

Estudio de viabilidad de la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi.

Fermín Trujillo Valverde

Máster Universitario en
Ingeniería de
Telecomunicación
Área de Electrónica

Tutor/a de TF

Xavier Saura Mas

**Profesor/a responsable de
la asignatura**

Carlos Monzo Sánchez

06/2023

Universitat Oberta
de Catalunya



Esta obra está sujeta a una licencia de Reconocimiento-
NoComercial-SinObraDerivada [3.0 España de Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/)

Ficha del Trabajo Final

Título del trabajo:	Estudio de viabilidad de la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi.
Nombre del autor/a:	Fermín Trujillo Valverde
Nombre del Tutor/a de TF:	Xavier Saura Mas
Nombre del/de la PRA:	Carlos Monzo Sánchez
Fecha de entrega:	06/2023
Titulación o programa:	Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación
Área del Trabajo Final:	Electrónica
Idioma del trabajo:	Castellano
Palabras clave	DWPT, Vehículo eléctrico, Carga Inalámbrica, Infraestructura.
Resumen del Trabajo	
<p>Dentro del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima se establecen unas medidas para la reducción de un 23% de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) respecto a 1990 para 2030 [1].</p> <p>Para alcanzar el objetivo marcado es fundamental avanzar hacia un paradigma de movilidad sostenible, potenciando el uso del vehículo eléctrico tanto de forma particular como pública y fomentando la penetración en el mercado y el uso del mismo.</p> <p>Aunque la venta de estos vehículos ha ido en aumentando en los últimos tiempos, hay inconvenientes que frenan la implantación definitiva en el mercado, como son el alto coste de la tecnología, el tiempo requerido para la recarga, volumen y peso de las baterías o la autonomía limitada.</p> <p>Algunas de estas desventajas pueden paliarse con el uso de tecnología DWPT (Dynamic Wireless Power Transfer) mediante la cual el vehículo va tomando energía eléctrica de la red mientras está circulando sin necesidad de utilizar la energía almacenada o incluso ir aumentando la disponible.</p> <p>El presente trabajo pretende estudiar la tecnología DWPT aplicada a la carga del vehículo eléctrico, presentar un sistema de transferencia de 30 kW y analizar la viabilidad de implantación del mismo en un carril bus-taxi.</p>	

Abstract

Within the National Integrated Energy and Climate Plan, measures are established to reduce greenhouse gases (GHG) emissions by 23% compared to 1990 by 2030 [1].

To achieve the objective set, it is essential to move towards a paradigm of sustainable mobility, promoting the use of electric vehicles both privately and publicly and promoting market penetration and its use.

Although, the sale of these vehicles has been increasing in recent times, there are drawbacks that slow down the definitive consolidation in the market, such as the high cost of the technology, the time required for recharging, the volume and weight of the batteries or the limited autonomy.

Some of these disadvantages can be alleviated with the use of DWPT (Dynamic Wireless Power Transfer) technology through which the vehicle draws electrical energy from the network while it is driving without the need to use hidden energy or even increase the available one.

This paper aims to study the DWPT technology applied to electric vehicle charging, present a 30 kW transfer system and analyze the feasibility of installing it in a bus-taxi lane.

Agradecimientos

En primer lugar, quería dar las gracias a mi tutor Xavier, guía y faro de este proyecto, sus conocimientos, profesionalidad y apoyo me ha ayudado a mejorar cada día y han hecho más sencillo el trabajo. Una suerte haber contado con él.

A la familia, amigos y amigos que son familia que han estado ahí de una forma u otra.

A mi mujer, Patricia. Mi media mitad y la que se ha encargado de llevar el timón de la familia durante las horas que he dedicado a estudiar, por pensar siempre en mí, por ayudarme a crecer y sobre todo por creer siempre en mí.

Y por último a mis hijas, Inés y Marta. Una de las razones que me hizo retomar los estudios después de 15 años fue intentar inculcar con el ejemplo la importancia de ser constante, trabajar a diario y seguir formándose. Durante estos años han sido ellas quien me han dado el ejemplo a mí, ejemplo de paciencia, de comprensión, de esperar para pasar tiempo juntos, de no preguntar... gracias infinitas por estar siempre ahí.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Contexto y justificación del Trabajo	1
1.2. Objetivos del Trabajo	3
1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad	3
1.4. Motivación	6
1.5. Enfoque y método seguido	7
1.6. Planificación del trabajo	8
1.7. Breve resumen de productos obtenidos	10
1.8. Breve descripción de otros capítulos de la memoria	10
2. Estado del Arte	12
2.1. El vehículo eléctrico	12
2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos	13
2.1.2. Partes del vehículo eléctrico	15
2.2. Sistemas de carga para vehículo eléctrico	16
2.2.1. Sistemas de carga conductiva	16
2.2.2. Sistemas de carga inductiva	19
2.2.2.1. Descripción general de un sistema inalámbrico de transferencia de potencia WPT	21
2.2.2.2. Sistemas IPT aplicado al vehículo eléctrico	23
2.2.3. Normativa y estándares WPT	24
2.3. Estado de la tecnología DWPT	27
2.3.1. Proyectos finalizados	28
2.3.2. Proyectos actualmente en curso	30
2.3.3. Otros desarrollos asociados a carga inalámbrica	34
2.3.4. Conclusiones tras análisis de desarrollos	37
3. Dimensionamiento general del Sistema DWPT	38
3.1. Análisis de componentes del sistema DWPT	38
3.1.1. El modelo de transformador clásico	39
3.1.1.1. Acoplamiento del modelo de transformador	39
3.1.1.2. Selección de la frecuencia de trabajo	41
3.1.2. Almohadillas inductivas	43
3.1.2.1. Geometría de las bobinas en sistemas de flujo vertical	45
3.1.3. Circuito de compensación	48
3.1.3.1. Topologías de compensación básicas	53
3.1.3.2. Estabilidad del sistema	58

3.1.4.	Convertidores Electrónicos	60
3.1.4.1.	Conversión en el lado de transmisión	60
3.1.5.	Sistemas de control	63
4.	Diseño del sistema DWPT 30 kW64	
4.1.	Diseño del módulo de transmisión y compensación	64
4.1.1.	Cálculo de bobinas y sistema compensación con topología SS	64
4.1.2.	Estabilidad del sistema	70
4.1.3.	Variación de la potencia en función a la desalineación de bobinas	71
4.2.	Etapas de conversión AC-DC/DC-AC	73
4.2.1.	Conversión AC-DC	73
4.2.2.	Conversión DC-AC	74
5.	Implantación del Sistema DWPT diseñado79	
5.1.	Selección de carril bus-taxi	79
5.2.	Dimensionamiento general del sistema	80
5.3.	Planteamiento general de la instalación eléctrica	82
5.3.1.	Equipamiento necesario del sistema	85
5.3.1.1.	Centro de transformación	85
5.3.1.2.	Conjunto de celdas de media tensión	87
5.3.1.3.	Transformadores	92
5.3.1.4.	Cuadros de distribución de baja tensión	93
5.3.1.5.	Convertidor AC-DC	94
5.3.1.6.	Equipo rectificador	96
5.3.1.7.	Almohadilla inductora	97
5.3.2.	Diseño eléctrico en baja tensión	98
5.3.2.1.	Dimensionamiento de tramos de CA. Cálculos comunes	98
5.3.2.2.	Dimensionamiento de tramos de 420 m de corriente alterna	100
5.3.2.3.	Dimensionamiento de tramos de 200 m de corriente continua	103
5.3.2.4.	Dimensionamiento de cableado entre inversor y bobina	104
5.3.2.5.	Dimensionamiento de canalizaciones mediante entubado	104
5.3.3.	Obra civil Asociada	106
5.3.3.1.	Emplazamiento del Centro de transformación	107
5.3.3.2.	Diseño general de la zanja para ubicación de elementos bajo calzada	108
5.3.3.3.	Número de tubos de canalización por tramo	115
6.	Presupuesto	118
7.	Estudio económico y de impacto medioambiental	125
7.1.	Estimación de la densidad de tráfico	125

7.1.1.	Estimación gasto/ahorro debido al tránsito de autobuses de combustión si se implanta el sistema DWPT	125
7.1.2.	Estimación del beneficio obtenido si se ofrece el servicio a taxis eléctricos	127
7.2.	Estimación del gasto	128
7.3.	Cálculo del TIR	129
7.4.	Evaluación de beneficios medioambientales	131
8.	Conclusiones y líneas futuras	133
8.1.	Conclusiones	133
8.2.	Líneas futuras	134
9.	Glosario	136
10.	Bibliografía	137
11.	Anexos.	147

Lista de Figuras

Figura 1: Evolución del parque de vehículos eléctricos de España 07/02/2023 .	1
Figura 2: Esquema general de diseño.	2
Figura 3: Desplazamientos encadenados frente a simples.	4
Figura 4: Evolución de emisiones de CO2 por modo de transporte y tipo tráfico.	6
Figura 5: Nuevas matriculaciones de vehículos eléctricos 07/02/2023.	13
Figura 6: Principales arquitecturas de vehículo eléctrico.	15
Figura 7: Elementos de un VE.	15
Figura 8: Modos de carga para VE según la norma UNE-EN 61851-1:2012.	18
Figura 9: Tipos de conectores para carga conductiva de VE.	19
Figura 10: Bloque de carga inalámbrica estacionaria WiTricity Halo.	20
Figura 11: Representación de carril de carga dinámica.	20
Figura 12: Punto de recarga cuasi dinámico en parada de autobús.	21
Figura 13: Representación esquemática de un sistema de transferencia inductiva.	22
Figura 14: Esquema típico de sistema IPT.	22
Figura 15: Esquema típico de sistema CPT.	23
Figura 16: Esquema general de carga inductiva aplicada a VE.	23
Figura 17: Estándares más relevantes.	25
Figura 18: Representación planos de desalineación entre emisor y receptor.	26
Figura 19: Regiones definidas en vehículo con limitación de exposición a EMF.	27
Figura 20: Representación de soluciones para disminuir las emisiones del proyecto Cenex.	28
Figura 21: Tranvía eléctrico ruta Seúl-Grand Park.	29
Figura 22: Autobús eléctrico en Mannheim.	29
Figura 23: Renault Kangoo en pista de prueba de Versailles.	30
Figura 24: Camión eléctrico proyecto Smartroad Gotland.	30
Figura 25: Autobús con tecnología Electreon en Tel Aviv.	31
Figura 26: Casos de uso proyecto Incit-EV.	32
Figura 27: Instalación de bobinas en circuito Arena del Futuro.	34
Figura 28: Vista aérea circuito Arena del Futuro.	34
Figura 29: Hormigón magnetizable.	35
Figura 30: Molde para fabricación de piezas de Magment.	36
Figura 31: Prueba realizada con inductor trifásico de Magment.	36
Figura 32: Bobina circular y bobina doble "D" de Magment.	37
Figura 33: Arquitectura general de un sistema DWPT.	38
Figura 34: Esquema general del modelo de transformador.	40
Figura 35: Diseño de bobina emisora y receptora propuesto por SAE J2954.	43
Figura 36: Topologías de sistemas en función a la captura de flujo.	44
Figura 37: Esquema general sistema de captura de flujo tangencia.	45
Figura 38: Sistema de captura de flujo normal.	45
Figura 39: Disposiciones geométricas de bobinas.	46
Figura 40: Dimensiones de bobinas rectangulares.	48

Figura 41: Configuraciones clásicas de sistema de compensación.....	49
Figura 42: Configuraciones híbridas (a)LCC-LCC, (b) CCL-LC, (c) LC-LC, (d) LCL-LCCL, (e) LCL-LCL, (f) LCC-S, (g) P-PS, (h) S-SP, (j) S-LCL, (k) CCL-S y (l) S-CLC.	50
Figura 43: Diagrama de bode de un sistema resonante RLC.....	53
Figura 44: Representación de formas de onda de un sistema DWPT resonante.	54
Figura 45: Representación de formas de onda de un sistema DWPT resonante.....	54
Figura 46: Relación entre factores de calidad en sistemas DWPT estables.....	59
Figura 47: Arquitectura general de un sistema de transmisión WPT con conversión de doble etapa.....	60
Figura 48: (a) Inversor monofásico con una bobina, (b) Inversor monofásico que alimenta varias bobinas en serie, (c) Inversor monofásico que alimenta varias bobinas en paralelo y (d) Inversor multifásico.	61
Figura 49: Diferentes topologías de conexión con fuente de alimentación controlada por tensión en el lado del transmisor.....	62
Figura 50: Dimensiones y posición relativa entre bobina emisora y receptora.	65
Figura 51: Representación del circuito diseñado mediante LTSpice.	68
Figura 52: Valores de tensión e intensidad en la resistencia de carga.	68
Figura 53: Valores de tensión e intensidad en la resistencia de carga	69
Figura 54: Detalle de comportamiento de honda de la señal de potencia entregada a la resistencia de carga.....	69
Figura 55: Comparativa de la potencia entregada por el inversor (señal de color rojo) y la entregada a la carga (señal de color verde)	70
Figura 56: Representación del vehículo frente a los ejes de desalineación.....	71
Figura 57: Variación del rendimiento de un sistema SS frente a desacoplos en ejes “X” e “Y”.....	72
Figura 58: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje de desplazamiento del vehículo “Y”.	72
Figura 59: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje perpendicular al desplazamiento del vehículo “X”.	73
Figura 60: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje perpendicular al desplazamiento del vehículo “X”.	74
Figura 61: Esquema de diseño de equipo inversor utilizando software Simetrix.	75
Figura 62: Tensión de salida del inversor.....	76
Figura 63: Intensidad de salida del inversor.....	77
Figura 64: Detalle de la potencia ofrecida por el inversor.....	78
Figura 65: Ubicación del carril bus-taxi elegido para la implantación del sistema [61].	80
Figura 66: Imagen satélite del carril bus-taxi completo.....	80
Figura 67: Esquema general a nivel de baja tensión del montaje eléctrico propuesto.	84
Figura 68: Representación general de un centro PFU-5	86
Figura 69: Esquema dimensional centro de transformación PFU-5 de Ormazabal.....	87
Figura 70: Esquema del conjunto de celdas de media tensión.....	88
Figura 71: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-I.	88
Figura 72: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-M.	90
Figura 73: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-p.	91

Figura 74: Fusibles HRC para protección de transformador.....	92
Figura 75: Representación de un transformador de 1000 kVA.	93
Figura 76: Fotografía del cuadro CBTO AS5 1600 5 BTVC 400 ID-ST y esquema.	94
Figura 77: Convertidores de corriente continua familia DCS880.	95
Figura 78: Fotografía del módulo BSM180D12P2C101.	96
Figura 79: Dimensiones del módulo BSM180D12P2C101.	96
Figura 80: Dimensiones de caja estanca presentada en para albergar los inversores	97
Figura 81: Prototipo de bobina inductora presentada en.	97
Figura 82: Ubicación del edificio prefabricado sobre planta.	107
Figura 83: Representación del carril “derecho” e “izquierdo” sobre plano.	108
Figura 84: Emplazamiento del primer tramo de zanja y convertidores junto al CT....	109
Figura 85: Estratificación de la zanja con elementos instalados.....	110
Figura 86: Primeras etapas de la fase constructiva. Lecho de arena y colocación de entubado.....	111
Figura 87: Prototipo de arqueta de alojamiento de inversor para diseño	112
Figura 88: Detalle de bancada para apoyar la arqueta.....	112
Figura 89: Montaje completo de bancada sobre base.....	113
Figura 90: Fotografía de arqueta registrable usada como referencia.	113
Figura 91: Dimensiones de la arqueta registrable.	114
Figura 92: Relleno de arena en zanja y capa de hormigón con bobinas incrustadas.	114
Figura 93: Finalización de cierre de zanja con capas asfálticas echadas.....	115
Figura 94: Esquema general de canalizaciones para entubado de cable.....	116
Figura 95: Precio kW ofertado por EMT en sus puntos de recarga.	126
Figura 96: Evolución anual del TIR en diferentes escenarios de uso del carril.	130

Lista de Tablas

Tabla 1: Hitos y procesos definidos para desarrollo de TFM.	9
Tabla 2: Clasificación sistemas WPT.....	22
Tabla 3: Clases de sistemas WPT según SAE J2954.	25
Tabla 4: Desalineación máxima entre emisor y receptor definidos en SAE J2954.....	26
Tabla 5: Clasificación sistemas WPT según separación emisor y receptor.....	26
Tabla 6: Coeficiente de autoinducción para diferentes geometrías.....	46
Tabla 7: Resistencia de los bobinados según su geometría.	47
Tabla 8: Características principales de las topologías básicas.	51
Tabla 9: Características principales de las topologías híbridas.	52
Tabla 10: Cálculo de la impedancia total vista desde la fuente.....	55
Tabla 11: Cálculo de la impedancia reflejada.	55
Tabla 12: Cálculo de frecuencia y condensadores de primario y secundario por topología.....	56
Tabla 13: Determinación de parámetros según topología.....	57
Tabla 14: Relación de transformación por topología SS, SP, PS, PP.....	58
Tabla 15: Parámetros de calidad para cada topología de compensación.	59
Tabla 16: Intensidad de corriente máxima para conductores de cobre según su sección	66
Tabla 17: Valor determinado para los principales componentes del circuito diseñado.....	67
Tabla 18: Consumo energético de un autobús de 18 m con diferentes configuraciones de carga.....	81
Tabla 19: Comparativa de consumo en diferentes entornos de vehículos eléctricos y de combustión.	82
Tabla 20: Dimensiones de centros de transformación prefabricados de Ormazabal...	86
Tabla 21: Características eléctricas de la celda CGMCosmos-I.	89
Tabla 22: Características eléctricas del interruptor seccionador de celda CGMCosmos-I.	89
Tabla 23: Características eléctricas del seccionador de puesta a tierra de la celda CGMCosmos-I.	90
Tabla 24: Fusibles HRC para protección de transformador.	92
Tabla 25: Características de los convertidores de corriente continua familia DCS880 tipo 2-Q.	95
Tabla 26: Intensidad máxima admisible para diferentes secciones según “ITC-BT-07”.	102
Tabla 27: Diámetro exterior del entubado según “ITC-BT-21”.	105
Tabla 28: Características del cable Toxfree ZH RZ1MZ1-K según su sección.....	105
Tabla 29: Dimensionamiento de canalizaciones según sección.	106
Tabla 30: Gasto anual del Ayuntamiento de Madrid por tránsito de autobuses en el carril bus-taxi de la calle Goya.....	126
Tabla 31: Gasto anual del Ayuntamiento de Madrid por tránsito de autobuses en el carril bus-taxi de la calle Goya.....	127

Tabla 32: Beneficio anual obtenido si se ofertase el servicio a vehículos taxis para diferente número de automóviles por hora y sentido.....	128
Tabla 33: Estimación del gasto de mantenimiento del sistema durante 15 años.	129
Tabla 34: Valores de emisiones de referencia para un autobús de gasóleo.	131
Tabla 35: Comparativa de emisiones generadas actualmente y reducción si migrase a tecnología eléctrica.	132

1. Introducción

1.1. Contexto y justificación del Trabajo

Con objeto de cumplir la ruta marcada dentro del Plan Nacional Integrado de Energía y Clima en cuanto a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero como medida transitoria en 2030 para alcanzar la neutralidad en lo que al uso de carbono se refiere en 2050, se hace necesario actuar sobre los sectores que más afectan al medioambiente.

Entre las actividades que más emisiones totales brutas generan, encontramos el sector de la movilidad y transporte donde se prevé una reducción de 27 MtCO₂-eq. En particular, en zonas urbanas con alta densidad de tráfico y gran congestión de vehículos, donde, aunque los trayectos no sean largos se invierte gran cantidad de tiempo en recórrelos, la cantidad de CO₂ generada ha llevado a las administraciones a realizar medidas encaminadas a minimizar el impacto del tráfico [2], tales como Zonas de Bajas Emisiones, limitaciones de velocidad en tramos determinados, fomento del transporte público con carriles específicos para este tipo de vehículos o ayudas para la adquisición de los mismos.

Estas medidas han provocado que en los últimos años las matriculaciones de automóviles eléctricos hayan crecido de manera exponencial, como puede apreciarse con los datos recogidos en el “Observatorio del vehículo eléctrico y la movilidad sostenible, OVEMS” [3]:

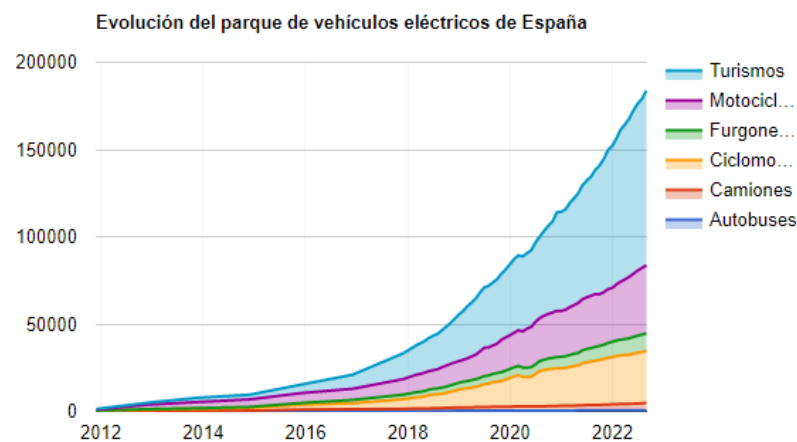


Figura 1: Evolución del parque de vehículos eléctricos de España 07/02/2023 [3].

Pese al aumento en cuanto a ventas descrito, encontramos una serie de inconvenientes que frenan la implantación definitiva en el mercado. Entre estos inconvenientes podemos destacar los siguientes:

- Alto coste de la tecnología.
- Precio de partida elevado.
- Tiempos de recarga relativamente altos.
- Limitados puntos de recarga.
- Autonomía inferior a la que ofrecen los vehículos de combustión.
- Desgaste en el sistema de almacenamiento con componentes costosos.
- Generación de residuos que requerirá una infraestructura de reciclaje y una gestión correcta de los mismos.

Algunas de estas desventajas pueden paliarse o decrementar con el uso de tecnología DWPT (Dynamic Wireless Power Transfer) o sistema DIPT (Sistemas Dinámicos de transferencia de Potencia Inductiva) mediante el cual el vehículo va tomando energía eléctrica de la red mientras está circulando sin necesidad de utilizar la energía almacenada o incluso ir aumentando la disponible. Esta tecnología posibilita un sistema alternativo que ofrece seguridad y flexibilidad al realizar la carga con el vehículo en movimiento y una reducción del tamaño y capacidad de las baterías, con la consiguiente disminución de elementos y residuos generados. Además, es adaptable a cualquier automóvil eléctrico lo que potencia en gran medida la transición hacia la movilidad con “cero emisiones”.

El presente trabajo, pretende estudiar la tecnología de transferencia dinámica de potencia inductiva aplicada a la carga de vehículo eléctrico con objeto de implementar un sistema DWPT con bobinas de transferencia de 30 kW. Una vez planteado el prototipo se analizará la viabilidad de instalación en un carril bus-taxi. De forma general, el sistema DWPT a diseñar constaría de los siguientes elementos básicos:

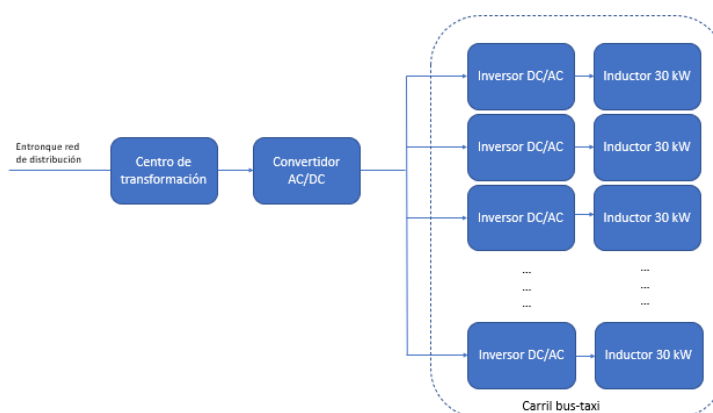


Figura 2: Esquema general de diseño.

Como puede apreciarse, requerirá además del diseño del prototipo, el dimensionamiento eléctrico tanto de la infraestructura de conexión con la red de distribución como de la red formada por inversores/inductores que se integrará en la vía y que compone el sistema de carga.

Para finalizar, se realizará una previsión de costes de implantación en el supuesto a estudio, teniendo en cuenta la escasez de soluciones comerciales para estos dispositivos evaluando, a su vez, el impacto en cuanto a la reducción de emisión de gases de efecto invernadero que conlleva la implantación en un tramo con alta densidad de tráfico.

1.2. Objetivos del Trabajo

El presente trabajo versa fundamentalmente sobre tres ejes principales: el estudio continuo de la tecnología DWPT debido a su temprana fase de desarrollo, la realización de un prototipo funcional que pueda implantarse en un entorno real y un análisis de implantación del citado prototipo. En base a esto se han definido los siguientes objetivos:

- Estudio sobre la tecnología de transferencia de potencia dinámica inductiva aplicada al vehículo eléctrico.
- Análisis de las diferentes iniciativas de aplicación de la tecnología que se están llevando a cabo para evaluar el grado de implantación
- Dimensionamiento de un sistema de transferencia de potencia para el diseño en un carril Bus-Taxi.
- Diseño del prototipo para el caso anteriormente expuesto.
- Estimación de costes y beneficios que la implantación del prototipo conlleva.
- Evaluación del grado de mejora en cuanto a impacto medioambiental se refiere.

1.3. Impacto en sostenibilidad, ético-social y de diversidad

La fabricación de automóviles tradicionalmente se ha basado en diseñar vehículos en función a las necesidades de un hombre adulto medio, el diseño exterior, confort, manejabilidad o condiciones de uso son algunas de las características que se han tenido en cuenta sin pensar en la diferencia que podemos encontrar entre conductores y conductoras.

En la guía “El vehículo autónomo visto con gafas violeta” [4] realizada dentro del proyecto “Diamond” y financiada bajo el programa de investigación e innovación “Horizon 2020” se analizan las causas y se plantean directrices para sensibilizar e

identificar los puntos clave y líneas estratégicas a seguir para el desarrollo de la justicia de género en lo que al vehículo autónomo conectado se refiere.

Algunas de las desigualdades que se reflejan en el documento y que hacen necesario plantear el desarrollo de la industria automovilística con perspectiva de género, son las siguientes:

- Existe una situación de escasa movilidad para las mujeres provocada por una peor situación económica de forma generalizada.
- Los desplazamientos de la mujer son encadenados, de manera que implica planificar una ruta con paradas múltiples para incluir diferentes responsabilidades en comparación a los desplazamientos realizados por los hombres que son eminentemente directos desde un punto A hacia otro B o viceversa. Estos patrones de desplazamiento se reflejan en la figura 3.

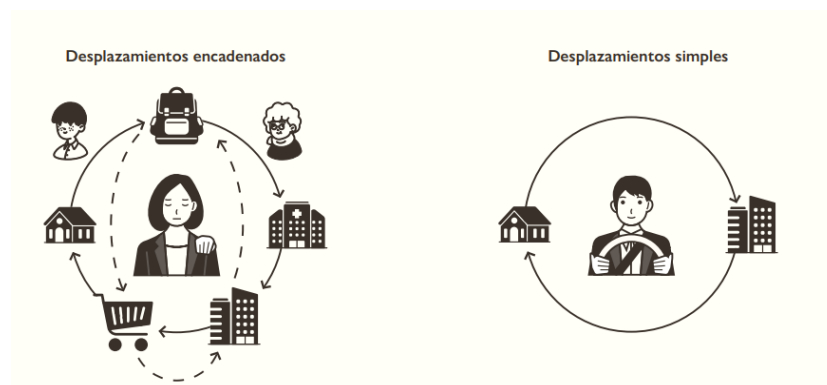


Figura 3: Desplazamientos encadenados frente a simples [4].

Estos puntos están directamente relacionados con los objetivos de desarrollo sostenible ODS 5 “Gender Equality” y ODS 10 “Reduce inequalities” y la introducción del vehículo eléctrico estaría alineada con ambas dimensiones.

Por un lado, el precio medio del kWh se sitúa entre 0,15€ kWh 0,79€ kWh [5] para la recarga de vehículo eléctrico, lo que conlleva que el coste total de cargar un automóvil con una batería de capacidad máxima de 40kWh ascendería a 20€ aproximadamente y aportaría una autonomía de 270 km. En el caso de usar un vehículo de combustión con un consumo medio de 6 l/100 km y un precio de 1,638 €/l para Diesel y 1,809 €/l para gasolina [6], el gasto en combustible ascendería a 26,53 € y 29,30 € respectivamente. Esto permite que con un recurso económico menor se amplie la movilidad.

A su vez, analizando los patrones de movilidad mujer/hombre, puede extraerse que es más sencillo para estos últimos planificar la ruta y por tanto las paradas para repostaje o recarga, sin embargo con patrones encadenados como los que tienen que realizar las

mujeres, la previsión es más compleja, por lo que disponer de infraestructura con carga inductiva dinámica que permita recargar el vehículo en ruta, sería un aspecto muy positivo no tanto para mitigar la desigualdad sino para aportar calidad y tranquilidad a la movilidad.

En cuanto al impacto que el proyecto tiene en lo referente a sostenibilidad, puede extraerse que el vehículo eléctrico en general favorece el cuidado del medio ambiente y su implantación es una de las medidas más importantes que puede llevarse a cabo para la lucha contra el cambio climático, pues trae consigo una disminución de los gases de efecto invernadero emitidos en comparación con los vehículos de combustión. Este hecho impacta directamente con los objetivos ODS 13 “*Climate Action*” y ODS 15 “*Life on land*”.

Sin embargo, el paradigma actual tecnológico supone la necesidad de un número elevado de baterías para almacenar la energía, lo que implica una penalización en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero. Tanto la extracción de los materiales necesarios para su elaboración (litio, cobalto, níquel o manganeso) como el consumo energético para el proceso de fabricación suponen una afección medioambiental adicional.

Según los datos recogidos por la Agencia Internacional de la Energía (AIE), la demanda de baterías de litio para vehículo eléctrico sigue una trayectoria creciente, aumentando en 2022 un 65 % con respecto al año anterior [7] debido a la necesidad actual para la fabricación de vehículos, lo que puede provocar un desajuste entre los objetivos climáticos y la extracción de los minerales que se necesitan para tal fin [8].

La movilidad eléctrica, supondrá a medio plazo, la necesidad masiva de reciclaje de los residuos producidos por estas baterías, para ello se están estudiando procesos como el “reciclaje hidrometalúrgico” que aunque permiten la recuperación de los metales, consumen grandes cantidades de energía y productos químicos [9].

Si particularizamos en el uso de carga inductiva, la implantación de esta tecnología posibilitará que se utilice menor número de baterías y con capacidad inferior a las que traen las soluciones eléctricas actuales y por ende, reducirá la huella de carbono en los procesos de extracción y fabricación, disminuyendo a su vez, la generación de residuos, aspectos positivos enmarcados dentro de los objetivos ODS 9 “*Industry, innovation and infrastructure*” y ODS 12 “*Responsible Consumption and Production*”.

A su vez, y puesto que el sistema precisa de una etapa de conversión CA/CC, se podría plantear la posibilidad de alimentarlo directamente con corriente continua tal y como se genera con un sistema fotovoltaico, lo que favorecería la integración de la energía renovable en la red de acuerdo con el objetivo ODS 7 “*Affordable and Clean Energy*”.

1.4. Motivación

Actualmente las políticas medioambientales de la mayoría de los países van encaminadas al cuidado del medio ambiente. En particular, la Unión Europea, basa su legislación en conseguir una serie de objetivos prioritarios [10] entre los que podemos destacar:

- Conseguir objetivo de reducción de emisiones de gases de efecto invernadero para 2030 y una neutralidad climática para 2050.
- Perseguir la ambición de reducir la contaminación a cero, incluida el aire, el agua y el suelo, así como salvaguardar la salud y el bienestar de las personas.
- Reducir las presiones climáticas y medioambientales asociadas a la producción y el consumo, haciendo hincapié en los ámbitos de la energía, el desarrollo industrial, la construcción de infraestructuras, la movilidad y los sistemas alimentarios.

Para alcanzar estos hitos es imprescindible atajar las emisiones de gases de efecto invernadero que se arrojan a la atmosfera, siendo el transporte nacional de carretera una de las fuentes que mayor tonelaje de emisiones aporta, como se aprecia en la siguiente imagen donde se muestran la evolución de emisiones de CO₂ desde 1990 a 2020 según el modo de transporte:

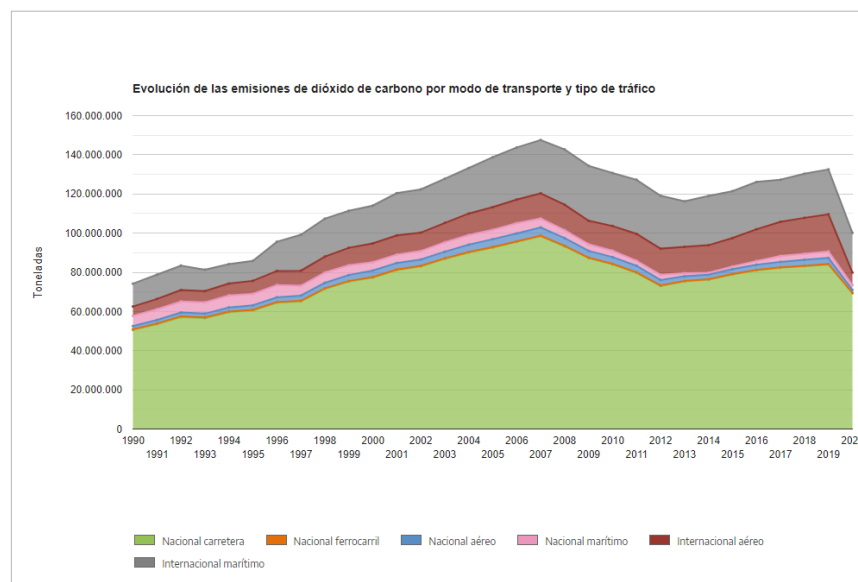


Figura 4: Evolución de emisiones de CO₂ por modo de transporte y tipo tráfico [11].

El vehículo eléctrico avanza como una alternativa a la movilidad de combustión para alcanzar un desarrollo sostenible y respetuoso con el medio ambiente, pero presenta

unas limitaciones que están provocando que la implantación no sea tan efectiva como debiera.

El uso de baterías con una autonomía limitada e inferior a la de los vehículos de combustión, requiere, por una parte, la instalación de un conjunto de gran tamaño con un peso considerable y por otra, una inversión inicial elevada. Además, el sistema de almacenamiento es una fuente de posibles averías por el desgaste paulatino de los componentes con un precio de reemplazo considerable.

Por otro lado, hay que valorar la gestión de residuos que deberá realizarse con los materiales que conforman los distintos sistemas de almacenamiento y que conllevará aplicar medidas encaminadas al reciclaje y gestión óptima del material sobrante.

Por todo ello, la motivación principal que me ha llevado a plantear este trabajo es la de estudiar sistemas alternativos de carga que puedan paliar o corregir los problemas que ralentizan la penetración en el mercado y el uso del vehículo eléctrico como medio fundamental para conseguir los objetivos de desarrollo sostenible.

Avanzar hacia una tecnología que posibilite la carga de automóviles mientras está circulando y, por tanto, requiera de la instalación de menos capacidad de batería con dispositivos de inferior tamaño sería una solución para los problemas anteriormente planteados.

Si, además, pensamos en transporte público, la electrificación de automóviles tiene que plantearse teniendo en cuenta que la recarga no debería suponer la detención del servicio, cuestión complicada si utilizamos un sistema de puntos de suministro fijos.

Aunque se han puesto sobre la mesa diferentes alternativas para este fin, me he decantado por DWPT por que se basa en la transferencia inductiva, efecto que ha sentado las bases del paradigma de funcionamiento de la mayoría de máquinas eléctricas, constituidas por transformadores o motores, pero plantea el reto de estudiar la eficiencia y el acoplamiento de inductores con una separación comparable a sus dimensiones físicas con un aplicativo específico para el fin que hemos determinado. Por todo lo anteriormente expuesto, considero el desarrollo de este campo un trabajo muy interesante que me ayudará a seguir aprendiendo y aplicar los conocimientos ya adquiridos.

1.5. Enfoque y método seguido

El enfoque y método seguido para la realización del trabajo ha constado de cuatro fases sobre las que se ha desarrollado el proyecto completo.

En la primera, se ha realizado una introducción al trabajo mediante un análisis del estado actual del vehículo eléctrico, los beneficios que la tecnología DWPT conlleva, la motivación que ha impulsado su realización y se han definido los objetivos a conseguir para realizar una planificación efectiva. Posteriormente se ha realizado un estudio del estado del arte de la tecnología de transferencia de potencia inalámbrica en general, para entender la base teórica que rige este tipo de sistemas.

En una segunda fase, se ha desarrollado en detalle la tecnología de transferencia de potencia inductiva dinámica aplicada a la carga del vehículo eléctrico, analizando todos los elementos que la componen con objeto de poder determinar una solución de transmisión para un modelo de 30 kW.

En una tercera fase, se ha parametrizado el sistema determinando sus principales variables eléctricas y componentes y se han realizado simulaciones de los elementos diseñados para comprobar su funcionamiento. A su vez se ha presentado la ubicación seleccionada para el estudio de su instalación, verificando que el sistema cubre los requisitos energéticos de los vehículos que transitan por ella.

En una última fase se ha realizado el dimensionamiento tanto a nivel eléctrico como de obra civil necesario para la implantación en pista del sistema DWPT, presupuestando el montaje completo. Esto ha permitido realizar un balance de coste/beneficio y un análisis económico. A su vez, se han presentado los beneficios medioambientales que conlleva y se han planteado las conclusiones y las líneas futuras de trabajo.

1.6. Planificación del trabajo

Para evaluar la planificación de trabajos se detallan una serie de hitos marcados por el calendario de entrega de las diferentes PECs con los objetivos a conseguir en cada uno. La consecución de dichos objetivos se ha planteado definiendo una serie de procesos acotados en tiempo que se describen a continuación:

1. PEC 1: Definición. Fase inicial donde se definen los objetivos del proyecto delimitando el alcance completo del trabajo. Una vez establecidos estos dos procesos, se realizará la planificación de hitos marcando el horizonte temporal a seguir para alcanzarlos.
2. PEC 2: Estado del Arte. En esta segunda etapa, se realizará un estudio de los sistemas de transferencia inductiva y su aplicación en la tecnología DWPT, recogiendo los aspectos teóricos más relevantes como base para el desarrollo del trabajo. Además, se repasarán los proyectos más importantes que actualmente están en curso en este campo.

3. PEC 3: Diseño e Implementación: Fase de estudio del prototipo DWPT, evaluación del emplazamiento donde va a ubicarse y análisis de viabilidad de implantación definitiva. Finalmente se reflejarán las conclusiones obtenidas y el desarrollo de trabajos futuros en esta materia
4. PEC 4: Memoria: Etapa donde se recopilará la información anteriormente descrita y se compondrá con ella la memoria final a entregar.
5. PEC 5: Presentación: Enfocada al desarrollo de la presentación con los aspectos más relevantes del proyecto para exponerla y realizar la defensa del TFM.

El horizonte temporal definido para cada uno de los hitos se refleja en la siguiente tabla:

Nº	Hitos	Duración (días)	Objetivo	Fecha inicio	Fecha Fin
1	PEC 1: Definición	11	Definir objetivos y alcance, planificar hitos	01/03/2023	12/03/2023
1.1	Definir Objetivos y Alcance	2	--	01/03/2023	03/03/2023
1.2	Planificación Hitos	3	--	03/03/2023	06/03/2023
1.3	Redacción PEC	6	--	06/03/2023	12/03/2023
2	PEC 2: Estado del Arte	13	Estudio sistemas de transferencia inductiva, análisis DWPT y revisión proyectos en curso	13/03/2023	26/03/2023
2.1	Estudio Transferencia Inductiva	3	--	13/03/2023	16/03/2023
2.2	Análisis DWPT	5	--	16/03/2023	21/03/2023
2.3	Revisión Trabajos en marcha	1	--	21/03/2023	22/03/2023
2.4	Redacción PEC 2	4	--	22/03/2023	26/03/2023
3	PEC 3: Diseño e Implementación	53	Análisis prototipo, diseño implementación en ubicación real, valoración costes y conclusiones	27/03/2023	19/05/2023
3.1	Estudio prototipo	17	--	27/03/2023	13/04/2023
3.2	Análisis Ubicación	3	--	13/04/2023	16/04/2023
3.3	Dimensionamiento eléctrico	6	--	16/04/2023	22/04/2023
3.4	Diseño implantación	13	--	22/04/2023	05/05/2023
3.5	Evaluación impacto	2	--	05/05/2023	07/05/2023
3.6	Redacción PEC 3	12	--	07/05/2023	19/05/2023
4	PEC 4: Memoria	23	Revisión PECs anteriores y redacción memoria	20/05/2023	12/06/2023
4.1	Revisión PECs anteriores	5	--	20/05/2023	25/05/2023
4.2	Redacción Memoria	18	--	25/05/2023	12/06/2023
5	PEC 5: Presentación	9	Realización presentación y defensa	13/06/2023	22/06/2023
5.1	Elaboración Presentación	8	--	13/06/2023	21/06/2023
5.2	Defensa TFM	1	--	21/06/2023	22/06/2023

Tabla 1: Hitos y procesos definidos para desarrollo de TFM.

El diagrama de Gantt que representa la evolución temporal de cada una de las tareas se ha reflejado en el Anexo I para su consulta.

1.7. Breve resumen de productos obtenidos

El producto final del TFM consiste en la confección de un modelo del sistema DWPT y el estudio de viabilidad de implantación en un carril bus-taxi, pero para llegar a ello se desarrollarán una serie de subproductos necesarios para el resultado definitivo. Con todo ello, el resumen de productos consiste en:

- Análisis de la tecnología de transferencia de potencia inalámbrica.
- Estudio en detalle de un sistema DWPT.
- Revisión de los programas piloto que actualmente están en curso en este campo.
- Modelo de sistema DWPT con inductores de 30 kV.
- Dimensionamiento eléctrico necesario para el despliegue.
- Análisis de la obra civil necesaria para la instalación.
- Estimación del coste económico de implantación y análisis económico.
- Análisis de beneficios en cuanto a reducción de emisiones de gases de efecto invernadero que la implantación de este sistema conllevaría.

