de acoplamiento. Como magnitudes de estudio, se toma el factor de potencia a la entrada del sistema, la potencia reactiva, la potencia activa de carga y el rendimiento conjunto.

Dicho rendimiento se obtiene a través de la relación entre la potencia activa de carga y la potencia activa de entrada, sin depender de la potencia reactiva.

$$\eta = \frac{P_L}{P_e} \quad (5-1)$$

El factor de potencia determina la relación entre la potencia activa y reactiva. En este caso, el factor de potencia a la entrada del cargador es una variable de gran importancia como se verá reflejado en los resultados obtenidos.

$$\cos \varphi_e = \frac{P_e}{S_e} = \cos \left( \arctan \left( \frac{Q_e}{P_e} \right) \right) \quad (5-2)$$

A la hora de la simulación en Matlab Simulink, existe un elemento con características especiales que se debe definir correctamente. Esta es la carga, que es alimentada por parte del conjunto formado por la fuente de tensión y las bobinas acopladas. La carga puede tener diversas características, como por ejemplo ser modelada como impedancia o como resistencia, y si su valor es variable o constante entre otras. En este caso, la carga modelada corresponde con la batería de ion-litio, que almacena la energía eléctrica que le llega a través del cargador.

El problema de modelar una batería a través de su resistencia equivalente es la relación no constante entre la resistencia equivalente de la batería y la intensidad que circula para cada valor de esta, según se aprecia en la Figura 5-3.

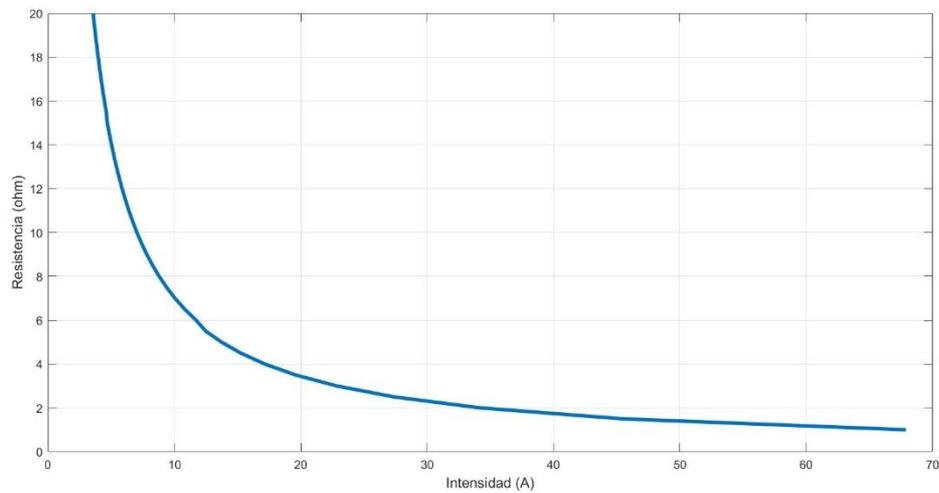


Figura 5-3: Curva I-R característica de la batería.

A pesar de que mediante una resistencia no sea el método más real para modelar la carga, es el método que se ha escogido para este estudio. Principalmente, esta decisión se debe a que, de esta forma, es posible variar el valor de la resistencia, con el fin de lograr entender cómo varía las condiciones del sistema en función de dicho valor. Por el contrario, si se modelase empleando el bloque de batería que proporciona Matlab Simulink, las características de este bloque serían fijas, con lo que no sería tan simple estudiar la dependencia de las magnitudes del cargador en función de esta.

Para el conjunto de primeras simulaciones realizadas, el valor de la carga se toma de  $8 \Omega$ . No obstante, con el fin de lograr un resultado final más ajustado a la realidad, la simulación final sí incluye el bloque de baterías junto con un puente de diodos como rectificador. La diferencia entre estas primeras simulaciones y la mencionada simulación final es que las primeras tienen como fin entender el sistema y su dependencia con los parámetros, mientras que la segunda tiene como objetivo la obtención de los valores reales y finales de este estudio.

### 5.1.1 Relación de las magnitudes eléctricas con la resistencia interna de las bobinas

La resistencia eléctrica interna de los devanados da una muestra de las pérdidas de energía en el interior de estos, producidas por el efecto Joule. Para el estudio, se varía dicha resistencia interna entre  $0.05 \Omega$  y  $1 \Omega$ .

Los resultados, que se muestran a continuación, se obtienen con una frecuencia de conmutación de  $30 \text{ kHz}$ , una inductancia propia de ambas bobinas de  $200 \mu\text{H}$  y un coeficiente de acoplamiento de  $0.5$ .

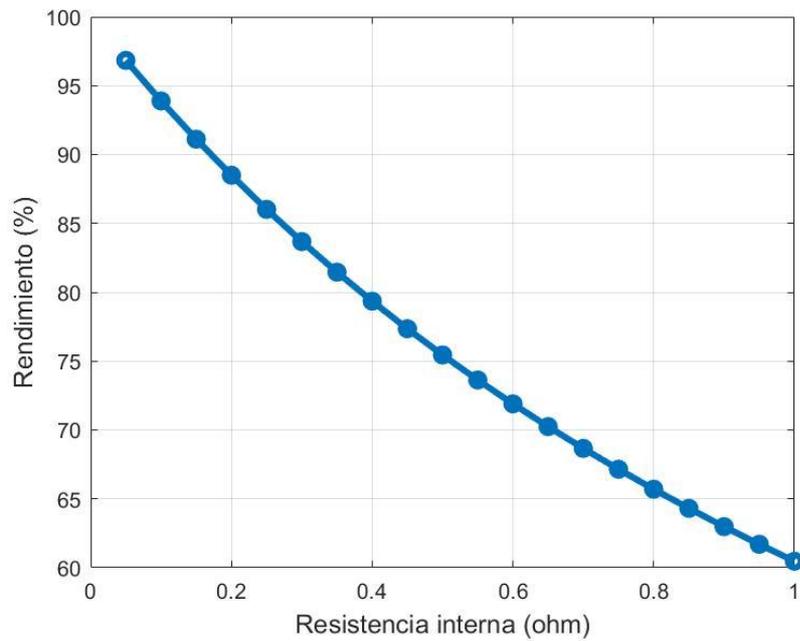


Figura 5-4: Rendimiento del sistema con respecto a la resistencia interna de las bobinas.

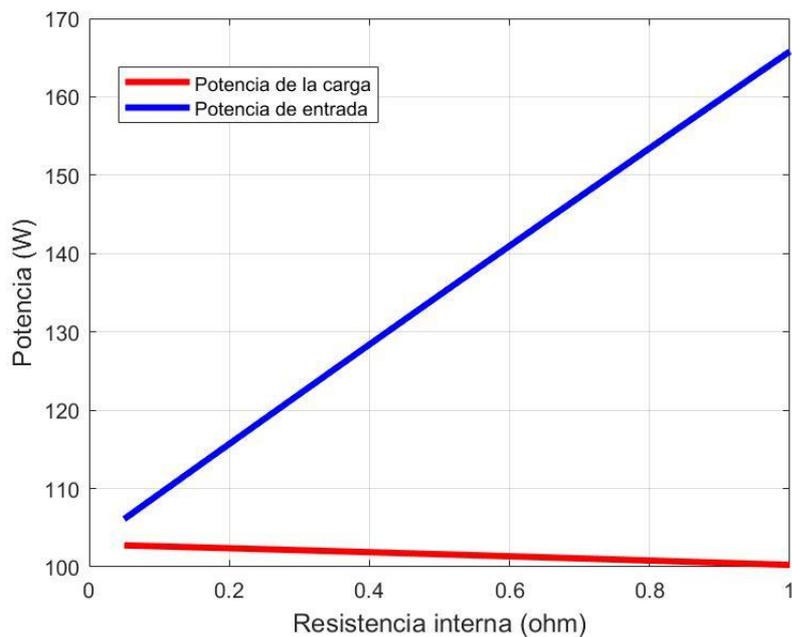


Figura 5-5: Potencia del sistema con respecto a la resistencia interna de las bobinas

Como se puede apreciar en las figuras anteriores, las pérdidas internas en ambos inductores tienen apreciables efectos negativos en el normal funcionamiento del cargador. El rendimiento es la magnitud que más se ve perjudicada ante un aumento en la resistencia interna de las bobinas, tanto es así que la relación es lineal entre ambos. El motivo de esto reside en que la carga demanda aproximadamente la misma potencia sin depender de la pérdida eléctrica en los inductores, con lo que, a mayores pérdidas, más cantidad de potencia tiene que aportar, en consecuencia, la fuente.

Aunque estos resultados son dependientes de otros parámetros del sistema, demuestran que las pérdidas por efecto Joule en los bobinados tienen una gran importancia a la hora del diseño de estos. Por ello, uno de los factores más importantes que se ha tenido en cuenta de cara al diseño de las bobinas consiste en la máxima reducción posible de la resistencia interna en los devanados. Este punto, como el resto de las cuestiones que tienen que ver con el diseño de las bobinas, se tiene en cuenta en el capítulo siguiente, de modelado y simulación en Comsol Multiphysics.

### 5.1.2 Relación de las magnitudes eléctricas con la frecuencia, la inductancia y el acoplamiento

Para entender la relación entre estas tres magnitudes con la respuesta del cargador, se han hecho dos bloques de simulaciones. Se mantiene constante el valor de la inductancia mutua para cada una de dichas simulaciones, y se hace variar el coeficiente de acoplamiento y la frecuencia de conmutación del sistema, con el fin de obtener una curva para cada coeficiente de acoplamiento dado. De esta manera, ambas simulaciones se llevan a cabo en un rango de frecuencias de entre 500 y 20000 Hz, obteniendo 6 curvas distintas, correspondientes a valores de  $k$  entre 0.15 y 0.9. En la primera simulación se toma una inductancia propia de 300  $\mu\text{H}$ , y de 100  $\mu\text{H}$  en la segunda. Este conjunto de resultados se obtiene con una resistencia interna de los devanados de 0.2  $\Omega$  y una resistencia de carga de 8  $\Omega$ .

Los resultados para  $L=300 \mu\text{H}$  son los siguientes:

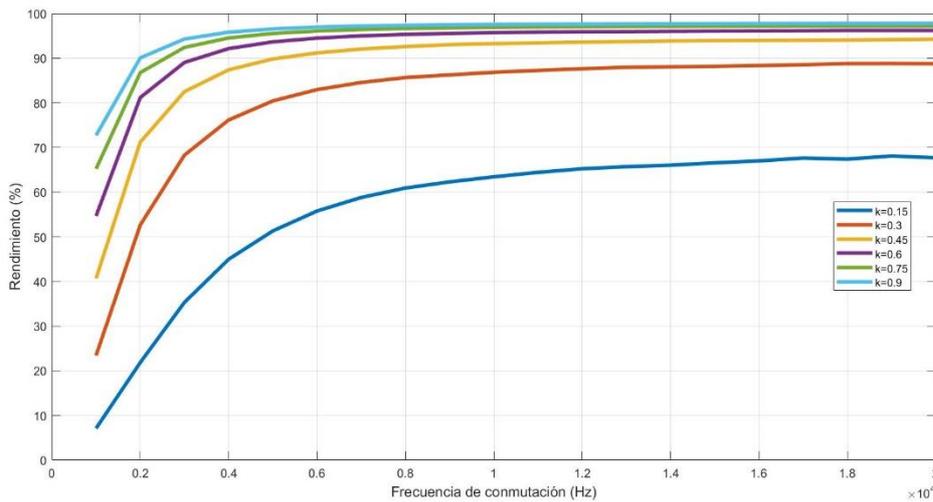


Figura 5-6: Relación entre el rendimiento y la frecuencia para  $L=300 \mu\text{H}$ .

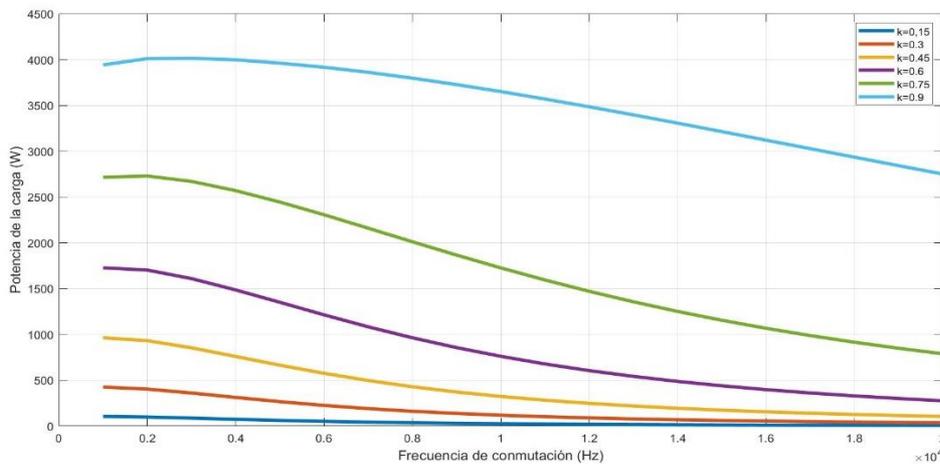


Figura 5-7: Relación entre la potencia de carga y la frecuencia para  $L=300 \mu\text{H}$ .

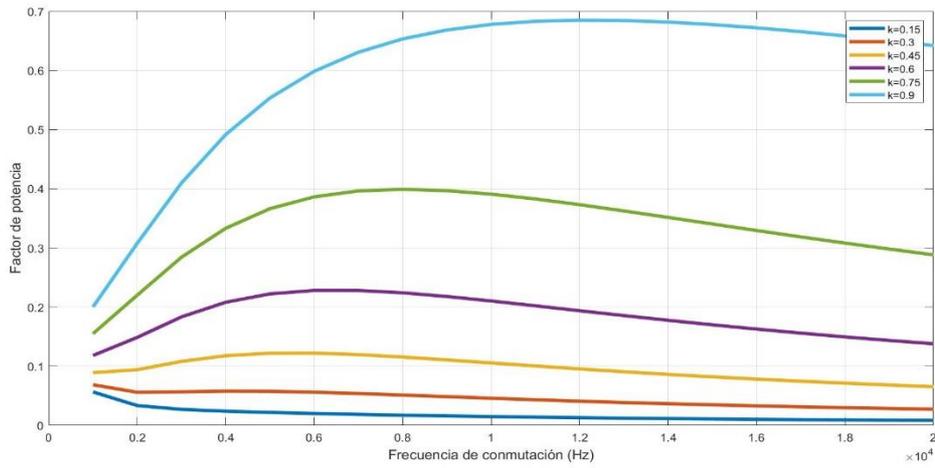


Figura 5-8: Relación entre el factor de potencia a la entrada y la frecuencia para  $L=300 \mu\text{H}$ .

Los resultados para  $L=100 \mu\text{H}$  son los siguientes:

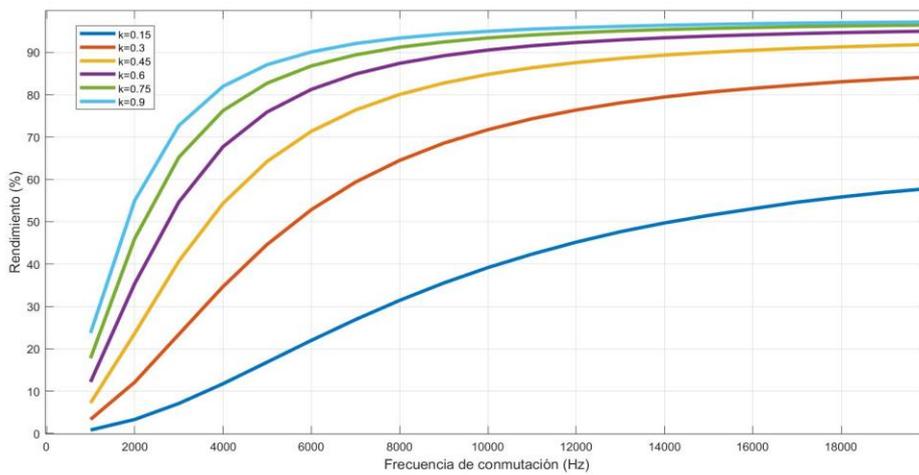


Figura 5-9: Relación entre el rendimiento y la frecuencia para  $L=100 \mu\text{H}$ .

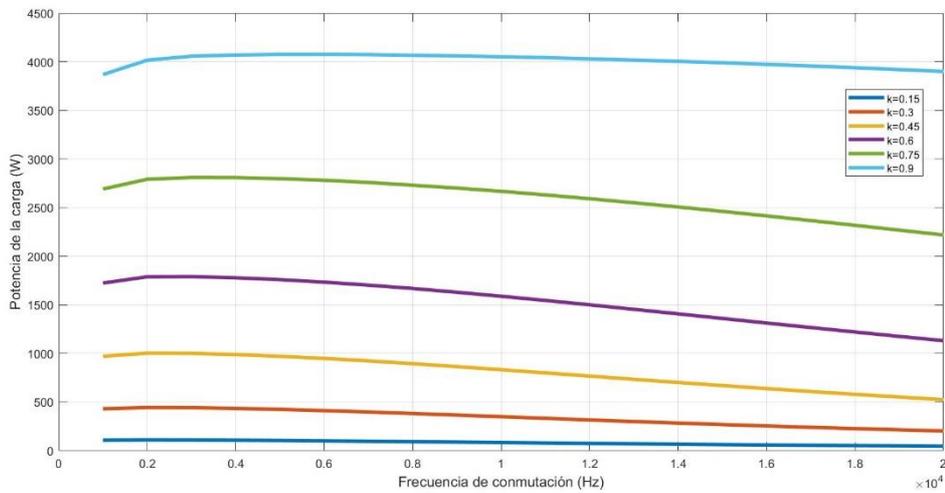


Figura 5-10: Relación entre la potencia de carga y la frecuencia para  $L=100 \mu\text{H}$ .

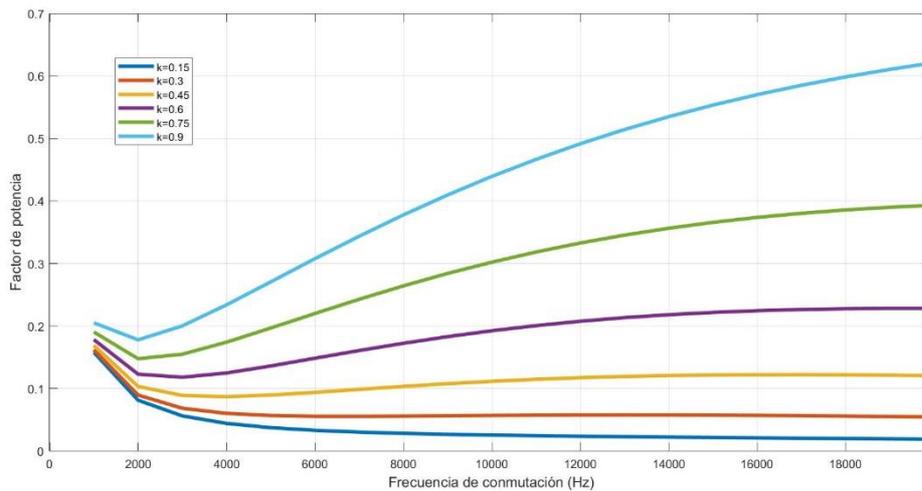


Figura 5-11: Relación entre el factor de potencia a la entrada y la frecuencia para  $L=100 \mu\text{H}$ .

Atendiendo a los resultados obtenidos, se aprecia con claridad cuáles son las limitaciones y los grandes inconvenientes de la transferencia inductiva de potencia.

En primer lugar, con respecto a la inductancia propia, los valores máximos alcanzables de rendimiento, potencia y factor de potencia apenas varían entre ambos casos. No obstante, sí es apreciable que dicho valor máximo se obtiene para frecuencias mayores cuanto menor es la inductancia propia de las bobinas.

En el caso de la potencia de carga, el lugar donde se obtiene su valor máximo coincide con la frecuencia a la cual el argumento de la impedancia del circuito coincide con la resistencia que modela la carga, según el Teorema de Máxima Transferencia de Potencia en Corriente Alterna, expresado en la Ecuación 5-3. La potencia máxima y la frecuencia a la que sucede depende, por tanto, del valor de la resistencia de carga que dado.

$$R_L(P_{\max}) = \sqrt{R_{TH}^2 + X_{TH}^2} \quad (5-3)$$

Uno de los grandes inconvenientes de esta tecnología de transferencia de energía es, como se aprecia en la Figura 5-7 y 5-10, la necesidad de un coeficiente de acoplamiento muy alto para llegar a alcanzar una potencia de carga alta. Para que dicho coeficiente sea tan elevado, las bobinas tienen que estar a una distancia muy pequeña entre sí, condición que es imposible de cumplir en circunstancias como la que caracterizan este estudio, ya que, en este caso, no existe posibilidad alguna de que ambos terminales estén tan cerca entre sí. Para un coeficiente de acoplamiento de 0.3, la potencia máxima que es capaz de transferir apenas alcanza los 500W.

Por otra parte, el rendimiento que se puede llegar a alcanzar en esta tecnología es elevado, incluso para acoplamientos no tan altos como en el caso de la potencia. No obstante, en este caso hay dos inconvenientes principalmente: en primer lugar, el rendimiento máximo no se alcanza en el mismo punto que la potencia máxima, con lo que sería necesario elegir entre un buen rendimiento con poca potencia transmitida o viceversa. En segundo lugar, tal y como refleja la ecuación 5-1, el rendimiento se obtiene a partir exclusivamente de la relación entre las potencias activas de entrada y salida del cargador, lo cual no refleja el papel de la potencia reactiva. Para hacer visible esto, es útil estudiar el factor de potencia a la entrada del cargador.

Estudiando los resultados obtenidos en la Figura 5-8 y 5-11 es posible llegar a la conclusión de uno de los grandes problemas relacionados con esta tecnología: la gran cantidad de energía reactiva necesaria para lograr traspasar energía entre las bobinas acopladas. La presencia de esta energía reactiva está relacionada directamente con la inductancia propia de los devanados.

El factor de potencia alcanzado en este escenario de carga es, en el mejor de los casos, de en torno a 0.7. No obstante, dicho máximo se obtiene en una zona de frecuencias en las que la potencia de carga es mucho menor que la potencia máxima alcanzable, lo cual es de nuevo un inconveniente. Además, el factor de potencia es muy dependiente de el coeficiente de acoplamiento, con lo que, a menos que se tenga una  $k$  muy cercana a la unidad, el factor de potencia va a ser muy pequeño.

La consecuencia principal de tener un factor de potencia bajo es que se necesitaría una corriente muy elevada a la entrada del cargador, produciendo problemas en el cableado tanto del dispositivo en sí como de la red. Más allá de esto, la energía reactiva no produce trabajo, con lo cual, cuanto más cercano a uno sea el factor, mejor aprovechamiento de la corriente a la entrada se logrará para generar dicho trabajo.

No parece que el valor máximo del factor de potencia dependa del valor de la inductancia propia de las bobinas. Sin embargo, a menor valor de dicha inductancia, a mayor frecuencia se alcanza la mejor relación entre potencia activa y reactiva.

A modo de conclusión de esta simulación, los resultados dejan claro que la transferencia inductiva de potencia no es un método eficaz para el empleo en las circunstancias de estudio. En primer lugar, la energía reactiva a la entrada del cargador es muy elevada sin que se haga uso de otros elementos eléctricos para reducirla, siendo este un problema grave. Además, el valor máximo de potencia se alcanza en una zona en la que el rendimiento no es alto del todo, y en la cual la reactiva necesaria para la transferencia es muy elevada. En segundo y último lugar, es necesario un acoplamiento entre bobinas muy elevado para lograr una buena potencia de carga, aunque, incluso en el caso de tener un coeficiente de acoplamiento cercano a uno, el problema de la energía reactiva persiste. Además, no es posible lograr un enclavamiento tan elevado en este caso en concreto, ya que, al encontrarse la motocicleta a una cierta distancia del suelo, el acoplamiento disminuye notablemente.

Para hacer posible la aplicación de la tecnología inalámbrica a este caso práctico, y resolver los problemas antes mencionados, se propone el empleo de resonancia mediante condensadores en ambos devanados.

## 5.2 Empleo de la resonancia para mejorar la transferencia inalámbrica de energía

### 5.2.1 Concepto de resonancia en el ámbito eléctrico

La resonancia, asociada a un sistema eléctrico, es el fenómeno que se produce en cierto circuito eléctrico cuando los efectos de los elementos inductivos y capacitivos de este interfieren y están relacionados entre sí. La respuesta de un circuito con bobinas y condensadores depende en gran parte de la frecuencia dada, de tal manera que, sin que varíe el valor de inductancia ni de capacitancia de este, el valor de la impedancia del circuito varía según su frecuencia.

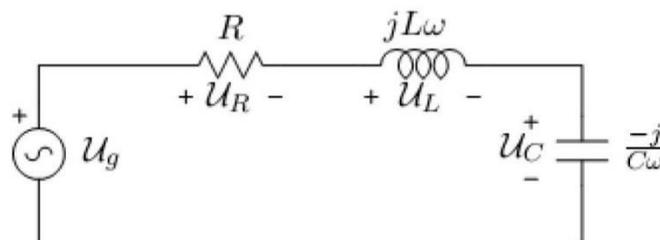


Figura 5-12: Ejemplo de circuito resonante serie

Las ecuaciones planteadas corresponden a un circuito resonante serie, en el que bobina, condensador y resistencia se encuentran en serie entre sí. No obstante, el planteamiento en el caso de circuito resonante paralelo es dual a este.

El fenómeno de la resonancia puede ocurrir de forma involuntaria, mediante la interacción entre inductores y capacitores propios del circuito, o de forma forzosa, añadiendo elementos a un determinado circuito para variar su respuesta según se desee. Esto último es utilizado en diversas aplicaciones en el ámbito de la ingeniería eléctrica, como en filtros electrónicos o en protecciones eléctricas como la bobina Petersen.

En el caso de la transferencia de carga inalámbrica, el empleo de resonancia tiene como finalidad resolver gran parte de los problemas intrínsecos de esta tecnología, los cuales se trataron en el punto anterior.

Si se tiene un circuito eléctrico no lineal, compuesto por una resistencia, un condensador y una bobina, existe una frecuencia concreta a la cual los efectos de estos capacitivos e inductivos se compensan entre sí, haciendo que la impedancia global del mismo sea puramente resistiva en ese punto. Esta es la frecuencia de resonancia, la cual se obtiene a partir de la Ecuación 5-4.

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5-4)$$

La característica principal que tiene un circuito a frecuencia resonante tiene que ver con la potencia activa y reactiva cedida por la fuente de este. En ese punto, sucede que la energía reactiva consumida por la bobina y la cedida por el condensador coinciden, con lo que, globalmente se anulan entre sí, produciendo que la fuente solo entregue potencia activa al sistema. Al anularse los efectos almacenadores de energía, la impedancia del circuito es puramente resistiva en ese punto.

$$Z_{cto} = R + j\left(L\omega - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5-5)$$

$$Q_{cto} = \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) I^2 \quad (5-6)$$

Siendo  $\omega = 2\pi f$ , relacionando las ecuaciones 5-4, 5-5 y 5-6, se llega a:

$$Z_{cto} = R \Rightarrow Q_{cto} = 0$$

Tal y como se trató en el apartado anterior, los mayores problemas relacionados con la transferencia de carga inalámbrica de potencia son, entre otros, la enorme cantidad de potencia reactiva necesaria para transferir energía entre ambas bobinas, produciendo esto una corriente muy elevada en la bobina primaria, y una potencia y rendimiento bajos en conjunto. Sin embargo, la resonancia resulta ser una gran solución a dicho problema. Al incluir uno o varios elementos en el circuito, de tal forma que resuenen con la inductancia propia de cada uno de los devanados, la potencia reactiva pasaría a ser nula en ambos, produciendo esto una gran mejora en el rendimiento, potencia transferida y factor de potencia a la entrada del conjunto.

Para lograr dicho efecto, es importante encontrar la frecuencia de conmutación correcta para que los efectos sean los deseados.

## 5.2.2 La autorresonancia de una bobina

A la hora de diseñar el sistema resonante que se añade al circuito, lo más común y simple resulta colocar un condensador en cada uno de los devanados, de tal forma que el condensador resuene con la inductancia propia de cada bobina. No obstante, es posible lograr el mismo efecto sin necesidad de añadir ningún elemento externo.

Una bobina real tiene cierto efecto capacitivo. Aunque la capacitancia de una bobina se suele despreciar debido a su bajo peso en su conjunto, sus efectos son apreciables en determinadas frecuencias de conmutación. El efecto capacitivo se aprecia claramente conociendo el circuito equivalente de una bobina real.

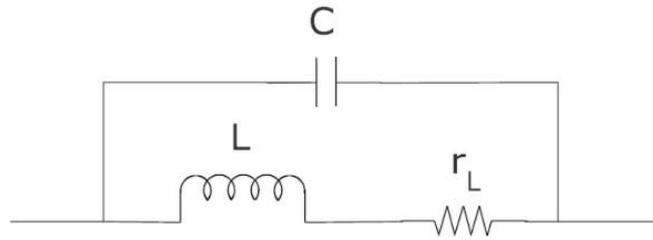


Figura 5-13: Circuito equivalente de una bobina real.

A frecuencias bajas, el efecto del condensador es prácticamente nulo, siendo el valor de este despreciado con respecto a la inductancia y a la resistencia interna de la bobina. No obstante, a frecuencias muy altas, del orden de los megahercios, el efecto capacitivo puede resultar de igual magnitud al efecto inductivo. En ese espectro, existe una frecuencia de resonancia, a la cual se compensan los efectos inductivos y capacitivos del devanado. A este efecto resonante, sin la necesidad de inclusión de elementos externos, se le denomina autorresonancia.

