



Trabajo Fin de Grado

Diseño teórico de un sistema de carga inalámbrica
estática y dinámica para un autobús eléctrico urbano

Theoretical design of a static and dynamic
wireless power transfer system for a
public electric bus

Autor

Víctor Ferrer Gómez

Director

Juan Luis Villa Gazulla

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

2017





**DECLARACIÓN DE
AUTORÍA Y ORIGINALIDAD**

(Este documento debe acompañar al Trabajo Fin de Grado (TFG)/Trabajo Fin de Máster (TFM) cuando sea depositado para su evaluación).

D./Dª. Víctor Ferrer Gómez

con nº de DNI 76974698T en aplicación de lo dispuesto en el art. 14 (Derechos de autor) del Acuerdo de 11 de septiembre de 2014, del Consejo de Gobierno, por el que se aprueba el Reglamento de los TFG y TFM de la Universidad de Zaragoza,

Declaro que el presente Trabajo de Fin de (Grado/Máster) Grado _____, (Título del Trabajo)

Diseño teórico de un sistema de carga inalámbrica estática y dinámica para un autobús eléctrico urbano

es de mi autoría y es original, no habiéndose utilizado fuente sin ser citada debidamente.

Zaragoza, 20 de septiembre de 2017

Fdo: Víctor Ferrer Gómez





Diseño teórico de un sistema de carga inalámbrica estática y dinámica para un autobús eléctrico urbano

RESUMEN

La creciente preocupación medioambiental en las ciudades, evidenciada por el endurecimiento de las emisiones máximas permitidas por los vehículos, hacen que la movilidad eléctrica sea objeto de numerosos estudios e investigaciones actualmente. No obstante, la electrificación del transporte en entornos urbanos, especialmente la de los autobuses públicos, está hoy en día limitada por el elevado peso de las baterías necesario y la pobre autonomía que ofrecen las baterías comerciales actuales.

Por este motivo, el objetivo del presente trabajo es el de minimizar dichos inconvenientes a través del diseño de un sistema de carga inalámbrica estática y dinámica para un autobús eléctrico urbano. La solución propuesta consiste en la instalación de puntos de carga inductiva estática en cada parada del recorrido, permitiendo la subida y bajada de pasajeros al mismo tiempo que se las baterías se recargan, así como la disposición de carriles de carga inductiva dinámica entre cada parada, recargando el vehículo mientras se desplaza. Además, el sistema se ha diseñado de tal forma que las baterías se alimentan de forma ininterrumpida, minimizando al máximo el peso necesario de éstas.

El sistema diseñado resulta ser viable técnicamente, al transferir la potencia deseada a la carga y cumplir con la normativa vigente de la emisión máxima de campo electromagnético. Sin embargo, el coste necesario para su instalación y puesta en marcha es bastante alto, lo que actualmente entorpece su implantación masiva en las ciudades.



ÍNDICE

1. Motivación y objetivos del TFG	1
2. Carga de vehículos eléctricos	3
3. Aspectos teóricos de un sistema WPT	6
3.1. Definición y clasificación	6
3.2. Tipos de carga	9
3.3. Revisión del estado del arte	10
3.3.1. Proyectos	10
3.3.2. Avances tecnológicos	14
4. Estudio energético de una línea de autobús urbano	18
4.1. Registro GPS del recorrido	19
4.2. Modelo dinámico de vehículos eléctricos	21
5. Diseño teórico del sistema WPT.....	25
5.1. Selección de un tramo tipo	25
5.2. Diseño del carril de carga	26
5.3. Topología de compensación.....	29
5.4. Sistema de alimentación	32
5.5. Dimensionamiento óptimo del sistema	33
5.6. Sistema WPT diseñado	36
6. Diseño del sistema de apantallamiento	39
6.1. Normativa vigente.....	39
6.2. Análisis del campo magnético sin apantallamiento	40
6.3. Sistema de apantallamiento óptimo diseñado	42
6.4. Análisis del campo magnético con apantallamiento óptimo	47
6.5. Comprobación de saturación	48
7. Estudio económico	50
8. Conclusiones.....	52
9. Bibliografía	53
ANEXOS	55
ANEXO I	56
ANEXO II	57
ANEXO III	62
ANEXO IV	64



1. MOTIVACIÓN Y OBJETIVOS DEL TFG

La electrificación del transporte urbano representa una gran oportunidad para alcanzar una movilidad urbana sostenible. El actual modelo de transporte, basado fundamentalmente en combustibles fósiles, produce un gran impacto medioambiental, depende de un recurso fósil finito y consume grandes cantidades de carburante.

Las cada vez más exigentes normativas de emisiones promovidas por la Unión Europa evidencian la creciente concienciación medioambiental. Las emisiones derivadas de los actuales y tradicionales sistemas de transporte, como el CO₂, SO₂ y NO_x, fomentan la contaminación atmosférica y el efecto invernadero.

Por este motivo, la incursión de la movilidad eléctrica en las ciudades juega un papel fundamental. La nula emisión de contaminantes atmosféricos y acústicos durante su funcionamiento, el bajo coste de la energía necesaria para cargar las baterías y el escaso mantenimiento requerido hacen de los vehículos eléctricos la mejor alternativa.

La sustitución de los autobuses urbanos actuales por eléctricos puros representa la opción más eficiente para combatir las emisiones contaminantes en entornos urbanos. No obstante, su electrificación se encuentra hoy en día limitada por la pobre autonomía que ofrecen y por el elevado peso de las baterías necesario. La baja densidad de energía de las actuales baterías comerciales de ion litio, del orden de 90-120 Wh/kg, es 100 veces menor que la de los carburantes de origen fósil. Esto provoca que se necesiten baterías de gran tamaño para poder competir con la autonomía de los vehículos de combustión convencionales.

Para paliar estos inconvenientes, son ya varias ciudades europeas, entre ellas Barcelona, las que han apostado por la instalación de sistemas de carga inductiva ultrarrápida por pantógrafo en ciertas paradas de la ruta del autobús. Aunque permiten recargar la batería en pocos minutos, estos sistemas producen un gran impacto visual y únicamente son compatibles con aquellos vehículos eléctricos diseñados específicamente para ser recargados mediante este tipo de sistemas.

Los sistemas de carga inductiva aplicados para la recarga de vehículos eléctricos constituyen una solución viable, eficiente y segura a los problemas mencionados anteriormente. Se basan en el intercambio de potencia entre dos bobinas enfrentadas a través del aire, una emisora y otra receptora. La bobina emisora va enterrada bajo el asfalto, mientras que la receptora se coloca en la parte inferior del vehículo eléctrico.

Estos sistemas se caracterizan principalmente por su interoperabilidad, pues permiten la recarga de cualquier vehículo eléctrico equipado con una bobina receptora (vehículos particulares, autobuses, camiones, taxis, tranvías, etc.). Asimismo, producen un mínimo impacto visual.

La implantación de sistemas de carga inalámbrica en el recorrido de un autobús eléctrico urbano, ya sea con carga estática en ruta en las paradas y/o con carga dinámica en ciertos tramos del trayecto, supone un suplemento de energía mientras el vehículo realiza su itinerario. Este hecho permite reducir sustancialmente el peso y volumen de la batería necesaria, con la consiguiente disminución de su coste e incremento de su autonomía.



Así pues, el objetivo primordial del presente TFG es el de diseñar un sistema de carga inalámbrica estática y dinámica en ruta para un autobús eléctrico urbano. Se estudia el caso que requiere menor peso de baterías embarcado, mediante la alimentación continua a lo largo de todo el recorrido. El sistema está diseñado para cargar la misma energía que necesita el vehículo durante el trayecto. De esta manera, la energía almacenada necesaria en la batería debe ser solamente la suficiente para que el autobús eléctrico sea capaz de llegar desde las cocheras hasta el comienzo de su itinerario, y para regresar de éste a ellas.

A continuación se enumeran los principales objetivos del proyecto:

- Realizar una revisión del estado del arte de los sistemas de carga inalámbrica dinámica para diseñar el sistema de acuerdo con los más recientes avances tecnológicos.
- Llevar a cabo un análisis pormenorizado de las necesidades energéticas de un autobús urbano tipo.
- Elaborar un modelo dinámico de vehículos eléctricos con el que estudiar las necesidades energéticas de dicho autobús tipo.
- Establecer un tramo tipo en el que diseñar un carril de carga dinámica para alimentar de manera continua el autobús eléctrico.
- Seleccionar una adecuada topología de compensación y unos convenientes convertidores de potencia para conformar la alimentación del sistema de carga.
- Dimensionar de manera óptima el sistema.
- Elaborar un modelo en elementos finitos del sistema de carga para estudiar las emisiones de campo electromagnético.
- Diseñar un adecuado sistema de apantallamiento que haga cumplir con la normativa vigente.
- Realizar un estudio económico del coste de construcción e implantación del sistema de carga a diseñar.

La memoria está organizada como sigue: el capítulo 2 recoge los sistemas de carga de vehículos eléctricos existentes actualmente; en el capítulo 3 se definen y se clasifican los diferentes tipos de sistemas de carga inalámbrica, se explican las dos tipologías de los sistemas de transferencia de potencia por acoplamiento inductivo y se realiza una revisión del estado del arte de estos sistemas empleados en la carga dinámica; en el capítulo 4 se lleva a cabo un análisis energético de una línea de autobús urbano de la ciudad de Zaragoza; en el capítulo 5 se diseña de manera óptima el sistema de carga inalámbrica; el capítulo 6 recoge un análisis de la emisión del campo magnético y se diseña un óptimo sistema de apantallamiento acorde a la normativa vigente; en el capítulo 7 se realiza un análisis económico del coste de construcción e implantación del sistema.



2. CARGA DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

En la actualidad, existen diversos sistemas con los que poder recargar un vehículo eléctrico. El método más extendido y por el que más se ha apostado hasta la fecha es la carga conductiva. A su vez, también existen sistemas de recarga por inducción, los cuales están siendo objeto de numerosos estudios actualmente y son ya varios los sistemas de carga inductiva puestos en marcha en el mundo. Asimismo cabe destacar el método basado en el intercambio de baterías, aunque no es un método de recarga como tal.

La carga conductiva tradicional consiste en la conexión del vehículo eléctrico a una fuente de energía por medio de un cable, permitiendo así la recarga de su batería (Figura 2.1). El bajo coste de su instalación, el elevado grado de libertad que permite en cuanto al posicionamiento del vehículo y el hecho de ser una tecnología madura han hecho que, hoy en día, sea el método de carga más ampliamente utilizado. No obstante, presenta algunos inconvenientes pues requiere de la intervención del usuario, llegando éste a tener que enfrentarse al viento, lluvia, hielo o nieve para conectar el vehículo con el riesgo de sufrir una descarga eléctrica, pueden ser víctimas del vandalismo y, además, suponen un gran impacto visual.



Figura 2.1. Carga de vehículo eléctrico por conducción

La carga inductiva no solo evita los inconvenientes relacionados con la carga conductiva anteriormente mencionados, sino que también requiere de mucho menos espacio para implementar el sistema, no requiere de ningún cable y se adapta a cualquier condición ambiental. Al mismo tiempo, este método se caracteriza por su versatilidad, puesto que permite la posibilidad de cargar el vehículo también en movimiento, lo que incrementa las oportunidades de carga. Aun así, están limitados por el bajo grado de libertad de la posición del vehículo admitido, requieren de un sistema de apantallamiento que aísle el entorno del campo electromagnético generado y su eficiencia es menor que en la carga conductiva tradicional, aunque en ningún caso baja del 90%.

Por otro lado, el método basado en el intercambio de baterías no carga el vehículo eléctrico directamente, sino que reemplaza la batería descargada por otra completamente cargada (Figura 2.2). Pese a que el tiempo necesario para llevar a cabo el proceso es corto (3-5 min), se requiere de una estación de grandes dimensiones para poder instalar el sistema de intercambio, cuyo coste ronda los 400.000€. Este hecho dificultó su expansión a nivel mundial, motivo por el que la empresa desarrolladora del sistema se declaró en bancarrota en el año 2013.



Figura 2.2. Intercambio de batería en un vehículo eléctrico

La electrificación del transporte urbano, especialmente los autobuses, está limitada actualmente por la pobre autonomía que ofrecen. El valor medio de la distancia recorrida por un bus urbano en una jornada laboral se encuentra entre 190 y 225 km. Esto hace que se requiera de baterías de gran tamaño, entre 200 y 350 kWh de energía almacenada, para cubrir sus trayectos diarios y también para suministrar energía a sistemas auxiliares como calefacción o aire acondicionado [1]. Esto reduce notablemente el rendimiento del bus e incrementa su coste de operación.

Los sistemas de carga inductiva ofrecen múltiples oportunidades para facilitar la incursión de autobuses eléctricos urbanos en las ciudades. Así, el uso de pantógrafos o sistemas de carga dinámica pueden proveer a las baterías de energía mientras los autobuses cubren sus trayectos, sin necesidad de volver a las cochertas para recargar el vehículo. De esta manera, la energía necesaria en las baterías se vería reducida sustancialmente, lo que conllevaría a su vez una reducción de su peso, mejorando así el rendimiento del vehículo.

Tales son las ventajas que ofrecen estos sistemas que ya han sido varias ciudades las que han decidido implantar autobuses eléctricos en su flota de vehículos, como por ejemplo Barcelona [2]. Como parte del proyecto ZeEUS, Endesa y la empresa concesionaria del transporte urbano de la ciudad (TMB), han puesto en marcha un punto de carga ultrarrápida por pantógrafo para autobuses eléctricos (Figura 2.3). El cargador, instalado en la última parada de la línea, se acopla a un brazo mecánico retráctil situado sobre el vehículo, el cual se despliega para realizar la transferencia de potencia. En un tiempo de entre 5 y 8 minutos, los 400 kW de potencia del cargador permiten cargar la batería hasta el 80% de su capacidad, energía suficiente para realizar su trayecto de nuevo.



Figura 2.3. Carga inductiva
por pantógrafo en Barcelona



La ciudad de Málaga, en cambio, ha decidido apostar por un sistema de carga inductiva en ruta estática y dinámica para la recarga de autobuses eléctricos urbanos [3]. Endesa y CIRCE, junto con otras empresas y organismos, han llevado a cabo el diseño de dicho sistema enmarcados dentro del proyecto VICTORIA. El sistema presenta una triple modalidad de carga: el autobús puede recargar sus baterías por medio de un sistema de carga rápida conductiva con protocolo CHAdeMO instalado en cocheras, a través de diversos sistemas de carga inductiva estática en ruta colocados en las paradas del bus, o bien en un carril de carga inductiva dinámica en ruta. El autobús eléctrico diseñado explícitamente para esta triple modalidad de carga es el que aparece en la Figura 2.4.



Figura 2.4. Autobús eléctrico puesto en marcha en Málaga

Comparando las cualidades de ambos sistemas, la carga inductiva por pantógrafo puede llegar a resultar más cara de mantener puesto que el brazo mecánico articulado incorporado en el autobús podría experimentar con facilidad cualquier tipo de avería al ser una pieza en movimiento. Esto no ocurre en los sistemas de carga inductiva estática y dinámica, puesto que carecen de piezas móviles. Además, el pantógrafo produce un gran impacto visual frente a los componentes que integran los sistemas de carga estática y dinámica, los cuales apenas se aprecian. El hecho de que el pantógrafo sea tan visible también puede provocar que sea víctima de actos vandálicos. A su vez, las inclemencias climatológicas, especialmente las tormentas de nieve, pueden dañar el pantógrafo y el brazo articulado del autobús. Otra ventaja de la carga inductiva frente al pantógrafo es que puede cargar diferentes tipos de vehículos eléctricos (taxis, autobuses, tranvía, camiones de limpieza...) es decir, interoperabilidad; mientras que el pantógrafo solo es válido para un tipo de vehículo.

Estos inconvenientes propios de la carga inductiva por pantógrafo, sumados al interés que suscitan los sistemas de carga inductiva estática y dinámica tanto en la Universidad de Zaragoza como en mi persona, hacen que uno de estos sistemas sea objeto de estudio del presente TFG.



3. ASPECTOS TEÓRICOS DE UN SISTEMA WPT

3.1. Definición y clasificación

Los sistemas de transferencia inalámbrica de potencia WPT (*Wireless Power Transfer*) consisten en la transmisión de energía sin cables a través de un campo eléctrico, magnético o electromagnético. En función de sus principios de funcionamiento, estos sistemas pueden clasificarse en dos grandes grupos: los radiantes y los no radiantes.

Los sistemas WPT radiantes efectúan la transferencia de potencia a través de haces de radiación electromagnética, como las microondas o haces láser, siendo empleados para la transferencia a largas distancias. Por su parte, en los no radiantes la potencia puede ser transmitida bien por medio del campo magnético generado por el acoplamiento inductivo entre dos bobinas (sistemas IPT, *Inductive Power Transfer*), o bien gracias al campo eléctrico creado al acoplarse capacitivamente dos electrodos (sistemas CPT, *Capacitive Power Transfer*). Ambos sistemas son idóneos para la transferencia de potencia en distancias cortas.

Los sistemas IPT son los más empleados en la actualidad para transferir potencia de manera inalámbrica. Entre sus principales aplicaciones se encuentran la recarga de teléfonos móviles, dispositivos médicos implantables y vehículos eléctricos.

Para la carga inalámbrica IPT de vehículos eléctricos se precisan dos bobinas perfectamente aisladas: una emisora, generalmente colocada bajo el asfalto, y otra receptora, ubicada en la parte inferior del vehículo. Al acoplarse magnéticamente entre sí a través del aire, se transfiere potencia entre ellas para cargar la batería del vehículo.

El circuito equivalente de dos bobinas acopladas magnéticamente, con el lado primario alimentado por medio de una fuente de tensión de valor eficaz V_1 y estando el secundario alimentando a una carga puramente resistiva R_L , se puede ver en la Figura 3.1

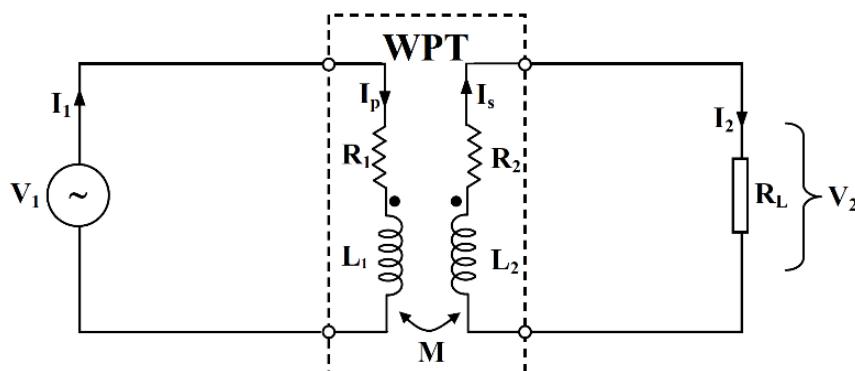


Figura 3.1. Circuito equivalente de un sistema WPT sin compensación

Las ecuaciones que definen el circuito de la Figura 3.1, aplicando la 2^a Ley de Kirchhoff, son:

$$\vec{V}_1 = (R_1 + j\omega L_1) \cdot \vec{I}_p - j\omega M \cdot \vec{I}_s = \vec{Z}_1 \vec{I}_p - j\omega M \vec{I}_s \quad (\text{Ec. 3.1})$$

$$0 = R_L \cdot \vec{I}_2 + (R_2 + j\omega L_2) \cdot \vec{I}_s - j\omega M \cdot \vec{I}_p \quad (\text{Ec. 3.2})$$

Si despreciamos R_2 frente a R_L [4], la tensión en la carga puede expresarse como:

$$\vec{V}_2 = R_L \cdot \vec{I}_2 = j\omega M \cdot \vec{I}_p - j\omega L_2 \cdot \vec{I}_s \quad (\text{Ec. 3.3})$$



Con el secundario en circuito abierto, $I_2=I_s=0$, la tensión inducida sobre la bobina secundaria, V_{oc} , viene dada por:

$$\vec{V}_{oc} = j\omega M \cdot \vec{I}_p \quad (\text{Ec. 3.4})$$

Estando el secundario en cortocircuito, $R_L=0$, la corriente máxima denominada corriente en cortocircuito, I_{sc} , se calcula como:

$$\vec{I}_{sc} = \frac{j\omega M}{j\omega L_2} \cdot \vec{I}_p = \frac{M}{L_2} \cdot \vec{I}_p \quad (\text{Ec. 3.5})$$

La potencia aparente máxima transferida del primario al secundario, sin ningún tipo de compensación, puede expresarse como:

$$\vec{S}_{2u} = \vec{V}_{oc} \cdot \vec{I}_{sc} = j \frac{\omega M^2 \vec{I}_p^2}{L_2} \quad (\text{Ec. 3.6})$$

Empleando condensadores de resonancia en el secundario, se produce un aumento de la potencia transferida al trabajar en resonancia en el circuito secundario:

$$\vec{S}_{2,máx} = \vec{S}_{2u} \cdot q_s \quad (\text{Ec. 3.7})$$

Donde q_s es el factor de calidad del secundario, el cual relaciona las potencias activa y reactiva de dicho lado:

$$q_s = \frac{Q_s}{P_2} \quad (\text{Ec. 3.8})$$

La potencia activa máxima que puede transferirse a la carga viene definida por:

$$P_{2,máx} = S_{2,máx} \cos \varphi_2 \quad (\text{Ec. 3.8})$$

El valor máximo que la potencia activa puede llegar a alcanzar se consigue trabajando en resonancia en el secundario, estando así la tensión en fase con la corriente, $\cos \varphi_2=1$. Por lo tanto, la máxima potencia transferida viene dada por:

$$P_{2,máx} = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_2} \cdot q_s \quad (\text{Ec. 3.9})$$

Siendo:

- ω , frecuencia de trabajo
- M , coeficiente de inducción mutua entre las bobinas
- I_p , corriente que circula por el devanado primario
- L_2 , coeficiente de autoinducción del devanado secundario
- q_s , factor de calidad del secundario

De la expresión anterior se deduce que, para que la potencia máxima a transferir sea lo mayor posible, se necesita emplear condensadores de resonancia en el circuito secundario, trabajar a elevadas frecuencias y elevados valores del factor de calidad, aunque no mayores que 10 pues podrían desestabilizar el sistema. Unos valores altos de los parámetros mencionados contrarrestan el bajo coeficiente de inducción mutua entre dos bobinas característico de los



sistemas de acoplamiento magnéticamente a través del aire, lográndose así la maximización de la potencia transferida entre el primario y secundario deseada.

Para lograr una transferencia de potencia óptima, es necesario trabajar en resonancia tanto en el lado primario como en el secundario, para lo cual se requieren sistemas de compensación a ambos lados. La compensación en el primario conlleva una disminución de la corriente absorbida por el convertidor al hacer que la impedancia total vista desde la fuente presente carácter óhmico; por otro lado, la compensación en el secundario maximiza la potencia transferida a la carga.

Estos sistemas de compensación están normalmente formados por condensadores. No obstante, también han surgido nuevas topologías que combinan tanto condensadores como bobinas ofreciendo un comportamiento más estable, tal y como se verá en el apartado 3.3. Las cuatro topologías más típicas pueden verse en la Figura 3.2, donde la diferencia entre cada una de ellas radica en la manera de conectar los condensadores en el circuito.

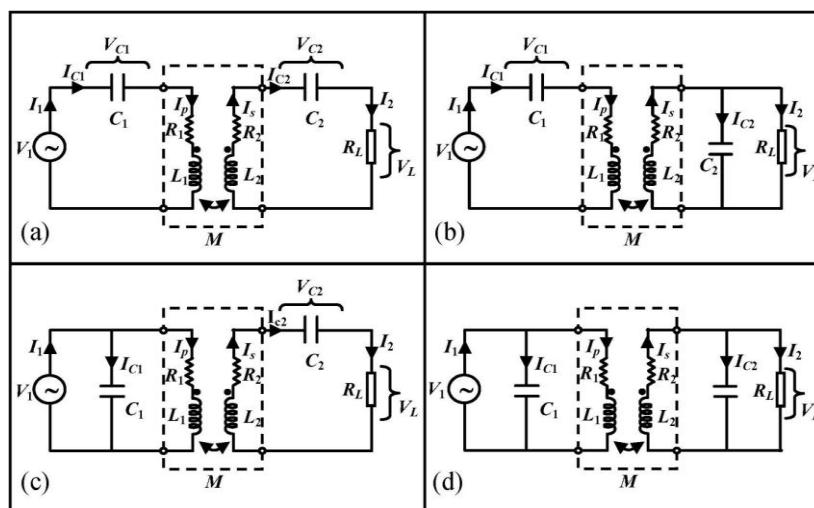


Figura 3.2. Topologías básicas de compensación

- Compensación S-S: Condensador primario en serie con la bobina primaria, condensador secundario en serie con la bobina secundaria.
- Compensación S-P: Condensador primario en serie con la bobina primaria, condensador secundario en paralelo con la bobina secundaria.
- Compensación P-S: Condensador primario en paralelo con la bobina primaria, condensador secundario en serie con la bobina secundaria.
- Compensación P-P: Condensador primario en paralelo con la bobina primaria, condensador secundario en paralelo con la bobina secundaria.