1.8. Breve descripción de otros capítulos de la memoria

A continuación, se resumen los diferentes capítulos que componen el trabajo final:

- **Capítulo 1. Introducción.** En este primer capítulo se realiza la introducción al trabajo y se expone la motivación que ha llevado a realizarlo. A su vez, se analiza el impacto que el trabajo va a tener en lo que al medioambiente y diversidad de género se refiere. Por último, se presenta la planificación de trabajo, presentando los diferentes hitos y el desarrollo temporal que se prevé.
- **Capítulo 2. Estado del arte.** En esta sección se analiza la tecnología de carga del vehículo eléctrico y se presentan las principales iniciativas que se han realizado y se están realizando en el campo de la transferencia de potencia inalámbrica.
- **Capítulo 3. Dimensionamiento general del Sistema DWPT.** Se realiza un análisis teórico de los sistemas de transferencia de potencia inductiva, en particular, se analizarán los sistemas DWPT presentando sus componentes principales.

- **Capítulo 4. Diseño del sistema DWPT 30 kW:** En este capítulo se presenta un modelo de sistema DWPT de 30 kW, calculado y dimensionado en base a la teoría expuesta en secciones anteriores. Además, se estudia la estabilidad del sistema completo para proponer su instalación en una ubicación real.

Capítulo 5. Implantación del Sistema DWPT diseñado: Con el modelo diseñado se analiza la ubicación del mismo en un emplazamiento concreto, realizando el dimensionamiento tanto de la parte eléctrica como de la obra civil necesaria para su instalación.

- **Capítulo 6. Presupuesto:** Sección en la que se realiza un presupuesto tanto de los equipos necesarios para la implantación del sistema DWPT como de la instalación en el carril bus-taxi seleccionado.
- **Capítulo 7. Estudio económico y de impacto ambiental:** En el mismo se realiza un balance económico del ahorro que el sistema conlleva en caso de implantarlo y sustituir los actuales autobuses de combustión por eléctricos, se plantean los beneficios obtenidos si el servicio se ofrece a otros vehículos eléctricos como taxis y se estiman los gastos en un horizonte temporal de 15 años para analizar la tasa interna de retorno de la inversión realizada. Por otro lado, se evalúa la reducción de gases de efecto invernadero que el montaje conlleva.
- **Capítulo 8. Conclusiones y líneas futuras:** Capítulo donde se exponen las conclusiones extraídas tras realizar el trabajo y se reflejan las líneas de trabajo que pueden desarrollarse a futuro.
- **Capítulo 9. Glosario.** Recapitulación de términos y acrónimos utilizados.
- **Capítulo 10. Bibliografía:** Listado de referencias bibliográficas consultadas para la realización del trabajo.
- **Capítulo 11. Anexos:** Este capítulo consta de 4 anexos donde se refleja el diagrama de Gantt con la planificación seguida, la fórmula utilizada para el cálculo del coeficiente de inducción mutua entre bobinas rectangulares de diferente tamaño, el código implementado en Matlab para el cálculo de los diferentes parámetros eléctricos del sistema diseñado y los planos de montaje de la instalación sobre el carril bus-taxi.

2. Estado del Arte

En el presente capítulo se realiza un análisis del estado actual de la tecnología aplicada al vehículo eléctrico en general, analizando en detalle lo que tiene que ver con el sistema de carga y las diferentes opciones que actualmente se están aplicando.

Además, se presentan las principales normas y estándares que se están desarrollando en este campo y se repasan las iniciativas que se han realizado y que se están llevando a cabo para probar e implantar sistemas de transferencia de potencia inalámbrica para la carga del vehículo eléctrico.

2.1. El vehículo eléctrico

Aunque la venta de vehículos eléctricos ha crecido exponencialmente en los últimos años impulsada por las medidas encaminadas a la disminución de los gases de efecto invernadero, lo cierto es que la tecnología lleva casi dos siglos en desarrollo. Fue el ingeniero húngaro Ányos Jedlik en 1828 [12] quien diseñó el primer motor eléctrico del mundo y quien posteriormente, lo aplicó a un pequeño vehículo. Por otro lado, Thomas Davenport fabricó un artilugio similar en 1834 que rodaba en una pista electrificada. A pesar de esto, se atribuye la invención al químico escocés Robert Anderson ya que, entre 1832 y 1839, trabajó en la evolución del carruaje tradicional alimentado por celdas eléctricas.

Se desarrollaron muchos modelos en los años sucesivos, pero la limitada autonomía debido al uso de baterías no recargables hizo que la solución no prosperase.

En 1859, Gatón Planté impulsó su desarrollo al fabricar las primeras baterías recargables de plomo y ácido, lo que permitió una recarga continuada del sistema de almacenamiento, mejorada en 1881 por Camille Faure al aumentar la capacidad de las pilas.

Este avance hizo que a principios del siglo XX el vehículo eléctrico se convirtiese en un éxito en algunas ciudades, siendo los taxistas de Nueva York los primeros usuarios comerciales registrados, se estima que un tercio del total de vehículos disponían de esta tecnología [13]. Este modelo fue seguido por los taxistas de Londres o Berlín.

En 1912 se alcanzó el máximo de producción. A partir de aquí comenzó la decadencia tecnológica y la transición hacia el vehículo de combustión interna debido a factores como:

- Arranque automático.
- Producción en cadena impulsada por Henry Ford.

- Descubrimiento de importantes reservas de petróleo.
- Deficientes condiciones técnicas en la infraestructura de generación y distribución eléctrica.

Aunque durante varios periodos del siglo pasado se intentó reimpulsar la tecnología, como al finalizar la Segunda Guerra Mundial por la escasez de combustible o durante la crisis del petróleo entre (1973 y 1979), no ha sido hasta principios del siglo XXI cuando políticas medioambientales de las diferentes administraciones han hecho que los fabricantes potencien las acciones necesarias para incrementar las ventas y aumentar la penetración en el mercado de estos vehículos, observándose un crecimiento exponencial en la última década según los datos recogidos en el “Observatorio del vehículo eléctrico y la movilidad sostenible, OVEMS” [3]:

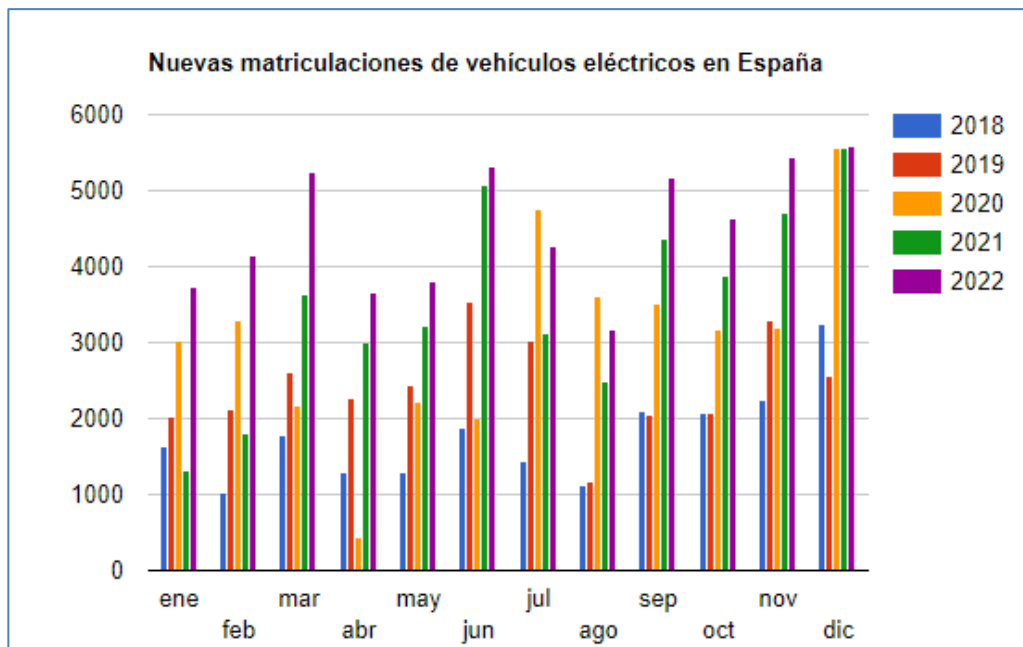


Figura 5: Nuevas matriculaciones de vehículos eléctricos 07/02/2023 [3].

2.1.1. Tipos de vehículos eléctricos

Actualmente en el mercado encontramos seis categorías en las que se engloban los diferentes vehículos eléctricos en función a sus características y funcionalidades. Esta clasificación se corresponde con [14]:

- **Vehículos eléctricos puros (BEV, Battery Electric Vehicle):** El automóvil se desplaza gracias a la energía almacenada en sus baterías. Para la recarga del sistema de almacenamiento se debe conectar a la red, la velocidad de carga dependerá de la potencia del cargador utilizado. Se

suele combinar con sistemas de frenada regenerativa en deceleraciones para maximizar su autonomía.

- **Vehículos eléctricos con pila de hidrógeno (FCEV, Fuel Cell Electric Vehicle):** Utilizan el proceso de electrolisis del hidrógeno para generar electricidad, produciendo agua como residuo. Por tanto, no requieren de batería para almacenar energía.
- **Vehículos eléctricos de autonomía extendida (REEV, Range Extended Electric Vehicle):** Disponen de varios motores. Uno o más motores eléctricos alimentados por baterías que se encarga del movimiento de las ruedas y un motor de combustión genera la energía que se acumula en el sistema. Para conseguir que estos vehículos sean considerados como eléctricos puros y no híbridos, se necesita que las ruedas se muevan sólo por el motor eléctrico. Reciben etiqueta CERO emisiones si se consigue una autonomía eléctrica de más de 40 km.
- **Vehículos híbridos enchufables (PHEV, Plug-in Hybrid Electric Vehicle):** El coche se desplaza gracias al motor eléctrico y al de combustión, ambos pueden participar en el movimiento del vehículo. La ubicación del motor o motores eléctricos puede ser variada, encontrando algunos modelos que lo ubican en las ruedas, otros en los ejes o en otras partes del vehículo. Al igual que en el caso anterior, la batería debe superar los 40 km de autonomía para recibir la etiqueta CERO emisiones, en caso contrario se clasificaría como ECO. Precisa conexión a la red eléctrica para realizar la recarga
- **Vehículos híbridos (HEV, Hybrid Electric Vehicle):** Utilizan un motor eléctrico intercalado con el de combustión para ayudarle y reducir el consumo. Disponen de baterías con un almacenamiento muy limitado y puede utilizar sistemas como el de frenada regenerativa o el motor de combustión para cargarlas. Están dentro de la clasificación ECO de la DGT.
- **Vehículos microhíbridos (MHEV, Micro-Hybrid Electric Vehicle):** Aunque se desplazan mediante un motor de combustión, adaptan un sistema de asistencia eléctrica que recupera energía y se almacena en una batería limitada de 48 V. Esta asistencia consiste en ayudar al motor térmico o alimentar algún sistema eléctrico del vehículo. La funcionalidad les permite estar clasificados como ECO.

Teniendo en cuenta que los vehículos REEV si son híbridos y los MHEV tendrán una arquitectura similar a los HEV, podríamos representar las principales arquitecturas [15] como las que se muestran en la figura 6.

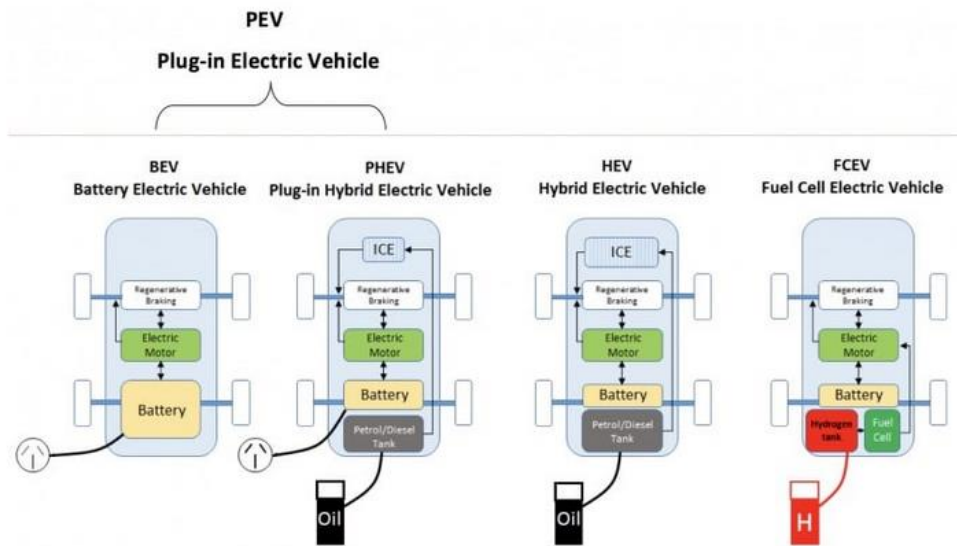


Figura 6: Principales arquitecturas de vehículo eléctrico [15].

2.1.2. Partes del vehículo eléctrico

Esencialmente el vehículo eléctrico consta de los siguientes elementos principales:

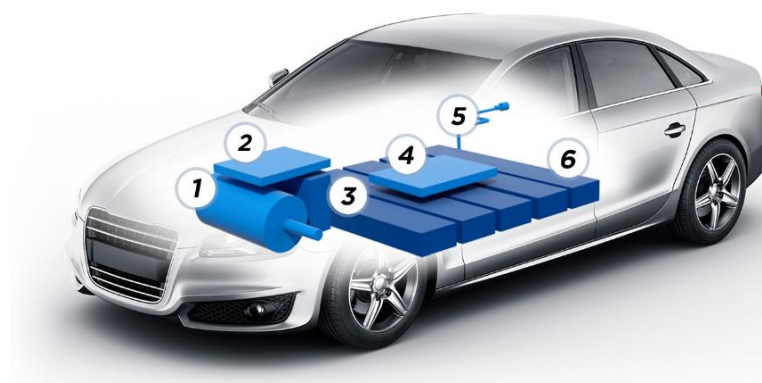


Figura 7: Elementos de un VE [16].

1. **Motor eléctrico:** Recibe la energía procedente de las baterías y la transfiere a las ruedas para producir el movimiento del vehículo. Puede haber un solo motor o varios y su ubicación depende del diseño, pudiendo ubicarse en la parte frontal, en las ruedas o incluso en la caja de cambios.

2. **Inversor:** Se encarga de convertir la corriente continua de las baterías en corriente alterna para la alimentación del motor. En vehículos equipados con frenada regenerativa, puede ir combinado con un convertidor que realiza el proceso contrario pasando la corriente alterna recibida del sistema de freno a continua para su almacenamiento en las baterías.
3. **Controlador:** Su función es regular la energía procedente de las baterías e inversores para distribuirla al motor eléctrico ajustando la potencia que demanda el conductor por medio del acelerador. Además, determina la variación de frecuencia o voltaje que entra al motor.
4. **Convertidor:** Convierte la corriente alterna suministrada por la red a corriente continua para su almacenamiento en las baterías. En función al modelo, también se encarga de adaptar la tensión de salida de baterías a 12 V para alimentar otros sistemas auxiliares.
5. **Cargador:** Punto de conexión del vehículo eléctrico a la red de alimentación. Para conseguir diferentes tipos de recarga se utilizan diversos conectores.
6. **Baterías:** Almacenan la energía para alimentar al resto de componentes del vehículo. En ciertos modelos, se instalan baterías auxiliares para surtir de energía otros sistemas del vehículo.

2.2. Sistemas de carga para vehículo eléctrico

Actualmente, la mayoría de los sistemas de carga para vehículo eléctrico están basados en tecnología conductiva, es decir, la recarga se realiza mediante la conexión del vehículo con el punto de carga por medio de cables eléctricos convencionales. Sin embargo, en los últimos años se están estudiando diversos métodos de carga inductiva, para los que no se precisa una conexión física entre vehículo y unidad de recarga, en particular los basados en carga inductiva son el objeto del trabajo.

2.2.1. Sistemas de carga conductiva

Como ya se ha comentado en 2.2, los sistemas de carga conductiva precisan de una conexión física entre vehículo y punto de carga. La topología de este tipo de sistemas varía en función a la potencia que entregan, el tipo de uso al que están destinados o el conector que utilizan.

Según la potencia contratada, encontramos la siguiente clasificación de sistemas [17]:

- Sistema de recarga vinculado: Potencia inferior a 7 kW.
- Sistema de recarga convencional: Potencia entre 7 kW y 15 kW.
- Sistemas de carga semi-rápida: Potencia entre 15 kW y 40 kW.
- Sistemas de carga rápida: Potencia superior a 40 kW e inferior a 100 kW.
- Sistemas de carga ultra-rápida: Potencias superiores a 100 kW.

El modo de carga variará en función al protocolo entre el punto de recarga y el vehículo eléctrico. Aunque es un asunto que está en desarrollo, en la norma UNE-EN 61851-1:2012 “Sistema conductivo de carga para vehículos eléctricos” se definen 4 modos [18]:

- **Modo 1:** Está diseñado para su implementación en vivienda con una potencia eléctrica contratada de 3,7 kW en monofásico y 11 kW en conexión trifásica. Se usa un enchufe Schuko convencional para realizar la recarga.
- **Modo 2:** Ofrece una potencia máxima de 7,4 kW en monofásico y hasta 22 kW en trifásico. Solución óptima para plazas de garaje comunitarias con conector tipo Schuko. Se equipa con protecciones diferenciales y magnetotérmicas al conjunto como medida de seguridad y es posible configurar diferentes parámetros de carga.
- **Modo 3:** Ofrece una potencia similar al modo 2 pero se utiliza en puntos de recarga no domésticos. Requiere utilizar un sistema de alimentación para vehículo eléctrico (SAVE o Wallbox) con cables nivel 1 (recarga doméstica sin instalación específica), 2 (recarga acelerada o rápida) o 3 (recarga rápida o ultrarrápida).
- **Modo 4:** Entrega una potencia de salida de hasta 50 kW lo que posibilita recuperar el 80 % de la batería en 20 o 30 minutos (aunque depende de la capacidad de la batería). Aunque la variedad de conectores es amplia, comúnmente utiliza cableado con conector CCS Combo o CHAdeMO con sistema de protección ajustado a la intensidad de carga.

La representación de cada uno de los modos con las principales características que los componen los encontramos en la figura 8.

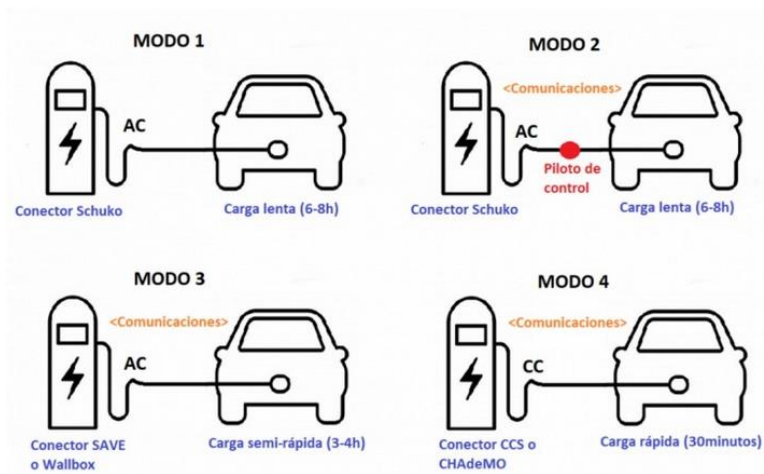


Figura 8: Modos de carga para VE según la norma UNE-EN 61851-1:2012 [19].

Por su parte, al no haber una norma internacional que estandarice los tipos de conectores, existen diferentes dispositivos con diversas características. Los más comunes son:

- **Conector Simple, tipo Schuko, UNE-EN 2035:** Toma de corriente clásica para instalaciones eléctricas.
- **Conector tipo 1, Yazaki, SAE J1772:** Específico para vehículo eléctrico con conexión monofásica y tierra. Dispone de bornes adicionales para piloto de proximidad de vehículo, PP y control, CP.
- **Conector tipo 2, Mennekes, UNE-EN 62196-2:** Dos posibilidades, monofásico 16 A y 32 A o trifásico con 16 A, 32 A y 63 A. Dispone de 5 bornes en monofásico, potencia, fase, neutro y tierra y dos complementarios para PP y CP.

En trifásico presenta 7 bornes, 5 de potencia y los dos complementarios.

- **Conector tipo 3, SCAME, UNE-EN 62196-2:** Conocido como EV-Plug-in Alliance, con 5 o bornes según el tipo monofásico o trifásico con tierra y comunicaciones.
- **Conector COMBO, combinado o CCS, UNE-EN 62196-3:** Dispone de 5 bornes y admite carga lenta y rápida.
- **Conector Chademo, UNE-EN 62196-3:** Diseñado para carga rápida en corriente continua, posee 10 bornes y admite hasta 200 A de intensidad.

Cada uno de los conectores anteriores se corresponden con las imágenes de la figura 9.



Figura 9: Tipos de conectores para carga conductiva de VE [20].

2.2.2. Sistemas de carga inductiva

Los principales inconvenientes detectados en los vehículos eléctricos están relacionados con el sistema del almacenamiento. La autonomía de las baterías es baja en comparación con los vehículos clásicos de combustión, necesitan un largo periodo de tiempo para estar completamente cargados, la red de puntos de recarga está todavía en desarrollo y requiere una planificación de viaje previa, el bloque de almacenamiento es un conjunto muy pesado, lo que conlleva a consumos mayores y precisa una infraestructura óptima para la correcta gestión de los residuos generados.

Como solución a estos problemas se han planteado diferentes soluciones diseñadas mediante transferencia de potencia inalámbrica WPT (Wireless Power Transfer) entre las que se encuentra las siguientes variantes:

- **Carga estática o estacionaria:** Consiste en cargar el vehículo mientras está parado. El proceso de carga se inicia cuando las bobinas emisora y receptora están total o parcialmente alineadas.



Figura 10: Bloque de carga inalámbrica estacionaria WiTricity Halo [21].

- **Carga en movimiento o dinámica (DWPT, Dynamic Wireless Power Transfer):** La carga del vehículo se realiza mientras está circulando a velocidades relativamente altas tomando la energía de bobinas situadas debajo de la pista.



Figura 11: Representación de carril de carga dinámica [22].

- **Carga cuasi dinámica:** El vehículo se carga mientras se mueve a baja velocidad o durante paradas momentáneas.



Figura 12: Punto de recarga cuasi dinámico en parada de autobús [23].

Los sistemas dinámicos de transferencia de potencia permiten reducir el número y tamaño de las baterías o incluso eliminarlas.

2.2.2.1. Descripción general de un sistema inalámbrico de transferencia de potencia WPT

En general, se pueden clasificar los sistemas de transferencia de potencia inalámbrica en dos grupos:

- **Sistemas de Transferencia de campo lejano (WPT *Far Field*):** Utilizan microondas o láser en función a la frecuencia de trabajo (del orden de MHz), como medio para transmitir energía. Permiten trabajar con un rango de separación entre emisor y receptor amplio.
- **Sistemas de Transferencia de potencia de campo cercano (WPT *Near Field*):** En función al tipo de elemento que se use para la transmisión de energía se pueden clasificar dos subtipos. En el primero de ellos se transfiere un campo magnético desde el emisor al receptor utilizando bobinas, sistema denominado "IPT" (*Inductive Power transfer*) y en el segundo un campo eléctrico por medio de condensadores, tecnología conocida como "CPT" (*Capacitor Power Transfer*).

Ambos tipos de sistemas tienen un alcance menor que los de campo lejano y trabajan con frecuencias del orden de kHz [24].

Las características principales se pueden resumir en la tabla 2:

WPT	Far Field	Near Field
Range	Long	Short-Mid
Phenomenon	Coupled mode theory	Induction theory
Frequency	Mega Hertz	Kilo Hertz
Efficiency	Low	High

Tabla 2: Clasificación sistemas WPT [24].

En particular, podemos considerar un sistema de transferencia de potencia inalámbrico de campo cercano aquel que está formado por dos bobinas o condensadores acoplados magnética o eléctricamente y con un aislamiento eléctrico entre ellas por medio del aire, como el mostrado en la figura 14.

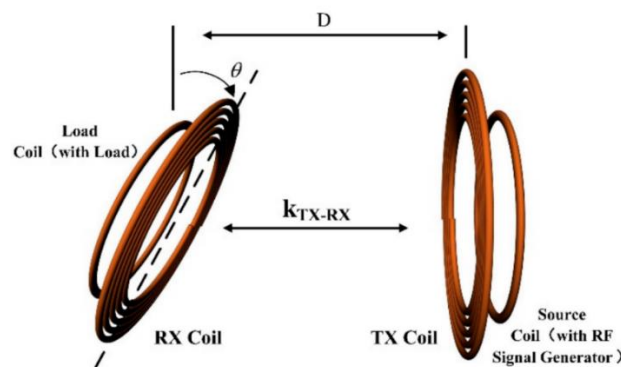


Figura 13: Representación esquemática de un sistema de transferencia inductiva [25].

El sistema consta de dos elementos, un transmisor conectado a la alimentación eléctrica y otro receptor conectado a la carga. La separación física entre ambos se corresponde con “ D ”, “ K_{TX-RX} ” es el factor de acoplamiento y “ θ ” el ángulo de desviación de la bobina receptora.

En [23] nos presentan los esquemas típicos de aplicación para las dos casuísticas anteriormente descritas:

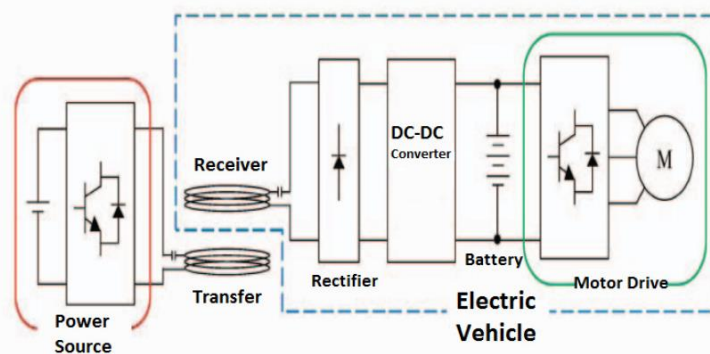


Figura 14: Esquema típico de sistema IPT [26].

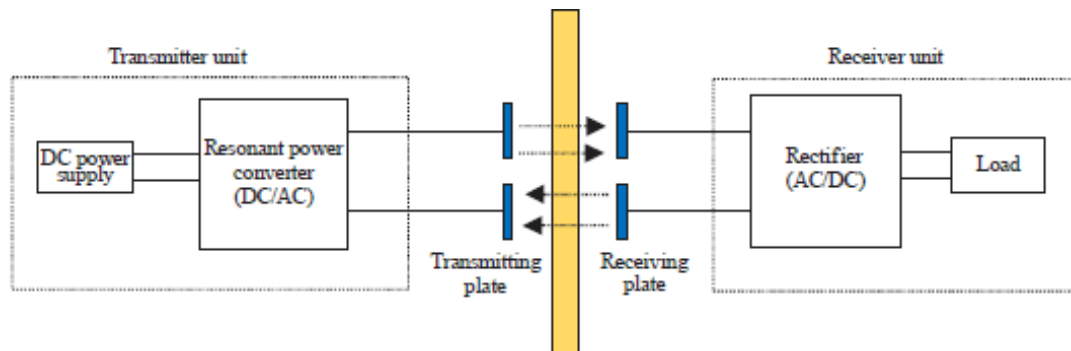


Figura 15: Esquema típico de sistema CPT [27].

La tecnología IPT presenta unas características que la convierten en una solución apropiada para la carga de vehículos eléctricos, entre estas podemos destacar:

- No genera ruido.
- Tiene aislamiento galvánico.
- No contiene piezas móviles que hagan el conjunto frágil.
- Tolera desalineaciones relativamente altas entre emisor y receptor.
- El espacio para el que se puede transmitir potencia está comprendido entre 10-14cm [26], mientras en CPT a partir de 1 cm la salida decrece exponencialmente [27]. Por tanto, IPT permite cubrir ampliamente la altura de la mayoría de los vehículos.

2.2.2.2. Sistemas IPT aplicado al vehículo eléctrico

De forma general podemos considerar que el sistema de carga inductiva para vehículo eléctrico consta de los siguientes elementos:

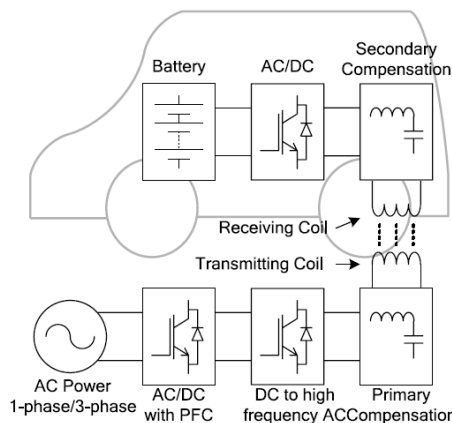


Figura 16: Esquema general de carga inductiva aplicada a VE [28].

Puede apreciarse que está formado por dos conjuntos aislados eléctricamente, uno de ellos conectado a la red eléctrica y el otro en el vehículo. La descripción funcional de cada uno de los bloques sería:

- **Inversor AC/DC.** Conjunto encargado de convertir a corriente continua la corriente alterna de alimentación de la red eléctrica. Puede alimentarse mediante un sistema trifásico o monofásico. Además, cumple la función de elemento de control de potencia.
- **Convertidor CC/CC:** Elemento que eleva la frecuencia hasta valores típicos de uso en sistemas WPT.
- **Inductor Primario con circuito de compensación:** Bloque formado por la bobina transmisora y un circuito de compensación formado por condensadores y bobinas para evitar la corriente de fuga por magnetización.
- **Inductor Secundario con circuito de compensación:** Compuesto por la bobina receptora y el circuito de compensación diseñado para el mismo fin explicado anteriormente. Este conjunto se ubica en la parte inferior del vehículo.
- **Convertidor CC/CC o inversor CC/CA:** Elemento que adapta la corriente proporcionada por la bobina receptora a niveles de tensión adaptados para la carga de la batería o la invierte a corriente alterna para la alimentación del motor eléctrico del vehículo.

2.2.3. Normativa y estándares WPT

En la actualidad se está trabajando en estandarización de sistemas WPT por parte de la “*International Organization for Standardization*” (ISO), la “*International Standards for all Electrical, Electronic and Related Technologies*” (IEC) así como la “*Society of Automotive Engineers*” (SAE) con objeto de lograr por un lado la interoperabilidad entre diferentes fabricantes y por otro, cumplir unos límites de seguridad.

Los estándares más relevantes implicados en la tecnología WPT son los siguientes:

Standard	Topic
ISO 19363	Electrically propelled road vehicles – magnetic field wireless power transfer – safety and interoperability requirements
ISO 15118	Road vehicles – vehicle to grid communication interface
ISO 17409	Connection to external electric power supply
ISO 12405	Li-Ion battery system – performance testing and safety performance
ISO 6469	Electrically propelled road vehicles – safety specifications
IEC 61980	Electric vehicle wireless power transfer systems
IEC 62840	Electric vehicle battery swap system
IEC 61851	Electric vehicle conductive charging system
SAE J2954	Wireless charging of electric and plug-in hybrid vehicles
SAE 1772	Electric vehicle and plug in hybrid electric vehicle conductive charge coupler
SAE J1773	Electric vehicle inductively coupled charging
SAE J2836/6	Use cases for wireless charging communication for plug-in electric vehicles
SAE J2847/6	Communication between wireless charged vehicles and wireless EV chargers
SAE J2931/6	Signalling communication for wirelessly charged electric vehicles
BS EN 61851-1	Electric vehicle conductive charging system: general requirements

Figura 17: Estándares más relevantes [29].

La norma IEC 61980 refleja los aspectos generales para definir el sistema completo, desde las partes propias del sistema de carga para el vehículo eléctrico hasta los módulos de comunicación entre estación y automóvil.

Por su parte SAE J2954, es más específica en cuanto a dimensionamiento y clasificación del sistema, definiendo para la carga estática diferentes clases en función a diferentes aspectos.

Según la potencia suministrada encontramos 4 clases de sistemas:

WPT Power Classes				
Power Class	WPT1	WPT2	WPT3	WPT4
Input Power	3.7 kW	7.7 kW	11.1 kW	22 kW
Minimum efficiency (%)	>85	>85	>85	TBD
Minimum efficiency (offset) (%)	>80	>80	>80	TBD

Tabla 3: Clases de sistemas WPT según SAE J2954 [30].

Puesto que la bobina emisora y receptora deben estar alineadas para realizar la recarga, la norma establece unos márgenes de desalineación admisibles dentro de los cuales la transferencia de potencia deber ser posible, además de soportar un grado de rotación entre emisor y receptor. Esquemáticamente, se pueden representar los diferentes planos de la siguiente manera:

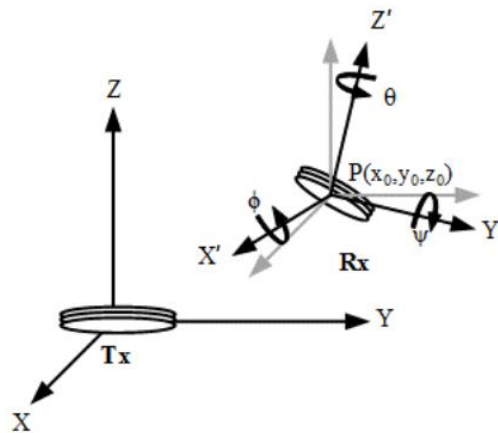


Figura 18: Representación planos de desalineación entre emisor y receptor [31].

Los valores recogidos en cada uno de los ejes anteriormente representados, así como los grados de rotación admisibles pueden verse en la tabla 4:

Misalignments	
Offset direction	Range (mm)
$\Delta X / \Delta Y$	$\pm 75 / \pm 100$
ΔZ	$(Z_n - \Delta_{low}) - (Z_n - \Delta_{high})$
Rotation, Roll and Yaw	$\pm 2, 2$ and 10 degrees

Tabla 4: Desalineación máxima entre emisor y receptor definidos en SAE J2954 [30].

Siendo el Z_n la distancia entre emisor y receptor y $\Delta_{low}, \Delta_{high}$ los límites definidos en la siguiente tabla y que establecen tres clases de sistemas en función a dicha distancia:

Ground Clearance	
Z-Class	Range (mm)
Z1	100-150
Z2	140-210
Z3	170-250

Tabla 5: Clasificación sistemas WPT según separación emisor y receptor [30].

Además de lo anteriormente expuesto, la norma especifica los límites de exposición a campos electromagnéticos para público en general, definiendo tres regiones en el vehículo y marcando como límite 21,2 μT para la 2 y 3. La ubicación de cada una de estas regiones puede apreciarse en la figura 19.

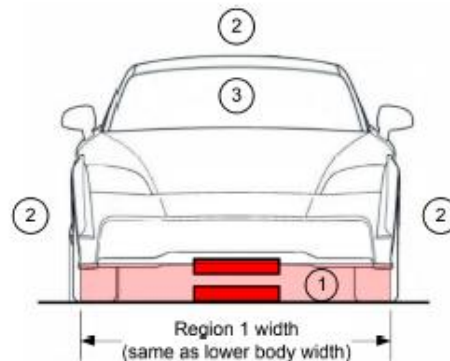


Figura 19: Regiones definidas en vehículo con limitación de exposición a EMF [30].

El último aspecto a destacar es la frecuencia de operación del sistema WPT que debe estar comprendida entre 81,38 kHz y 90 kHz según este estándar.

En la actualidad, se ha llegado a un acuerdo entre SAE e ISO para desarrollar una norma común que refleje las medidas de seguridad a tomar, el rendimiento mínimo del sistema y otros aspectos relacionados con la interoperabilidad para los sistemas de carga con objeto de conseguir unos criterios de referencia únicos que faciliten la penetración en el mercado y el crecimiento de la tecnología.

2.3. Estado de la tecnología DWPT

La tecnología DWPT se encuentra actualmente en fase de pruebas en diversos proyectos lanzados y apoyados por diferentes administraciones, tanto para analizar la tecnología en sí como para estudiar el impacto de implantación de la misma en la red eléctrica, usuarios o la industria automovilística .

Entre ellos, el proyecto Dynacov [32], englobado dentro del proyecto CENEX del Reino Unido y que nació con objeto de revisar el desarrollo actual y futuro de la carga dinámica inalámbrica para vehículo eléctrico, determinar el impacto de esta tecnología en el país, modelar la influencia en la red eléctrica y realizar un examen inicial de negocio, concluyó que en 2021 no se habían presentado soluciones comerciales por parte de los proveedores en los últimos años, debido en gran medida a la propiedad intelectual en torno a la tecnología, siendo ElectReon el único proveedor activo de sistemas DWPT [33] en esa fecha con capacidad para diseñar y fabricar de forma integral todos los componentes del sistema, tanto electrónicos, como pueden ser las bobinas inductoras y receptoras, redes de compensación y circuitería de potencia, como los elementos de control de software necesarios para la monitorización y gestión del sistema, aunque

aclara que solo han tenido en cuenta para realizar dicho estudio los prototipos que tienen presencia en el mercado de alguna forma.

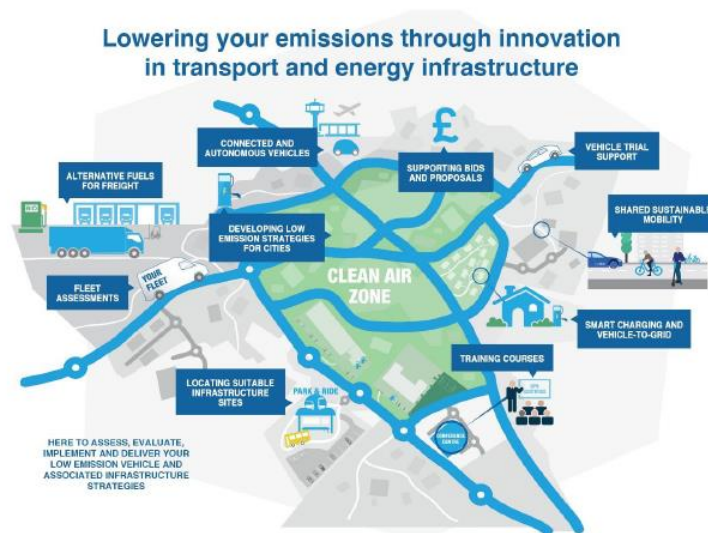


Figura 20: Representación de soluciones para disminuir las emisiones del proyecto Cenex [32].

Aun así, y pese a las escasas soluciones en el mercado, ya se han desarrollado algunas iniciativas en este sentido y otras están actualmente en desarrollo, en ambos casos presentaremos brevemente algunas de ellas.

2.3.1. Proyectos finalizados

Algunas de las iniciativas que se han realizado en este campo y que han finalizado han sido:

- **Proyecto desarrollado por Korean Advanced Institute of Technology (KAIST):** Lanzado entre los años 2011 y 2014. El proyecto consistió en la instalación de tecnología de carga inalámbrica en 372,5 m del total 2,2 km en la ruta Seúl-Grand Park para un tranvía eléctrico. Además de otros 60 m en ruta de 3,76 km para el uso de autobuses eléctricos.

El sistema se diseñó con una potencia de alimentación de 100 kW y se probó con dos autobuses consiguiendo una eficiencia máxima del 85%, y un nivel medido de EMF (*Electromagnetic Field*) 6,25 μ T.



Figura 21: Tranvía eléctrico ruta Seúl-Grand Park [34].

- Proyecto en Mannheim, Alemania:** Desarrollado en cooperación por el operador de transporte regional Rhein-Neckar-Verkehr, Bombardier Transport, el instituto de Tecnología de Karlsruhe y el fabricante de autobuses Hessen 2013. Se implementó una pista de prueba de 80 m con una potencia proporcionada de 200 kW, inicialmente probada para tranvías y posteriormente se testeó en autobuses de 12 metros de largo. La eficiencia reportada del sistema tras las pruebas superó el 90% desde el suministro de red hasta la electrónica del vehículo [35].



Figura 22: Autobús eléctrico en Mannheim [36].

- Proyecto en Versalles, Francia:** Qualcomm Halo junto con Vedecom, dentro del proyecto FABRIC en 2017, implementaron un carril de 100 m para proporcionar 20 kW a velocidades de 100 km/h a dos vehículos simultáneamente. Se realizaron pruebas con dos vehículos Renault Kangoo Z.E. El fabricante indica que el diseño puede alcanzar el 97 % de eficiencia

entre transmisor y receptor, un 90 % desde el punto de suministro de la red eléctrica y tolera una desalineación entre bobinas de 20 cm.



Figura 23: Renault Kangoo en pista de prueba de Versailles [37].

- Proyecto Smartroad Gotland, Suecia:** Englobado dentro de la iniciativa ERS, y financiado por “*Trafikverket*”, la Administración de Transporte de Suecia, se completó un en 2022 un primer tramo de 1,65 km de carretera entre el aeropuerto y el centro de la ciudad de Visby, donde se realizaron pruebas con un camión y un remolque eléctrico de 40 toneladas, alcanzando velocidades de 80 km/h con una potencia media de recepción de 70 kW y tecnología Electreon. El objetivo perseguido era testear el funcionamiento interurbano para implementarlo en autobuses de larga distancia.



Figura 24: Camión eléctrico proyecto Smartroad Gotland [38].

2.3.2. Proyectos actualmente en curso

- Proyecto Tel-Aviv, Israel:** Este proyecto surge por un proceso de colaboración entre el municipio de Tel Aviv-Yafo, Dan Bus Company y Ayalon Highways, financiado por la Autoridad de Innovación de Israel y el Ministerio de Transporte. En 2020 se finalizó la pavimentación y electrificación de un

tramo de carretera de 700 m (entre la universidad y la estación de tren) de un total de 5 km de ruta. Se instaló también una estación de carga inalámbrica, el objetivo era usarlo por autobuses para su ruta con tecnología de supercondensadores de 42 kWh.