Mediante el software Comsol, se ha simulado la autorresonancia de una bobina común a modo de ejemplo, de seis vueltas, cinco milímetros de grosor de cobre y quince milímetros de distancia entre conductores cada vuelta.

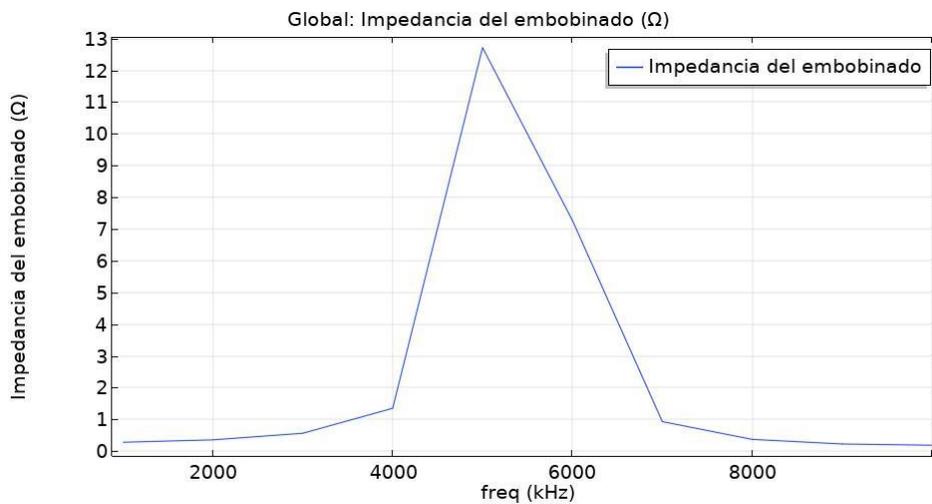


Figura 5-14: Impedancia de una bobina en autorresonancia.

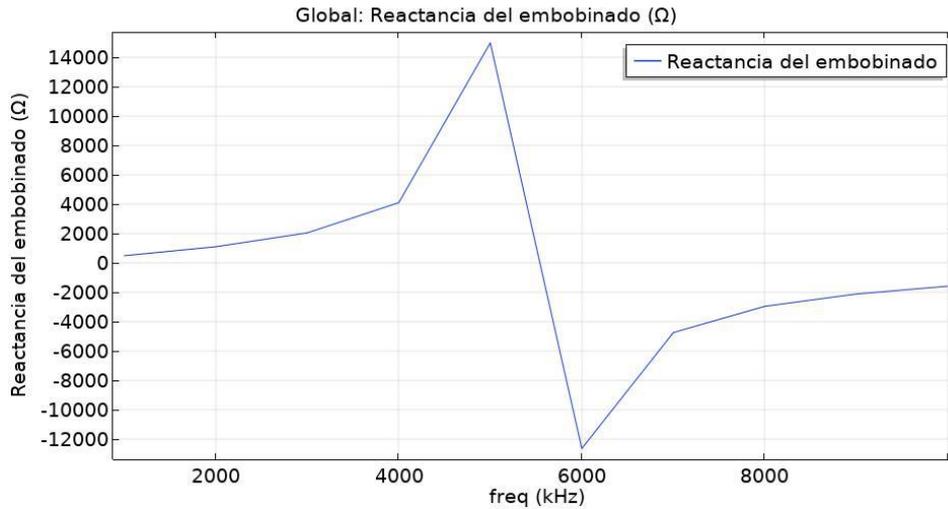


Figura 5-15: Reactancia de una bobina en autorresonancia.

En este caso, la frecuencia de resonancia es muy elevada, en torno a 5 MHz, lugar en el cual la reactancia global de la bobina es nula. Es posible, por tanto, solucionar los problemas encontrados en la transferencia inalámbrica de potencia sin necesidad de añadir condensadores ni circuitos resonantes, simplemente elevando la frecuencia de conmutación.

No obstante, aunque este método se puede llevar a la práctica, tiene una serie de problemas asociados. La necesidad de tener una frecuencia de conmutación tan elevada incrementa el gasto en los elementos de electrónica de potencia. Por otro lado, la resistencia en un conductor aumenta conforme lo hace la frecuencia, según el efecto pelicular. Además, a mayores frecuencias de conmutación mayor riesgo de salud existe para las personas debido a las variaciones de campo magnético. Todo esto hace que, en la mayoría de las aplicaciones prácticas, se añada un circuito resonante. Por ello, no se va a emplear la autorresonancia como solución, sino un circuito resonante basado en condensadores.

### 5.2.3 Sistema resonante escogido

Para lograr el efecto de la resonancia, existen múltiples opciones a la hora de diseñar el circuito resonante. La opción más simple, y muy efectiva, consiste en añadir un condensador en cada bobina, de tal forma que, a cierta frecuencia, el efecto inductivo se anule con el capacitivo. Existe cuatro tipos de topologías que funciona de esta manera, la serie-serie, la serie-paralelo, la paralelo-serie y la paralelo-paralelo, en función de si el condensador de el terminal primario y secundario se incluyen en el circuito de forma serie o paralelo [40].

En la referencia encontrada de otros diseños de transferencia resonante de potencia [41] [42], el esquema más habitual en carga de vehículos eléctricos suele ser la topología serie-serie, la cual se escoge también en este trabajo .

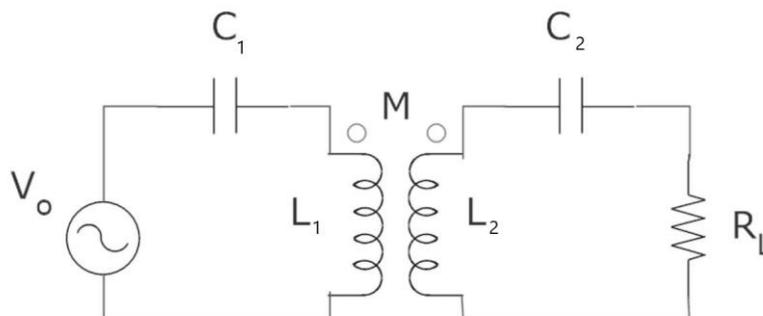


Figura 5-16: Sistema de transferencia resonante de potencia serie-serie.

El sistema resonante serie-serie tiene una serie de ventajas que hacen que sea el más adecuado para gran parte de las aplicaciones de potencia media, como la recarga de los vehículos eléctricos. El condensador en serie en el secundario se suele emplear cuando la resistencia de la carga es pequeña, como es el caso de estudio, para que el factor de calidad del circuito secundario sea elevado de esa forma. Por el contrario, el secundario en paralelo es más común cuando dicha resistencia es más elevada, para mantener un factor de calidad elevado en resonancia en paralelo [40].

Por otro lado, a diferencia de las otras tres topologías, el valor del condensador primario no depende del valor de la carga ni de la inductancia mutua. Esto hace que la frecuencia de resonancia de ambos lados dependa exclusivamente de la inductancia propia y del condensador conectado de estos [43]. Esto simplifica en gran medida el sistema, hallándose la frecuencia de resonancia de forma mucho más sencilla que en otras topologías, según la Ecuación 5-4. De esta forma, aunque varíe la posición o distancia a la hora de la carga real del sistema, el valor del condensador será siempre el óptimo que se ha calculado para la aplicación. Además, la eficiencia y factor de potencia que se alcanzan con el sistema serie-serie es superior a las otras tres alternativas [44].

Para profundizar en lo que sucede en el sistema resonante serie-serie, es muy útil estudiar el sistema de bobinas acopladas como fuentes dependientes, de tal forma que se sustituye las bobinas en ambos terminales por una fuente de tensión dependiente en ambos lugares. De esta forma, el elemento primario y secundario se estudian de forma que cada uno sea un circuito independiente respecto al otro [45]. Las fuentes dependientes tienen como objetivo aportar a cada uno de los circuitos laparte referente a la inductancia mutua entre ellos, es decir, el término relacionado con la inductancia mutua de las ecuaciones 4-6 y 4-7, en el dominio fasorial.

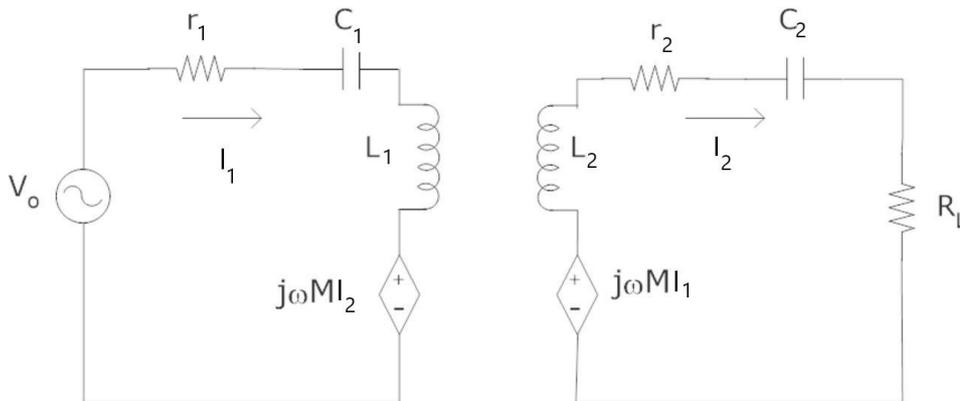


Figura 5-17: Circuito resonante con bobinas acopladas como fuentes dependientes.

Cuando la frecuencia de los circuitos coincide con la frecuencia de resonancia, los efectos capacitivos e inductivos se anulan entre sí. De cara al circuito equivalente, esto es lo mismo que quitar la bobina y el condensador en ambos circuitos, quedando de esta manera ambos circuitos puramente resistivos. Además, resulta de gran utilidad cambiar la fuente dependiente del circuito primario por una impedancia equivalente. De esta forma, es posible conocer la dependencia paramétrica que se tiene en esta topología de circuito.

Haciendo bucle en el circuito secundario, se obtiene el valor de la intensidad que circula por él. Sustituyendo dicho valor en la fuente dependiente, tenemos la mencionada impedancia equivalente que ve el circuito primario

$$I_2 = \frac{-j\omega M I_1}{r_2 + R_L} \quad (5-7)$$

$$Z_1 = \frac{\omega^2 M^2}{R_L + r_2} \quad (5-8)$$

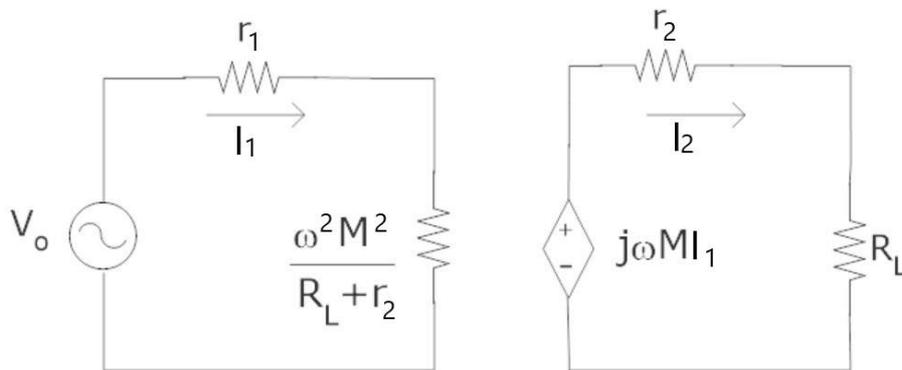


Figura 5-18: Circuito resonante con bobinas acopladas como fuentes dependientes 2.

En la topología serie-serie, la impedancia equivalente que ve el circuito primario es puramente resistiva. Esto es algo que no sucede si el secundario se encuentra en paralelo, caso en el cual la impedancia vista desde el primario incluye cierto valor inductivo proveniente del secundario. Esto supone una gran ventaja para la topología escogida, ya que el valor del condensador escogido siempre va a anular cualquier efecto inductivo en el circuito primario, sin depender de ningún otro factor salvo la inductancia propia y la frecuencia. Si se tuviera un secundario en paralelo, por mucho que se anule la inductancia propia de la bobina con el condensador primario, quedaría siempre cierto carácter inductivo en el circuito primario, limitando de esta forma el factor de potencia y el rendimiento de este.

Por otro lado, es importante apreciar que el valor de la impedancia equivalente vista por el primario aumenta conforme aumenta la inductancia mutua entre bobinas y conforme aumenta la frecuencia de conmutación, así como disminuye con respecto al aumento de carga. Esta dependencia será clave para entender los resultados que se muestran en los apartados que siguen, donde se tratan y detallan en profundidad.

#### 5.2.4 Simulación del cargador con resonancia en Matlab y relación de las magnitudes eléctricas con la resistencia interna de las bobinas

De cara a la obtención de los resultados tras incluir el sistema resonante en el conjunto, este ha sido simulado haciendo uso de Matlab Simulink, de la misma manera que se han obtenido los resultados del sistema sin resonancia. De esta manera, lo obtenido de esta simulación se podrá comparar de forma sencilla con los resultados de la primera. El esquema de la simulación es el siguiente:

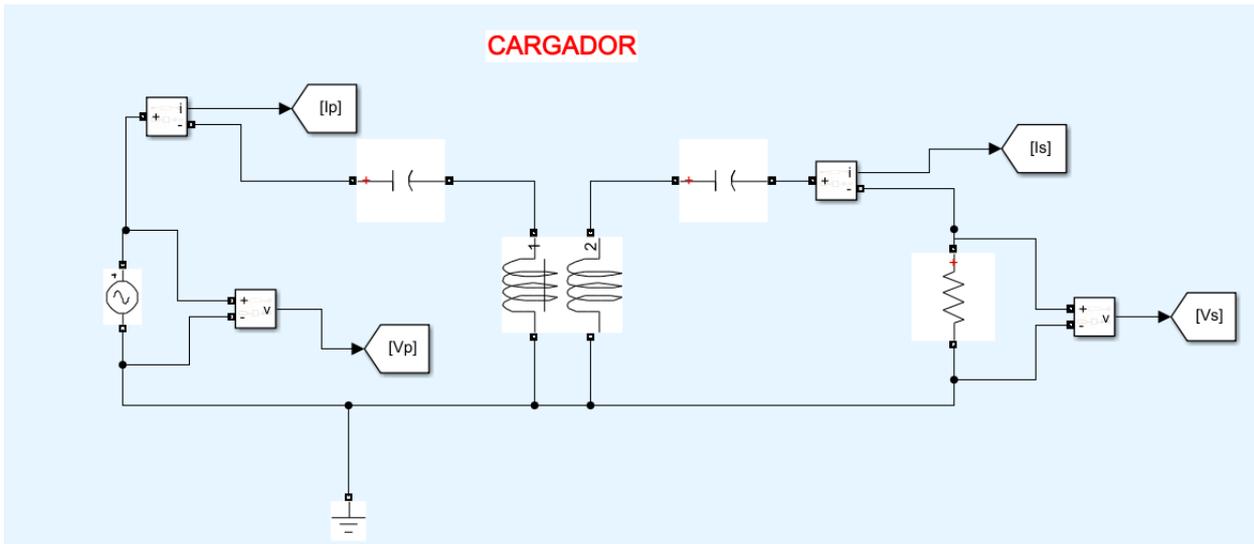


Figura 5-19: Esquema de bloques del sistema con resonancia en Matlab Simulink.

Principalmente, la gran diferencia entre esta simulación y la primera son los condensadores en serie colocados tanto en la parte primaria como en la secundaria. Estos condensadores en serie conforman la topología escogida de cara a la obtención de resonancia en el circuito para este estudio. El resto de los elementos del circuito no han variado.

En primer lugar, se pretende estudiar cómo afecta a las magnitudes eléctricas del cargador en función de la resistencia interna de ambas bobinas. Para ello, se simula la variación de la potencia a la entrada y a la salida del cargador, y su rendimiento global, según aumenta la mencionada resistencia. Los parámetros de la simulación son los mismos que los escogidos en la anterior realizada sin resonancia: la resistencia interna de los devanados se hace variar entre  $0.05 \Omega$  y  $1 \Omega$ , la frecuencia del sistema es de  $30 \text{ kHz}$ , el coeficiente de acoplamiento se toma de  $0.5$ , y la inductancia propia de los inductores se escogen de  $200 \mu\text{H}$ . En cuanto al valor de los condensadores, este se ha escogido de tal forma que el sistema se encuentre en resonancia para la frecuencia dada de  $30 \text{ kHz}$ , según la Ecuación 5-4.

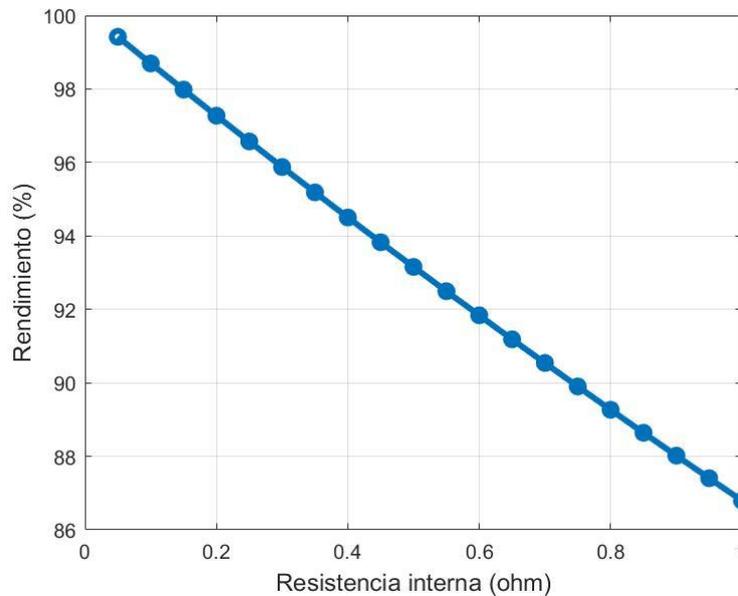


Figura 5-20: Rendimiento del sistema con resonancia con respecto a la resistencia interna de las bobinas.

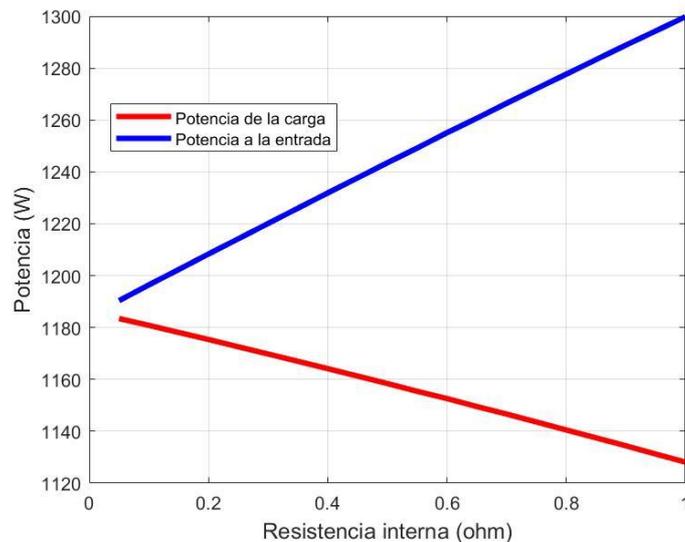


Figura 5-21: Potencia del sistema con resonancia con respecto a la resistencia interna de las bobinas

Como se puede apreciar en las gráficas resultantes, una resistencia interna alta en las bobinas conlleva una bajada en las prestaciones del cargador. A mayor resistencia, menor rendimiento global se obtiene y mayor potencia a la entrada del cargador es necesaria para una menor potencia de carga final, causado por un aumento en las pérdidas.

No obstante, la inclusión de la resonancia en el sistema hace mejorar mucho el mencionado problema. En primer lugar, se aprecia que la potencia de carga obtenida es muy superior al caso del sistema no resonante, en torno a 10 veces mayor, y, en segundo lugar, la caída en el rendimiento global es mucho menos pronunciada en este caso. En el estudio sin condensadores, el rendimiento cae en torno a un 40%, mientras que, al añadir resonancia al sistema, la bajada resulta de tan solo un 13%.

A pesar de las mejoras mencionadas atribuidas al efecto de los condensadores añadidos al circuito, la reducción de la resistencia interna de ambas bobinas será uno de los objetivos que se tendrán en cuenta a la hora su diseño.

### 5.2.5 Relación de las magnitudes eléctricas con la frecuencia, la inductancia y el acoplamiento

Por último, se pretende entender la relación entre las magnitudes eléctricas del cargador con respecto a la frecuencia, inductancia propia de las bobinas y coeficiente de acoplamiento entre las mismas. Las magnitudes de estudio son el factor de potencia a la entrada, la potencia reactiva a la entrada, la potencia activa a la salida y el rendimiento global del conjunto. A través de los distintos resultados, se busca comprender las ventajas en el ámbito práctico que conlleva el uso de resonancia en la transferencia inductiva de potencia.

Con respecto a las simulaciones, estas se obtienen mediante un barrido paramétrico con respecto a la frecuencia del sistema. De esta forma, en cada gráfica la magnitud de estudio se representa con respecto a la frecuencia como variable independiente. Dicha frecuencia de conmutación está, en la totalidad de los resultados, en el entorno de la frecuencia de resonancia tomada en cada caso, para poder estudiar como se comporta el sistema cuando se encuentra en resonancia y cuando tiene una frecuencia menor o mayor a la resonante.

Se proponen dos bloques de simulaciones, a distinta frecuencia de resonancia cada uno, para apreciar el efecto del valor de la frecuencia característica sobre las distintas magnitudes. El primer bloque de resultados se obtiene para una frecuencia de resonancia de 30 kHz, y el segundo bloque para 60 kHz.

Dentro de cada bloque de frecuencia característica, se obtienen los distintos resultados de cada magnitud en función del coeficiente de acoplamiento, de tal manera que, en cada gráfica resultante, existen tres curvas, correspondientes a los resultados para un coeficiente de acoplamiento de 0.1, 0.2 y 0.3. De esta manera, se pretende estudiar el peso que tiene la inductancia mutua en las magnitudes del sistema.

Por último, para comprender el efecto que tiene el valor de la inductancia propia en las magnitudes eléctricas, se simula el sistema con dos valores diferentes de inductancia de las bobinas. Para simplificar el estudio, se toma como partida que ambas bobinas tienen el mismo valor de inductancia. Por otro lado, se propone simular el sistema para una inductancia de  $L=200 \mu\text{H}$  y  $L=300 \mu\text{H}$ . De esta manera, se hacen 3 simulaciones en total: la primera, a 30 kHz de frecuencia de resonancia y  $L=200 \mu\text{H}$ , la segunda, con la misma inductancia que la primera ( $L=200 \mu\text{H}$ ) y al doble de frecuencia de conmutación, 60 kHz, y la tercera, con la misma frecuencia que la primera (30 kHz) pero aumentando la inductancia de sus bobinas hasta los  $L=300 \mu\text{H}$

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la primera simulación del sistema, a una frecuencia de resonancia de 30 kHz e inductancia propia de  $L=200 \mu\text{H}$ :

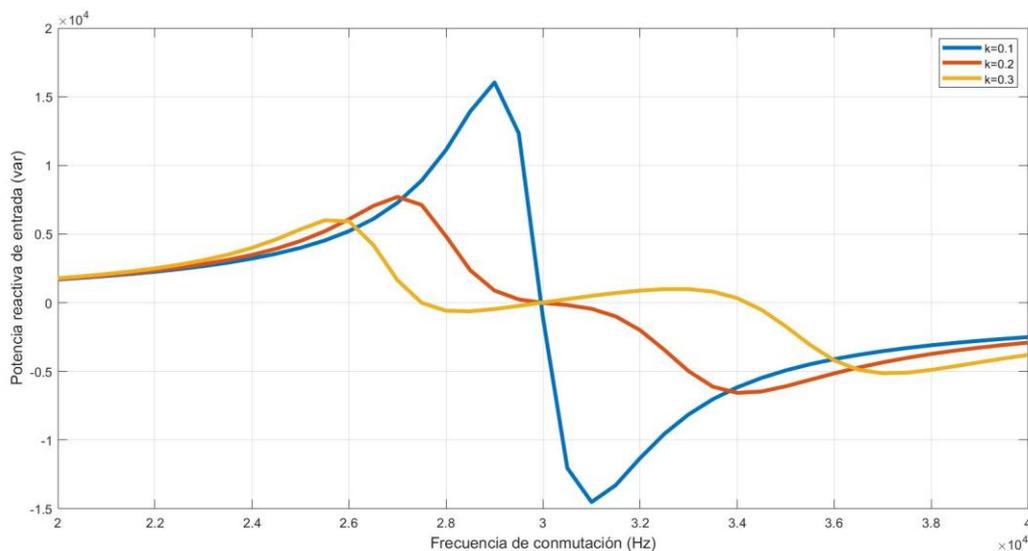


Figura 5-22: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

En primer lugar, la potencia reactiva a la entrada del cargador, tal y como se demostró a través de la Ecuación 14 anteriormente, es cero. Esto se cumple cuando la frecuencia de conmutación coincide con la frecuencia de resonancia. Como se puede apreciar, la nulidad de esta magnitud se cumple ante cualquier valor de coeficiente de acoplamiento.

No obstante, se puede observar como la respuesta del sistema cuando este se encuentra a una frecuencia distinta a la resonante varía según lo hace el acoplamiento entre inductores. A menor coeficiente de acoplamiento, mayor es el pico de potencia reactiva que se tiene en el espectro de frecuencias, y más cerca de la frecuencia de resonancia se producen. Es decir, a mayor acoplamiento, más constante es la respuesta en potencia reactiva en el entorno de la frecuencia de resonancia.

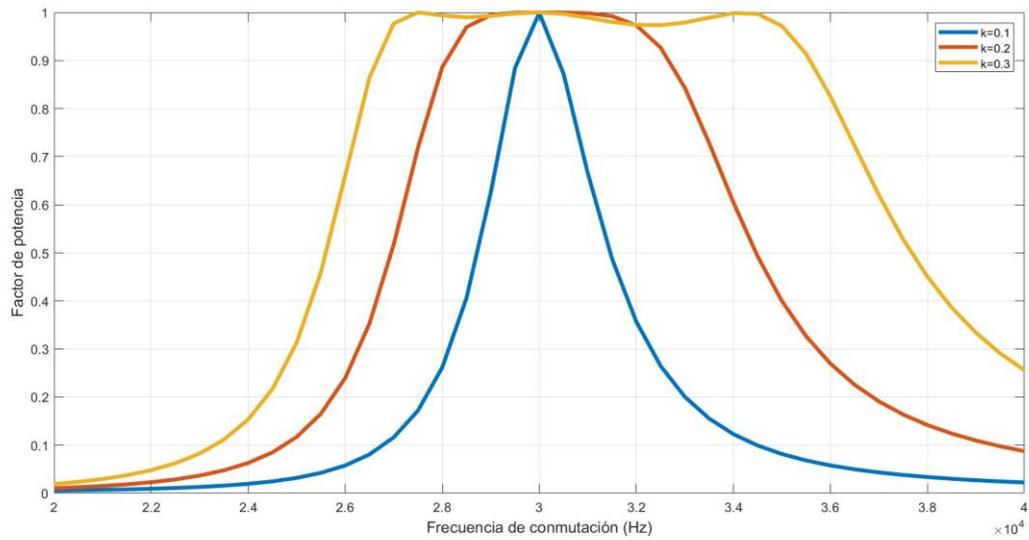


Figura 5-23: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

A causa de la potencia reactiva nula a la entrada del cargador, el factor de potencia a la entrada del cargador tiene valor unidad cuando el sistema se encuentra en resonancia. Es decir, en ese punto, la potencia que demanda el cargador de la red es puramente activa. Esto supone un gran avance, ya que, en consecuencia, la corriente que circulará desde la red a la bobina primaria es mucho menor en este caso. De esta forma, el empleo de resonancia en el cargador soluciona uno de los mayores problemas que tenía el cargador inicial sin condensadores.

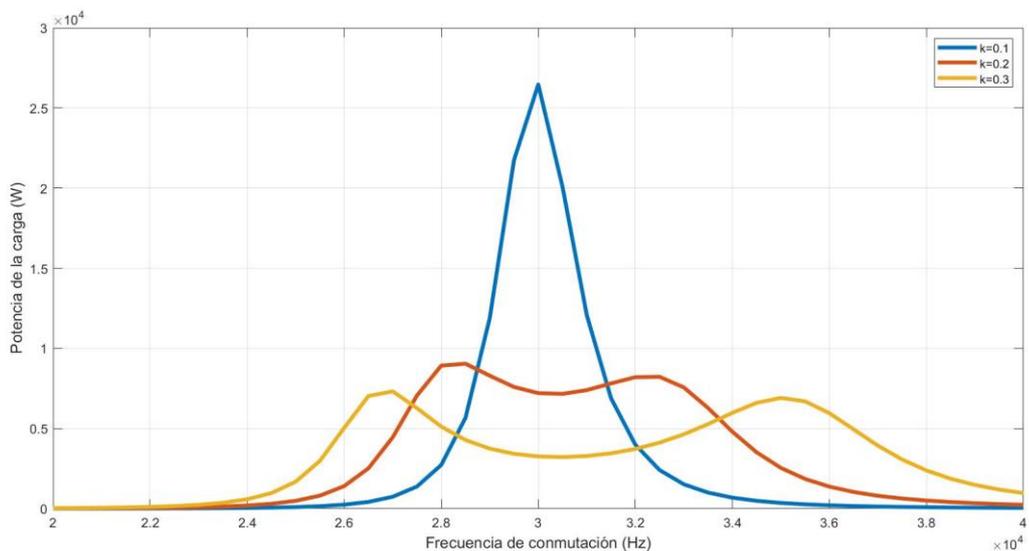


Figura 5-24: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

Por otro lado, la potencia de carga alcanzada es muy superior gracias a la inclusión de la resonancia en el sistema. La potencia máxima obtenida en el sistema sin resonancia era de en torno a 4 kW, mientras que, en la simulación más reciente, esta llega hasta los 25 kW, e incluso tiene aún un margen amplio para crecer.