Cada una de las topologías de compensación presenta un comportamiento distinto al variar los parámetros del circuito, como pueden ser un cambio en la frecuencia de alimentación, la distancia vertical entre las bobinas (*air gap*), su posicionamiento relativo o la carga a la que el sistema alimenta. Así, aquellos sistemas IPT con compensación serie en el lado secundario se comportan como una fuente de tensión, mientras que una compensación en paralelo en el secundario hace que trabaje como fuente de corriente [4].

Los sistemas de transferencia inalámbrica de potencia pueden clasificarse según el grado de acoplamiento existente entre las bobinas receptora y emisora. Así, se puede hablar de (a) sistemas fuertemente acoplados, (b) sistemas de proximidad y (c) sistemas débilmente acoplados.



En (a) las bobinas se arrollan sobre núcleos magnéticos de alto factor de acoplamiento, lo que provoca que el bobinado secundario concatene la práctica totalidad del flujo creado por el devanado primario. A pesar de su elevada eficiencia, estos sistemas presentan el inconveniente de su rígido posicionamiento, lo que no permite ningún desalineamiento entre las bobinas. Esto reduce notablemente su versatilidad y, por ello, no se emplean ni para la carga estática ni dinámica de vehículos eléctricos. Por otro lado, los sistemas (b) son más apropiados para sistemas de carga dinámica, como el desplazamiento de vehículos sobre guías o para la alimentación de trenes de levitación magnética (Maglev). Poseen una elevada eficiencia, aunque la pequeña distancia necesaria entre las bobinas y el pequeño desplazamiento lateral que permiten limita su uso.

Los sistemas (c) son los ideales para la carga inalámbrica de vehículos eléctricos. Permiten realizar la transferencia de potencia con un alto grado de libertad en relación con el air gap y el posicionamiento relativo entre las bobinas. No obstante, no todas las líneas de flujo que una bobina genera concatenan con la contraria, lo que implica un factor de acoplamiento sea mucho menor que la unidad. Esto hace que sea indispensable diseñar de manera adecuada tanto las bobinas como el sistema de compensación, así como trabajar a elevadas frecuencias (del orden de decenas de kHz) para realizar una efectiva transferencia de potencia.

El sistema de transferencia inalámbrica de potencia WPT diseñado en el presente trabajo se basa en el débil acoplamiento inductivo entre dos bobinas planas enfrentadas y perfectamente aisladas a través del aire.

3.2. Tipos de carga

Dependiendo del bobinado secundario, los sistemas de transferencia inalámbrica de potencia pueden clasificarse en (a) sistemas de carga inalámbrica estática y (b) dinámica. En ambos casos, el lado primario consiste en una (o varias) bobinas enterradas bajo el asfalto (conocidas como bobinas emisoras) y en el lado secundario las bobinas se ubican bajo el chasis del vehículo (bobina receptora o *pick-up*).

En (a), la transferencia de potencia se produce con el vehículo estacionado sobre la bobina emisora, la cual se acopla magnéticamente con la receptora para cargar la batería. En cambio, en (b) la bobina receptora se va acoplando magnéticamente con las diversas bobinas emisoras colocadas bajo el suelo, las cuales se van conectando y desconectando conforme el vehículo se va desplazando, produciéndose así la transferencia de potencia. La Figura 3.3 muestra un esquema de ambas configuraciones.

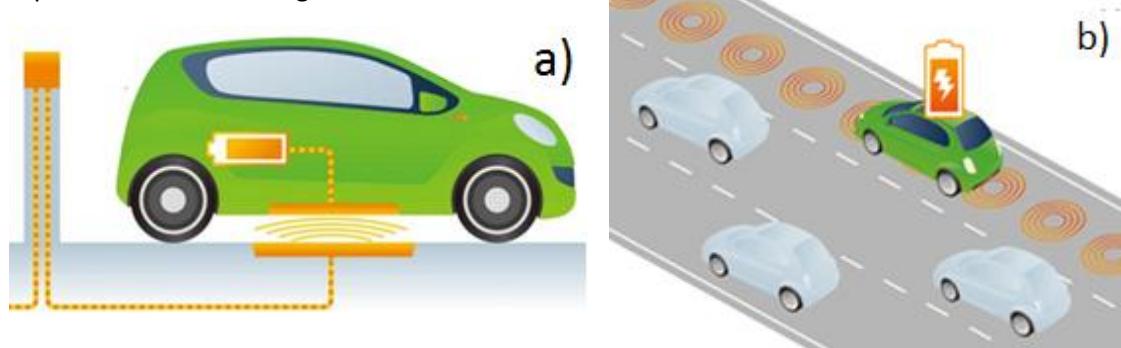


Figura 3.3. Sistemas de carga inalámbrica (a) estática y (b) dinámica



Ambas configuraciones pueden ser implantadas fácilmente, por ejemplo, en el recorrido de un autobús eléctrico urbano. Colocando sistemas de carga estática en las paradas de su itinerario, el vehículo puede recargar sus baterías durante unos pocos segundos y así continuar con el trayecto. Además, también se pueden instalar sistemas de carga dinámica en ciertos tramos donde el vehículo puede reponer la carga de su batería mientras se desplaza.

La potencia necesaria en los cargadores depende directamente del tiempo de carga. Así, en una carga dinámica se precisa de una menor potencia al estar el vehículo cargándose durante más tiempo que en una carga estática.

Por este motivo, el sistema WPT diseñado en el presente trabajo está compuesto por tramos de carga dinámica entre las paradas del autobús, además de sistemas de carga estática en cada una de las paradas, lo que reduce sustancialmente la potencia a instalar en los cargadores. Asimismo, las bobinas para la carga estática y dinámica son idénticas, de tal forma que el vehículo podría cargarse de manera estática en cualquier punto del recorrido.

3.3. Revisión del estado del arte

En este apartado se recogen el origen y los últimos proyectos llevados a cabo hasta la fecha relacionados con la carga de vehículos eléctricos por inducción dinámica, así como los avances tecnológicos más significativos realizados recientemente en el área de la transferencia inalámbrica de potencia por acoplamiento inductivo para la recarga dinámica de vehículos eléctricos.

3.3.1. Proyectos

El primer sistema de carga dinámica de vehículos eléctricos data del año 1894 de la mano de los franceses Hulin y Leblanc [5]. Estos investigadores diseñaron y patentaron un sistema para alimentar un tren eléctrico por medio de un raíl de suministro que actuaba como lado primario, el cual transfería energía al motor eléctrico a través de la corriente inducida en varias bobinas secundarias colocadas bajo el vehículo. Pese a exponer en la patente diversos problemas relacionados con su diseño, la configuración propuesta por ellos es a día de hoy prácticamente idéntica a la de los sistemas de carga dinámica por inducción actuales.

Menos de un siglo después, debido al estallido de la crisis del petróleo en los años 70, comenzaron numerosos estudios y proyectos en los Estados Unidos para tratar de sustituir los vehículos de combustión convencionales por vehículos eléctricos y así disminuir su dependencia en el petróleo. El primer proyecto tuvo lugar en el año 1976 de la mano del Laboratorio Nacional Lawrence Berkeley perteneciente a la Universidad de California [6], quienes realizaron un prototipo de IPT alcanzando una potencia de 8 kW. Su esquema se muestra en la Figura 3.4.

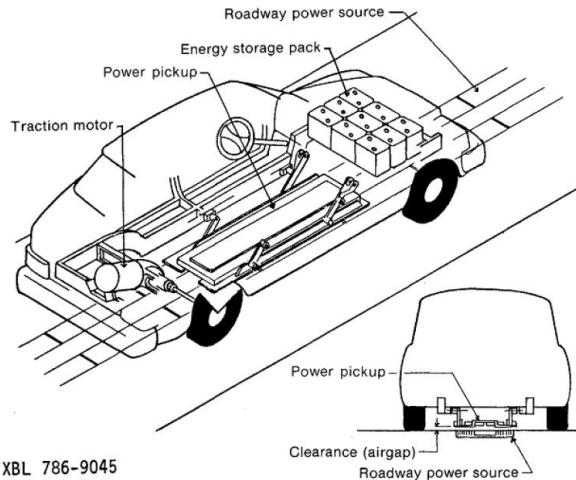


Figura 3.4. Esquema de la carga dinámica inductiva propuesto en [2]

Varios años más tarde, de nuevo la Universidad de California se embarcó en 1992 en otro proyecto denominado PATH (*Partners for Advanced Transit and Highways*) [7]. A través del estudio de los sistemas de transferencia de potencia inalámbrica por inducción, sus sistemas de alimentación y su impacto ambiental, llegaron a confirmar su viabilidad técnica. Además, desarrollaron e implementaron un sistema WPT para cargar dinámicamente un autobús eléctrico a lo largo de un tramo de 213 metros de longitud. Lograron transferir una potencia de 60 kW a la carga, por medio de un air gap de 7,6 cm y con una frecuencia de operación de 400 Hz. No obstante, la pobre eficiencia obtenida (60%) y su elevado coste de construcción (1 M\$/km) hicieron que el sistema desarrollado no llegara a comercializarse.

En los últimos años, los sistemas de carga inalámbrica dinámica de vehículos eléctricos han atraído la atención de numerosos científicos e investigadores, siendo varios los proyectos llevados a cabo en diversos puntos del mundo.

Desde el año 2009, la universidad surcoreana KAIST (*Korea Advanced Institute of Science & Technology*) ha desarrollado hasta la fecha un total de 6 generaciones de sistemas de carga inductiva dinámica para vehículos eléctricos, denominados OLEV (*On-Line Electric Vehicle*). La configuración defendida por ellos consiste en un lado primario formado por un raíl largo, el cual actúa como bobinado emisor, sobre el que circula un vehículo eléctrico con una o varias bobinas receptoras. Las características de todos los sistemas desarrollados por ellos hasta hoy se recogen en la Tabla 3.1.

Sus primeros sistemas fueron puestos en práctica a lo largo del 2009. Se implementaron en un carrito de golf eléctrico (1G OLEV), en varios autobuses (2G OLEV, Figura 3.5) y en un vehículo SUV particular (3G OLEV) [8], en cada uno de los cuales lograban optimizar las especificaciones técnicas de sus versiones predecesoras. Una versión mejorada del 3G OLEV, denominada 3⁺G OLEV [9], fue implementada tanto en buses como en trenes en el Campus Munji de KAIST. En el año 2013 se comercializaron los dos primeros buses eléctricos con la tecnología 3⁺G OLEV, los cuales cubrían una ruta de 48 km en Gumi, Corea del Sur. Asimismo, en el 2015 se comercializaron dos buses eléctricos 3⁺G OLEV más en Sejong, Corea del Sur, en un recorrido de 12 km.



Figura 3.5. Bus eléctrico 2G OLEV y sus raíles de carga de 60 m en el Campus Munji [4]

Las dos generaciones posteriores tuvieron como objetivo disminuir el coste de implantación de estos sistemas, razón por la que actualmente no se han terminado de comercializar a nivel mundial. La cuarta generación, 4G OLEV, hizo uso de núcleos magnéticos tipo I en el raíl de carga, disminuyendo así sus dimensiones [6]. Respecto al 3G OLEV, consiguieron reducir el coste de construcción en un 20%. Por su parte, el 5G OLEV [10] todavía fue capaz de disminuir más este coste mediante la inclusión de núcleos tipo S en el raíl (Figura 3.6), reduciendo su anchura desde los 10 cm del 4G hasta tan solo 4 cm.



Figura 3.6. Bus eléctrico 4G OLEV en el Campus Munji [6]

El objetivo de KAIST en su sexta y más reciente generación, el 6G OLEV [11], es el de desarrollar un sistema de carga inalámbrica dinámica que sea capaz de cargar no solo vehículos eléctricos concebidos para ello (RPEVs, *Roadway-Powered Electric Vehicles*), si no también aquellos que fueron diseñados para cargar sus baterías con sistemas de carga inalámbrica estática (SCEVs, *Stationary Charging Electric Vehicles*), tal y como muestra la Figura 3.7. Para ello, han propuesto un raíl sin núcleos magnéticos, el cual emite un campo magnético uniforme a lo largo del carril de carga, y una bobina receptora rectangular y universal que cumpla la normativa vigente para la carga inalámbrica estática.

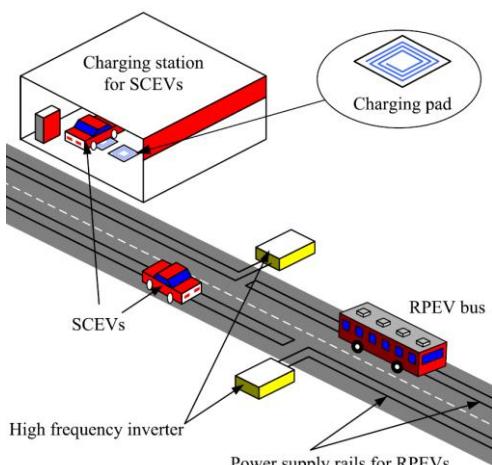


Figura 3.7. Interoperabilidad del 6G OLEV [11]



En la Tabla 3.1 se muestran las especificaciones técnicas de las 6 generaciones llevadas a cabo hasta la fecha por KAIST.

	1G	2G	3G	3+G	4G	5G	6G*
Potencia transferida	3 kW	6 kW	17 kW	15 kW	27 kW	22 kW	3,3 kW
Air gap	1 cm	17 cm	17 cm	20 cm	20 cm	20 cm	10-30 cm
Frecuencia de trabajo	20 kHz	85 kHz					
Eficiencia global	80%	72%	71%	83%	74%	91%	-
Ancho del raíl	20 cm	140 cm	70 cm	70 cm	10 cm	4 cm	50 cm
Núcleo magnético raíl emisor	Tipo E	Tipo U	Tipo W	Tipo W	Tipo I	Tipo S	Sin núcleo
Núcleo magnético bobina receptora	Tipo E	Tipo I	Tipo W	Tipo W	Plana	Plana	Plana

Tabla 3.1. Especificaciones técnicas de los OLEV [5-11]. * Resultados experimentales

Ingenieros del Laboratorio Nacional de Oak Ridge (ORNL) llevan investigando sistemas de carga inductiva dinámica desde el 2013 [12]. Sus investigadores defienden la configuración formada por un lado primario compuesto por diversas bobinas emisoras de geometría circular, tal y como refleja la Figura 3.8.

Si bien esta geometría hace que su diseño sea más compacto y más fácil de instalar, posee el inconveniente de no permitir apenas desalineamiento lateral entre las bobinas emisoras y la receptora, cuyo coeficiente de acoplamiento además es relativamente bajo. A pesar de ello, llevaron a cabo un experimento en sus instalaciones, en el que lograron transferir una potencia de 2,2 kW con una frecuencia de trabajo de 20 kHz y una eficiencia del 74%.

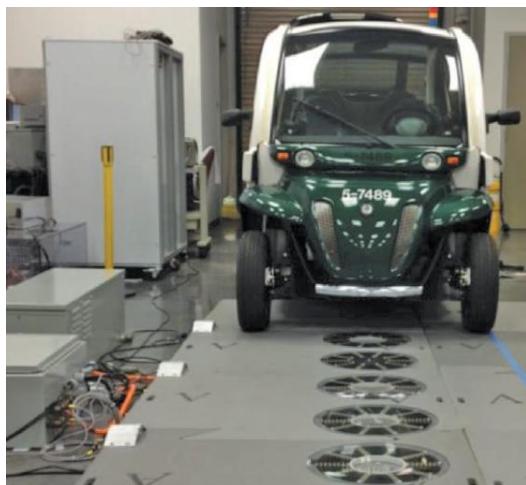


Figura 3.8. Vehículo eléctrico sobre bobinas emisoras circulares [9]

En España también se han realizado investigaciones y proyectos en el área de la carga dinámica de vehículos eléctricos. En diciembre del 2014, Endesa, junto con CIRCE e investigadores de la Universidad de Zaragoza, ha puesto en marcha un autobús eléctrico en Málaga con una triple modalidad de carga como parte del proyecto VICTORIA [3].

El primer modo de carga consiste en un punto de recarga rápida conductiva en cocheras, de entre 50 y 100 kW, de forma que el autobús eléctrico inicie la ruta con las baterías llenas. A lo largo del recorrido de 10 km de longitud, se han instalado estaciones de recarga inductiva estática en ruta situadas en las paradas (segundo modo de carga) donde el vehículo se carga mientras está detenido permitiendo la bajada y subida de pasajeros, además de un carril de recarga inductiva dinámica (tercer modo de carga) de 100 m de longitud, en el que el vehículo



se carga mientras se desplaza. El sistema para la carga dinámica y estática en ruta es común, con una potencia de 50 kW y una frecuencia de operación de 24 kHz. Un esquema del recorrido se muestra en la Figura 3.9.

Para la carga dinámica en ruta, se optó por emplear un raíl de carga con núcleos magnéticos de ferrita tipo U integrado por un total de 8 bobinas emisoras rectangulares separadas 12,5 m entre sí, así como una bobina receptora rectangular de mayores dimensiones que la emisora.

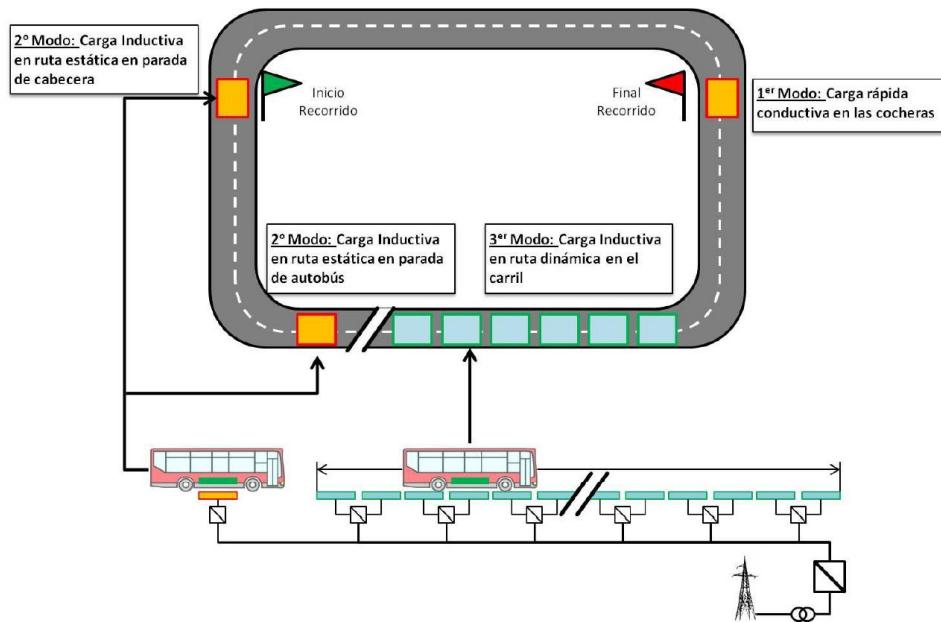


Figura 3.9. Esquema del recorrido del bus con la triple modalidad de carga [10]

3.3.2. Avances tecnológicos

Los tres bloques clave en los que se pueden descomponer los sistemas IPT para carga dinámica son las bobinas, los sistemas de compensación y los sistemas de control. Del diseño de éstos depende en gran medida el correcto funcionamiento del sistema.

Las bobinas emisora y receptora son las encargadas de convertir la energía eléctrica a magnética al acoplarse magnéticamente entre sí y así transferir la potencia deseada a la carga. A su alrededor se suelen disponer planchas de aluminio para apantallar el sistema IPT, y núcleos de ferrita para guiar al flujo magnético y amplificarlo en el interior del sistema de apantallamiento.

Dependiendo del diseño del bobinado primario, existen dos configuraciones básicas de los sistemas de carga dinámica inductiva: el carril de carga puede estar formado por una única y larga bobina emisora, o bien se puede dividir en varias bobinas emisoras.

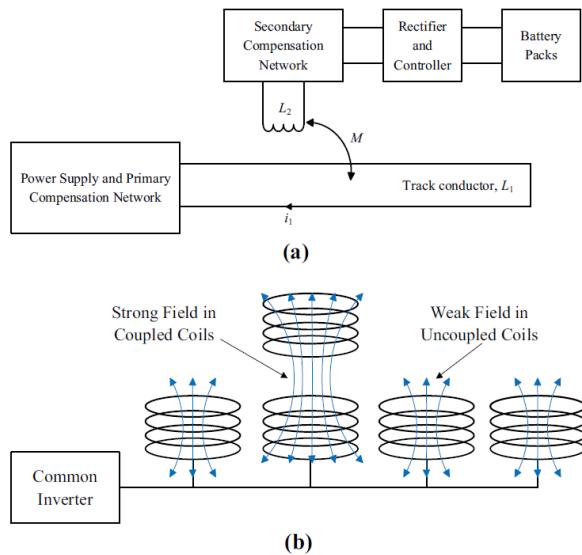


Figura 3.10. Lado primario con (a) una única bobina emisora larga y (b) varias bobinas emisoras

En el caso de emplear una única y larga bobina emisora, al desplazarse un vehículo eléctrico con una bobina receptora a través del carril se transfiere potencia entre las bobinas de forma continua. No obstante, esta configuración presenta ciertas desventajas. La bobina receptora cubre únicamente una pequeña parte del carril, lo que hace que el coeficiente de acoplamiento sea bajo y que se emita campo electromagnético en las zonas no cubiertas por el vehículo, provocando una caída notable de la eficiencia global del sistema y no cumpliendo con la normativa de emisiones electromagnéticas.

El instituto KAIST propuso una solución para solventar estos problemas [14]. Manteniendo la configuración del bobinado primario largo, diseñaron un sistema de alimentación del carril de carga formado por núcleos de ferrita tipo S entre los que se colocaron los cables de suministro, según indica la Figura 3.11. De esta manera lograron reducir la emisión del campo electromagnético redundante y, a su vez, disminuyeron sustancialmente el coste de construcción e implantación del sistema.

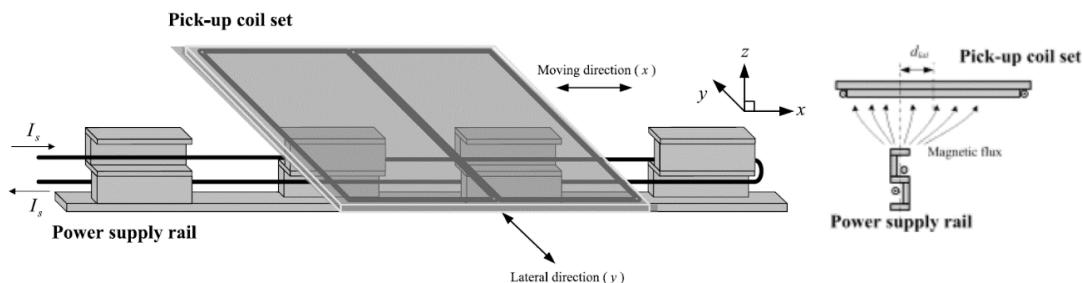


Figura 3.11. Diseño propuesto por KAIST. (a) Vista aérea (b) Vista frontal [11]



La otra posible configuración, en la que el lado primario está formado por diversas bobinas emisoras, es la más empleada actualmente y también reduce los inconvenientes del campo electromagnético redundante. En este caso, gracias a un adecuado sistema de control que detecta la posición del vehículo, tan solo la bobina emisora sobre la que el automóvil se encuentra es la que se activa, permitiendo así que ambas se acoplen magnéticamente y transfieran potencia entre ellas. Mientras tanto, las demás bobinas colocadas a lo largo del carril de carga se hallan desactivadas. Aunque las bobinas apagadas emiten un leve campo electromagnético por la alta frecuencia que circula por los cables de suministro, se consigue reducir en gran medida la emisión de este campo, incrementando la eficiencia del sistema.

La elección de un apropiado sistema de compensación es uno de los puntos críticos a la hora de diseñar un sistema de transferencia de potencia inductivo, especialmente para la carga dinámica de vehículos eléctricos.

La distancia existente entre las bobinas emisora y receptora siempre varía, ya sea por el desalineamiento o por el hecho de que no todos los vehículos poseen la misma altura respecto del suelo, lo que hace que el coeficiente de acoplamiento entre las bobinas varíe. Este parámetro es clave, pues de él depende la estabilidad y la eficiencia del sistema. Por ello, la topología de compensación debe ser capaz de hacer trabajar al sistema en resonancia sin que éste se vea alterado por las características del acoplamiento.

La topología de compensación LCC a ambos lados propuesta por la Universidad de Michigan [15] solventa los problemas mencionados, cuyo esquema se muestra en la Figura 3.12. Estos investigadores verificaron que, implementando dicha topología, la frecuencia de resonancia es independiente tanto del coeficiente de acoplamiento entre las dos bobinas como de las condiciones de la carga. Así, se consigue transferir potencia a la carga de manera estable para distintas características del acoplamiento.