El doble sistema diseñado permite que los autobuses reciban energía tanto de forma dinámica como estática. La tecnología usada es de ElectReon.

En siguientes fases del proyecto se prevé extender el sistema a otros puntos de Tel Aviv, así como a diferentes partes de la región Sur de Israel, estimando que pueda ser utilizado por 200 autobuses.



Figura 25: Autobús con tecnología Electreon en Tel Aviv [39].

- **Proyecto Incit-EV:** Proyecto creado en Europa para impulsar la implantación del vehículo eléctrico. Está financiado casi en su totalidad por la Unión Europea y coordinado por CIRCE (Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos) [40]. El objetivo que persigue es analizar y desarrollar mediante 7 casos de uso, diversas soluciones de carga para responder a las necesidades de los usuarios.

- **Caso de uso 4. Cargador HUB en un área de descanso alrededor de Turín:** Se instalará 10 cargadores bidireccionales de 3,6 kW, 1 supercargador unidireccional de 150 kW, 1 super cargador inductivo estático de 100 kW y un cargador inductivo dinámico de 20 kW en un parking.
- **Caso de uso 5. Supercargadores en corredores europeos, Tallín:** Con objeto de estudiar la carga ultrarrápida, se implementará un sistema de 175 kW bidireccional para dar respaldo a la red eléctrica.
- **Caso de uso 6. Cargadores bidireccionales de baja potencia y carga de vehículos eléctricos de movilidad personal en Zaragoza:** Cargadores de media potencia con conexión directa entre ellos de corriente continua. Posibilitarán el intercambio de energía con instalaciones de edificios cercanos, así como con otros vehículos conectados. Usaran energía renovable y baterías para dar soporte a la conexión eléctrica. El prototipo diseñado constara de 1 cargador V2X CHAdeMO (7,4kW – 15kW), 1 cargador V2X CSS2 COMBO (7,4kW – 15kW) y 4 cargadores para bicicleta eléctrica.
- **Caso de uso 7 Cargador estático inductivo para taxis y vehículos públicos en Zaragoza:** Implantación de dos sistemas de carga inductiva de 50 kW a 85 kHz. El objetivo es cargar hasta 1,66 kWh en los dos minutos inmediatamente posteriores al apagado del vehículo, lo que aportará una autonomía de 12 km.
- **Proyecto Arena del Futuro:** Circuito de 1050 m construidos a modo de laboratorio por Stellantis, A35 Brebreimi y otros socios en Italia. Consta de bobinas insertadas en el pavimento con una potencia eléctrica de 1 MW. Para realizar los primeros test se equiparon con tecnología DWPT a dos vehículos, un Fiat 500 eléctrico y un autobús Iveco E-Way.
La diferencia con otros proyectos en este ámbito es que la alimentación se realiza en corriente continua, lo que permite reducir las pérdidas de energía en el proceso de distribución, garantizar la integración directa de energía de fuentes renovables, el uso de cables de menor grosor y de materiales como el aluminio, reduciendo el coste frente al cobre.
Los resultados de las primeras pruebas permiten concluir que se puede viajar a velocidades típicas de carretera sin consumir la energía almacenada en baterías, ofreciendo una eficiencia similar a las estaciones de carga rápida [42].

La integración de bobinas en pista puede verse en la figura 27.



Figura 27: Instalación de bobinas en circuito Arena del Futuro [42].

La pista completa con vehículo de prueba es la siguiente:



Figura 28: Vista aérea circuito Arena del Futuro [43].

2.3.3. Otros desarrollos asociados a carga inalámbrica

A la vez que se está trabajando en la implementación de los sistemas de carga dinámica inalámbrica, se está investigando y desarrollando materiales que faciliten la integración de estos sistemas. Uno de los retos a los que se enfrenta la tecnología son los costes de implementación en carreteras ya construidas.

En este sentido, la empresa Magment GmbH en colaboración con Heritage Environmental Technologies LCC está trabajando en un asfalto magnetizable [44], denominado “Magment”, que permitirá la construcción más rentable de carreteras con posibilidad de suministrar energía a los vehículos que circulan por ella.

Según los desarrolladores, la mezcla asfáltica puede usarse para la transmisión dinámica de energía debido a su composición, 90 % de ferrita y 10% de arena y otros elementos, lo que permite su magnetización [45], además indican que utilizan para su fabricación componentes reciclados.



Figura 29: Hormigón magnetizable [46].

Las características principales del material son las siguientes [47]:

- Alta permeabilidad.
- No requiere proceso de prensado.
- La estructura final es muy robusta y duradera.
- Su densidad se debe a una reacción química con el agua.
- Posee una contracción muy baja, alrededor del 0,5%.
- Es un material muy poco poroso.
- La absorción de agua se sitúa por debajo del 1%.
- Tiene un tiempo de endurecimiento programable.
- Resistente a la corrosión.
- Puede modelarse para tomar cualquier forma.
- Al utilizar restos de ferrita reciclados, su coste es relativamente bajo.



Figura 30: Molde para fabricación de piezas de Magment [47].

El proceso para crear componentes inductivos consiste en verter el cemento en una carcasa, en la que previamente se ha insertado una bobina, de esta forma se crea una estructura activa, protegida y magnética. Mediante el software “Magmath” se pueden controlar los parámetros magnéticos del material con precisión [48].

En la figura 31 puede observarse una prueba realizada con un inductor trifásico fabricado mediante este proceso y la corriente obtenida frente a la teórica:

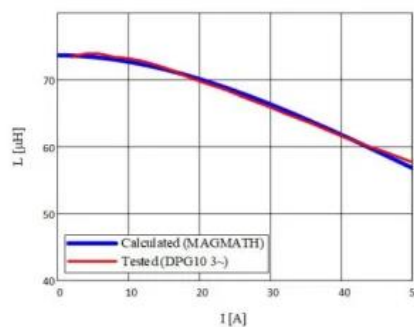


Figura 31: Prueba realizada con inductor trifásico de Magment [47].

Algunas bobinas fabricadas con esta tecnología se muestran en la figura 32.

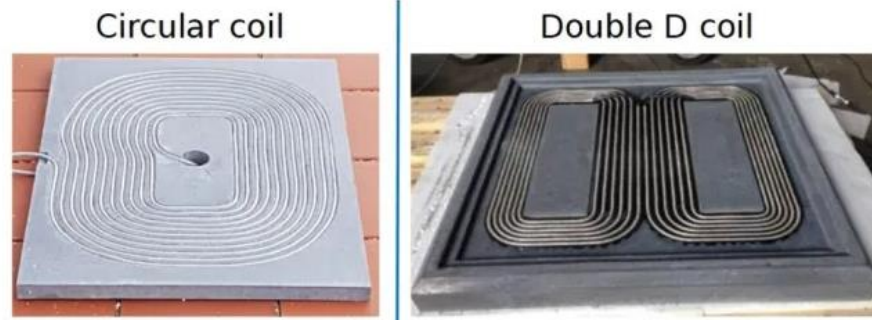


Figura 32: Bobina circular y bobina doble “D” de Magment [47].

Aunque las pruebas realizadas muestran que es posible aplicarlo a la carga dinámica para vehículo eléctrico, se están realizando diferentes test para evaluar aspectos como la saturación del material o la capacidad de carga que puede suministrar.

2.3.4. Conclusiones tras análisis de desarrollos

Como puede extraerse de los desarrollos en curso, el estado de la tecnología está en fase de progreso y pilotaje en diferentes ubicaciones para analizar las diversas opciones de montaje y uso.

Las iniciativas ya finalizadas se han realizado sobre tramos de prueba de longitud menor a 500 m (salvo el proyecto Smartroad Gotland) y han estado encaminadas a transporte público.

La misma tónica siguen los pilotajes que actualmente se han lanzado, con la particularidad del proyecto Arena del Futuro, que se está llevando a cabo sobre una pista de 1 km y posibilitará la extracción de conclusiones sobre el uso de la tecnología en automóviles de turismo desplazándose a velocidades de vías interurbanas.

Por otro lado, los diversos estándares no están definidos por completo y van más encaminados a la carga inductiva estática, por ello algunas iniciativas están probando con sistemas que no se adaptan a los mismos en su totalidad.

El análisis y desarrollo de nuevos materiales es un indicador del potencial de la tecnología y puede impulsar la viabilidad de implantación de la misma.

3. Dimensionamiento general del Sistema DWPT

Los sistemas inductivos de transferencia de potencia inalámbrica y entre ellos los sistemas DWPT basan su funcionamiento en la transmisión de energía a través del aire. Esencialmente consta de dos bobinas eléctricamente aisladas y acopladas magnéticamente con el mismo principio de funcionamiento que un transformador clásico.

En este capítulo se realiza el dimensionamiento general de un sistema DWPT. En primer lugar, se presenta la teoría que permite entender el acoplamiento magnético en el modelo de transformador clásico como base sobre la que se desarrolla el sistema.

Posteriormente, se exponen los componentes principales del sistema DWPT analizando sus características y su función dentro del conjunto, para finalmente, desarrollar un modelo funcional válido sobre el que plantear su instalación en una ubicación real.

3.1. Análisis de componentes del sistema DWPT

Con objeto de sentar la base teórica que rige el acoplamiento magnético, se realiza un análisis de los componentes que forman parte de un sistema DWPT, en particular, los que componen el sistema de transmisión de potencia ubicado en la carretera y que son los encargados de la emisión de la energía que recibe el vehículo.

Un sistema dinámico de transferencia de potencia inalámbrica está formado por los elementos representados en la figura 34 [50].

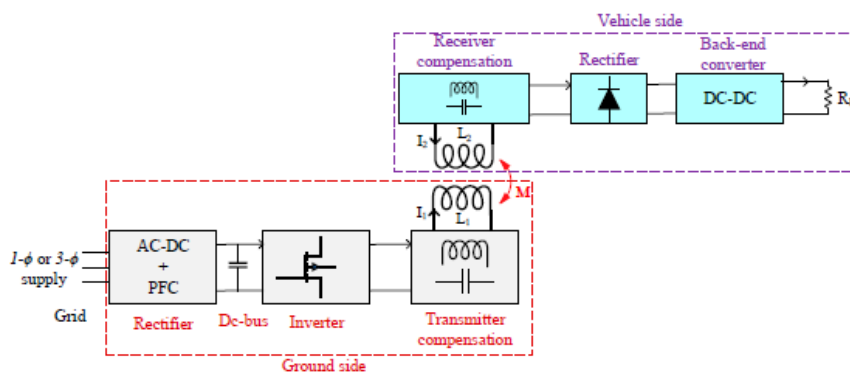


Figura 33: Arquitectura general de un sistema DWPT [50].

Puede apreciarse que el sistema consta de dos partes diferenciadas. Por un lado, en la parte del transmisor que se ubica en la vía de circulación, se encuentra la bobina transmisora o almohadilla inductora encargada de suministrar la potencia de la red por

medio de una corriente alterna de alta frecuencia. Según la norma SAE J2954, esta frecuencia debe estar comprendida entre 81,38 kHz y 90 kHz [30], utilizándose como valor estándar 85 kHz [50].

Además, se encuentra una red de compensación, un inversor que se alimenta de un conjunto rectificador que convierte a corriente continua la energía suministrada por la red en alterna. La alimentación de este bloque puede realizarse en modo trifásico o monofásico.

En el lado del receptor se ubica la bobina que recibe la tensión inducida del lado opuesto del sistema, una red de compensación, un módulo rectificador que convierte la corriente alterna en continua y un convertidor CC-CC que adapta la tensión a un valor adecuado para cargar la batería del vehículo o alimentar el motor eléctrico.

La transferencia de potencia entre la bobina emisora y receptora se realiza mediante acoplamiento magnético. Este sistema se puede asimilar al modelo de transformador clásico, donde el devanado del primario y secundario se corresponden con las bobinas del sistema DWPT.

Se hace necesario un análisis de dicho modelo como paso previo a presentar cada uno de los componentes, para introducir el fundamento teórico que rige el modo de transferencia de potencia y presentar la base sobre la que se desarrollan el resto de elementos.

3.1.1. El modelo de transformador clásico

Dentro del modelo clásico de acoplamiento magnético hay dos parámetros fundamentales que rigen el funcionamiento. Se trata, por un lado, del factor de acoplamiento entre las bobinas y por otro, la selección de una correcta frecuencia de trabajo que maximice el rendimiento general del sistema.

A continuación, se analizan estos dos parámetros como paso previo a la presentación del sistema.

3.1.1.1. Acoplamiento del modelo de transformador

Para entender los sistemas de transferencia de potencia inductivos, hay que estudiar el acoplamiento en un transformador clásico.

De forma general, podemos aproximar el acoplamiento de dos bobinas magnéticamente alimentadas por una fuente de alimentación y conectadas a una carga mediante el circuito de la figura 33.

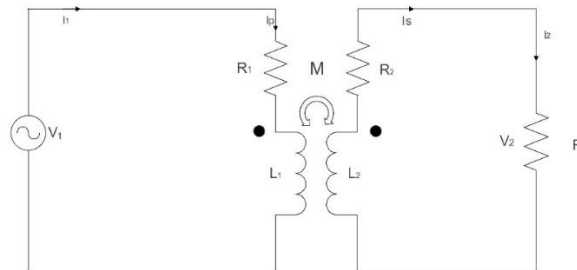


Figura 34: Esquema general del modelo de transformador.

Las ecuaciones que rigen el circuito vendrían dadas por [49]:

$$\vec{V}_1 = (R_1 + jL_1\omega)\vec{I}_p - jM\omega\vec{I}_s \quad (1)$$

$$R_L\vec{I}_2 + (R_2 + jL_2\omega)\vec{I}_s - jM\omega\vec{I}_p = 0 \quad (2)$$

Puesto que, en la mayoría de los sistemas, la resistencia de carga “ R_L ” va a ser mucho mayor que la resistencia ofrecida por la bobina “ L_2 ”, podría considerarse que “ R_2 ” igual a cero, la tensión en el secundario podría expresarse como:

$$\vec{V}_2 = jM\omega\vec{I}_1 - jL_2\omega\vec{I}_s = 0 \quad (3)$$

Para obtener la máxima potencia aparente transferida de primario a secundario debemos multiplicar la corriente de cortocircuito por la tensión en circuito abierto.

Analizando el circuito, cuando el secundario se encuentra en circuito abierto, la tensión sobre la bobina sólo dependería de la corriente del primario, de la forma:

$$\vec{V}_{oc} = jM\omega\vec{I}_p \quad (4)$$

En caso de secundario en cortocircuito, la resistencia de carga sería nula y tendríamos una corriente que se corresponde con:

$$\vec{I}_{sc} = \frac{M}{L_2}\vec{I}_p \quad (5)$$

Con las ecuaciones anteriores obtenemos una potencia aparente máxima en secundario que se corresponde con la ecuación:

$$\vec{S}_{SM} = jM\omega\vec{I}_p \frac{M}{L_2}\vec{I}_p = j\left(\frac{\omega M^2 \vec{I}_p^2}{L_2}\right) \quad (6)$$

Según se indica en [49], incluyendo condensadores en el secundario, trabajaríamos en resonancia y se producirá un incremento de la potencia transferida:

$$\vec{S}_{SMmax} = \vec{S}_{SM}q_s = j\left(\frac{\omega M^2 \vec{I}_p^2}{L_2}\right)q_s \quad (7)$$

La potencia activa máxima en el circuito secundario se corresponde con:

$$\vec{P}_{Smax} = \frac{\omega M^2 I_p^2}{L_s} q_s \quad (8)$$

A su vez, el factor que define el acoplamiento entre las bobinas, denominado “*factor de acoplamiento*” puede definirse como el coeficiente de inducción mutua entre la media geométrica de las inductancias del primario y secundario.

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}} \quad (9)$$

Estas ecuaciones sientan las bases que rigen los sistemas de transferencia de potencia inductiva y de ellas se extraen las siguientes conclusiones [49]:

- Para incrementar el valor de potencia activa máxima, necesitamos un factor de calidad “ q_s ” elevado, pero estará limitado a 10 para no comprometer la estabilidad del sistema. En caso de valores superiores hay que verificar la estabilidad como se exponen en el capítulo 3.2.2.2.
- Para minimizar la cantidad de cobre a usar, se debe aumentar la frecuencia de trabajo, ya que la corriente “ I_p ” disminuirá.
- La potencia a transferir es proporcional al coeficiente de inducción mutua e inversamente proporcional a la inductancia del circuito secundario.
- Se deben usar condensadores o bobinas para sintonizar el circuito secundario y que la transferencia de potencia sea máxima.

3.1.1.2. Selección de la frecuencia de trabajo

La elección correcta de la frecuencia de trabajo para el sistema inductivo es un parámetro que determina el diseño del prototipo, pues en función a este valor se

dimensionan los condensadores que forman parte de la red de compensación que se presentará posteriormente.

Para evaluar el efecto de esta variable hay que analizar la impedancia del secundario reflejada en el primario y la impedancia total vista desde la fuente de alimentación. Analizando de nuevo el circuito de la figura 33, se extrae que la impedancia del primario “ Z_p ” se corresponde con:

$$Z_p = R_1 + jL_1\omega \quad (10)$$

Por tanto, podemos reescribir la ecuación (1) como:

$$\vec{V}_1 = Z_p \vec{I}_p - jM\omega \vec{I}_s \quad (11)$$

Por su parte, la impedancia en el secundario, puesto que se había considerado la resistencia de la bobina despreciable frente a la de carga, se corresponde con:

$$Z_s = jL_2\omega \quad (12)$$

Según esto, la ecuación (3) puede expresarse como:

$$jM\omega \vec{I}_p - Z_s \vec{I}_s = 0 \quad (13)$$

Relacionando la intensidad de corriente entre secundario y primario se obtiene:

$$\vec{I}_s = j \frac{M\omega}{Z_s} \vec{I}_p \quad (14)$$

Sustituyendo el valor de la corriente en el secundario en la ecuación (11) puede reescribirse como:

$$\vec{V}_1 = \left(Z_p + \frac{M^2\omega^2}{Z_s} \right) \vec{I}_p \quad (15)$$

Siendo la impedancia del secundario reflejada en el primario:

$$Z_r = \frac{M^2\omega^2}{Z_s} \quad (16)$$

Trasladando este valor de impedancia a la ecuación (15) se consigue redefinir como:

$$\vec{V}_1 = (Z_p + Z_r) \vec{I}_p = Z_{pt} \vec{I}_p \quad (17)$$

Donde “ Z_{pt} ” se corresponde con la impedancia desde la fuente de alimentación “ \vec{V}_1 ”.

La máxima transferencia de potencia se alcanzará cuando la impedancia reflejada sea igual a la impedancia del primario conjugada, en [49] desarrollan las ecuaciones y exponen que trabajando en resonancia en ambos devanados la frecuencia de trabajo se corresponde con:

$$\omega = \frac{\sqrt{R_1(R_2+R_L)}}{M} \quad (18)$$

Así mismo indican, que a esta frecuencia la transferencia de potencia será máxima pero no la eficiencia, por tanto, es necesario encontrar un factor “ K_D ” que aumente dicha eficiencia, de la forma:

$$\omega = K_D \frac{\sqrt{R_p(R_S+R_L)}}{M} \quad (19)$$

3.1.2. Almohadillas inductivas

Es común en la terminología DWPT denominar a las bobinas emisoras y receptoras con el término de “*almohadillas inductivas*” y constituyen una parte crítica dentro del conjunto, pues se encargan de transferir y recibir la potencia desde la fuente de alimentación al vehículo. Por tanto, el diseño óptimo de estos elementos es fundamental para el funcionamiento final del sistema

En cuanto a sus características físicas, aunque se han probado diferentes diseños, en [51] nos presentan una propuesta de arquitectura tanto de la bobina emisora como de la receptora aplicada a carga inductiva:

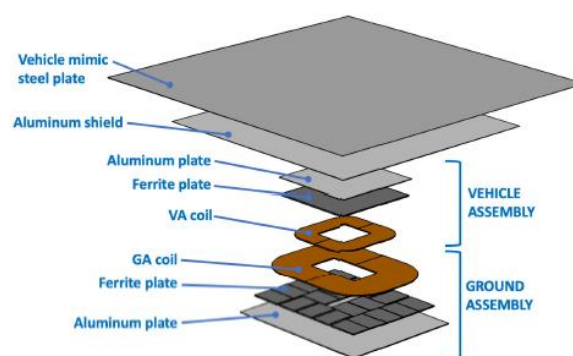


Figura 35: Diseño de bobina emisora y receptora propuesto por SAE J2954 [51].

Como puede apreciarse, ambas almohadillas se sitúan sobre una placa de ferrita y ésta a su vez descansa sobre otra placa de aluminio. El objetivo de estas placas es aumentar la eficiencia total del sistema pues protegen y reflejan el campo magnético dentro del área de transferencia inductiva.

Otro de los parámetros que van a definir la tipología del diseño es el factor de acoplamiento (9). Dicho parámetro toma valores entre 0 y 1. Aunque en el acoplamiento del transformador clásico suele estar cercano a la unidad, en los sistemas de transferencia de potencia inductiva dicho valor, frecuentemente, se encuentra por debajo de 0,2 [52].

En base a esto, se consideran sistemas “débilmente acoplados” o “*Flat-pickup*” [53], característica que implica optimizar el diseño del sistema de compensación y de las propias bobinas y los hacen apropiados para el uso en sistemas DWPT pues la separación de las bobinas es comparable a las dimensiones físicas de las mismas.

En función a la componente de flujo que capture el inductor del lado del vehículo, encontramos dos tipos de sistemas diferentes, denominados de captura horizontal o tangencial y de captura vertical o normal.

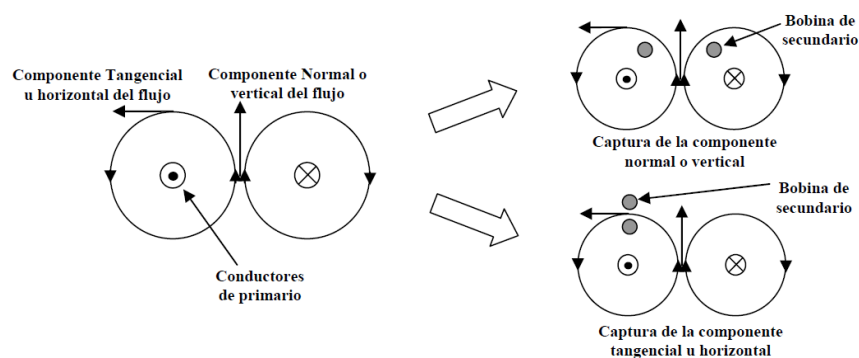


Figura 36: Topologías de sistemas en función a la captura de flujo [53].

Las características principales de estas topologías son:

- **Sistemas de captura de flujo horizontal o tangencial:** La máxima transferencia de potencia se obtiene cuando la bobina receptora está ubicada sobre uno de los conductores del lado del emisor, lo que hace que capture la componente de flujo horizontal. En función si se utiliza un conductor o dos para la emisión se clasifican en sistemas unipolares o bipolares.

Puesto que necesitamos una ubicación precisa entre inductores para capturar la mayor cantidad de flujo posible, la desalineación permitida es baja y por ello no suelen utilizarse en sistemas DWPT.

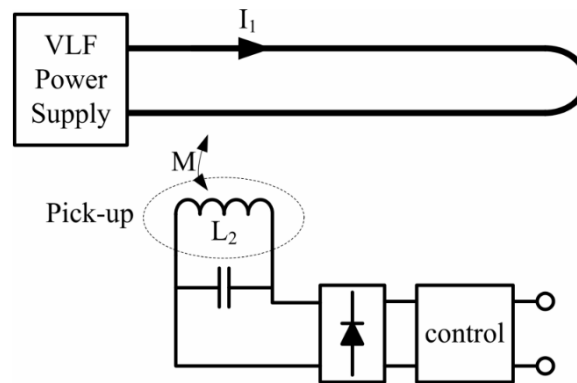


Figura 37: Esquema general sistema de captura de flujo tangencial [53].

- Sistemas de captura de flujo normal o vertical:** Este tipo de sistemas están formados por dos almohadillas, inductora y receptora, planas y situadas una sobre la otra en la componente vertical, lo que hace que en recepción se capture el flujo en este sentido.



Figura 38: Sistema de captura de flujo normal [54].

Son los sistemas que más se utilizan para DWPT pues permiten desalineaciones mayores entre bobinas [55]. Las almohadillas inductoras suelen ser similares en tamaño y pueden estar arrolladas en núcleos magnéticos o con núcleo al aire.

3.1.2.1. Geometría de las bobinas en sistemas de flujo vertical

Con objeto de optimizar la transferencia de potencia, habrá que tener en cuenta la geometría de las bobinas, pues este parámetro va a influir en el coeficiente de autoinducción “ L ” de cada devanado y el coeficiente de inducción mutua “ M ”.

Las formas geométricas de almohadillas inductoras más comunes son la circular y la rectangular, entendiendo que una disposición cuadrada se puede considerar, a nivel de cálculo, como una rectangular con los lados de igual longitud.

Según esto, la representación de cada disposición con sus dimensiones se corresponde con la presentada en la figura 39.

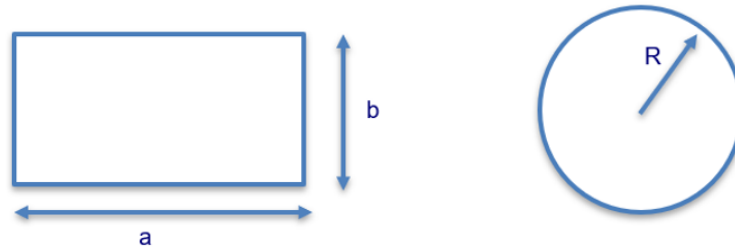


Figura 39: Disposiciones geométricas de bobinas.

Si consideramos que la sección del conductor es “S” y “N” el número de vueltas del arrollamiento, podemos determinar el diámetro “d” equivalente como:

$$d = 2 \cdot \sqrt{\frac{N \cdot S}{\pi}} \quad (20)$$

Con este parámetro y las características físicas en lo que a dimensiones de las bobinas inductoras se refiere, en [49] se presenta una metodología de cálculo tanto del coeficiente de autoinducción como del coeficiente de inducción mutua, exponiendo las siguientes ecuaciones para cada uno de ellos:

Geometría	Coficiente de autoinducción L
Circular	$L = \mu_0 N^2 R \left(\ln \frac{16 \cdot R}{d} - 2 \right)$
Rectangular	$L = 4 \cdot 10^{-7} N^2 \left[(a + b) \ln \left(\frac{4a \cdot b}{d} \right) - a \cdot \ln(a + \sqrt{a^2 + b^2}) - b \cdot \ln(b + \sqrt{a^2 + b^2}) + 2\sqrt{a^2 + b^2} + (d - 2(a + b)) \right]$

Tabla 6: Coficiente de autoinducción para diferentes geometrías [49].

Donde “ μ_0 ” se corresponde con la permeabilidad magnética del vacío.

Por otro lado, la resistencia que ofrecen los bobinados también depende de la geometría de los mismos y puede determinarse mediante las ecuaciones de la tabla 7.

Geometría	Resistencia R
Circular	$R = \rho N^2 \pi r S$
Rectangular	$R = \rho N^2 (a + b) S$

Tabla 7: Resistencia de los bobinados según su geometría [49].

Correspondiéndose “ ρ ” con la resistividad del material.

A su vez, hay que determinar el coeficiente de inducción mutua entre bobinas “ M ”, para ello además de tener en cuenta las dimensiones físicas de las mismas, hay que considerar una separación entre ellas “ h ”. Al igual que para los parámetros anteriormente descritos, la geometría va a determinar el tipo de cálculo.

- **Bobinas Circulares:**

Considerando dos bobinas circulares con radios “ R_a ” y “ R_b ”, la ecuación empleada se corresponde con [49]:

$$M = \mu_0 N_1 N_2 \pi \sqrt{R_a R_b} \left(\frac{F_K^3}{16} + 3 \frac{F_K^5}{64} \right) \quad (21)$$

Siendo el coeficiente “ F_K ”:

$$F_K = \sqrt{\frac{4 \cdot R_a \cdot R_b}{(R_a + R_b)^2 + h^2}} \quad (22)$$

- **Bobinas rectangulares con igual dimensión:**

Considerando dos bobinas rectangulares con lados “ a_1 ”, “ b_1 ” y “ a_2 ”, “ b_2 ” puede determinarse el coeficiente de inducción mutua como [49]:

$$M = \frac{\mu_0}{\pi} N_1 N_2 \left[\frac{a_1 \ln \left(a_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2} \right) \left(\sqrt{h^2 + b_1^2} \right)}{\left(a_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2} \right) \cdot h} + \frac{b_1 \ln \left(b_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2} \right) \left(\sqrt{h^2 + b_1^2} \right)}{\left(b_1 + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2} \right) \cdot h} \right] + \frac{\mu_0}{\pi} N_1 N_2 \left[2 \left(h - \sqrt{h^2 + a_1^2} - \sqrt{h^2 + b_1^2} + \sqrt{h^2 + a_1^2 + b_1^2} \right) \right] \quad (22)$$

- **Bobinas rectangulares con diferente dimensión:**

En este caso, tendremos una situación como la presentada en la figura 40.

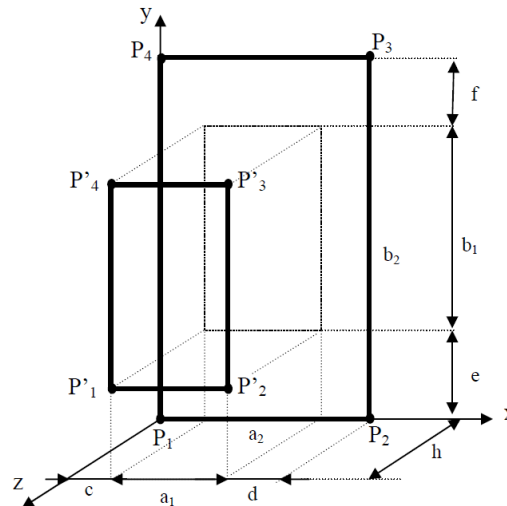


Figura 40: Dimensiones de bobinas rectangulares [49].

Donde las distancias “c” y “e” indican la posición relativa de la bobina receptora con respecto a la emisora.

Para determinar el coeficiente de inducción mutua entre ambas bobinas se usa la expresión de Neumann [45], que se corresponde con:

$$M = \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 N_2 \oint_{\gamma_1} \oint_{\gamma_2} \frac{dl \cdot dl'}{r} \quad (23)$$

El desarrollo de la expresión anterior se realiza por segmentos, teniendo en cuenta que cada segmento será influenciado por los segmentos paralelos de la bobina opuesta. En [49] se presenta el resultado obtenido analizando tanto los segmentos horizontales como los verticales. La ecuación obtenida se utiliza para el cálculo en el presente trabajo y se refleja en el Anexo II debido a su extensión.

3.1.3. Circuito de compensación

En los sistemas de transferencia de potencia inalámbrica y en particular en los de transferencia dinámica, vamos a encontrar una inductancia de fuga asociada al espacio de aire entre almohadilla emisora y receptora. Para mitigar este efecto es imprescindible diseñar un sistema de compensación que minimice este efecto, mejorando la potencia y eficiencia transmitida en el sistema [50].

Además, el diseño del sistema de compensación va a optimizar la potencia aparente absorbida de la fuente de alimentación, puesto que limitará la potencia reactiva para conseguir un factor de potencia cercano a la unidad. Lo que se pretende es compensar la parte imaginaria de la impedancia total del sistema vista desde la fuente a la frecuencia de trabajo.

Las topologías de compensación pueden dividirse en redes resonantes clásicas o básicas y redes resonantes híbridas o compuestas.

En primer lugar, las redes de compensación básicas están compuestas por un único condensador conectado en serie o en paralelo en las dos partes del sistema, dando lugar a 4 configuraciones elementales que se presentan en la figura 41.

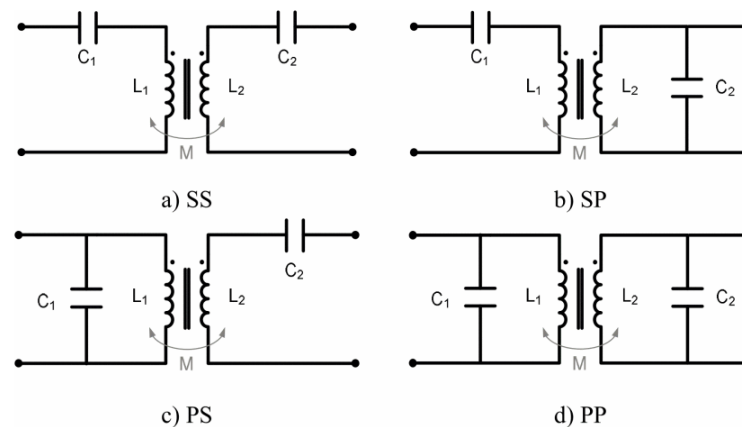


Figura 41: Configuraciones clásicas de sistema de compensación [56].

Por otro lado, las configuraciones híbridas están compuestas por combinaciones de bobinas y condensadores en ambos lados del sistema de transferencia, dando lugar a un número mayor de posibilidades de compensación [50], como se aprecia en la figura 42.

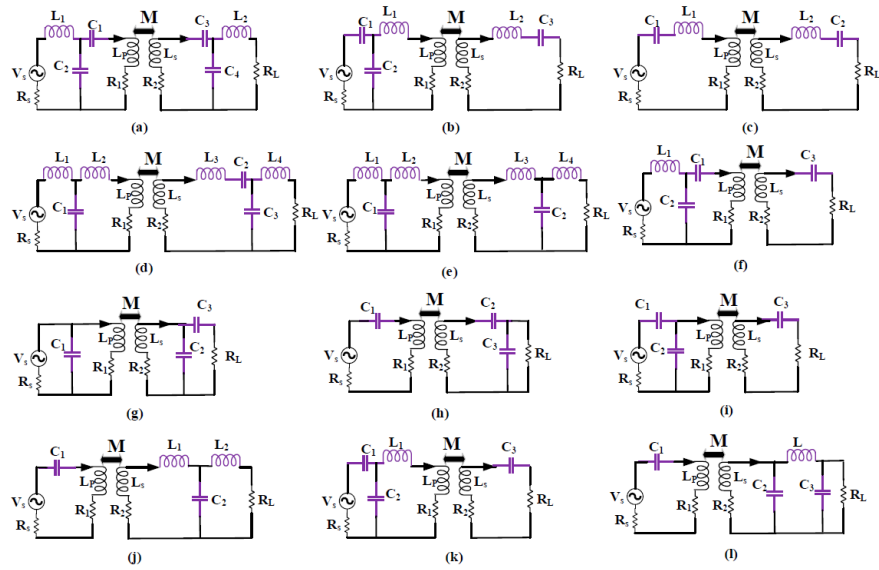


Figura 42: Configuraciones híbridas (a) LCC-LCC, (b) CCL-LC, (c) LC-LC, (d) LCL-LCCL, (e) LCL-LCL, (f) LCC-S, (g) P-PS, (h) S-SP, (i) S-LCL, (k) CCL-S y (l) S-CLC [50].

En [50] se realiza un análisis de las principales características de ambos tipos de topologías, pudiendo resumirlas en las siguientes tablas 5 y 6.

Parámetro	Topologías			
	SS	SP	PS	PP
Impedancia total	Se reduce con la desalineación	Se reduce con la desalineación	Aumenta con la desalineación	Aumenta con la desalineación
Sensibilidad de desalineación	Bajo	Ligeramente superior a SS	Aumenta con la desalineación	Aumenta con la desalineación
Margen de acoplamiento	No permitido	Permitido	Permitido	Permitido
Eficiencia	Muy alta	Baja	Baja	Alta
Potencia de salida	Alto	Alto	Bajo	Bajo
Salida en impedancia de carga	Tensión y corriente	Tensión y corriente	Solo tensión	Solo corriente
Nivel de potencia propuesto	Preferiblemente para alto nivel de potencia	Nivel de potencia bajo o medio	Alto nivel de potencia	Alto nivel de potencia
Clasificación de voltaje del inversor	Se requiere un voltaje de enlace de CC bajo (más alto que SP)	Voltaje de enlace bajo	Voltaje más alto que SS y SP	Voltaje más alto que SS y SP
Clasificación de corriente del inversor	Corriente de bobinas del transmisor	Corriente de bobinas del transmisor	Componente activo de la corriente de bobina del transmisor	Componente activo de la corriente de bobina del transmisor
Otras características	1.- Corriente de salida independiente de la carga. 2.- Mayor potencia y eficiencia que SP frecuencias superiores a 1 MHz.	1.- Autoinductancia del receptor más pequeña que SS. 2.- Corriente estable debido a la compensación paralela en el receptor.	1.-Alta eficiencia y factor de potencia a inductancia mutua relativamente baja. 2.- Rango relativamente grande de variaciones de carga	Se utiliza para cableado alimentado por fuente de corriente de alta potencia y largas distancias
Inconvenientes principales	1.- La carga depende de la relación de tensión transmitida en condiciones de carga parcial. 2.- Requiere autoinducción secundaria mayor que SP. 3.- Presenta un voltaje en el condensador alto debido a la alta frecuencia	Carece de bloqueo de componentes de CC.	1.- Requiere una fuente de entrada de corriente para evitar cualquier cambio instantáneo en el voltaje. 2.- Alta resistencia de entrada, se requiere un alto voltaje de acoplamiento	1.- Factor de potencia bajo. 2.- Altos requisitos de fuente de corriente y alta tensión de carga del primario.
Solución propuesta	Sistemas WPT y DWPT	Aplicaciones biométricas y de baja potencia	Aplicaciones de alta potencia, vehículos eléctricos y autobuses	Aplicaciones de alta potencia, vehículos eléctricos y autobuses

Tabla 8: Características principales de las topologías básicas [50].

Parámetro	Topologías			
	LCL y variantes	LCC y variantes	SP-S	S-SP
Coste y tamaño	Alto	Menor tamaño y coste que topología LCL	No muy alto	No muy alto
Elementos adicionales requeridos	Dos inductancias	Un condensador, una inductancia	Un condensador	Un condensador
Características	1.- Reduce la clasificación de VA. 2.- Alta eficiencia con factor de baja calidad. 3.- Menores pérdidas en el bobinado. 4.- Mantiene una alta eficiencia durante todo el rango de acoplamiento de carga.	1.- Reduce la tensión de corriente en el inversor. 2.- Compensa la potencia reactiva en el lado del receptor. 3.- Alta tolerancia a la desalineación.	1.- Consigue la estabilidad de tensión y bloquea la componente CC de la tensión de entrada mediante un condensador conectado en serie. 2.- Potencia de salida constante para una alta desalineación.	1.- Proporciona una correcta estabilidad de salida y menores pérdidas de circulación. 2.- Ganancia de voltaje de salida no es sensible al cambio de parámetro alrededor del punto de intersección
Desventajas	La impedancia transferida al transmisor contiene parte imaginaria y real de la carga	Más complejo en lo que al control se refiere	Voltaje alto en el condensador debido a la alta frecuencia	No determinado
Solución propuesta	WPT/DWPT	WPT/DWPT y aplicaciones de alta frecuencia	Carga de batería de sistema móvil	Aplicaciones de alta potencia

Tabla 9: Características principales de las topologías híbridas [50].

3.1.3.1. Topologías de compensación básicas

Como se ha visto en el apartado anterior, las topologías básicas están formadas por un condensador conectado en serie o en paralelo tanto en el lado de transmisión como en el de recepción.

La introducción de condensadores en el diseño hace que se cree un filtro paso banda entre el propio condensador y la bobina inductora o receptora.

Si se diseña el sistema de manera correcta para que trabaje en resonancia, los armónicos de baja frecuencia son frenados por los condensadores, de manera similar, los de alta frecuencia por la inductancia de las bobinas. En [52] indican que, a la frecuencia de resonancia " f_0 ", la caída de ambos tipos de armónicos es de 20 dB/dec, además la impedancia de entrada alcanza su mínimo.

La representación en diagrama de bode de un sistema resonante RLC indica que por debajo de " f_0 " la amplitud de la frecuencia de entrada disminuye en 20 dB/dec. Mientras que por encima aumenta en la misma magnitud.

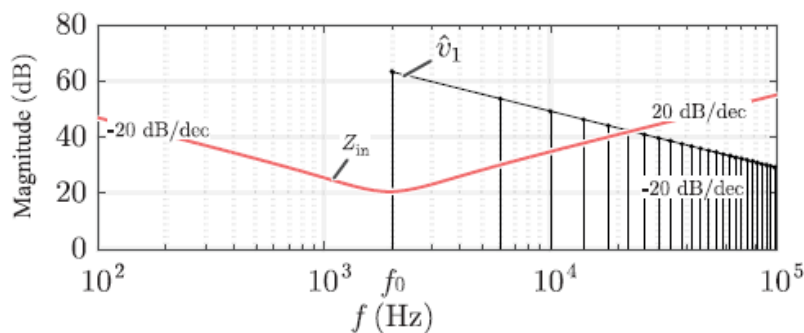


Figura 43: Diagrama de bode de un sistema resonante RLC [52].

Por otro lado, la corriente y el voltaje estarán en fase y por ello la impedancia de entrada es completamente resistiva, lo que posibilita un análisis más sencillo del sistema pues es posible la sustitución del inversor que alimenta el lado del transmisor por una fuente de tensión de corriente alterna.

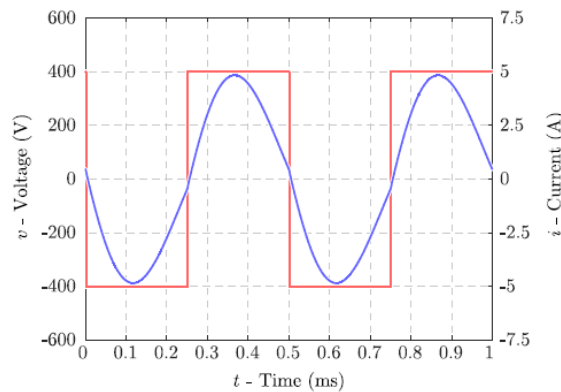


Figura 44: Representación de formas de onda de un sistema DWPT resonante [52].