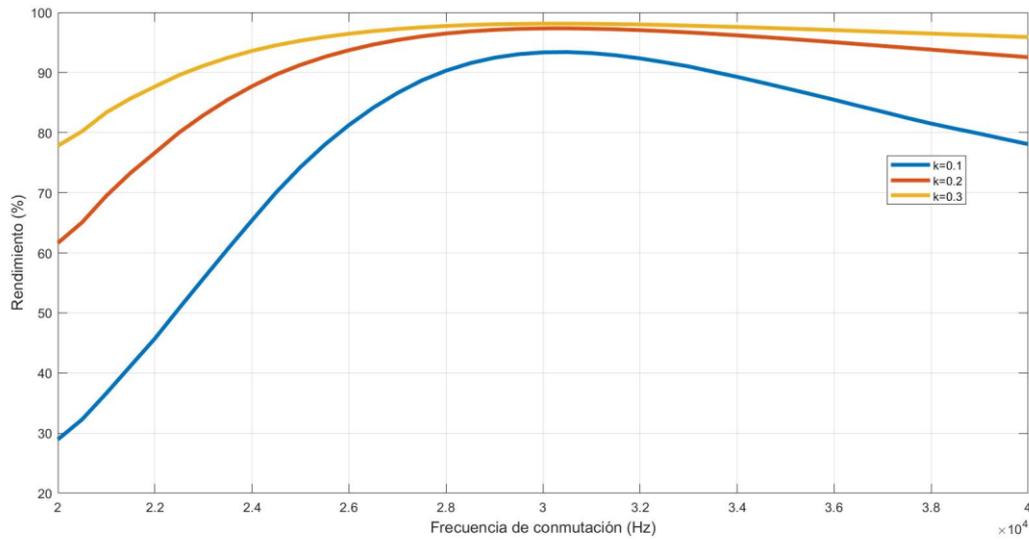


Figura 5-25: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

Por último, el rendimiento global del sistema con resonancia es muy alto. Aunque en el sistema basado en transferencia inductiva es posible obtener un valor de rendimiento alto, es necesario una inductancia mutua muy elevada para lograrlo, hecho que no es compatible con este cargador. Al añadirle condensadores al sistema, el rendimiento obtenido es muy alto, y es mucho menos dependiente del acoplamiento entre bobinas. De esta forma, aunque el rendimiento siga aumentando conforme lo haga la inductancia mutua, es posible obtener un rendimiento superior al 90% incluso con coeficiente de acoplamiento menores de 0.1. Por ello, el rendimiento no será un motivo de peso a la hora del diseño final de las bobinas, ya que su valor es muy alto y poco dependiente de las características de estas.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de la segunda simulación del sistema, a una frecuencia de resonancia de 60 kHz e inductancia propia de  $L=200 \mu\text{H}$ :

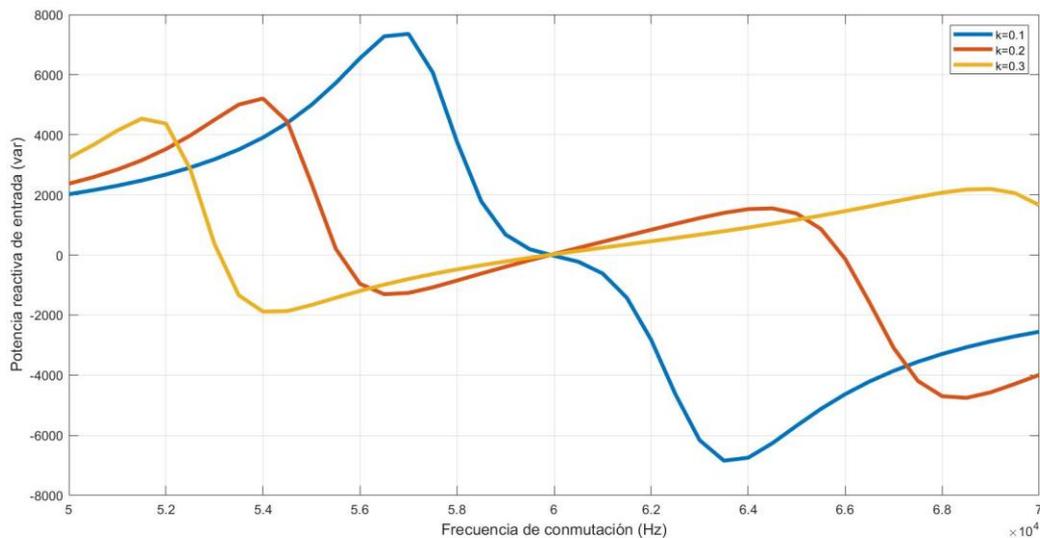


Figura 5-26: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=60 \text{ kHz}$ .

Al comparar lo resultante en la Figura 5-26 con la Figura 5-22, es observable que cuanto mayor es la frecuencia más estable resulta ser la respuesta de la potencia reactiva en el entorno de la frecuencia resonante. Además, menor es el valor máximo de reactiva para las tres curvas de acoplamiento dadas, y menor diferencia entre curvas existe. Lo más trascendental es el valor nulo de potencia reactiva cuando el sistema se encuentra en resonancia.

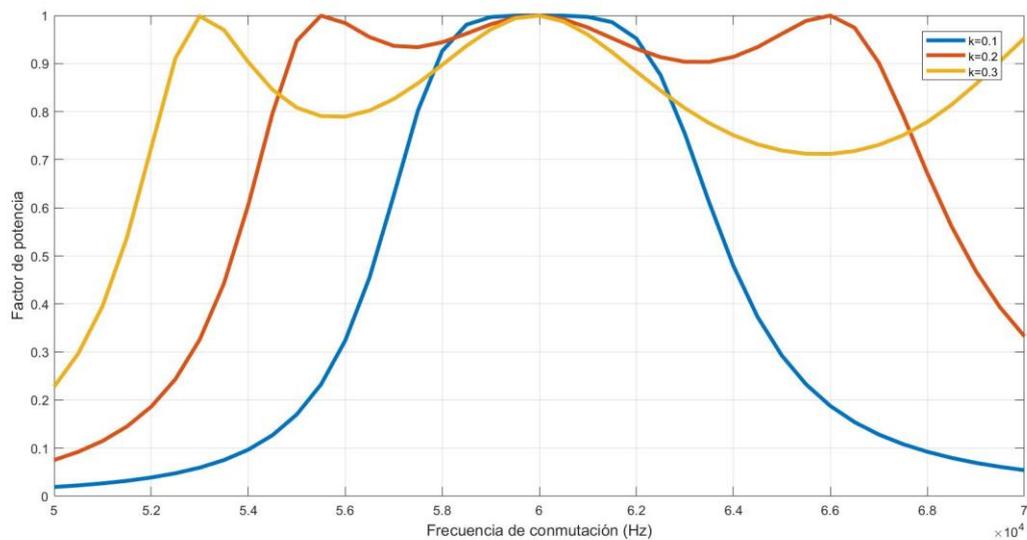


Figura 5-27: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=60 \text{ kHz}$ .

En los resultados del factor de potencia se puede captar el mismo efecto que en la potencia reactiva. Al aumentar la frecuencia manteniendo el resto de los valores constantes, las curvas resultantes se expanden en el espectro de frecuencias. Sin embargo, lo más importante de lograr se sigue cumpliendo: el factor de potencia a la entrada del cargador sigue teniendo valor uno.

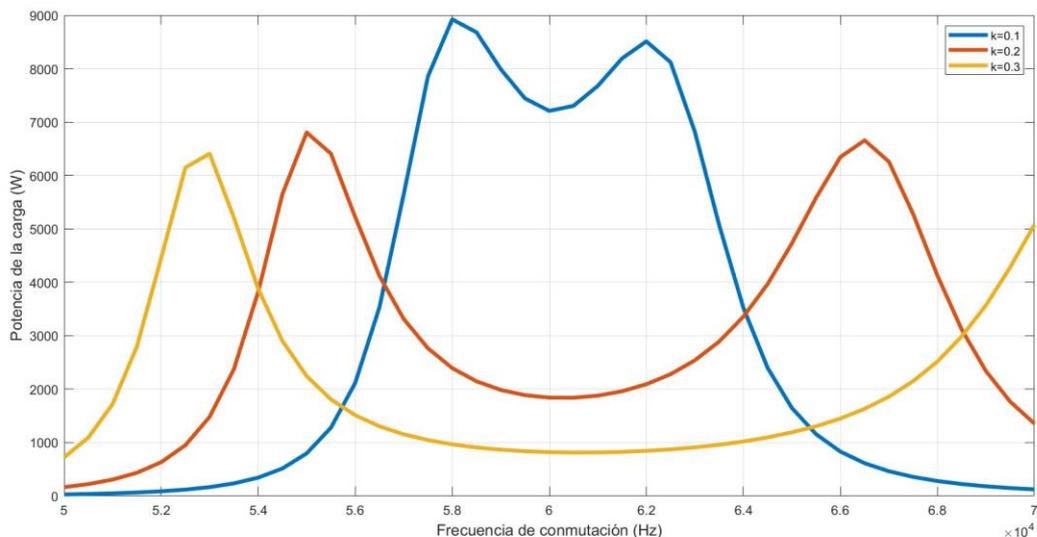


Figura 5-28: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=60 \text{ kHz}$ .

Con respecto a la potencia de carga, se puede observar que su valor disminuye conforme aumenta la frecuencia de resonancia del sistema. El motivo de que la potencia de salida sea inversamente proporcional a la frecuencia característica es el mismo por el que es inversamente proporcional respecto al coeficiente de acoplamiento. La razón detrás de este hecho se entiende a través de la Ecuación 18 y la Figura 5-18. Según la ecuación, la impedancia equivalente en el primario del sistema serie-serie cuando se encuentra en resonancia es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y de la inductancia mutua, e inversamente proporcional a la resistencia de carga. Por ello, si ambas magnitudes aumentan, así lo hará la impedancia equivalente, resultando esto en una menor corriente circulando por la bobina primaria. A menor corriente primaria, menor potencia se logrará, y, por último, menor potencia de salida se tiene.

A nivel práctico, esta característica de los sistemas serie-serie resulta sorprendente, ya que, a menor acoplamiento de las bobinas, mayor potencia se logra. Esto choca con lo que sucede en el sistema sin resonancia, donde a mayor acoplamiento se logra obtener mayor potencia de carga. Esto sucede porque, en la transferencia resonante de potencia, las bobinas quedan ligadas entre sí a través de la resonancia aportada.

De esta manera, ya no es necesario un acoplamiento muy elevado para lograr una buena respuesta del sistema. Además, esto abre la puerta a el empleo de la transferencia inalámbrica a distancias más amplias, así como una transferencia inalámbrica con sistema de carga rápida. De esta forma, la resonancia consigue solucionar otro de los grandes problemas de la transferencia inductiva de potencia: su necesidad de que las bobinas primarias y secundarias estuviesen muy cerca para poder transferir un valor aceptablemente alto de potencia.

La parte negativa de este hecho es la caída de tensión en la bobina secundaria, ya que esta es dependiente de la corriente que circula por la primaria, con lo que cuanto más potencia se quiera lograr mediante este método, mayor caída de tensión se tendrá en el inductor secundario.

Al igual que ocurría con la potencia reactiva y el factor de potencia, la respuesta del sistema en el espectro de frecuencias en torno a la resonancia es más estable cuando la frecuencia de resonancia es más elevada.

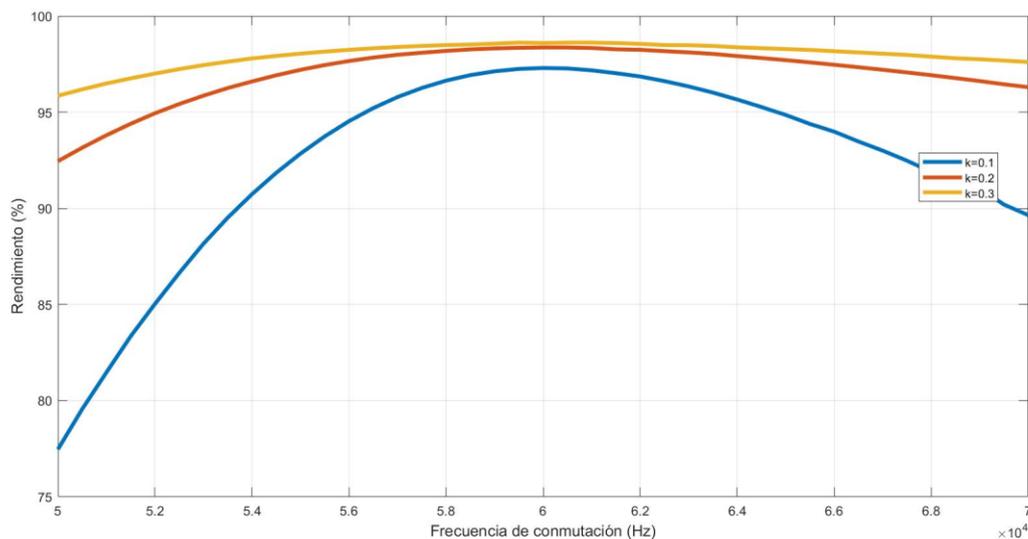


Figura 5-29: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con  $L=200 \mu\text{H}$  y  $f_r=60 \text{ kHz}$ .

En cuanto al rendimiento global del sistema, se puede apreciar como este aumenta al hacerlo la frecuencia. Esto sucede debido a que, como se ha explicado previamente, a mayor frecuencia de resonancia, mayor corriente circula por el circuito primario. Al circular mayor intensidad, aumentan las pérdidas por efecto Joule debido a la resistencia interna de las bobinas. No obstante, es evidente que la diferencia es mínima, ya que el rendimiento pasa de el 92% al 97% tras duplicar la frecuencia.

Este mismo motivo explica, por otro lado, por qué se obtiene mayor rendimiento al tener mayor acoplamiento, ya que la corriente primaria aumenta del mismo modo. Sin embargo, la diferencia es de nuevo pequeña, pasando del 97% de rendimiento con acoplamiento 0.1 al 98.5% con acoplamiento 0.3.

A continuación, por último, se muestran los resultados obtenidos de la tercera simulación del sistema, a una frecuencia de resonancia de 30 kHz e inductancia propia de  $L=300 \mu\text{H}$ :

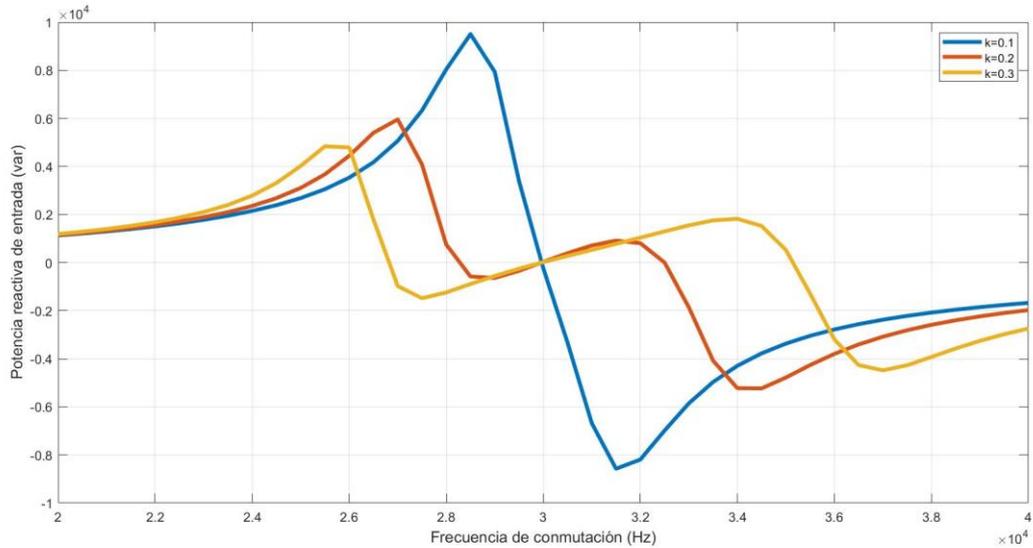


Figura 5-30: Potencia reactiva a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=300 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

Los resultados obtenidos muestran que el sistema se encuentra en un punto intermedio entre la primera y la segunda simulación. Se puede apreciar, principalmente, como se cumple de nuevo la nula potencia reactiva de entrada cuando el sistema funciona en resonancia. Mas allá de este hecho, el pico de reactiva resulta menor que en la primera simulación, pero mayor que en la segunda. Esto resulta una muestra de que el efecto de la inductancia mutua y de la frecuencia de resonancia en el sistema es similar.

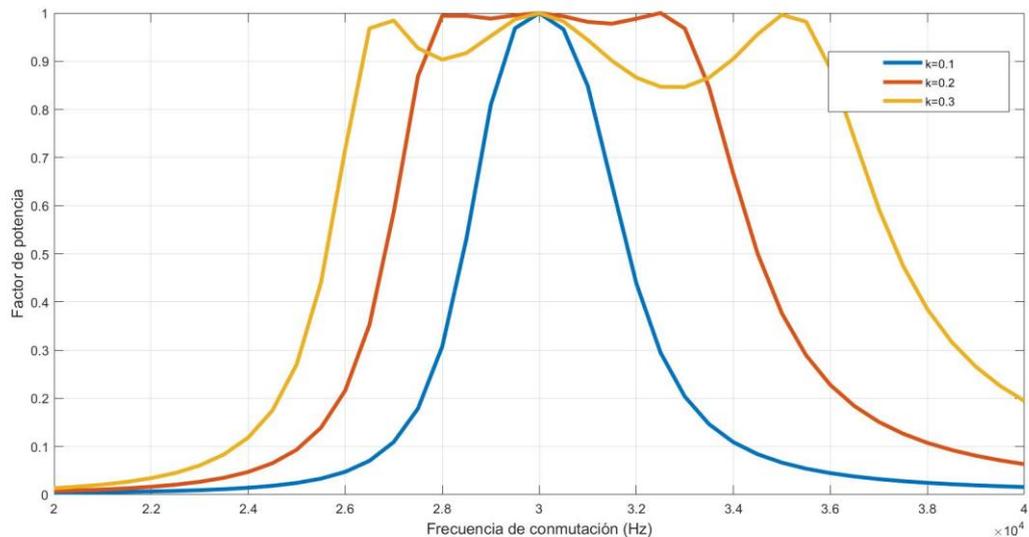


Figura 5-31: Factor de potencia a la entrada vs frecuencia de conmutación con  $L=300 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

En cuanto al factor de potencia, este sigue la misma tendencia que la potencia reactiva. Las curvas resultantes son menos picudas en torno a sus valores máximos con respecto a la primera simulación, pero lo son menos si se compara con la segunda simulación. Lo mismo sucede con la amplitud de la respuesta en el entorno cercano a la zona de resonancia. Como era de esperar, con el sistema en resonancia, el factor de potencia tiene como valor la unidad sin importar su grado de acoplamiento ni la frecuencia ni la inductancia.

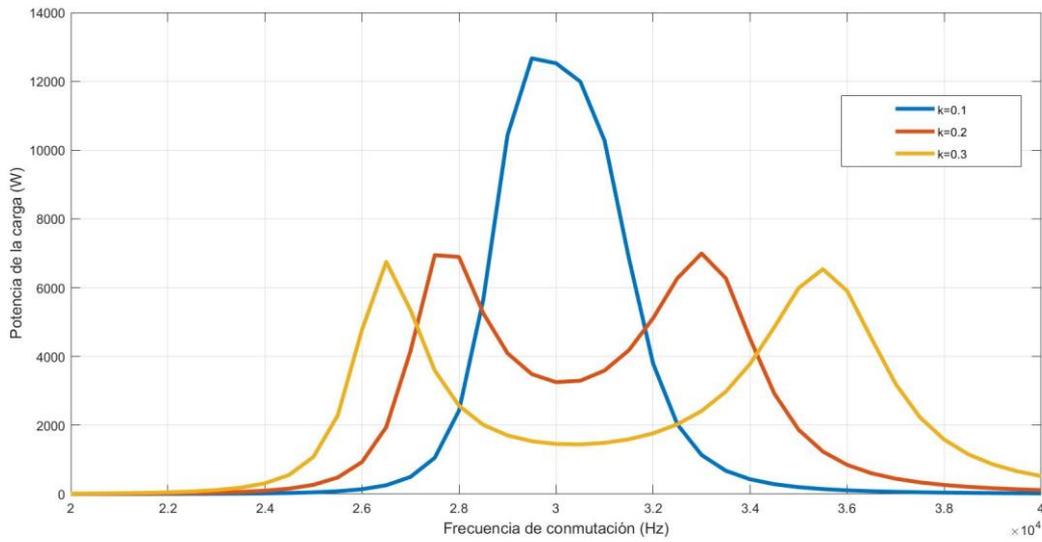


Figura 5-32: Potencia de carga vs frecuencia de conmutación con  $L=300 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

Con respecto a la potencia de carga, se puede apreciar exactamente lo mismo. La potencia obtenida máxima resulta menor que en la primera simulación y mayor que la segunda. Aunque por los resultados pueda parecerlo, las magnitudes no varían en función de la inductancia propia de la bobina. Si se analiza en profundidad, al aumentar la inductancia propia de la bobina con el mismo coeficiente de acoplamiento, según se describe en la Ecuación 4-8, la inductancia mutua aumenta en consecuencia. Esto hace parecer que la potencia aumenta conforme lo hace la inductancia propia, mientras que estas son constantes a dicha magnitud, siendo realmente dependientes de la inductancia mutua dada.

Se cumple de la misma manera lo predicho anteriormente: aumentar la inductancia mutua tiene los mismos efectos en el sistema que aumentar la frecuencia. Tal es así, que, si en vez de haber pasado a  $300 \mu\text{H}$  la simulación fuese con  $400 \mu\text{H}$ , los resultados de las cuatro magnitudes serían idénticos a los de la segunda simulación, debido a que duplicar la frecuencia conlleva lo mismo al sistema que duplicar la inductancia mutua.

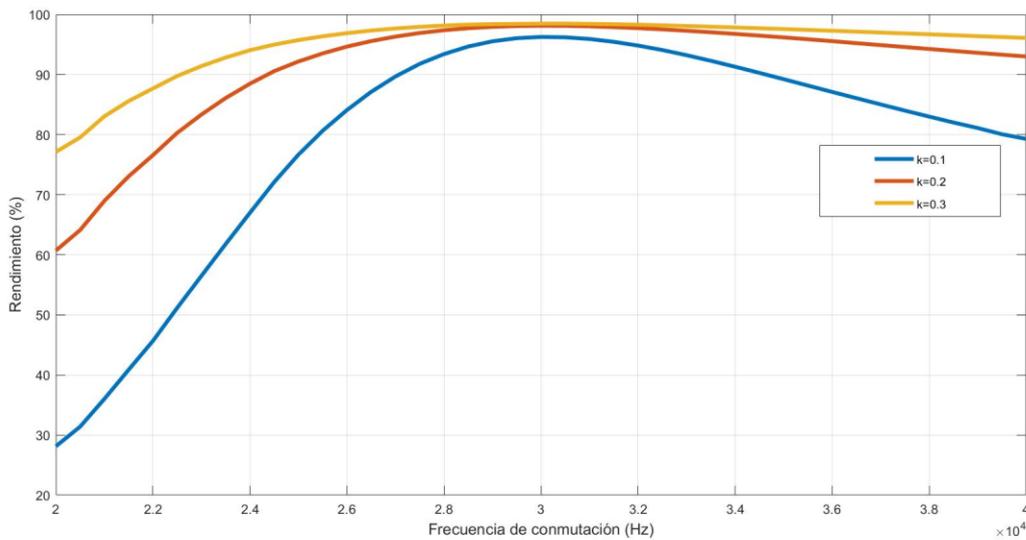


Figura 5-33: Rendimiento global vs frecuencia de conmutación con  $L=300 \mu\text{H}$  y  $f_r=30 \text{ kHz}$ .

Por último, se tiene el rendimiento, en el cual se observa un resultado equivalente con los correspondientes a las dos primeras simulaciones. Se pone así de manifiesto que el rendimiento global es una magnitud cuyo valor es muy alto, aunque puede tener pequeñas variaciones con la frecuencia y la inductancia.

A modo de conclusión, en todos los casos anteriores, se percibe que la potencia reactiva, el factor de potencia y el rendimiento global del cargador no van a ser limitantes de cara al diseño de las bobinas finales, ya que tienen una respuesta similar, sin depender del mencionado diseño de los inductores, cuando el sistema se encuentra en resonancia.

Por tanto, la magnitud en la que se sustenta el diseño es la potencia deseada de carga de la batería. Ésta se encuentra muy influida por la relación entre la inductancia mutua y la frecuencia de resonancia escogida, existiendo variaciones muy importantes en la respuesta del cargador con solamente aumentar un poco el acoplamiento, tal y como se aprecia en las Figuras 5-24, 5-28 y 5-32.

En concreto, en las tres mencionadas Figuras se puede apreciar un efecto que es característico de esta tecnología de carga inalámbrica. Es observable que, en función de la inductancia mutua y de la frecuencia resonante, las curvas de potencia resultantes pueden tener un único máximo en el punto de resonancia, o un gran valle y dos máximos laterales del mismo valor. Este efecto es conocido como división de frecuencias, y es de gran importancia conocerlo para lograr anticipar con exactitud la respuesta que tendrá el sistema de carga inalámbrica [46] [47].

La división de frecuencias viene causada por una fuerte interacción entre la bobina primaria y la secundaria. De esta manera, cuando el sistema se encuentra en resonancia y las bobinas tienen cierto acoplamiento, sucede los circuitos primario y secundario interaccionan entre sí. Así, la resonancia no ocurre en los dos sistemas por separado, sino que sus efectos se superponen entre sí, dando lugar al anteriormente mencionado valle de la curva de potencia.

La magnitud del efecto depende de la frecuencia de resonancia del sistema, de la inductancia mutua existente entre los inductores y del valor de la carga que alimentan. La existencia de este efecto se puede predecir de antemano, según la siguiente expresión [48]:

$$R_L \leq \sqrt{\left(2\omega^2 \cdot k^2 - \frac{r_1^2}{L_1^2}\right) L_2^2} \quad (5-9)$$

Si la resistencia de la carga es menor que la raíz cuadrada, entonces el sistema experimentará el efecto de la división de frecuencias. En cambio, si la resistencia es mayor, el sistema no sufrirá este efecto, y la curva de potencia tendría un único máximo, en el punto de resonancia.

Por ejemplo, en la Figura 5-24, se puede apreciar como el sistema padece este efecto con coeficiente de acoplamiento de 0.2 y 0.3, mientras que no sucede si su valor es 0.1. Para este caso, con 30 kHz de frecuencia resonante, y 200  $\mu$ H de inductancia, el coeficiente de acoplamiento crítico a partir del cual se aprecia el cambio en los resultados es de 0.15. Por el contrario, en la Figura 5-32, se observa como este hecho se produce en el sistema para los tres acoplamientos estudiados.

La división de frecuencias puede ser un problema en algunas aplicaciones de transferencia resonante de potencia. No obstante, en este caso de estudio, el sistema requiere de una potencia no muy elevada, de en torno a 2 kW, con lo que resulta positivo el valle de potencia resultante.

A nivel global, es evidente las ventajas que la resonancia aporta a la transferencia inductiva de potencia. Su inclusión en la carga inalámbrica soluciona los problemas que padece la misma. En primer lugar, la corriente en el terminal primario es mucho menor que en el primer caso, debido a la mínima cantidad de potencia reactiva por los circuitos capacitivos resonantes añadidos. Esto soluciona también el problema propio del factor de potencia a la entrada, siendo este ahora igual o muy cercano a la unidad.

En segundo lugar, la potencia transferida es mucho mayor con esta mejora de la tecnología de carga, con lo que se puede emplear en un abanico más amplio de aplicaciones. No obstante, una ventaja fundamental reside en la eliminación de la necesidad de un gran acoplamiento entre bobinas para una media o alta transferencia de potencia. En lugar de esto, el sistema es capaz de transferir una cantidad de potencia mucho mayor con coeficientes de acoplamiento menores. Por todo esto, se decide contar con un sistema de transferencia de potencia basado en resonancia mediante condensadores.

Finalmente, se plantea una última simulación en Matlab Simulink, con el objetivo de hallar los valores definitivos del sistema de carga. Para ello, se incluye un puente de diodos, a modo de rectificador, y se sustituye la resistencia de carga por un bloque de batería, para simular con mayor grado de realismo la carga de esta en la práctica.