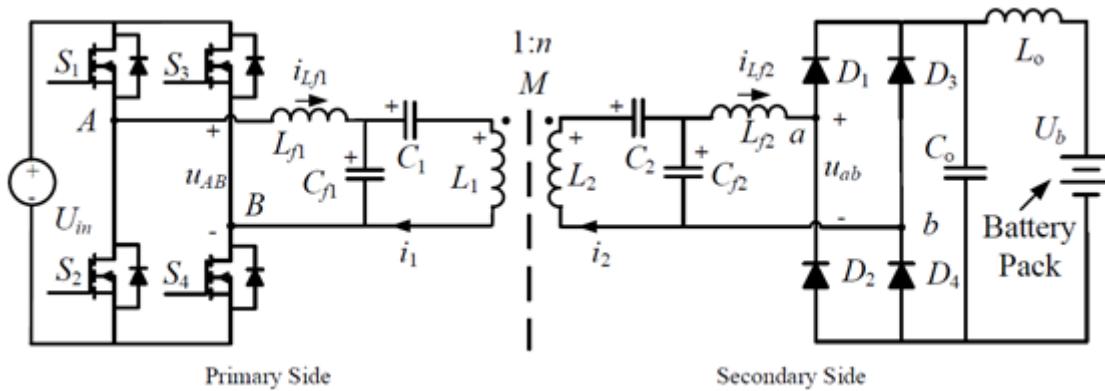


Figura 3.12. Sistema de carga dinámica IPT con compensación LCC a ambos lados [2]

Los sistemas de control empleados en la carga dinámica tienen como objetivo tanto regular la potencia entregada a la carga como detectar la posición exacta de la bobina receptora en el carril de carga.



Para controlar la potencia transferida, se han desarrollado tres topologías de control distintas según si el control se realiza desde el lado primario, desde el secundario o desde ambos [16]. La estrategia de control desde el primario genera una corriente constante en la bobina emisora, además de un campo magnético constante. No obstante, es incapaz de controlar el sistema para alcanzar la máxima eficiencia. Para lograr esto, el método de control desde el secundario provoca bien unas corriente y tensión en la carga constantes, o bien una máxima eficiencia de la transferencia de potencia. El control efectuado desde ambos lados del sistema, el cual es una combinación de los controles desde el primario y secundario, permite transferir la potencia deseada a la carga con una eficiencia máxima.

Asimismo, se requiere de exhaustivos sistemas de control, especialmente en los sistemas cuyo carril de carga está formado por diversas bobinas emisoras, para conocer en todo momento la posición exacta del vehículo equipado con la bobina receptora y así activar la bobina emisora adecuada para que ambas se acoplen magnéticamente y transfieran potencia entre ellas.

En 2015, investigadores de la Universidad de Utah propusieron un sistema de control asequible y fiable para detectar la posición del vehículo sin hacer uso de ningún dispositivo de detección de su posición [17]. Se basa en el hecho de que todo vehículo que se desplaza sobre una bobina emisora crea en ésta una “huella de potencia”, la cual queda reflejada en la impedancia del lado secundario vista desde el primario y en la potencia extraída de las bobinas emisoras. Así, el algoritmo de control propuesto consiste en controlar la energía suministrada a las bobinas emisoras a partir de la medición de la potencia entregada a la bobina receptora.



4. ESTUDIO ENERGÉTICO DE UNA LÍNEA DE AUTOBÚS URBANO

Para poder dimensionar técnicamente una línea de carga dinámica para autobuses eléctricos, es necesario realizar un estudio de las necesidades energéticas del vehículo que actualmente realiza el trayecto de la línea analizada. Este estudio se compone de una primera fase de registro GPS del recorrido con el que se obtienen los perfiles de velocidades y altitud; y de una segunda fase en la que se elabora un modelo dinámico para vehículos eléctricos con el que analizar los perfiles obtenidos para, finalmente, llegar a los requerimientos energéticos del autobús.

La línea escogida para realizar el análisis energético ha sido la línea 44 de autobuses urbanos de la ciudad de Zaragoza. El motivo de dicha elección es la cercanía del comienzo del trayecto al domicilio del autor, la finalización del mismo en la Escuela de Ingeniería y Arquitectura de la Universidad de Zaragoza y el hecho de ser una línea con pocas aglomeraciones, lo que podría facilitar la implementación del sistema.

La parada que da comienzo al recorrido está ubicada en la Estación Ferroviaria Miraflores junto al pabellón Príncipe Felipe, y el fin de línea se encuentra en el edificio Ada Byron de la Escuela de Ingeniería y Arquitectura. En la Figura 4.1 se muestra un mapa con las distintas paradas que realiza el vehículo a lo largo del trayecto.



Figura 4.1. Mapa con el trayecto de la línea 44 analizada

El vehículo que a día de hoy cubre la línea 44 es un Mercedes-Benz Citaro. Sus características principales, las cuales se necesitan para llevar a cabo el estudio energético, son las que se recogen en la Tabla 4.1. Asimismo, se han representado sus dimensiones en la Figura 4.2. Todas estas especificaciones se han extraído de la hoja de características del vehículo.



Longitud	12135 mm	Peso en vacío	10950 kg
Anchura (sin retrovisores)	2550 mm	Potencia máxima	282 CV (210 kW)
Altura	3000 mm	Par máximo	1120 N·m
Distancia entre ejes	5900 mm	Neumáticos	275/70 R 22,5
Altura del piso sobre la calzada	370 mm	Capacidad total de pasajeros	75

Tabla 4.1. Características del Mercedes-Benz Citaro

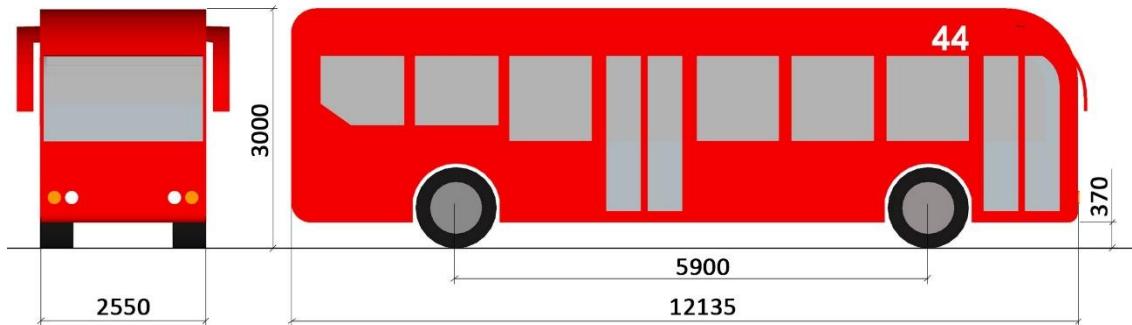


Figura 4.2. Dimensiones del Mercedes-Benz Citaro acotadas

4.1. Registro GPS del recorrido

Para obtener los perfiles de velocidad y altitud del recorrido del autobús, se ha hecho uso de la app *Geo Tracker*. Se trata de una aplicación Android de geolocalización que permite grabar trayectos para después exportarlos en formato GPX con los que se pueden obtener los perfiles deseados.

Así pues, tras realizar un trayecto a bordo del bus, se grabó el recorrido mediante la aplicación móvil y se midieron con un cronómetro los tiempos que el vehículo se detuvo en cada parada para permitir la subida y bajada de pasajeros, los cuales pueden encontrarse en el Anexo I.

Para poder trabajar con el archivo del recorrido en formato GPX, se ha hecho uso del programa *BaseCamp* de Garmin con el que se han extraído los distintos waypoints registrados durante el recorrido. Posteriormente se ha realizado un proceso de refinado de los datos, en el que se han añadido los tiempos exactos de detención medidos en cada parada y se han corregido ciertas incongruencias debidas al error de medición propio del GPS. En la Tabla 4.2 se recogen las características del recorrido analizado.

Distancia recorrida	9,95 km
Tiempo total	35 min 56 s (2156 s)
Velocidad media	29,21 km/h
Nº de paradas	26

Tabla 4.2. Características del recorrido analizado

Los perfiles de velocidad, altitud y pendiente obtenidos aparecen a continuación en las figuras Figura 4.3, Figura 4.4 y Figura 4.5.

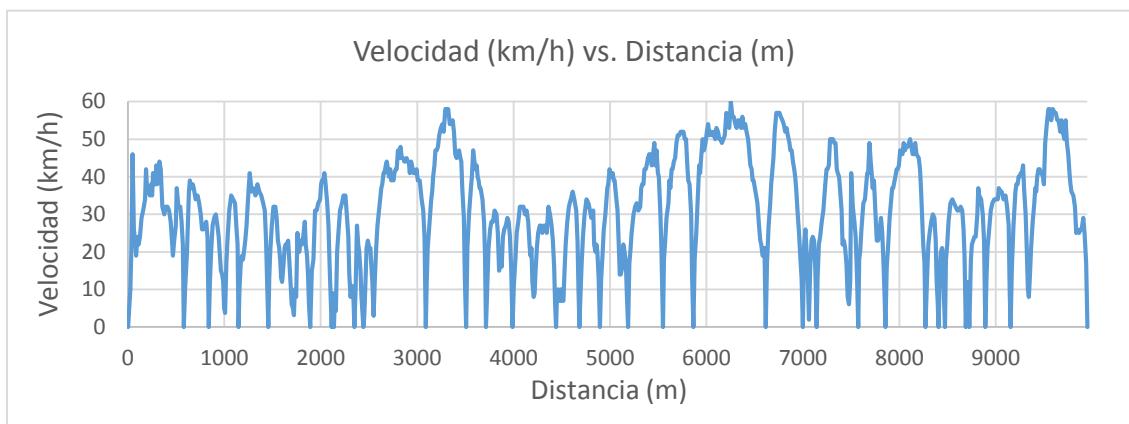


Figura 4.3. Perfil de velocidad del trayecto

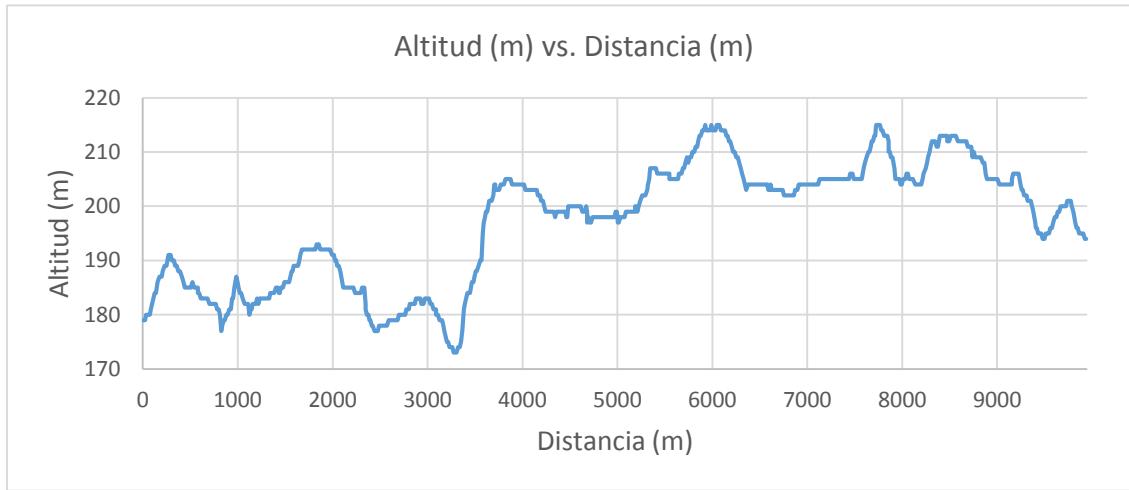


Figura 4.4. Perfil de altitud del trayecto

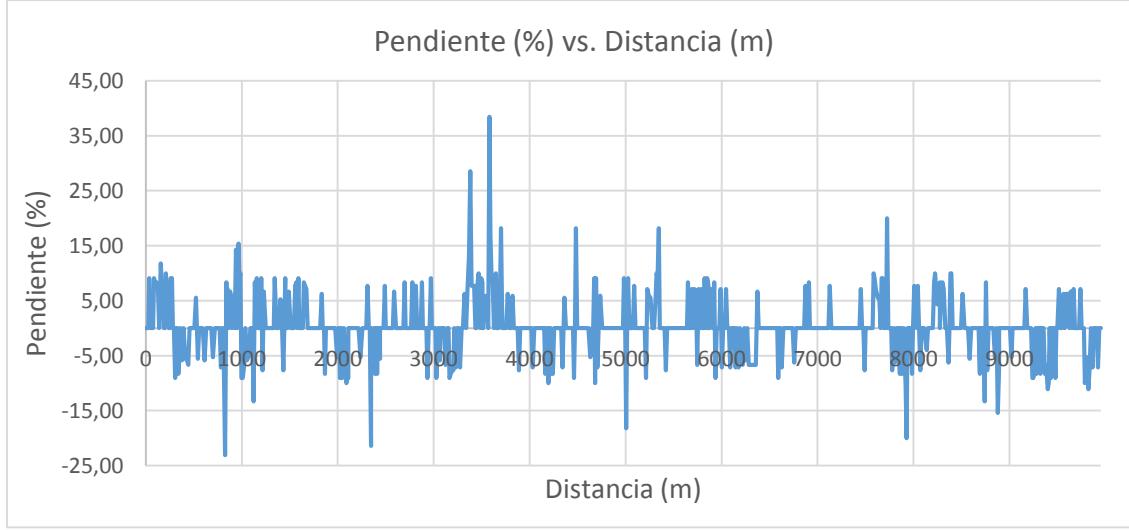


Figura 4.5. Perfil de pendientes del trayecto



4.2. Modelo dinámico de vehículos eléctricos

Con el fin de simular los perfiles obtenidos, se ha realizado un modelo dinámico de vehículos eléctricos con el programa MATLAB, en el que se puede simular el recorrido realizado por el autobús. Tomando como entradas al modelo los perfiles de velocidad y pendiente vs. tiempo y la distancia total del trayecto, se obtienen como resultado el consumo energético del autobús y la energía necesaria de las baterías del vehículo para completar el trayecto analizado.

El modelo dinámico se ha elaborado a partir de las ecuaciones que definen las fuerzas que se oponen al movimiento del autobús, las cuales se representan en la Figura 4.6.

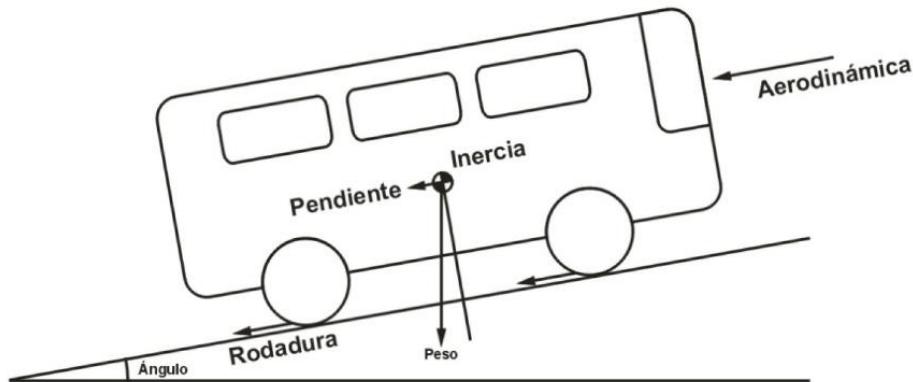


Figura 4.6. Fuerzas que actúan sobre el autobús

Dichas ecuaciones dinámicas son las que se describen a continuación.

- Resistencia a la rodadura. Provocada por la deformación del neumático al rodar por una superficie, se expresa como:

$$F_{rodadura} = \mu \cdot m \cdot g \quad (\text{Ec. 4.1})$$

- Resistencia aerodinámica. Fuerza que sufre un cuerpo al desplazarse en el seno de un fluido, en nuestro caso aire. Viene definida por:

$$F_{aerodinámica} = 0,5 \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot v^2 \quad (\text{Ec. 4.2})$$

- Resistencia por pendiente. Representa la componente del peso del vehículo, la cual se manifiesta siempre en sentido contrario al de movimiento.

En el caso de desplazarse el vehículo cuesta abajo, dicha componente pasa a ser una fuerza impulsora. En ambos casos se define como:

$$F_{pendiente} = m \cdot g \cdot \sin \alpha \quad (\text{Ec. 4.3})$$

- Resistencia por aceleración. Constituye la oposición que ofrece un cuerpo a modificar su estado dinámico. En caso de estar el vehículo decelerando, la fuerza se convierte en impulsora. Ambos casos vienen definidos por la segunda ley de Newton:

$$F_{aceleración} = m \cdot a \quad (\text{Ec. 4.4})$$

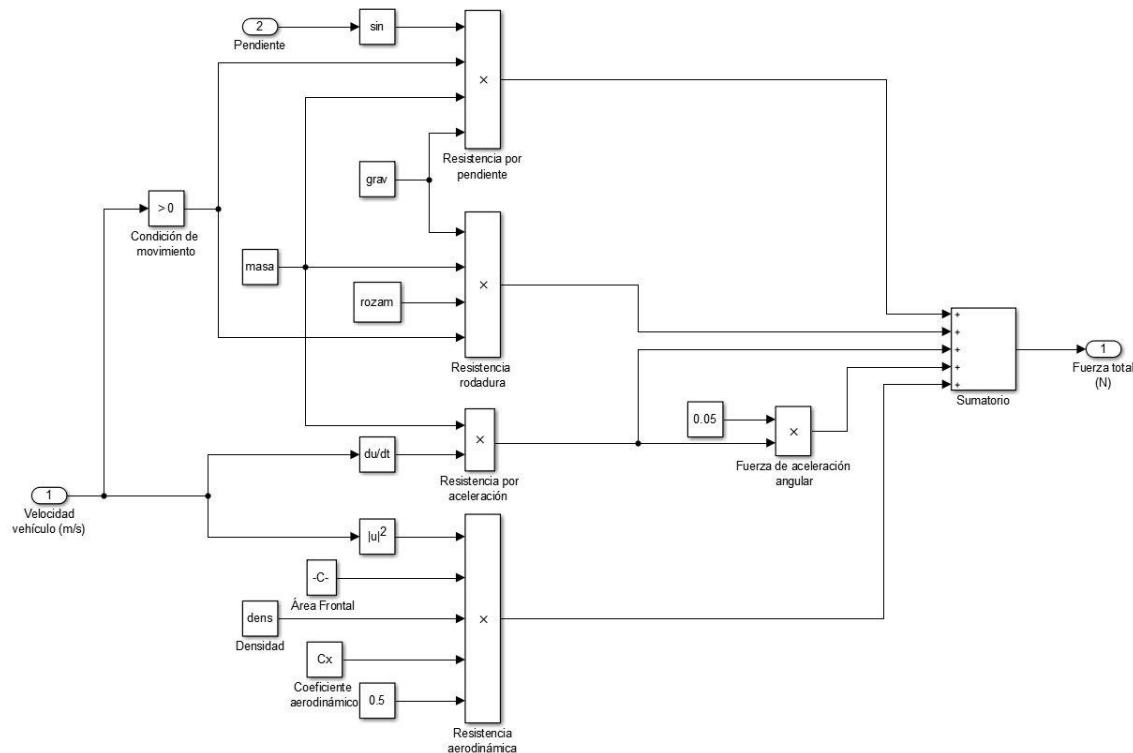


- Resistencia de aceleración angular. De acuerdo con [18], la caracterización de esta fuerza requiere conocer en profundidad la mecánica del vehículo, por lo que se aproxima al considerar su valor como el 5% de la resistencia por aceleración.

$$F_{aceleración} = 0,05 \cdot F_{aceleración \text{ angular}} \quad (\text{Ec. 4.5})$$

De esta manera, para que el vehículo avance, el motor ha de generar una fuerza de empuje superior a la suma de las fuerzas resistentes enumeradas anteriormente.

Haciendo uso de MATLAB Simulink, se ha elaborado un modelo que calcula la fuerza total resistente a partir de las ecuaciones dinámicas descritas, el cual puede verse en la Figura 4.7.



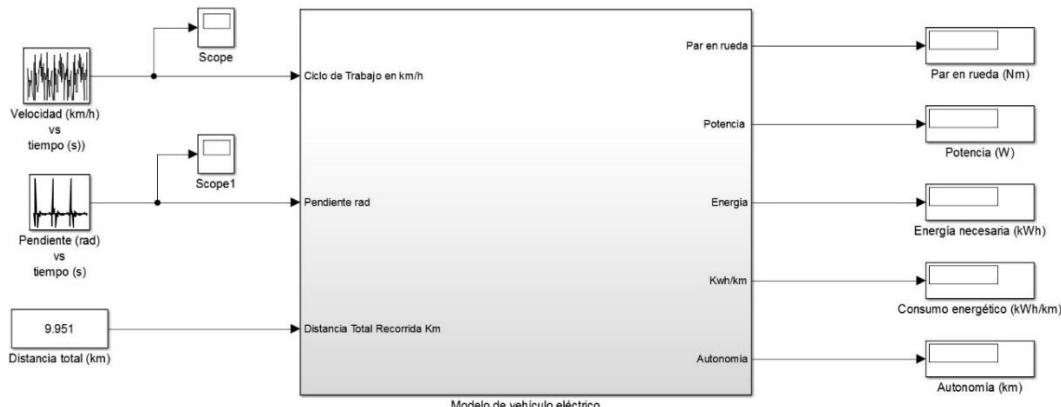


Figura 4.8. Modelo de vehículo eléctrico

Una vez elaborado el modelo dinámico, se ha empleado para simular el recorrido del autobús grabado con el fin de obtener el consumo energético que un autobús eléctrico, de las mismas dimensiones que el vehículo que actualmente cubre la línea analizada, experimentaría al recorrer el trayecto en estudio.

Así pues, en la Tabla 4.3 se recogen los valores de los parámetros que se han empleado para llevar a cabo la simulación.

Masa del vehículo, m	16200 kg
Radio de rueda, R	480 mm
Área frontal, A	8 m ²
Coeficiente aerodinámico, C_x	0,7
Coeficiente de rozamiento, μ	0,025
Densidad del aire, ρ	1,25 kg/m ³
Gravedad, g	9,81 m/s ²

Tabla 4.3. Parámetros empleados en la simulación

A continuación se detalla el origen de los valores de los parámetros expuestos en la Tabla 4.3:

- El peso del vehículo introducido en la simulación se ha calculado considerando que el autobús se encuentra al máximo de su capacidad total de pasajeros. Tomando un peso promedio de 70 kg por pasajero, y de acuerdo con el peso en vacío y el número máximo de pasajeros admitido de la Tabla 4.1, el peso del vehículo equivale a 16200 kg.
- El valor del radio de rueda de un vehículo viene definido por las características de su neumático. A partir de su código identificativo, en nuestro caso 275/70 R 22.5, se conoce que el neumático es radial, el cual posee un ancho de banda de rodadura de 275 mm, una altura del flanco un 70% el ancho de banda de rodadura y un diámetro de llanta de 22,5 pulgadas.

La expresión que relaciona estos parámetros con el radio de la rueda es:

$$R = \frac{1}{2} \left(22,5 \text{ pulgadas} \cdot \frac{25,4 \text{ mm}}{1 \text{ pulgada}} + 2 \cdot 0,7 \cdot 275 \text{ mm} \right) = 480 \text{ mm} \quad (\text{Ec. 4.6})$$

- El área frontal del autobús se ha calculado como el producto de la altura y la anchura del vehículo. Haciendo uso de los valores recogidos en la Tabla 4.1, A vale 8 m².
- El coeficiente aerodinámico de un vehículo depende de su diseño aerodinámico. Para autobuses, según [18] su valor aproximado es 0,7.



- El coeficiente de rozamiento de los neumáticos de los autobuses, en la mayoría de los casos bastante desgastados, con el asfalto se estima en 0,025 [19].

Los resultados obtenidos tras simular el trayecto analizado en el modelo dinámico son los que figuran en la Tabla 4.4.

Energía consumida en un trayecto	13,5 kWh
Consumo energético por unidad de longitud	1,357 kWh/km

Tabla 4.4. Resultados de la simulación



5. DISEÑO TÉORICO DEL SISTEMA WPT

5.1. Selección de un tramo tipo

Con el fin de implementar el sistema WPT a lo largo de todo el trayecto del autobús, se ha decidido dividir el recorrido de la línea en una serie de tramos. Éstos ocupan la distancia existente entre dos paradas consecutivas, de tal forma que el vehículo puede cargar sus baterías de manera estática mientras los pasajeros suben y bajan en la parada, y de manera dinámica mientras el autobús va de una parada a otra.

Así, al estar la totalidad del recorrido de la línea cubierto por sistemas WPT, el vehículo siempre dispondrá de energía para poder circular, sin necesidad de realizar ni una sola parada en cocheras para cargar las baterías.

El sistema WPT se ha diseñado para un tramo en concreto. Este tramo tipo está formado por las paradas que el autobús realiza en los postes de la C/ María Zambrano 48 y 60, mostrados en la Figura 5.1. Haciendo uso *Google Earth*, la distancia exacta entre ambas paradas es de 301,61 m. Para facilitar los cálculos, se ha establecido que la distancia sea de 300 metros.