Los cuatro esquemas básicos de compensación tienen ventajas y desventajas, por tanto, la elección de uno u otro para cada diseño debe analizarse en función a la carga conectada. Por ello, se presentan los diferentes parámetros de cálculo para cada uno de ellos con objeto de poder realizar el análisis correspondiente y revisar el comportamiento del diseño.

Como se ha explicado en el apartado 3.1.2 la elección de la frecuencia óptima de trabajo es fundamental para el diseño del sistema de compensación, para determinarla es preciso calcular la impedancia total del sistema vista desde la fuente y la impedancia reflejada.

En [57] presentan la impedancia total vista desde la fuente para cada una de las arquitecturas. Los circuitos con la nomenclatura de cada elemento se reflejan en la figura 45.

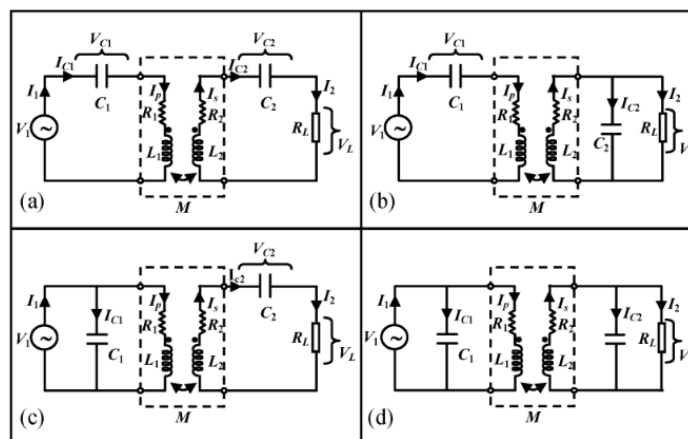


Figura 45: Representación de formas de onda de un sistema DWPT resonante [57].

El resultado de la impedancia total vista desde la fuente “ Z_T ” se refleja en la tabla 10.

Arquitectura Compensación	Impedancia reflejada
SS	$Z_T = \left(R_1 + j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_L + R_2 + j \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right) \right)}$
SP	$Z_T = \left(R_1 + j \left(L_1 \omega - \frac{1}{C_1 \omega} \right) \right) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_2 + j L_2 \omega + \frac{R_L}{1 + j R_L C_2 \omega} \right)}$
PS	$Z_T = \frac{1}{(R_1 + j L_1 \omega) + \frac{\omega^2 M^2}{\left(R_2 + R_L + j \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right) \right)} + j \omega C_1}$
PP	$Z_T = \frac{1}{(R_1 + j L_1 \omega) + \frac{1}{\frac{\omega^2 M^2 (1 + j R_L C_2 \omega)}{(R_L + (R_2 + j L_2 \omega)(1 + j R_L C_2 \omega))}} + j \omega C_1}$

Tabla 10: Cálculo de la impedancia total vista desde la fuente [57].

En cuanto a la impedancia reflejada “Z_r” para cada topología en [49] presentan las ecuaciones de cálculo, dichas ecuaciones están reflejadas en la tabla 11.

Arquitectura Compensación	Impedancia reflejada
SS	$Z_r = \frac{\omega^2 M^2 (R_L + R_2)}{(R_L + R_2)^2 + \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2} - j \frac{\omega^2 M^2 \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)}{(R_L + R_2)^2 + \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)^2}$
SP	$Z_r = \frac{\omega^2 M^2 (1 + j R_L C_2 \omega)}{R_L + (R_2 + j L_2 \omega)(1 + j R_L C_2 \omega)}$
PS	$Z_r = \frac{\omega^2 M^2}{(R_L + R_2) + j \left(L_2 \omega - \frac{1}{C_2 \omega} \right)}$
PP	$Z_r = \frac{\omega^2 M^2 (1 + j R_L C_2 \omega)}{R_L + (R_2 + j L_2 \omega)(1 + j R_L C_2 \omega)}$

Tabla 11: Cálculo de la impedancia reflejada [49].

Como ya se ha expuesto anteriormente, la condición de máxima transferencia de potencia se producirá cuando la impedancia del primario sea igual a la conjugada de la impedancia reflejada, trabajando en resonancia en ambos devanados pueden determinarse las frecuencias óptimas y el valor de los condensadores que se corresponde con [45,52] las ecuaciones reflejadas en la tabla 9.

A. Compensación	Frecuencia óptima	Condensadores primarios	Condensador es secundarios
SS	$\omega = \frac{\sqrt{(R_1(R_2+R_L))}}{M}$	$C_1 = \frac{1}{L_1\omega^2}$	$C_2 = \frac{1}{L_2\omega^2}$
SP	$\omega = \frac{\sqrt{(R_2R_L^2M^2+R_1R_2^2L_2^2)}}{L_2M}$	$C_1 = \frac{L_2^2C_2}{L_1L_2-M^2}$	$C_2 = \frac{1}{L_2\omega^2}$
PS	$\omega = \frac{\sqrt{(R_1(R_2+R_L))}}{M}$	$C_1 = \frac{L_2^2C_2}{L_1 + \frac{M^4}{L_1L_2C_2R_L^2}}$	$C_2 = \frac{1}{L_2\omega^2}$
PP	$\omega = \frac{\sqrt{(R_2R_L^2M^2+R_1R_2^2L_2^2)}}{L_2M}$	$C_1 = \frac{(L_1L_2-M^2)L_2^2C_2}{(L_1L_2-M^2)^2 + \frac{M^4R_L^2C_2}{L_2}}$	$C_2 = \frac{1}{L_2\omega^2}$

Tabla 12: Cálculo de frecuencia y condensadores de primario y secundario por topología [49, 58].

Por su parte, el resto de parámetros eléctricos en cada topología se resumen en la tabla 10 [49].

	SS	SP	PS	PP
I_1	$\frac{V_1}{Z_{T\ SS}}$	$\frac{V_1}{Z_{T\ SP}}$	$\frac{V_1}{Z_{T\ PS}}$	$\frac{V_1}{Z_{T\ PP}}$
I_p	I_1	I_1	$I_1 - j\omega C_1 V_1$	$I_1 - j\omega C_1 V_1$
I_{C1}	I_p	I_p	$j\omega C_1 V_1$	$j\omega C_1 V_1$
V_{C1}	$\frac{I_1}{j\omega C_1}$	$\frac{I_1}{j\omega C_1}$	V_1	V_1
I_s	$\frac{j\omega M I_p}{\left(R_2 + R_L + j\left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}\right)\right)}$	$\frac{j\omega M I_p (1 + j\omega R_L C_2)}{R_L + (R_2 + jL_2\omega)(1 + j\omega R_L C_2)}$	$\frac{j\omega M I_p}{\left(R_2 + R_L + j\left(L_2\omega - \frac{1}{C_2\omega}\right)\right)}$	$\frac{j\omega M I_p (1 + j\omega R_L C_2)}{R_L + (R_2 + jL_2\omega)(1 + j\omega R_L C_2)}$
I_2	I_s	$I_s \frac{1}{(1 + j\omega R_L C_2)}$	I_s	$I_s \frac{1}{(1 + j\omega R_L C_2)}$
I_{C2}	I_s	$j\omega R_L C_2 I_s$	I_s	$j\omega R_L C_2 I_s$
V_{C2}	$\frac{I_s}{j\omega C_2}$	$\frac{I_{C2}}{j\omega C_2}$	$\frac{I_s}{j\omega C_2}$	$\frac{I_{C2}}{j\omega C_2}$
V_L	$R_L I_2$	V_{C2}	$R_L I_2$	V_{C2}
P_2	$R_L I_2^2$	$R_L I_2^2$	$R_L I_2^2$	$R_L I_2^2$

Tabla 13: Determinación de parámetros según topología [49].

Para la elección del sistema de compensación se tendrá en cuenta la relación de transformación entre el circuito primario y secundario. En [52] nos presentan la aproximación a estos parámetros trabajando a la frecuencia de resonancia.

$r_t = \frac{V_1}{V_2}$	$\frac{\omega M}{R_L}$	$\frac{M}{L_2}$	$\frac{L_1}{M}$	$\frac{L_1 L_2 \omega}{R_L M}$
-------------------------	------------------------	-----------------	-----------------	--------------------------------

Tabla 14: Relación de transformación por topología SS, SP, PS, PP [52].

Analizando cada una de las expresiones pueden extraerse las siguientes conclusiones:

- Para la topología SS, el nivel de tensión no depende de las autoinductancias de las bobinas. La potencia deseada a transferir se puede conseguir mediante una combinación de frecuencia y coeficiente de inducción mutua.
- Para topologías SP, si la tensión del secundario es menor que la del primario, se precisa un coeficiente de inducción mutua mayor que la autoinducción de la bobina del secundario. Es posible que no haya relación de espiras para una geometría dada con la que se consiga alcanzar esta premisa.
- Para topologías PS, si la tensión del primario es mayor que la del secundario, se debe cumplir que la autoinducción de la bobina primaria sea mayor que la del secundario. Esto puede conseguirse aumentando el número de espiras y disminuyendo sección.
- Para topologías PP, para una frecuencia y resistencia de carga conocidas, hay múltiples combinaciones de bobinas que pueden cumplir esta condición, sin embargo, si la tensión del secundario es menor que la del primario, es complejo encontrar una combinación de bobinados para los cuales, el producto de sus coeficientes de autoinducción sea mayor que el coeficiente de inducción mutua.

3.1.3.2. Estabilidad del sistema

Una de las condiciones que se busca en el diseño de sistema de transferencia de potencia inductiva es que trabaje a la frecuencia de resonancia, de esta manera, como ya se ha explicado, el sistema se comporta con una impedancia puramente resistiva vista desde la fuente de alimentación y la transferencia de potencia es máxima, aunque posteriormente se multiplique por un factor constante para aumentar el rendimiento.

Es común que para las topologías de compensación encontrar varias raíces reales que anulen la parte imaginaria de la impedancia total del sistema, fenómeno conocido como

bifurcación, dicho fenómeno provoca cambios en los parámetros eléctricos y puede ocasionar daños en la electrónica [59].

Para evitar este hecho, es preciso conseguir que el sistema alcance la estabilidad con una única frecuencia de resonancia. Con objeto de evaluar esta premisa, se establecen unos parámetros de calidad para el circuito primario y secundario “ Q_p ” y “ Q_s ” que se corresponden con los mostrados en la tabla 15.

Topología	SS	SP	PS	PP
Q_p	$\frac{L_p R_L}{\omega M^2}$	$\frac{L_p L_s^2 \omega}{R_L M^2}$	$\frac{L_p R_L}{\omega M^2}$	$\frac{L_p L_s^2 \omega}{R_L M^2}$
Q_s	$\frac{L_p \omega}{R_L}$	$\frac{R_L}{\omega L_s}$	$\frac{L_p \omega}{R_L}$	$\frac{R_L}{\omega L_s}$

Tabla 15: Parámetros de calidad para cada topología de compensación [59].

En un sistema estable se deben cumplir la siguiente la relación mostrada en la figura 46 [59]:

	Primary Capacitance	Bifurcation
SS	$\frac{1}{\omega^2 L_p}$	$Q_p > \frac{4Q_s^3}{4Q_s^2 - 1}$
SP	$\frac{1}{\omega^2 L_p \frac{M^2}{L_s}}$	$Q_p > Q_s + \frac{1}{Q_s}$
PS	$\frac{L_p}{\left(\frac{\omega^2 \cdot M^2}{R}\right)^2 + L_p^2 \omega^2}$	$Q_p > Q_s$
PP	$\frac{L_p - \frac{M^2}{L_s}}{\left(\frac{R \cdot M^2}{L_s^2}\right)^2 + \omega^2 \left(L_p - \frac{M^2}{L_s}\right)^2}$	$Q_p > Q_s + \frac{1}{Q_s}$

Figura 46: Relación entre factores de calidad en sistemas DWPT estables [59].

3.1.4. Convertidores Electrónicos

Para conseguir la transferencia de potencia de la red al vehículo se precisa de una etapa de electrónica de potencia que realice la conversión CA-CC y viceversa.

En función a la ubicación de los elementos, encontramos dos categorías básicas de conversión, la del lado del transmisor ubicado en pista y la del lado del receptor en el vehículo.

Puesto que el sistema a diseñar en el presente proyecto se centra en los elementos de transmisión de potencia, se realiza una introducción teórica de los equipos que forman parte de esta etapa, sin detallar los necesarios para la recepción y alimentación del sistema energético del automóvil.

3.1.4.1. Conversión en el lado de transmisión

Mediante esta etapa se convierte la corriente alterna procedente de la red a frecuencia de 50/60 Hz a la frecuencia de trabajo del sistema DWPT para alimentar la bobina transmisora y maximizar la potencia transferida.

Una de las opciones más comunes para realizar dicha conversión consiste en el diseño de un esquema de doble etapa [60]. En la primera se realiza una transformación de corriente alterna a corriente continua y posteriormente se invierte de nuevo a corriente alterna a la frecuencia deseada.

El esquema general se corresponde con el mostrado en la figura 47.

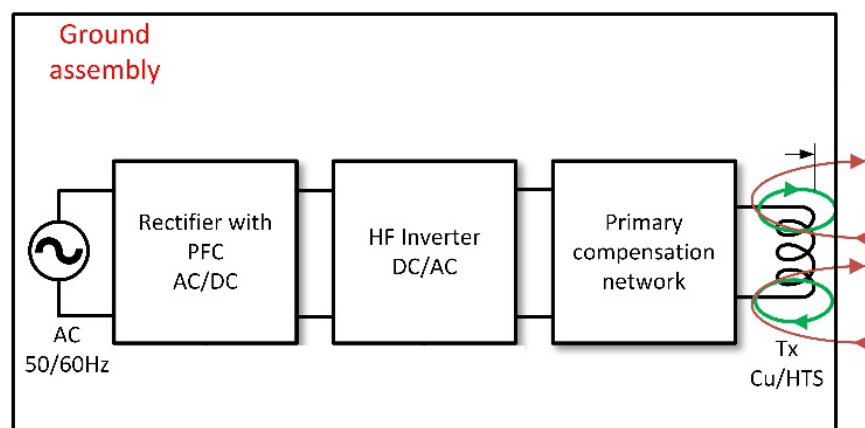


Figura 47: Arquitectura general de un sistema de transmisión WPT con conversión de doble etapa [60].

El bloque rectificador CA-CC presenta varias ventajas al diseño, entre ellas destacan:

- Posibilita el control de energía consumida en el circuito que alimenta, el dimensionamiento de este conjunto debe ir acorde a la potencia requerida en el conjunto de almohadillas inductoras.
- Realiza una corrección del factor de potencia, pues a partir del mismo, la distribución se realiza en corriente continua.
- Compensa la caída de tensión sufrida desde el punto de alimentación hasta la ubicación del equipo, lo que favorece el uso de cableado con menor sección, redundando en una mejora de los costes.
- Reduce las pérdidas del sistema al utilizar corriente continua para transportar la energía desde este equipo hasta los inversores.

Una vez convertida la energía a corriente continua, se utilizan inversores de puente completo para la transformación a corriente alterna de alta frecuencia mediante el uso de IGBT o tecnología MOSFET.

Entre las opciones más comunes de diseño encontramos esquemas de inversores de fase única o de múltiples fases alimentando a una sola bobina o a varias a la vez [50].

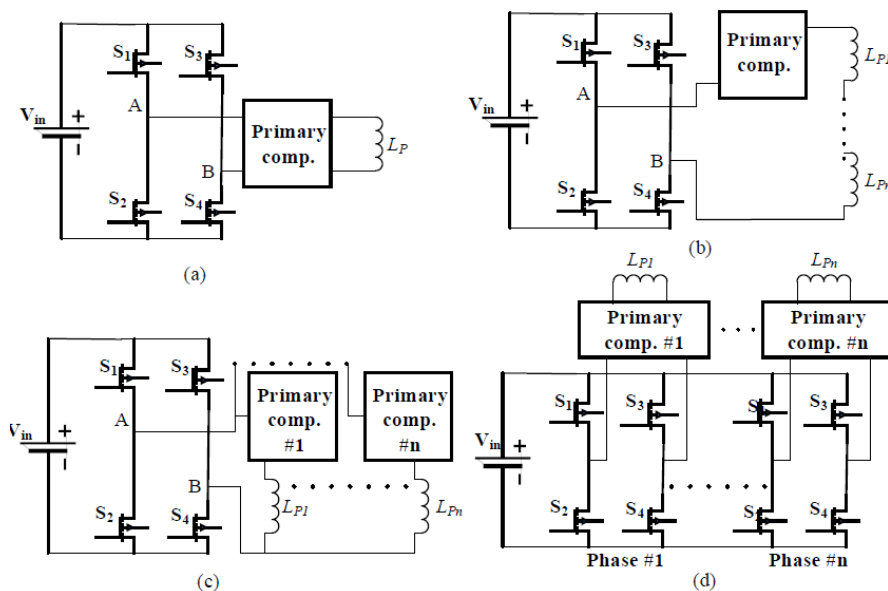


Figura 48: (a) Inversor monofásico con una bobina, (b) Inversor monofásico que alimenta varias bobinas en serie, (c) Inversor monofásico que alimenta varias bobinas en paralelo y (d) Inversor multifásico [50].

Dentro de los estudios realizados en la literatura de referencia aparecen a su vez sistemas de inversores alimentados por corriente en vez de por tensión. En [50] detallan un análisis de ambos tipos de sistemas concluyendo que los sistemas DWPT con una

red de compensación en paralelo en el transmisor funciona de forma más eficiente con alimentación controlada por corriente, mientras que para los que usan compensación en serie la mejor opción es usar inversores alimentados por tensión.

Algunos estudios realizados para el análisis de las ventajas de la última opción descrita resaltan que un inversor alimentado por tensión presenta una fiabilidad mayor, gran eficiencia y una respuesta dinámica más rápida, con la ventaja de que pueden convertirse en un equipo alimentado por corriente conectando una inductancia en serie en el lado del transmisor, lo que conlleva a pasar de una topología básica a una híbrida en el circuito de compensación [61]. En la figura 49 se presentan varias topologías de conexión en el lado del transmisor.

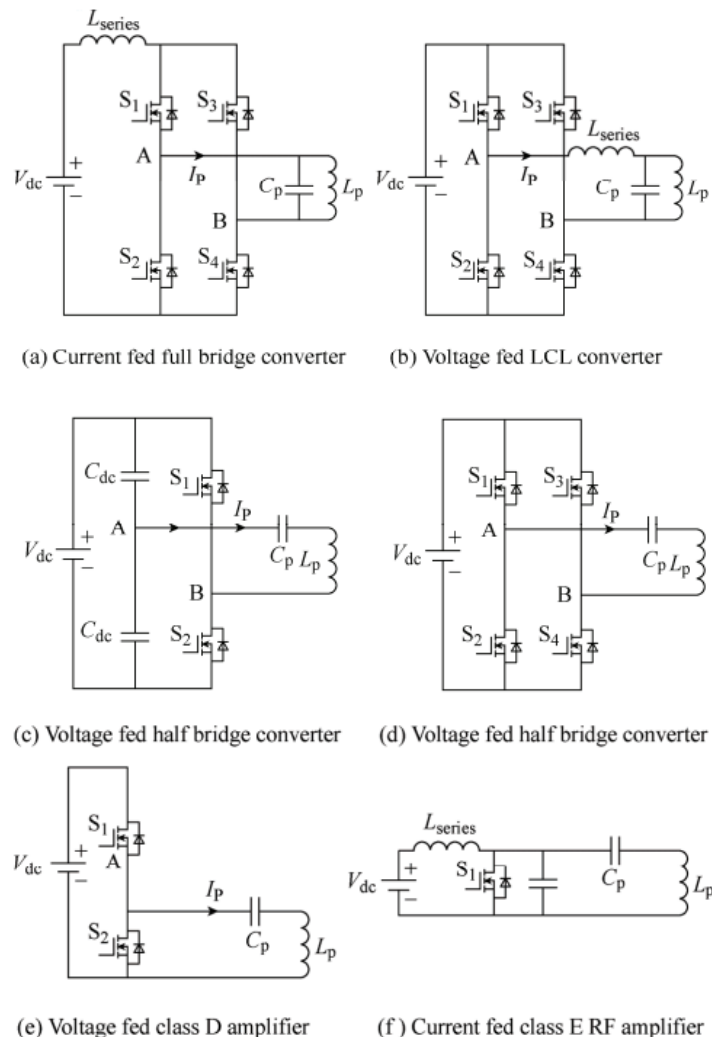


Figura 49: Diferentes topologías de conexión con fuente de alimentación controlada por tensión en el lado del transmisor [52].

En cuanto a la alimentación de las bobinas, en función de los parámetros de diseño, pueden encontrarse esquemas donde cada inversor alimenta un solo elemento o varios, bien sea conectándolas en serie o paralelo.

3.1.5. Sistemas de control

Para aumentar la precisión y eficiencia en el sistema de transferencia de potencia, se hace necesario un sistema que ajuste los inversores de manera correcta proporcionando una corriente o tensión constantes y de esta forma garantizar la alimentación óptima del sistema de transmisión o almacenamiento del vehículo.

Además, se precisa de un sistema que gestione la carga que está realizando el vehículo y transmita esta información a modo que pueda registrarse y usarse para la facturación de la energía transmitida a cada vehículo.

Puesto que implica analizar el circuito de potencia del vehículo, no se ha tratado como objetivo de este proyecto y el sistema de control se dejará para futuros desarrollos. De cara a la inclusión de este elemento en el presupuesto se tomarán los datos de la literatura de referencia como se explica en capítulos posteriores.

4. Diseño del sistema DWPT 30 kW

En el presente capítulo se realiza el diseño de un sistema DWPT de 30 kW, realizando los cálculos necesarios para determinar el circuito de compensación y las bobinas inductora y receptora. Además, se presenta una propuesta para la etapa de conversión de potencia.

A su vez, se analiza el comportamiento en cuanto al acoplamiento entre las bobinas en lo que a la transmisión de potencia se refiere, estudiando cómo afecta la desalineación en caso de implementación del prototipo en un entorno real, para determinar de la forma más aproximada posible la energía que el sistema va a suministrar.

4.1. Diseño del módulo de transmisión y compensación

4.1.1. Cálculo de bobinas y sistema compensación con topología SS

Para el diseño del modelo se plantea un sistema DWPT que pueda suministrar una potencia de 30 kW por inductor, aunque la clasificación según SAE J2954 establece el nivel mayor de carga en 22 kW, catalogado como clase WPT4, se ha establecido una potencia superior, pues al realizar las primeras simulaciones teóricas según el consumo de diferentes vehículos, se aprecia que la energía suministrada no es suficiente para asegurar la circulación de los mismos sin usar la energía almacenada en las baterías.

Por otro lado, se toma como referencia la frecuencia de 85 kHz reflejada como tal en la norma y comprendida entre el rango marcado (81,38 kHz y 90 kHz) para los sistemas de esta tecnología.

La tensión de alimentación a la salida del inversor se ha modelado con 420 V, así como la resistencia de carga $R_L = 5,3 \Omega$, tomando como referencia los valores utilizados para el diseño del modelo de 30 kW presentado en [62].

La topología de compensación elegida ha sido SS, puesto que, al analizar las características de cada una en cuanto a la relación de transformación, esta nos permite independizarnos del nivel de tensión y conseguir la potencia deseada en función a la combinación de frecuencia e inducción mutua, de esta forma aseguramos que, con una geometría elegida, en función a la sección del cable y el número de espiras vamos a conseguir realizar el diseño.

Se propone una geometría rectangular para las bobinas de cobre con las siguientes dimensiones:

- Bobina receptora L_1 : 0,6 m de ancho por 0,5 m de largo.
- Bobina inductora L_2 : 0,6 m de ancho por 1 m de largo.

La separación entre emisor y receptor se establece en $h=0,25$ m, espacio marcado con categoría Z3 en SAE J2954.

Los cálculos se realizan con la posición de la bobina receptora alineada sobre el eje x de la emisora y con la separación entre ambas citada anteriormente. En la figura 50 se representa la situación inicial tomada para el cálculo.

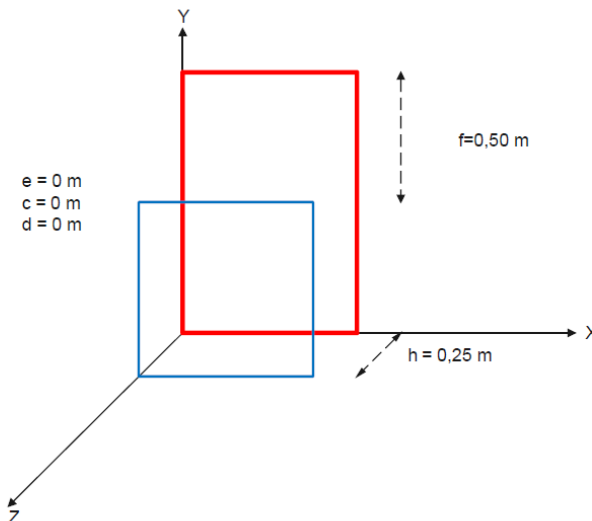


Figura 50: Dimensiones y posición relativa entre bobina emisora y receptora.

En primer lugar, se ha procedido al cálculo del coeficiente de inducción mutua para la frecuencia de trabajo. Con la topología seleccionada, la intensidad del primario se puede determinar mediante la siguiente expresión [52]:

$$I_p = \frac{P_L}{V_1} \quad (24)$$

Lo que se corresponde según los datos de nuestro sistema con:

$$I_p = 70,59 \text{ A}$$

A su vez, a la frecuencia de resonancia podemos establecer la potencia suministrada a la carga como:

$$P_L = \frac{\omega^2 M^2 I_p^2}{R_L} = R_L I_2^2 \quad (25)$$

Operando obtenemos coeficiente de inducción mútua que se corresponde con:

$$M = 1,06 \cdot 10^{-5} H$$

La intensidad del secundario se puede determinar mediante:

$$I_2 = \sqrt{\frac{P_L}{R_L}} = 76 A$$

Con las intensidades de primario y secundario determinadas se elige una sección para el cobre del bobinado. Según los datos recogidos la tabla 16 [63] la sección mínima a utilizar sería de 16 mm² :

SECCIÓN mm ²	3 XLPE (3 cables unipolares o 1 tripolar)		2 XLPE (2 cables unipolares o 1 bipolar)	
	Cobre	Aluminio	Cobre	Aluminio
1,5	23	--	27	--
2,5	30	23	36	27
4	39	30	46	36
6	48	37	58	44
10	64	49	77	58
16	82	62	100	77

Tabla 16: Intensidad de corriente máxima para conductores de cobre según su sección [63].

Aunque se podría utilizar un conductor de sección menor, se ha decidido usar una sección de 95 mm² , lo que equivale a una sección cuadrada de 10 mm por 10 mm, ya que al realizar el cálculo de las autoinductancias con la disposición geométrica de las bobinas seleccionadas, se consigue un coeficiente de autoinducción más cercano al teórico.

Mediante el software Matlab, se ha diseñado un código con los parámetros y ecuaciones necesarias para establecer los diferentes componentes eléctricos. Dicho código se presenta en el Anexo III.

Con objeto de determinar el número de espiras óptimo en cada devanado, se han realizado diferentes pruebas analizando diversas combinaciones y se ha calculado para

cada caso los valores de autoinducción y el coeficiente de inducción mutua, estableciendo finalmente unos valores óptimos de $N_1=10$ y $N_2=5$ para nuestro sistema. Aplicando la ecuación para la determinación del coeficiente de autoinducción para bobinas rectangulares de la tabla 6, se obtienen los siguientes valores:

$$L_1 = 128,59 \mu\text{H}$$

$$L_2 = 57,47 \mu\text{H}$$

El coeficiente de inducción mutua calculado mediante la ecuación presentada en el Anexo II se asemeja en gran medida al teórico:

$$M = 1,04 \cdot 10^{-5} H$$

Lo que se corresponde con un factor de acoplamiento según lo reflejado en la ecuación 9 de:

$$k = 0,1205$$

Puede apreciarse que se trata de un sistema débilmente acoplado, como ya se adelantó en el desarrollo teórico.

Aplicando las ecuaciones de la tabla 12 se han obtenido el resto de parámetros eléctricos. El resumen de los valores más destacados calculados para el sistema se corresponde con:

Variable	Valor estimado del modelo
V_1	425 V
V_L	402 V
Z_L	5,3 Ω
P_L	30,04 kW
$f_{trabajo}$	85 kHz
K_D	38,08
C_1	27,27 nF
L_1	128,59 μH
C_2	61,00 nF
L_2	57,47 μH
R_1	4,10 m Ω
R_s	3,00 m Ω
Z_T	5,78 Ω

Tabla 17: Valor determinado para los principales componentes del circuito diseñado.

Se ha realizado una simulación mediante el software LTSpice para comprobar el diseño. El circuito implementado se corresponde con el representado en la figura 51.

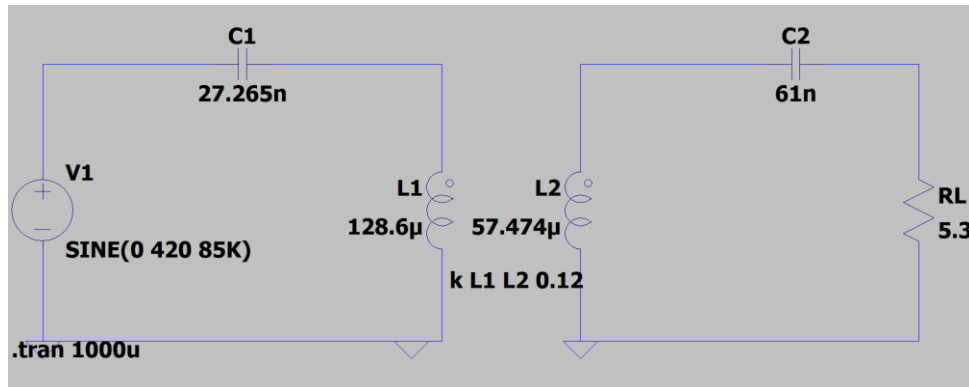


Figura 51: Representación del circuito diseñado mediante LTSpice.

Realizando diferentes simulaciones se comprueba que la respuesta del sistema es acorde a los parámetros de diseño. En la figura 52 se presenta la tensión y la corriente que circula por la resistencia de carga.

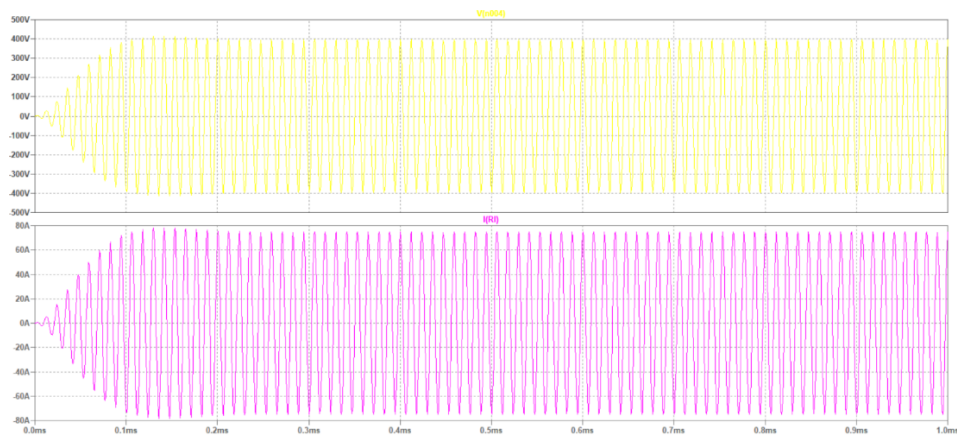


Figura 52: Valores de tensión e intensidad en la resistencia de carga.

La potencia ofrecida a la carga puede apreciarse en la figura 53. Comprobando que tras un periodo transitorio se estabiliza en los 30 kW que se había previsto para el diseño.



Figura 53: Valores de tensión e intensidad en la resistencia de carga

En la figura 54 se aprecia que la señal de salida alcanza el valor previsto, pues se muestra en detalle el valor que alcanzan los máximos de la señal de potencia en la resistencia de carga.

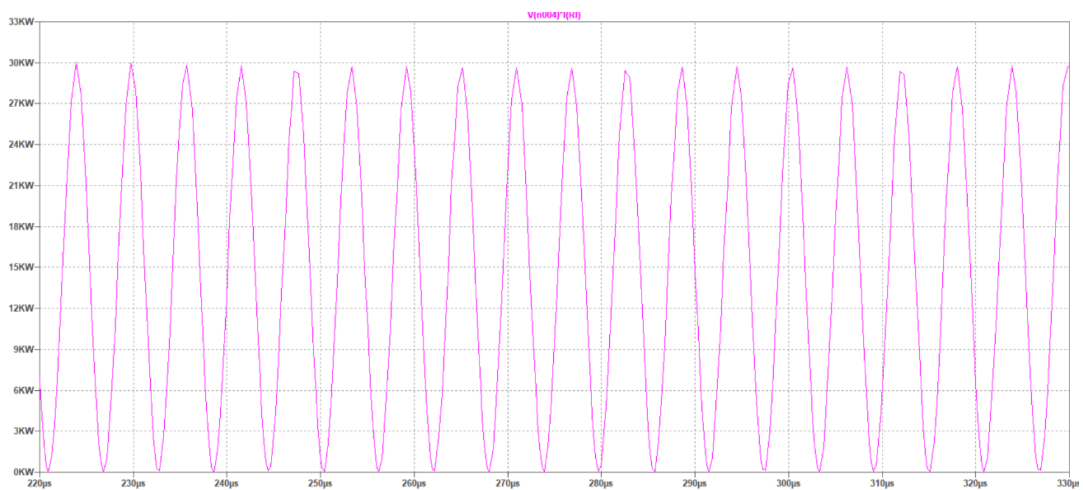


Figura 54: Detalle de comportamiento de honda de la señal de potencia entregada a la resistencia de carga.

El rendimiento que el sistema ofrece es del 99,8 %. Para comprobarlo se ha representado en la figura 55 una comparativa de la potencia “ P_1 ” de entrada y el valor “ P_L ” entregado a la carga.



Figura 55: Comparativa de la potencia entregada por el inversor (señal de color rojo) y la entregada a la carga (señal de color verde)

4.1.2. Estabilidad del sistema

Con los parámetros calculados se verifica que el sistema diseñado es estable según las ecuaciones de la tabla 15 y de la figura 46. Para ello, se calculan los factores de calidad del primario y secundario:

$$Q_p = \frac{L_p R_L}{\omega M^2} = \frac{128,59 \cdot 10^{-6} \cdot 5,3}{2 \cdot \pi \cdot 85000 \cdot (1,06 \cdot 10^{-5})^2} = 11,88$$

$$Q_s = \frac{L_p \omega}{R_L} = \frac{128,59 \cdot 10^{-6} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 85000}{5,3} = 5,79$$

Como se adelantó en el desarrollo teórico, para esquema de compensación SS se debe cumplir que:

$$Q_p > \frac{4 \cdot Q_s^3}{4 \cdot Q_s^2 - 1}$$

Donde, sustituyendo los valores anteriormente calculados, obtenemos que “ Q_p ” debe ser mayor a 5,83 para garantizar la estabilidad, premisa que se cumple para el diseño.

De esta forma, aseguramos que no se producirán fenómenos de bifurcación que afecten a la electrónica utilizada.

4.1.3. Variación de la potencia en función a la desalineación de bobinas

Para determinar la potencia que recibe la bobina receptora en su desplazamiento sobre la emisora hay que tener en cuenta la variación de los parámetros eléctricos en función a dicho desplazamiento.

Los sistemas de carga inductiva dinámica fundamentalmente estarán afectados por el desplazamiento en el eje "Y" debido a el avance del vehículo y en el eje "X" por desalineación entre el mismo y la pista de carga.

Aunque es posible que también varíen las condiciones por cambios en la altura de las bobinas debido a baches o terrenos con deformaciones en la calzada, no se ha tenido en cuenta este eje para el cálculo, considerando únicamente los desacoplos laterales.

En la figura 56 se observa la posición del vehículo con los dos ejes de desalineación considerados.

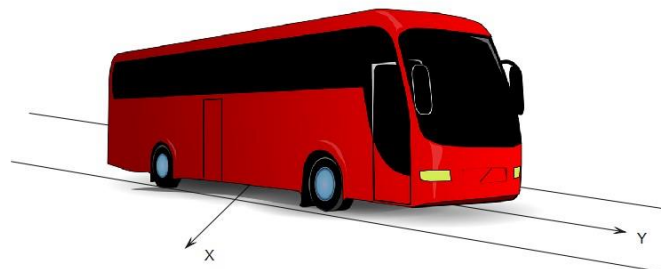


Figura 56: Representación del vehículo frente a los ejes de desalineación.

En [49] se realiza un análisis de comportamiento del sistema y se concluye que una de las ventajas de elegir un inductor para la recepción de menor dimensión que el emisor, es que las condiciones de acoplamiento se mantienen estables siempre que la bobina receptora se encuentre dentro del área de la emisora

Además, se refleja que en sistemas DWPT con esquemas de compensación SS, se permiten desalineaciones del 50% del tamaño de la bobina receptora en el eje "Y" sin variación significativa de los parámetros eléctricos y del 10 % en el eje "X", lo que implica que el rendimiento se mantenga en valores muy cercanos a los diseñados. En la figura 57 se representa el rendimiento frente a desalineaciones en ambos ejes:

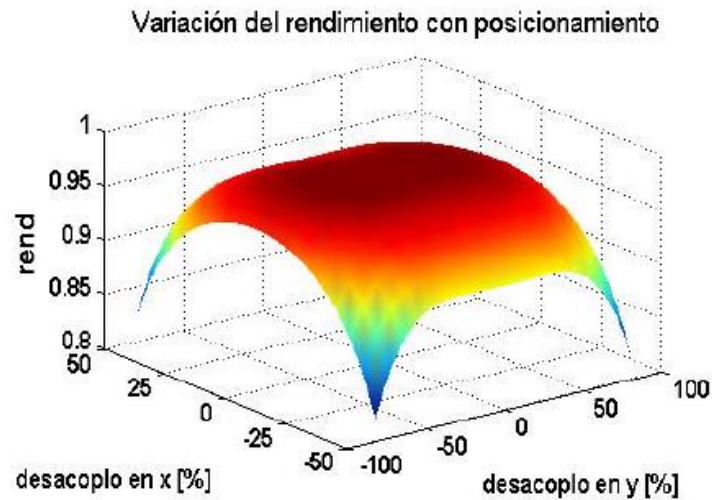


Figura 57: Variación del rendimiento de un sistema SS frente a desacoplos en ejes "X" e "Y".

En base a esto, se ha calculado la variación de potencia con una desalineación del 50% en el eje "Y" de desplazamiento del vehículo y del 10% en el eje "X", obteniendo los datos que se muestran en la figura 58 y 59.

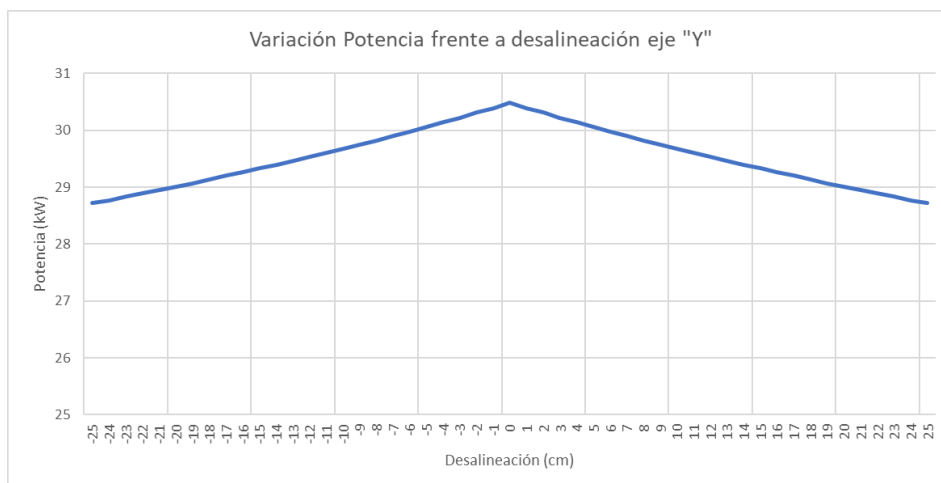


Figura 58: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje de desplazamiento del vehículo "Y".

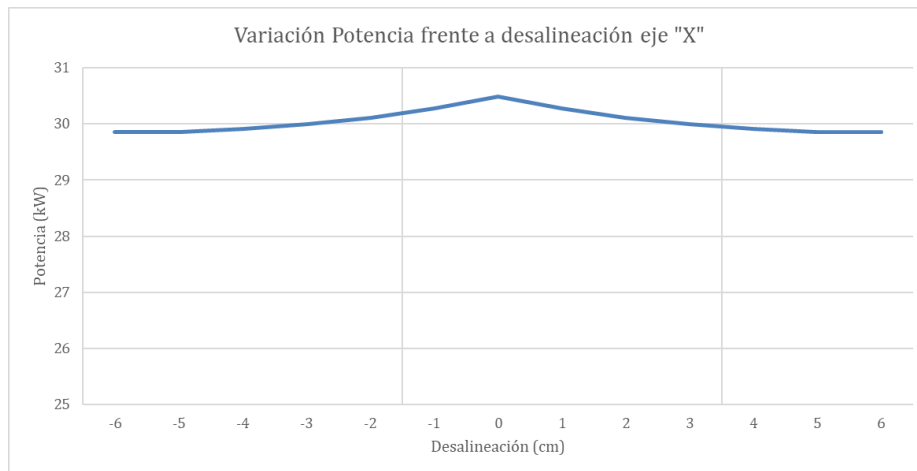


Figura 59: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje perpendicular al desplazamiento del vehículo "X".