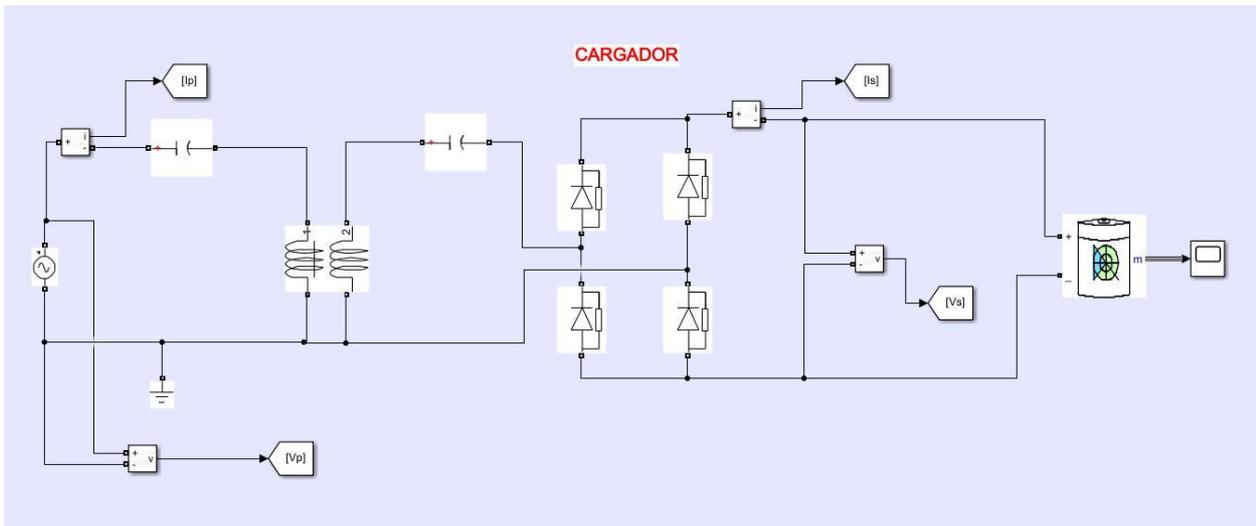


Figura 5-34: Esquema de bloques de sistema de carga completo con batería.

Mientras que las simulaciones anteriores tienen la finalidad de entender la dependencia paramétrica de un sistema de carga inalámbrico basado en resonancia, el motivo de esta última simulación es el de afinar los resultados, haciéndolos más realistas con el modelo de batería descrito anteriormente, e implantando así la base en la que se sustenta el diseño de las bobinas en Comsol Multiphysics, en el capítulo que viene a continuación. De esta manera, los resultados finales de las magnitudes eléctricas del cargador definitivo se obtendrán a partir de esta simulación. A modo de simplificación, no se tiene en cuenta el inversor como parte del sistema. Así, los resultados finales de potencia, rendimiento global y otros tendrán solamente en cuenta ambos inductores, el rectificador y la carga.

# 6 DISEÑO DE LAS BOBINAS EN COMSOL MULTIPHYSICS

*El diseño no es solo cómo se ve y se siente. El diseño es cómo funciona*  
- Steve Jobs -

El objetivo de este capítulo es diseñar las bobinas que componen el núcleo del sistema de transferencia inalámbrica de potencia, así como profundizar en las simulaciones para entender la dependencia paramétrica de las magnitudes de las bobinas para lograr un diseño correcto.

A la hora del empleo del software Comsol Multiphysics 5.4 en el desarrollo de los inductores de las siguientes simulaciones, se tienen en cuenta distintas guías de construcción de modelos con alguna característica similar a este [49] [50] [51] [52].

En primer lugar, el primer paso de este estudio trata de entender las condiciones de la motocicleta, como el espacio que hay disponible en esta, así como su altura desde el suelo. La bobina primaria, la que recibe la energía eléctrica de la red, se encuentra en el suelo, mientras que la bobina secundaria, la que recibe energía desde la primera a través del aire, se encuentra en la parte inferior de la moto. Concretamente, el inductor secundario se encuentra presente en la parte inferior a la quilla, la cual es la parte más baja del prototipo, y tiene forma rectangular.



Figura 6-1: Ubicación de la bobina secundaria en la motocicleta.

La superficie señalada en la Figura 6-1 es completamente horizontal respecto al suelo, aunque en la fotografía no se muestre así por estar elevada solamente sobre el caballete de la rueda trasera. La fotografía corresponde a la motocicleta de gasolina de la competición del pasado año, no siendo este un prototipo eléctrico, de ahí que, como se puede apreciar, tenga escape. No obstante, el diseño de la motocicleta eléctrica aún no está finalizado, a causa del retraso producido por la Covid-19, con lo que se va a tomar el espacio de la quilla de la motocicleta de gasolina como punto base del diseño geométrico de la bobina secundaria. Además, el diseño final de la quilla de la motocicleta eléctrica no va a diferir en gran medida respecto a su antecesora en cuanto a dimensiones, con lo que las dimensiones que se tienen en cuenta para el diseño de la bobina secundaria son igualmente aplicables para ambos prototipos.

Por otra parte, según el reglamento interno de la competición de motociclismo universitario, Motostudent, la distancia mínima que debe tener la quilla respecto el suelo es de 10 cm. Por tanto, las bobinas de este sistema de transferencia inalámbrica se diseñan para estar a 10 cm de distancia entre sí.

En cuanto al espacio disponible en la quilla de la motocicleta, las dimensiones de esta son de 16 cm de ancho y 32 cm de largo, las cuales no deben ser, por tanto, sobrepasadas por la bobina secundaria.

Por último, es importante tener en cuenta los objetivos finales que se pretende alcanzar en el dispositivo de carga inalámbrica. La potencia nominal de cara al diseño es de 2 kW, y se propone, adicionalmente, que el rendimiento global se encuentre por encima del 90%, así como tener un factor de potencia igual o en el entorno de la unidad en la entrada del cargador.

Tabla 6-1: Condiciones iniciales de diseño de las bobinas.

Magnitud	Condición
Espacio máximo disponible en la quilla	16 x 32 cm
Distancia al suelo	10 cm
Potencia nominal de diseño	2 kW
Rendimiento nominal de diseño	> 90%

## 6.1 Simulación de una bobina plana y circular

En primer lugar, se estudia un sistema compuesto por una sola bobina, con el fin de entender la dependencia paramétrica de la inductancia propia y la resistencia interna de esta en función de diversas magnitudes geométricas y la frecuencia del sistema.

Para empezar a estudiar el sistema, se plantea emplear bobinas planas y circulares, de tal manera que el cobre del conductor vaya enrollándose para formar una espiral. Tanto la bobina primaria como la secundaria están formadas de esta manera plana.

Entre los parámetros geométricos que influyen en el sistema, se encuentra: el radio interno y radio externo de las bobinas, la distancia y el desalineamiento horizontal entre estas.

En cuanto a otros parámetros que condiciona el diseño de las bobinas, se encuentra el diámetro del conductor de cobre, la frecuencia del sistema y el número de vueltas de la bobina. Además, es necesario tener en cuenta las condiciones impuestas en la Tabla 6-1 de cara al diseño del conjunto.

Para hacer más efectiva la simulación, algunos de los parámetros se toman fijos y constantes. Entre estos, se encuentra el radio externo de la bobina y el diámetro del conductor. El radio máximo del inductor debe ser tal que las dimensiones de este no superen las de la quilla de la motocicleta, por lo tanto, el radio externo máximo que se toma es de 8 cm.

Por otro lado, el conductor de cobre final se escoge según la tabla de conductores desnudos de cobre del fabricante General Cable, del grupo Prysmian. La potencia nominal de carga es de 2 kW, con lo que, teniendo en cuenta que el sistema es monofásico y de 230 V de tensión nominal, la corriente que circula por la bobina primaria es de aproximadamente 9 A. Mientras, la tensión nominal de carga de la batería del secundario es de unos 116 V, teniendo, así, una corriente durante la carga del secundario de en torno a 18 A.

Tabla 6-2: Tabla de capacidad de corriente según el diámetro del conductor de cobre [53].

ALAMBRES DE COBRE DESNUDO - CALIBRES AWG				
Calibre	Sección nominal	Diámetro nominal de la hebra	Peso total aprox.	Capacidad de corriente
AWG	mm <sup>2</sup>	mm	kg/km	A
12	3,3	2,05	29,3	45
10	5,3	2,59	46,8	61
8	8,4	3,26	74,2	81
6	13,3	4,11	118	108
3	26,7	5,83	237	169

Según la información de la Tabla 6-2, un conductor de 2.05 mm de diámetro cumpliría los parámetros de diseño perfectamente, no obstante, con el fin de no tener problemas con el efecto pelicular dada la alta frecuencia, se prefiere optar por la segunda opción de la lista, el conductor de cobre de 2.59 mm de diámetro.

Con respecto a las simulaciones, se han realizado en dos bloques. En primer lugar, se ha realizado la simulación en dos dimensiones de la bobina, para estudiar el efecto de la frecuencia sobre el cable y su relación con la resistencia interna de la bobina. Por último, el resto de los estudios se tratan en tres dimensiones, siendo su finalidad la de entender la correlación entre la inductancia y el resto de los parámetros de los que esta depende.

El modelo de la bobina circular y plana en dos dimensiones, así como la malla de elementos finitos en los que se basa el cálculo interno del software, se muestran a continuación:

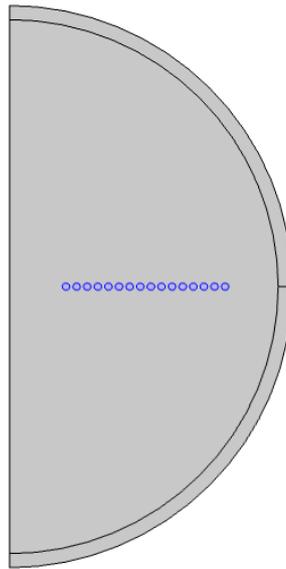


Figura 6-2: Modelo de bobina circular y plana en dos dimensiones.

El primer paso de la simulación en Comsol Multiphysics consiste en definir el sistema y la geometría de este. Dicho paso es crucial en este estudio, ya que la geometría de la bobina es uno de los puntos clave a la hora de su diseño. En este caso, la bobina se ha formado a partir de 16 círculos, de 2.59 mm de diámetro, a 1.15 mm de distancia entre sí, teniendo así la bobina 16 vueltas.

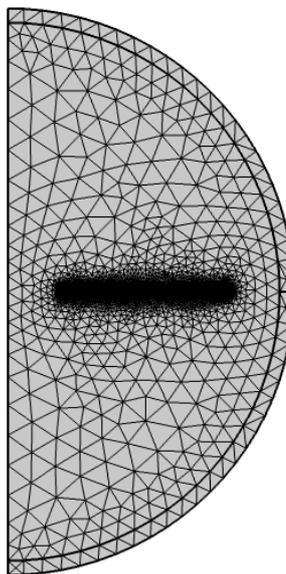


Figura 6-3: Malla de elementos finitos de la bobina circular y plana en dos dimensiones.

Una vez definida la geometría, el software genera el sistema de elementos finitos, a través del cual resuelve las ecuaciones diferenciales y sobre el que se muestran los resultados finales. El conjunto de elementos finitos se basa en el semicírculo externo a los 16 círculos que forman la bobina.

Gracias a este análisis en dos dimensiones, es posible apreciar el efecto de la frecuencia sobre el conductor de cobre. El efecto pelicular se produce en los conductores eléctricos cuando circula por ellos una corriente alterna. Como consecuencia de este, la corriente eléctrica no circula de forma distribuida por toda la superficie del conductor, si no que esta circula por los extremos del cobre, de tal forma que la circulación en el centro de este es baja o incluso nula.

Este efecto es apreciable en conductores eléctricos a baja frecuencia, pero de gran longitud, como las líneas eléctricas de alta tensión, así como en los sistemas con alta frecuencia, como lo es este cargador.

La cantidad de superficie por la que circula corriente en estos casos es cuantificable, mediante la denominada profundidad del efecto pelicular [54]:

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi\mu\sigma f}} \quad (6-1)$$

Siendo  $f$  [Hz] la frecuencia del sistema,  $\mu$  la permeabilidad magnética del material, y  $\sigma$  [S/m] la conductividad de este.

A mayor frecuencia, mayor efecto pelicular en el sistema, y menor superficie de cobre por donde circula energía eléctrica. A continuación se muestra, en el corte del conductor, la densidad de corriente en dos frecuencias distintas:

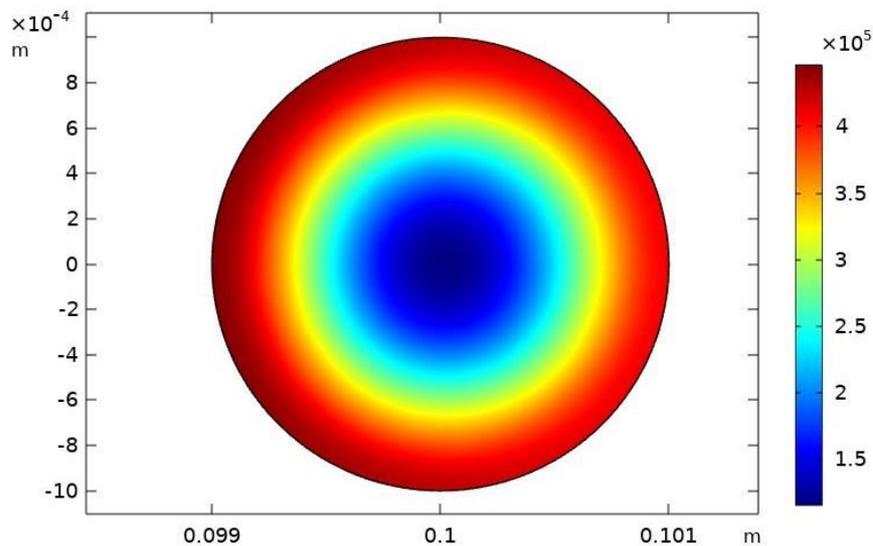


Figura 6-4: Densidad de corriente en el conductor a frecuencia de 20 kHz.

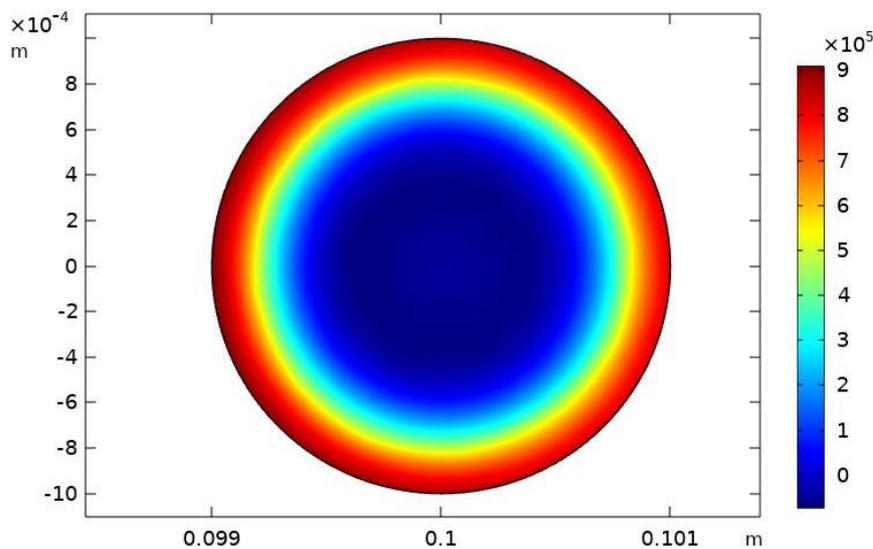


Figura 6-5: Densidad de corriente en el conductor a frecuencia de 100 kHz.

A una frecuencia de 20 kHz, aunque se aprecie que circula más corriente en el exterior del conductor, se observa como existe circulación, aunque más baja, a través de su zona central. No obstante, en el segundo caso, se ve como la circulación de energía en su centro es nula, apreciándose, además, una menor zona de circulación, tal y como se esperaba.

Sin embargo, aunque estos efectos sean apreciables, la superficie del conductor que queda disponible a 100 kHz es aún suficiente, demostrando de esta forma que el diámetro de cobre escogido es correcto. La frecuencia de conmutación del sistema, no obstante, será finalmente menor de 100 kHz, con lo que los efectos finales no serán tan graves como se muestra.

En cuanto a la simulación en tres dimensiones de la bobina, esta supone la base de la futura simulación del sistema con dos bobinas circulares y paralelas entre sí.

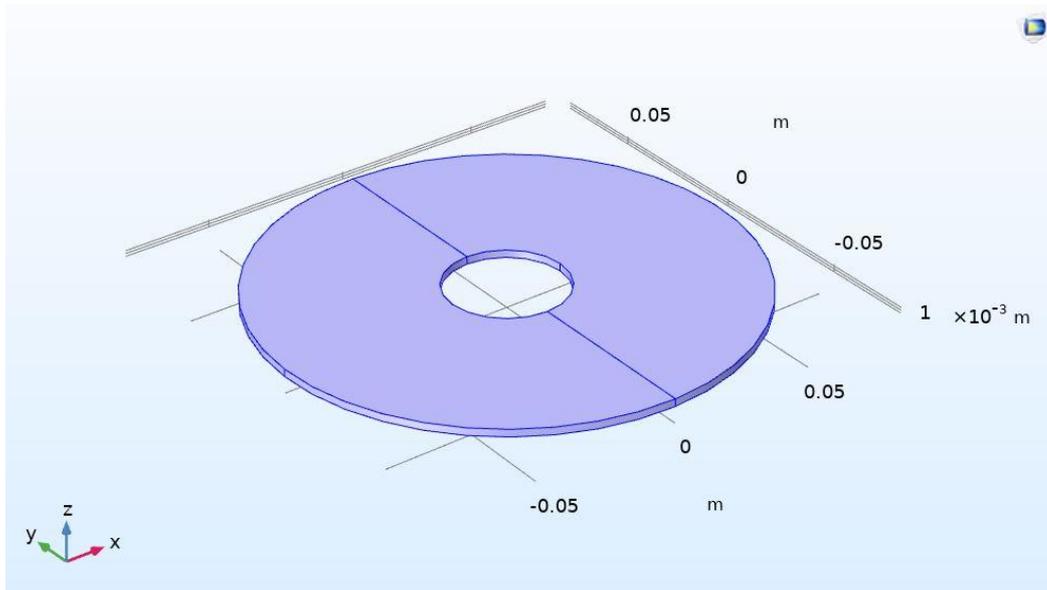


Figura 6-6: Modelo de bobina circular y plana en tres dimensiones.

En esta simulación, la bobina se ha diseñado como un cilindro hueco y plano, de tal manera que el bobinado se encuentra en el interior de la corona circular resultante. Para que el software de elementos finitos entienda el cilindro hueco de la Figura 6-6 y del resto de modelos que se presentan en este capítulo como un devanado, se debe marcar el dominio o dominios que conforman la bobina geoméricamente, e incluir la característica física llamada “bobina” en el mencionado conjunto. Esto se debe realizar para cada devanado, es decir, si el modelo de estudio lo conforman dos bobinas, existirán dos características físicas de bobina diferentes.

De esta forma, es importante configurar correctamente la característica física de bobina para que el resultado final sea correcto. Para ello, es necesario definir el número de vueltas de la bobina, el diámetro del conductor de cobre y la corriente de entrada. El número de vueltas de la bobina y el diámetro del conductor se pueden apreciar mejor en el modelo en dos dimensiones que se muestra en la Figura 6-2. De esta manera, el número de vueltas corresponde con el número de círculos alineados, mientras que el diámetro del cobre coincide con el diámetro de cada uno de estos círculos.

A estos parámetros se les suma las características de la bobina que vienen definidas por su geometría inicial, tales como el radio interno y el radio externo. El radio interno es la distancia entre el centro de la bobina y el comienzo del devanado, mientras que el radio externo es la distancia entre el centro de la bobina y el extremo externo del devanado. Tomando como ejemplo la Figura 6-6, el radio interno es el radio del círculo interno del cilindro, mientras que el radio externo coincide con el radio de la corona circular de color morado. De esta manera, el devanado es la diferencia entre ambos radios.

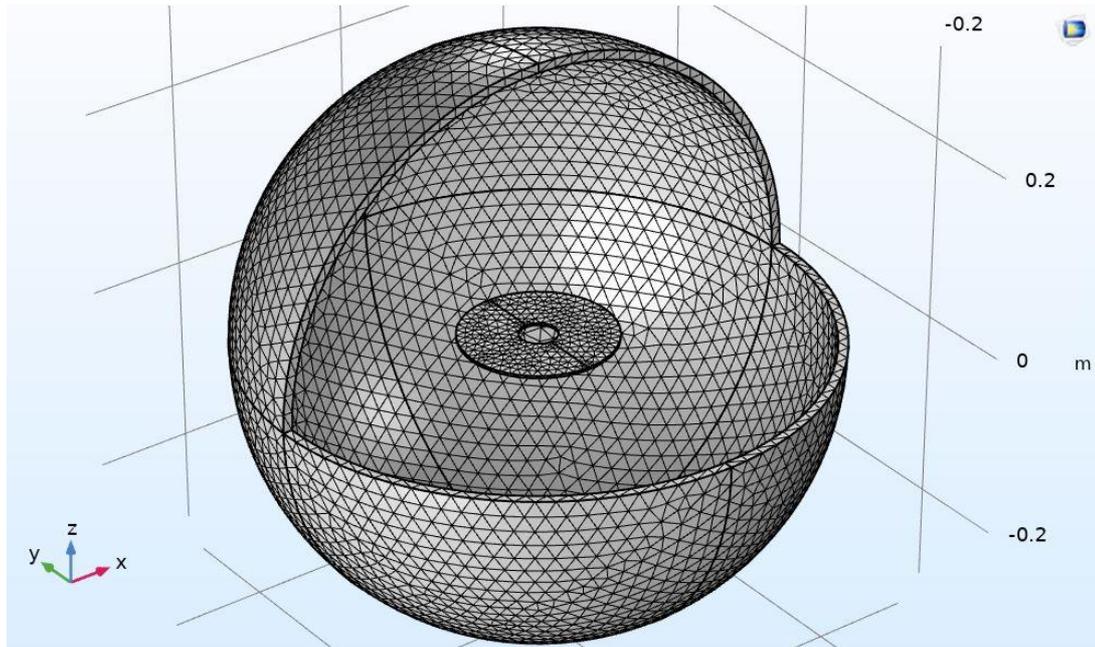


Figura 6-7: Malla de elementos finitos de la bobina circular y plana en tres dimensiones.

De nuevo, se emplea una red de elementos finitos alrededor de la geometría de estudio. En este caso, como suele ser normalmente, la malla de elementos finitos se conforma a partir de una esfera, cuyo centro es el mismo que el de la bobina de estudio.

Este sistema de elementos finitos permite obtener resultados en tres dimensiones difíciles de obtener mediante otros medios de cálculo. Por ejemplo, es posible visualizar el campo magnético que genera la bobina en su entorno, así como el flujo magnético en una superficie o volumen en el espacio, lo cual será de gran ayuda de cara al estudio de afección en personas que se plantea, también, en este estudio.

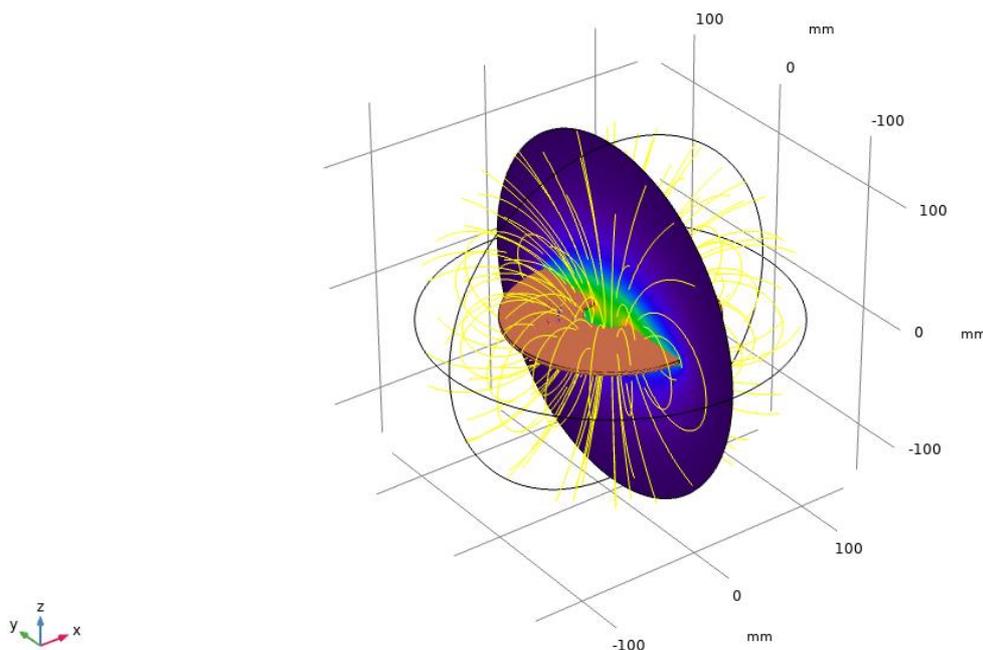


Figura 6-8: Campo magnético alrededor de la bobina de estudio.

En amarillo, se visualiza las líneas de campo magnético en torno a la bobina. En color cobre, se observa el bobinado del inductor. Por último, se presenta la densidad de flujo magnético sobre un corte perpendicular a la bobina, lo cual permite ver mejor las líneas de campo.

En los siguientes subcapítulos, se presentan los resultados obtenidos referentes a la resistencia interna y a la inductancia propia de la previamente descrita bobina de estudio.

### 6.1.1 Dependencia paramétrica de la resistencia interna

Tal y como se concluyó en apartados anteriores, la resistencia interna de las bobinas supone una de las magnitudes críticas de cara a las características finales del sistema. De tal manera que, para lograr un rendimiento bajo en el cargador, es necesario tener una resistencia interna de los inductores lo más pequeña posible.

Existen una serie de parámetros que condicionan el valor de la mencionada magnitud. Por un lado, como se explicó con anterioridad al tratar el efecto pelicular del conductor, la resistencia eléctrica aumenta conforme lo hace la frecuencia del sistema.

$$R_{ac} = \frac{l}{\sigma A} \left[ \frac{1}{4} + \frac{r}{2\delta} \right] \quad (6-2)$$

Siendo  $l$  la longitud del conductor,  $r$ , su radio,  $\sigma$ , su conductividad eléctrica,  $\delta$ , la profundidad del efecto pelicular, y  $A$ , el área transversal del conductor [38].

Según la ecuación anterior, cuanto menor sea la profundidad del efecto pelicular, es decir, a mayor frecuencia, más resistencia encuentra la corriente eléctrica a su paso por el conductor de cobre, tal y como confirma la siguiente figura. Los resultados han sido obtenidos con 16 vueltas de cobre.

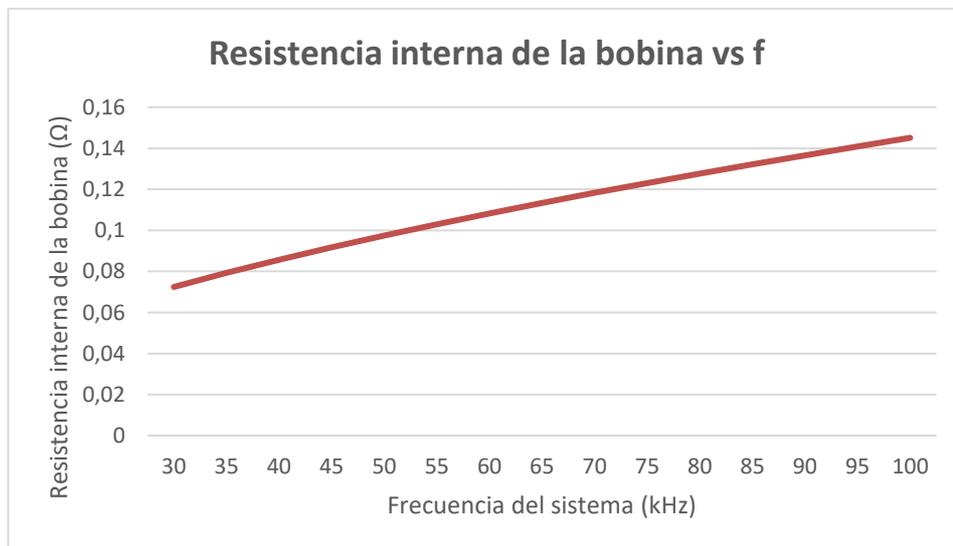


Figura 6-9: Relación entre la resistencia interna y la frecuencia del sistema.

Como se puede observar, aunque el aumento de frecuencia haga aumentar la resistencia interna, su valor no crece drásticamente con este parámetro. La curva resultante es prácticamente lineal, y de poca pendiente. No obstante, es importante tener en consideración que la frecuencia de conmutación es una de las magnitudes más importantes en el diseño del sistema resonante inalámbrico, con lo que es necesario tener en cuenta su relación con la resistencia y el rendimiento del sistema a la hora de su elección.

Por otro lado, en cualquier conductor eléctrico se cumple que, a mayor longitud de este, mayor será su resistencia global. Esto también sucede en el caso de la bobina. No obstante, es más útil relacionar, en este caso, la magnitud mencionada con el número de vueltas del inductor, mejor que con su longitud. El siguiente resultado se ha obtenido para una frecuencia del sistema de 65 kHz.