Figura 5.1. Ubicación del tramo tipo seleccionado

De esta manera, todos los tramos entre cada parada del recorrido vendrán definidos por este tramo tipo. En aquellos en los que su longitud sea diferente a los 300 metros, se dispondrán más o menos bobinas emisoras según convenga, pero manteniendo siempre la distancia entre bobinas primarias diseñada en este tramo tipo.



5.2. Diseño del carril de carga

Tras determinar la longitud del tramo en el que se va a instalar cada sistema WPT, a continuación se establecen las dimensiones de las bobinas primaria (emisora) y secundaria (receptora) de acuerdo con la distancia existente entre las paradas del tramo tipo.

Ambas se ha decidido que tengan forma rectangular. Esto se debe a que esta geometría presenta un mejor comportamiento frente a desalineamientos, ofreciendo un alto grado de libertad durante el proceso de carga en la dirección del movimiento.

Asimismo, se considera que tanto las bobinas emisoras como la bobina secundaria están hechas de hilo de Litz. Este tipo de conductor está formado por multitud de hebras recubiertas con una película aislante, lo que incrementa el área de la superficie conductora, reduciéndose así las pérdidas de potencia asociadas al efecto pelicular cuando se trabaja a altas frecuencias.

Según las dimensiones (Tabla 4.1) y el espacio disponible en la parte del inferior en un Mercedes-Benz Citaro (Figura 5.2), vehículo que a día de hoy cubre el trayecto de la línea 44, se ha decidido emplear una bobina secundaria de dimensiones 5,5 m de largo por 1 m de ancho, la cual irá alojada en el chasis del vehículo y centrada entre los ejes delantero y trasero.

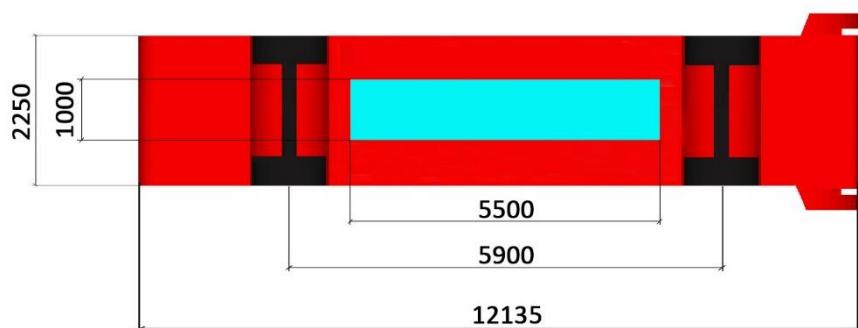


Figura 5.2. Parte inferior del autobús con la bobina receptora

Por otro lado, se han estudiado tres casos con diferentes dimensiones de la bobina primaria: 2,5, 1,5 y 0,75 m de largo por 0,5 m de ancho cada una. Como se puede observar, sus longitudes son inferiores a la de la bobina secundaria. Esto se debe a que, durante la carga dinámica, la posición relativa entre las bobinas varía constantemente. Por ello, una bobina receptora de mayor tamaño que la emisora ayuda a que la pérdida de potencia debida al desalineamiento entre ellas sea mínima, y a que la bobina secundaria concatene la mayor parte del flujo creado por la primaria. Además, el empleo de una bobina receptora de mayores dimensiones que las emisoras facilita el apantallamiento del sistema.

El dimensionamiento de las bobinas primarias se ha realizado teniendo en cuenta que las bobinas emisora y receptora intercambian potencia entre sí siempre que la receptora comprenda como mínimo el 70% de la emisora. Así, la distancia entre cada bobina emisora se ha calculado de tal forma que, tras terminar el intercambio de potencia de la bobina receptora con una emisora, se acople magnéticamente con la siguiente bobina emisora de forma inmediata. De esta manera, se garantiza una carga dinámica continua y una transferencia de potencia constante. En la Figura 5.3 se pueden ver las tres fases que conforman el proceso de transferencia de potencia entre cada una de las bobinas emisoras (verde) con la receptora (azul).

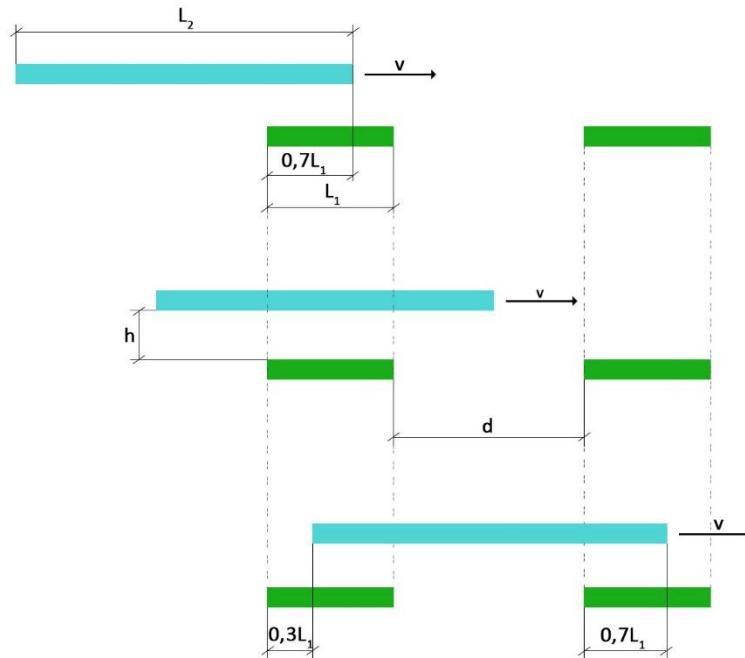


Figura 5.3. Comienzo, posición centrada y final del acoplamiento magnético entre las bobinas

Donde L_1 es la longitud de la bobina primaria, L_2 es la longitud de la bobina secundaria, d es la distancia entre cada bobina primaria, h es la distancia vertical entre las bobinas primaria y secundaria (*air gap*), y v es la velocidad con la que el autobús eléctrico se desplaza.

Del esquema de la Figura 5.3 se deduce que la distancia entre cada bobina primaria para que haya una transferencia de potencia ininterrumpida ha de ser:

$$d = L_2 - 2 \cdot 0,7L_1 \quad (\text{Ec. 5.1})$$

Por lo tanto, el número de bobinas primarias que pueden colocarse a lo largo de la distancia que ocupa el tramo (D) se calcula como:

$$N = \frac{D}{L_1 + d} \quad (\text{Ec. 5.2})$$

Asimismo, al producirse acoplamiento magnético solo cuando la bobina secundaria cubre el 70% de la primaria, la distancia que el vehículo recorre mientras se transfiere potencia entre una bobina emisora y la receptora es:

$$d_{acop.} = L_2 - 0,4L_1 \quad (\text{Ec. 5.3})$$

De ahí que el tiempo que permanecen acopladas cada bobina emisora con la receptora equivale a:

$$t_{acop.} = \frac{d_{acop.}}{v} \quad (\text{Ec. 5.4})$$

Por lo tanto, el tiempo durante el que las bobinas transfieren potencia entre sí a lo largo del tramo, teniendo en cuenta tanto la carga estática como la dinámica, vale:

$$t_{carga} = t_{est.} + t_{din.} = t_{est.} + N \cdot t_{acop.} \quad (\text{Ec. 5.5})$$



A partir del consumo energético obtenido del modelo dinámico realizado en el Capítulo 4 (E), el gasto energético que el vehículo tendría al recorrer la distancia que ocupa el tramo del sistema WPT (D) y, por lo tanto, la energía que habría que suministrar a la batería del vehículo en dicho tramo, es:

$$E_{tramo} = E \cdot D \quad (\text{Ec. 5.6})$$

Por lo que la potencia requerida en el sistema WPT ha de ser:

$$P_{WPT} = \frac{E_{tramo}}{t_{carga}} \quad (\text{Ec. 5.7})$$

Haciendo uso de las expresiones anteriores, y empleando los valores numéricos reflejados en la Tabla 5.1, se ha dimensionado el carril de carga para cada longitud de las bobinas primarias analizadas, así como la potencia del sistema WPT en cada caso, cuyos parámetros se muestran en las tablas Tabla 5.2, Tabla 5.3 y Tabla 5.4. Asimismo, en la Figura 5.4 se ha representado un esquema comparativo de los distintos tamaños de bobina primaria analizados respecto de la bobina secundaria.

Longitud bobina secundaria, L_2	5,5 m
Distancia del tramo, D	300 m
Velocidad del autobús, v	25 km/h
Consumo energético, E	1,35 kWh/km
Tiempo de parada para carga estática, $t_{est.}$	25 s

Tabla 5.1. Valores numéricos

CASO 1: $L_1 = 2,5$ m	
$d = 2$ m	$t_{acop.} = 0,65$ s
$d_{acop.} = 4,5$ m	$t_{carga} = 67,77$ s
$N = 66$	$P_{WPT} = 21,51$ kW

Tabla 5.2. Parámetros del sistema WPT con $L_1=2,5$ m

CASO 2: $L_1 = 1,5$ m	
$d = 3,4$ m	$t_{acop.} = 0,71$ s
$d_{acop.} = 4,9$ m	$t_{carga} = 68,04$ s
$N = 61$	$P_{WPT} = 21,43$ kW

Tabla 5.3. Parámetros del sistema WPT con $L_1=1,5$ m

CASO 3: $L_1 = 0,75$ m	
$d = 4,45$ m	$t_{acop.} = 0,75$ s
$d_{acop.} = 5,2$ m	$t_{carga} = 67,68$ s
$N = 57$	$P_{WPT} = 21,54$ kW

Tabla 5.4. Parámetros del sistema WPT con $L_1=0,75$ m

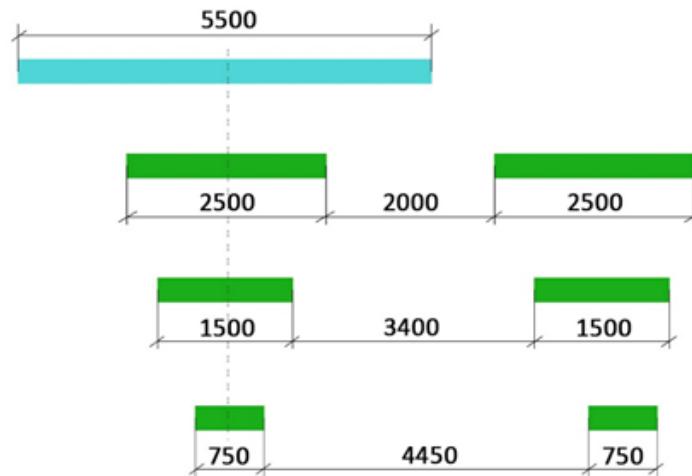


Figura 5.4. Comparativa de los tamaños de las bobinas emisoras y la receptora

Se observa que, al disminuir el tamaño de las bobinas primarias, L_1 , es preciso colocar un menor número de bobinas a lo largo del tramo, N , porque se necesita una separación entre ellas mayor para evitar que la bobina receptora se acople magnéticamente con dos bobinas primarias al mismo tiempo. Pero, al reducirse el tamaño de las bobinas emisoras, la distancia que la bobina secundaria recorre estando acoplada magnéticamente con una primaria es mayor, de acuerdo con la Ecuación 5.3. Por lo tanto, al final, el tiempo de carga acaba siendo siempre constante en los tres casos, y por ello los de la potencia a transferir necesaria también. No obstante, éstos no toman valores idénticos puesto que el número de bobinas primarias a colocar se ha redondeado a la baja, provocando ligeros cambios en los decimales de los resultados.

5.3. Topología de compensación

La topología de compensación que se ha decidido emplear en el sistema WPT es una compensación S-S. Se ha optado por esta topología puesto que es la más sencilla de implementar, es la que consigue la máxima eficiencia del sistema y, además, es la más conveniente para carga inductiva dinámica con una adecuado control [20], [21].

El circuito equivalente del sistema de compensación seleccionado se muestra en la Figura 5.5.

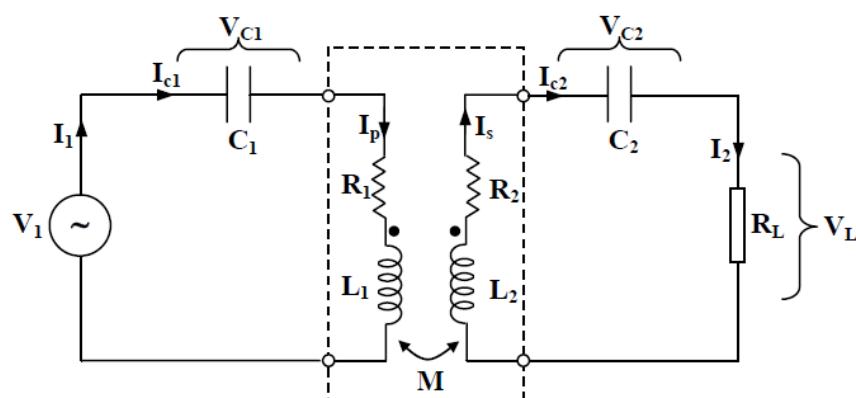


Figura 5.5. Circuito equivalente de un sistema WPT con compensación S-S



Donde:

- V_1 es la tensión eficaz de la fuente.
- V_{C1} y V_{C2} las tensiones eficaces en los condensadores primario y secundario, respectivamente.
- V_L la tensión eficaz en la carga.
- I_1 es la corriente suministrada por la fuente.
- I_{C1} e I_{C2} son las corrientes eficaces en el condensador primario y secundario, respectivamente.
- I_p e I_s son las corrientes eficaces por el devanado primario y secundario, respectivamente.
- I_2 es la corriente que circula por la carga.
- R_1 y R_2 son las resistencias del devanado primario y secundario, respectivamente.
- R_L es la resistencia de carga.
- L_1 y L_2 son los coeficientes de autoinducción del devanado primario y secundario, respectivamente.
- C_1 y C_2 son los condensadores de compensación de primario y secundario, respectivamente.
- M es el coeficiente de inducción mutua.

Las expresiones que caracterizan el circuito, aplicando la 2^a Ley de Kirchhoff en el lado primario y secundario, son:

$$\vec{V}_1 = \left[R_1 + j \left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1} \right) \right] \cdot \vec{I}_1 - j \omega M \cdot \vec{I}_2 = \vec{Z}_1 \vec{I}_1 - j \omega M \vec{I}_2 \quad (\text{Ec. 5.8})$$

$$0 = \left[(R_2 + R_L) + j \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \right) \right] \cdot \vec{I}_2 - j \omega M \cdot \vec{I}_1 = \vec{Z}_2 \vec{I}_2 - j \omega M \vec{I}_1 \quad (\text{Ec. 5.9})$$

Despejando \vec{I}_2 de la Ecuación 5.9 se obtiene la relación entre las corrientes del primario y secundario, definida por:

$$\vec{I}_2 = j \frac{\omega M}{\vec{Z}_2} \vec{I}_1 \quad (\text{Ec. 5.10})$$

Sustituyendo la expresión anterior en la Ecuación 5.8, se tiene la expresión que define el circuito equivalente visto desde el primario, representado en la Figura 5.6:

$$\vec{V}_1 = \left(\vec{Z}_1 + \frac{\omega^2 M^2}{\vec{Z}_2} \right) \cdot \vec{I}_1 \quad (\text{Ec. 5.11})$$

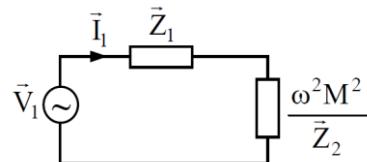


Figura 5.6. Circuito equivalente visto desde el lado primario

La segunda impedancia del circuito anterior se denomina impedancia reflejada en compensación SS, la cual representa la impedancia del secundario vista desde el primario:

$$\vec{Z}_r = \frac{\omega^2 M^2}{\vec{Z}_2} \quad (\text{Ec. 5.12})$$



Sustituyendo \vec{Z}_2 por su expresión en la Ecuación 5.12 y operando, se obtiene la fórmula para la impedancia reflejada:

$$\vec{Z}_r = \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} - j \frac{\omega^2 M^2 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \quad (\text{Ec. 5.13})$$

Según la Teoría de Circuitos, la máxima potencia transferida a la carga se consigue cuando la impedancia del secundario vista desde el primario es igual al conjugado de la impedancia del primario, $\vec{Z}_r = \vec{Z}_1^*$. Esto implica que:

$$R_1 = \frac{\omega^2 M^2 (R_2 + R_L)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \quad (\text{Ec. 5.14})$$

$$\left(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}\right) = \frac{\omega^2 M^2 \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)}{(R_2 + R_L)^2 + \left(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2}\right)^2} \quad (\text{Ec. 5.15})$$

Al trabajar en resonancia tanto en el primario como en el secundario, igualando a cero la ecuación x se obtiene la expresión de la frecuencia de máxima potencia:

$$\omega_{op} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}} \quad (\text{Ec. 5.16})$$

Sustituyendo la Ecuación 5.16 en la Ecuación 5.14, se obtiene otra expresión más para la frecuencia de máxima potencia:

$$\omega_{op} = \frac{\sqrt{R_1 (R_2 + R_L)}}{M} \quad (\text{Ec. 5.17})$$

Para lograr un rendimiento máximo en la transferencia de potencia, la frecuencia de trabajo del sistema ha de ser mayor que la frecuencia de máxima potencia ω_{op} . Así se define la frecuencia de máximo rendimiento ω_d :

$$\omega_d = K_\omega \omega_{op} = K_\omega \frac{\sqrt{R_1 (R_2 + R_L)}}{M} \quad (\text{Ec. 5.18})$$

Así pues, los condensadores de resonancia del sistema de compensación, trabajando a la frecuencia de máximo rendimiento ω_d , vienen expresados por:

$$C_1 = \frac{1}{L_1 \omega_d^2} \quad (\text{Ec. 5.19})$$

$$C_2 = \frac{1}{L_2 \omega_d^2} \quad (\text{Ec. 5.20})$$



5.4. Sistema de alimentación

En lo referente a la alimentación del sistema WPT, es necesario distinguir entre los dos bloques principales que lo componen: el lado primario o tierra, cuyos sistemas de alimentación van colocados bajo el asfalto y alimentan al bobinado primario; y el lado secundario o vehículo, cuyos dispositivos se ubican a bordo del autobús eléctrico y comprenden los sistemas que alimentan la batería del bus.

El sistema de alimentación para carga inalámbrica comienza con una toma de red. Como la red comercial AC trabaja a una frecuencia muy baja, entre 50 y 60 Hz, se necesita amplificar dicha frecuencia para poder efectuar la transferencia de potencia inalámbrica de forma efectiva. De este modo, se requiere de un rectificador AC/DC que convierta la señal de corriente alterna de la red a corriente continua, un convertidor DC/DC para controlar la potencia de carga, y un inversor DC/AC que convierta la corriente continua a corriente alterna de alta frecuencia.

Por otro lado, para alimentar la batería del autobús eléctrico a la tensión deseada, es necesario convertir la corriente alterna inducida en la bobina receptora a corriente continua mediante un rectificador AC/DC, y un convertidor DC/DC que adapte la señal a la tensión deseada en la carga.

El diagrama unifilar del sistema de alimentación del conjunto del sistema WPT se muestra en la Figura 5.7.

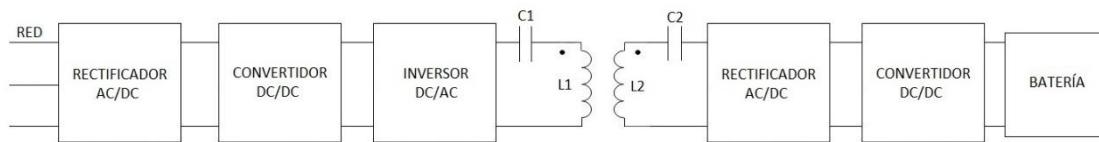


Figura 5.7. Diagrama unifilar de un sistema WPT genérico

Para realizar la transferencia de potencia entre las bobinas primaria y secundaria, es necesario emplear una serie de cargadores con una potencia igual a la deseada transferir a la batería del autobús. Estos cargadores, compuestos por un inversor DC/AC, están alimentados por la señal continua de salida del convertidor DC/DC (bus DC), y son los encargados de alimentar a cada bobina emisora.

Las 66 bobinas primarias distribuidas a lo largo del tramo tipo de 300 m se alimentan por medio de 17 cargadores: 16 de ellos alimentan a 4 bobinas emisoras cada uno, mientras que el último de ellos alimenta únicamente a un par de bobinas. Asimismo, cada cargador lleva asociado un bloque de condensadores de compensación, como puede verse en la Figura 5.8. Se ha optado por esta configuración ya que es la opción más económica, al requerir de una menor cantidad de cableado, condensadores de compensación y cargadores.

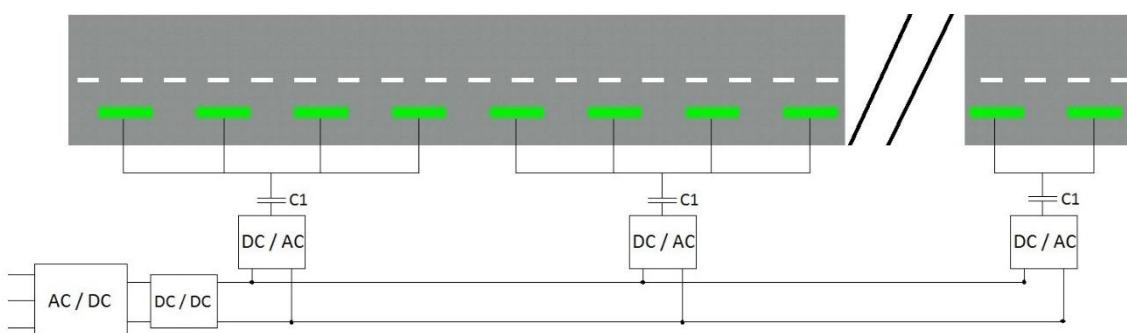


Figura 5.8. Configuración de la alimentación de las bobinas primarias



El esquema de alimentación planteado para el sistema WPT diseñado se ha representado en la Figura 5.9. Para el bus DC se propone emplear como convertidor AC/DC un puente rectificador trifásico de 6 pulsos, y un convertidor DC/DC reductor (buck) para controlar la potencia de carga, ambos de 50 kW de potencia. Así, puede permitirse la carga de dos vehículos a la vez en un mismo tramo: uno en la parada de manera estática, y otro desplazándose por la línea. Al bus DC van conectados los diversos cargadores ubicados en el tramo, compuestos cada uno de ellos por un inversor DC/AC en puente monofásico, con una potencia de 22 kW, y por el sistema de compensación del lado primario. Para activar la bobina emisora adecuada en cada momento, se propone emplear un contactor modular de 2 polos por cada bobina emisora de tal forma que únicamente se active la bobina emisora sobre la que el autobús eléctrico se encuentra, estando el resto desconectadas.

En el lado secundario se propone hacer uso de un rectificador en puente monofásico como convertidor AC/DC, y un filtro para adecuar la tensión de carga de la batería y una corriente constante de carga con el rizado deseado.

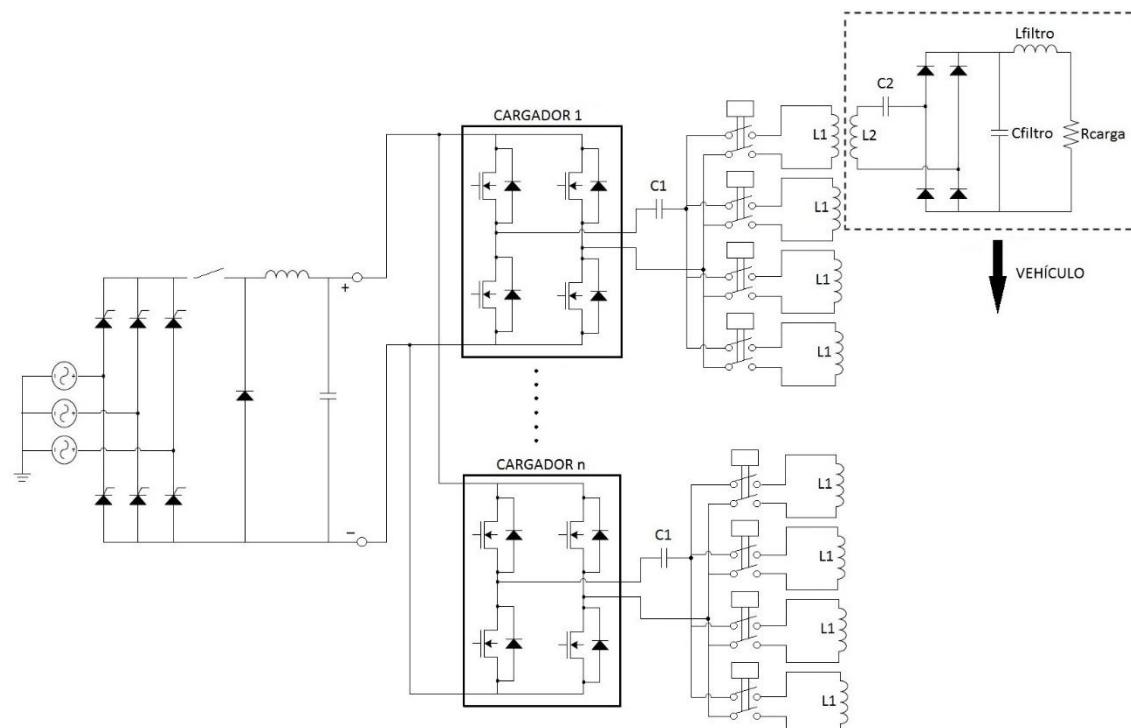


Figura 5.9. Esquema propuesto de la electrónica de potencia del sistema WPT

5.5. Dimensionamiento óptimo del sistema

En este apartado se ha dimensionado el sistema de transferencia de potencia WPT. Este dimensionamiento comprende la determinación de los números de espiras de las bobinas primaria y secundaria, N_1 y N_2 , sus respectivas secciones, S_1 y S_2 , la frecuencia de trabajo con la que se obtiene el mayor rendimiento, f_0 , y los condensadores de compensación, C_1 y C_2 .