Puede apreciarse, como el mínimo valor calculado se corresponde con 28,72 kW para una desalineación de 25 cm en el eje de desplazamiento del vehículo. La media de potencia obtenida es de 29,51 kW, valor que se usará posteriormente para los cálculos de dimensionamiento del sistema.

Aunque el modelo matemático ofrece valores de potencia para cualquier desalineación a evaluar, no se han tenido en cuenta desalineaciones mayores al 50% y 10% en los ejes "Y" y "X" respectivamente, pues como se ha demostrado en los test realizados en [49] el sistema no lo permite.

4.2. Etapa de conversión AC-DC/DC-AC

Para finalizar el dimensionamiento del sistema de transmisión completo hay que definir la etapa de conversión. Como se ha visto anteriormente, dicha etapa está formada por dos elementos: el convertidor AC/DC que toma la energía de la red y la transforma en corriente continua para su distribución y el inversor que posteriormente vuelve a transformar a energía alterna a la frecuencia de diseño.

4.2.1. Conversión AC-DC

El conversor AC/DC, además de rectificar la corriente alterna, realiza la función de control de potencia del circuito y proporciona alimentación a los inversores. Los requerimientos que se han de tener en cuenta para el dimensionamiento son los siguientes:

- Tensión de alimentación y frecuencia acordes a la red de distribución.
- Tensión de salida en corriente continua adaptada a las necesidades de los inversores.
- Suficiente nivel de potencia para realizar la alimentación por tramos de bobinas.

Puesto que encontramos convertidores de potencia en múltiples aplicaciones e instalaciones, no ha sido necesario realizar el diseño de este equipo específicamente para el proyecto, pues se comercializan conjuntos que cumplen las especificaciones que precisamos abaratando el coste con respecto a los diseñados. En el siguiente capítulo se presenta el equipo seleccionado.

4.2.2. Conversión DC-AC

De acuerdo con el circuito de compensación implementado junto a las bobinas inductora y receptora, se precisa un inversor con las siguientes características:

- Tensión de salida 420 V.
- Frecuencia de trabajo 85 kHz.
- Intensidad suministrada 71 A.

Se ha diseñado un inversor de puente completo para la alimentación de la bobina según el esquema de la figura 60, basado en el módulo BSM180D12P2C101.

Se trata de un conjunto formado por dos transistores MOSFET de 1200 V y 180 A. Las características completas del mismo pueden comprobarse en [64].

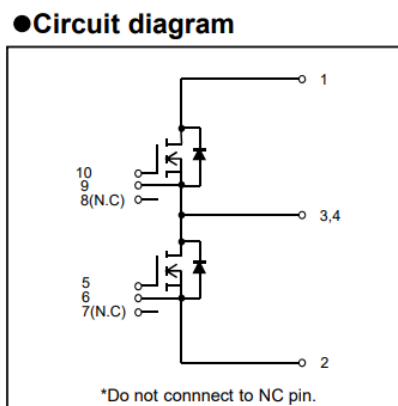


Figura 60: Variación de la potencia frente a desalineaciones en el eje perpendicular al desplazamiento del vehículo "X".

Puesto que dicho módulo compone medio puente inversor, se necesitan dos unidades para el diseño, además se implementa la electrónica necesaria para que pueda trabajar en un rango de frecuencia entre 50 kHz y 100 kHz mediante una unidad PFM “Pulse Frequency Modulation”.

Como se ha explicado en el apartado 3.1.3.2, se ha diseñado el sistema para que trabaje a una frecuencia tal que la impedancia total del sistema circuito de compensación-bobinas inductora y receptora sea puramente resistiva y su valor se corresponde con $5,78 \Omega$, como se ha calculado en 4.1.1. Por tanto, se puede diseñar el circuito inversor utilizando este valor de impedancia a su salida para comprobar su correcto funcionamiento con el esquema completo.

El circuito propuesto se refleja en la figura 61 donde la salida se corresponde con $R_o=5,78 \Omega$.

Se ha utilizado el software “Simetrix” [65], consistente en diferentes aplicaciones para la simulación de electrónica de potencia analógica y de computación, para testear según los parámetros requeridos el diseño implementado.

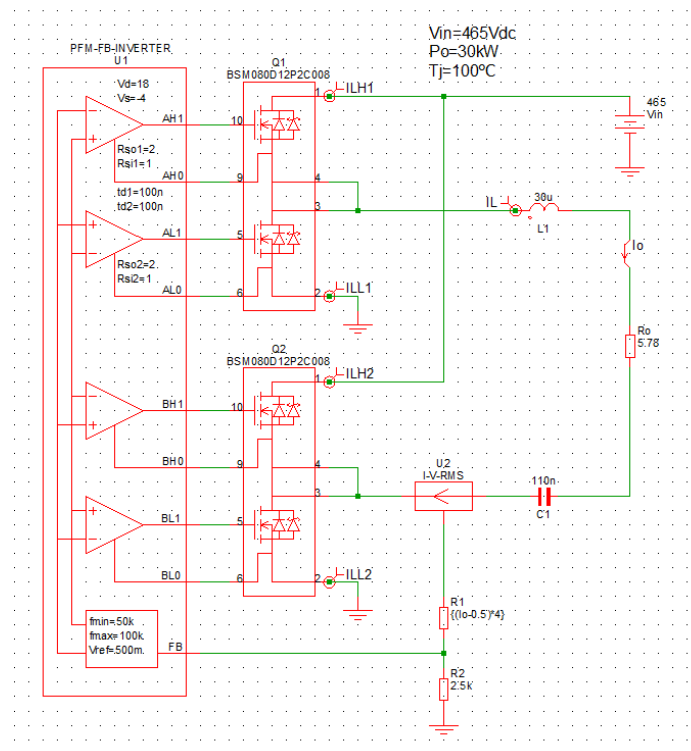


Figura 61: Esquema de diseño de equipo inversor utilizando software Simetrix.

Se había determinado como tensión de alimentación del circuito de compensación y bobinado un valor de 420 V , tensión que debe ofrecer el inversor. Al realizar la

simulación de la tensión de salida se obtiene la señal que aparece en la figura 62 y que se corresponde con el nivel esperado.

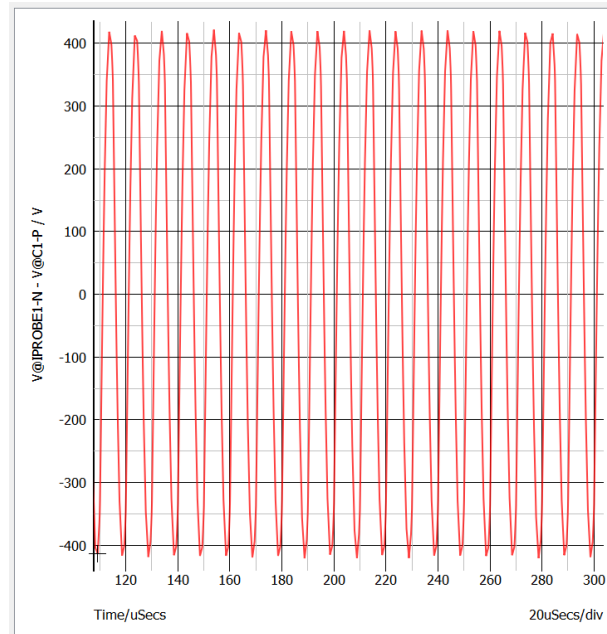


Figura 62: Tensión de salida del inversor.

La intensidad prevista a suministrar al circuito de compensación se corresponde con 71 A, valor que ofrece el inversor diseñado y que puede apreciarse en la figura 63:

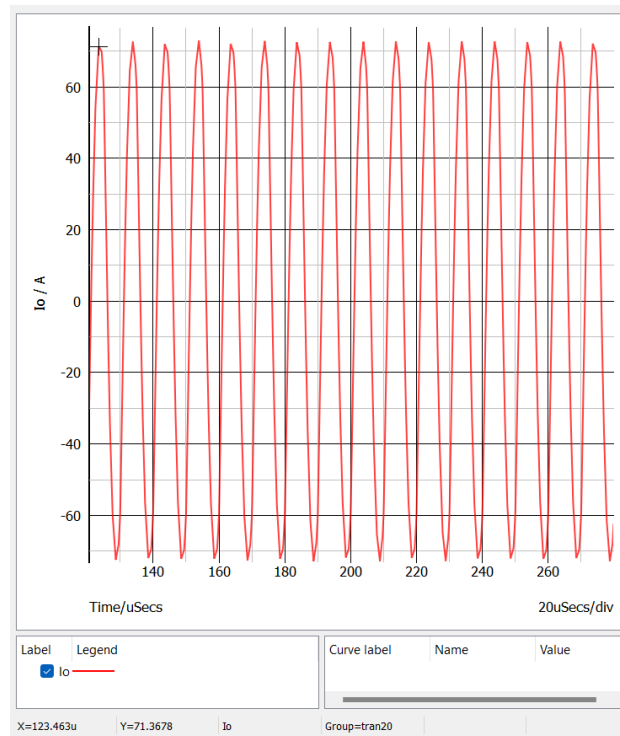


Figura 63: Intensidad de salida del inversor.

Por último, se analiza la potencia de salida del circuito. El diseño propuesto ofrece una potencia de 30 kW. El detalle puede apreciarse en la figura 64.

Puesto que, tanto el esquema del circuito inversor como el del circuito de compensación-bobina inductora se ha realizado de forma teórica, se incluye una partida en el presupuesto para la validación de estos modelos y corrección si fuese necesario.

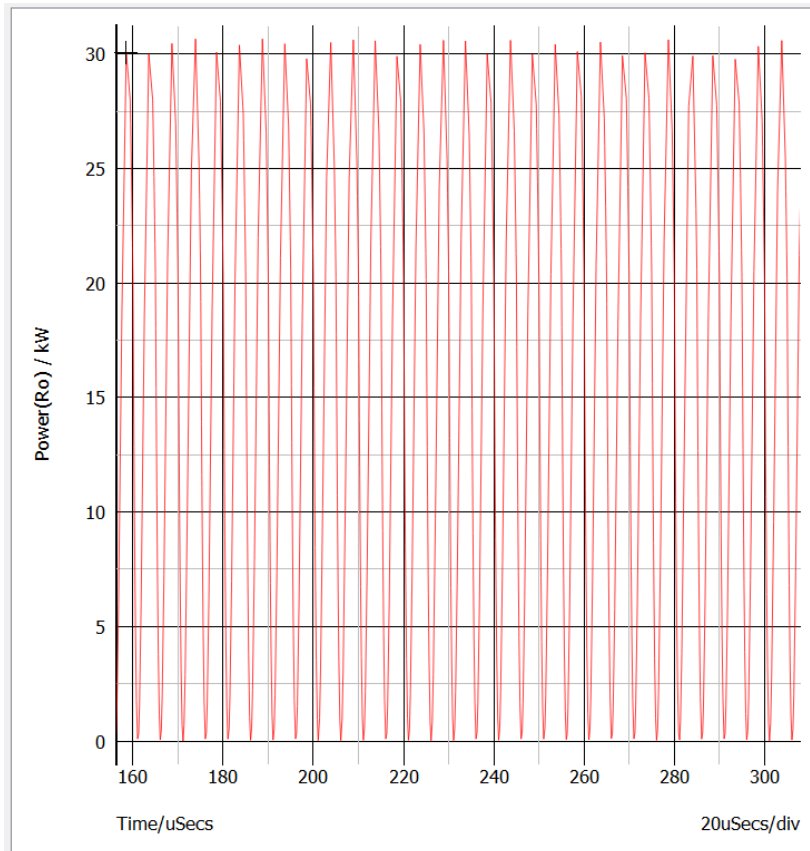


Figura 64: Detalle de la potencia ofrecida por el inversor.

5. Implantación del Sistema DWPT diseñado

Una vez se ha diseñado el sistema, el siguiente paso consiste en determinar una ubicación real para implantarlo y de esta forma evaluar las necesidades que la instalación conlleva tanto a nivel eléctrico, pues ha de adaptarse a la regulación vigente, como a nivel de obra civil.

En este capítulo se dimensionan y determinan los equipos que se precisan para la implantación del sistema DWPT a nivel de instalación eléctrica, se estudia la instalación de los mismos en un entorno real y se dimensiona la obra civil asociada a la misma.

5.1. Selección de carril bus-taxi

Para el desarrollo del sistema DWPT se ha elegido un tramo de carril bus-taxi con objeto de que pueda ser utilizado para la carga dinámica de los autobuses que lo utilizan, así como ofrecer el servicio a los vehículos taxis que pueden transitar por él.

El tramo elegido está situado en la calle Goya de Madrid, entre las intersecciones con las calles de Serrano y Alcalá. La elección de dicho tramo se ha realizado en base a que consta de dos carriles de ida y vuelta de 1 km de longitud cada uno de ellos, lo que permite normalizar un montaje sobre un recorrido de 2 km que posteriormente puede extrapolarse a distancias mayores.

Además, se encuentra en una zona clasificada con el distintivo “ZBE” (Madrid zona de bajas emisiones) en las que se están llevando a cabo diferentes acciones legislativas para disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y la implantación de medias para la movilidad eléctrica ayudarían a las mismas.

Las líneas que lo transitan son la 21 y la 53 con una frecuencia de 17 autobuses por hora y sentido, según la Empresa Municipal de Transporte de Madrid, “EMT”, tiene una demanda diaria de 31000 viajeros [66].

La situación del mismo se refleja en la figura 65, identificando ambos carriles con los colores azul y rojo.

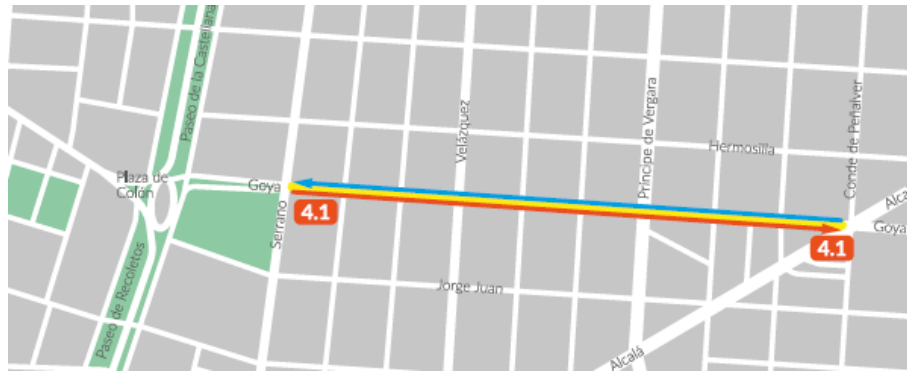


Figura 65: Ubicación del carril bus-taxi elegido para la implantación del sistema [61].

La imagen aérea de satélite de la zona se aprecia en la figura 66, tomada de “Google Earth”.



Figura 66: Imagen satélite del carril bus-taxi completo.

5.2. Dimensionamiento general del sistema

Para realizar el dimensionamiento del sistema eléctrico, debemos tener en cuenta en primer lugar el consumo energético del vehículo. Puesto que el sistema se va a diseñar para su implementación en un carril bus-taxi, vamos a analizar por un lado la energía consumida media de un autobús eléctrico y por otro, la energía que debe aportar el sistema para que pueda circular alimentándose de la infraestructura DWPT.

En [67] se presentan un estudio del consumo energético de un autobús eléctrico de 18 m en entorno urbano, analizando diferentes configuraciones de carga de vehículo. Para ello, se realizan diversos trayectos aumentando el volumen de carga partiendo de un 0% (autobús sin pasajeros) hasta un 100 % (simulando ocupación total). Los resultados de consumo energético extraídos se presentan en la tabla 18.

Carga nominal (%)	Porcentaje de la capacidad de carga (%)	Pasajeros equivalentes	Peso bruto vehicular (kg)	Consumo energético (kWh/km)
0	0	0	17 660	0.92
25	34.3	54	21 120	1.01
50	54.9	87	23 260	1.10
75	81.3	130	25 960	1.15
100	104.9	167	28 340	1.23

Tabla 18: Consumo energético de un autobús de 18 m con diferentes configuraciones de carga [62].

Para realizar la estimación, se va a tomar como consumo, el mayor valor de los datos obtenidos en la tabla anterior, que se corresponde con 1,23 kWh/km.

La velocidad media en ruta de un autobús urbano se ha extraído de [68] donde se realiza un análisis de la ruta 74 de Madrid y se estudian diferentes parámetros de la misma. Los resultados obtenidos, determinan que la velocidad media en el trayecto de ida es de 8,75 km/h y 9,75 km/h para el de vuelta.

Se toma el valor mayor como media para nuestro análisis de requerimientos, con esta premisa se obtiene que la velocidad media se corresponde con 3,05 m/s. Puesto que las bobinas diseñadas tienen 1 m de longitud tal y como se ha definido en el apartado 4.1.1, el vehículo permanecerá situado sobre la superficie de carga 0,33 s.

Si se colocan las bobinas inductoras cada 4 metros, cada vehículo de 12 m (longitud estándar de un autobús urbano) podría alimentarse de 3 elementos a la vez, teniendo en cuenta que la potencia media ofrecida por nuestro sistema es de 29,51 kW, se obtiene una potencia instantánea de 88,53 kW, e implica diseñar 200 bobinas en el total del tramo.

La energía acumulada en el total del tramo de 1 km puede determinarse mediante la potencia instantánea, el número total de bobinas y el tiempo que el vehículo está situado sobre las mismas de la forma:

$$E_{acu}(kWh/km) = 200 \frac{bobinas}{km} * 0,33 s * 88,53 \frac{kWh}{3600s} = 1,62 kWh/km$$

Según la energía calculada, en el tramo acumularíamos un 32 % de energía más de la que necesita para transitarlo.

En el caso de un automóvil, en [69] se reflejan los datos que aparecen en la tabla con el consumo medio urbano para tres vehículos, eléctrico, de combustión con gasolina y con diésel. En la referencia marcada se indica que la velocidad a la que se ha realizado el análisis ha estado por debajo de 50 km/h con los siguientes resultados:

Marzo 2022	EV	Gasolina	Diesel
Consumo medio Urbano por 100 km	14,5 kWh	8 L	7 L
Consumo medio Mixto por 100 km	18 kWh	6 L	5,5 L
Coste	0,38 €/kWh	1,791 €/L	1,835 €/L
Coste por 100 km Urbano	5,51 €	14,33 €	12,85 €
Coste por 100 km Mixto	6,84 €	10,75 €	10,09 €

Tabla 19: Comparativa de consumo en diferentes entornos de vehículos eléctricos y de combustión [69].

Se puede extraer del mismo que el consumo de un vehículo eléctrico se corresponde con 0,145 kWh/km, valor que tomaremos como referencia para el dimensionamiento.

Suponiendo una velocidad media de 20 km/h para no sobrepasar los límites de un carril bus-taxi, cada automovil tardaría en recorrer el metro de bobina 0,18 segundos en los que obtendría 30 kWh. La energía acumulada en el tramos de un km se correspondería con:

$$E_{acu}(kWh/km) = 200 \frac{bobinas}{km} * 0,18 s * 29,52 \frac{kWh}{3600s} = 0,29 kWh/km$$

Obtendría un 100% más de energía de la que necesitaría para circular por el tramo diseñado.

5.3. Planteamiento general de la instalación eléctrica

Una vez seleccionado el carril bus-taxi y comprobado que el sistema diseñado es capaz de cubrir las necesidades energéticas tanto para autobuses como para taxis en el tramo elegido, el siguiente paso consiste en plantear la infraestructura eléctrica necesaria para llevar a cabo la instalación.

Tal y como se ha diseñado el sistema en el capítulo 4.1.1, cada bobina aporta 30 kW de potencia y se han previsto 200 bobinas por kilómetro para conseguir la energía acumulada determinada en 5.2. En base a esto, se propone la instalación de un transformador de 1000 kVA de potencia aparente por sentido de circulación.

El total de potencia se repartirá en 5 tramos de línea de baja tensión de 200 kW con 40 bobinas cada uno para poder dimensionar el cableado eléctrico usando unas secciones acordes a lo que el mercado ofrece.

Esto implica instalar un cuadro de distribución de baja tensión por cada transformador con 5 salidas y 5 convertidores AC-DC.

El total de elementos necesarios son:

- Un centro de transformación para conectar el sistema con la red de distribución de MT de la empresa distribuidora y albergar los equipos.
- Conjunto de celdas para realizar la conexión con MT, tomar la medida de la energía consumida y proteger los transformadores.
- 2 transformadores de 1000 kVA, uno por sentido de circulación.
- 2 cuadros de distribución en baja tensión con 5 salidas cada uno.
- 10 convertidores AC-DC.
- 400 inversores.
- 400 bobinas.

El esquema general a nivel de baja tensión puede apreciarse en la figura 67.

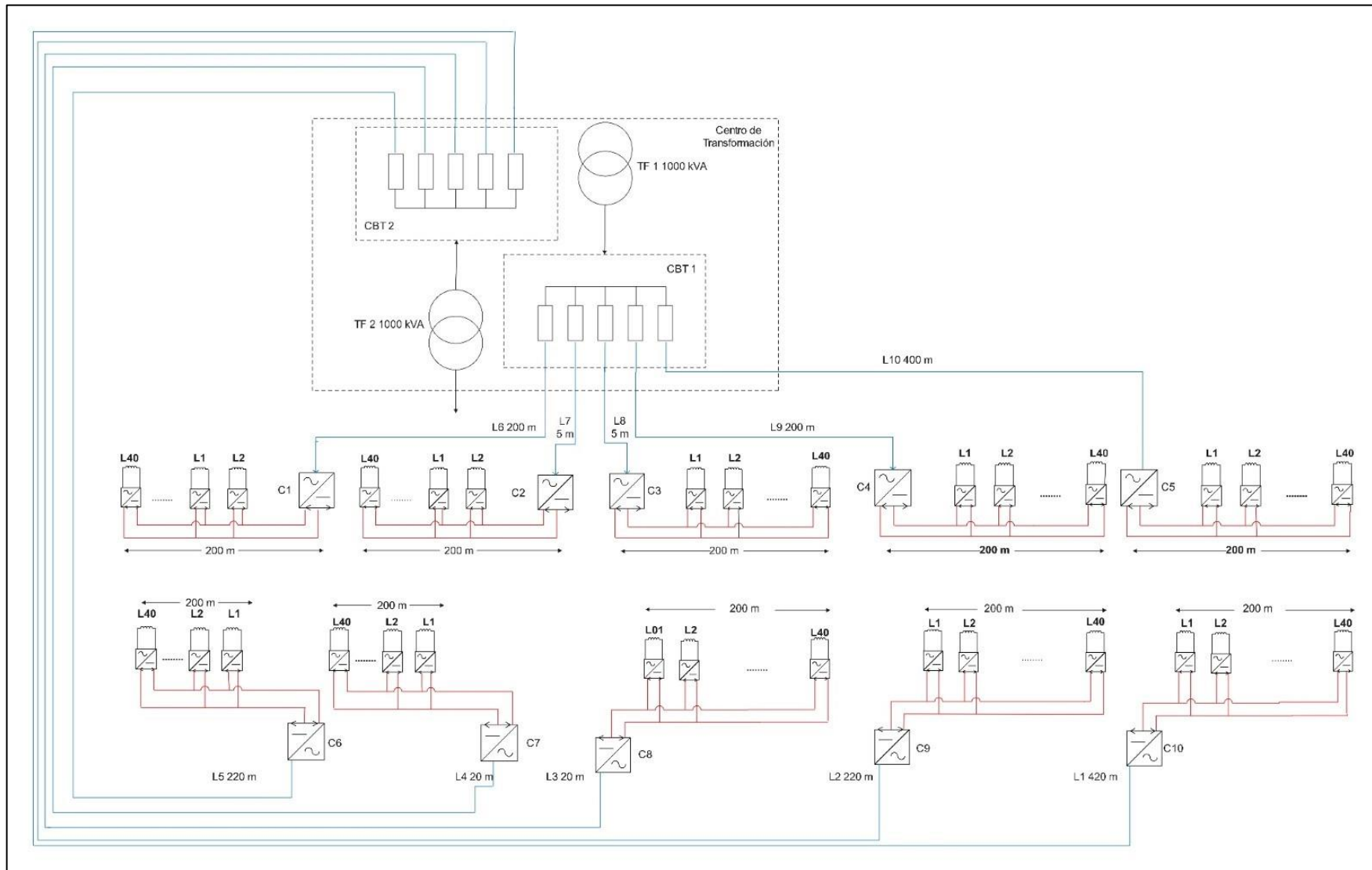


Figura 67: Esquema general a nivel de baja tensión del montaje eléctrico propuesto.

En la figura 67 se han representado las líneas con diferentes colores para su correcta identificación, de esta manera las que se corresponden con corriente alterna y van desde el centro de transformación a cada convertidor se representan en azul mientras que las que transportan corriente continua se han dibujado en rojo y parten desde los convertidores hasta la alimentación de cada inversor.

Puesto que, tras analizar el plano de la ubicación, se encontró un emplazamiento válido para situar el centro de transformación a 400 metros de la calle Serrano, como se explicará más adelante, las líneas de baja tensión se han diseñado de forma asimétrica.

De esta forma, hacia la dirección de la calle anteriormente citada, se han previsto dos líneas de baja tensión de corriente alterna, la primera alimenta un conversor situado a 5 metros del centro de transformación y cubriría los primeros 200 m de bobinas y otra de 200 m de corriente alterna hasta un segundo convertidor que alimentaría los otros 200 m restantes hasta el inicio de la calle.

En el sentido contrario, dirección calle de Goya, se han diseñado 3 convertidores, el primero de ellos situado a 5 metros del centro, alimentado por una línea de corriente alterna de esa longitud, el segundo a 200 m y el último a 400 m, de esta forma se cubre el total del kilómetro.

Para el carril opuesto, el reparto de líneas de baja tensión es el mismo, añadiendo a cada una 20 m de longitud adicionales para el cruzamiento de la vía.

5.3.1. Equipamiento necesario del sistema

5.3.1.1. Centro de transformación

Con objeto de ubicar los elementos necesarios para el entronque con la compañía eléctrica, conexión con los dos transformadores de potencia, ubicación de la medida y de los conjuntos necesarios para la distribución de las líneas de baja tensión, se prevé la instalación de un edificio prefabricado de hormigón, correspondiente a un PFU-5 del fabricante Ormazabal [70]. La representación general del centro puede verse en la figura 68.



Figura 68: Representación general de un centro PFU-5 [70]

Se trata de una envolvente monobloque prefabricada de hormigón armado, con capacidad para albergar 2 transformadores, un conjunto de celdas y 2 cuadros de baja tensión.

Las dimensiones y características del mismo pueden consultarse en la columna correspondiente al modelo de la tabla 20.

		pfu-3	pfu-4	pfu-5	pfu-7	
Longitud*	[mm]	3280	4460	6080	8080	
Anchura*	[mm]	2380	2380	2380	2380	
Altura	[mm]	Cubierta estándar	3045	3045	3045	-
		Cubierta sobreelevada	3240	3240	3240	3240
Altura visible	[mm]	Cubierta estándar	2585	2585	2585	-
		Cubierta sobreelevada	2780	2780	2780	2790
Peso**	[kg]	10545	13465	17460	29090	

Tabla 20: Dimensiones de centros de transformación prefabricados de Ormazabal [65].

El edificio deberá ubicarse sobre el terreno y precisa de un área de nivelación, además cuenta con entubado ya instalado para la salida y entrada de cable subterráneo. El esquema dimensional del mismo se representa en la figura 69.

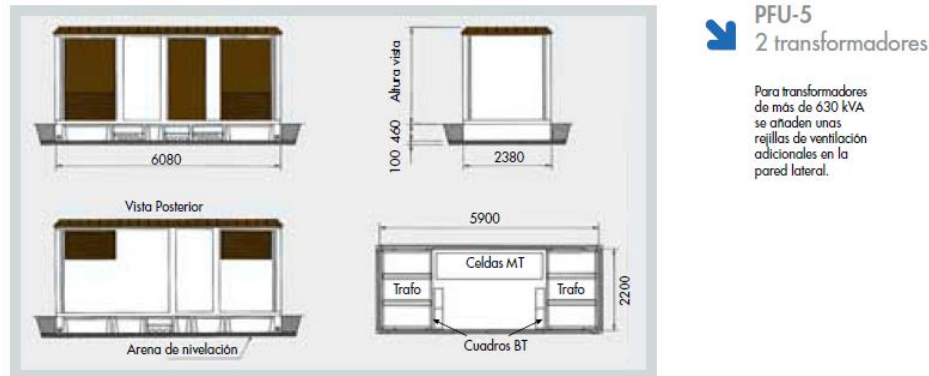


Figura 69: Esquema dimensional centro de transformación PFU-5 de Ormazabal [70].

5.3.1.2. Conjunto de celdas de media tensión

El diseño del conjunto de celdas de media tensión se ha realizado teniendo en cuenta que se va a necesitar:

- Una celda de posición de línea para realizar el entronque en MT con la empresa distribuidora.
- Una celda de medida con transformadores de intensidad y tensión para realizar la medida fiscal y facturación de la energía consumida por el sistema.
- Dos posiciones de protección de transformador.

El esquema general de diseño se corresponde con el presentado en la figura 70 y consta de 4 celdas modulares.

La primera de ellas, representada a la izquierda de la imagen, corresponde con la posición de línea y sirve para conectar el centro de transformación a la red de media tensión de la compañía distribuidora. La segunda posición contiene los transformadores de tensión y de intensidad necesarios para medir la energía suministrada al sistema DWPT, de esta forma puede realizarse la facturación. Y, por último, las dos posiciones siguientes serían las encargadas de la protección de cada uno de los dos transformadores mediante fusibles, para evitar el daño de estos equipos en caso de sobretensión en la red de media tensión.

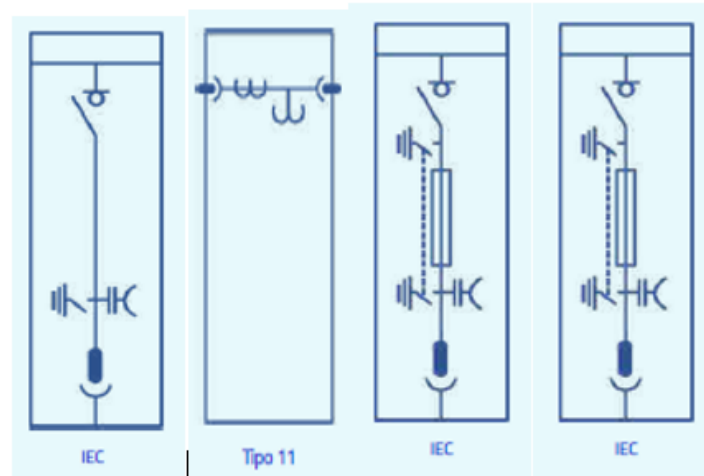


Figura 70: Esquema del conjunto de celdas de media tensión [65].

Se han seleccionado conjuntos de celdas manuales del fabricante Ormazabal, al igual que el centro de transformación. El detalle de cada una se explica a continuación.

1. Posición de línea para entronque.

El modelo elegido se corresponde con “CGMcosmos-I” estándar IEC con interruptor, seccionador de posición, para un corte eléctrico efectivo y seccionador de puesta a tierra, todo ello embutido en una cámara con Hexafluoruro de Azufre “SF6” para la extinción del arco eléctrico que se produce en las maniobras de apertura y cierre del interruptor [71] debido al nivel de tensión al que trabaja.

Sus dimensiones y aspecto exterior se presentan en la figura 71.

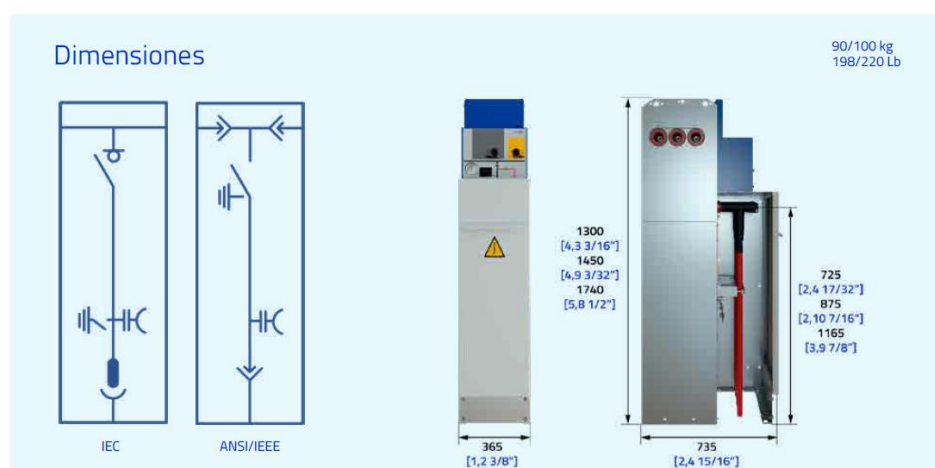


Figura 71: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-I [71].

Se ha realizado una consulta a la compañía distribuidora de la zona, “I-DE Redes Eléctricas Inteligentes” [102] con objeto de conocer la tensión de servicio del

emplazamiento, confirmando que la distribución en media tensión se realiza en niveles de 20 kV.

En la tabla 21 se recogen las principales características de la celda de línea comprobando que es válida para una tensión asignada de 24 kV.

Además presenta unos niveles de tensión soportados frente a cortocircuitos eléctricos o impulsos tipo rayo de 50 kV y 60 kV respectivamente. Lo que garantiza su correcto funcionamiento ante problemas en la red.

Características eléctricas		IEC		ANSI/IEEE	
Tensión asignada	U, [kV]	12*	24	15,5	27
Frecuencia asignada	fr [Hz]	50/60		50/60	
Corriente asignada (embarrado y línea)	I, [A]	400/630		600	
Tensión asignada de corta duración soportada a frecuencia industrial (1 min)					
Entre fases y tierra	U ^d [kV]	28	50	35	60
A través de la distancia de seccionamiento	U ^d [kV]	32	60	38,5	66
Tensión soportada asignada a impulso tipo rayo					
Entre fases y tierra	U ^p [kV]	75	125	95	125
A través de la distancia de seccionamiento	U ^p [kV]	85	145	104,5	137,5
Clasificación arco interno	IAC	AFL 16 kA 0,5 s/16 kA 1 s/20** kA 1 s/ 25 kA 1 s AFL[R***] 20** kA 1 s		AFL 16 kA 0,5 s/16 kA 1 s/ 20** kA 1 s/25 kA 1 s	
Tensión de corriente continua soportada	[kV]	48 kV sin dispositivo de comprobación de cable 50 kV con dispositivo de comprobación de cable		53	78

Tabla 21: Características eléctricas de la celda CGMCosmos-I [71].

El conjunto interruptor-seccionador de aislamiento presenta un poder de corte ante sobre corrientes de pequeña duración (1 segundo) de hasta 25 kA, aunque su corriente nominal de funcionamiento se sitúa en 630 A, como se aprecia en la tabla 22.

Interruptor-seccionador		IEC 62271-103 + IEC 62271-102		IEEE C37.74	
Corriente admisible asignada de corta duración (circuito principal)					
Valor $t^k = (x) s$	I^k [kA]	16/20** (1/3 s)/25 (1 s)		20** (1/3 s)/25 (1 s)	
Valor de pico	I^p [kA]	50 Hz: 40/52**/62,5 60 Hz: 41,6/52**/65		50 Hz: 52**/62,5 60 Hz: 54,6**/65	
Poder de corte de corriente principalmente activa	I^1 [A]	400/630		600	
Poder de corte - carga de cable / carga de línea	I^{4a} [A]	50/1,5		15	
Poder de corte bucle cerrado	I^{2a} [A]	400/630		600	
Poder de corte de falta a tierra	I^{6a} [A]	300		n/a	
Poder de corte de cables y líneas en vacío en condiciones de falta a tierra	I^{6b} [A]	100		n/a	
Corriente de conmutación de magnetización del transformador	[A]	21		21	
Poder de cierre del interruptor principal (valor de pico)	I^{ma} [kA]	50 Hz: 40/52**/62,5 60 Hz: 41,6/52**/65		50 Hz: 52**/62,5 60 Hz: 54,6**/65	
Categoría del interruptor					
Endurancia mecánica		1000-M1/5000-M2		1000/5000	
Ciclos de maniobras (cierres en cortocircuito)- clase		5-E3		3	

Tabla 22: Características eléctricas del interruptor seccionador de celda CGMCosmos-I [66].

Finalmente, se exponen en la tabla 23, las principales características eléctricas del seccionador de puesta a tierra, acorde al nivel de tensión y utilización del resto de elementos del conjunto.

Seccionador de puesta a tierra		IEC 62271-102	IEEE C37.74
Corriente admisible asignada de corta duración (circuito de tierra)			
Valor $t^k = (x) s$	i^k [kA]	16/20** (1/3 s)/25 (1 s)	20** (1/3 s)/25 (1 s)
Valor de pico	i^p [kA]	50 Hz: 40/52**/62,5 60 Hz: 41,6/52**/65	50 Hz: 52**/62,5 60 Hz: 54,6**/65
Poder de cierre del seccionador de puesta a tierra (valor de pico)	i_{ma} [kA]	50 Hz: 40/52**/62,5 60 Hz: 41,6/52**/65	50 Hz: 52**/62,5 60 Hz: 54,6**/65
Categoría del seccionador de puesta a tierra:			
Endurancia mecánica (manual)		1000-M0	1000
Ciclos de maniobras (cierres en cortocircuito)- clase		5-E2	3

Tabla 23: Características eléctricas del seccionador de puesta a tierra de la celda CGMCosmos-I [71].

2. Posición de medida.

Con objeto de medir y realizar la facturación de la energía consumida por el sistema, se ha previsto la instalación de una celda de medida “CGMcosmos-M”. Se trata de un conjunto modular con aislamiento al aire y transformadores de intensidad y tensión para alimentar un contador registrador [71].

El esquema general se presenta en la figura 72.

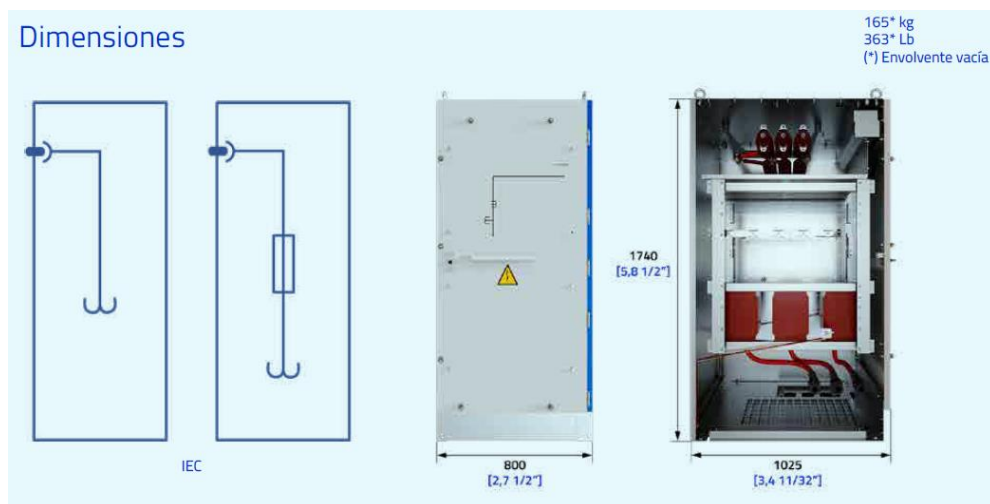


Figura 72: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-M [66].

Al igual que el conjunto anterior, es válida para una tensión de servicio de hasta 24 kV y 50 Hz tal y como se aprecia en la tabla 21.

Características eléctricas		IEC	
Tensión asignada	Ur [kV]	12*	24
Tensión asignada	Ur [kV]	12*	24
Frecuencia asignada	fr [Hz]	50/60	50/60
Corriente asignada			
Interconexión general de embarrado y celdas	Ir [A]	400/630	400/630
Tensión asignada de corta duración soportada a frecuencia industrial (1 min)			
Entre fases y tierra	Ud [kV]	28	50
Tensión soportada asignada a impulso tipo rayo			
Entre fases y tierra	Up [kV]	75	125
Clasificación arco interno	IAC	AFL 20** kA 0,5 s/20** kA 1 s	
Corriente admisible asignada de corta duración Valor $t_k = (x) s$	Ir [kA]	16/20** (1/3 s) / 25 (3 s)	

* También disponible con Ur = 7,2 kV bajo demanda ** Ensayos realizados a 21 kA/52,5 kA

Tabla 21: Características eléctricas de la celda CGMCosmos-M [66].

Trae preinstalados 3 transformadores de intensidad y tres transformadores de tensión para la medida fiscal [71], aunque el fabricante no especifica las características de los mismos.

3.Posición de protección de transformador.

Para la protección de los transformadores, se ha elegido una celda modular con protección mediante fusibles y equipada con interruptor seccionador de tres posiciones, apertura, cierre y puesta a tierra. El modelo se corresponde con el “CGMcosmos-p” y se presenta en la figura 73.

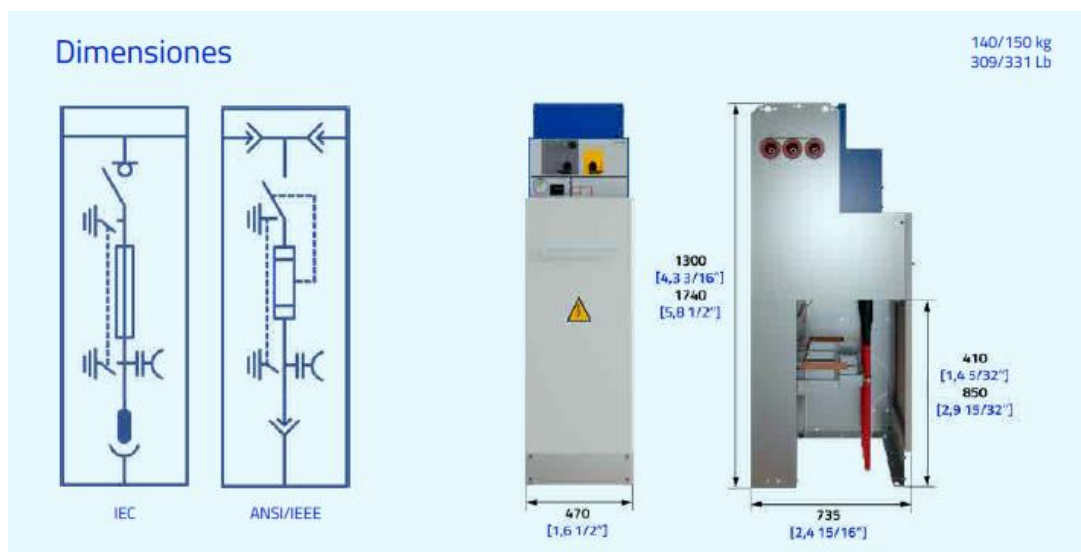


Figura 73: Esquema, dimensiones y aspecto exterior de celda CGMcosmos-p [71].