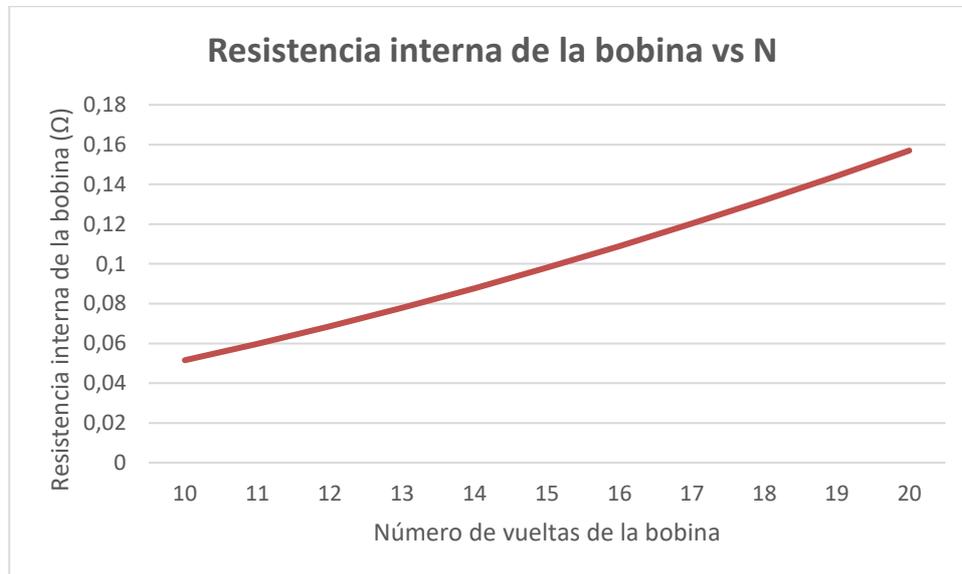


Figura 6-10: Relación entre la resistencia interna y el número de vueltas.

En este caso, aunque la curva sea parecida a una lineal, es apreciable que tiene cierta curvatura, de tal modo que esta es creciente. Este hecho tiene sentido, ya que cada vuelta de la bobina no es igual que su predecesora, si no que cada una de las vueltas tiene mayor cantidad de cobre que la anterior, y menor que la posterior.

Por ello, además, se puede apreciar como la resistencia interna aumenta más con respecto al número de vueltas de la bobina que con la frecuencia de conmutación del cargador. Al pasar de 10 a 20 vueltas, la resistencia interna casi se multiplica por cuatro, mientras que, en el espectro de frecuencias del ámbito de aplicación, esta a penas se duplica.

El número de vueltas de la bobina es una de las magnitudes que más caracteriza a cualquier tipo de bobina. Su valor está muy relacionado con la inductancia propia de esta. Es por ello, que el valor de vueltas del inductor se pretende escoger según la inductancia que necesite el inductor para transferir la potencia de diseño de 2 kW, sin tener en cuenta, por tanto, la resistencia del conductor.

### 6.1.2 Dependencia paramétrica de la inductancia propia

La inductancia propia es la magnitud más característica de cualquier inductor. Resulta importante, de cara a su diseño, entender cómo depende su inductancia según su geometría.

Como se trató con anterioridad al explicar el modelo en tres dimensiones del inductor, el radio externo máximo disponible es de 8 cm, debido a las dimensiones de la quilla de la motocicleta. Dado que el diámetro del conductor de cobre está también cerrado en cuanto a diseño, siendo este de 2.59 mm, queda por determinar el número de vueltas (N), la distancia entre conductores ( $d_c$ ) y el radio interno de la bobina ( $R_i$ ), y así cerrar el diseño geométrico de la bobina.

$$d_c = \frac{R_e - R_i - N \cdot d}{N - 1} \quad (6-3)$$

Estos tres parámetros se encuentran geoméricamente relacionados entre sí, de tal manera que sólo será necesario determinar dos de los tres parámetros, y el tercero de ellos vendrá dado. De esta manera, se pretende estudiar la relación entre la inductancia con el número de vueltas ( $N$ ) y con el diámetro del conductor ( $d$ ), y la distancia entre conductores ( $d_c$ ) será dependiente de estas dos.

La inductancia propia de una bobina depende principalmente de sus características geométricas. En el caso de una bobina plana, circular en forma de espiral, el valor de la inductancia se puede aproximar según la siguiente ecuación [55]:

$$L \approx \frac{N^2 t^2}{30t - 22R_i} \quad (6-4)$$

$$\text{Siendo } t = \frac{2R_i + N(d_c + d)}{2}$$

Los resultados que se obtengan de las simulaciones, por tanto, deberán cumplir con lo marcado en la anterior expresión. No obstante, es importante recalcar que las expresiones referentes a la inductancia propia suelen tener un ámbito de exactitud pequeño, ya que los errores aumentan cuando los parámetros de la ecuación se encuentran fuera de ciertos límites que dependen de qué expresión se use. Es por ello, que la función de la expresión referente a la inductancia propia es la de servir de guía para entender la relación paramétrica y los resultados obtenidos de las simulaciones.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos de las simulaciones. Para obtener los resultados de la inductancia en función del número de vueltas de la bobina, se han mantenido los demás parámetros constantes, siendo el valor del radio interno del inductor de 20 milímetros.

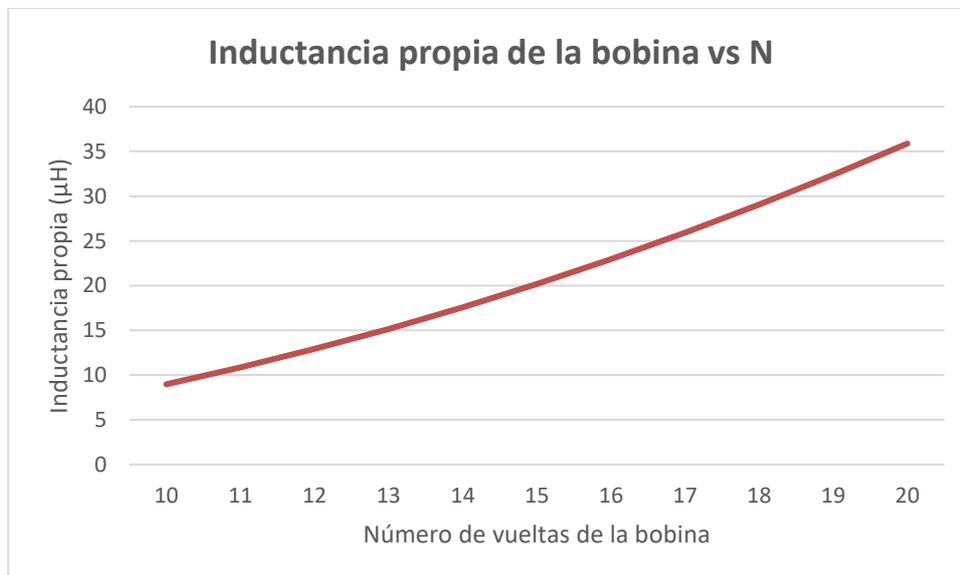


Figura 6-11: Relación entre la inductancia propia y el número de vueltas.

La curva resultante es muy similar a la relación obtenida entre la resistencia interna y el número de vueltas, siendo la curva con curvatura ascendente por el mismo motivo. Se comprueba que, a mayor número de vueltas, mayor inductancia propia posee el inductor.

La curva de resultados respecto el radio interno de la bobina ha sido obtenida con todos los demás parámetros constantes y para un número de vueltas de 16.

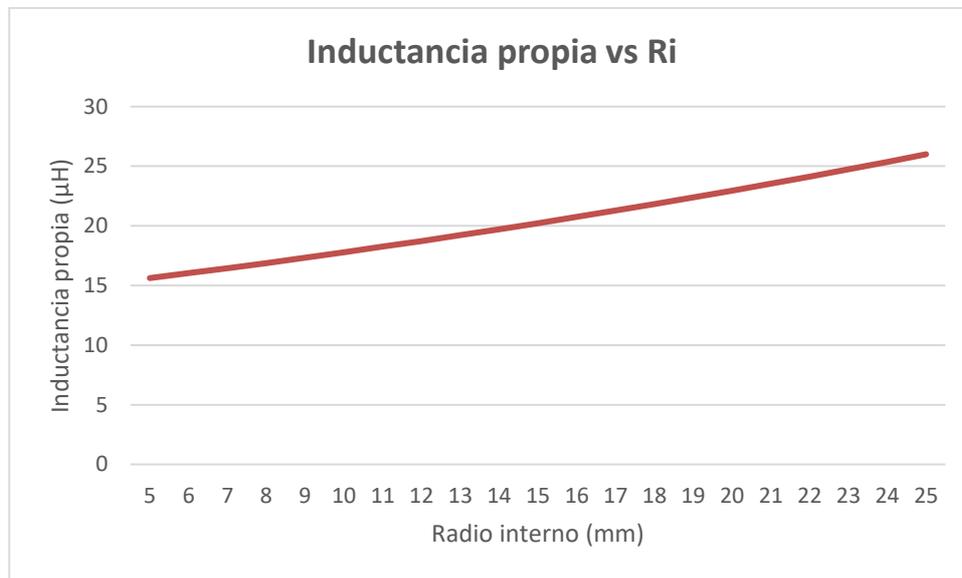


Figura 6-12: Relación entre la inductancia propia y el radio interno.

La relación entre la inductancia y el radio interno requiere un estudio más profundo. En la expresión de la inductancia propia, aparece tanto el radio interno de la bobina como la distancia entre conductores, siendo la inductancia directamente proporcional a ambos parámetros.

No obstante, sucede que, al aumentar el radio interno del inductor y teniendo el resto de los parámetros constantes, la distancia entre conductores se reduce en consecuencia. Por tanto, a priori, no es tan evidente saber si la inductancia aumenta o disminuye según el radio interno, ya que hay primero que esclarecer cuál de los parámetros, si el radio interno o la distancia entre conductores, tiene mayor peso en la expresión. Analizando los resultados obtenidos, se confirma que la inductancia propia aumenta conforme así lo hace el radio interno de la bobina.

Estos dos parámetros serán críticos a la hora del diseño de ambos inductores, tanto el primario como el secundario. En función del coeficiente de acoplamiento que se obtenga, cuya dependencia se discute en el próximo apartado, será necesaria una inductancia propia mayor o menor. De esta manera, una vez sabida, de forma aproximada, la inductancia que se necesite para llevar a cabo la transferencia, se modifica el radio interno y el número de vueltas hasta lograr la bobina con la inductancia deseada.

## 6.2 Simulación de una pareja de bobinas planas y circulares

En este apartado, se estudia el sistema con dos bobinas, una primaria, la cual absorbe la energía eléctrica de la red, y otra secundaria, la cual recibe energía de forma inalámbrica desde la primera, y a la cual se encuentra conectada la batería.

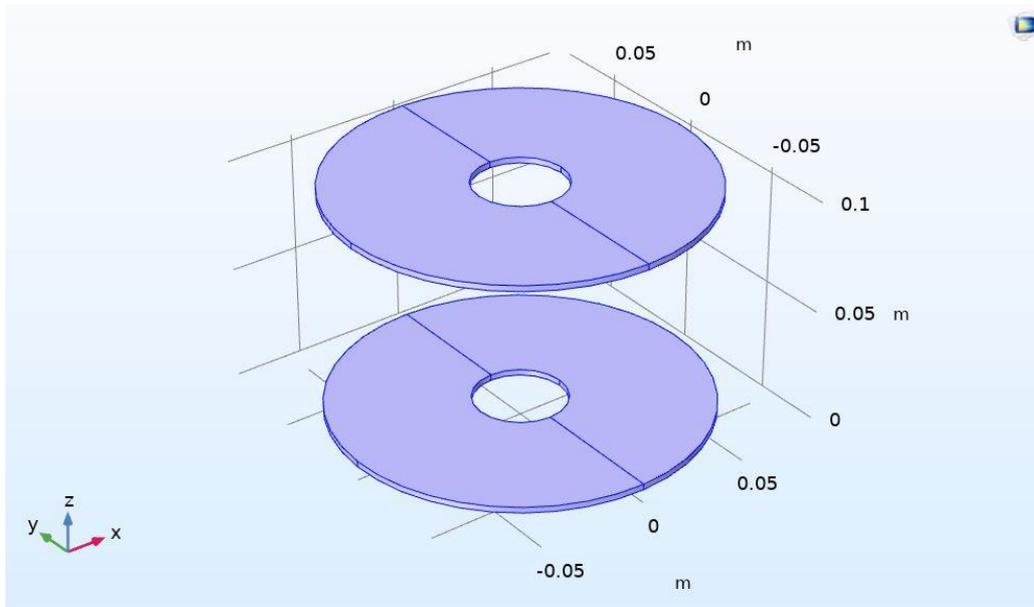


Figura 6-13: Modelo de una pareja de bobinas circulares y planas en tres dimensiones.

En un primer lugar, ambas bobinas tienen idéntica geometría. Es decir, ambas son bobinas planas y circulares, en forma de espiral, y ambas tienen el mismo número de vueltas, radio interno y externo, distancia entre conductores y diámetro de cobre. Con lo cual, en definitiva, ambos inductores tienen la misma inductancia propia y resistencia interna, con el fin de estudiar con eficacia cómo influyen los distintos parámetros solamente en la inductancia mutua entre ambas.

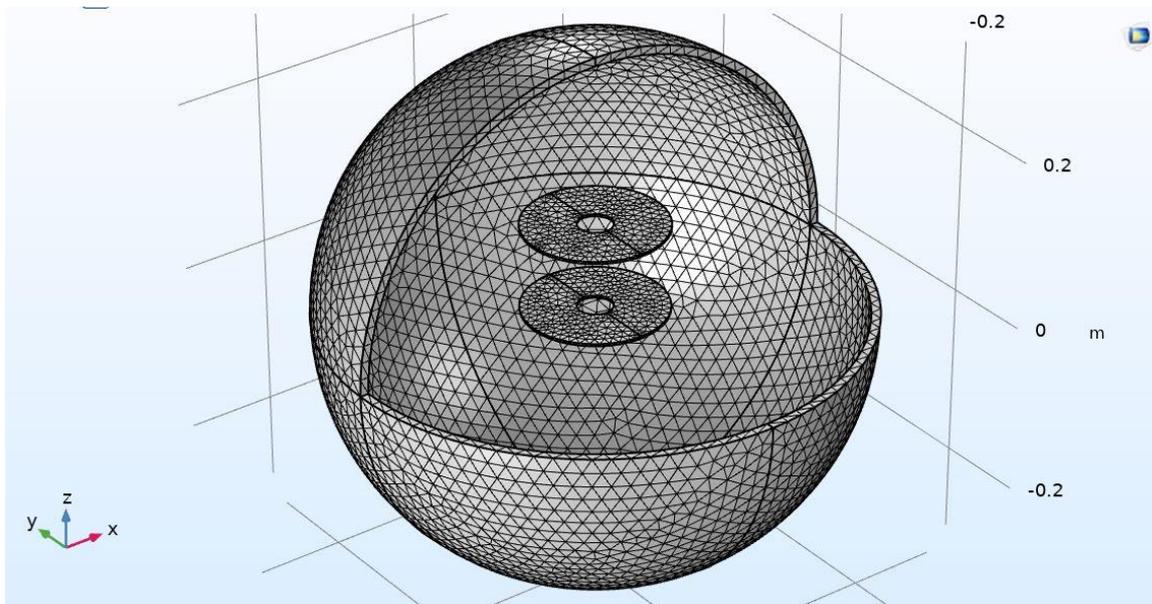


Figura 6-14: Malla de elementos finitos de pareja de bobinas circulares y planas en tres dimensiones.

Nuevamente, ambas bobinas están construidas a partir de cobre, y el resto de los elementos que conforma la red de elementos finitos está compuesto por aire. El software de elementos finitos en tres dimensiones permite observar cómo fluye el campo magnético en el entorno de la bobina primaria, y cómo parte de este atraviesa el inductor secundario.

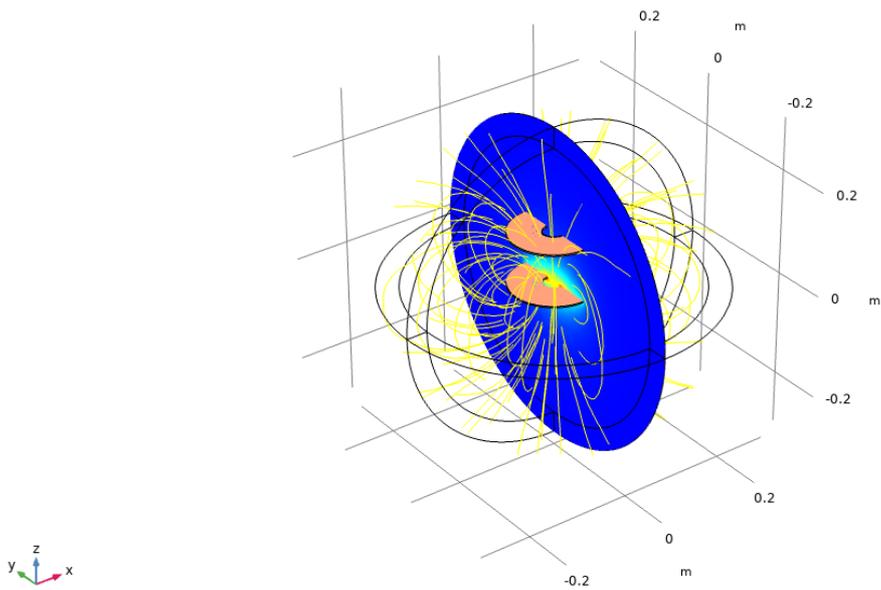


Figura 6-15: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas.

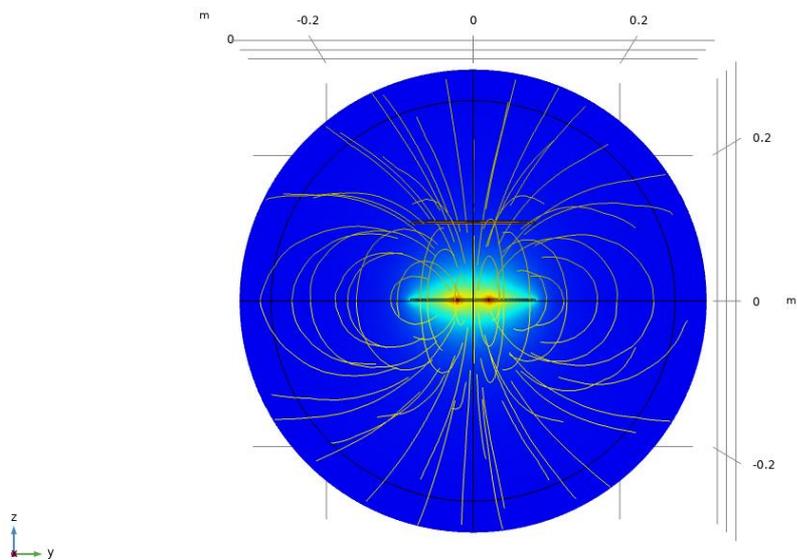


Figura 6-16: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas sobre el plano Y-Z.

En las Figuras 6-15 y 6-16 se puede apreciar cómo existe parte del campo magnético generado por la bobina primaria que se cierra sin atravesar la bobina secundaria, mientras que una parte de las líneas de flujo sí que inciden sobre esta superficie. La proporción del flujo que se concatena entre las dos bobinas corresponde con la inductancia mutua entre ambas. A mayor flujo incidente sobre la bobina secundaria, mayor será la inductancia mutua, y mayor será el coeficiente de acoplamiento en la pareja de inductores.

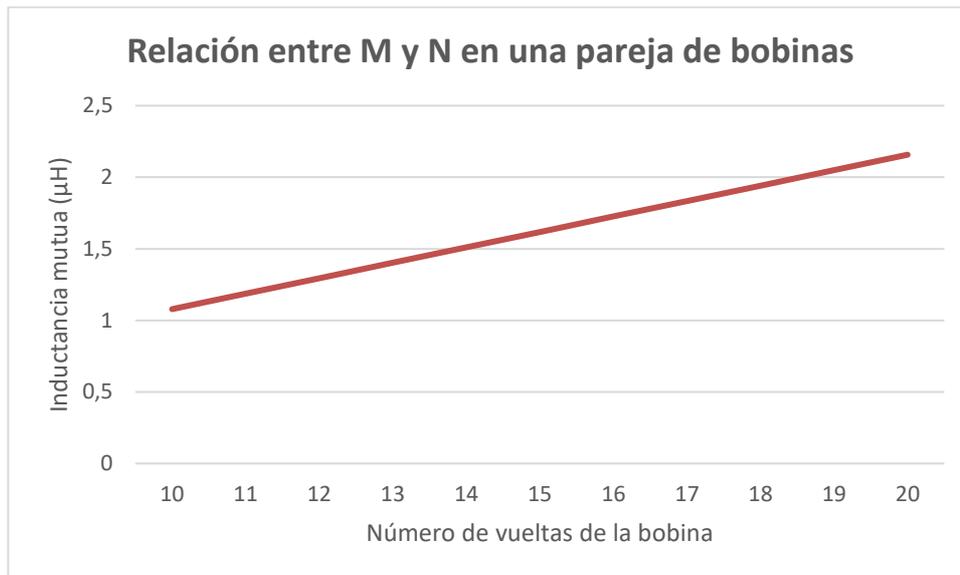


Figura 6-17: Inductancia mutua según el número de vueltas de la bobina.

La Figura 6-17 ejemplifica a la perfección una de las claves en el diseño de ambos inductores. Como se planteó en el capítulo anterior, con las simulaciones en Matlab Simulink, las magnitudes eléctricas del cargador dependen, esencialmente, de la carga a la que se conecta, de la frecuencia del sistema y de la inductancia mutua entre las bobinas. Por tanto, la inductancia mutua es uno de los parámetros más importante desde el punto de vista del diseño.

Para escoger la inductancia mutua deseada en el inductor, existen dos opciones. En primer lugar, dado que la inductancia mutua es una proporción de la inductancia propia, es posible incrementar la inductancia mutua entre las bobinas incrementando la inductancia propia de cada una de ellas. Esto es lo que sucede, por ejemplo, al aumentar el número de vueltas de las bobinas.

Otra opción posible de cara a la obtención de la inductancia mutua deseada en el sistema sería, manteniendo la inductancia propia de las bobinas constante, variar el coeficiente de acoplamiento entre las bobinas. El acoplamiento entre bobinas varía según la posición geométrica de estas en el espacio, de tal manera que, cuanto más cerca y más alineados se encuentren los inductores, mayor acoplamiento y, por tanto, mayor inductancia mutua se obtiene. Lo mismo sucede al aumentar la superficie de las bobinas.

En este caso de estudio, de cara a los resultados finales, en primer lugar, se tienen en cuenta las limitaciones geométricas en cuanto a distancia entre bobinas y su posible desalineación, y posteriormente se hace variar la geometría y características internas de cada una de las bobinas para que, mediante la inductancia propia, se logre la inductancia mutua que necesita el sistema para llegar a la potencia deseada. La frecuencia de conmutación se obtiene posterior a la inductancia mutua.

### 6.2.1 La inductancia mutua según la distancia entre bobinas

En este apartado se pretende estudiar cuál es el efecto que se produce en la inductancia mutua característica de una pareja de bobinas al variar la distancia existente entre estas. Primeramente, se parte del modelo anterior, en el que ambos inductores tienen la misma inductancia propia. Es importante que la esfera de elementos finitos incluya completamente ambos elementos, de no ser así, es necesario aumentar el radio de la esfera para que el cálculo sea correcto.

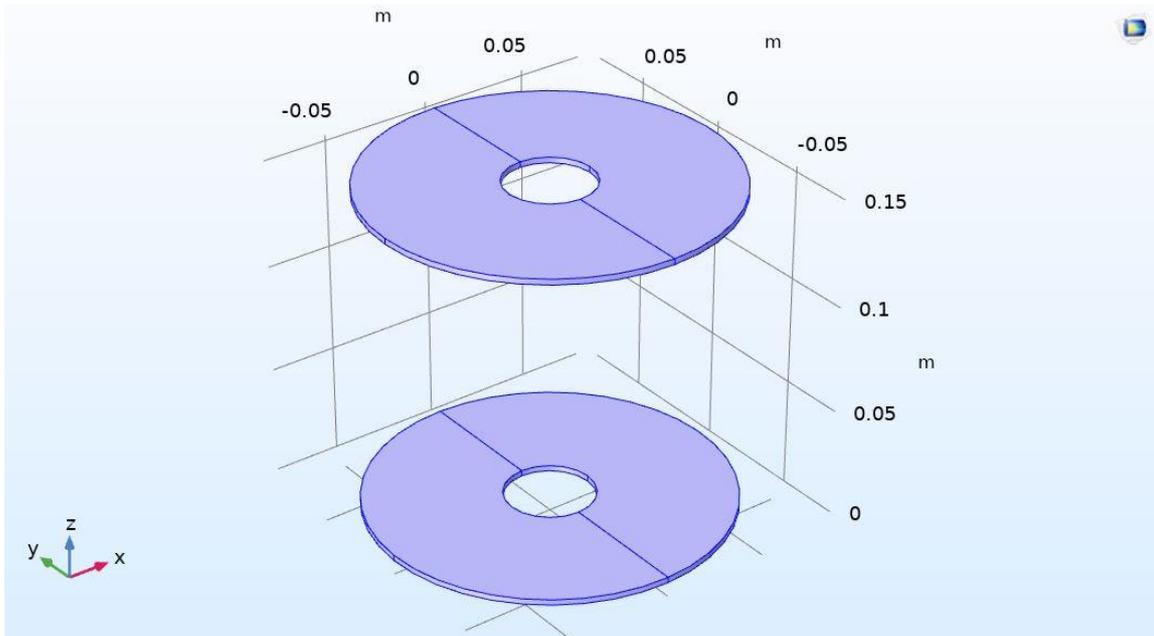


Figura 6-18: Modelo de una pareja de bobinas circulares y planas a 15 cm de distancia.

Es importante que la esfera de elementos finitos incluya completamente ambos elementos, de no ser así, es necesario aumentar el radio de la esfera para que el cálculo sea correcto.

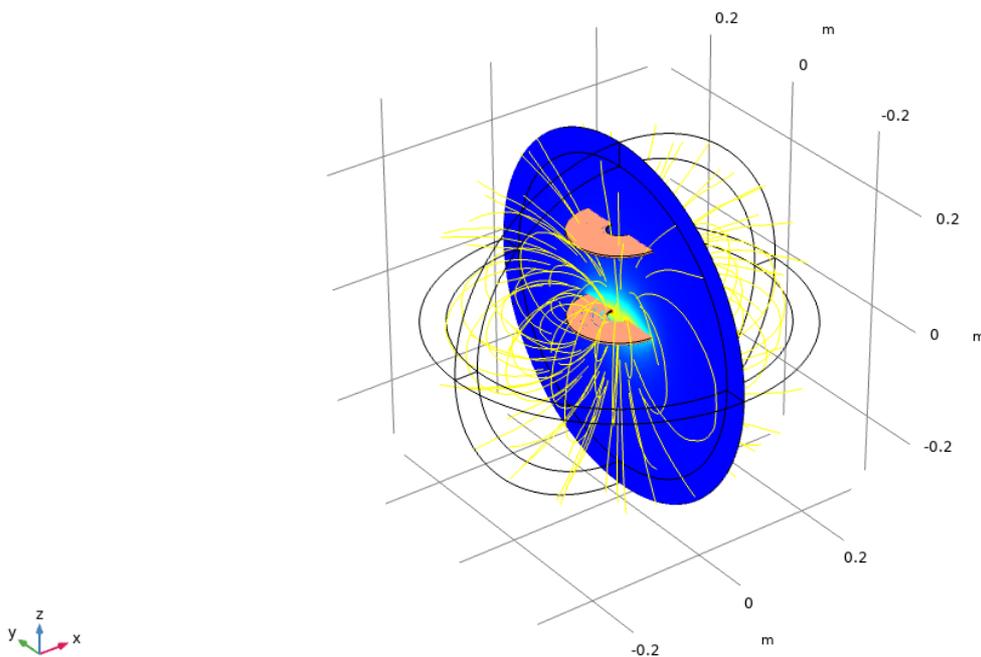


Figura 6-19: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas a 15 cm de distancia.

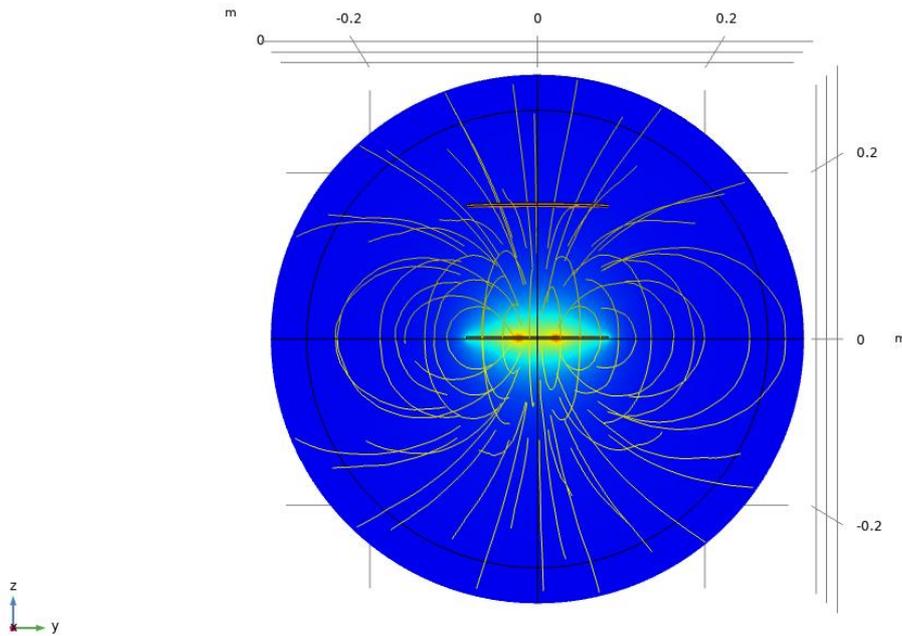


Figura 6-20: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas a 15 cm sobre el plano Y-Z.

Las Figuras 6-19 y 6-20 se deben comparar con las Figuras 6-15 y 6-16 para entender el efecto de una mayor distancia entre bobinas y su acoplamiento. Cuanto mayor distancia existente entre ambos elementos, menor cantidad de campo magnético generado por la bobina primaria atraviesa la secundaria, con lo que menor acoplamiento se logra para la pareja de bobinas sin variar la inductancia propia de estas, con lo que, en consecuencia, menor inductancia mutua se obtiene en el conjunto.