Para establecer cada uno de estos parámetros, se ha empleado un método iterativo desarrollado por el director del presente trabajo [4] el cual aporta una solución óptima. A partir de la potencia a transferir, las dimensiones de las bobinas y de las tensiones de alimentación al sistema y la deseada en la carga, el programa nos proporciona la solución óptima de los parámetros anteriormente mencionados para la cual el sistema se comporta de la manera más estable posible y para la que se precisa una menor cantidad de cobre en las bobinas. El código del método iterativo desarrollado en MATLAB para un sistema WPT con compensación S-S se encuentra en el Anexo II.

Dicho programa se ha empleado para dimensionar el sistema para cada uno de los casos de bobina primaria definidos en el apartado 5.3. Los valores que se han tomado para las distintas variables de entrada se recogen en la Tabla 5.5.

Potencia deseada en la carga, P	22 kW
Tensión deseada en la carga (batería), V_L	700 V
Tensión de alimentación, V_{bus}	565 V
Distancia vertical entre bobinas, h	250 mm
Anchura de la bobina primaria, a_1	500 mm
Longitud de la bobina primaria, b_1	Según cada caso
Anchura de la bobina secundaria, a_2	1000 mm
Longitud de la bobina secundaria, b_2	5500 mm
Posición relativa entre bobinas en eje x, c	Según cada caso
Posición relativa entre bobinas en eje y, e	Según cada caso

Tabla 5.5. Variables de entrada al programa

Donde:

- La potencia deseada en la carga equivale a la potencia necesaria transferir entre las bobinas primaria y secundaria, la cual se ha establecido en 22 kW de acuerdo con su diseño teórico.
- La tensión de las baterías de los autobuses eléctricos actuales ronda los 700 V de continua.
- La tensión del bus DC es la tensión de pico de tensión línea de la red:

$$V_{bus} = \sqrt{2} \cdot V_{red} = \sqrt{2} \cdot 400 V \cong 565 V \quad (\text{Ec. 5.21})$$

- De acuerdo con la altura sobre el piso bajo del autobús (Figura 4.2), se ha tomado un valor de 25 cm para la distancia vertical entre las bobinas (*air gap*), y así asegurar una correcta transferencia de potencia.
- Los parámetros c y e determinan la posición relativa entre las bobinas primaria y secundaria, estando ambas perfectamente alineadas, tal y como se representa en la Figura 5.10. De ésta se deduce que:

$$c = -\left(\frac{a_2}{2} - \frac{a_1}{2}\right) \quad (\text{Ec. 5.22})$$

$$e = -\left(\frac{b_2}{2} - \frac{b_1}{2}\right) \quad (\text{Ec. 5.23})$$

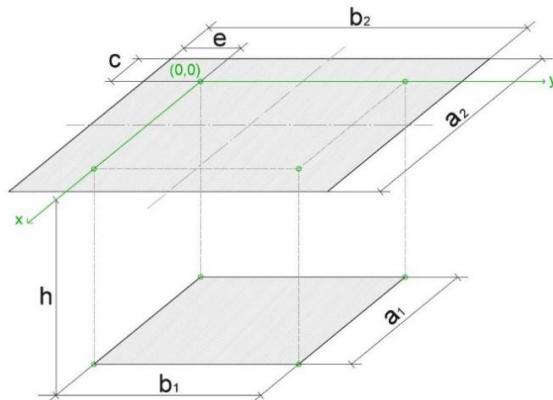


Figura 5.10. Dimensiones genéricas de dos bobinas rectangulares alineadas

Por lo tanto, las soluciones óptimas obtenidas a partir del programa para cada uno de los casos analizados se muestran en las tablas Tabla 5.6, Tabla 5.7 y Tabla 5.8.

CASO 1: $b_1 = 2,5 \text{ m}$								η
N_1	S_1	V_1	I_1	C_1	V_{C1}	L_1	M	
15	15 mm ²	508,68 V	44,50 A	0,0440 µF	7,06 kV	1,1 mH	0,111 mH	
N_2	S_2	V_L	I_2	C_2	V_{C2}	L_2	f	0,9654
9	11 mm ²	697,70 V	31,32 A	0,0443 µF	4,93 kV	1,1 mH	22,79 kHz	

Tabla 5.6. Dimensionamiento sistema WPT con $b_1 = 2,5 \text{ m}$

CASO 2: $b_1 = 1,5 \text{ m}$								η
N_1	S_1	V_1	I_1	C_1	V_{C1}	L_1	M	
23	15 mm ²	508,68 V	44,73 A	0,0258 µF	11,10 kV	1,6 mH	0,102 mH	
N_2	S_2	V_L	I_2	C_2	V_{C2}	L_2	f	0,9649
9	11 mm ²	699,30 V	31,39 A	0,0374 µF	5,38 kV	1,6 mH	24,78 kHz	

Tabla 5.7. Dimensionamiento sistema WPT con $b_1 = 1,5 \text{ m}$

CASO 3: $b_1 = 0,75 \text{ m}$								η
N_1	S_1	V_1	I_1	C_1	V_{C1}	L_1	M	
39	15 mm ²	508,68 V	44,60 A	0,0146 µF	16,69 kV	2,5 mH	0,105 mH	
N_2	S_2	V_L	I_2	C_2	V_{C2}	L_2	f	0,9603
11	11 mm ²	696,67 V	31,28 A	0,0272 µF	7,60 kV	1,6 mH	24 kHz	

Tabla 5.8. Dimensionamiento sistema WPT con $b_1 = 0,75 \text{ m}$

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que la frecuencia de trabajo en todos los casos oscila entre los 22 y 25 kHz y que el rendimiento de la transferencia ronda el 96%. Sin embargo, se ha comprobado que conforme la longitud de la bobina primaria decrece, la caída de tensión en los condensadores de compensación aumenta. Esto se debe a que el número de espiras necesario es mayor, por lo que la inductancia de primario L_1 también aumenta, lo que provoca que la caída de tensión en esta bobina, $I_1 \cdot \omega L_1$, sea muy elevada.



Este hecho es de vital importancia puesto que una elevada tensión en los condensadores puede dificultar su aislamiento. Debido a este aspecto y así garantizar un funcionamiento óptimo del sistema WPT, tras analizar los distintos casos se ha decidido tomar como longitud de bobina primaria $b_1 = 2,5$ m.

Para llevar a cabo el estudio económico del Capítulo 7 y así estimar de manera certeza el coste del sistema, se ha escogido un modelo comercial para los condensadores de compensación del lado primario. Así, se ha seleccionado el modelo CSP 305B/600 de la compañía CELEM, cuyas especificaciones se pueden consultar en el Anexo III.

De acuerdo con la capacidad teórica del condensador primario, $C_1 = 0,0440 \mu\text{F}$, y la tensión teórica que cae en él, $V_{C1} = 7,06 \text{ kV}$, se requieren 8 condensadores conectados en serie de $0,33 \mu\text{F}$ de capacidad y 1000 V de tensión eficaz sinusoidal cada uno, según refleja la Figura 5.11. Los ocho condensadores en serie se comportan como un único condensador, cuyo valor resultante de la asociación serie es $0,0412 \mu\text{F}$:

$$\frac{1}{C_1} = \frac{1}{C} + \frac{1}{C} \Rightarrow C_1 = \frac{C}{8} = \frac{0,33 \mu\text{F}}{8} = 0,0412 \mu\text{F} \quad (\text{Ec. 5.24})$$

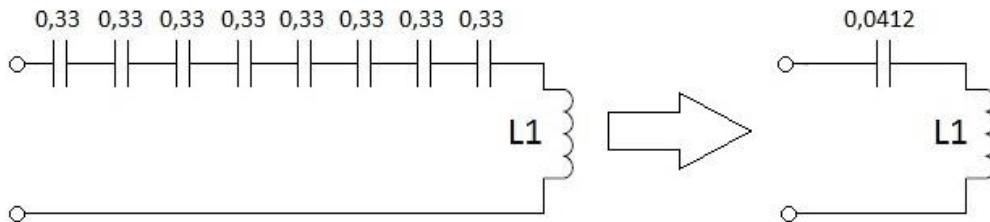


Figura 5.11. Asociación serie de los condensadores de compensación del lado primario (unidades en μF)

5.6. Sistema WPT diseñado

El sistema WPT diseñado de manera teórica es el que se muestra en el presente apartado. En la Tabla 5.9 se pueden consultar los parámetros del circuito equivalente del sistema de transferencia de potencia, así como las dimensiones de las bobinas emisoras y receptora.

Sistema WPT de 22 kW	
$a_1 = 500 \text{ mm}$	$a_2 = 1000 \text{ mm}$
$b_1 = 2500 \text{ mm}$	$b_2 = 5500 \text{ mm}$
$h = 250 \text{ mm}$	
$N_1 = 15$	$N_2 = 9$
$S_1 = 15 \text{ mm}^2$	$S_2 = 11 \text{ mm}^2$
$R_1 = 0,2105 \Omega$	$R_2 = 0,3732 \Omega$
$L_1 = 0,0011 \text{ H}$	$L_2 = 0,0011 \text{ H}$
$M = 0,1113 \text{ mH}$	
$C_1 = 0,0412 \mu\text{F}$	$C_2 = 0,0443 \mu\text{F}$
$f = 22,8 \text{ kHz}$	$\eta = 0,9654$

Tabla 5.9. Parámetros teóricos del sistema WPT diseñado



La bobina primaria (emisora) se ha diseñado con forma rectangular, con un total de 15 espiras hechas a base de hilo de Litz con un diámetro de 5,24 mm cada una. Sus dimensiones son 2,5 m x 0,5 m, tal y como se ha reflejado en la Figura 5.12.

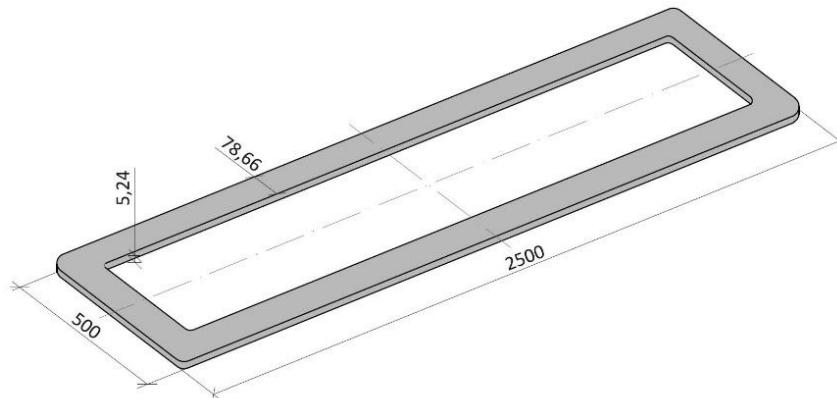


Figura 5.12. Bobina primaria

La bobina secundaria (receptora) se ha diseñado también con geometría rectangular, formada por un total de 9 espiras de hilo de Litz de 4,48 mm de diámetro cada una. Sus dimensiones son 5,5 m x 1 m, tal y como muestra la Figura 5.13.

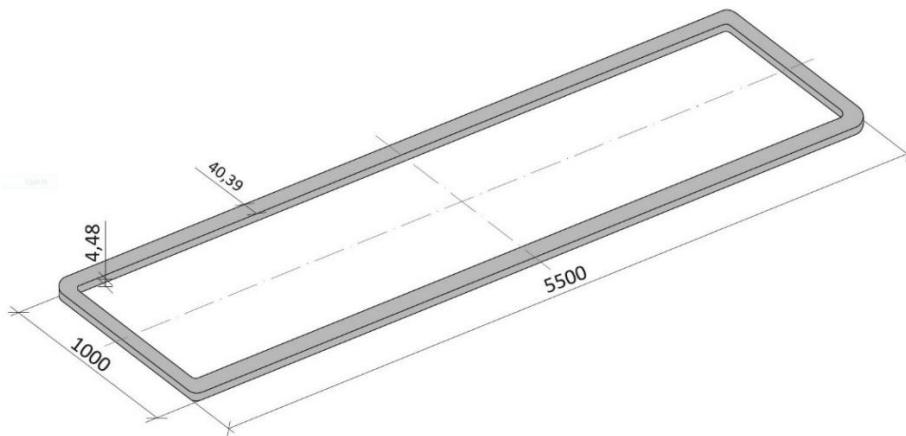


Figura 5.13. Bobina secundaria

De esta manera, la configuración final del autobús con la bobina secundaria (azul) instalada bajo el chasis del vehículo es la que aparece en la Figura 5.14. A su vez, se han representado en el mismo esquema las distintas dimensiones del vehículo y las bobinas primarias del carril de carga acotadas (verde), las cuales caracterizan el sistema de carga estática y dinámica diseñado.

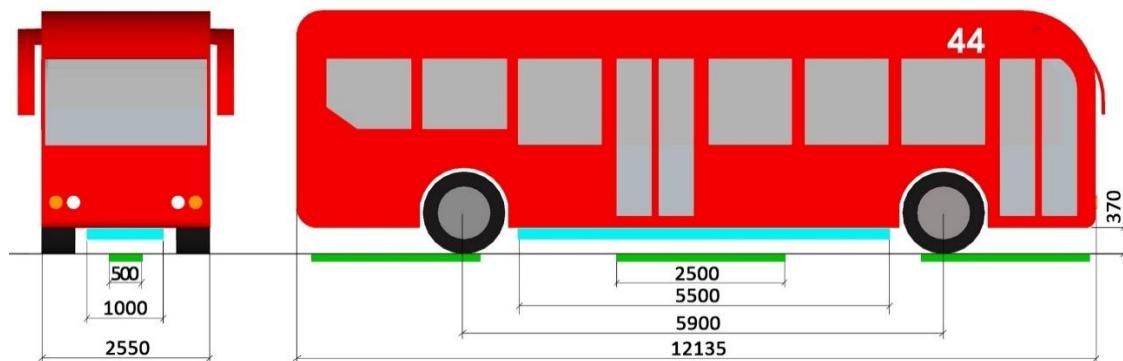


Figura 5.14. Autobús analizado acotado



Para cargar el vehículo y que la potencia en la carga sea de 22 kW, el autobús ha de circular a una velocidad constante de 25 km/h sobre el carril de carga dinámica, teniendo que detenerse durante un tiempo de 25 segundos en cada parada para llevar a cabo la carga estática.

Por otro lado, el carril de carga del tramo tipo está conformado por un total de 66 bobinas primarias. Su disposición a lo largo del tramo de carril de carga dinámica junto con sus dimensiones se puede ver en la Figura 5.15.

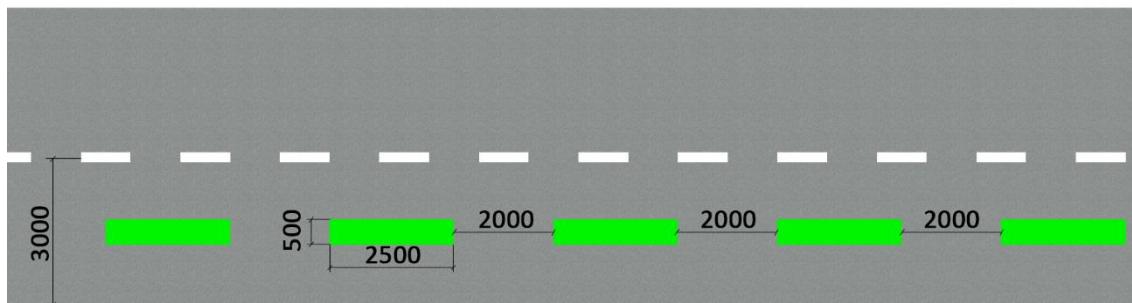


Figura 5.15. Carril de carga acotado

Así, el autobús se desplaza por encima de dicho carril de carga al mismo tiempo que recarga sus baterías de manera continua. En la Figura 5.16 se muestra dicha situación, en la que el autobús se encuentra completamente centrado en su carril, estando a su vez las bobinas emisoras y receptoras perfectamente alineadas entre sí.

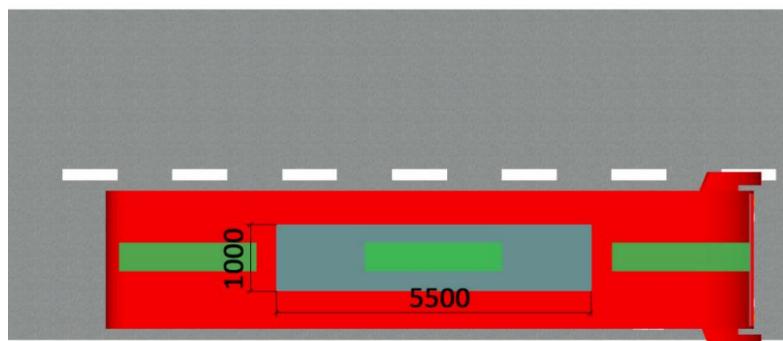


Figura 5.16. Carril de carga con autobús acotado

En el caso de la carga estática, la bobina emisora transfiere la misma potencia que las bobinas de la carga dinámica. Mientras el vehículo se detiene, durante el tiempo establecido, en las paradas para permitir la subida y bajada de pasajeros, el autobús recarga sus baterías. Dicha situación se ha ilustrado en la Figura 5.17.



Figura 5.17. Vista aérea del sistema completo



6. DISEÑO DEL SISTEMA DE APANTALLAMIENTO

La transferencia de potencia por medio del acoplamiento inductivo entre dos bobinas a través del aire genera un campo magnético variable en función del nivel de carga. Este hecho hace que sea imprescindible el diseño de un adecuado sistema de apantallamiento que evite que el campo magnético creado afecte a los pasajeros del propio autobús, a los viandantes y a los elementos y materiales circundantes al sistema WPT.

6.1. Normativa vigente

De acuerdo con la Comisión Internacional para la Protección ante Radiación No Ionizante, ICNIRP (*International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection*), en el año 2010 se estableció el valor máximo de campo electromagnético al que una persona puede exponerse. La Tabla 6.1, extraída de dicha normativa, fija estos valores límite en función de la frecuencia. En nuestro caso, al ser la frecuencia del sistema WPT diseñado de 22,8 kHz, el campo magnético no debe superar los 27 μT .

Frequency range	E-field strength E (kV m^{-1})	Magnetic field strength H (A m^{-1})	Magnetic flux density B (T)
1 Hz–8 Hz	5	$3.2 \times 10^4/f^2$	$4 \times 10^{-2}/f^2$
8 Hz–25 Hz	5	$4 \times 10^3/f$	$5 \times 10^{-3}/f$
25 Hz–50 Hz	5	1.6×10^2	2×10^{-4}
50 Hz–400 Hz	$2.5 \times 10^2/f$	1.6×10^2	2×10^{-4}
400 Hz–3 kHz	$2.5 \times 10^2/f$	$6.4 \times 10^4/f$	$8 \times 10^{-2}/f$
3 kHz–10 MHz	8.3×10^{-2}	21	2.7×10^{-5}

Notes:

- f in Hz.

Tabla 6.1. Valores máximos de exposición humana a campo magnético, ICNIRP 2010

Por otro lado, la norma IEC 61851 determina las áreas alrededor del vehículo eléctrico en las que se recomienda y/o se obliga cumplir con el valor máximo de exposición humana frente a campos magnéticos establecido por la norma ICNIRP 2010, tal y como se puede ver en la Figura 6.1.

	Protection target 1	Protection target 2
Protection area 1 (see 3.115):	recommended	mandatory
Protection area 2 (see 3.116):	recommended	mandatory
Protection area 3 (see 3.117):	mandatory	mandatory
Protection area 4 (see 3.118):	mandatory	mandatory

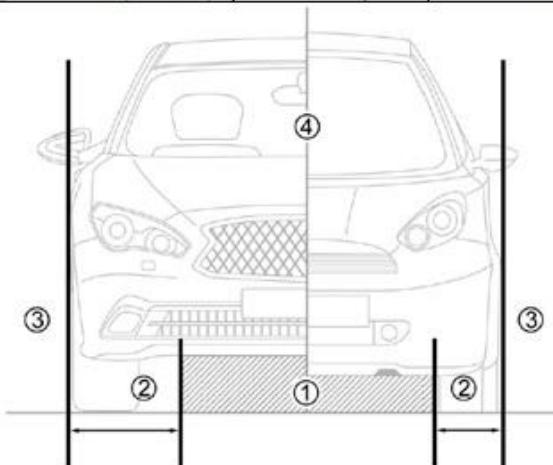


Figura 6.1. Zonas de protección de un vehículo eléctrico cargado de manera inalámbrica



Para medir la intensidad del campo magnético en las zonas de protección obligatorias (3 y 4), las normas IEC 62110 e IEC 62233 establecen una serie de puntos situados dentro de dichas áreas en las que no se deben superar los $27 \mu\text{T}$, los cuales se representan en la Figura 6.2. Se trata de cuatro puntos, distribuidos alrededor del vehículo y ubicados a 20 cm de éste, en cada uno de los cuales se han de llevar a cabo tres medidas del campo magnético: a 0,5, a 1 y a 1,5 metros.

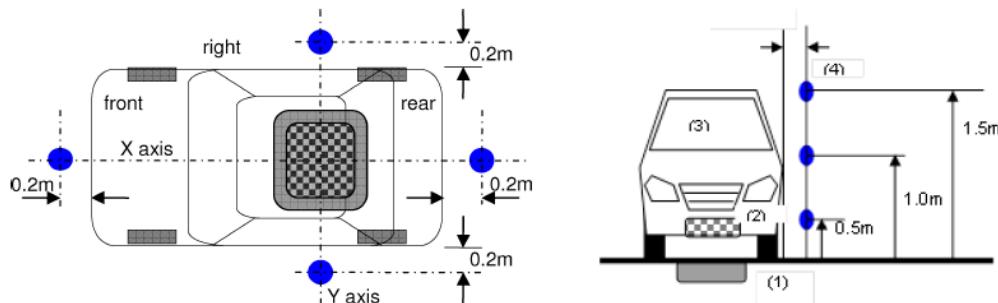


Figura 6.2. Puntos de medida del campo magnético en las zonas 3 y 4

Por lo tanto, la normativa vigente hace que sea estrictamente necesario el diseño de un adecuado sistema de apantallamiento que aíslle el sistema WPT correctamente para proteger tanto al vehículo eléctrico como a su entorno.

6.2. Análisis del campo magnético sin apantallamiento

Para diseñar el sistema de apantallamiento de manera óptima, se ha realizado un modelo 2D en elementos finitos del sistema WPT diseñado teóricamente mediante el programa FEMM (*Finite Element Method Magnetics*).

El modelo elaborado consiste en la transferencia de potencia entre una bobina primaria y la secundaria, estando perfectamente alineadas entre sí. Se ha analizado de manera transversal, puesto que la geometría rectangular de las bobinas hace que la bobina secundaria concatene una mayor cantidad del flujo creado por la primaria en dirección transversal. Esta situación es la que más campo magnético puede llegar a generar y, por tanto, conforma la situación más crítica a la hora de cumplir con la normativa vigente expuesta en el apartado anterior.

Las bobinas emisora y receptora se han dibujado con un corte transversal. Cada una de ellas se ha representado mediante sus espiras con sus respectivas secciones, en base al dimensionamiento óptimo realizado en el apartado 5.5. Éstas se han dibujado a 1000 y 500 mm y con un air gap de 250 mm, de acuerdo con su diseño teórico. El modelo FEMM del sistema acotado se ha representado en la Figura 6.3.