Utiliza fusibles cilíndricos de alta capacidad de ruptura “HRC” con percutor acorde a la norma IEC 60282-1. Su aspecto se corresponde al mostrado en la figura 74.



Figura 74: Fusibles HRC para protección de transformador [71].

La selección de fusibles se realiza de acuerdo a la norma IEC anteriormente especificada según las directrizas marcadas en la tabla 24. Para la tensión de servicio de nuestra instalación y transformadores de 1000 kVA se precisan elementos con intensidad asignada de 50 A.

		Selección de fusibles HHD según normas IEC																
U _{Red} [kV]	U _{Fusible} [kV]	Potencia asignada del transformador sin sobrecarga [kVA]																
		25	50	75	100	125	160	200	250	315	400	500	630	800	1000	1250	1600	2000
		Intensidad asignada del fusible (IEC 60282-1) [A]																
10	6/12	6,3	10	16	16	20	20	25	31,5	40	50	63	63	80	100	160	200	-
13,5	10/24	6,3	6,3	10	16	16	20	20	25	31,5	40	50	63	63	80	100	-	-
15	10/24	6,3	6,3	10	16	16	16	20	20	25	31,5	40	50	63	80	80	-	-
20	10/24	6,3	6,3	6,3	10	16	16	16	20	20	25	31,5	40	50	50	63	80	125

Tabla 24: Fusibles HRC para protección de transformador [71].

5.3.1.3. Transformadores

Con objeto de adaptar la tensión de media tensión a valores normalizados de baja tensión (400 V en distribución trifásica) y alimentar los convertidores, se ha diseñado el sistema con dos transformadores de 1000 kVA como el mostrado en la figura 75.



Figura 75: Representación de un transformador de 1000 kVA [72].

Se trata de un equipo del fabricante Ormazabal, con bobinado de media tensión y baja sumergido en aceite mineral como dieléctrico. La tensión asignada del primario se corresponde con 24 kV y la del secundario 420 V en vacío [72].

Cuenta con refrigeración natural entre aire y aceite y está diseñado según los requisitos de la directiva Ecodiseño de la Comisión Europea que establece un marco regulatorio con los requerimientos biológicos para productos energéticos vendidos en la Unión Europea [73].

5.3.1.4. Cuadros de distribución de baja tensión

Para la distribución de las líneas de BT hasta los convertidores, se ha previsto el uso de dos cuadros de distribución de baja tensión modelo “CBTO AS5 1600 5 BTVC 400 ID-ST” del fabricante Pronutec [74].

Con capacidad de hasta 1600 A y 5 salidas protegidas por fusible mediante bases “Triver” tripolares, es decir, válida para tres fases y permite la desconexión con carga, lo que implica que no hay que retirar el servicio para poder abrir dichas líneas. Se pueden realizar su conexión con líneas de baja tensión con cable de hasta 240 mm² de sección.

El modelo se corresponde con el presentado en la figura 76.

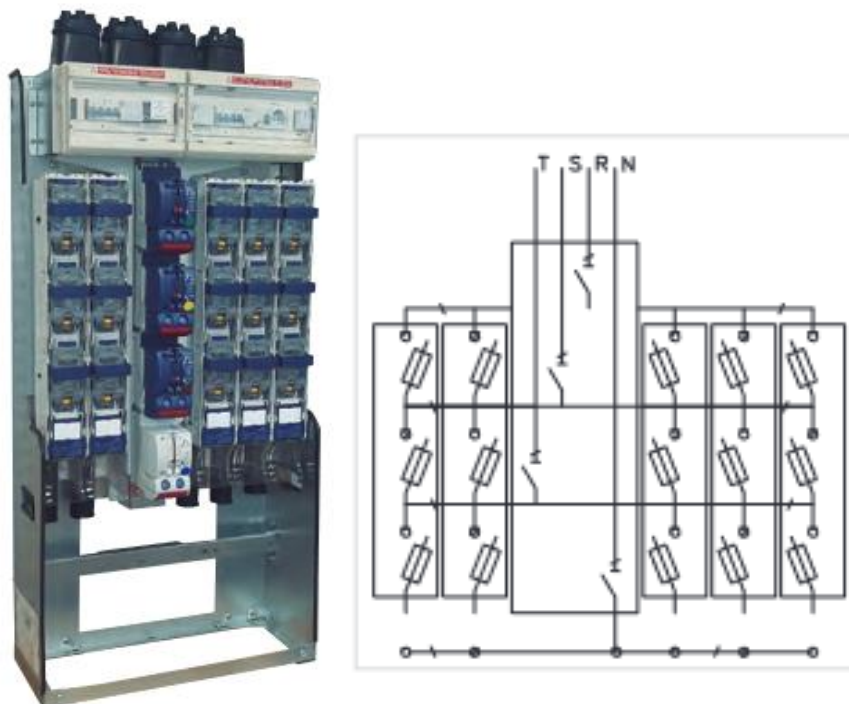


Figura 76: Fotografía del cuadro CBTO AS5 1600 5 BTVC 400 ID-ST y esquema [74].

5.3.1.5. Convertidor AC-DC

Según las especificaciones del sistema diseñado, se necesita un conjunto de rectificadores que trabajen con una tensión de alimentación de 400 Vac, 200 kW de potencia y que posibiliten una salida de 420 Vcc.

Teniendo en cuenta estas premisas, el rectificador seleccionado se trata del modelo "DCS880-A54-0470-04/05" [75]. El equipo sin envoltorio de protección se corresponde con el modelo H3 de la figura 77.



Figura 77: Convertidores de corriente continua familia DCS880 [70].

La rectificación de la corriente alterna se realiza mediante un puente inducido simple “2-Q”, alimentado por medio de una conexión trifásica de 400 V que ofrece una tensión de salida en corriente continua de hasta 465 V con una potencia nominal de 213 kW.

Las características principales se presentan en la tabla 25.

Convertidores tipo 2-Q	I_{cc} [A]	$P_{sahda}^{2)}$ [kW]		Corriente interna de excitación [A]	Tensión del ventilador [V _{CA}]	Volumen de aire [m ³ /h]	$P_{Pérdida}$ [kW]	Tamaño del bastidor ³⁾
		400 V	500 V					
400 V / 500 V / 525 V								
DCS880-S01-0020-04/05	20	9	12	6	sin ventilador		0,11	
DCS880-S01-0045-04/05	45	21	26	12	interna	57	0,17	H1
DCS880-S01-0065-04/05	65	30	38	12		57	0,22	
DCS880-S01-0090-04/05	90	42	52	12		57	0,28	
DCS880-S01-0135-04/05	135	58	73	18	interna	170	0,38	H2
DCS880-S01-0180-04/05	180	84	104	18		170	0,56	
DCS880-S01-0225-04/05	225	107	133	18		170	0,73	
DCS880-S01-0270-04/05	270	128	159	18	interna	170	0,82	H3
DCS880-S01-0315-04/05	315	146	183	25		170	0,91	
DCS880-S01-0405-04/05	405	188	235	25		170	1,12	
DCS880-S01-0470-04/05	470	213	280	25		255	1,32	

Tabla 25: Características de los convertidores de corriente continua familia DCS880 tipo 2-Q [70].

Nota: Aunque el modelo que aparece en la figura 77 tiene la nomenclatura “DCS880-S01-0470-04/05”. El fabricante permite la configuración “DCS880-A54-0470-04/05” que consiste en el mismo equipo electrónico, pero embutido en una envolvente con grado de protección IP54, lo que se corresponde con protección frente a penetración de polvo y proyecciones de agua.

5.3.1.6. Equipo rectificador

El diseño de los rectificadores que alimentan el sistema inductivo se ha basado en el esquema de la figura 60 como se adelantó en el capítulo 4.2.2. Para su implementación se precisan dos módulos “BSM180D12P2C101”, como el mostrado en la figura 78.



Figura 78: Fotografía del módulo BSM180D12P2C101 [64].

Las dimensiones de cada uno se corresponden con las representadas en el esquema de la figura 79.

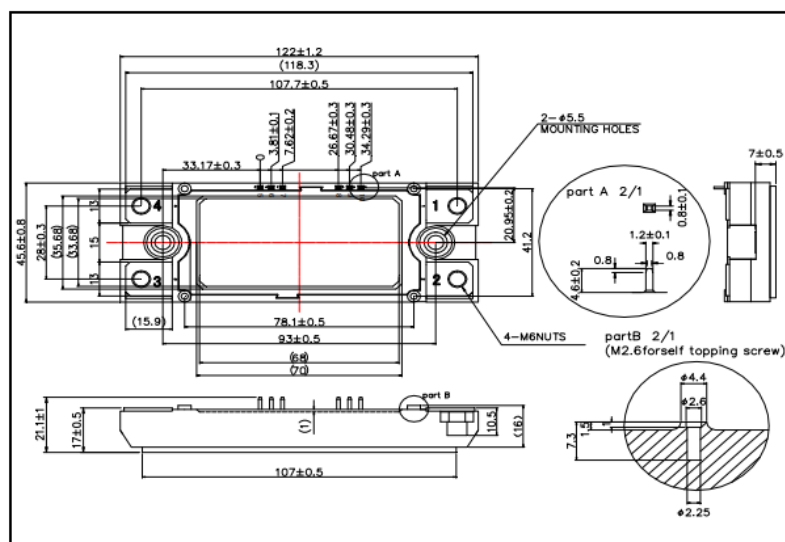


Figura 79: Dimensiones del módulo BSM180D12P2C101 [64].

Con objeto de poder estimar el coste de este elemento, es necesario conocer la cantidad de cobre utilizada. Para ello y puesto que se han previsto bobinas rectangulares sabiendo el primero, el número de vueltas y la sección del cable utilizado, se puede realizar el cálculo de la forma:

$$C_{cobre} = 2 \cdot (a_1 + b_1) \cdot N \quad (26)$$

Siendo “ a_1 ” y “ b_1 ” las dimensiones de la bobina y “ N ” el número de vueltas

Las dimensiones se corresponden con 0,6 m de anchura y 1 m de longitud con 5 vueltas con cobre de 96 mm² tal y como aparece reflejado en el capítulo 4.1.1.

Con las dimensiones elegidas y la sección del cable utilizado, la cantidad de cobre en cada bobina se corresponde con:

$$C_{cobre} = 2 \cdot (1 + 0,6) \cdot 5 = 16 \text{ m}$$

El conjunto de bobina y condensador de compensación irán embutidos en el bloque de polietileno de alta densidad [76], todo ello se incrustará en la capa de hormigón previa al asfalto, como se verá en capítulos posteriores.

5.3.2. Diseño eléctrico en baja tensión

5.3.2.1. Dimensionamiento de tramos de CA. Cálculos comunes

Para la determinación de las características de la red de baja tensión se ha tenido en cuenta lo recogido el “*Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión*” y en particular en su “*Instrucción Técnica Complementaria*” ITC-BT-07 [77]

En primer lugar, y con objeto de calcular la sección necesaria para cada uno de los conductores, se necesita determinar el factor de corrección aplicable a la intensidad máxima admisible de cada cable según se recoge en la norma citada.

Dicho factor viene determinado por la temperatura a la que estará sometida la instalación, la profundidad de la misma, la resistividad térmica del terreno y el tipo de cable a usar. El producto de los factores unitarios de cada una de las características anteriores establece el factor total de corrección de la forma [77]:

$$F_C = F_{C_{tem}} \cdot F_{C_{prof}} \cdot F_{C_{res}} \cdot F_{C_{cable}} \quad (27)$$

Por las características de nuestra instalación se han tomado los siguientes datos para el cálculo:

- $F_{C_tem} = 1$ (Equivalente a temperatura de servicio 90° y temperatura del terreno 25°).
- $F_{C_prof} = 0,97$ (Valor establecido para profundidad de 1 m por discurrir instalación eléctrica bajo carretera).
- $F_{C_res} = 0,99$ (Equivalente a una profundidad de 0,8 m).
- $F_{C_cable} = 0,7$ (Tres cables por entubado en contacto entre ellos).

Con todo ello, el valor final obtenido se corresponde con:

$$F_C = 0,672$$

Por otro lado, para calcular la sección vamos a precisar la conductividad del cable a usar, puesto que se pretende realizar la instalación con cobre, podemos determinar este parámetro mediante la inversa de la resistividad del material en función a la temperatura de servicio[78]:

$$\rho_{\theta} = \rho_{20} \cdot [1 + \alpha(\theta - 20)] \quad (28)$$

Siendo:

- ρ_{θ} : Resistividad del material en función a la temperatura de servicio.
- ρ_{20} : Resistividad del material a 20°C ($\Omega\text{mm}^2/\text{m}$)
- α : Coeficiente de temperatura ($^{\circ}\text{C}^{-1}$).
- θ : Temperatura máxima del conductor ($^{\circ}\text{C}$).

Puesto que la temperatura máxima del conductor de cobre que vamos a usar se corresponde con $\theta=90^{\circ}\text{C}$, la resistividad del cobre a 20°C es $\rho_{20}=0,017$ y el coeficiente de temperatura es $\alpha=0,00392$ $^{\circ}\text{C}^{-1}$ [78], se ha obtenido el siguiente valor de resistividad del material:

$$\rho_{\theta} = 0,02167 \frac{\Omega\text{mm}^2}{\text{m}}$$

En función al cálculo anterior, se establece un valor de conductividad como:

$$\begin{aligned} \gamma &= \frac{1}{\rho_{\theta}} & (29) \\ \gamma &= 46,13 \frac{\text{m}}{\Omega\text{mm}^2} \end{aligned}$$

5.3.2.2. Dimensionamiento de tramos de 420 m de corriente alterna

Para determinar la sección del cable a utilizar se evalúa en primer lugar la sección necesaria para cumplir con la caída de tensión de 6,5% que marca la “ITC-BT-19” [77] para instalaciones de fuerza a la salida del transformador.

Una vez realizado, se determina la sección mínima a utilizar por la intensidad que va a circular por las líneas y se comparará con el resultado obtenido por caída de tensión. Realizado los dos cálculos se elegirá el diámetro mayor puesto que va a cumplir ambas condiciones.

Como por todas las líneas de baja tensión va a circular la misma intensidad de corriente debido a que están dimensionadas con 200 kW cada una de potencia, y la mayor caída de tensión se va a producir para el tramo de mayor longitud, que se corresponde con 420 m, vamos a dimensionar este tramo y se utilizará la misma sección para el resto.

Nota: Aunque el tramo se ha considerado de 420 m en sentido longitudinal y así se ha referenciado, teniendo en cuenta que los convertidores que alimenta se sitúan sobre el acerado y no sobre la calzada, se utiliza para el cálculo una longitud de 425 m para cubrir esta distancia y ajustar los cálculos a la realidad de la instalación.

La fórmula utilizada para determinar la sección se corresponde con [79]:

$$S = \frac{P \cdot l}{\gamma \cdot U^2 \cdot e} \cdot 100 \quad (30)$$

Donde:

- P : Potencia (W)
- l : Longitud del conductor (m)
- γ : Conductividad del conductor ($m/\Omega mm^2$)
- U : Tensión (V)
- e : Caída de tensión permitida (%)

La potencia de cada tramo viene limitada por el convertidor de 200 kW y la longitud del mismo son 425 m, por tanto, utilizando la conductividad anteriormente calculada, la sección mínima del conductor para cumplir con la caída de tensión es:

$$S = \frac{20000 \cdot 425}{46,13 \cdot (400)^2 \cdot 6,5} \cdot 100 = 164,59 \text{ mm}^2$$

La sección nominal normalizada inmediatamente superior a la calculada serían 185 mm² según “ITC-BT-07”

Una vez establecida la sección mínima del conductor para cumplir con la caída de tensión, debemos calcular la intensidad admisible. Para ello determinaremos la intensidad que va a circular por el mismo y en función a ello seleccionaremos un tipo de cable, la intensidad admisible será la intensidad nominal del cable o intensidad máxima admisible aplicando el factor de corrección ya calculado:

$$I_{adm} = I_{nom_cable} \cdot F_C \quad (31)$$

En estas condiciones, debemos asegurar que:

$$I_{adm} > I_{calculada} \quad (32)$$

La intensidad para una red trifásica viene dada por:

$$I_{calculada} = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi} \quad (33)$$

Siendo:

- P : Potencia (W)
- U : Tensión nominal (V)
- $\cos\varphi$: Factor de potencia.

Estableciendo un valor de factor de potencia de 0,95, la intensidad que va a circular por nuestra instalación se corresponde con:

$$I_{calculada} = \frac{200000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0,95} = 304,23 \text{ A}$$

En la tabla 26 se muestra la intensidad máxima admisible o intensidad nominal para conductores de cobre en instalación enterrada obtenida de la “ITC-BT-07”:



SECCIÓN NOMINAL mm ²	Terna de cables unipolares (1) (2)			1 cable tripolar o tetrapolar (3)		
						
	TIPO DE AISLAMIENTO					
	XLPE	EPR	PVC	XLPE	EPR	PVC
6	72	70	63	66	64	56
10	96	94	85	88	85	75
16	125	120	110	115	110	97
25	160	155	140	150	140	125
35	190	185	170	180	175	150
50	230	225	200	215	205	180
70	280	270	245	260	250	220
95	335	325	290	310	305	265
120	380	375	335	355	350	305
150	425	415	370	400	390	340
185	480	470	420	450	440	385
240	550	540	485	520	505	445
300	620	610	550	590	565	505
400	705	690	615	665	645	570
500	790	775	685	-	-	-
630	885	870	770	-	-	-

Tabla 26: Intensidad máxima admisible para diferentes secciones según "ITC-BT-07" [77].

Seleccionando una terna de cables unipolares con recubrimiento "XLPE" (*Cross Linked polyethylene*, polietileno reticulado) y sección de 185 mm², podemos transportar 480 A. En base a esto se calcula la intensidad admisible con estos parámetros:

$$I_{adm} = 480 \cdot 0,672 = 322,56 A$$

Se ha decidido utilizar cables unipolares, por tener una intensidad máxima admisible mayor que la de los cables tripolares. Además, ante una avería en un cable, solamente habría que reparar el dañado sin afectar a la totalidad.

Ya que $I_{adm} > I_{calculada}$ podemos concluir que la sección de 185 mm² posibilita cumplir con los requisitos de intensidad y caída de tensión para el tramo de 425 m.

Como ya hemos comentado, todos los tramos de corriente alterna se deberán implementar con esta sección de cable.

5.3.2.3. Dimensionamiento de tramos de 200 m de corriente continua

A continuación, se realiza el cálculo de la sección necesaria para los tramos de 200 m de corriente continua aplicando un proceso similar al usado en el apartado anterior.

Para conductores de corriente continua, la caída de tensión viene determinada por [79]:

$$S = \frac{2 \cdot P \cdot l}{\gamma \cdot U^2 \cdot e} \cdot 100 \quad (34)$$

Donde:

- P : Potencia (W)
- l : Longitud del conductor (m)
- γ : Conductividad del conductor ($\text{m}/\Omega\text{mm}^2$)
- U : Tensión (V)
- e : Caída de tensión permitida (%)

En este caso, aunque el convertidor proporciona una tensión de hasta 465V, se ha tomado como tensión el valor de 420V ya que se corresponde con la tensión elegida para alimentar los inversores

Al igual que en el caso anterior, aunque se ha referenciado con una longitud lineal de 200 m, para el cálculo se utiliza 205 m para cubrir el tramo desde la ubicación de los convertidores en el acerado hasta el final del tramo.

En cuanto a la caída de tensión, tomamos como dato admisible el 6,5% que marca el reglamento [77].

$$S = \frac{2 \cdot 20000 \cdot 205}{46,13 \cdot (420)^2 \cdot 6,5} \cdot 100 = 155,03 \text{ mm}^2$$

La sección normalizada inmediatamente superior se corresponde con 185 mm². Como se aprecia en la tabla 24.

Por su parte, la intensidad que va a circular por cada circuito se corresponde con:

$$I_{calculada} = \frac{P}{U} = \frac{200000}{415} = 481,92 \text{ A}$$

Seleccionando un cable de 400 mm² tendríamos una intensidad admisible:

$$I_{adm} = 705 \cdot 0,692 = 487,86 \text{ A}$$

Puesto que $I_{adm} > I_{calculada}$ podemos usar un cable de 400 mm² de sección.

5.3.2.4. Dimensionamiento de cableado entre inversor y bobina

Cada inversor se encuentra situado a una distancia aproximada de 0,5 m con la bobina a la que alimenta y ofrece una potencia de 30 kW con una tensión de 420 V. Bajo estas condiciones se ha estimado una caída de tensión del 1,5 %, pues este supuesto no se ajusta a los casos presentados en el reglamento, y por ello se ha decidido tomar una referencia menor para asegurar una caída de tensión baja. La sección mínima a utilizar se corresponde con:

$$S = \frac{2 \cdot 30000 \cdot 0,5}{46,13 \cdot (420)^2 \cdot 1,5} \cdot 100 = 0,25 \text{ mm}^2$$

Por otro lado, la intensidad que va a circular por cada una de ellas se corresponde con 70,58 A como ya se determino en el apartado 4.1.1.

Seleccionando un cable de 16 mm², para el que su intensidad máxima admisible se corresponde con 125 A, obtenemos una intensidad admisible que cumple con el requisito $I_{adm} > 70,58 \text{ A}$.

$$I_{adm} = 125 \cdot 0,692 = 86,50 \text{ A}$$

Por tanto, utilizaremos esa sección como válida para el diseño.

5.3.2.5. Dimensionamiento de canalizaciones mediante entubado

Con objeto de canalizar los cables de baja tensión bajo la vía, se realiza el dimensionamiento del material necesarios para tal fin.

Los requerimientos de tubo para la canalización de cables en zanja en instalaciones eléctricas de baja tensión se rigen por la norma "ICT-BT-21". En la misma, aparece la información recogida en la tabla 27 con la dimensión exterior del tubo a utilizar en función al número de conductores que alberga y la sección nominal de los mismos.

Sección nominal de los conductores unipolares (mm ²)	Diámetro exterior de los tubos (mm)				
	Número de conductores				
	≤ 6	7	8	9	10
1,5	25	32	32	32	32
2,5	32	32	40	40	40
4	40	40	40	40	50
6	50	50	50	63	63
10	63	63	63	75	75
16	63	75	75	75	90
25	90	90	90	110	110
35	90	110	110	110	125
50	110	110	125	125	140
70	125	125	140	160	160
95	140	140	160	160	180
120	160	160	180	180	200
150	180	180	200	200	225
185	180	200	225	225	250
240	225	225	250	250	--

Tabla 27: Diámetro exterior del entubado según "ITC-BT-21" [77].

Como se ha determinado en el apartado anterior, todos los tramos de corriente alterna utilizan ternas de cable unipolar de 185 mm², por tanto, según lo recogido en la normativa, necesitarían una canalización de 180 mm de diámetro exterior. Cabe la posibilidad de agrupar hasta 6 conductores en el mismo entubado.

En cuanto a las conexiones para los tramos de corriente continua, al utilizar cableado con dimensiones superiores a las reflejadas en la tabla, la norma establece el uso de tubo con diámetro exterior 4 veces superior a la sección en mm del cable.

Se ha tomado como referencia el cable "Toxfree ZH RZ1MZ1-K" con aislamiento XLPE [80], para determinar el diámetro del conductor que según el fabricante se corresponde con 42,1 cm, tal y como se refleja en la tabla 28.

DIMENSIONES

Sección (mm ²)	Diámetro (mm)	Peso (Kg/km)	Aire libre a 30°C (A)	Enterrado a 20°C (A)	Caída tensión (V/A · km)
1 x 10	14,6	341	74	61	4,23
1 x 16	15,3	405	101	79	2,68
1 x 25	17,6	550	135	101	1,73
1 x 35	18,7	665	169	122	1,23
1 x 50	20,3	835	207	144	0,86
1 x 70	22	1055	268	178	0,603
1 x 95	23,8	1.300	328	211	0,457
1 x 120	25,5	1.565	383	240	0,357
1 x 150	27,6	1.875	444	271	0,286
1 x 185	29,7	2.210	510	304	0,235
1 x 240	32,5	2.790	607	351	0,178
1 x 300	37,7	3.665	703	396	0,142
1 x 400	42,1	4.665	823	464	0,108

Tabla 28: Características del cable Toxfree ZH RZ1MZ1-K según su sección [80].

Puesto que se necesita albergar dos conductores, el diámetro exterior del tubo para la canalización según ICT-BT-21 deber ser de al menos 337 cm.

Por último, para los tramos de corriente alterna entre inversor y bobina, se ha determinado un conductor de 16 mm² lo que implica utilizar una canalización de 63 mm de diámetro exterior.

Para el dimensionamiento del proyecto se han consultado diferentes fabricantes de tubería corrugada adaptada a la normativa específica, encontrando dimensiones normalizadas en fabricación diferentes a las que marca dicha norma, por tanto, y para dimensionar el sistema ajustado a la realidad se han elegido las siguientes dimensiones del fabricante “Futurflex” [81] que se recogen en la tabla 29.

	Longitud (m)	Sección conductor (mm ²)	Canalización según ICT-BT-21 (mm)	Diámetro Fabricante (mm)
Tramo CA	420	185	180	200
	220	185	180	200
	20	185	180	200
	400	185	180	200
	200	185	180	200
	5	185	180	200
	0,5	16	63	75
	Tramos CC	200	400	337

Tabla 29: Dimensionamiento de canalizaciones según sección.

Hay que destacar que para los tramos de corriente continua puesto que no se han encontrado dimensiones mayores a 315 mm de tubería, el diseño se ha realizado con canalización de 200 mm independiente para cada uno de los dos cables.

5.3.3. Obra civil Asociada

Se ha realizado el diseño de la obra civil mediante el software “Sketchup” [82]. Se trata de una herramienta para el modelado de obras de construcción en 3D que facilita la integración de las mismas en entornos urbanos.

Una vez realizado el diseño, se ha trasladado a la herramienta “Autodesk Revit” [83], que consiste en un software de diseño en 3D para obra civil, con objeto de realizar los planos que se adjuntan en el Anexo IV.

La información geográfica se ha obtenido del “Geoportal del Ayuntamiento de Madrid” [84], ya que este recurso permite importar capas con ubicaciones específicas y trasladarlas a los softwares anteriormente explicados.

5.3.3.1. Emplazamiento del Centro de transformación

El lugar elegido para el emplazamiento del centro de transformación se encuentra en el tramo de la calle de Goya ya descrito, entre las intersecciones con las calles Velázquez y Nuñez de Balboa, a la altura de los números 41-43. Este punto permite ubicar el centro de transformación a una distancia de 400 m con la calle Serrano (inicio del carril bus) y a 600 m con la de la calle Alcalá (fin del carril bus), cumpliendo el dimensionamiento eléctrico diseñado.

El detalle de la ubicación concreta puede apreciarse en el plano “A1 Situación y Emplazamiento” del Anexo IV.

Se ha previsto la utilización de una zona junto al aparcamiento para la colocación del del edificio prefabricado, como se muestra en la figura 82.

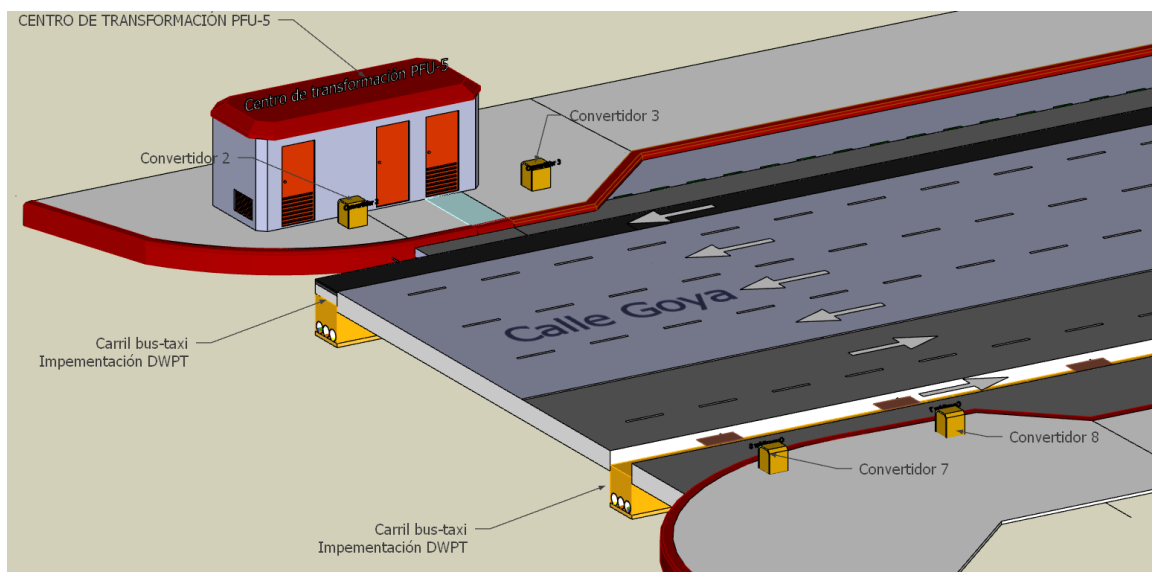


Figura 82: Ubicación del edificio prefabricado sobre planta.

La calle cuenta con cuatro carriles en un sentido y dos en el opuesto, representados por flechas en la figura. Las dos vías de los extremos se corresponden con los carriles bus-taxi donde se instalará el sistema DWPT.

Para la identificación correcta de dichos carriles, se toma como “carril derecho” el correspondiente al sentido hacia la calle Serrano y “carril izquierdo” el que dirige el tráfico hacia la calle Alcalá. Este detalle puede apreciarse en la figura 83.

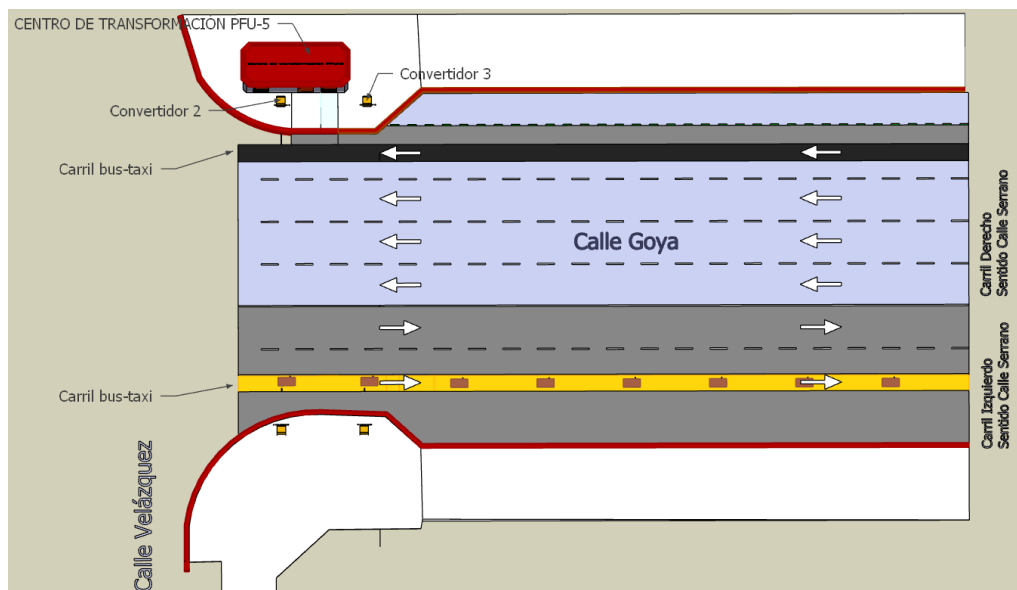


Figura 83: Representación del carril "derecho" e "izquierdo" sobre plano.

Además, puede apreciarse el tramo DWPT sobre el carril derecho ya finalizado con la capa asfáltica echada, representado en la parte superior de la imagen con el color negro. Por otro lado, el sistema DWPT sobre el carril izquierdo aparece con la sección abierta para que se aprecie la colocación de las bobinas sobre plano.

Junto al Centro de transformación se sitúan los convertidores C2 y C3. Por su parte, en el lado opuesto de la calzada, se encuentran C7 y C8 de la figura 67, que alimentan los 2 primeros tramos de 200 m en cada sentido.

5.3.3.2. Diseño general de la zanja para ubicación de elementos bajo calzada

Para la instalación de los diferentes equipos que componen el sistema DWPT bajo la calzada se ha previsto la apertura de una zanja longitudinal a lo largo de ambos carriles y otra transversal de salida desde el centro de transformación hacia la anterior.

Además, hay que tener en cuenta que como los convertidores se ubicarán a pie de calle, en los aparcamientos situados junto al carril bus-taxi, a la altura de cada uno de ellos, hay que realizar una excavación transversal para la alimentación de los mismos y salida de circuitos de corriente continua.

La longitud de las excavaciones se corresponde con:

- 1000 m de foso bajo carril izquierdo.
- 1000 m de foso bajo carril derecho.
- 20 m de foso desde centro de transformación hacia carril derecho.
- 5 m de foso desde la calzada hasta cada convertidor (20 m en total para el conjunto completo de convertidores).

El detalle de emplazamiento de estas zanjas se refleja en la figura 84. Se representa el primer tramo, donde aparece el centro de transformación y los convertidores aledaños a este, junto con la ubicación de las primeras bobinas en la calzada, pues a partir de aquí, el diseño es similar en todo el recorrido.

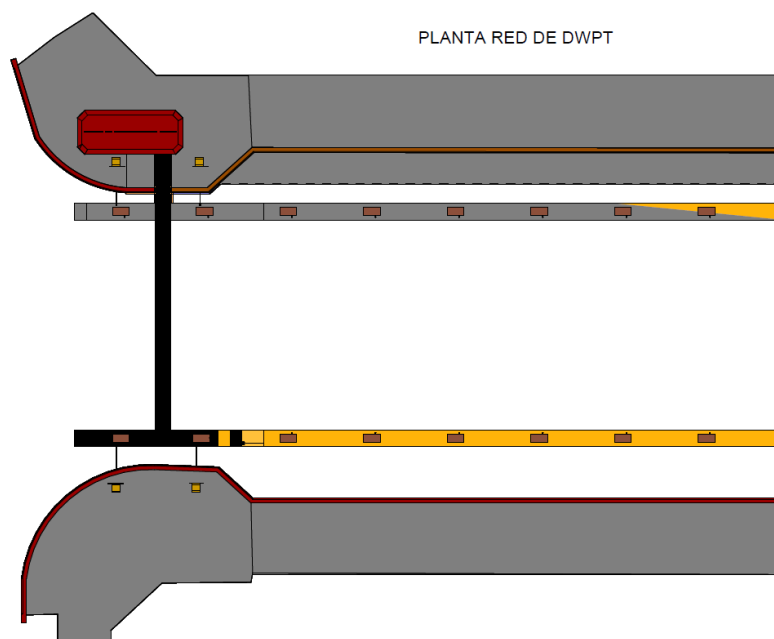


Figura 84: Emplazamiento del primer tramo de zanja y convertidores junto al CT.

El diseño de las mismas se ha realizado teniendo en cuenta por un lado, los diferentes elementos a instalar, que se corresponden con:

- Entubado para canalización de cables de las líneas de baja tensión de corriente alterna y corriente continua.
- Inversores.
- Bobinas inductoras.

Por otro lado, se ha consultado la normativa aplicable a la obra civil, para ello se ha tomado como referencia el proyecto *“Reurbanización de Pavimento en el paseo de Recoletos”* [85] de la Dirección General del Espacio Público, Obras e Infraestructuras de la comunidad de Madrid. Además, se han seguido las directrices marcadas en *“Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid, de 17 de abril*

de 1997” [86] en su última edición de junio de 2019, así como las diferentes disposiciones recogidas en el Reglamento Electrotécnico de Baja tensión.

Tomando como referencia el proyecto presentado en [85], para cumplir la normativa municipal en lo que a pavimentación de calzadas se refiere, se ha previsto un diseño de los diferentes estratos de la excavación con las siguientes necesidades constructivas:

- Sub-base de 10 cm de arena de miga colocada sobre suelo.
- Base de 25 cm de hormigón tipo HM-20.
- Capa intermedia de asfalto formada por mezcla bituminosa tipo hormigón combinada con betún asfáltico MCB (Mezcla bituminosa en caliente) tipo AC-22/32 de 7 cm.
- Capa de rodadura de asfalto formada por mezcla bituminosa tipo hormigón combinada con betún asfáltico MCB tipo ac-16/22 de 4 cm.

Además, según lo dispuesto en la “ITC-BT-07” [77] del Reglamento Electrotécnico de Baja Tensión, la ubicación de cableado bajo tubo en cruzamientos de vías debe tener una profundidad mínima de 0,80 m.

En función a ello y por las dimensiones de los equipos a instalar, se ha previsto una apertura de zanja de 1 m de ancho y 1,41 m de profundidad estratificada según lo dispuesto en la figura 85.

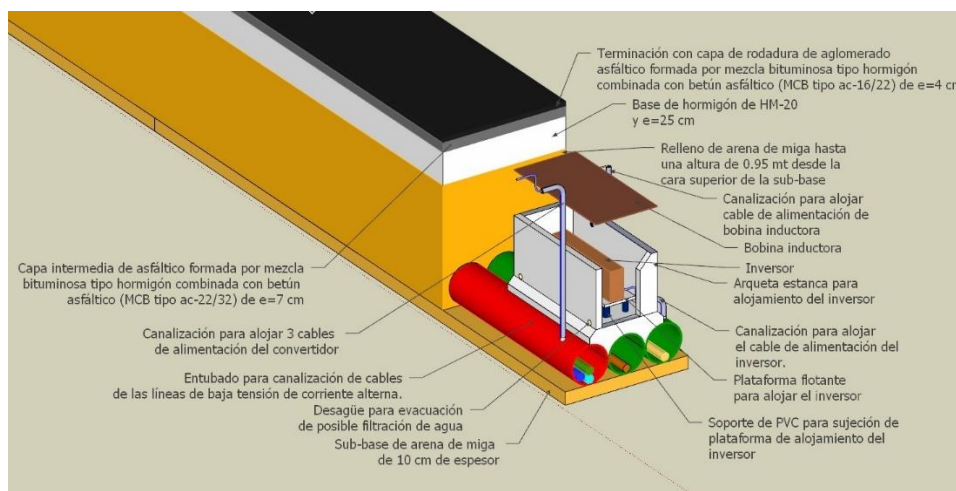


Figura 85: Estratificación de la zanja con elementos instalados.

Nota: La canalización para alojar los 3 cables de alimentación del convertidor, se ha representado en la figura 85 con una sección de menor tamaño a la calculada para que

pueda apreciarse en el dibujo el detalle completo. Hay que tener en cuenta que diámetro real según normativa debe ser de 200 mm.

Analizando el corte transversal del diseño general de la excavación, se aprecia que, para la correcta ubicación de las canalizaciones de cables, se han situado sobre la capa de arena de 10 cm de grosor, a modo de base según la imagen de la figura 86 donde aparecen las primeras etapas de la fase constructiva.

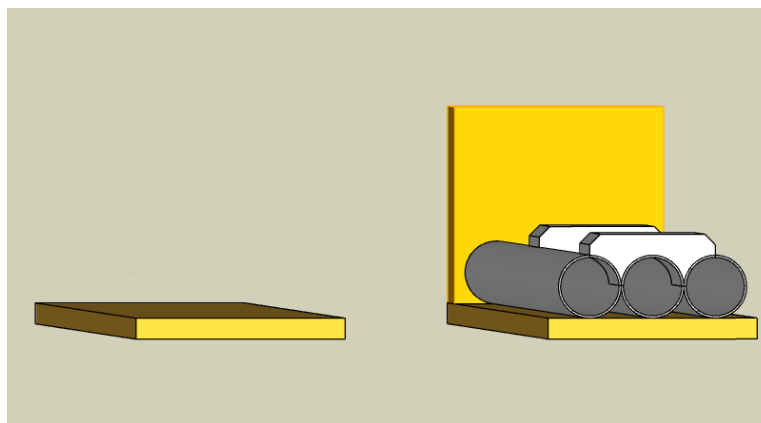


Figura 86: Primeras etapas de la fase constructiva. Lecho de arena y colocación de entubado.

Teniendo en cuenta que cada 5 metros hay que colocar un inversor se ha previsto la ubicación del mismo en una arqueta de hormigón prefabricada estanca de dimensiones 1x0,5x0,5 m para proteger de humedad la electrónica. Esta arqueta está provista de una salida de agua en su parte inferior y una bancada para la colocación del equipo.

A modo de referencia para el diseño se toma el modelo “*Arqueta eléctrica de Iberdrola*” de hormigón armado según EHE 2008 con resistencia de 40 N/mm², representado en la figura 87 del fabricante “*CEMAT*” [87], pues según las especificaciones se fabrican para cualquier profundidad y están diseñadas para la introducción de diferentes dimensiones de tubo por cara lateral, lo que permite utilizarlas en proyectos de este tipo. Puesto que no se ajusta totalmente al diseño, se incluirá una partida en el presupuesto para adaptarla a las necesidades específicas.



Figura 87: Prototipo de arqueta de alojamiento de inversor para diseño [82].

Para asentar el conjunto se diseña una base de hormigón de 1,0x0,5x0,1m. En la figura 88 se observa la disposición de la bancada sobre la canalización de cables.