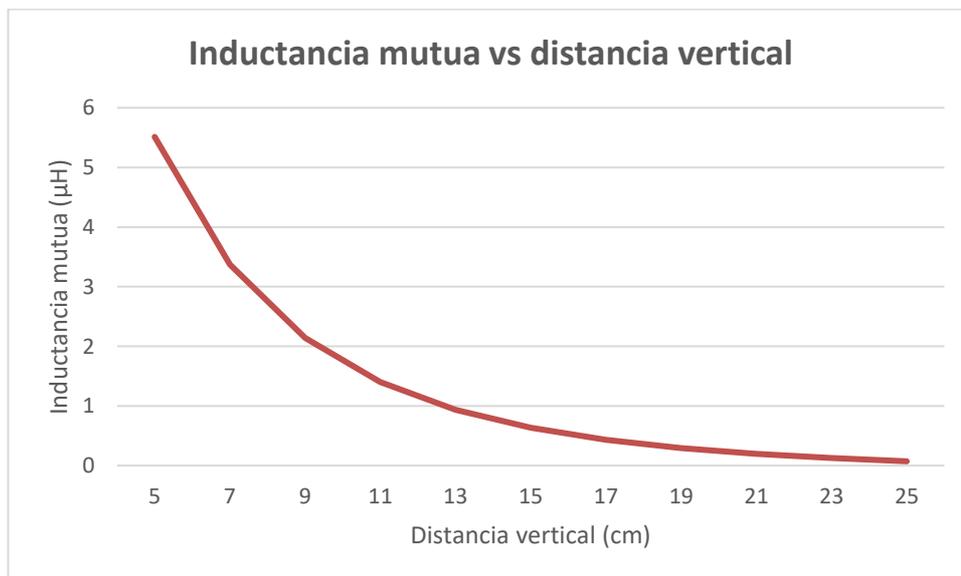


Figura 6-21: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas.

Analizando la Figura 6-21 se comprueba lo predicho anteriormente. A mayor distancia entre bobinas, menor inductancia mutua existente entre ambas. La caída de esta magnitud es brusca, pasar de una distancia de 5 a 10 centímetros supone perder, aproximadamente, dos tercios del acoplamiento inicial, pasando de 90 a unos 30  $\mu\text{H}$  de inductancia mutua.

Un hecho importante que sucede es que la curva resultante para la inductancia mutua es exactamente la misma que la del coeficiente de acoplamiento respecto a la distancia, ya que la inductancia propia no cambia en este caso. Otro punto observable de los resultados es que la relación entre la inductancia mutua y la distancia tiene una pendiente mucho mayor que respecto el número de vueltas de la bobina, con lo que la distancia entre bobinas supone un parámetro crítico de cara al diseño del conjunto, y de cara a la potencia de carga final del sistema.

## 6.2.2 La inductancia mutua según el desalineamiento entre bobinas

Se dice que las bobinas se encuentran alineadas entre sí cuando la proyección del centro de ambas sobre el plano X-Y es coincidente. En este caso en concreto, ambas bobinas son planas y circulares, con lo que el desalineamiento producido sobre el eje y es el mismo que sobre el eje x.

El efecto de un desalineamiento entre la pareja de inductores supone una pérdida de acoplamiento, como ocurre al aumentar la distancia entre estos.

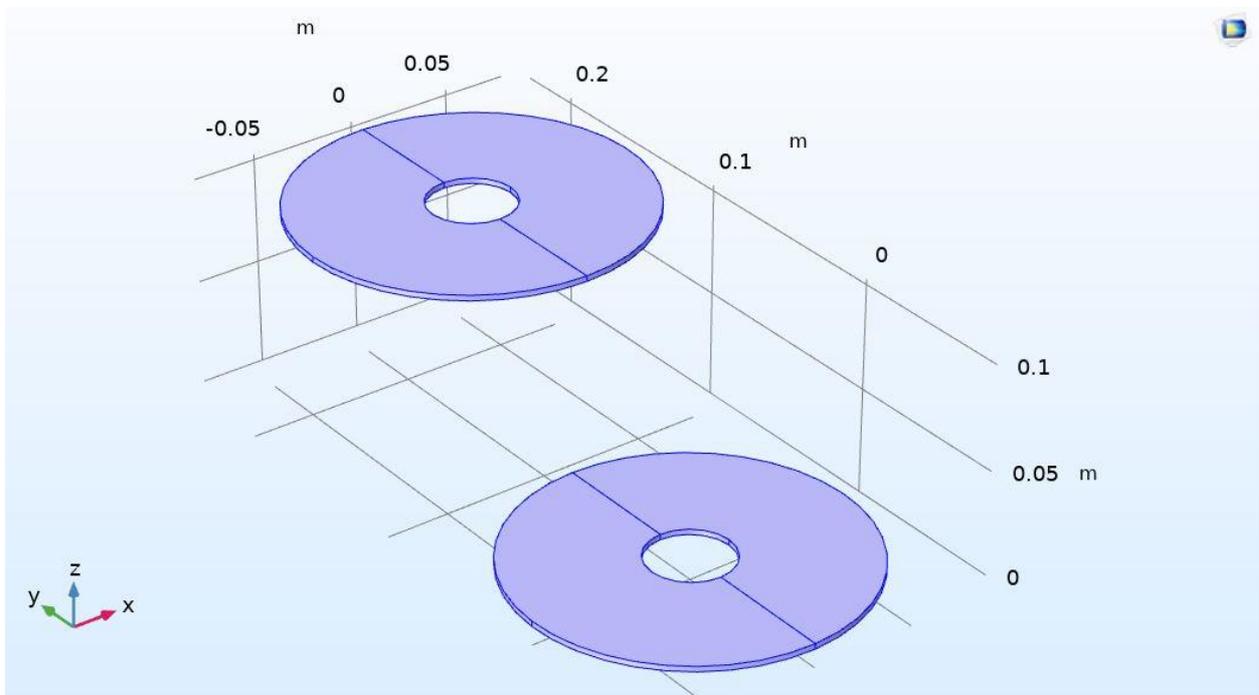


Figura 6-22: Modelo de una pareja de bobinas circulares desplazadas 15 cm entre sí.

Se muestra el modelo de la pareja de elementos con 15 centímetros de desplazamiento entre sí en el eje y, con el fin de entender visualmente cuál es la casuística de estaparte de la simulación. Para lograrlo, resulta de utilidad visualizar conjuntamente las Figuras 6-13 y la 6-22. La falta de alineación de ambas bobinas puede suceder al inmovilizar la motocicleta encima de la bobina que se encuentra en el cielo, si se hace de tal manera que los centros no coincidan.

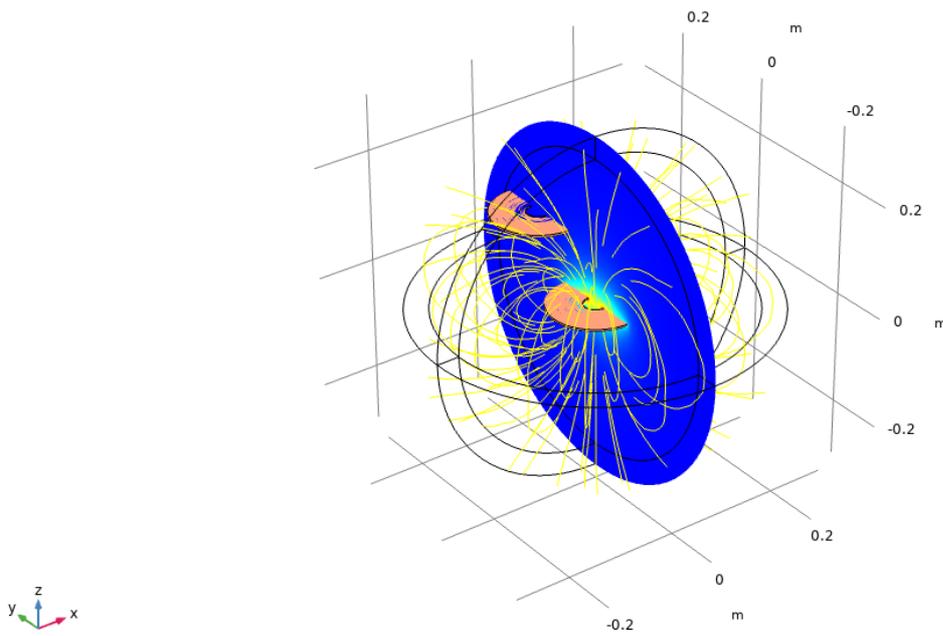


Figura 6-23: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas con 10 cm de desalineamiento.

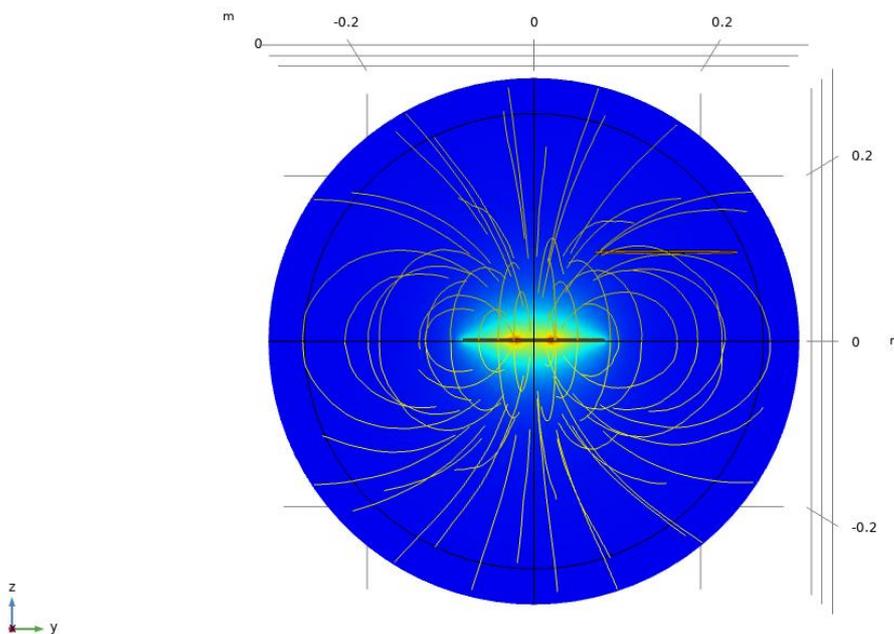


Figura 6-24: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas con desalineamiento sobre el plano Y-Z.

En las Figuras 6-23 y 6-24 se puede observar algo similar a lo que sucede cuando se aumenta la distancia entre bobinas. Se aprecia un menor número de líneas de flujo magnético atravesando el devanado secundario desde el primario, con lo que la relación es la misma. La simulación de la variación de la inductancia mutua con respecto el desalineamiento entre inductores se realiza con una distancia entre estos de 10 centímetros.

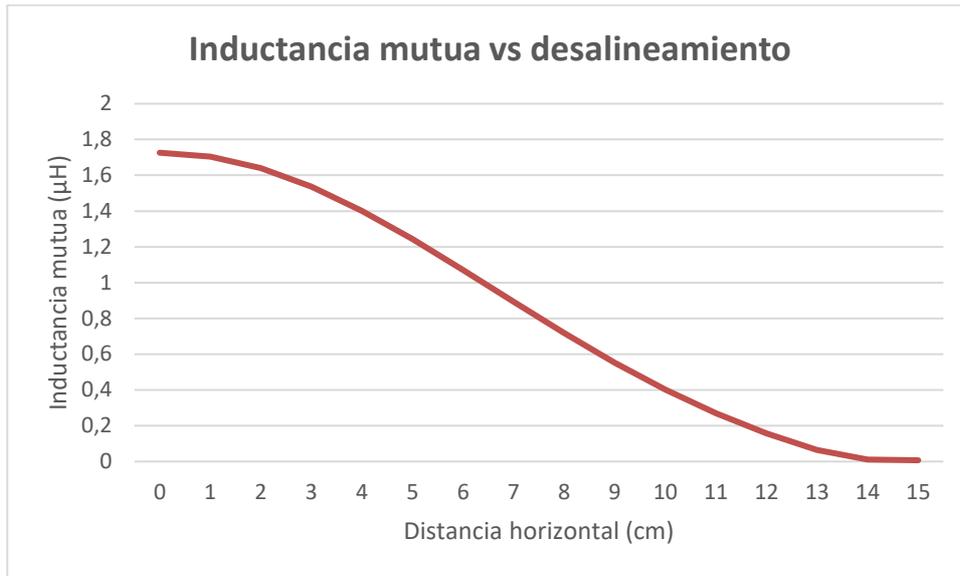


Figura 6-25: Inductancia mutua según el desalineamiento entre las bobinas.

Según los resultados dados en la figura 6-25, la inductancia mutua, y el coeficiente de acoplamiento entre inductores, es inversamente proporcional al desalineamiento entre estos. No obstante, se puede observar como la respuesta obtenida no es exactamente la misma que la obtenida respecto a la variación en la distancia. En este caso, el descenso inicial es más suave, siendo más pronunciado en una fase lineal descendente, a partir de los tres centímetros de desalineamiento. Aun así, la pendiente máxima obtenida en este caso es mucho menor que la de la misma magnitud respecto la distancia, en la que era más pronunciada, por lo que se puede concluir que el acoplamiento se ve más afectado ante un aumento en la distancia que con un desalineamiento dado.

### 6.2.3 Resultados obtenidos con la pareja de bobinas circulares

Se propone un sistema formado por una pareja de bobinas idénticas entre sí. Ambas tienen las mismas dimensiones y características internas. Estas, son escogidas a partir de las relaciones paramétricas mencionadas en el apartado anterior. La Tabla 6-3, muestra las especificaciones con las que se construyen los inductores.

Tabla 6-3: Especificaciones de diseño de las bobinas circulares

Magnitud	Valor
Número de vueltas de la bobina	17
Radio interno	20 mm
Radio externo	80 mm
Diámetro del conductor	2.59 mm
Distancia entre conductores	1 mm
Distancia vertical entre bobinas	100 mm
Distancia horizontal entre bobinas	0 mm

Con los mencionados parámetros, los resultados referentes a las inductancias y al acoplamiento de las bobinas entre sí son los siguientes:

Tabla 6-4: Valores de inductancias y acoplamientos obtenidos con las bobinas circulares

Magnitud	Valor
Inductancia propia	25.919 $\mu\text{H}$
Inductancia mutua	1.948 $\mu\text{H}$
Coefficiente de acoplamiento	0.0752
Resistencia interna	0.674 $\Omega$

Por último, se muestran los resultados obtenidos referentes a las magnitudes eléctricas del cargador completo, obtenidos a través de la simulación en Matlab Simulink correspondiente a la Figura 5-34.

Tabla 6-5: Resultados del cargador con bobinas circulares

Magnitud	Valor
Potencia de entrada	2248 W
Potencia de carga	1898 W
Rendimiento global	84.43 %
Potencia reactiva a la entrada	262.6 var
Factor de potencia a la entrada	0.993 (inductivo)
Frecuencia de resonancia	1 MHz
Condensador primario	0.997 nF
Condensador secundario	0.997 nF
Corriente a la entrada	9.85 A
Corriente de carga	16.28 A
Tensión de carga	116.6 V

A la hora de analizar los resultados, se observa que algunos de los requisitos iniciales de diseño se alcanzan finalmente, mientras que existe ciertas magnitudes que se salen, en menor o mayor medida, de las pretensiones marcadas.

En primer lugar, la potencia de carga de la batería es de 1.9 kW, satisfaciendo, de esta manera, la condición de diseño de 2 kW nominales de carga. La tensión de carga es de 116.6 V, valor correcto según establece el fabricante de las celdas, tal y como se discutió al principio de este estudio. La corriente de carga es de 16.28 A, estableciendo la carga de la batería en 0.51C, de tal manera que cumple con los criterios de carga establecidos por el fabricante de las celdas.

Más allá de la carga, el factor de potencia a la entrada del cargador es muy próximo a la unidad, con lo que la corriente de entrada es pequeña, inferior a los 10 A. Esto supone un gran logro en el diseño del conjunto.

No obstante, aunque con estas especificaciones en las bobinas el cargador es viable y válido, hay ciertos resultados que podrían mejorar. En primer lugar, el rendimiento del conjunto es menor que el 90 %, el establecido inicialmente. Esto se debe a la elevada resistencia interna de los inductores, la cual está causada por la alta frecuencia del sistema.

La base de este problema recae sobre la baja inductancia lograda por parte de las bobinas, y el bajo acoplamiento logrado entre estas. Esto resulta en una inductancia mutua muy pequeña, razón por la cual se necesita una muy alta frecuencia para alcanzar las condiciones de diseño.

Existen distintas soluciones posibles para elevar la inductancia mutua y encontrar una salida ante el problema descrito. En primer lugar, se encuentra la posibilidad de incluir ferrita en los extremos de las bobinas para aumentar el acoplamiento entre ellas, o tratar de disminuir la distancia entre estas para lograr el mismo fin. Otra opción, es aumentar la inductancia propia de cada una de las bobinas, para que la mutua aumente del mismo modo.

### 6.3 Diseño final mejorado y adaptado a la motocicleta

Con la finalidad de mejorar el problema de acoplamiento que se da en el cargador con la pareja de bobinas circulares e iguales entre sí, se propone un nuevo diseño de ambos inductores. Se busca tanto aumentar la inductancia propia de ambos terminales como perfeccionar su acoplamiento.

En primer lugar, la bobina secundaria tiene un amplio margen de mejora. Inicialmente, este terminal se propuso de forma circular, la cual no se adapta a la superficie de la quilla. Con el fin de lograr dicha mejor adaptación, se diseña una bobina con forma de elipse, cuyas dimensiones son las mismas que las de la superficie inferior de la motocicleta, 16 cm de ancho y 32 cm de largo.

Por otra parte, se busca aumentar el tamaño de la bobina primaria. De esta manera, el inductor pasa de 8 cm de radio a 18 cm. Al aumentar ambas bobinas, se produce una mejora en la inductancia mutua por dos motivos. El primero de ellos, se debe a que cuanto mayor inductancia tenga individualmente cada bobina, mayor inductancia común tendrá el conjunto. Por otro lado, si la superficie de las bobinas en el espacio es mayor, mayor acoplamiento entre estas se consigue.

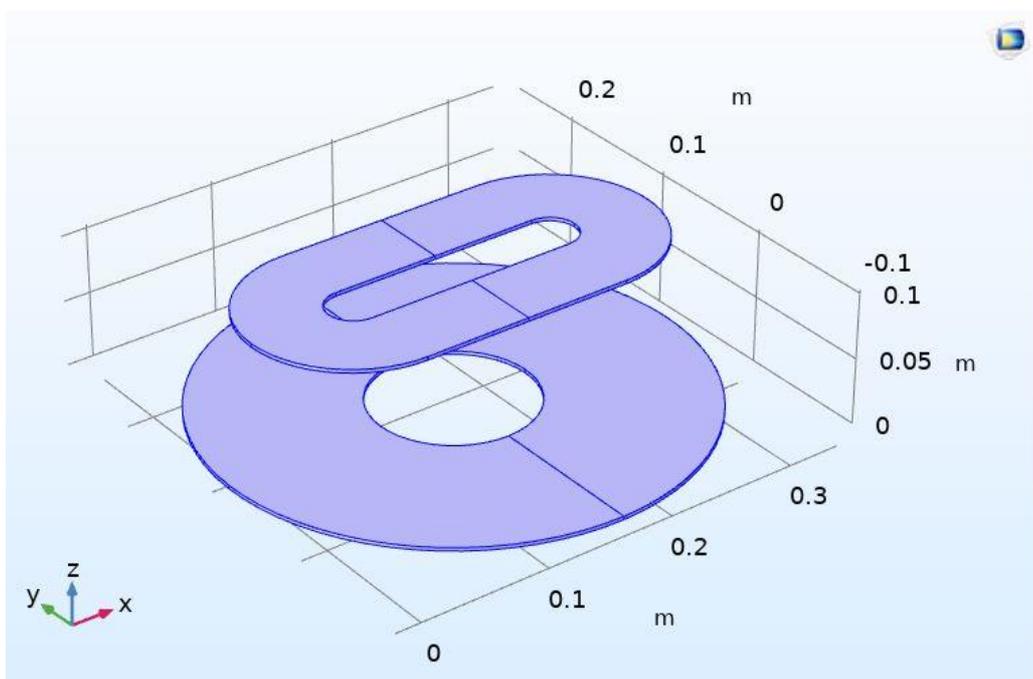


Figura 6-26: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas.

La realización del modelo de la bobina primaria ha sido similar a la de las bobinas circulares del apartado anterior. Sin embargo, se necesita modelar la bobina elíptica de una forma diferente. Ya que la distancia desde el centro no es constante, en lugar de necesitar solamente el radio interno y el radio externo para construir el modelo se necesitan tres variables: el largo, ancho y la longitud del devanado, que es la distancia entre el comienzo y el fin del conductor que conforma el inductor. Es constante a lo largo de la superficie de la bobina elíptica, y es equivalente a la diferencia entre el radio externo y el interno en la bobina circular.

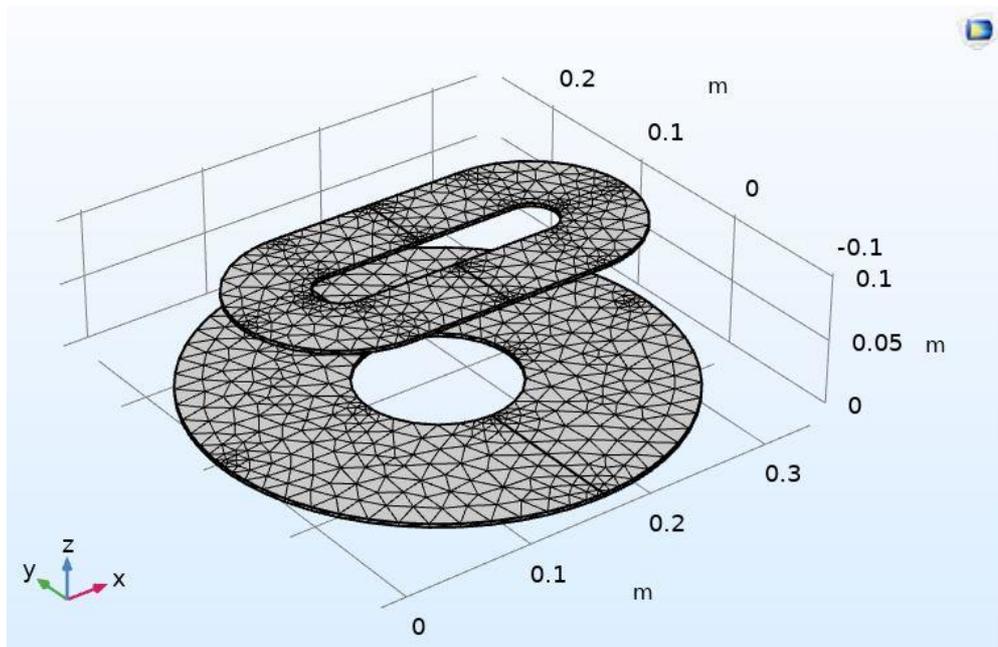


Figura 6-27: Malla de elementos finitos de pareja de bobinas mejoradas.

De nuevo, se crea una red de elementos finitos en el entorno de las bobinas para realizar los distintos cálculos en el sistema. Aparte de las bobinas, la malla de elementos finitos se crea en el espacio a su alrededor mediante una geometría basada en una esfera, tal y como se hace en el caso de la pareja de bobinas circulares. Gracias a esta esfera exterior, es posible mostrar visualizaciones tales como el campo magnético alrededor de las bobinas.

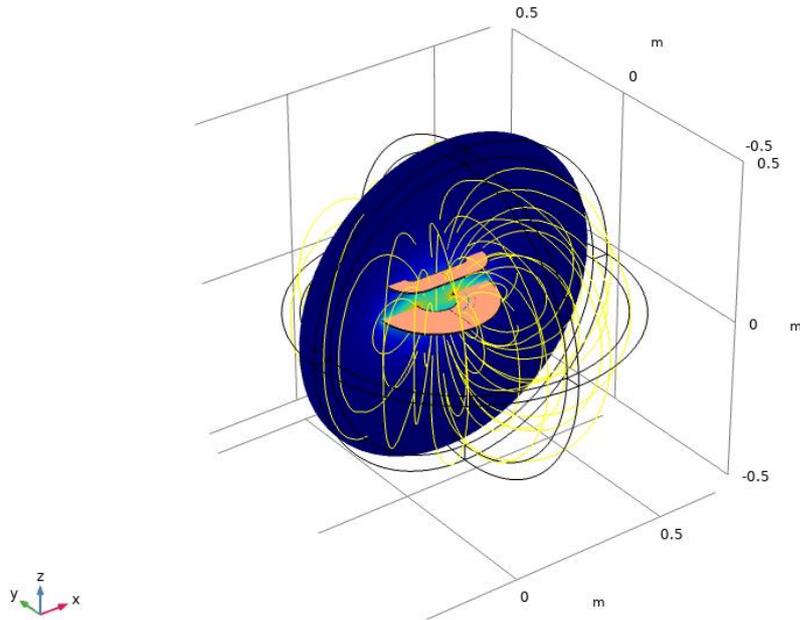


Figura 6-28: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas.

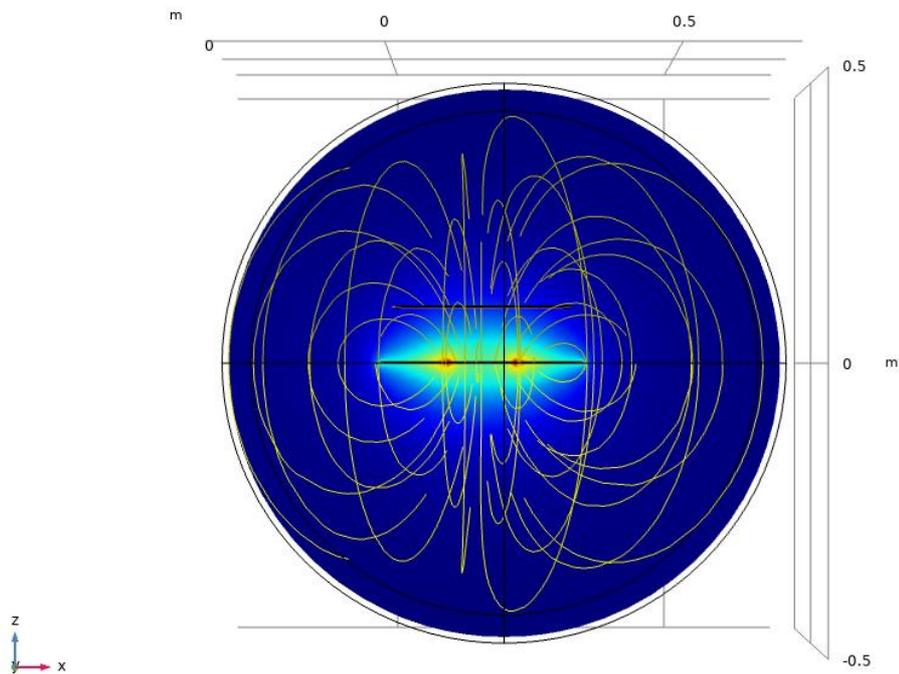


Figura 6-29: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas sobre el plano Y-Z.

En este caso, se puede apreciar cómo, a partir de los resultados, existe un mayor número de líneas de flujo que se cierran atravesando la superficie de la bobina secundaria. De esta manera, es previsible que la inductancia mutua entre las bobinas ha mejorado.

Para comprobar que, efectivamente, ha mejorado el acoplamiento y la inductancia entre inductores, se realizan las mismas simulaciones que en el apartado anterior con la pareja de bobinas circulares y se comparan entre sí.

Se realiza el estudio de la inductancia mutua respecto la distancia entre las bobinas y respecto el desalineamiento horizontal entre estas.

A la hora de las simulaciones, todos los parámetros, excepto el parámetro concreto con que se haga la comparación (distancia o desalineamiento) se mantienen constantes. De esta manera, en la bobina primaria, el radio interno se toma de 60 mm, el radio externo de 180 mm y 28 vueltas de conductor. Sobre la bobina elíptica, el ancho se toma de 160 mm, el largo de 320 mm, la longitud de cobre de 60 mm y 20 vueltas de conductor.

### 6.3.1 Mejora respecto a la distancia entre bobinas

En primer lugar, se estudia cómo afecta un aumento en la distancia entre los terminales respecto la inductancia mutua entre ambas. Para entender, de nuevo, mejor como están las bobinas geométricamente cuando están más alejadas, se presenta en la Figura 6-30 el modelo de ambas bobinas en tres dimensiones a 15 cm de distancia entre sí.