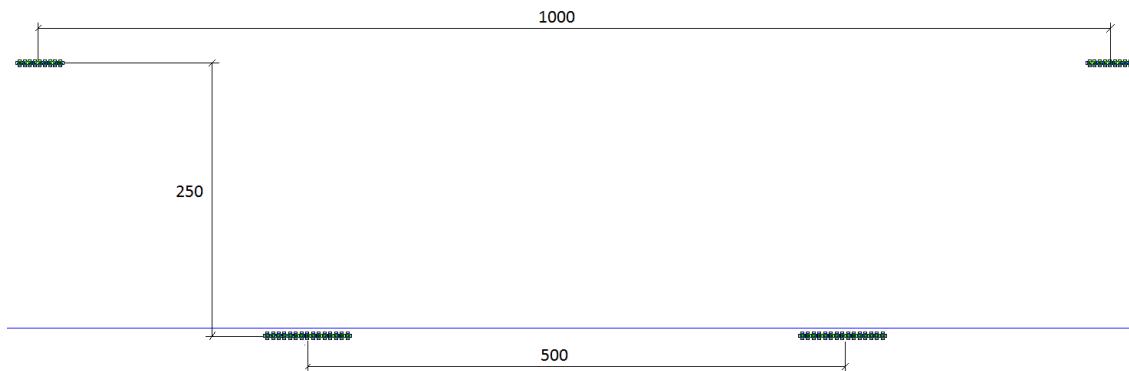


Figura 6.3. Modelo FEMM del sistema WPT

A su vez, se ha considerado que las espiras están fabricadas con hilo de Litz de 0,3 mm de diámetro. Este tipo de conductor está formado por multitud de hebras recubiertas con una película aislante, lo que incrementa el área de la superficie conductora, reduciéndose así las pérdidas de potencia asociadas al efecto pelicular cuando se trabaja a altas frecuencias. De acuerdo con las secciones de las espiras diseñadas, cada espira de las bobinas primarias está formada por 212 hebras, mientras que las de la secundaria poseen un total de 155 hebras.

Una vez construido el modelo, se ha analizado el campo magnético del sistema WPT en ausencia de apantallamiento. Como se puede comprobar en la Figura 6.4, la práctica totalidad del autobús y su entorno se encuentran bajo el efecto de un campo magnético de al menos 27 µT (zonas coloreadas en rosa). Este valor es el máximo permitido por la normativa vigente y evidencia la necesidad de apantallar debidamente el sistema de transferencia de potencia.

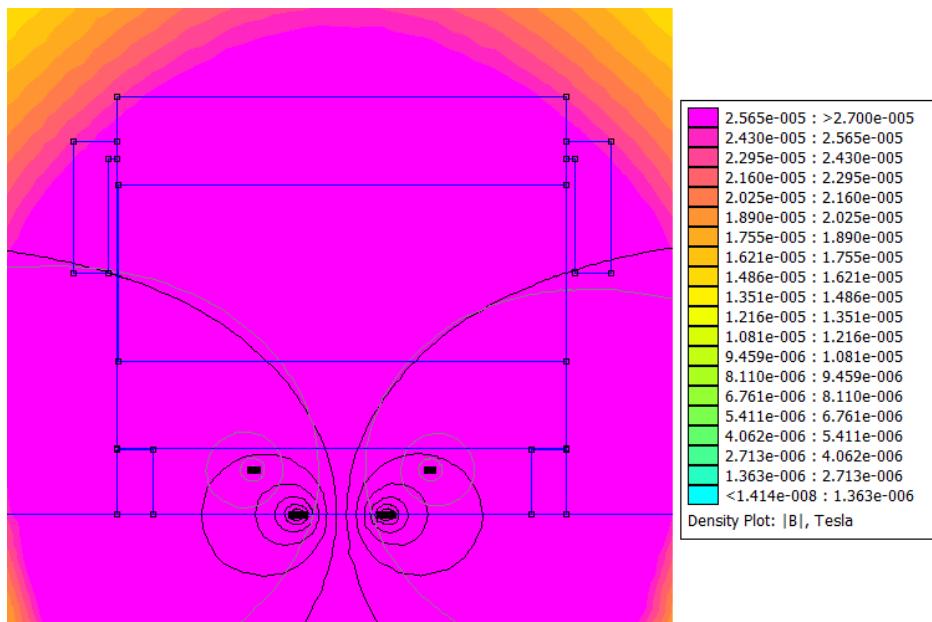


Figura 6.4. Análisis del campo magnético sin apantallamiento



6.3. Sistema de apantallamiento óptimo diseñado

Para llevar a cabo un aislamiento electromagnético, se requieren hacer uso de materiales que sean conductores eléctricos. Las propiedades de estos materiales hacen que el campo electromagnético en su interior sea nulo, mitigando así el efecto de los campos externos.

El material más empleado en este tipo de aplicaciones es el aluminio, gracias a su ligereza y a su fácil mecanizado. También es un buen conductor, lo que permite que corrientes parásitas circulen por su interior fácilmente, absorbiendo y apantallando el campo magnético que lo rodea.

Se ha decidido diseñar dos piezas de aluminio, las cuales serán instaladas en el primario y en el secundario para apantallar tanto el suelo y los materiales dispuestos a su alrededor como el vehículo y los pasajeros, respectivamente.

Para apantallar el lado primario se ha diseñado una caja de aluminio con unas dimensiones de 1550 mm de ancho, 3500 mm de largo, 105 mm de alto y 3 mm de grosor, en cuyo interior va alojada la bobina emisora. Se ha optado por diseñarla con una anchura grande para dar libertad a las líneas de flujo magnético y para permitir holgura en caso de desalineamiento. A su vez, se ha realizado un agujero central de geometría cuadrada (350 mm x 350 mm) en el que se podría instalar un pilar de refuerzo para proporcionar un mayor soporte mecánico a la infraestructura en tierra. Esta pieza se muestra en la Figura 6.5.

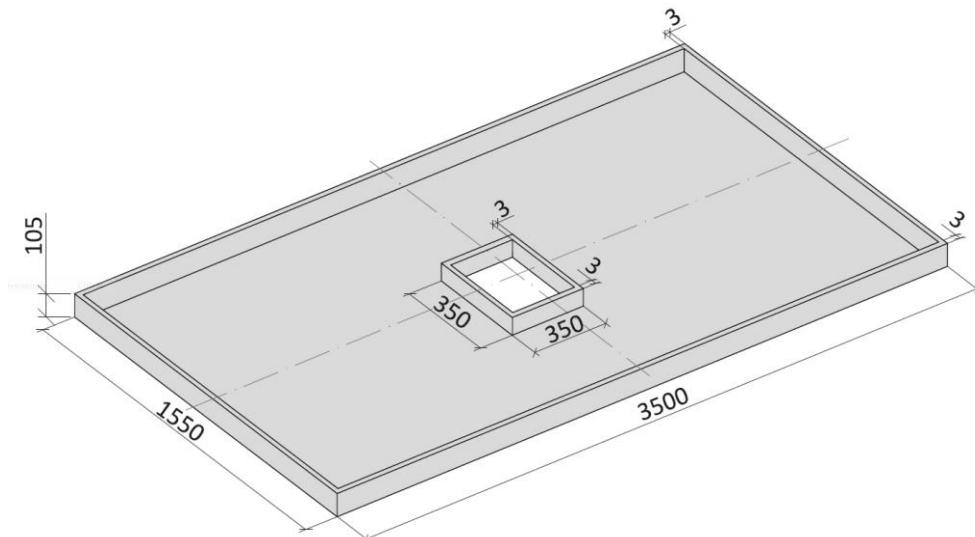


Figura 6.5. Caja de aluminio del lado primario

Para apantallar el secundario del sistema WPT, se ha optado por diseñar una plancha de aluminio que cubre la práctica totalidad de la parte inferior del vehículo. Sus dimensiones son 2000 mm de ancho, 12135 mm de largo y 3 mm de espesor, tal y como se puede ver en la Figura 6.6.

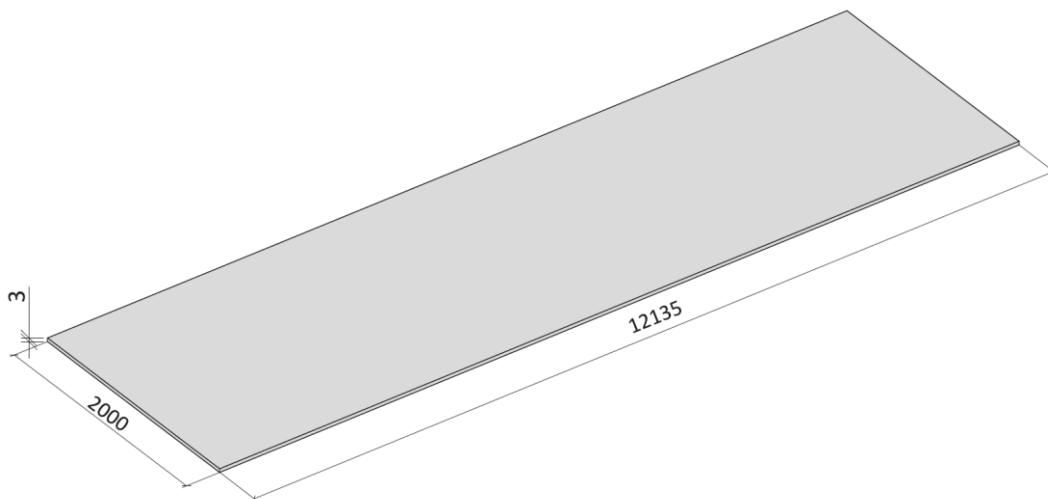


Figura 6.6. Plancha de aluminio del lado secundario

Analizando mediante el modelo FEMM el campo magnético del sistema WPT, incorporando únicamente la caja y la plancha de aluminio diseñadas, se puede observar (Figura 6.7) que el sistema de apantallamiento diseñado es eficaz. Tan solo el área existente entre el chasis del vehículo y el asfalto y parte del suelo se encuentran sometidos a un campo magnético de 27 μT , lo cual cumple con la normativa vigente.

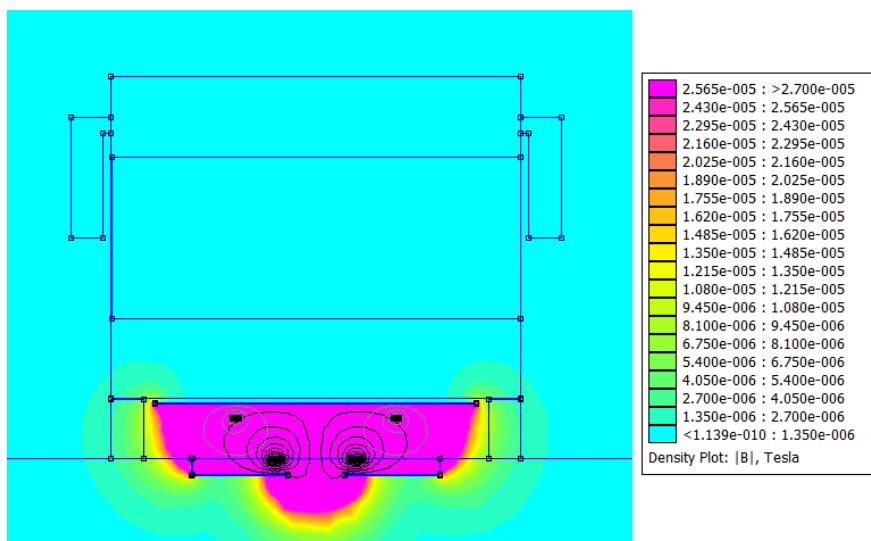


Figura 6.7. Análisis del campo magnético con plancha y caja de aluminio

No obstante, debido a las características propias del aluminio y a la presencia de un campo magnético a su alrededor, se originan unas corrientes parásitas en su interior que generan un campo magnético de igual magnitud pero de sentido contrario en el metal, lo que cancela el campo dentro del conductor. Esto propicia un descenso de la intensidad del campo magnético, que a su vez conlleva una notable disminución de la potencia transferida entre las bobinas. En nuestro caso en concreto, la potencia transferida pasa de los 22 kW diseñados a tan solo 2,6 kW.

Por este motivo, es necesario compensar el descenso del campo magnético con la inclusión de ferritas. Las propiedades inherentes a este material ferromagnético permiten amplificar el campo magnético creado por las bobinas, concentrando el campo disponible dentro del espacio



encerrado por el sistema de apantallamiento y logrando así incrementar la potencia intercambiada entre las bobinas.

Tras estudiar distintos modelos con diferentes geometrías y dimensiones de las ferritas, se ha visto necesario emplear dicho material tanto en el primario como en el secundario para que la potencia transferida alcance su valor teórico de diseño. El modelo FEMM con el sistema de apantallamiento óptimo diseñado, el cual requiere la menor cantidad de ferrita posible, se ha representado en las figuras Figura 6.8 y Figura 6.9.

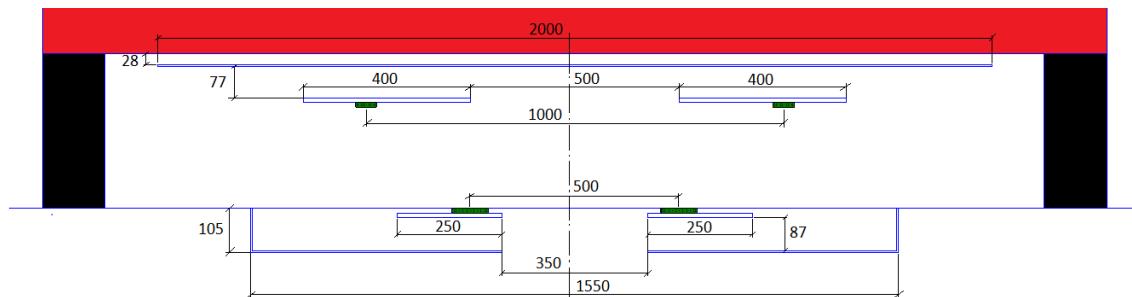


Figura 6.8. Corte transversal del sistema de apantallamiento óptimo en FEMM

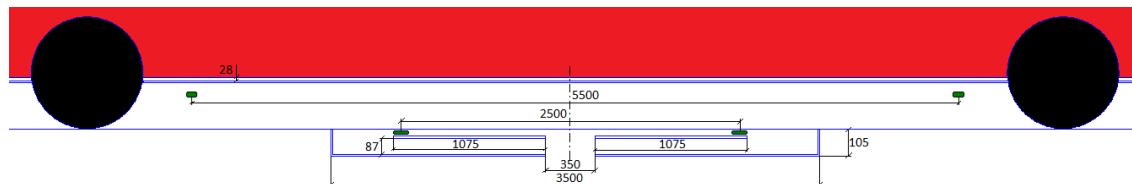


Figura 6.9. Corte longitudinal del sistema de apantallamiento óptimo en FEMM

Así, la ferrita del lado primario se ha diseñado con geometría rectangular, la cual cubre la bobina emisora por completo, sobresaliendo unos centímetros a ambos lados para compensar el campo magnético perdido. Asimismo también se ha diseñado con un agujero central para permitir la instalación del pilar de refuerzo mencionado anteriormente. El diseño de la ferrita de primario se muestra en la Figura 6.10.

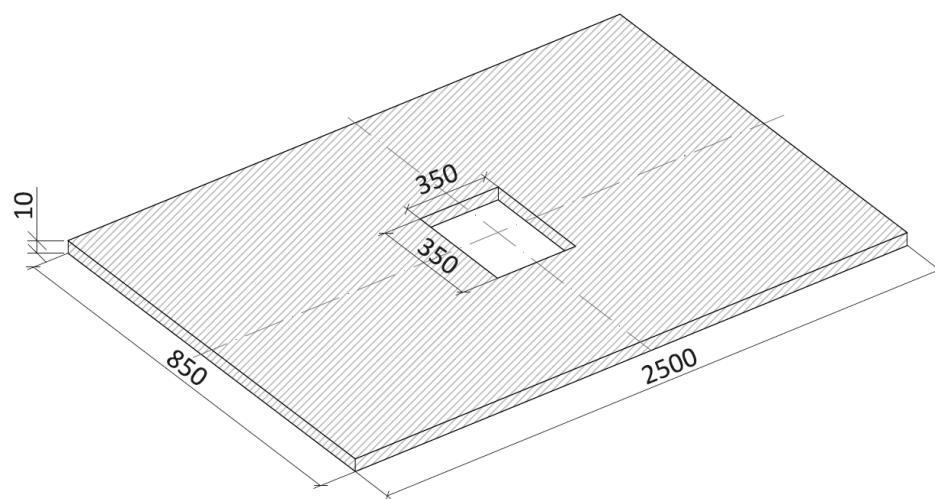


Figura 6.10. Ferrita del lado primario



Por otro lado, la ferrita del lado secundario consta de un par de láminas de 10 mm de espesor que cubren toda la longitud de la bobina receptora. Su diseño se representa en la Figura 6.11.

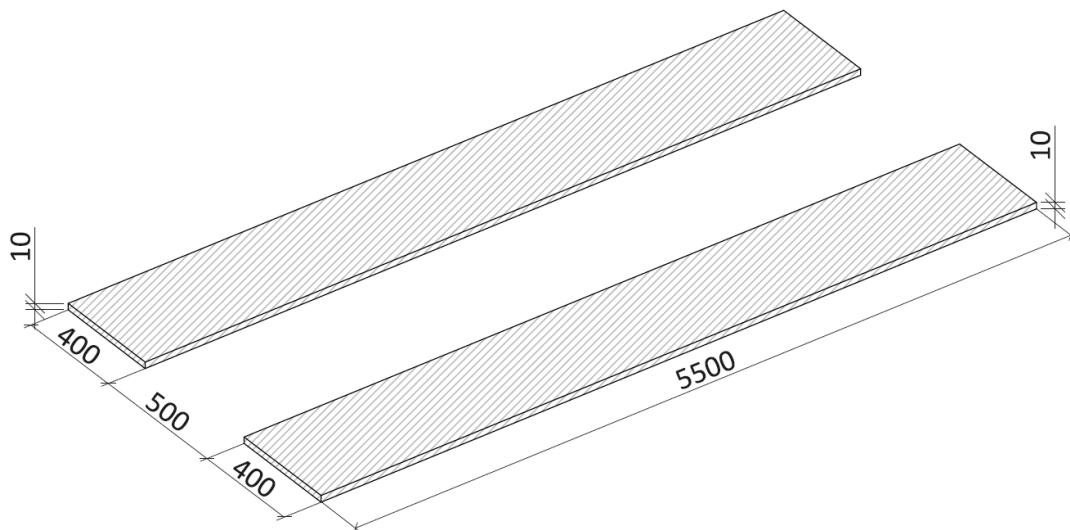


Figura 6.11. Ferrita del lado secundario

Una vez diseñados todos los componentes del sistema de apantallamiento, a continuación se representa la disposición final del apantallamiento de ambos lados, solo con la ferrita (Figura 6.12 y Figura 6.14) y el conjunto completo (Figura 6.13 y Figura 6.15).

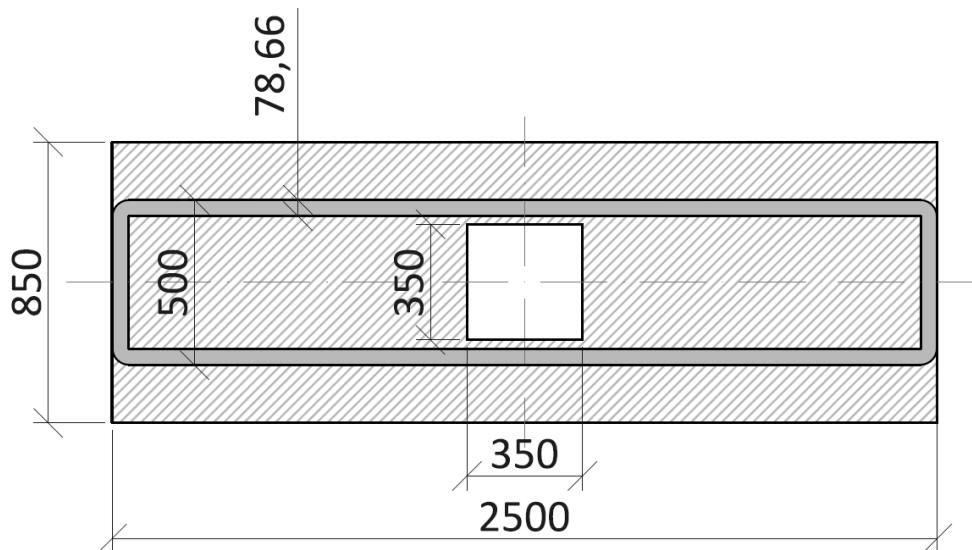


Figura 6.12. Bobina primaria con ferrita

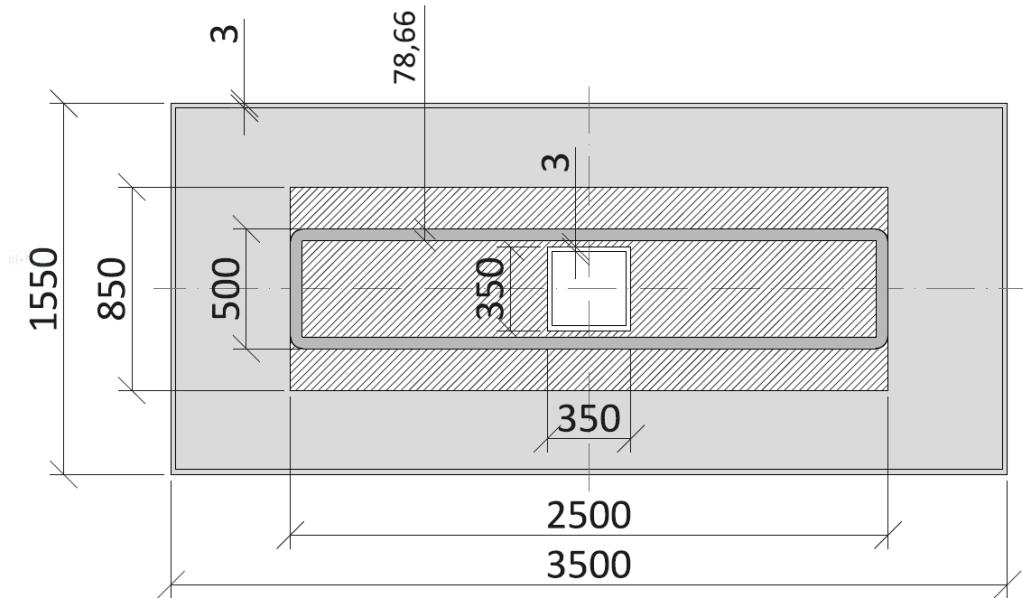


Figura 6.13. Primario completo

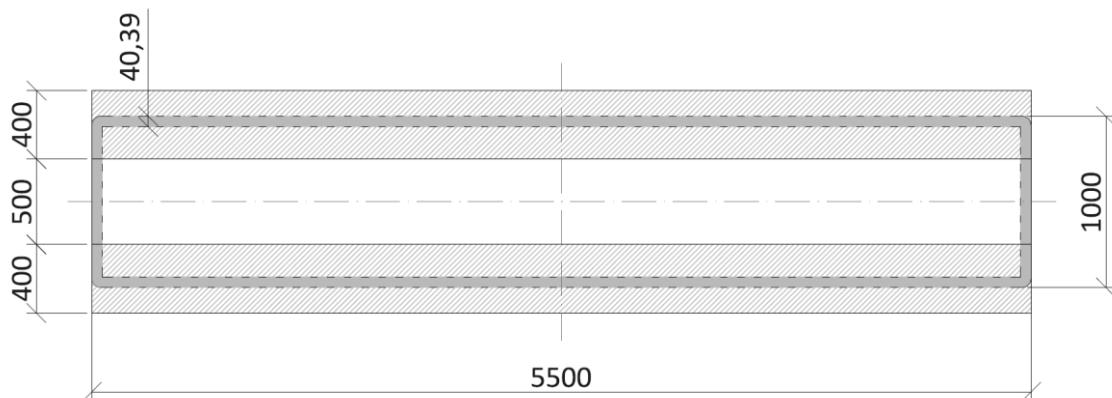


Figura 6.14. Bobina secundaria con ferrita

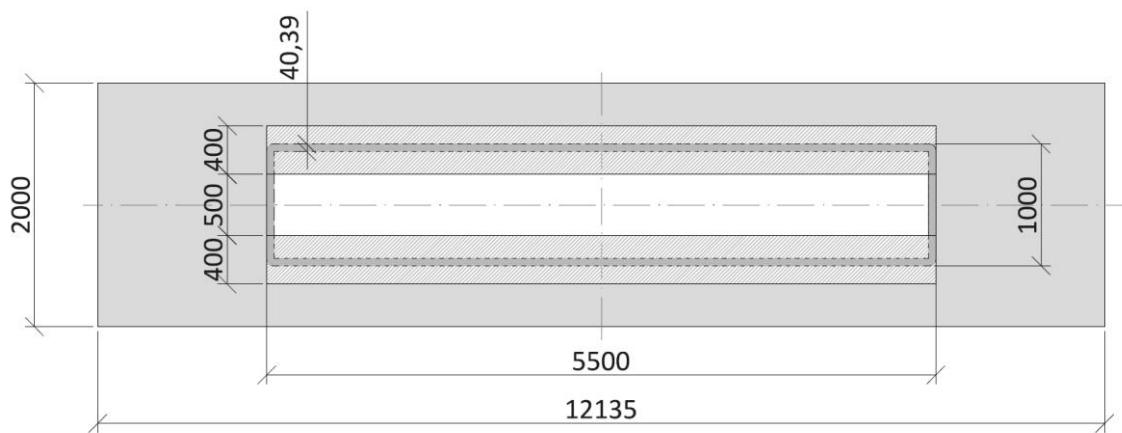


Figura 6.15. Secundario completo



6.4. Análisis del campo magnético con apantallamiento óptimo

Una vez diseñado de manera óptima el sistema de apantallamiento, se ha simulado mediante el modelo FEMM creado la transferencia de potencia entre las bobinas con el apantallamiento incorporado, tal y como se ha reflejado en las figuras Figura 6.16, Figura 6.17 y Figura 6.18. La escala de las tres figuras se corresponde con la que aparece en la Figura 6.16.