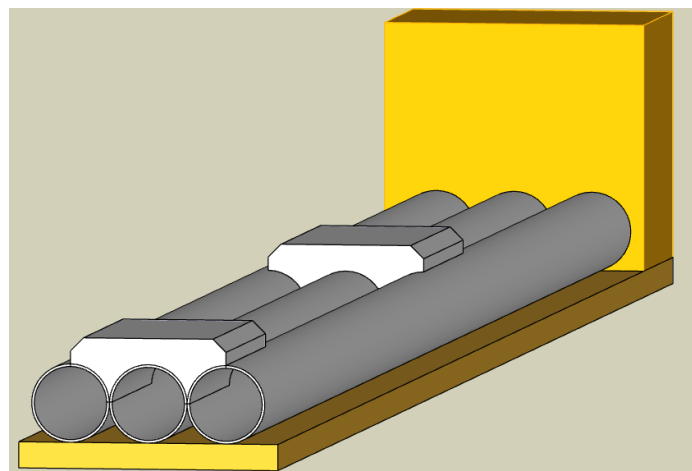


Figura 88: Detalle de bancada para apoyar la arqueta.

El montaje completo de bancada sobre base de hormigón y tubos de canalización de cables se representa en la figura 89.

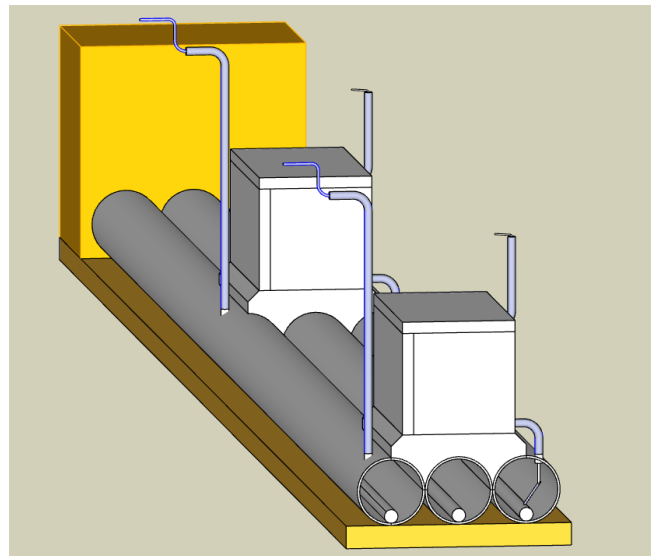


Figura 89: Montaje completo de bancada sobre base.

Según se establece en [86] las canalizaciones subterráneas precisan de la instalación de arquetas registrables cada 50 m. De esta forma, ante posibles averías o trabajos de mantenimiento en el cableado eléctrico, se pueden realizar comprobaciones de la instalación sin necesidad de abrir la calzada.

Para ello, se han incluido en el diseño estos elementos, con la misma disposición que las arquetas de protección de los inversores según el modelo de la figura 90 del fabricante "Prefabricados Alberdi" [88].



Figura 90: Fotografía de arqueta registrable usada como referencia [88].

En la figura 91 se representan las diferentes secciones de la arqueta con las dimensiones en cada uno de ellos.

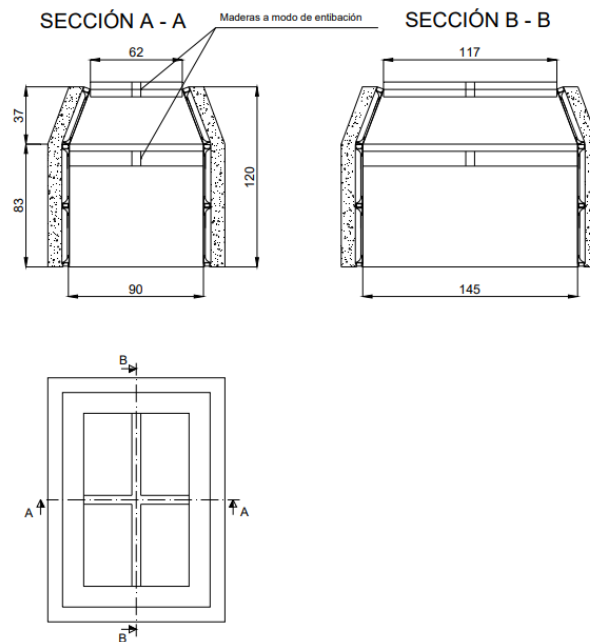


Figura 91: Dimensiones de la arqueta registrable [88].

La base de hormigón que la sustenta tendrá un espesor de 11 cm, sobre el lecho de arena, para que estén accesibles desde la calzada.

El conjunto completo de la zanja se rellena de arena compactada hasta una altura de 0,95 m donde se ha diseñado la capa base de 25 cm de hormigón tipo HM-20 según la normativa. En este estrato se incrustará la bobina inductora. En la figura 92 se aprecia el detalle

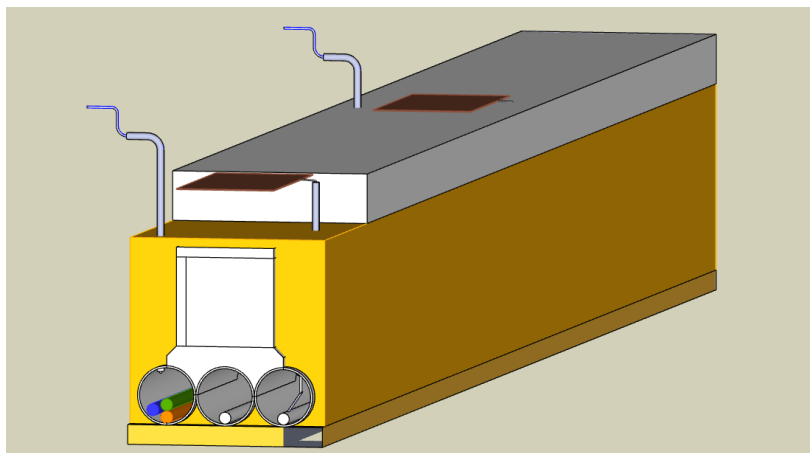


Figura 92: Relleno de arena en zanja y capa de hormigón con bobinas incrustadas.

Finalmente, se incluyen las dos capas asfálticas: la capa intermedia y la de rodadura según lo dispuesto en la figura 93.

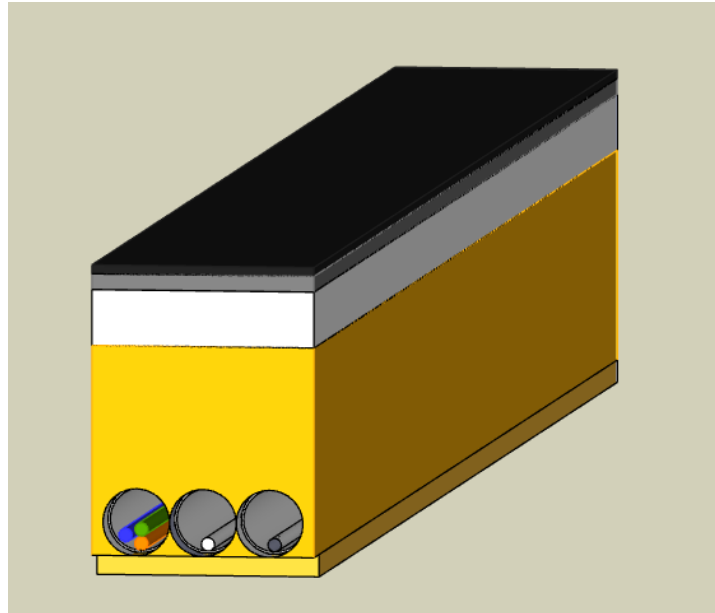


Figura 93: Finalización de cierre de zanja con capas asfálticas echadas.

5.3.3.3. Número de tubos de canalización por tramo

Para finalizar el dimensionamiento de la obra civil, hay que determinar el número de canalizaciones de cable que discurren por cada uno de los tramos.

Según se ha determinado en el apartado 5.4.5 y aparece reflejado en la tabla 29, para todos los circuitos de corriente alterna se ha previsto canalización de diámetro exterior de 200 mm. Según la "ICT-BT-21" con estas dimensiones, pueden albergar hasta 6 conductores por tubo.

En cuanto al cableado de corriente continua, como ya se ha explicado se utiliza una canalización de 200 mm para cada uno de los dos cables.

El esquema general de canalización de cables para un carril puede apreciarse en la figura 94. En la misma se ha representado el número de cables que discurren por cada una de ellas

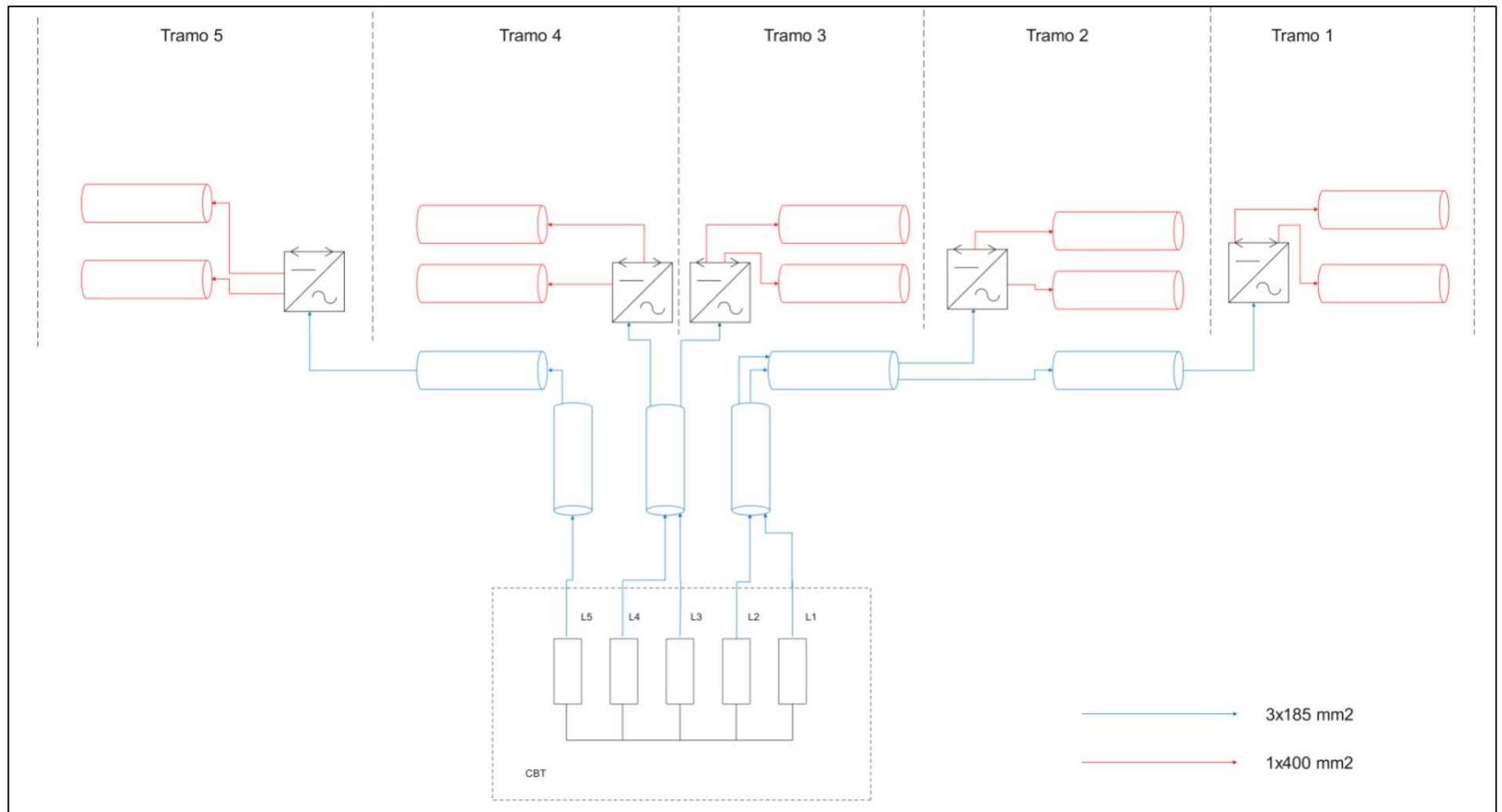


Figura 94: Esquema general de canalizaciones para entubado de cable.

A modo de resumen, por cada sentido de circulación encontramos las siguientes canalizaciones:

- 3 tubos de 200 mm a la salida del centro de transformación.
- Tramos 1 y 5: Formado por dos canalizaciones de 200 mm de diámetro exterior que llevan alimentación de corriente continua.
- Tramo 2, 3 y 4: Compuesto por tres canalizaciones en total, 2 de corriente continua y una de corriente alterna, todas ellas de 200 mm de diámetro exterior.

En el Anexo IV se reflejan en detalle los elementos constructivos más destacados, se han particularizado los tramos por los que discurren mayor número de canalizaciones para exponer las ubicaciones más complejas. La relación de planos diseñada se corresponde con:

1. A1_Situación y emplazamiento.
2. A2_Plano de conjunto.
3. A3_Plano de Red (DWPT).
4. A4_Instalaciones (DWPT).
5. A5_Secciones Transversales.
6. A6_Secciones Longitudinales.
7. A7_Detalles Constructivos.
8. A8_Fases Constructivas.

6. Presupuesto

En el presente capítulo se presenta el presupuesto estimado para la implantación del sistema DWPT, se ha dividido en varias partidas para poder detallar el contenido y facilitar la explicación.

Para la determinación de precios se han consultados tres fuentes de información que son:

1. Generador de Precios CYPE Ingenieros [89].
2. Base de datos de precios de la Comunidad de Madrid [90].
3. Precio Centro Guadalajara. Gabinete técnico Aparejadores Guadalajara [91]

Las dos últimas fuentes han sido facilitadas por el Ayuntamiento de Madrid.

Como se refleja en las partidas correspondientes y puede consultarse en el presente capítulo, se han encontrado dificultades para establecer el precio de algunos materiales, sobre todo en lo que se refiere a equipos electrónicos debido a la falta de soluciones comerciales, en base a ello se ha debido estimar el precio de las bobinas inductoras, los inversores o las arquetas para la ubicación de estos elementos.

En cuanto a la interpretación de las tablas, se han realizado referenciando cada partida para su correcta identificación, se incluye una descripción de la partida y en la unidad que se cuantifica, el precio unitario, el rendimiento, que se corresponde con el factor que se aplica a cada unidad según la referencia utilizada ponderándola con el número de unidades a usar y por último, el coste.

1. Centro de Transformación

	<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Precio unitario (€)</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Total (€)</i>
Caseta prefabricada	CT_DWPT001	Caseta Superficie 6080x2380m	u	11.909,10	1,00	11.909,10
	CT_DWPT002	Grúa Celosía 30 T	h	118,67	1,50	178,01
	CT_DWPT003	Vaciado Máquina Terreno flojo <2m	m3	3,88	12,15	47,14
	CT_DWPT004	Arena rio 0,6 mm	m3	19,22	8,10	155,68
	CT_DWPT005	Compactación Terreno medio mecánico	m2	13,75	9,00	123,75
	CT_DWPT006	Pequeño Material	u	1,43	27,00	38,61
	CT_DWPT007	Costes indirectos	%	12.452,29	10,00	1.245,23
					Total Partida	13.697,52

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Conjunto de celdas SF6	CT_DWPT008	Celda de línea SF6	u	2.770,29	1,00	2.770,29
	CT_DWPT009	Celda de medida 2Transformadores	u	5.278,92	1,00	5.278,92
	CT_DWPT010	Celda de Protección de Transformador	u	3.472,56	2,00	6.945,12
	CT_DWPT011	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	16,00	353,44
	CT_DWPT012	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	16,00	335,36
	CT_DWPT013	Pequeño Material	u	1,43	56,00	80,08
	CT_DWPT014	Costes indirectos	%	15.763,21	10,00	1.576,32
					Total Partida	17.339,53

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Posiciones de Transformador	CT_DWPT015	Transformador 1000 kVA Aceite mineral	u	16.724,28	2,00	33.448,56
	CT_DWPT016	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	8,00	176,72
	CT_DWPT017	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	8,00	167,68
	CT_DWPT018	Pequeño Material	u	1,43	14,00	20,02
	CT_DWPT019	Costes indirectos	%	33.812,98	10,00	3.381,30
					Total Partida	37.194,28

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Cuadros de distribución de baja tensión	CT_DWPT020	CBT 1600 A 5 BTVC Pronutec	u	2.468,00	2,00	4.936,00
	CT_DWPT021	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	8,00	176,72
	CT_DWPT022	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	8,00	167,68
	CT_DWPT023	Pequeño Material	u	1,43	14,00	20,02
	CT_DWPT024	Costes indirectos	%	5.300,42	10,00	530,04
					Total Partida	5.830,46

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
P.A.T Centro de transformación y conexión transformador/celdas/CBTs	CT_DWPT025	Pica T.T. acero-Cu 2000014.6 mm {300 micras}	u	21,58	8,00	172,64
	CT_DWPT026	Conductor cobre desnudo 50 mm2	u	6,44	32,00	206,08
	CT_DWPT027	Cable flexible Cu 0,6/1 kV - RV-K Eca - 1x50 mm2	u	6,44	20,00	128,80
	CT_DWPT028	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	20,00	441,80
	CT_DWPT029	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	20,00	419,20
	CT_DWPT030	Pequeño Material	u	1,43	56,00	80,08
	CT_DWPT031	Cable eléctrico unipolar Al MT 20 kV 1x95mm2	m	10,23	15,00	153,45
	CT_DWPT032	Cable unipolar RV-K 0,6/1 kV 1x50mm2	m	10,72	15,00	160,80
	CT_DWPT033	Costes indirectos	u	1.762,85	10,00	176,29
					Total Partida	1.939,14
					Total Centro de Transformación	76.016,05

Destacar que se han añadido las partidas para la realización de la puesta a tierra (PAT) del centro de transformación y el conexionado entre conjunto de celdas-transformador-cuadros de distribución de baja tensión, pues, aunque no se ha calculado el detalle del cableado a utilizar se utilizan medidas estándar para este tipo de conexiones.

Además, se ha incrementado el total de cada una de las partidas un 3 % a modo de costes indirectos para incluir elementos no imputables a las unidades de la obra, tales como almacenaje, imprevistos o compensación para el pago de otros servicios que puedan estar afectados por la instalación.

2. Obra Civil

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Cableado Circuito CA	OC_DWPT001	Cable Unipolar RZ-k 1x185 mm2	m	38,80	5.280,00	204.864,00
	OC_DWPT002	Tubo curvable, suministrado en rollo de 200 mm de diámetro nominal, para canalización enterrada, resistencia a la compresión 450 N	m	19,52	1.325,00	25.864,00
	OC_DWPT003	Cable Unipolar RZ-k 16 mm2	m	3,70	400,00	1.480,00
	OC_DWPT004	Tubo curvable, suministrado en rollo de 75 mm de diámetro nominal, para canalización enterrada, resistencia a la compresión 450 N	m	4,36	400,00	1.744,00
	OC_DWPT005	Cinta Señalización polietileno cable eléctrico	m	0,25	1.325,00	331,25
	OC_DWPT006	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	676,31	14.939,75
	OC_DWPT007	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	674,35	14.134,29
	OC_DWPT008	Pequeño Material	u	1,43	2.700,00	3.861,00
	OC_DWPT009	Costes directos Complementarios	%	267.218,29	3,00	8.016,55
					Total Partida	275.234,84

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Cableado Circuitos CC	OC_DWPT010	Cable Unipolar RZ-k 400 mm2	m	88,70	4.000,00	354.800,00
	OC_DWPT011	Tubo curvable, suministrado en rollo de 200 mm de diámetro nominal, para canalización enterrada, resistencia a la compresión 450 N	m	19,52	4.000,00	78.080,00
	OC_DWPT012	Cinta Señalización polietileno cable eléctrico	m	0,25	2.000,00	500,00
	OC_DWPT013	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	800,00	17.672,00
	OC_DWPT014	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	800,00	16.768,00
	OC_DWPT015	Pequeño Material	u	1,43	2.700,00	3.861,00
	OC_DWPT016	Costes directos Complementarios	%	471.681,00	3,00	14.150,43
					Total Partida	485.831,43

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Excavación Zanja	OC_DWPT017	Retroexcavadora hidráulica sobre neumáticos, de 70 kW.	m3	14,97	2.905,00	43.487,85
	OC_DWPT018	Peón especializado	h	22,34	734,70	16.413,25
	OC_DWPT019	Costes directos complementarios	%	59.901,10	3,00	1.797,03
					Total partida	61.698,13

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Sub-Base de Arena en Zanja	OC_DWPT020	Arena de rio de 0 a 5 mm de diámetro limpia	t	16,45	466,50	7.673,93
	OC_DWPT021	Pala cargadora sobre neumáticos 120 kW	h	45,95	5,18	237,92
	OC_DWPT022	Peón especializado	h	20,43	10,28	209,93
	OC_DWPT023	Costes directos complementarios	%	7.911,84	3,00	237,36
					Total partida	8.359,12

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Arquetas Inversores	OC_DWPT024	Arqueta Hormigón	u	68,45	400,00	27.380,00
	OC_DWPT025	Tapa marco estanca Hormigón	u	68,97	400,00	27.588,00
	OC_DWPT026	Oficial contrucción	h	21,86	240,08	5.248,15
	OC_DWPT027	Peón especializado	h	19,57	479,92	9.392,03
	OC_DWPT028	Retrocargadora neumática	h	24,93	60,65	1.512,00
	OC_DWPT029	Base Hormigón HM 10 cm espesor	m3	94,38	80,00	7.550,40
	OC_DWPT030	Costes directos complementarios	%	78.670,58	10,00	7.867,06
					Total partida	86.537,64

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Arquetas Registrables	OC_DWPT031	Arqueta Hormigón	u	68,45	40,00	2.738,00
	OC_DWPT032	Tapa marco estanca Hormigón	u	68,97	40,00	2.758,80
	OC_DWPT033	Oficial contrucción	h	21,86	80,00	524,80
	OC_DWPT034	Peón especializado	h	19,57	80,00	939,20
	OC_DWPT035	Retrocargadora neumática	h	24,93	8,00	302,40
	OC_DWPT036	Base Hormigón HM 10 cm espesor	m3	94,38	6,00	338,40
	OC_DWPT037	Costes directos complementarios	%	7.601,60	10,00	760,16
					Total partida	8.361,76

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Relleno Zanja	OC_DWPT038	Arena de 0 a 5 mm de diámetro, limpia.	t	16,45	2.956,88	48.640,59
	OC_DWPT039	Pala cargadora sobre neumáticos 120 kW	h	45,95	16,00	1.508,01
	OC_DWPT040	Peón especializado	h	19,57	67,99	1.330,59
	OC_DWPT041	Costes directos complementarios	%	51.479,19	3,00	1.544,38
					Total partida	53.023,57

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Capa Hormigón 28 cm	OC_DWPT042	Hormigón HM 28 cm espesor	m3	94,38	581,00	54.834,78
	OC_DWPT043	Oficial contrucción	h	21,86	200,00	4.372,00
	OC_DWPT044	Peón especializado	h	19,57	200,00	3.914,00
	OC_DWPT045	Costes directos complementarios	%	63.120,78	3,00	1.893,62
					Total partida	65.014,40

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Terminado asfáltico Banda Intermedia	OC_DWPT046	Mezcla bituminosa continua en caliente AC22 bin D, para capa intermedia 7 cm	t	90,00	353,50	31.815,00
	OC_DWPT047	Extendidora asfáltica de cadenas, de 81 kW.	h	231,73	3,81	883,75
	OC_DWPT048	Rodillo vibrante tandem autopropulsado, de 24,8 kW, de 2450 kg, anchura de trabajo 100 cm.	h	56,81	3,86	219,17
	OC_DWPT049	Compactador de neumáticos autopropulsado, de 12/22 t.	h	65,18	3,96	258,06
	OC_DWPT050	Oficial 1ª Construcción Civil	h	21,41	23,28	498,44
	OC_DWPT051	Ayudante Construcción Obra Civil	h	20,34	15,47	314,62
	OC_DWPT052	Costes directos complementarios	%	33.989,03	3,00	1.019,67
					Total partida	35.008,70

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Terminado asfáltico Banda Rodadura	OC_DWPT051	Mezcla bituminosa continua en caliente AC16 surf D, para capa de rodadura 4 cm	t	87,57	80,80	7.075,66
	OC_DWPT052	Extendidora asfáltica de cadenas, de 81 kW.	h	231,73	0,89	206,04
	OC_DWPT053	Rodillo vibrante tandem autopropulsado, de 24,8 kW, de 2450 kg, anchura de trabajo 100 cm.	h	56,81	0,88	50,10
	OC_DWPT054	Compactador de neumáticos autopropulsado, de 12/22 t.	h	65,18	0,90	58,98
	OC_DWPT055	Oficial 1ª Construcción Civil	h	21,41	5,32	113,93
	OC_DWPT056	Ayudante Construcción Obra Civil	h	20,34	3,54	71,91
	OC_DWPT057	Costes directos complementarios	%	7.576,62	3,00	227,30
					Total partida	7.803,91
					Total Obra Civil	1.086.873,51

En esta partida se ha incluido la unidad de “Costes directos complementarios” de un 3 % para contemplar el pago de pequeño material no incluido, como pueden ser los codos o piezas de unión para unir diferentes tramos de canalización o realización de empalmes en cableado eléctrico.

En las partidas correspondientes a las arquetas tanto de ubicación de inversores como de registro, se han incrementado los costes directos en un 10 % para compensar el sobre gasto que supone adaptar las utilizadas como referencia a las necesidades específicas del proyecto.

3. Equipamiento Electrónico:

	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Bobinas inductoras	ELDWPT001	Cable cobre desnudo 95 mm2	m	14,75	6.400,00	94.400,00
	ELDWPT002	Poliuretano alta densidad >0,941g/cm3	m2	6,00	240,00	1.440,00
	ELDWPT003	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	240,00	5.301,60
	ELDWPT004	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	240,00	5.030,40
	ELDWPT005	Costes directos Complementarios	%	106.172,00	10,00	10.617,20
	ELDWPT006	Desarrollo Modelo/Montaje Ingeniería	h	36,21	80,00	2.896,80
					Total Partida	119.686,00
	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Inversores	ELDWPT007	BSM180D12P2C101	u	462,56	800,00	370.048,00
	ELDWPT008	Módulo PFM	u	462,56	400,00	185.024,00
	ELDWPT009	Caja Estanca 50x50x50 cm	u	43,49	400,00	17.394,00
	ELDWPT010	Costes directos Complementarios	%	572.466,00	10,00	57.246,60
	ELDWPT011	Desarrollo Modelo/Montaje Ingeniería	h	36,21	80,00	2.896,80
						Total Partida
	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Convertidores CC	ELDWPT012	dcs880-A54-0470-04/05	u	6.996,00	10,00	69.960,00
	ELDWPT013	Armario Estanco Protección	u	5.000,00	10,00	50.000,00
	ELDWPT014	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	120,00	2.650,80
	ELDWPT015	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	120,00	2.515,20
	ELDWPT016	Partida Anclaje Instalación equipo	u	176,32	10,00	1.763,20
	ELDWPT017	Costes directos Complementarios	%	126.889,20	5,00	6.344,46
					Total Partida	133.233,66
	Referencia	Descripción	Unidad	Precio unitario (€)	Rendimiento	Total (€)
Equipo Comunicación inversor-vehículo	ELDWPT018	Modulo comunicación Revel	u	551,13	200,00	110.226,00
	ELDWPT019	Oficial Electricista 1ª	h	22,09	140,00	3.092,60
	ELDWPT020	Oficial Electricista 2ª	h	20,96	140,00	2.934,40
	ELDWPT021	Desarrollo Modelo/Montaje Ingeniería	h	36,21	80,00	1,81
						Total Partida
					Total Electrónica	1.001.783,87

Aunque no se ha explicado en el trabajo, como se adelantó en el capítulo 3.2.4 se precisa de un sistema de control que monitorice la energía entre el vehículo y los inversores, en base a esto, se ha tomado como referencia el prototipo presentado en [92] bajo la plataforma Revel para diseñar un sistema de comunicación entre vehículo y plataforma de recarga comunicados mediante un módulo de radiofrecuencia. Se utiliza el precio de diseño del prototipo como referencia para el presupuesto.

En las partidas correspondientes a bobinas inductoras, inversores y equipos de comunicación inversor vehículo se ha incluido una unidad denominada “Desarrollo Modelo/Montaje Ingeniería” que contempla 80 horas de trabajo de ingeniería en laboratorio específico para probar el prototipo diseñado y confirmar que funciona correctamente o incluir las mejoras que se precisen.

Todas las partidas se han incrementado un 10 % en concepto de costes directos complementarios para contemplar el pago de elementos electrónicos y finalización de montaje de cada uno de los equipos.

4. Mantenimiento decenal de instalaciones

Con objeto de disponer de una estimación del coste de mantenimiento decenal del equipamiento instalado, se ha determinado este concepto en base a los precios de referencia que vienen recogidos en [89].

Se ha tenido en cuenta para el cálculo el equipamiento eléctrico, el equipamiento electrónico, incluyendo cableado, capas de hormigonado y asfálticas, pues son las partidas que aparecen en la base de datos de precios de referencia con coste de mantenimiento asociado.

La estimación del coste del sistema DWPT, unidad con referencia MT_DWPT061, se ha realizado en base al precio decenal reflejado en [89] para una estación de recarga con potencia 14,8 kW con alimentación monofásica, extrapolando el valor a la potencia diseñada en nuestro sistema de 2000 kW.

En base a todo ello el coste del mantenimiento para los 10 primeros años de la instalación se corresponde con:

	<i>Referencia</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Precio anual (€)</i>	<i>Rendimiento</i>	<i>Total (€)</i>
Mantenimiento Decenal	MT_DWPT001	Centro de transformación	u	30,21	10	302,10
	MT_DWPT002	Transformadores de 1000 kV	u	32,528	10	325,28
	MT_DWPT003	Cuadros de distribución BT	u	14,746	10	147,46
	MT_DWPT004	Conjunto de Celdas	u	134,34	10	1.343,40
	MT_DWPT005	Sistema DWPT:Cableado, convertidor, inversores y bobinas inductoras	u	15070,9459	10	150709,459
	MT_DWPT006	Capa hormigón 28 cm	u	178,948	10	1789,48
	MT_DWPT007	Capa asfáltica intermedia	u	485,709	10	4857,09
	MT_DWPT008	Capa asfáltica rodadura		108,1104	10	1081,104
					Total partida	152.827,70

Finalmente, el presupuesto total para la implantación del sistema DWPT se corresponde con la suma de las partidas anteriormente descritas y asciende a **dos millones trescientos diecisiete mil quinientos un euro**.

	<i>Precio (€)</i>
Total CT	76.016,05
Total Obra Civil	1.086.873,51
Total Electrónica	1.001.783,87
Total Mantenimiento	152.827,70
Presupuesto final	2.317.501,13

7. Estudio económico y de impacto medioambiental

En el presente capítulo se realiza por un lado un estudio económico de la implantación de la tecnología y por otro un estudio de los beneficios en lo que al medioambiente se refiere.

De esta forma, se puede evaluar la duración temporal que se precisa para retornar la inversión y la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero que se evitan a la atmosfera.

7.1. Estimación de la densidad de tráfico

Para realizar una estimación real del beneficio económico que supone la instalación del sistema DWPT en un carril bus-taxi, hay que analizar en primer lugar la ocupación para conocer el número de vehículos que lo utilizan.

La “Ordenanza de Movilidad Sostenible para la ciudad de Madrid” [93] reserva la utilización de este tipo de carriles para autobuses urbanos y taxis, excluyendo servicios VTC (Vehículo de turismo con conductor). Por ello, se ha realizado una estimación de uso para estos dos tipos de vehículos y en base a ello el beneficio económico que repercute.

7.1.1. Estimación gasto/ahorro debido al tránsito de autobuses de combustión si se implanta el sistema DWPT

En primer lugar, se ha realizado una estimación económica del coste que afronta el Ayuntamiento de Madrid al transitar el tramo del carril bus-taxi elegido mediante autobús de combustión. Analizando el número de vehículos que lo recorren anualmente, los kilómetros y el precio medio del combustible.

Según los datos recogidos en [66] el tramo de carril bus-taxi de la calle Goya es transitado por 17 autobuses por hora y sentido, lo que conlleva un total de 816 autobuses diarios con un recorrido de 1 km.

Para determinar el consumo de combustible de un autobús urbano se han tomado como referencia los datos reflejados en [94], donde se realiza el estudio del consumo medio de combustible de un autobús urbano en ruta. El resultado de las pruebas arroja un consumo medio de 0,69 l/km.

Finalmente, para realizar la estimación se considera el precio del combustible Diesel en 1,50 €/l, según la información publicadas por el “Ministerio Para la Transición ecológica y el Reto Demográfico” en el informe “Precios Carburantes y Combustibles Datos abril 2023” [95].

En base a esto, el gasto anual en carburante que tienen que abonar el ayuntamiento de Madrid por transitar el tramo a estudio asciende a 308.264 €. En la tabla 30 se resumen los principales parámetros de cálculo.

<i>Nº Autobuses diario</i>	816
<i>Distancia anual (km)</i>	297840
<i>Consumo Anual Diesel (l)</i>	205509,6
<i>Precio Diesel (€/l)</i>	1,5
<i>Gasto anual(€)</i>	308.264

Tabla 30: Gasto anual del Ayuntamiento de Madrid por tránsito de autobuses en el carril bus-taxi de la calle Goya.

A continuación, se ha realizado la misma estimación, pero considerando el uso de autobús eléctrico.

Como se ha reflejado en el capítulo 5.2 el consumo energético por kilómetro de un autobús eléctrico urbano que el sistema DWPT ofrece se corresponde con 1,69 kWh/km.

Para establecer el precio de la energía eléctrica se ha considerado el sistema DWPT similar al resto de puntos de carga que la EMT tiene en Madrid desplegados y que según cobra 0,40 €/kW a los usuarios en su Tarifa de Colón [96].



**PUNTOS DE
RECARGA ELÉCTRICA**

**Tarifa
Colón** | **0,40 €/kWh**

PASOS DE ELECTRO-EMT

Figura 95: Precio kW ofertado por EMT en sus puntos de recarga.

Por tanto, el gasto anual que debe afrontar la administración con el sistema DWPT implantado en lo que a la afección a las líneas de autobuses que utilizan actualmente el carril bus-taxi se corresponde con 193.000 €.

En la tabla 31 se resumen los principales parámetros de cálculo con el sistema de transferencia inductiva dinámica instalado.

<i>Nº Autobuses diario</i>	816
<i>Distancia anual (km)</i>	297840
<i>Consumo Anual Eléctrico (KWh)</i>	482500,80
<i>Precio (€/kWh)</i>	0,4
<i>Gasto anual(€)</i>	193.000

Tabla 31: Gasto anual del Ayuntamiento de Madrid por tránsito de autobuses en el carril bus-taxi de la calle Goya.

El ahorro anual en cuanto a coste energético que trae consigo la implantación de este sistema es de 115.264 € que se corresponde con un 37 %.

7.1.2. Estimación del beneficio obtenido si se ofrece el servicio a taxis eléctricos

Aunque no se cuenta con una estimación del número de vehículos taxi que transitan diariamente el carril bus-taxi, la implantación del sistema DWPT podría aportar como valor añadido el beneficio económico y ambiental que trae consigo ofertarlo a este tipo de servicios. Por ello, se realiza una estimación de los ingresos obtenidos en caso de que se ofreciese y transitasen por la vía 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45 y 50 automóviles a diario por hora y sentido.

Siguiendo el modelo descrito para el caso de autobuses, el consumo energético que tiene un taxi al recorrer el carril se corresponde con 0,29 kWh/km como se ha explicado en el apartado 5.2.

Con estas premisas, el beneficio obtenido para los casos explicados anteriormente se corresponde con los datos reflejados en la tabla 32.

<i>Nº Taxis hora y sentido</i>	15	20	25	30
<i>Nº Taxis anual ambos sentidos</i>	262800	350400	438000	525600
<i>Distancia anual (km)</i>	262800	350400	438000	525600
<i>Consumo Anual Eléctrico (KWh)</i>	76212,00	101616,00	127020,00	152424,00
<i>Precio (€/kWh)</i>	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Recaudación anual(€)</i>	30.485	40.646	50.808	60.970
<i>Nº Taxis hora y sentido</i>	35	40	45	50
<i>Nº Taxis anual ambos sentidos</i>	613200	700800	788400	876000
<i>Distancia anual (km)</i>	613200	700800	788400	876000
<i>Consumo Anual Eléctrico (KWh)</i>	177828,00	203232,00	228636,00	254040,00
<i>Precio (€/kWh)</i>	0,4	0,4	0,4	0,4
<i>Recaudación anual(€)</i>	71.131	81.293	91.454	101.616

Tabla 32: Beneficio anual obtenido si se ofertase el servicio a vehículos taxis para diferente número de automóviles por hora y sentido.

7.2. Estimación del gasto

Con objeto de evaluar la viabilidad de la inversión y el tiempo que tardaría en recuperarse, es necesario hacer una estimación del gasto que va a generar durante los próximos años.

Puesto que las instalaciones que se han realizado hasta el día de hoy en lo que a sistemas DWPT se refiere, han consistido en pruebas piloto, se ha tomado como referencia la evaluación de gasto descrita en [97] para la implantación de una red de puntos de recarga. En dicho análisis, se centra el gasto en 4 puntos fundamentales que se corresponden con:

1. Mantenimiento de la instalación: Puesto que se incluyó en el presupuesto inicial una partida de mantenimiento decenal, los 10 primeros años están cubiertos por este importe. A partir del undécimo se ha tomado como referencia el valor de 23.995,63 € obtenido mediante el coste de mantenimiento anual calculado en el capítulo 6 con un incremento del IPC desde el primer año. Dicho coste, se ha seguido incrementando con el IPC los años sucesivos para la simulación.
2. Seguro de instalación: En [97] se ha estimado en 400 € el primer año por cada 2 puntos de recarga instalados en estaciones de servicio. Utilizando como referencia ese valor para cada tramo de 200 kW, establecemos el valor inicial del seguro en 2.000 €. Este coste se incrementa anualmente con el IPC.
3. Gestor de carga: Gastos asociados a el alta como gestor de carga para ofrecer los servicios a terceros, EMT ya es gestor de carga pues

dispone de puntos de recarga ya instalados por lo que no incrementa el gasto [96].

4. Gestión remota de puntos de recarga: No se incluye en precio pues la EMT, ya dispone de una aplicación que gestiona de forma remota los puntos de recarga instalados en la ciudad y se propone la integración de este servicio en la misma aplicación [103].

Se ha tomado como referencia el valor del IPC (Índice de Precios de Consumo) en España acumulado en abril de 2023 que alcanzó el 4,1% [98].

Según estos condicionantes, el gasto de mantenimiento determinado para los próximos 15 años se refleja en la tabla 33.

Año	Mantenimiento (€)	Seguro (€)	Total (€)
1	-	2.000,00	2.000,00
2	-	2.082,00	2.082,00
3	-	2.167,36	2.167,36
4	-	2.256,22	2.256,22
5	-	2.348,73	2.348,73
6	-	2.445,03	2.445,03
7	-	2.545,27	2.545,27
8	-	2.649,63	2.649,63
9	-	2.758,26	2.758,26
10	-	2.871,35	2.871,35
11	23.995,63	2.989,08	26.984,71
12	24.979,45	3.111,63	28.091,08
13	26.003,61	3.239,21	29.242,81
14	27.069,76	3.372,01	30.441,77
15	28.179,62	3.510,27	31.689,88

Tabla 33: Estimación del gasto de mantenimiento del sistema durante 15 años.

7.3. Cálculo del TIR

Una vez determinado tanto el beneficio como el gasto que la implantación del sistema conlleva, se ha realizado una estimación de los años que tardaría en recuperarse la inversión y por tanto el sistema comienza a ser rentable.

Para ello se ha utilizado la “Tasa Interna de Retorno” (TIR), como indicador válido para determinar los rendimientos futuros esperados de la inversión.

Este parámetro permite evaluar la inversión inicial y el flujo de caja obtenido anualmente, restando los gastos a los ingresos esperados.

Para realizar la cuantificación, se ha calculado la tasa de descuento que, en el momento inicial, equipara la corriente futura de cobros con los pagos, generando un “Valor Actual Neto” (VAN) igual a cero [99] según la expresión:

$$VAN = \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+TIR)^t} - I = 0 \quad (35)$$

Donde:

- F_t se corresponde con el flujo de caja en cada periodo “t”.
- n se corresponde con el número de periodos.
- I se corresponde con la inversión inicial.

Con todo ello, se ha realizado la estimación suponiendo un escenario en el cual se posibilita el uso del servicio a un número de Taxis diferentes, tal y como se ha considerado en el apartado anterior.

En la figura 96 se observa la evolución del TIR en función al número de vehículos que usen el carril bus-taxi en un periodo de 15 años.

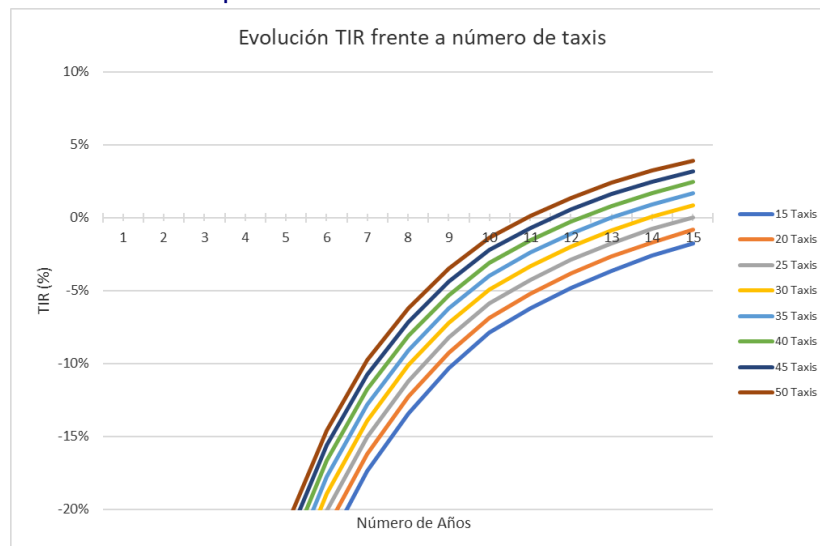


Figura 96: Evolución anual del TIR en diferentes escenarios de uso del carril.