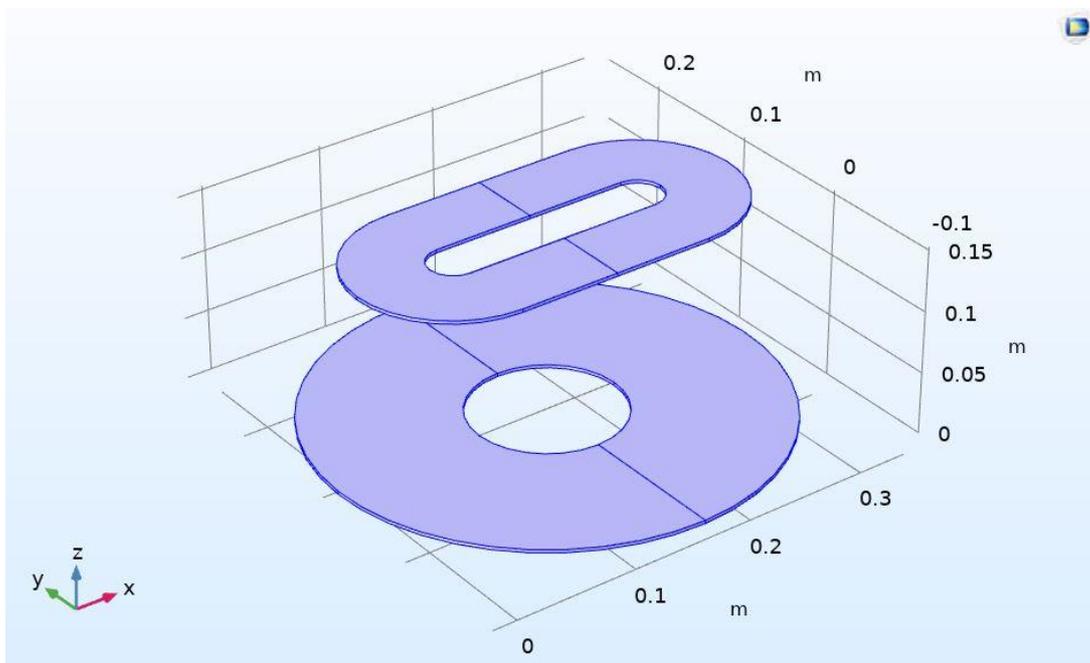


Figura 6-30: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia.

A continuación, se muestra el campo magnético entre las bobinas cuando estas se encuentran a 15 centímetros de distancia entre sí. Ambas figuras deben ser comparadas con las resultantes de la pareja de bobinas circulares a 15 centímetros de distancia (Figura 6-19 y 6-20) para visualizar la mejora lograda.

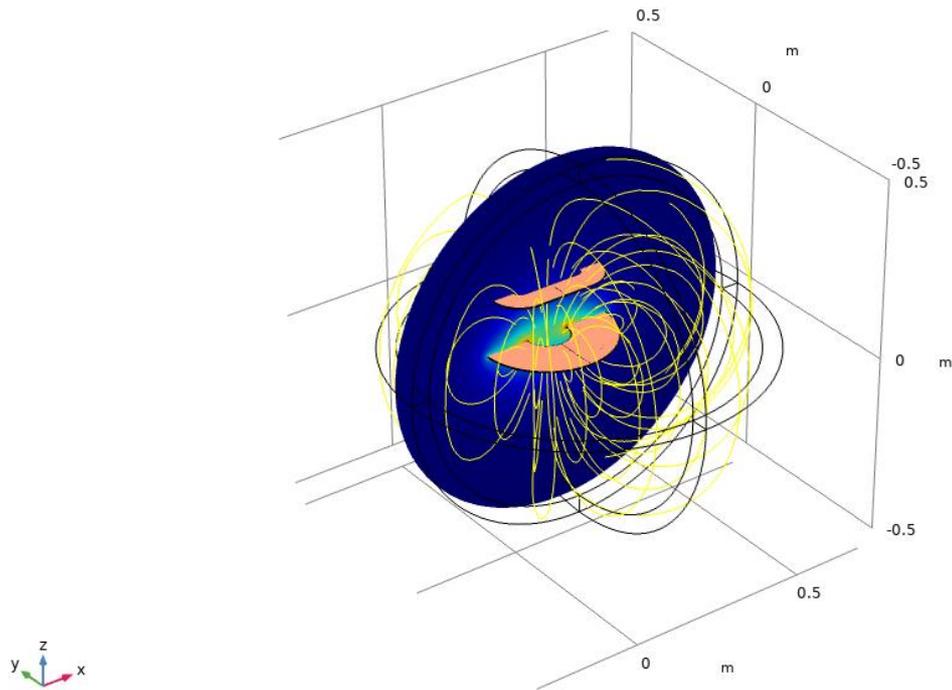


Figura 6-31: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia.

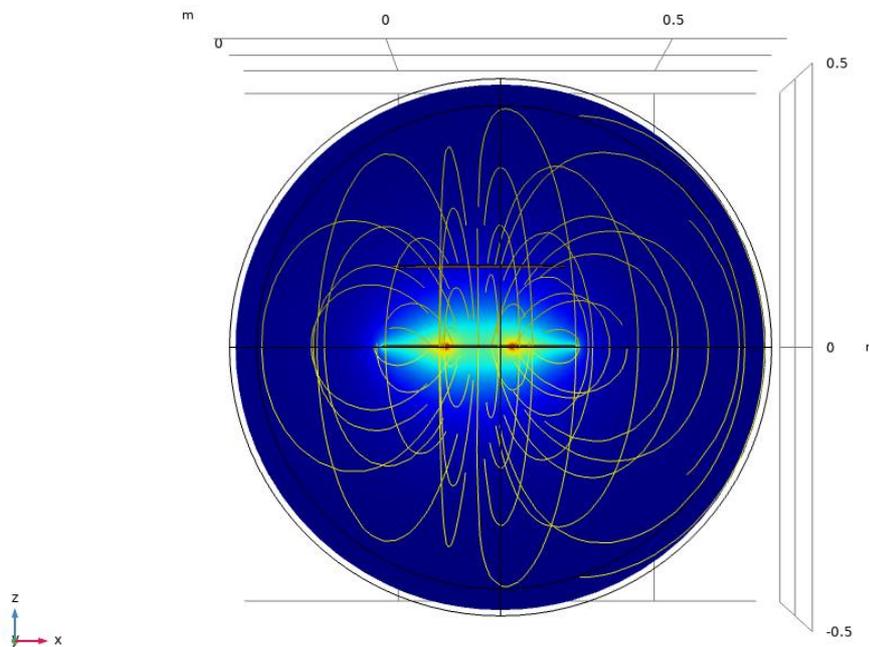


Figura 6-32: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas a mayor distancia sobre el plano Y-Z.

Observando la distribución de campo magnético en el entorno de la pareja de bobinas, se aprecia como el número de líneas que, partiendo del terminal inferior, se cierran sobre el superior, es muy superior en el caso

de las bobinas mejoradas respecto la pareja de inductores circulares inicial.

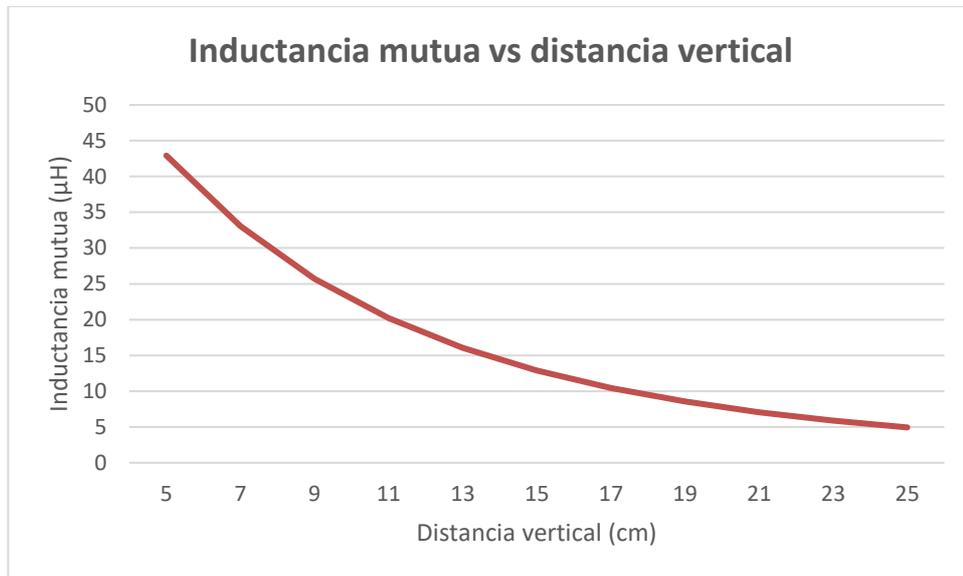


Figura 6-33: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas mejoradas.

Observando los resultados recogidos en la Figura 6-33, se llega a la conclusión de que la solución encontrada mejora la inductancia entre terminales. La mejora se puede visualizar en dos características distintas. En primer lugar, el máximo de inductancia mutua, que se obtiene en esta serie a una distancia de 5 cm, es de unos 43  $\mu\text{H}$ , más de 7 veces más que los que se tiene con la pareja de bobinas circulares.

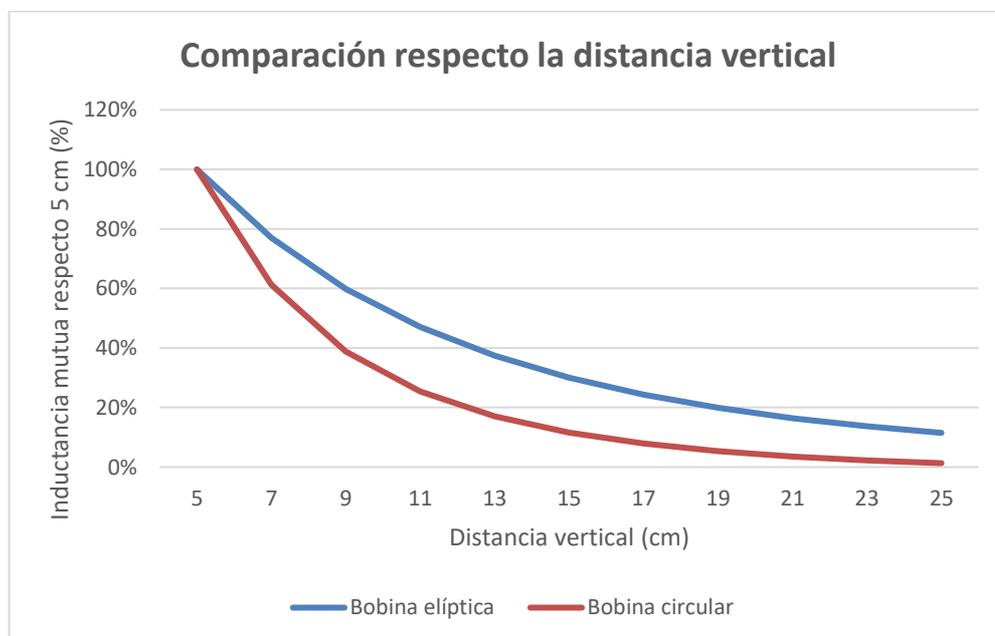


Figura 6-34: Caída de inductancia mutua de ambos casos respecto la distancia.

En segundo lugar, se puede apreciar claramente como la bobina elíptica en el secundario y el mayor tamaño de las bobinas hacen que el acoplamiento no caiga tan bruscamente en comparación con el caso anterior. En la Figura 6-34 se comparan las curvas normalizadas respecto el valor de inductancia de 5 cm de cada una de las series. Se confirma, por tanto, que no sólo el conjunto posee mayor inductancia entre las bobinas, si no también que existe menor problema de acoplamiento ante un incremento en la distancia entre las bobinas.

### 6.3.2 Mejora respecto al desalineamiento entre bobinas

Por último, se estudia cómo depende la inductancia entre las bobinas del desalineamiento horizontal entre estas. En este caso, a diferencia de lo que sucede con la pareja de bobinas del apartado anterior, debido a que la bobina secundaria es elíptica, el desalineamiento no tiene la misma incidencia si ocurre a lo largo de un eje o del otro.

Para comprender visualmente la disposición espacial de ambas bobinas cuando existe desalineamiento, se muestra en la Figura 6-35 y 6-36 la bobina superior desplazada 15 centímetros sobre el eje mayor y sobre el eje menor respectivamente. En ambas imágenes, la distancia vertical entre ambos terminales es de 10 centímetros.

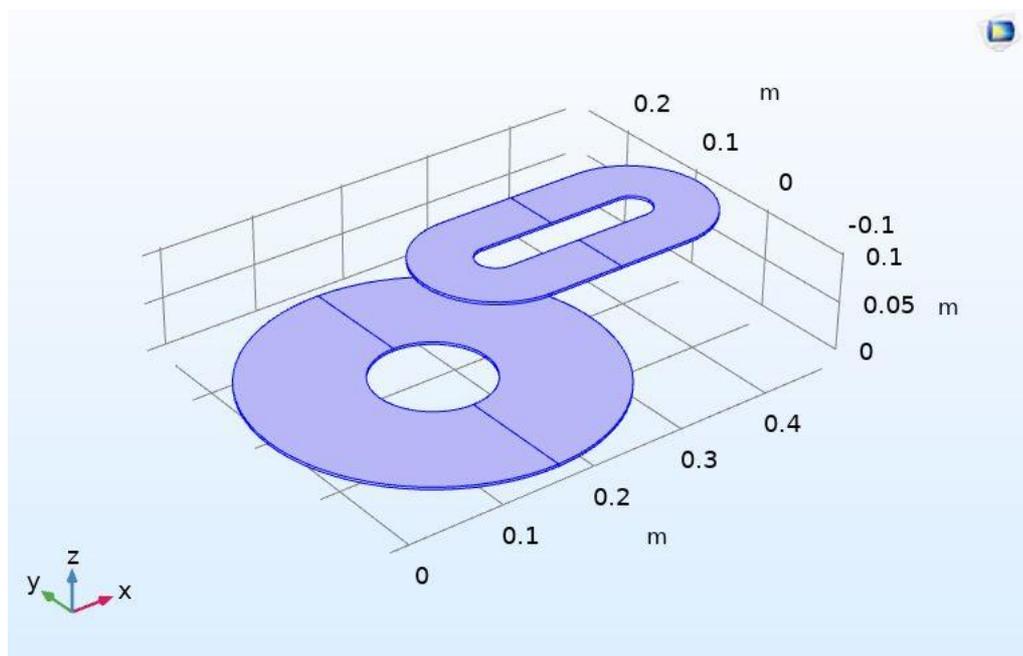


Figura 6-35: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento en el eje mayor.

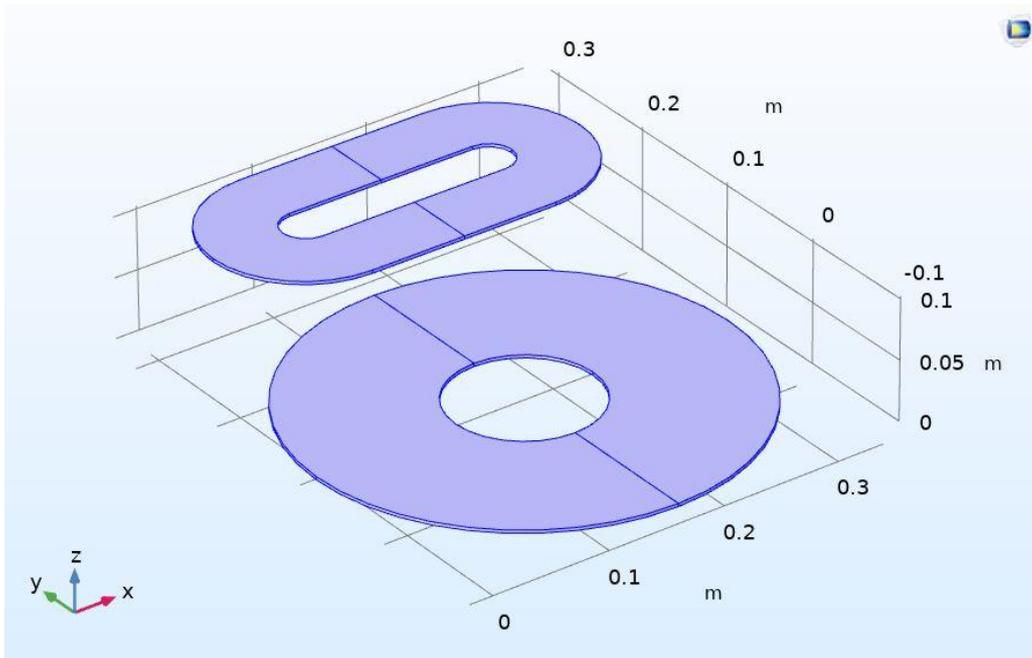


Figura 6-36: Modelo de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento en el eje menor.

Cuando la bobina se desplaza en su eje mayor, se aprecia como queda más proporción de la bobina en el interior de la proyección sobre la bobina circular inferior. Por el contrario, al desplazarse en su eje menor, se aprecia que esta queda más externa en su proyección sobre el suelo y el terminal inferior. Este es un hecho importante de mención a la hora de cuantificar los efectos del desplazamiento horizontal sobre uno de sus ejes o de forma oblicua a estos.

A continuación, se muestra el campo magnético entre las bobinas cuando estas tienen un desalineamiento de 15 centímetros entre sí. Ambas figuras deben ser comparadas con los resultados obtenidos en la Figura 6-23 y 6-24, referentes al estudio de desalineamiento en la pareja de inductores circulares.

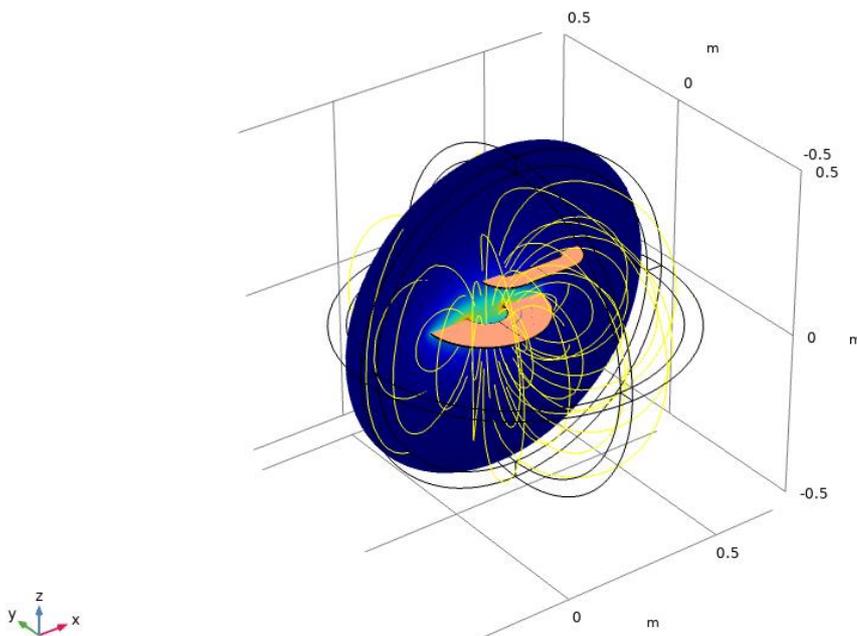


Figura 6-37: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento.

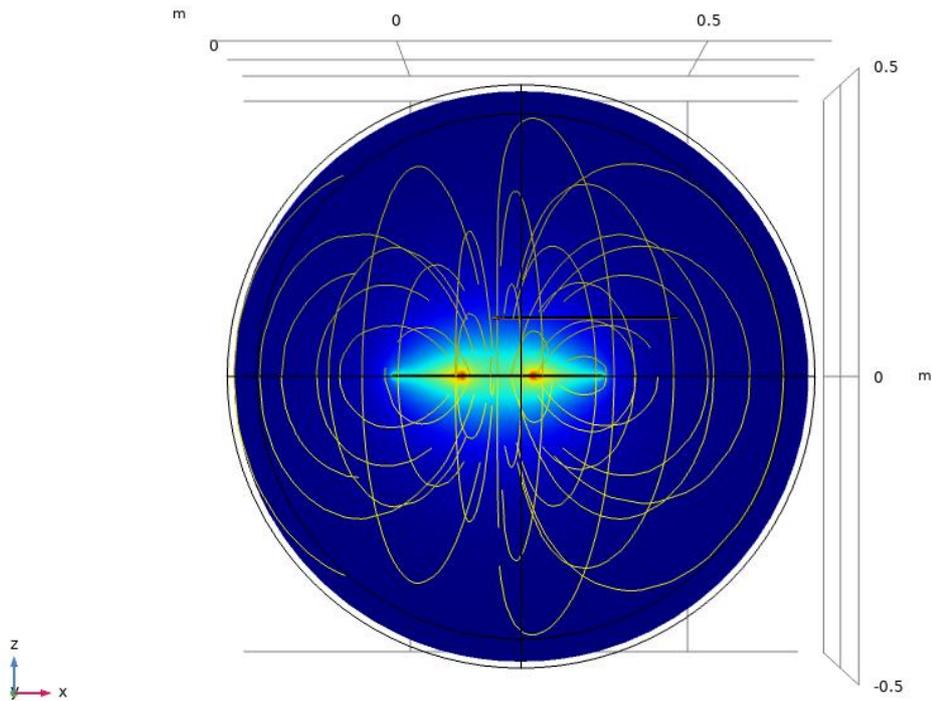


Figura 6-38: Campo magnético alrededor de la pareja de bobinas mejoradas con desalineamiento sobre el plano Y-Z.

Observando la distribución de campo magnético en el entorno de la pareja de bobinas, se aprecia cómo el número de líneas que, partiendo del terminal inferior, se cierran sobre el superior, es muy superior en el caso de las bobinas mejoradas respecto la pareja de inductores circulares inicial cuando hay desplazamiento horizontal entre las bobinas, de igual forma que sucede al aumentar la distancia vertical entre estas.

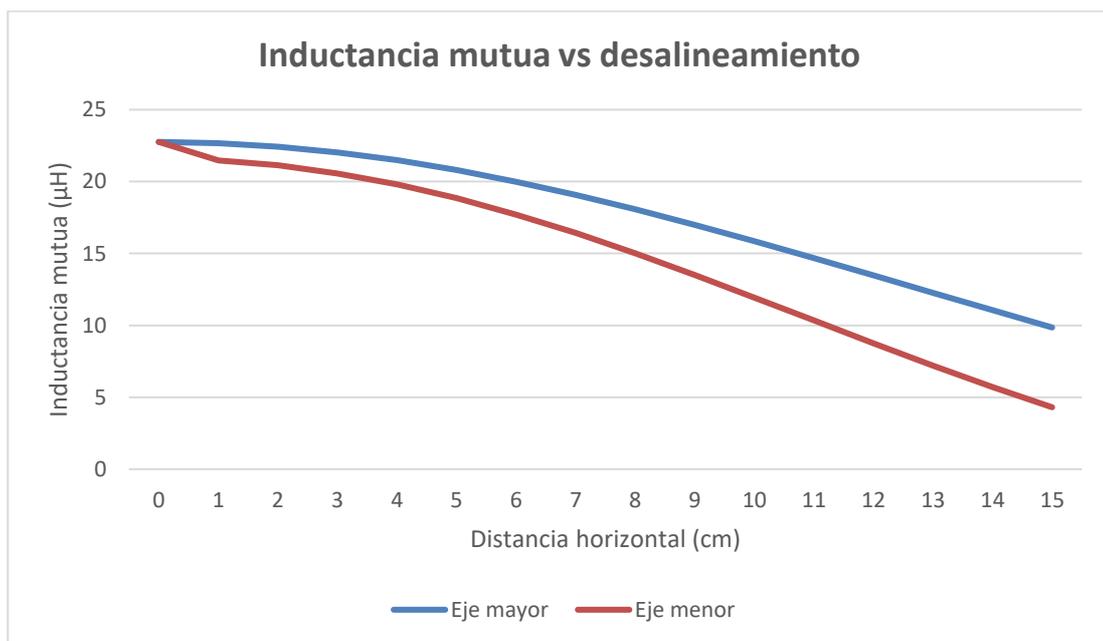


Figura 6-39: Inductancia mutua según la distancia entre las bobinas mejoradas.

Estudiando la Figura 6-39 se llega a dos conclusiones distintas. En primer lugar, se comprueba que el desalineamiento tiene menor efecto negativo en el conjunto cuando se produce sobre el eje mayor de la bobina elíptica.

En segundo lugar, comparando los resultados obtenidos con las bobinas mejoradas respecto los de la pareja de bobinas circulares, en la Figura 6-25, se aprecia como el sistema ha aumentado considerablemente la inductancia ambos terminales. Para el caso de desalineamiento nulo y una distancia entre bobinas de 10 cm, la inductancia mutua es aproximadamente 13 veces superior en la pareja de bobinas mejoradas.

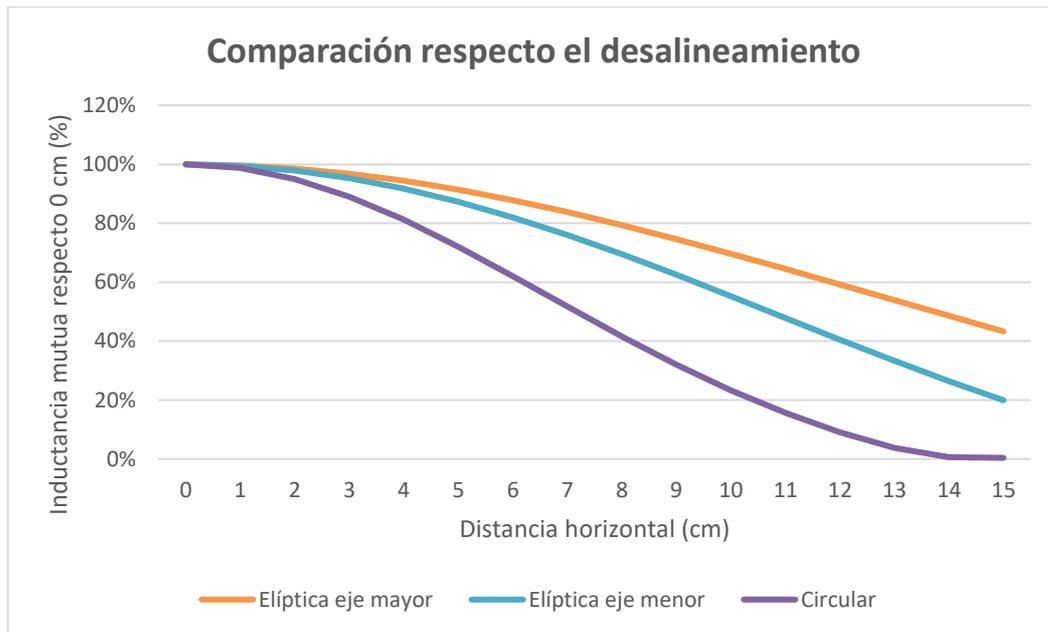


Figura 6-40: Caída de inductancia mutua de ambos casos respecto el desalineamiento.

Por último, se presenta una comparación de la caída de la inductancia normalizada respecto el valor con 0 centímetros de desalineamiento en los tres casos diferentes posibles: la pareja de bobinas circulares, y la pareja de bobinas mejoradas sobre el eje mayor de la bobina elíptica y sobre el menor.

Se observa cómo, aunque la bobina elíptica desplazada sobre su eje menor tenga peor caída de acoplamiento que la misma sobre su eje mayor, ambas se encuentran en una posición mucho más favorable que la pareja de bobinas circulares. De esta manera, un desplazamiento lateral de 6 centímetros en la pareja de inductores inicial tiene la misma caída de acoplamiento que la bobina elíptica a 9 centímetros sobre su eje menor y a 12 sobre su eje mayor.

Se comprueba, por tanto, que la segunda pareja de bobinas propuesta mejora las condiciones de carga respecto a la pareja inicialmente presentada, tanto ante un posible desalineamiento lateral, como ante un aumento en la distancia entre los terminales.

## 6.4 Resultados finales

Se ha demostrado cómo el sistema logra una mejora en cuanto a la inductancia obtenida respecto al sistema compuesto por la pareja de bobinas circulares. Para comprobar que las implicaciones de esta mejora se muestran, en este apartado, los resultados finales de la simulación del sistema completo. En primer lugar, la Tabla 6-6 y 6-7 muestran las especificaciones de diseño con la que se construyen ambas bobinas.

Tabla 6-6: Especificaciones de diseño de la bobina primaria mejorada.

Magnitud	Valor
Número de vueltas de la bobina	28
Radio interno	60 mm
Radio externo	180 mm
Diámetro del conductor	2.59 mm
Distancia entre conductores	1.76 mm

Tabla 6-7: Especificaciones de diseño de la bobina secundaria mejorada.

Magnitud	Valor
Número de vueltas de la bobina	20
Ancho	160 mm
Largo	320 mm
Longitud de cobre	60 mm
Diámetro del conductor	2.59 mm
Distancia entre conductores	0.432 mm
Distancia vertical respecto la primaria	100 mm
Distancia horizontal respecto la primaria	0 mm

Con los mencionados parámetros, los resultados referentes a las inductancias y al acoplamiento de las bobinas entre sí son los siguientes:

Tabla 6-8: Valores de inductancias y acoplamientos obtenidos con las bobinas mejoradas.

Magnitud	Valor
Inductancia propia	
$L_1$	187.82 $\mu\text{H}$
$L_2$	88.06 $\mu\text{H}$
Inductancia mutua	21.6 $\mu\text{H}$
Coefficiente de acoplamiento	0.168
Resistencia interna	
$r_1$	0.426 $\Omega$
$r_2$	0.335 $\Omega$

Por último, se muestran los resultados obtenidos referentes a las magnitudes eléctricas del cargador completo, obtenidos a través de la simulación en Matlab Simulink correspondiente a la Figura 5-34.

Tabla 6-9: Resultados del cargador con bobinas mejoradas.