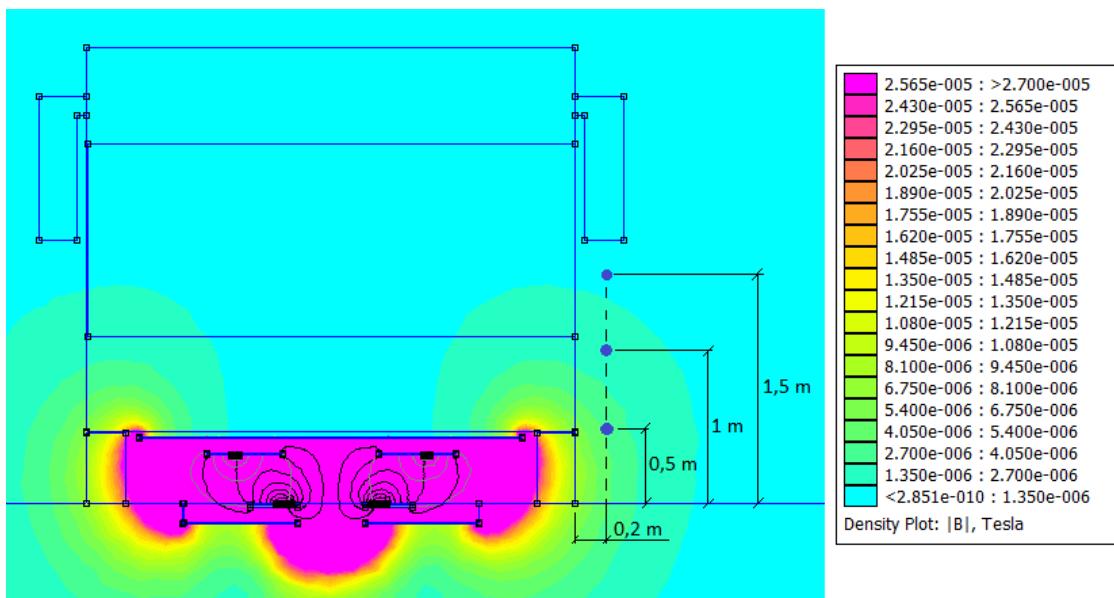


Figura 6.16. Corte transversal del modelo FEMM con apantallamiento óptimo

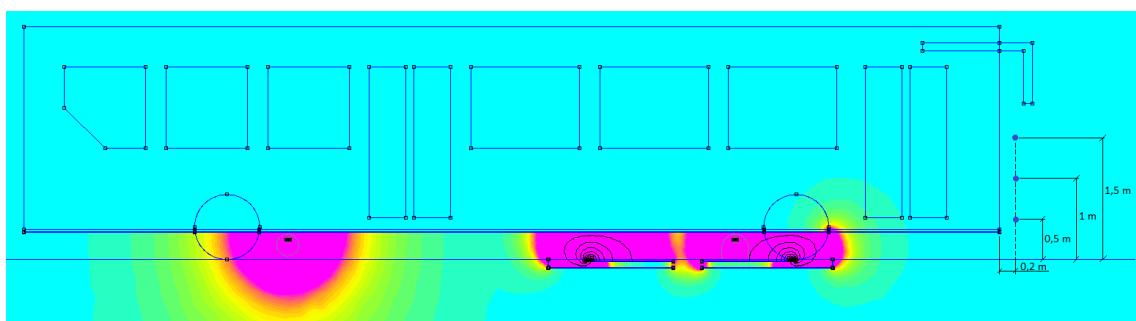


Figura 6.17. Corte transversal del modelo FEMM con apantallamiento óptimo (comienzo transferencia)

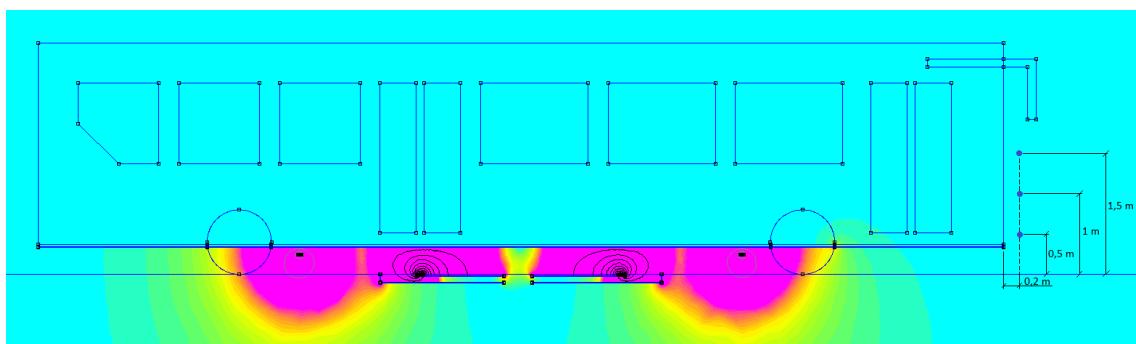


Figura 6.18. Corte longitudinal del modelo FEMM con apantallamiento óptimo (bobinas centradas)



Como se puede observar, tan solo la zona inferior del vehículo y parte del suelo se encuentran sometidos a un campo magnético de 27 μT (área coloreada en rosa). En las figuras anteriores se han representado los puntos de medida establecidos por la normativa ICNIRP 2010. Ninguno de éstos se encuentra bajo el efecto del campo magnético máximo admitido, por lo que el sistema diseñado es viable y cumple con la normativa vigente.

Asimismo, la potencia transferida entre las bobinas con el sistema de apantallamiento óptimo, sumando tanto la potencia intercambiada de manera transversal (22,05 kW) como longitudinal (0,13 kW), alcanza los 22,063 kW.

6.5. Comprobación de saturación

Los materiales ferromagnéticos pueden experimentar un fenómeno conocido como saturación, por el cual el campo magnético se estabiliza en su interior. Es importante no llegar a alcanzar dicha situación, puesto que el núcleo magnético del sistema dejaría de ser eficaz, ya que la permeabilidad magnética cae bruscamente dejando de comportarse como material magnético, frustrando así la transferencia de potencia entre las bobinas emisora y receptora.

Por este motivo, en este apartado se analiza si las ferritas diseñadas alcanzan el estado de saturación. Para ello, se ha seleccionado el modelo comercial Ferroxcube 3C90, cuyas características se pueden consultar en el Anexo IV. La intensidad del campo magnético máximo que esta ferrita admite sin llegar a saturarse es de 0,54 T.

Por medio del modelo FEMM elaborado del sistema WPT, se ha comprobado que las ferritas no alcanzan dicho valor máximo. De hecho, el campo magnético máximo en el interior de la ferrita del lado primario es 0,1 T (punto A), mientras que el de la del lado secundario es 58 mT (punto B), tal y como se ha representado en la Figura 6.19. El punto C de la Figura 6.20 presenta un campo magnético de 0,09 T. Por tanto, se verifica que los núcleos magnéticos diseñados no alcanzan el estado de saturación.

Las figuras Figura 6.19 y Figura 6.20 muestran la evolución del campo magnético en el interior de las ferritas primaria y secundaria, con una escala de valor máximo 0,1 T (regiones coloreadas de rosa). Tan solo se ha representado el lado izquierdo del sistema por la simetría de éste. Se aprecia cómo las regiones más próximas a las bobinas están sometidas a una mayor intensidad de campo magnético, pues éstas son la fuente de dicho campo. A medida que nos alejamos de ellas, su intensidad va disminuyendo.

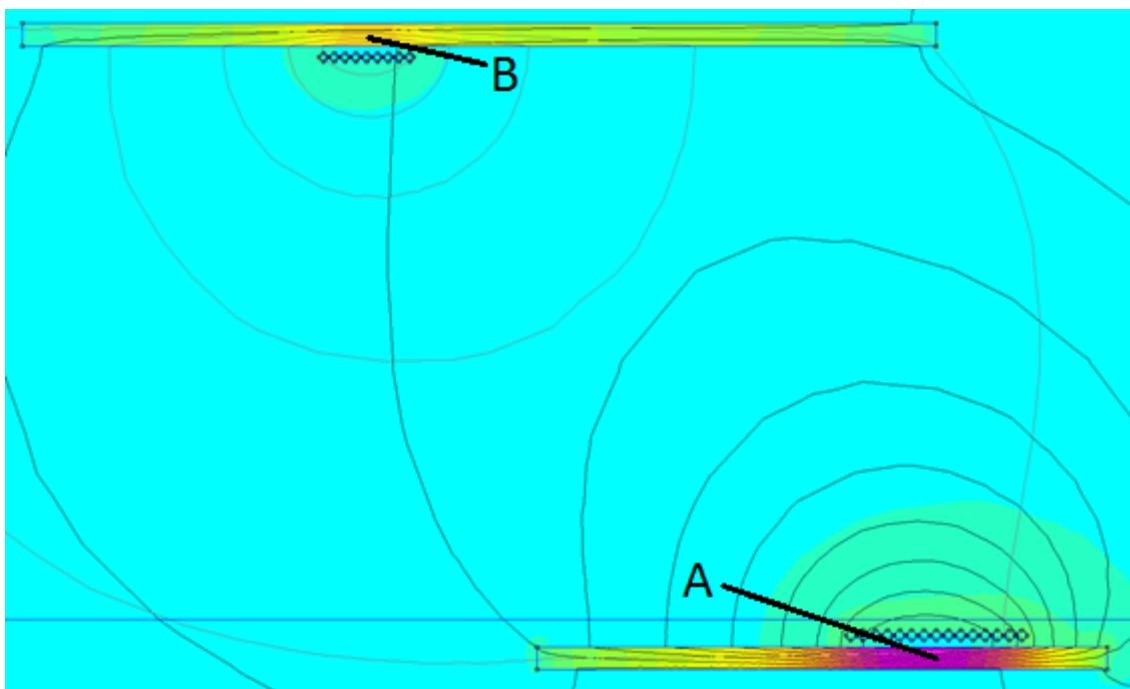


Figura 6.19. Análisis saturación ferritas del primario y secundario (corte transversal)

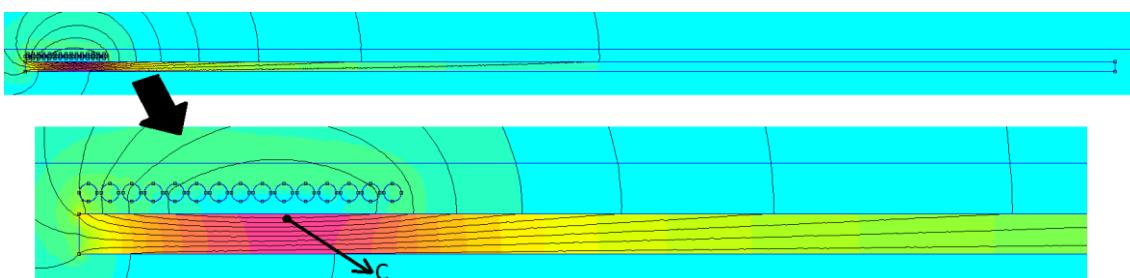


Figura 6.20. Análisis saturación ferrita de primario (corte longitudinal)



7. ESTUDIO ECONÓMICO

El coste de implantación de los sistemas de carga inalámbrica estática y dinámica para la recarga de vehículos eléctricos supone un gran desembolso inicial, motivo por el que esta tecnología no ha terminado aún de comercializarse a nivel mundial.

En este apartado se realiza un estudio económico del coste aproximado de instalación del sistema WPT diseñado para el tramo tipo. El análisis se ha centrado únicamente en los componentes que integran el lado primario del sistema.

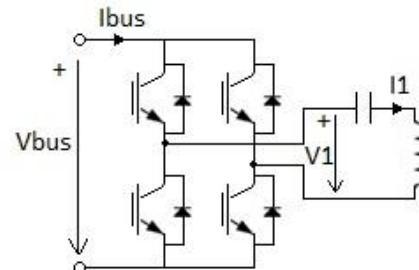
A continuación se recogen los distintos componentes que conforman el lado primario del sistema WPT instalado en el tramo tipo de 300 metros:

- Rectificador AC/DC y convertidor DC/DC buck: se precisa de una unidad de cada uno de ellos, ubicado al principio del tramo.
- Cable bus DC: para conectar la señal de salida del convertidor DC/DC con los 17 cargadores, se necesitan un total de 600 metros de cable para disponer el bus DC a lo largo del tramo.

Para escoger el diámetro del cable adecuado, se ha calculado la corriente que circula por el bus de continua I_{bus} :

$$V_{bus} \cdot I_{bus} = V_1 \cdot I_1$$

$$I_{bus} = \frac{V_1 \cdot I_1}{V_{bus}} = \frac{508,68 \text{ V} \cdot 44,50 \text{ A}}{565 \text{ V}} = 40,06 \text{ A}$$



Donde los valores de V_1 e I_1 son los que figuran en la Tabla 5.6, mientras que el de V_{bus} aparece en la Tabla 5.5.

De acuerdo con el Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, se requiere una densidad de corriente de 2 A/mm^2 . Siendo 40 A la corriente que circula por el bus DC, la sección del cable, atendiendo a los valores normalizados, ha de ser de 25 mm^2 .

- Inversores DC/AC (cargadores): de acuerdo con el diseño del sistema de alimentación, hacen falta 17 inversores DC/AC de 22 kW cada uno para alimentar las bobinas primarias.
- Sistema de compensación: tal y como se ha especificado en el apartado 5.5, son necesarios 8 condensadores de compensación CELEM CSP 305B/600 en serie por cada cargador, lo que hacen un total de 136 condensadores.
- Contactores: se precisa de un contactor modular de 2 polos por cada bobina emisora, 66 en total, para activar y desactivarlas según convenga.
- Hilo de Litz: las espiras de las bobinas emisoras se considera que están hechas a partir de hebras de hilo de Litz. Según las dimensiones de diseño (Figura 5.12), cada una tiene un perímetro de 6 m. Formadas cada una de ellas por 15 espiras, y habiendo 66 bobinas emisoras a lo largo del tramo tipo, hacen un total de 5940 m de hilo de Litz necesarios.
- Ferrita: en el lado primario se han diseñado 66 láminas de ferrita, una por cada bobina emisora. De acuerdo con sus dimensiones, cada lámina posee un volumen de $0,02 \text{ m}^3$, por lo que se necesitan $1,32 \text{ m}^3$ de ferrita. El modelo seleccionado es el Ferroxcube 3C92 de 10 mm de espesor.



- Aluminio: para apantallar el sistema WPT, en el lado primario se han diseñado 66 cajas de aluminio en las que van colocadas la bobina emisora y su ferrita.

El precio estimado de cada uno de estos elementos, el coste de construcción del carril, del montaje de las bobinas y de los equipos electrónicos, facilitados por la Fundación CIRCE y Elektra Aragón, se han reflejado en la Tabla 7.1.

Elemento	Cantidad	Precio unitario	Coste
Rect. AC/DC red + Conv. DC/DC buck (50 kW)	1 ud	15.896,38 €/ud	15.896,38 €
Cable bus DC 25 mm ²	600 m	2.181,50 €/km	1.308,90 €
Inversor DC/AC 22kW	17 uds	5.813,46 €/ud	98.828,82 €
Condensador CELEM CSP 305B/600	136 uds	129,70 €/ud	17.639,20 €
Contactores Schneider A9C20842 40A 2NA	66 uds	42,42 €/ud	2.799,72 €
Hilo de Litz	5940 m	7,58 €/m	45.025,20 €
Ferrita Ferroxcube 3C92 10 mm espesor	1,32 m ³	5000 €/m ³	6.600,00 €
Caja de aluminio	66 uds	345,00 €/ud	22.770,00 €
Montaje equipos electrónicos	18 uds	2.100,00 €/equipo	37.800,00 €
Montaje bobinas primarias	66 uds	1.000,00 €/bobina	66.000,00 €
COSTE TOTAL			314.668,22 €

Tabla 7.1. Desglose del coste de los componentes del tramo tipo (sin I.V.A.)

Del coste total del tramo tipo de 300 m, se deduce que el coste de implantación por unidad de longitud resulta ser 1.048.894,07 €/km, siendo 10.436.496,00 € el desembolso inicial necesario para instalar el sistema WPT diseñado a lo largo de todo el recorrido de 9,95 km de la línea de autobús estudiada.



8. CONCLUSIONES

Las cada vez más exigentes normativas de emisiones en relación con la circulación de vehículos en entornos urbanos hacen que la movilidad eléctrica gane más popularidad. La electrificación de los autobuses urbanos constituye una manera eficiente de alcanzar una sociedad sostenible. No obstante, el elevado peso de las baterías necesarias y la pobre autonomía que ofrecen limita actualmente su expansión. Los sistemas de carga inalámbrica, instalados en el recorrido del autobús, pueden mitigar estos inconvenientes y facilitar su inclusión en las ciudades.

En el presente TFG se ha analizado el dimensionamiento energético de una línea tipo de autobús urbano para su transformación a carga inalámbrica. El sistema diseñado permite una carga continua del autobús, el cual suministra a la batería la energía que el vehículo necesita para cubrir su trayecto. Este hecho minimiza al máximo el peso de baterías necesario, mejorando su rendimiento sustancialmente.

Asimismo, el sistema de apantallamiento diseñado cumple con la normativa vigente de emisiones electromagnéticas y, por tanto, es viable y seguro tanto para los pasajeros del autobús como para los viandantes.

Por otro lado, del análisis económico realizado se concluye que, en estos momentos, el gran desembolso inicial necesario para la puesta en marcha de la solución propuesta hace que ésta sea inviable para su implementación masiva en las ciudades.

Como futuras líneas de desarrollo, sería interesante comparar la solución propuesta con otras soluciones intermedias. Como, por ejemplo, el uso de cargadores de una menor potencia y el consiguiente incremento del peso y energía de las baterías; la instalación de puntos de carga estática solamente en las paradas durante más tiempo; o bien la implementación de puntos de carga estática en determinadas paradas y solo uno o dos carriles de carga dinámica.

Al mismo tiempo, se cree necesario un mayor estudio e investigación a nivel nacional, europeo e internacional de los sistemas de carga inalámbrica aplicados a la carga de vehículos eléctricos para incrementar el grado de madurez de su tecnología. El análisis de nuevas técnicas de alimentación, el desarrollo de nuevos materiales que permitan trabajar a los equipos electrónicos a mayores frecuencias, o la búsqueda de alternativas para abaratar su coste de implantación son algunos aspectos clave que, sin duda, pueden facilitar la expansión y comercialización no solo de estos sistemas, sino también de los vehículos eléctricos.



9. BIBLIOGRAFÍA

- [1] H. H. Wu, M. P. Masquelier. "An overview of a 50 kW inductive charging system for electric buses", *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo*, 2015.
- [2] Proyecto ZeEUS, carga ultrarrápida de autobuses eléctricos por pantógrafo. Enlace: <https://www.endesa.com/es/proyectos/a201610-autobus-electrico-barcelona.html>
- [3] "Proyecto VICTORIA. Carga por Inducción Dinámica", *Endesa*, 2013.
- [4] J. J. Villa. "Sistemas de transferencia de energía para vehículos eléctricos mediante acoplamiento inductivo", Tesis Doctoral. *Universidad de Zaragoza*, 2009.
- [5] M. Hutin, M. Leblanc. "Transformer system for electric railways", *U.S. Patent 527857*, 1894.
- [6] J. G. Bolger, M. I. Green, L. S. Ng, R. I. Wallace. "Tests of the performance and characteristics of a prototype inductive power coupling for electric highway systems", *Lawrence Berkeley Laboratory, University of California, Berkeley*, 1988.
- [7] California PATH Program. "Roadway powered electric vehicle project: Track construction and testing program, phase 3D", *University of California, Berkeley*, 1994.
- [8] S. Lee, C. Park, G. H. Cho, J. Huh, N. S. Choi, C. T. Rim. "On-Line Electric Vehicle using inductive power transfer system", *IEEE Energy Conversion Progress and Exposition*, 2010.
- [9] C. T. Rim. "The development and deployment of On-Line Electric Vehicles (OLEV)", *IEEE Energy Conversion Progress and Exposition*, 2013.
- [10] J. Huh, S. W. Lee, W. Y. Lee, G. H. Cho, C. T. Rim. "Narrow-width inductive power transfer system for on-line electrical vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2011.
- [11] S. Y. Choi, B. W. Gu, S. Y. Jeong, C. T. Rim. "Ultra slim S-type power supply rails for roadway-powered electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015.
- [12] V. X. Thai, S. Y. Choi, E. S. Lee, C. T. Rim. "Coreless power supply rails compatible with both stationary and dynamic charging of electric vehicles", *IEEE International Future Energy Electronics Conference*, 2015.
- [13] J. M. Miller, P. T. Jones, J. M. Li, O. C. Onar. "ORNL Experience and Challenges Facing Dynamic Wireless Power Charging of EV's", *IEEE Circuits and Systems Magazine*, 2015.
- [14] S. Y. Choi, S. Y. Jeong, B. W. Gu, G. C. Lim, C. T. Rim. "Ultraslim S-type power supply rails for roadway-powered electric vehicles", *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2015.
- [15] S. Li, W. Li, J. Deng, T. D. Nguyen, C. C. Mi. "A double-sided LCC compensation network and its tuning method for wireless power transfer", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013.
- [16] K. Song, K. E. Koh, C. Zhu, J. Jiang, C. Wang, Z. Huang. "A review of dynamic wireless power transfer for in-motion electric vehicles", *Wireless Power Transfer - Fundamentals and Technologies, Chapter 6, InTech*, 2016.
- [17] N. Hasan, H. Wang, T. Saha, Z. Pantic. "A novel position sensorless power transfer control of lumped coil-based in-motion wireless power transfer systems", *IEEE Energy Conversion Progress and Exposition*, 2015.



- [18] J. Larminie, J. Lowry. "Electric vehicle technology explained", *John Wiley & Sons, Ltd*, 2003.
- [19] O. E. Piro. "Notas sobre física general. Resistencia a la rodadura".
- [20] S. Wang, J. Chen, Z. Hu, C. Rong, M. Liu. "Optimisation design for series-series dynamic WPT system maintaining stable transfer power", *Institution of Engineering and Technology Power Electronics*, 2017.
- [21] S. A. Sabki, N. M. Tan. "Performance improvement of electric vehicle inductive-power transfer system using series-series capacitor compensation", *IEEE Conference on Energy Conversion*, 2016.



ANEXOS



ANEXO I

Tiempo cronometrado de detención del autobús en cada parada a lo largo del recorrido grabado.