Magnitud	Valor
Potencia de entrada	2250 W
Potencia de carga	2028 W
Rendimiento global	90.13 %
Potencia reactiva a la entrada	90.43 var
Factor de potencia a la entrada	0.9992 (inductivo)
Frecuencia de resonancia	85 kHz
Condensador primario	18.67 nF
Condensador secundario	39.81 nF
Corriente a la entrada	9.81 A
Corriente de carga	17.38 A
Tensión de carga	116.7 V

En primer lugar, se comprueba que, efectivamente, la parte de los resultados que, ya en la pareja de bobinas anterior cumplía los requisitos de diseño, lo siguen cumpliendo en este nuevo caso. Se cumple que la potencia de carga obtenida coincide con la potencia de carga de diseño, incluso se aproxima más a su valor exacto, ya que, anteriormente, su valor era de 1898 W y en este nuevo diseño se obtiene 2028 W, mucho más cerca de los 2 kW de diseño.

La tensión y corriente de carga de la batería siguen cumpliendo las condiciones de carga definidas por el fabricante de las celdas. La variación entre la tensión y corriente de carga de ambos modelos es muy poco apreciable. Además, el factor de potencia sigue cumpliendo con su especificación de diseño, siendo su valor también en este caso prácticamente igual a la unidad.

Más allá de estas magnitudes, se aprecia por los resultados obtenidos que el problema de diseño inicial ha sido solucionado completamente. Al aumentar el acoplamiento entre bobinas y la inductancia de estas, se necesita una frecuencia menor para obtener la potencia de diseño. Al trabajar el sistema en una frecuencia menor, los conductores sufren menor efecto pelicular, descendiendo, de esta manera, la resistencia interna de ambos inductores. La menor resistencia interna ha favorecido el aumento del rendimiento global del cargador, siendo este del 90.13 %, justo por encima del objetivo de diseño marcado.

Aunque no fuera una meta marcada en el diseño inicial, el diseño del conjunto se construye sobre una frecuencia de 85 kHz debido a que esta es la frecuencia a la que funciona una parte de los cargadores inalámbricos en la actualidad, según lo marca las especificaciones de la Asociación de Ingenieros del Automóvil de los Estados Unidos [56]. No obstante, hay marcas que no siguen este modelo de diseño, ya que no existe un estándar internacional en la carga inalámbrica. Además, incluso si existiese dicho estándar, lo marcado por la SAE solo incluye los sistemas de carga inalámbrica para aplicaciones en automóviles, con lo que no sería de necesario cumplimiento en el caso de diseño de un sistema en una motocicleta. Es la consecuencia de que este sistema de carga inalámbrico a penas se haya planteado hasta la fecha en motos, siendo los coches los únicos que están empezando a incluir esta tecnología, como se ve en el Estado del Arte, en el Capítulo 3 de este estudio

Finalmente, dado que se cumplen todos los objetivos marcados en el diseño del cargador inalámbrico, se toma el conjunto formado por la bobina primaria circular y la secundaria elíptica como el definitivo.

## 6.5 Estudio de incidencia sobre las personas

Como punto final de este estudio, se plantea la posible incidencia sobre las personas que se encuentren en el entorno del cargador inalámbrico mientras se está produciendo la carga de la batería.

La seguridad de los distintos elementos, tanto eléctricos como basados en ondas electromagnéticas, está siendo objeto de controversia en los últimos tiempos. Tecnologías como las líneas eléctricas, el microondas, el WIFI o las antenas móviles han llevado consigo que una parte de la opinión pública las tome como dañinas para la salud humana. Este movimiento se encuentra fuertemente al alza, con la reciente incorporación de las antenas de telefonía con tecnología 5G. Por ello, es necesario demostrar, empleando el método científico, que la tecnología de carga inalámbrica es segura en humanos.

El encargado de velar por la seguridad humana, y estudiar la influencia de las mencionadas tecnologías sobre la salud en las personas es el ICNIRP. Esta institución internacional se encarga de crear una guía que debe ser cumplida por parte de cualquier tecnología que incluya una variación de campos eléctricos o magnéticos. En este caso, el fundamento en que se sostiene la transferencia de carga inalámbrica es la variación de campo magnético para transferir potencia entre ambas bobinas.

Según la frecuencia, la guía de referencia del ICNIRP se divide en dos: La guía de límites de exposición de campos con baja frecuencia (1 Hz – 100 kHz) y la de exposición de campos con alta frecuencia (100 kHz – 300 GHz). Este caso de estudio se sitúa en la guía de baja frecuencia, debido a la mejora en el diseño, ya que, inicialmente, la frecuencia de trabajo era de 1000 kHz, situándose en la guía de campos con alta frecuencia. A mayor frecuencia, mayores restricciones impone la normativa, ya que más dañina sobre la salud humana resulta la tecnología. Los límites de exposición en bajas frecuencias se muestran en la Tabla 6-10 [57].

Tabla 6-10: Límites de campo magnético de baja frecuencia.

Frecuencia	Densidad de flujo magnético (T)
1 Hz - 8 Hz	$4 \times 10^{-2} / f^2$
8 Hz - 25 Hz	$5 \times 10^{-3} / f$
25 Hz - 50 Hz	$2 \times 10^{-4}$
50 Hz - 400 Hz	$2 \times 10^{-4}$
400 Hz - 3 kHz	$2 \times 10^{-2} / f$
3 kHz - 100 kHz	$2.7 \times 10^{-5}$

Según la guía de exposición a campos de baja frecuencia, se marca el límite de densidad de flujo magnético sobre las personas que se encuentren alrededor de la bobina en  $27 \mu\text{T}$ .

Para comprobar que el conjunto de inductores diseñados cumple con lo descrito en la normativa de exposición humana, se construye una simulación en Comsol Multiphysics. Se parte del modelo de bobinas mejoradas, que es el diseño final, al cual se le añade un cilindro a cierta distancia. El cilindro simula una pierna humana, escogiendo piel como material de este en el software.

La simulación consiste en observar a qué distancia debe situarse una persona para que la densidad de flujo magnético sobre esta esté dentro de los límites seguros.

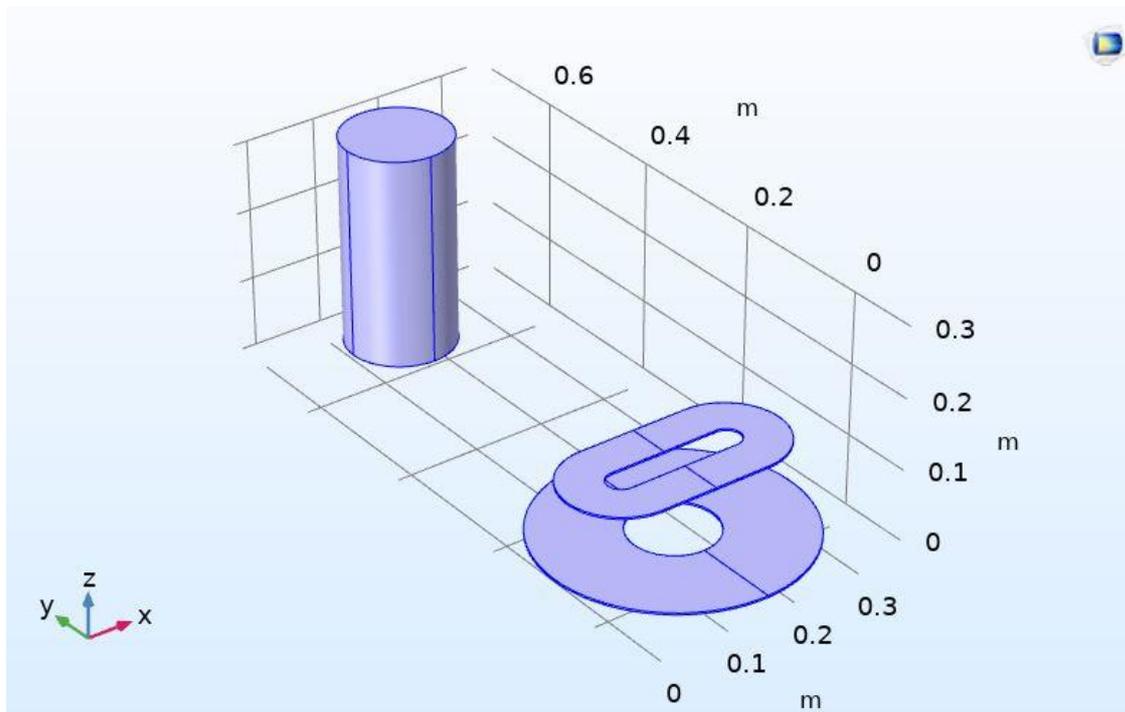


Figura 6-41: Modelo de estudio sobre la salud en las personas.

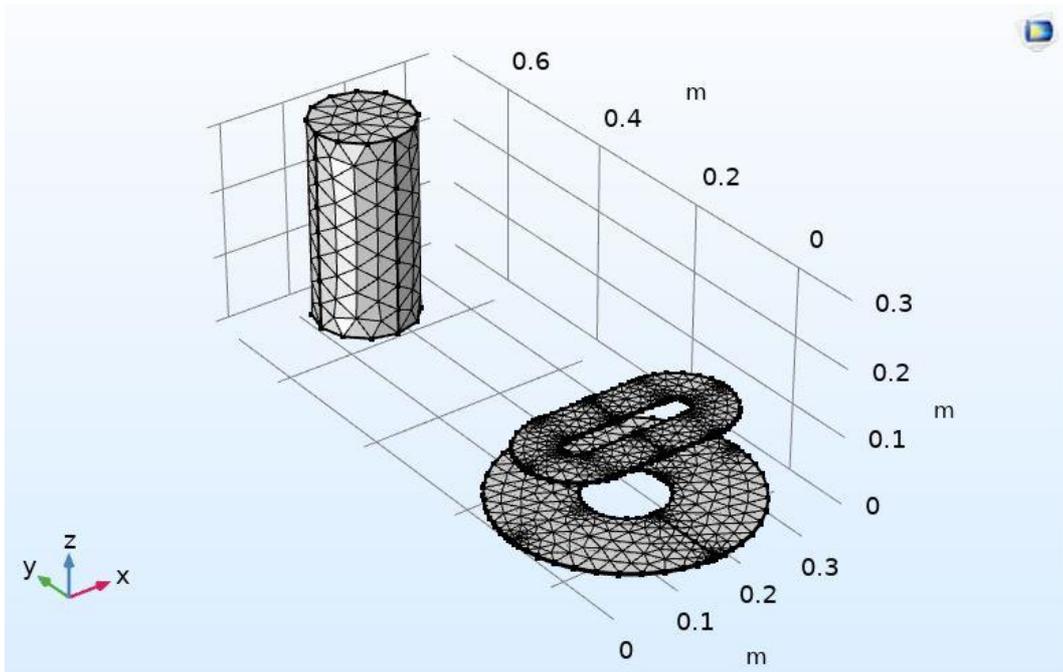


Figura 6-42: Malla de elementos finitos de estudio de salud sobre las personas.

La malla de elementos finitos permite, tanto realizar todos los cálculos de la simulación, como visualizar sobre esta los resultados finales. En este caso, aunque la malla de elementos finitos se cree en todas las superficies del modelo, los resultados sólo se plasman sobre la superficie correspondiente con la pierna humana, para apreciar mejor el flujo magnético sobre esta.

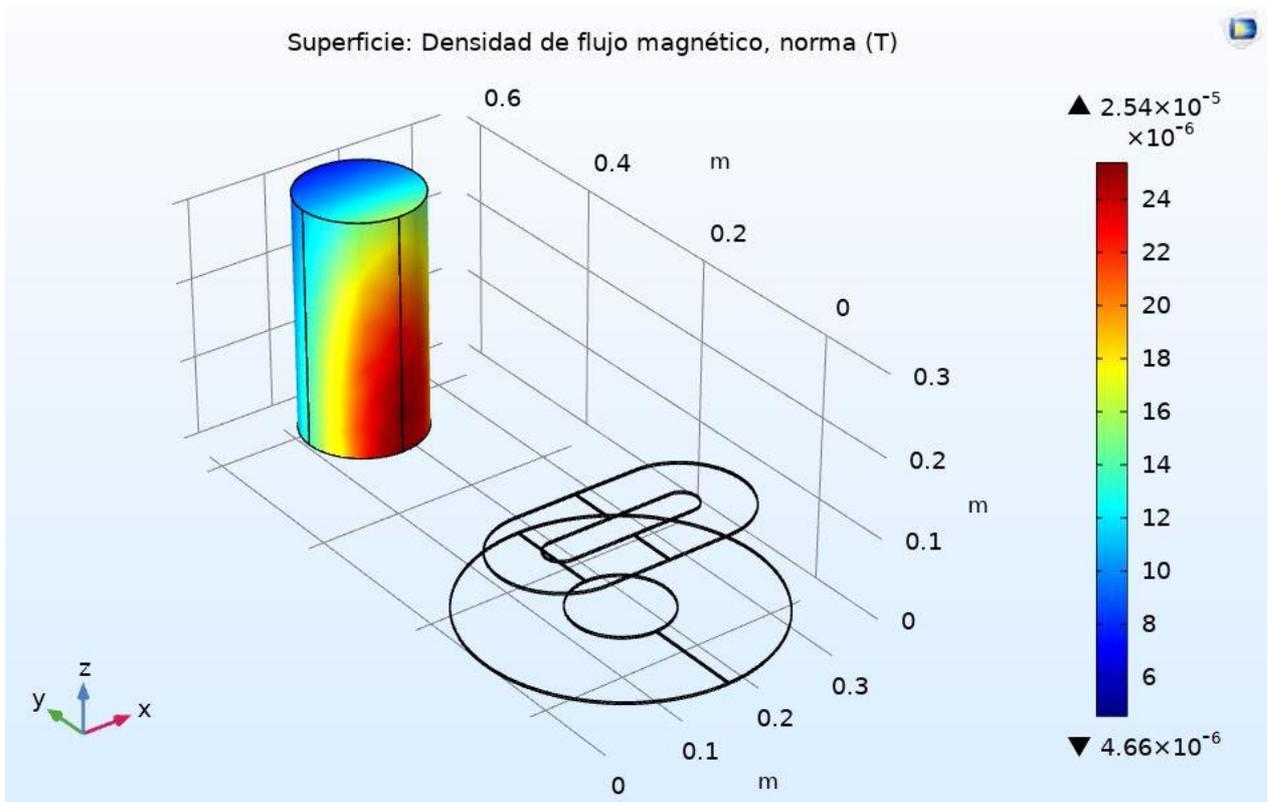


Figura 6-43: Incidencia de flujo magnético sobre una pierna humana a 25 cm de distancia.

Como se puede apreciar en la Figura 6-43, a 25 centímetros de distancia entre las personas y la pareja de bobinas el conjunto cumple con los criterios de exposición en los humanos. El valor máximo obtenido es de  $25.4 \mu\text{T}$ , ligeramente inferior al límite de  $27 \mu\text{T}$ . Cuanto mayor sea la distancia respecto las bobinas, menor densidad de flujo magnético se tiene sobre la persona.

Por consiguiente, el cargador basado en carga inalámbrica no sólo cumple con las condiciones iniciales de diseño, si no que también cumple con las condiciones de seguridad en humanos que se exigen para este tipo de tecnologías. Si el cargador tuviese mayor potencia de carga, la mayor corriente sobre la bobina primaria aumentaría la densidad de flujo magnético de la misma, haciendo que aumente la distancia mínima de seguridad en consecuencia. Lo mismo sucede si la frecuencia del sistema aumentara, ya que, a mayor frecuencia, mayor peligro sobre la salud de las personas existe.

Es importante recalcar que la distancia de seguridad se cuenta desde la parte exterior de la bobina primaria, no desde el centro de la misma, ya que es esta la que recibe energía eléctrica de la red y genera el campo magnético a su alrededor.

Una de las consecuencias de esta distancia, es la dificultad existente para diseñar un sistema de transferencia de energía dinámico, en el que la motocicleta se cargue en movimiento. Esto no parece posible a priori, ya que el piloto se encuentra a una distancia menor de la distancia mínima de seguridad, con lo que el sistema no cumpliría con la normativa y la salud del piloto estaría en peligro.

No obstante, la carga dinámica sí que es posible en automóviles, ya que el propio chasis del vehículo es capaz de proteger frente al campo magnético exterior. Además, es posible emplear elementos adicionales a la pareja de bobinas, como una capa de ferrita, para que la incidencia sobre las personas sea menor, pero, aun así, el piloto estaría demasiado cerca de la bobina secundaria, con lo que no sería suficiente para que la carga dinámica fuese segura.

# 7 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

---

Finalmente, se pueden extraer diversas conclusiones a través de los resultados obtenidos a lo largo de este estudio.

En primer lugar, queda demostrado que la transferencia inductiva inalámbrica de potencia sin resonancia no es una tecnología viable para poder ser aplicada en un cargador con las características que se tienen en este, ya que se necesita un acoplamiento muy elevado entre ambos terminales, lo que prácticamente imposibilita al sistema a transferir energía con 10 centímetros de distancia entre ellos. Además, la alta corriente a la entrada y el bajo rendimiento global hacen que no sea una solución muy fiable de emplear.

Por otro lado, sí se comprueba que añadir resonancia al sistema soluciona los problemas de la transferencia de carga inductiva en este caso de estudio. El acoplamiento no necesita ser elevado para que la energía se transfiera a distancia entre las bobinas. Además, la resonancia hace descender fuertemente la potencia reactiva a la entrada del sistema, con lo que soluciona también el problema de la elevada corriente en este punto. Con la tecnología RIPT se logra cumplir con los criterios de diseño, transfiriendo una potencia de 2 kW a una distancia de 10 centímetros con un rendimiento global del 90.13%.

Queda demostrado, por tanto, que la transferencia inalámbrica resonante de potencia es una tecnología posible de incluir en una motocicleta eléctrica. Aunque esta tecnología aún se encuentra mucho más desarrollada en automóviles que en motos, y la superficie disponible para insertar una bobina en una motocicleta es menor que en un coche, es posible integrar un sistema con la potencia suficiente como para cargar su batería.

Por último, aunque la carga de motocicleta mediante transferencia inalámbrica sea posible, se concluye que no es viable su implementación en los sistemas de motos compartidas de las ciudades. La distancia lateral que se debe dejar entre la motocicleta y la zona de seguridad en la que es inseguro para las personas dificulta su implementación en la práctica. No obstante, a una potencia de carga menor, existe la posibilidad de una viabilidad real de esta aplicación práctica, la cual podría ser motivo de una continuación de este estudio. Por otro lado, queda demostrado que la transferencia dinámica no es posible debido, de nuevo, a la distancia mínima entre las bobinas y las personas. Sin embargo, el punto principal de estudio sí se cumple, es posible cargar la motocicleta de competición del equipo US Racing, debido a que la distancia entre la zona de carga de la moto en el box de la competición y la zona de trabajo es mayor que la zona de seguridad necesaria, la cual es de 25 centímetros en este caso, siendo, de esta manera, viable de emplear en la práctica.

Con respecto a posibles líneas futuras, la tecnología de transferencia inalámbrica se encuentra en constante mejora y estudio en la actualidad.

Una de las mayores líneas de investigación referente a esta tecnología estudia la inclusión de resonancia en el sistema mediante dos elementos externos diferentes. Es decir, el sistema en lugar de tener dos bobinas, la primaria y la secundaria, tiene cuatro bobinas. La bobina primaria y la receptora de la energía no varía su función, mientras que la resonancia se añade en el sistema mediante las otras dos bobinas intermedias. De esta forma, se obtiene mayor rendimiento en la transferencia global. Un punto interesante de cara a futuros estudios sería comparar los resultados obtenidos en el sistema con una pareja de bobinas y otro con cuatro inductores en total.

Otra posible línea de continuación del estudio sería el diseño de otro sistema de resonancia, más complejo que el que se emplea en este estudio. Mejorar el sistema de resonancia podría mejorar la estabilidad del sistema y magnitudes como el rendimiento global, así como tendría incidencia en el control del cargador.

Un punto importante es el control del sistema. Este estudio tiene como finalidad el diseño de las bobinas dentro de las condiciones de potencia que se marquen en el diseño, así como definir estas para que la carga de la batería sea correcta. No obstante, el control en el cargador no tiene cabida en este estudio, siendo motivo de una posible continuación de este, así como la red de comunicaciones entre el cargador y un dispositivo para visualizar en tiempo real las condiciones de carga.

También, si la carga estática en las motocicletas se encuentra aún en fase muy joven de investigación, la carga dinámica en las motos prácticamente ni se plantea en la actualidad. Continuar este estudio con posibles soluciones para hacer la carga dinámica segura para el piloto sería un paso importante a la hora de alcanzar esta meta. Además de estudiar transferencias inalámbricas de potencia entre distintos receptores para una misma bobina emisora, simulando la carga de varias motos simultáneamente desde la bobina primaria, que se encontraría bajo el asfalto.

# REFERENCIAS

---

- [1] J. Croll, *Climate and Time in Their Geological Relations: A Theory of Secular Changes of the Earth's Climate*, 1875.
- [2] IPCC, «Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group 1 to the fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change,» 2013.
- [3] S. R. Weart, «The Carbon Dioxide Greenhouse Effect,» de *The Discovery of Global Warming*, 2008.
- [4] P. Gwynne, «The Cooling World,» *Newsweek*, 1975.
- [5] NASA, «Global Climate Change: Vital Signs of the Planet,» [En línea]. Available: <https://climate.nasa.gov/scientific-consensus/>.
- [6] Ministerio para la Transición ecológica, «[www.miteco.gob.es](http://www.miteco.gob.es),» Gobierno de España, [En línea]. Available: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/naciones-unidas/CMNUCC.aspx>. [Último acceso: 6 diciembre 2019].
- [7] WMO, «The Global Climate in 2015-2019,» 2019.
- [8] IPCC, «Special Report: Global Warming of 1.5°C,» 2018.
- [9] Club Español de la Energía, «Cuaderno de Energía Nº 57,» 2018.
- [10] Dirección General de Tráfico, «La Movilidad al Trabajo: un reto pendiente,» 2018.
- [11] Greenpeace, «El transporte en ciudades y cambio climático,» 2016.
- [12] K. K. A. P. U. P. M. F. A. D. T. M. Jos Lelieveld, «Cardiovascular disease burden from ambient air pollution in Europe using novel hazard ratio functions,» *European Heart Journal*, vol. 40, pp. 1590-1596, 2019.
- [13] M. L. S. García-Ramos, «Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos,» 2017.
- [14] Diario de Sevilla, «Diario de Sevilla,» 20 Septiembre 2019. [En línea]. Available: [https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Plan-Centro-Sevilla-beneficios-trajo-Francisco-Fernandez\\_0\\_1393061205.html](https://www.diariodesevilla.es/sevilla/Plan-Centro-Sevilla-beneficios-trajo-Francisco-Fernandez_0_1393061205.html).
- [15] Ecologistas en Acción, «Balance del Efecto de Madrid Central sobre la Calidad del Aire,» Madrid, 2019.
- [16] EEA, «Air Quality in Europe,» 2016.
- [17] IEA, «Global EV Outlook,» 2019.
- [18] REE & IDAE, «Guía de movilidad eléctrica para entidades locales,» 2019.

- [19] INE, «censo de conductores,» 2018.
- [20] Ecologistas en Acción, *Las cuentas ecológicas del transporte en España*, Madrid: Libros en Acción, 2016.
- [21] J. S. Medina, «Revista antropológica Homo Homini Sacra Res,» 2016. [En línea]. Available: <https://www.homohominisacrares.net/ciencia-y-tecnologia/comunicacion-inalambrica.php>.
- [22] BBVA open mind, Agosto 2017. [En línea]. Available: <https://www.bbvaopenmind.com/ciencia/grandes-personajes/la-torre-wardenclyffe-el-sueno-que-hundio-a-tesla/>.
- [23] IEEE, «Inductive Power Transfer,» *Proceedings of the IEEE*, vol. 101, nº 6, p. 1277, 2013.
- [24] J. C. Broncano, «Pro Android,» [En línea]. Available: <https://www.proandroid.com/tener-carga-inalambrica-android-smartphone/>.
- [25] WPC, «About the WPC,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.wirelesspowerconsortium.com/about/about-wpc>.
- [26] J. J. Castells, «Híbridos y eléctricos,» 2018. [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/sector/coches-electricos-cargaran-sin-cables-wireless-inductiva/20180514095456019403.html>.
- [27] X. Cañadell, «Electromaps,» 14 junio 2013. [En línea]. Available: <https://www.electromaps.com/articulo/bosch-comercializara-el-primer-sistema-de-recarga-de-vehiculos-electricos-inalambrico>.
- [28] M. G. d. Castillo, «autopista.es,» 29 mayo 2018. [En línea]. Available: <https://www.autopista.es/tecnologia/articulo/bmw-coches-electricos-hibridos-plug-in-sistema-carga-inalambrica>.
- [29] Witricity, «Witricity.com,» [En línea]. Available: <https://witricity.com/products/automotive/>.
- [30] G. G. Martínez, «movilidadelectric.com,» 17 febrero 2015. [En línea]. Available: <https://movilidadelectric.com/enide-unplugged/>.
- [31] CIRCE, «CIRCE.es,» [En línea]. Available: <https://www.fcirce.es/smart-mobility-es/victoria>.
- [32] Híbridos y eléctricos, «Hibridosyelectricos.es,» 20 mayo 2017. [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/qualcomm-renault-realizan-carga-dinamica-20-kw-100-km-h-coches-electricos-inalambricos/20170520173750014258.html>.
- [33] G. García, «hibridosyelectricos.com,» 16 septiembre 2018. [En línea]. Available: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/recarga-inductiva-dinamica-asfalto-carreteras/20180911123808021685.html>.
- [34] Smartroad Gotland, «smartroadgotland.com,» 20 marzo 2020. [En línea]. Available: <https://www.smartroadgotland.com/post/successful-test-of-dynamic-charging-of-the-truck>.
- [35] Departamento de física aplicada III, «wiki Laplace,» [En línea]. Available: [http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica\\_II\\_\(Ingenier%C3%ADa\\_Aeroespacial\)](http://laplace.us.es/wiki/index.php/F%C3%ADsica_II_(Ingenier%C3%ADa_Aeroespacial)).
- [36] J. O. J. Antonio Pastor Gutiérrez, *Circuitos eléctricos Volumen 2*, 2014.

- [37] L. R. L. P. D. N. G. R. P. M. Diego Iannuzzi, «Resonant inductive power transfer for an E-bike charging station,» *ELSEVIER*, 2016.
- [38] E. S. Maria Nisshagen, «Wireless power transfer using resonant inductive coupling,» 2017.
- [39] MathWorks, «MathWorks.com,» [En línea]. Available: <https://es.mathworks.com/help/physmod/sps/powersys/ref/mutualinductance.html>.
- [40] S. S. J. L. Chirag Panchal, «Review of static and dynamic wireless electric vehicle charging system,» *ELSERVIER*, 2018.
- [41] E. Ayisire, «Modeling of Magnetic Resonance Wireless Electric Vehicle Charging,» 2019.
- [42] Z. B. P. N. B. u. I. M. Z. U. R. Masood Rehman, «Modeling and Analysis of Series-Series and Series-Parallel Combined Topology for Wireless Power Transfer using Multiple Coupling Coefficients,» Perak, 2017.
- [43] W. E. Fariborz Musavi, «Overview of wireless power transfer technologies for electric vehicle battery charging,» *IET Power Electronics*, 2013.
- [44] M. K. M. J. M. M. B. F. Devendra Patil, «Wireless Power Transfer for Vehicular Applications: Overview and Challenges,» *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 4, n° 1, 2018.
- [45] C. C. Siqi Li, «Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications,» *IEEE Journal of emerging and selected topics in power electronics*, vol. 3, n° 1, 2015.
- [46] T. H. G. X. Lan Jianyu, «Frequency Splitting Analysis of Wireless Power Transfer System Based on T-type Transformer Model,» *Elektronika ir Elektrotechnika*, vol. 19, n° 10, 2013.
- [47] A. Scher, «Inductive wireless power transfer - lossless coils with primary and secondary circuits tuned to same resonant frequency,» [En línea]. Available: [http://aaronscher.com/Circuit\\_a\\_Day/Resonant\\_inductive\\_wireless\\_power\\_system/circuit.html](http://aaronscher.com/Circuit_a_Day/Resonant_inductive_wireless_power_system/circuit.html).
- [48] «Study on frequency characteristics of wireless power transmission system based on magnetic coupling resonance,» de *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2017.
- [49] COMSOL Multiphysics, «Setting Up and Running a Simulation with COMSOL Multiphysics®,» [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/video/setting-up-and-running-a-simulation-with-comsol-multiphysics>.
- [50] COMSOL Multiphysics, «Modeling Low-Frequency Electromagnetics with COMSOL®,» [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/video/intro-to-electromagnetics-modeling-with-comsol-multiphysics>.
- [51] B. Christopher, «Analyzing Mutual Inductance in Different Coil Arrangements,» [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/blogs/analyzing-mutual-inductance-in-different-coil-arrangements/>.
- [52] COMSOL Multiphysics, «Application Gallery,» [En línea]. Available: <https://www.comsol.com/model/self-inductance-and-mutual-inductance-of-a-single-conductor-and-a-homogenized-he-12687>.
- [53] General Cable COCESA, «Catálogo cables de baja tensión y conductores desnudos».

- 
- [54] J.-R. Riba, «Analysis of formulas to calculate the AC resistance of different conductors' configuration,» Igualada, 2015.
- [55] X. Y. W. C. Mohamad Abou Houran, «Magnetically Coupled Resonance WPT: Review of Compensation Topologies, Resonator Structures with Misalignment, and EMI Diagnostics,» *Electronics*, 2018.
- [56] SAE, «Wireless Power Transfer for Light duty Plug-In / Electric Vehicles & Alignment Methodology (J2954),» USA, 2019.
- [57] ICNIRP, «ICNIRP GUIDELINES for limiting exposure to time-varying electric and magnetic fields,» 2010.