Nº de parada	Ubicación de la parada	Tiempo de detención (s)
1	Estación Miraflores	Comienzo de línea
2	C/ Principado de Morea	5
3	C/ Diego Espés	14
4	C/ María de Aragón	23
5	C/ María de Aragón (C.S. Torre Ramona)	4
6	C/ Salvador Mingujón, 10	24
7	C/ Salvador Mingujón / Amistad	17
8	C/ Salvador Mingujón, 40	7
9	C.S. Las Fuentes Norte	15
10	C/ Marqués de la Cadena (Puente)	8
11	C/ Marqués de la Cadena (C.D.M. La Jota)	5
12	Avda. La Jota, 13	15
13	C/ Felisa Galé, 7	13
14	Avda. de Cataluña (C.M.E. Grande Covián)	12
15	Avda. Alcalde Caballero, 50	0
16	Avda. Alcalde Caballero (Gasolinera)	5
17	Avda. Alcalde Caballero / Cno. de Los Molinos	7
18	Avda. Salvador Allende, 107	16
19	Avda. Salvador Allende, 85	8
20	Avda. Salvador Allende, 67	21
21	C/ Pablo Ruiz Picasso, 2	11
22	C/ Pablo Ruiz Picasso, 8	32
23	C/ Pablo Ruiz Picasso, 34	22
24	C/ María Zambrano, 48	23
25	C/ María Zambrano, 60	12
26	Escuela de Ingeniería y Arquitectura	Final de línea



ANEXO II

Código del programa empleado en MATLAB para realizar el dimensionamiento óptimo del sistema WPT

```
%Datos (unidades SI)
%Tensión de alimentación
Vcc=565;
V1=2*sqrt(2)*Vcc/pi();
%Parámetros geométricos
h=0.25;
%Tamaño de las bobinas
a1=; b1=; a2=; b2=; (Según cada caso)
%Posición relativa entre ellas
c=; e=; (Según cada caso)

%Inicialización de variables
maxN1=60;
maxN2=60;
fmax=25000;
Pdeseada=input('Potencia deseada en la carga (W) = ');
Vdeseada=input('Tensión deseada en la carga (V) = ');
disp('Calculando...');

%Cálculo para las distintas combinaciones de espiras de geometría
rectangular
ya=0;
rendimientodeseado=1;
while ya<1
    for N1=1:maxN1
        for N2=1:maxN2
            seccion1(N1,N2)=1e-6;
            seccion2(N1,N2)=1e-6;
            seccioncorrecta=0;
            while seccioncorrecta<1
                A=[N1 N2];
                cantcobrel(N1,N2)=N1*2*(a1+b1)*seccion1(N1,N2)*1e6*8.96
                /1000;
                cantcobre2(N1,N2)=N2*2*(a2+b2)*seccion2(N1,N2)*1e6*8.96
                /1000;
                cobretotal(N1,N2)=cantcobrel(N1,N2)+cantcobre2(N1,N2);
                %Radios equivalentes de primario y secundario
                r01(N1,N2)=sqrt(N1*seccion1(N1,N2)/pi);
                r02(N1,N2)=sqrt(N2*seccion2(N1,N2)/pi);
                dp1=sqrt(a1^2+b1^2);
                dp2=sqrt(a2^2+b2^2);
                L1(N1,N2)=1*4e7*(N1^2)*(a1*log(2*a1*b1/(r01(N1,N2)*(a1+
                dp1)))+b1*log(2*a1*b1/(r01(N1,N2)*(b1+dp1)))-2*(a1+b1-
                dp1)+0.25*(a1+b1));
                L2(N1,N2)=1*4e7*(N2^2)*(a2*log(2*a2*b2/(r02(N1,N2)*(a2+
                dp2)))+b2*log(2*a2*b2/(r02(N1,N2)*(b2+dp2)))-2*(a2+b2-
                dp2)+0.25*(a2+b2));
                %Inductancia mutua bobinas distintas
                %M tramos horizontales
                M1(N1,N2)=N1*N2*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-
                c)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-
                c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-
                c)+sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e-
                b1)^2+(a1-c)^2))));
```



```
M2 (N1,N2)=N1*N2*1e-7* ((c*log((( -  
c)+sqrt(h^2+e^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e-  
b1)^2)))+((a2+c)*log((( -a2-c)+sqrt(h^2+(e-  
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+e^2))));  
M3 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+e^2+(a1-a2-c)^2)-  
sqrt(h^2+e^2+(a1-c)^2)-  
sqrt(h^2+e^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+e^2+c^2)+sqrt(h^2+(e-  
b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)+sqrt(h^2+(e-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e-  
b1)^2+c^2));  
M11 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((a1-a2-c)*log(((a1-a2-  
c)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-c)^2))/((a1-a2-  
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)))+(a1-c)*log(((a1-  
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2))/((a1-c)+sqrt(h^2+(e+b2-  
b1)^2+(a1-c)^2)));  
M21 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((c*log((( -  
c)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2))/((-c)+sqrt(h^2+c^2+(e+b2-  
b1)^2)))+((a2+c)*log((( -a2-c)+sqrt(h^2+(e+b2-  
b1)^2+(a2+c)^2))/((-a2-  
c)+sqrt(h^2+(a2+c)^2+(b2+e)^2)))));  
M31 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-a2-c)^2)-  
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a1-c)^2)  
sqrt(h^2+(b2+e)^2+(a2+c)^2)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)+sqrt(  
h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a1-a2-  
c)^2)+sqrt(h^2+(e+b2-b1)^2+(a2+c)^2)-sqrt(h^2+(e+b2-  
b1)^2+c^2));  
Mh (N1,N2)=M1 (N1,N2)-M11 (N1,N2)+M2 (N1,N2)-  
M21 (N1,N2)+M3 (N1,N2)-M31 (N1,N2);  
%M tramos verticales  
M4 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-  
e)+sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b1-e)^2)));  
M5 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((e*log((( -  
e)+sqrt(h^2+c^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c-  
a1)^2)))+((b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+c^2)))));  
M6 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+c^2+(b1-b2-e)^2)-  
sqrt(h^2+c^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(h^2+c^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+c^2+e^2)+sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)+sqrt(h^2+(c-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c-  
a1)^2+e^2));  
M41 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((b1-b2-e)*log(((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-e)^2))/((b1-b2-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)))+(b1-e)*log(((b1-  
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2))/((b1-e)+sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b1-e)^2)));  
M51 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*((e*log((( -  
e)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2))/((-e)+sqrt(h^2+e^2+(c+a2-  
a1)^2)))+((b2+e)*log((( -b2-e)+sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+(b2+e)^2))/((-b2-  
e)+sqrt(h^2+(b2+e)^2+(c+a2)^2)))));  
M61 (N1,N2)=N1*N2*1e-7*(sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-b2-e)^2)-  
sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b1-e)^2)-  
sqrt(h^2+(c+a2)^2+(b2+e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2)^2+e^2)+sqrt(  
h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b1-b2-  
e)^2)+sqrt(h^2+(c+a2-a1)^2+(b2+e)^2)-sqrt(h^2+(c+a2-  
a1)^2+e^2));
```



```
Mv(N1,N2)=(M4(N1,N2)-M41(N1,N2)+M5(N1,N2))-  
M51(N1,N2)+M6(N1,N2)-M61(N1,N2));  
%Coeficiente de inducción mutua definitivo  
M(N1,N2)=(Mh(N1,N2)+Mv(N1,N2));  
%Factor de acoplamiento  
k(N1,N2)=M(N1,N2)/(sqrt(L1(N1,N2)*L2(N1,N2)));  
%Resistencias  
R1(N1,N2)=2*(1/57)*N1*2*(b1+a1)/(seccion1(N1,N2)*1e6);  
R2(N1,N2)=2*(1/57)*N2*2*(b2+a2)/(seccion2(N1,N2)*1e6);  
RL(N1,N2)=Vdeseada^2/Pdeseada;  
%Inicialización de variables  
ff(N1,N2)=1;  
Pcarga=100000;  
frecuencia=1000;  
while Pcarga>Pdeseada  
    %Frecuencia de trabajo  
    om0(N1,N2)=(ff(N1,N2)*sqrt(R1(N1,N2)*(R2(N1,N2)+RL(N1,N2))))/M(N1,N2);  
    f0(N1,N2)=om0(N1,N2)/(2*pi);  
    %Condensadores de acople  
    C2(N1,N2)=1/(L2(N1,N2)*(om0(N1,N2)^2));  
    C1(N1,N2)=1/(L1(N1,N2)*(om0(N1,N2)^2));  
    %Impedancias compensadas  
    Z2f(N1,N2)=R2(N1,N2)+1i*(L2(N1,N2)*om0(N1,N2)-  
    1/(C2(N1,N2)*om0(N1,N2)));  
    Z1f(N1,N2)=R1(N1,N2)+1i*(L1(N1,N2)*om0(N1,N2)-  
    1/(C1(N1,N2)*om0(N1,N2)));  
    ZL(N1,N2)=RL(N1,N2);  
    %Cálculo de la potencia en la carga  
    KM(N1,N2)=(om0(N1,N2)*M(N1,N2))^2;  
    %Impedancia total de secundario vista desde el  
    primario  
    Z11(N1,N2)=Z1f(N1,N2)+KM(N1,N2)/(Z2f(N1,N2)+ZL(N1,  
    N2));  
    %Intensidades de primario y secundario  
    I1(N1,N2)=V1/Z11(N1,N2);  
    modI1(N1,N2)=abs(I1(N1,N2));  
    I2(N1,N2)=I1(N1,N2)*om0(N1,N2)*M(N1,N2)/(Z2f(N1,N  
    2)+ZL(N1,N2));  
    modI2(N1,N2)=abs(I2(N1,N2));  
    densiI1(N1,N2)=(modI1(N1,N2)/seccion1(N1,N2))*1e-  
    6;  
    densiI2(N1,N2)=(modI2(N1,N2)/seccion2(N1,N2))*1e-  
    6;  
    %Potencia y tensión en la carga  
    PL(N1,N2)=RL(N1,N2)*(modI2(N1,N2)^2);  
    VL(N1,N2)=I2(N1,N2)*ZL(N1,N2);  
    %Tensión en los condensadores de acople de  
    primario y secundario  
    VC10(N1,N2)=I1(N1,N2)*(1/(C1(N1,N2)*om0(N1,N2)));  
    VC20(N1,N2)=I2(N1,N2)*(1/(C2(N1,N2)*om0(N1,N2)));  
    %Admitancia total de secundario vista desde  
    primario  
    Y11(N1,N2)=1/Z11(N1,N2);  
    %Rendimiento del sistema  
    rend(N1,N2)=PL(N1,N2)/((V1^2)*real(Y11(N1,N2)));  
    Pcarga=PL(N1,N2);  
    frecuencia=f0(N1,N2);  
    %Factor de acoplamiento entre primario y  
    secundario  
    ff(N1,N2)=ff(N1,N2)+0.1;
```



```
factordisenso(N1,N2)=fmax/f0(N1,N2)*(rend(N1,N2)+1
e-3/cobretotal(N1,N2))+VC10(N1,N2)/VC20(N1,N2);
Qp(N1,N2)=L1(N1,N2)*RL(N1,N2)/(om0(N1,N2)*M(N1,N2
)^2);
Qs(N1,N2)=om0(N1,N2)*L2(N1,N2)/RL(N1,N2);
if Qp(N1,N2)>Qs(N1,N2)
    fun(N1,N2)=(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1,N2))
))))*(1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2))))) ;
    relQ(N1,N2)=1;
else
    fun(N1,N2)=0*(1/(1+abs((log(Qp(N1,N2)/Qs(N1,N2)
)))))*(1/(1+abs(log(fmax/f0(N1,N2))))) ;
    relQ(N1,N2)=0;
end
if densiI1(N1,N2)>3
    seccion1(N1,N2)=seccion1(N1,N2)+1e-6;
end
if densiI2(N1,N2)>3
    seccion2(N1,N2)=seccion2(N1,N2)+1e-6;
end
if densiI1(N1,N2)<=3 & densiI2(N1,N2)<=3
    seccioncorrecta=1;
end
end
end
rendmax, pos1]=max(rend);
[maxrend, pos2]=max(rendmax);
[minVC1, pos3]=min(VC10);
[VC1min, pos4]=min(minVC1);
[minVC2, pos5]=min(VC20);
rendimientoencontrado=0;
while rendimientoencontrado<1
    for i1=1:maxN1
        for i2=1:maxN2
            if f0(i1,i2)<=fmax & PL(i1,i2)>=0.99*Pdeseada &
                PL(i1,i2)<1.01*Pdeseada & densiI1(i1,i2)>2.8 &
                densiI1(i1,i2)<=3.2 & densiI2(i1,i2)>2.8 &
                densiI2(i1,i2)<=3.2 & rend(i1,i2)>=rendimientodeseado
                & ya==0 & Qp(i1,i2)>(4*Qs(i1,i2)^3/(4*Qs(i1,i2)^2-1))
                disp('La solución óptima es la siguiente:')
                opt=[i1 i2];
                %Número de espiras
                disp('Número de espiras, N1 y N2')
                disp(opt)
                %Frecuencia de trabajo
                disp('Frecuencia de trabajo (Hz)')
                disp(f0(i1,i2))
                %Tensión en el condensador primario, VC10
                disp('Tensión condensador primario, VC10 (V)')
                disp(VC10(i1,i2))
                %Tensión en el condensador secundario, VC20
                disp('Tenación condensador secundario, VC20
(V)')
                disp(VC20(i1,i2))
                %Potencia transferida a la carga, PL
                disp('Potencia entregada a la carga, PL (W)')
                disp(PL(i1,i2))
                %Rendimiento transferencia
                disp('Rendimiento de la transferencia, rend')
```



```
    disp(rend(i1,i2))
    %Densidad energética bobina 1
    densidadI1=(I1(i1,i2)/seccion1(i1,i2))*1e-6;
    disp('densidadI1')
    disp(densidadI1)
    %Densidad energética bobina 2
    densidadI2=(I2(i1,i2)/seccion2(i1,i2))*1e-6;
    disp('densidadI2')
    disp(densidadI2)
    %ff (?)
    disp('ff')
    disp(ff(i1,i2))
    %Sección bobina 1
    s1=seccion1(i1,i2);
    disp('Sección bobina 1, S1 (m^2)')
    disp(s1)
    %Sección bobina 2
    s2=seccion2(i1,i2);
    disp('Sección bobina 2, S2 (m^2)')
    disp(s2)
    ya=1;
    rendimientoencontrado=1;
    %Factor de diseño
    disp('Factor de diseño')
    disp(factoradisenio(i1,i2))
    disp('Cálculo terminado.')
end
end
end
if rendimientoencontrado<1
    rendimientodeseado=rendimientodeseado-0.01;
end
end
end
```



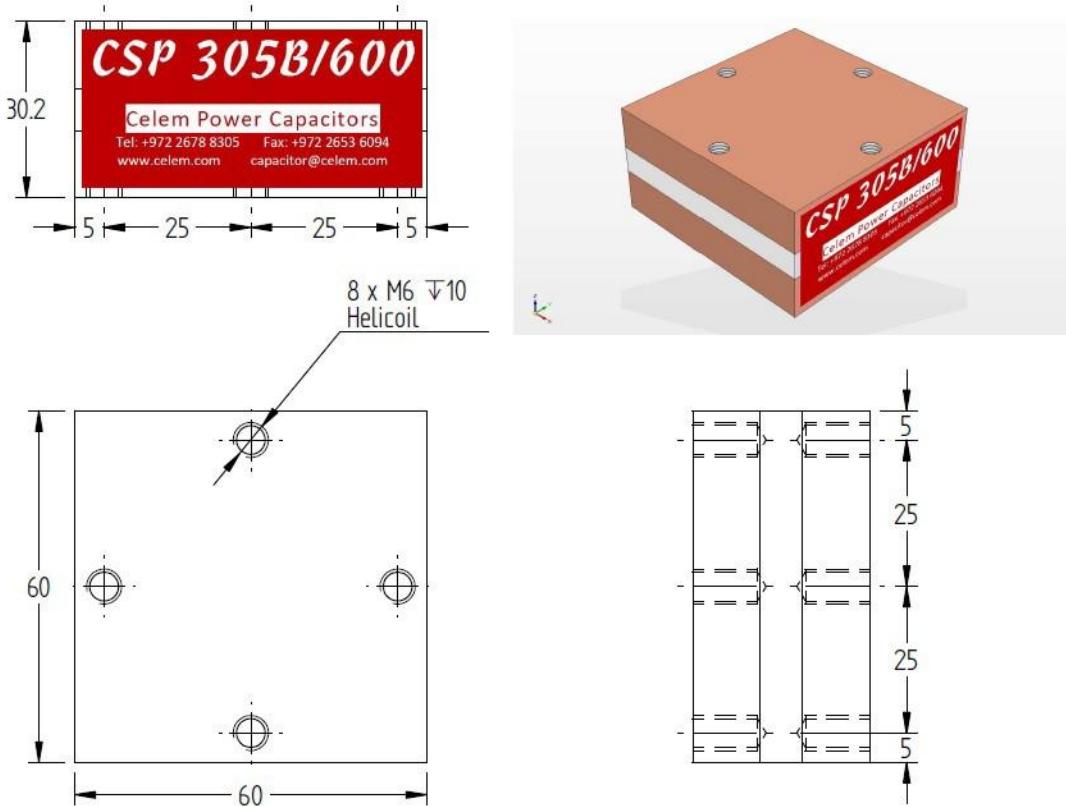
ANEXO III

Hoja de características del condensador CELEM CSP305B/600.

CSP305B/600

Technology Patented Worldwide

Conduction-cooled capacitor



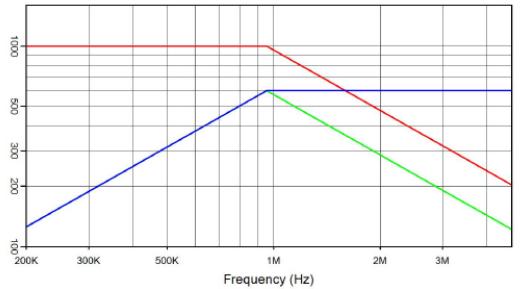
The CSP 305B/600 offers superior electrical characteristics in the same physical dimensions as the CSP 305B and the CSP 405B.

Type	CSP305B/6									
Dimensions (L x W x H)	mm	60 x 60 x 30.2								
Weight	kg	0.5								
Capacitance ($\pm 10\%$)	μF	0.1 μF	0.2 μF	0.33 μF	0.66 μF	1 μF	1.33 μF	2.6 μF	5 μF	
Sinusoidal Voltage	V _{rms}	10				800		700	600	500
Peak Voltage	V	14				1130		990	850	710
Max. Current	Arms	60				750	900	950	1050	1200
Max. Power	kVAr	600								
Freq Range @ Full Power	kHz	955-955	478-478	290-290	226-226	149-215	147-180	102-113	76-76	
Stray Inductance	nH	< 3								

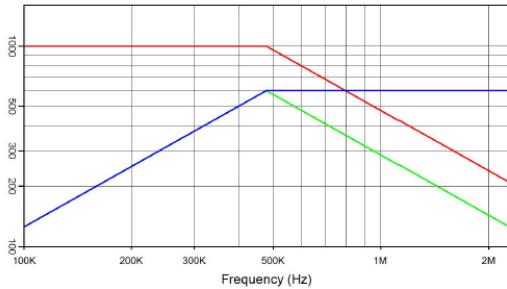


CSP305B/600

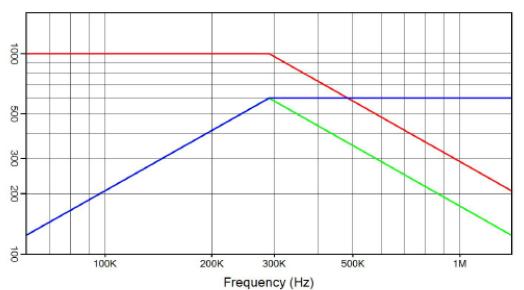
Conduction-cooled capacitor



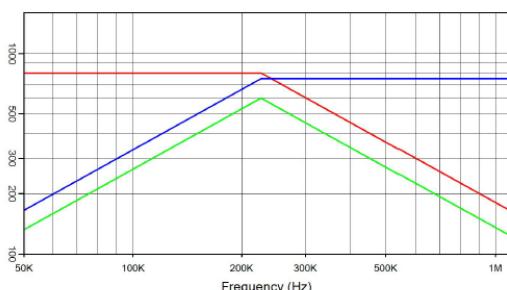
CSP305B/600 0.1 μF 1000 V_{rms} 600 A_{rms} 600 kVA_r



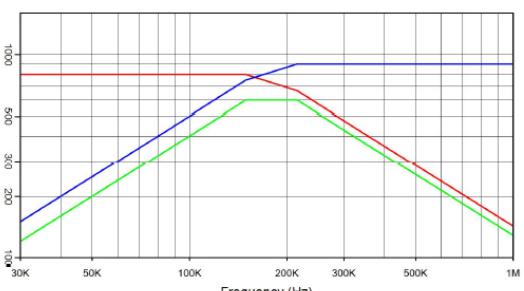
CSP305B/600 0.2 μF 1000 V_{rms} 600 A_{rms} 600 kVA_r



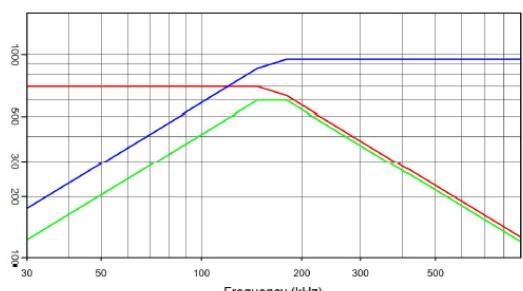
CSP305B/600 0.33 μF 1000 V_{rms} 600 A_{rms} 600 kVA_r



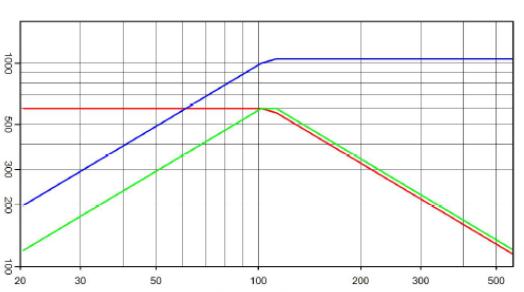
CSP305B/600 0.66 μF 800 V_{rms} 750 A_{rms} 600 kVA_r



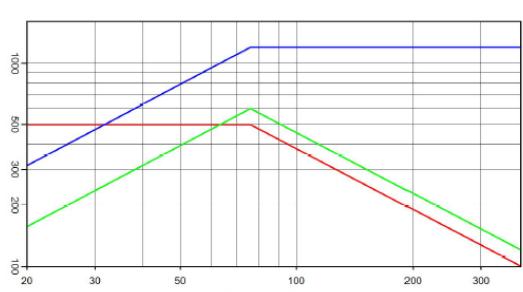
CSP305B/600 1 μF 800 V_{rms} 900 A_{rms} 600 kVA_r



CSP305B/600 1.33 μF 700 V_{rms} 950 A_{rms} 600 kVA_r



CSP305B/600 2.6 μF 600 V_{rms} 1050 A_{rms} 600 kVA_r



CSP305B/600 5 μF 500 V_{rms} 1200 A_{rms} 600 kVA_r



ANEXO IV

Hoja de características de la ferrita Ferroxcube 3C92.

Ferroxcube

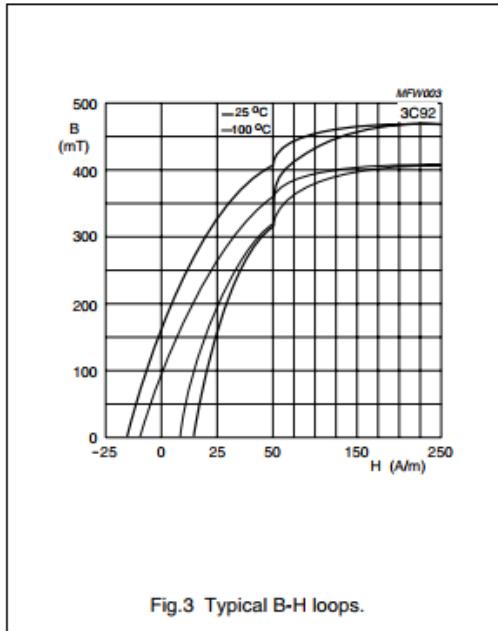
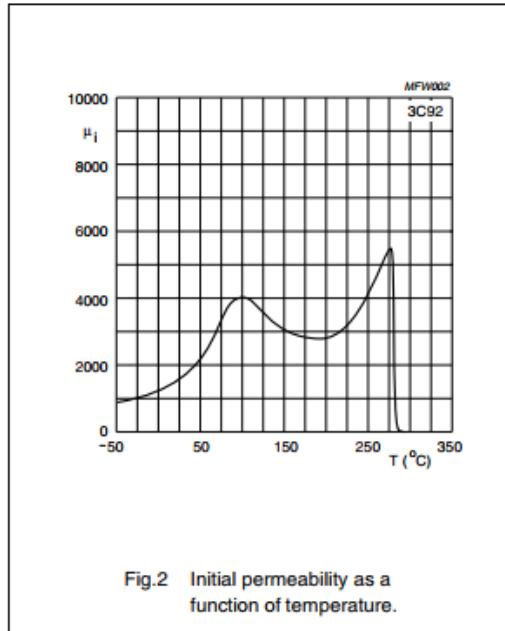
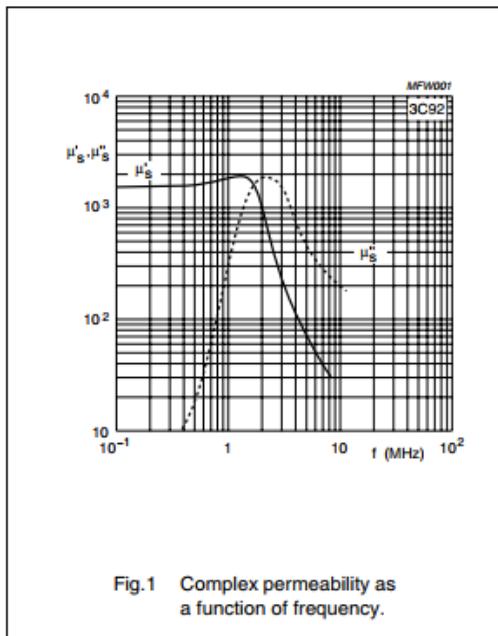
Material specification

3C92

3C92 SPECIFICATIONS

A low frequency, high B_{sat} power material for use in power inductors at frequencies up to 0.2 MHz.

SYMBOL	CONDITIONS	VALUE	UNIT
μ_i	25 °C; ≤ 10 kHz; 0.25 mT	1500 ±20%	
μ_a	100 °C; 25 kHz; 200 mT	≈ 5000	
B	25 °C; 10 kHz; 1200 A/m 100 °C; 10 kHz; 1200 A/m 140 °C; 10 kHz; 1200 A/m	≈ 540 ≈ 460 ≈ 400	mT
P_v	100 °C; 100 kHz; 100 mT 100 °C; 100 kHz; 200 mT	≈ 50 ≈ 350	kW/m³
ρ	DC; 25 °C	≈ 5	Ωm
T_c		≥ 280	°C
density		≈ 4800	kg/m³





Material specification

3C92