Cuando el TIR supera el 0 %, la inversión comienza a ser rentable.

Los resultados indican que, transitando la vía un número de taxis superior a 25 por hora y sentido, el “payback” o plazo de recuperación de la inversión se sitúa en un horizonte temporal comprendido entre los 11 y 15 años. Para los supuestos con un número menor de vehículos, la recuperación de la inversión supera los 15 años evaluados.

7.4. Evaluación de beneficios medioambientales

Con objeto de evaluar la reducción de gases de efecto invernadero que la implantación del sistema DWPT conlleva, se ha determinado en primer lugar las emisiones que actualmente se están generando en el tramo debido al tránsito de las líneas de autobuses que lo utilizan.

Para realizar el cálculo, se ha utilizado la calculadora de “Huella de Carbono” que facilita el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico en [100].

Esta herramienta, posibilita el cálculo de emisiones de gases efecto invernadero para cualquier tipo de actividad, incluyendo el transporte, permitiendo a su vez, realizar una estimación en función al tipo de vehículo, combustible usado y distancia recorrida o litros de carburante consumido.

Se han establecido los siguientes parámetros para el cálculo:

- Categoría de vehículo: Camiones y Autobuses (N2,N3, M2,M3). Se corresponde con vehículos de mercancías de más de 3,5 toneladas.
- Tipo de combustible: Gasóleo.
- Kilómetros Recorridos: El total de la distancia transitada por las líneas 21 y 53 a lo largo de un año. Se corresponde con 297.840 km.
- Factores de emisión: Valores de referencia facilitados por el Ministerio:

Valores de referencia		
kg CO ₂ /ud	g CH ₄ /ud	g N ₂ O/ud
0,586	0,012	0,029

Tabla 34: Valores de emisiones de referencia para un autobús de gasóleo [93].

A su vez, se han determinado las emisiones asociadas a la utilización de vehículos eléctricos, para conocer la reducción que se alcanza al sustituir los actuales autobuses de combustión por vehículos de esta tecnología.

Para determinar este parámetro, se ha usado la referencia de emisiones de gases de efecto invernadero arrojados a la atmosfera al generar la electricidad necesaria para suministrar la energía a los vehículos eléctricos. Este valor de referencia, denominado “Factor de mix eléctrico” viene dado por la combinación de las tecnologías utilizadas por cada compañía para generar la electricidad [101]. Para el presente estudio, se ha

utilizado el valor de “Iberdrola Energía España, S.A.U” que en 2022 fue de 0,273 kg CO₂e/kWh.

En la tabla 36 aparecen reflejadas las emisiones de gases efecto invernadero utilizando autobús de Combustión y Eléctrico, así como la reducción en unidades totales y porcentaje para un año, en caso de implantar el sistema DWPT y sustituir las unidades actuales de combustión por tecnología eléctrica.

Puede apreciarse como el sistema evitaría las emisiones de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O) en su totalidad en cuanto al tránsito del vehículo,

Por otro lado, la huella de carbono (CO₂e) se reduce un 26% penalizada por su dependencia con el tipo de combustible utilizado para la generación de electricidad.

	t CO ₂	kg CH ₄	kg N ₂ O	t CO ₂ e
Emisiones generadas por Autobus Combustión	174,53	3,57	8,64	176,92
Emisiones generadas por Autobus Eléctrico	-	-	-	131,72
Reducción Emisiones	174,53	3,57	8,64	45,20
% Reducción Emisiones	100	100	100	26

Tabla 35: Comparativa de emisiones generadas actualmente y reducción si migrase a tecnología eléctrica.

8. Conclusiones y líneas futuras

En este capítulo se exponen las principales conclusiones obtenidas tras la realización del proyecto, además se reflejan las líneas futuras de trabajo que podrían llevarse a cabo en este campo.

8.1. Conclusiones

El objetivo principal de este trabajo ha sido realizar el diseño de un sistema dinámico de transferencia de potencia inductiva que pueda implementarse en un carril bus-taxi. Esto ha conllevado en primer lugar, estudiar en profundidad la tecnología con la dificultad encontrada de que las iniciativas llevadas a cabo en este campo están en gran medida en fase de pilotaje y la información publicada es escasa.

Se ha conseguido diseñar un prototipo y realizar simulaciones para validar el funcionamiento tanto del conjunto bobina-circuito de compensación como de la etapa inversora. Sin embargo, se ha detectado que no existen soluciones comerciales que puedan adaptarse al montaje, por lo que el diseño debe ser validado antes de su implantación.

Así mismo, se ha determinado de forma teórica que con una potencia de 30 kW y según el esquema planteado, suministraría un 32 % más de la energía necesaria para transitar un kilómetro de carril en el caso de autobús eléctrico, y un 100 % más para vehículos de turismo a velocidades urbanas menores a 30 km/h. Según estos datos, se hace necesario la instalación del sistema en toda la vía.

Se ha realizado un estudio de la infraestructura que se precisa, de la normativa aplicable y de los diferentes estándares para su implantación, y se ha propuesto un montaje tanto de obra civil como eléctrica. Al realizarlo, se ha observado, que la actual normativa no es acorde a las necesidades de este tipo de instalaciones, pues no contempla esta topología de montajes, debiendo adaptarlos al Reglamento Electrotécnico de Baja tensión, que está enfocado a instalaciones de distribución de energía eléctrica.

Debido a esto y a los requisitos que se solicitan, la obra civil alcanza una dimensión importante, lo que conlleva un incremento en el coste de despliegue. Como se puede extraer del estudio, es conveniente adaptar la norma a exigencias menos restrictiva en cuanto a dimensiones de canalización, profundidad de excavaciones o a las diferentes peculiaridades que el montaje presenta.

El coste de instalación obtenido por kilómetro se sitúa en 1.158.750 €, aunque depende de la potencia instalada, se realiza una comparativa con las previsiones publicadas en la literatura de referencia.

Entre las diferentes publicaciones realizadas, encontramos el análisis hecho por Dynacov [32], englobado dentro del proyecto CENEX del Reino Unido para realizar un estudio de la tecnología y su viabilidad de implantación, donde se refleja que el coste por kilómetro se sitúa en una horquilla entre 791.987 € y 996.040 € según el proyecto OLEV “*On Line Electric Vehicle*” [60], lo que se corresponde con un valor un 16 % menor al obtenido en el presente trabajo.

En otra estimación reflejada en el proyecto Fabric [104], se estima un coste de obra civil e instalación entre 800.000 € y 1.600.000 € por kilómetro, rango que cubre el presupuesto que se ha determinado.

Se han analizado aspectos económicos para determinar el ahorro que supone la instalación para la administración pública en las condiciones de explotación actuales del carril bus-taxi, y se han realizado simulaciones de beneficios ofreciendo el servicio a taxis, determinando que el retorno de la inversión se realiza entre los 11 y 15 años desde la instalación, siempre que se amplíe el servicio y sea utilizado por, al menos, 25 taxis por hora y sentido.

Por último, se ha evaluado el impacto medioambiental concluyendo que actualmente, si se migran los autobuses de combustión que se usan en las líneas que transitan el carril bus-taxi, se evitaría la emisión de 174 toneladas de dióxido de carbono, 3 kg de metano y alrededor de 8 kg de óxido nitroso anualmente, cuestión fundamental para cumplir los objetivos de desarrollo sostenible, aunque la huella de carbono solo se ve reducida en un 26 % penalizada por la generación de la electricidad necesaria para alimentar el vehículo eléctrico.

Con todo ello, concluir que el proyecto está alineado con los objetivos de desarrollo sostenible ODS 5 y ODS 10 en cuanto a que mejora las condiciones de movilidad al ser más barato el coste de los desplazamientos y al realizar la carga sobre ruta la planificación de paradas para repostaje no es tan necesaria, favoreciendo los desplazamientos encadenados como se adelantó en el capítulo primero.

Además, la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero favorece la consecución de los objetivos ODS 13, ODS 15, ODS 9 y ODS 12.

8.2. Líneas futuras

En una tecnología que está en un estado tan incipiente como esta, las líneas de trabajo son muy amplias.

Es conveniente trabajar en simular esquemas con diferentes circuitos de compensación y comparar los resultados en cuanto a rendimiento general del sistema y costes.

Por otro lado, por la extensión del presente proyecto, han quedado etapas como la inversora o la del sistema de control entre vehículo y sistema DWPT pendientes de ahondar más y realizar un desarrollo con más detalle, cuestiones fundamentales para la implantación de la tecnología de forma efectiva.

Se ha realizado la simulación con bobinas de cobre, en la literatura de referencia se han probado con otros materiales como el litz, lo que abre el campo de estudio de la diversidad de materiales que pueden utilizarse para construir las almohadillas inductoras.

Puesto que se ha patentado asfalto magnetizable o “Magment” es interesante analizar el sistema DWPT usando este material.

Así mismo, se puede simular el comportamiento del sistema frente a separaciones de bobinas mayores a 25 cm, pues se ha tomado como referencia este valor de acuerdo con la clasificación marcada en el estándar SAE J2954, sin embargo, esta recomendación está enfocada a la carga inalámbrica estática.

En el supuesto de diseño, las bobinas se han repartido uniformemente sobre la vía. Para potenciar la carga en este tipo de carriles, puede analizarse un montaje con una instalación de bobinas adaptadas a la vía, ubicando un mayor número de elementos en zonas de paradas de autobuses, semáforos o intersecciones, de esta forma se aprovechan las detenciones para aumentar la carga.

Para finalizar, comentar que la implantación de la tecnología DWPT puede ser una oportunidad para integrar la energía renovable directamente en la red, pues las topologías que generan en corriente continua no precisan inversión a corriente alterna, siendo utilizadas para la alimentación directa de los equipos inversores, abaratando el coste final de la instalación.

9. Glosario

AC - Corriente Alterna
 BEV - Battery Electric Vehicle
 BT - Baja Tensión
 CIRCE- Centro de Investigación de Recursos y Consumos Energéticos
 CPT- Capacitive Power Transfer
 CT - Centro de Transformación
 DC - Corriente Continua
 DIPT - Dynamic Inductive Power Transfer
 DWPT - Dynamic Wireless Power Transfer
 EMF - Electromagnetic Field
 EMT - Empresa Municipal de Transporte de Madrid
 FCEV - Fuel Cell Electric Vehicle
 GEI - Gases de efecto invernadero
 GHG - Greenhouse Gasses
 HEV - Hybrid Electric Vehicle
 HF – High Frequency
 HM - Hormigón en masa
 IEC - International Standards for all Electrical, Electronic and Related Technologies
 IPC - Índice de precios de consumo
 IPT - Inductive Power Transfer
 ISO - International Organization for Standardization
 ITC - Instrucción Técnica Complementaria
 MCB - Mezcla bituminosa en caliente
 MHEV - Micro-Hybrid Electric Vehicle
 MT - Media Tensión
 OLEV - On Line Electric Vehicle
 OVEMS - Observatorio del vehículo eléctrico y la movilidad sostenible
 PAT - Puesta a tierra
 PFC - Power factor correction
 PHEV - Plug-in Hybrid Electric Vehicle
 REEV - Range Extended Electric Vehicle
 SAE - Society of Automotive Engineers
 TIR - Tasa interna de retorno
 VAN - Valor actual neto
 VE - Vehículo eléctrico
 VTC - Vehículo de turismo sin conductor
 WPT - Wireless Power Transfer
 XLPE - Cross linked Polyethylene
 ZBE - Madrid Zona de Bajas Emisiones

10. Bibliografía

- [1] (2020) Gob.es. Disponible en: https://www.miteco.gob.es/images/es/pnieccompleto_tcm30-508410.pdf (Consultado: el 3 de marzo de 2023).
- [2] Madrid 360 * Zonas de bajas emisiones (2021) Madrid 360. Ayuntamiento de Madrid. Disponible en: <https://www.madrid360.es/medio-ambiente/zonas-de-bajas-emisiones/> (Consultado: el 3 de marzo de 2023).
- [3] Observatorio del Vehículo Eléctrico y Movilidad Sostenible – OVEMS (sin fecha) Comillas.edu. Disponible en: <https://evobservatory.iit.comillas.edu/> (Consultado: el 3 de marzo de 2023).
- [4] Guía - El vehículo autónomo visto con gafas violeta (2022) diamond-project.eu. Disponible en: <https://diamond-project.eu/download/guia-el-vehiculo-autonomo-visto-con-gafas-violeta/> (Consultado: el 4 de marzo de 2023).
- [5] Cuánto cuesta cargar un coche eléctrico (2022) REPSOL. Repsol España. Disponible en: <https://www.repsol.es/particulares/asesoramiento-consumo/cuanto-cuesta-cargar-un-coche-electrico/> (Consultado: el 8 de junio de 2023).
- [6] Precio de la gasolina hoy en España (sin fecha) Dieselogasolina.com. Disponible en: <https://www.dieselogasolina.com/precio-de-la-gasolina.html> (Consultado: el 4 de marzo de 2023).
- [7] (2023) Apiem.org. Disponible en: <https://apiem.org/la-agencia-internacional-de-la-energia-cree-que-la-produccion-de-baterias-sera-mas-que-suficiente-para-cumplir-los-objetivos-del-coche-electrico> (Consultado: el 5 de marzo de 2023).
- [8] Clean energy demand for critical minerals set to soar as the world pursues net zero goals (sin fecha) IEA. Disponible en: <https://www.iea.org/news/clean-energy-demand-for-critical-minerals-set-to-soar-as-the-world-pursues-net-zero-goals> (Consultado: el 8 de junio de 2023).
- [9] Profesional, R. (2021) ¿Qué impacto ambiental tiene el reciclaje de baterías de los vehículos eléctricos?, Residuos Profesional. Disponible en: <https://www.residuosprofesional.com/impacto-ambiental-reciclaje-de-baterias/> (Consultado: el 8 de marzo de 2023).
- [10] La política de medio ambiente: principios generales y marco básico (sin fecha) Europa.eu. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/factsheets/es/sheet/71/la-politica-de-medio-ambiente-principios-generales-y-marco-basico> (Consultado: el 8 de marzo de 2023).
- [11] Emisiones de gases contaminantes en el transporte por modo y tipo de tráfico (nacional e internacional) (2023) Gob.es. Disponible en: <https://apps.fomento.gob.es/bdotle/visorBDpop.aspx?i=542> (Consultado: el 8 de marzo de 2023).

[12] Corporativa, I. (2023) Historia del coche eléctrico, Iberdrola. Disponible en: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/historia-coche-electrico> (Consultado: el 14 de marzo de 2023).

[13] Gamero, A. (2017) Cuando los coches eléctricos estaban de moda (a principios del siglo XX), La piedra de Sísifo. Disponible en: https://lapiedradesisifo.com/2017/12/27/cuando-los-coches-electricos-estaban-moda-principios-del-siglo-xx/?utm_content=cmp-true (Consultado: el 14 de marzo de 2023).

[14] Hita, M. Á. (2021) Estos son los seis tipos de coches eléctricos y electrificados, por si estás buscando uno de segunda mano, Motorpasion.com. Motorpasion. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/compra-coches/conoce-que-tipos-coches-electricos-hay-sus-caracteristicas-estas-buscando-uno-segunda-mano> (Consultado: el 15 de marzo de 2023).

[15] Tipos de coches eléctricos: principios de funcionamiento (2022) David. Disponible en: <https://ecoinventos.com/tipos-de-coches-electricos/> (Consultado: el 15 de marzo de 2023).

[16] Optimus Energía - Compañía eléctrica especializada en Empresas (sin fecha) Optimusenergia.es. Disponible en: https://www.optimusenergia.es/soluciones_cocheelectrico.php (Consultado: el 15 de marzo de 2023).

[17] Pardillos, S. C. (2022) Infraestructuras para la recarga del vehículo eléctrico.

[18] Bartolomé, E. S. (2022) Coches eléctricos: ¿qué tipos de carga existen?, Diariomotor. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/electricos/tipos-carga-coche-electrico/> (Consultado: el 16 de marzo de 2023).

[19] Modos de recarga de los vehículos eléctricos (2021) MotorMundial. Disponible en: <https://www.motormundial.es/modos-de-recarga-de-los-vehiculos-electricos/2021/11/02/> (Consultado: el 16 de marzo de 2023).

[20] Asesoría Energética Alicante Koneqta Energía - Instalaciones Vehículo Eléctrico (sin fecha) Koneqta.com. Disponible en: <https://www.koneqta.com/proyectos-o-estudios/instalaciones-veh%C3%ADculo-electrico/> (Consultado: el 16 de marzo de 2023).

[21] And, J. P. (sin fecha) WiTricity Halo TM wireless charging for electric vehicles, Witricity.com. Disponible en: https://witricity.com/wp-content/uploads/2022/11/WiTricity_Halo_brochure.pdf (Consultado: el 16 de marzo de 2023).

[22] Magnify (2021) "Arena del Futuro 2021: Movilidad con cero emisiones", Aleatica, 1 mayo. Disponible en: <https://www.aleatica.com/arena-del-futuro-movilidad-con-cero-emisiones/> (Consultado: el 19 de marzo de 2023).

- [23] ENRX (sin fecha) [ipt-technology.com](https://ipt-technology.com/case-study-wireless-opportunity-charging-turin/). Disponible en: <https://ipt-technology.com/case-study-wireless-opportunity-charging-turin/> (Consultado: el 27 de marzo de 2023).
- [24] M. Hassan and A. E. Zawawi, "Wireless power transfer (Wireless lighting)," *2015 5th International Conference on Information & Communication Technology and Accessibility (ICTA)*, Marrakech, Morocco, 2015, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICTA.2015.7426916
- [25] Li, Yang, Jiaming Liu, Qingxin Yang, Xin Ni, Yujie Zhai, and Zhigang Lou. 2020. "Directional Characteristics of Wireless Power Transfer via Coupled Magnetic Resonance" *Electronics* 9, no. 11: 1910. <https://doi.org/10.3390/electronics9111910>
- [26] Ahmed, A. & Khalifa, Othman. "Wireless power transfer for electric vehicle charging". 2020. *AIP Conference Proceedings*. 2306. 020026. 10.1063/5.0032383.
- [27] Yusmarnita Yusop, Shakir Saat, Huzaimah Husin, Imran Hindustan, F.K. Abdul Rahman, K.H. Kamarudin and Sing Kiong Nguang, 2016. A Study of Capacitive Power Transfer Using Class-E Resonant Inverter. *Asian Journal of Scientific Research*, 9: 258-265.
- [28] S. Li and C. C. Mi, "Wireless Power Transfer for Electric Vehicle Applications," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 3, no. 1, pp. 4-17, March 2015, doi: 10.1109/JESTPE.2014.2319453.
- [29] Hutchinson, L., Waterson, B., Anvari, B. and Naberezhnykh, D. (2019), Potential of wireless power transfer for dynamic charging of electric vehicles. *IET Intell. Transp. Syst.*, 13: 3-12. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5221>
- [30] S. Jayalath and A. Khan, "Design, Challenges, and Trends of Inductive Power Transfer Couplers for Electric Vehicles: A Review," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 9, no. 5, pp. 6196-6218, Oct. 2021, doi: 10.1109/JESTPE.2020.3042625.
- [31] Jayathurathnage, Prasad & Alphones, Arokiaswami & Vilathgamuwa, Don. (2016). Figure of Merit for the Optimization of Wireless Power Transfer System Against Misalignment Tolerance. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 32. 1-1. 10.1109/TPEL.2016.2601939.
- [32] Dynamic charging of vehicles (DynaCoV) (2021) Cenex. Disponible en: <https://www.nationalgrid.co.uk/downloads-view-reciteme/397042> (Consultado: el 18 de marzo de 2023).
- [33] Project, T. y Evans-Gadgil, S. (2021) Lowering your emissions through innovation in transport and energy infrastructure DynaCoV Workpackage 2 Report: Literature Review Dynamic Wireless Power Transfer, [Nationalgrid.co.uk](https://www.nationalgrid.co.uk/downloads-view-reciteme/397042). Disponible en: <https://www.nationalgrid.co.uk/downloads-view-reciteme/397042> (Consultado: el 20 de marzo de 2023).

[34] Seoul Grand Park gets environmentally friendly electric tram (2011) Ecofriend. Disponible en: <https://ecofriend.com/seoul-grand-park-environmentally-friendly-electric-tram.html> (Consultado: el 18 de marzo de 2023).

[35] Hutchinson, L., Waterson, B., Anvari, B. and Naberezhnykh, D. (2019), Potential of wireless power transfer for dynamic charging of electric vehicles. IET Intell. Transp. Syst., 13: 3-12. <https://doi.org/10.1049/iet-its.2018.5221>

[36] Libre, V. (sin fecha) La tecnología de alimentación Primove de Bombardier equipa una línea de autobuses en Alemania, Vialibre-ffe.com. Disponible en: <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=15453> (Consultado: el 18 de marzo de 2023).

[37] (2017) Renault prueba cargar vehículos eléctricos en movimiento, Motor y movilidad. Disponible en: <https://www.20minutos.es/noticia/3041890/0/renault-carga-movimiento-coche-electrico/> (Consultado: el 20 de marzo de 2023).

[38] Smartroad Gotland (2022) Electreon. Disponible en: <https://electreon.com/projects/gotland> (Consultado: el 18 de marzo de 2023).

[39] ElectReon y Dan Bus Company ponen en marcha la mayor infraestructura de recarga de vehículos eléctricos comerciales del mundo para una flota de 200 autobuses públicos (2021) Businesswire.com. Disponible en: <https://www.businesswire.com/news/home/20211005005657/> (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[40] Large demonstratioN of user Centric urban and long-range charging solutions to boost an engaging deployment of Electric Vehicles in Europe (2020) Europa.eu. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/875683/es> (Consultado: el 18 de marzo de 2023).

[41] Zarazaga, S. (2020) INCIT-EV project, INCIT-EV Project. Disponible en: <https://www.incit-ev.eu/demonstrations/> (Consultado: el 19 de marzo de 2023).

[42] Marinero, I. (2022) Así es Arena Del Futuro, el primer circuito que carga vehículos eléctricos sobre la marcha, El Español. Disponible en: https://www.elespanol.com/omicrono/tecnologia/20220619/arena-futuro-primer-circuito-vehiculos-electricos-marcha/680682158_0.html (Consultado: el 19 de marzo de 2023).

[43] “Arena del Futuro”, innovative dynamic induction charging becomes a reality (2021) Stellantis.com. Disponible en: <https://www.media.stellantis.com/be-nl/citroen/press/arena-del-futuro-innovative-dynamic-induction-charging-becomes-a-reality> (Consultado: el 20 de marzo de 2023).

[44] Tesic, M. (2022) Magnetizable Asphalt (MA): Magment expands portfolio of patented magnetizable road construction materials for dynamic wireless charging through partnership, Magment. Disponible en: <https://www.magment.co/magnetizable-asphalt-ma-magment-expands->

portfolio-of-patented-magnetizable-road-construction-materials-for-dynamic-wireless-charging-through-partnership/ (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[45] Luzardo, A. M. (2016) El asfalto magnético quiere revolucionar el transporte urbano, ENTER.CO. Disponible en: <https://www.enter.co/cultura-digital/ciencia/el-asfalto-magnetico-revolucionara-el-transporte-urbano/> (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[46] Magment Technology (2021) Magment. Disponible en: <https://www.magment.co/magment-technology/> (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[47] Magnetizable concrete technology for wireless charging (2022) Powerelectronicsnews.com. Disponible en: <https://www.powerelectronicsnews.com/magnetizable-concrete-technology-for-wireless-charging%EF%BB%BF/> (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[48] Hammerschmidt, C. (2018) Magnetic concrete could make wireless EV charging affordable, eeNews Europe. Disponible en: <https://www.eenewseurope.com/en/magnetic-concrete-could-make-wireless-ev-charging-affordable-2/> (Consultado: el 25 de marzo de 2023).

[49] Villa Gazulla, Juan Luis (2009). Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos Eléctricos mediante Acoplamiento Inductivo. Universidad de Zaragoza. Programa de Doctorado.

[50] Mohamed, Ahmed A. S., Ahmed A. Shaier, Hamid Metwally, and Sameh I. Selem. 2022. "An Overview of Dynamic Inductive Charging for Electric Vehicles" *Energies* 15, no. 15: 5613. <https://doi.org/10.3390/en15155613>

[51] V. Cirimele et al., "Uncertainty Quantification for SAE J2954 Compliant Static Wireless Charge Components," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 171489-171501, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3025052

[52] Iruretagoyena Alustiza, Ugaitz (2018). Desing and Optimization of a Three Phase Inductive Power Transfer System . Universidad del País Vasco. Doctoral Program in Control Engineering, Automation and Robotics.

[53] GAJ Elliott, JT Boys y GA Covic, "A Design Methodology for Flat Pick-up ICPT Systems", 2006 1ST IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications , Singapur, 2006, pp. 1-7, doi: 10.1109/ICIEA.2006.257165.

[54] La carga inalámbrica llega a los coches eléctricos [en línea] [consulta 31 de marzo de 2023] Disponible en: <https://www.circuitodeprueba.com/carga-inalambrica-coches-electricos/>

[55] J. de Boeij, E. Lomonova and A. Vandenput, "Contactless Energy Transfer to a Moving Load Part I: Topology Synthesis and FEM simulation," 2006 IEEE International Symposium on Industrial Electronics, Montreal, QC, Canada, 2006, pp. 739-744, doi: 10.1109/ISIE.2006.295726.

- [56] I. Villar, U. Iruretagoyena, A. Rujas, A. Garcia-Bediaga and I. P. de Arenaza, "Design and implementation of a SiC based contactless battery charger for electric vehicles," 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, QC, Canada, 2015, pp. 1294-1300, doi: 10.1109/ECCE.2015.7309841.
- [57] J. L. Villa, J. Sallan, J. F. Sanz Osorio and A. Llombart, "High-Misalignment Tolerant Compensation Topology For ICPT Systems," in IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 59, no. 2, pp. 945-951, Feb. 2012, doi: 10.1109/TIE.2011.2161055
- [58] Chwei-Sen Wang, G. A. Covic and O. H. Stielau, "General stability criterions for zero phase angle controlled loosely coupled inductive power transfer systems," IECON'01. 27th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (Cat. No.37243), Denver, CO, USA, 2001, pp. 1049-1054 vol.2, doi: 10.1109/IECON.2001.975925.
- [59] A. Mahesh, B. Chokkalingam and L. Mihet-Popa, "Inductive Wireless Power Transfer Charging for Electric Vehicles—A Review," in IEEE Access, vol. 9, pp. 137667-137713, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3116678.
- [60] Machura, P., & Li, Q. (2019). A Critical Review on Wireless Charging for Electric Vehicles. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 104, 209-234. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032119300383>
- [61] K. N. Mude and K. Aditya, "Comprehensive review and analysis of two-element resonant compensation topologies for wireless inductive power transfer systems," in Chinese Journal of Electrical Engineering, vol. 5, no. 2, pp. 14-31, June 2019, doi: 10.23919/CJEE.2019.000008.
- [62] Incit-ev.eu. Disponible en: <https://www.incit-ev.eu/wp-content/uploads/2022/10/INCIT-EV-D7.4-UC-2-complete-solution-description-vFinal.pdf> (Consultado: el 20 de marzo de 2023).
- [63] Intensidades máximas admisibles para conductores de cobre. Ingemecanica.com. Disponible en: https://ingemecanica.com/tutoriales/intensidades_admisibles_conductores_de_cobre.html (Consultado: el 3 de abril de 2023).
- [64] SiC Power Module Rohm.com. Disponible en: https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/discrete/sic/power_module/bsm180d12p2c101-e.pdf (Consultado: el 1 de mayo de 2023).
- [65] SIMetrix. Simetrix.co.uk. Disponible en: <https://www.simetrix.co.uk/products/simetrix.html> (Consultado: el 1 de mayo de 2023).
- [66] (2018) Madrid.es. Disponible en: https://www.madrid.es/UnidadesDescentralizadas/UDCMedios/noticias/2018/06Junio/04Lunes/Notasprensa/CarrilesBus/ficheros/dossier_carril_bus_V8-Ayun.pdf (Consultado: el 20 de abril de 2023).

[67] (2022) Consumo energético de autobuses eléctricos articulados para distintos niveles de carga en el BRT de la Ciudad de México, Theicct.org. Disponible en: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/Consumo-ZEBRA-A4-v3.pdf> (Consultado: el 25 de mayo de 2023).

[68] Calderón Peralvo, Felipe (2020). Desarrollo de un modelo de configuración eléctrica de autobús urbano con baterías. Universidad Politécnica de Madrid. Máster Universitario en Eficiencia Energética en la Edificación, la Industria y el Transporte.

[69] Candela, J. (2022) Coche eléctrico vs gasolina: ¿Qué es más rentable tras la subida de precios, Ecotech Cargadores. Disponible en: <https://www.ecotechcargadores.com/electrico-vs-gasolina/> (Consultado: el 4 de mayo de 2023).

[70] Centros de transformación (2022) Ormazabal. Disponible en: <https://www.ormazabal.com/product/centros-transformacion/> (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

[71] cgmcosmos (2022) Ormazabal. Disponible en: <https://www.ormazabal.com/product/cgmcosmos/> (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

[72] Aplicaciones de distribución (2022) Ormazabal. Disponible en: <https://www.ormazabal.com/product/aplicaciones-de-distribucion/> (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

[73] Diseño ecológico para productos sostenibles (2023) Comisión Europea. Disponible en: https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products_es (Consultado: el 5 de mayo de 2023).

[74] CBTO-AS5 (2021) Pronutec. Disponible en: <https://pronutec.gorlan.com/productos/cbto-as5/> (Consultado: el 3 de mayo de 2023).

[75] DCS880-S Drives. Disponible en: <https://new.abb.com/drives/es/convertidores-corriente-continua/dcs880-s> (Consultado: el 4 de mayo de 2023).

[76] Gabet, T., Mazhoud, B., Kadem, K., Meira, Z., Sanzel, A., Coquelle, E., Sedran, T., & Hornych, P. (2023). Thermo-viscoelastic analysis of an inductive charging system included in an eRoads. Incit-ev project. Transportation Engineering, 11(100161), 100161. <https://doi.org/10.1016/j.treng.2023.100161>

[77] BOE.es - Reglamento electrotécnico para baja tensión e ITC (2023) Boe.es. Disponible en: https://www.boe.es/biblioteca_juridica/codigos/codigo.php?modo=2&id=326_Reglamento_electrotecnico_para_baja_tension_e_ITC (Consultado: el 5 de mayo de 2023).

[78] De instalaciones eléctricas, D. de A. al D. y. D. INSTALACIONES III, Uma.es. Disponible en: https://riuma.uma.es/xmlui/bitstream/handle/10630/17137/REBT%20-%20Tablas%20de%20apoyo%20al%20calcul%20_V.01.pdf?sequence=1&isAllowed=y

(Consultado: el 5 de mayo de 2023).

[79] Gómez García, Jesus (2022). Diseño de una electrolinera provista con energía solar fotovoltaica. Universitat Oberta de Catalunya. Máster Universitario en Ingeniería de Telecomunicación. Área de Electrónica. Trabajo fin de Máster.

[80] Abcgrup.com. Disponible en: <https://www.abcgrup.com/catalogos/Topcable.pdf> (Consultado: el 7 de mayo de 2023).

[81] Rollos, B. P. Futura-systems.com. Disponible en: <https://www.futura-systems.com/wp-content/uploads/2023/02/2022-CATALOGO-FUTURFLEX.pdf> (Consultado: el 4 de junio de 2023).

[82] SketchUp, E. E. Software de modelado en 3D gratuito, SketchUp. Disponible en: <https://www.sketchup.com/es/plans-and-pricing/sketchup-free> (Consultado: el 1 de mayo de 2023).

[83] Autodesk (2023) Autodesk.es. Disponible en: <https://www.autodesk.es/> (Consultado: el 1 de mayo de 2023).

[84] Geoportal del Ayuntamiento de Madrid Madrid.es. Disponible en: https://geoportal.madrid.es/IDEAM_WBGEOPORTAL/index.iam (Consultado: el 2 de mayo de 2023).

[85] Moreno, D. y De Ayaladel, L. (2018) REURBANIZACIÓN DE PAVIMENTOS EN EL PASEO DE RECOLETOS. DISTRITO CENTRO-SALAMANCA (MADRID), Contrataciondelestado.es. Disponible en: <https://contrataciondelestado.es/wps/wcm/connect/17d1e25c-25dd-4a49-8d17-f8cb94da1f87/DOC20190118083543Memoria.pdf?MOD=AJPERES> (Consultado: el 4 de junio de 2023).

[86] Anm y Artículo, -Desarrollado Normas Urbanísticas del Plan General de Ordenación Urbana de Madrid, de 17 de abril de 1997, Madrid.es. Disponible en: https://sede.madrid.es/FrameWork/generacionPDF/ANM2021_345.pdf?idNormativa=6f8c7064cf4a1810VgnVCM2000001f4a900aRCRD&nombreFichero=ANM2021_345&cacheKey=297 (Consultado: el 6 de mayo de 2023).

[87] Arquetas eléctricas IBERDROLA (2020) CEMAT. CEMAT CANALIZACIONES ESPECIALES Y MATERIALES, S.L. Disponible en: <https://cemat.es/producto/arquetas-electricas-iberdrola/> (Consultado: el 6 de mayo de 2023).

[88] Arquetas de Iberdrola (homologado). Prefabricados Alberdi Prefabricadosalberdi.com. Disponible en: <http://www.prefabricadosalberdi.com/alberdi/de/arquetas-de-iberdrola-homologado.asp?nombre=2431&cod=2431&sesion=1> (Consultado: el 6 de mayo de 2023).

[89] Generador de precios de la construcción. España. CYPE Ingenieros, S.A (sin fecha) Generadordeprecios.info. Disponible en: <http://www.generadordeprecios.info/> (Consultado: el 2 de mayo de 2023).

[90] “Cuadro de mando de precios Comunidad de Madrid. CM2022 Área 1” (2022).

[91] Gestor de Publicaciones - Home (2022) Smartis.es. Disponible en: <http://preciocentropublico.smartis.es/publicopc/> (Consultado: el 5 de mayo de 2023).

[92] Muñoz Cobos, Pablo (2017). Revel: Plataforma de comunicación para la gestión de infraestructuras asociadas al vehículo eléctrico. Universidad de Castilla la Mancha. Grado en Tecnologías y Sistemas de la Información. Área de Tecnología específica de computadores. Trabajo fin de grado.

[93] Ordenanza de Movilidad Sostenible, de 5 de octubre de 2018 - Gestiones y Trámites (2018) Madrid.es. Disponible en: [https://sede.madrid.es/eli/es-md-01860896/odnz/2018/10/23/\(1\)/con/20221231/spa/html](https://sede.madrid.es/eli/es-md-01860896/odnz/2018/10/23/(1)/con/20221231/spa/html) (Consultado: el 10 de mayo de 2023).

[94] Barbosa Rojas, Diana Katherine. Betancur Ramírez, Daniel (2016). Medición del consumo de combustible en un bus articulado de la empresa integra s.a. operadora del sistema integrado de transporte “Megabús”. Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ingeniería Mecánica. Trabajo de Grado.

[95] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico - Informes mensuales (2023) Gob.es. Disponible en: <https://energia.gob.es/petroleo/Informes/InformesMensuales/Paginas/InformesMensuales.aspx> (Consultado: el 10 de mayo de 2023).

[96] (2023) Emtmadrid.es. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/getattachment/Bloques-EMT/Recarga-electrica/Tarifas/Tarifas-electroemt-Nov-2021.pdf.aspx> (Consultado: el 29 de mayo de 2023).

[97] Barcia Martín, Javier (2018). Plan de negocio y viabilidad económica para la implantación de puntos de recarga de vehículos eléctricos para conectar Madrid con el Levante español. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Técnica superior de ingenieros industriales. Trabajo de Grado.

[98] Cálculo de variaciones del Índice de Precios de Consumo (2023) INE. Disponible en: <https://www.ine.es/varipc/verVariaciones.do> (Consultado: el 12 de mayo de 2023).

[99] Arias, A. S. (2014) Tasa interna de retorno (TIR), Economipedia. Disponible en: <https://economipedia.com/definiciones/tasa-interna-de-retorno-tir.html> (Consultado: el 5 de junio de 2023).

[100] Calculadoras (2023) Gob.es. Disponible en: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/calculadoras.aspx> (Consultado: el 13 de mayo de 2023).

[101] la Circular, R. L. C. P. en et al. (2023) RESULTADOS DEL ETIQUETADO DE ELECTRICIDAD DE LAS EMPRESAS COMERCIALIZADORAS RELATIVOS A LA ENERGÍA PRODUCIDA EN EL AÑO 2022, Cnmc.es. Disponible en: https://gdo.cnmc.es/CNE/abrirVentanalGeneral.do?fichero=EtiquetadoComercializadora_2022.pdf&directorio=etiquetadoEmpElec (Consultado: el 14 de mayo de 2023).

[102] i-DE: la empresa de distribución eléctrica del grupo Iberdrola (2023) I-de.es. Disponible en: <https://www.i-de.es/> (Consultado: el 28 de abril de 2023).

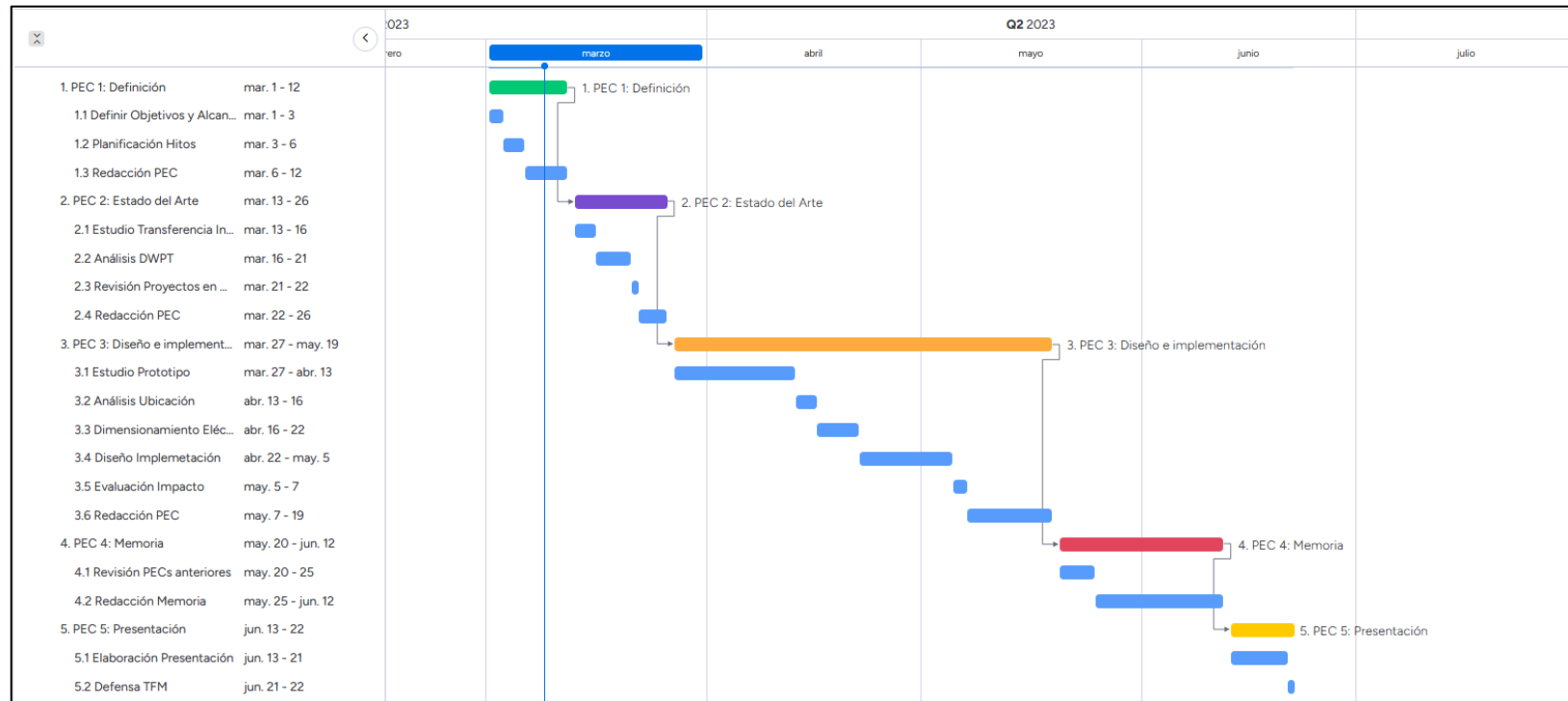
[103] Apps (2023) Emtmadrid.es. Disponible en: <https://www.emtmadrid.es/recargaElectrica/Apps?lang=es-ES> (Consultado: el 7 de junio de 2023).

[104] (2018) Europa.eu. Disponible en: <https://cordis.europa.eu/project/id/605405/reporting> (Consultado: el 8 de junio de 2023).

11. Anexos.

Anexo I

Diagrama de Gantt.



Anexo II

Coeficiente de inducción mutua “M” para bobinas rectangulares de diferente tamaño:

$$\begin{aligned}
 M = \frac{\mu_0}{4\pi} N_1 N_2 \left[& p \cdot \ln \frac{p + \sqrt{(p^2 + h^2 + (b_1 + f)^2)}}{p + \sqrt{(p^2 + h^2 + e^2)}} + (a_2 - c) \cdot \ln \frac{(a_2 - c) + \sqrt{((a_2 - c)^2 + h^2 + e^2)}}{(a_2 - c) + \sqrt{((a_2 - c)^2 + h^2 + (b_1 + f)^2)}} + c \right. \\
 & \cdot \ln \frac{-c + \sqrt{(c^2 + h^2 + e^2)}}{-c + \sqrt{(c^2 + h^2 + (b_1 + f)^2)}} + (a_1 + c) \cdot \ln \frac{-(a_1 + c) + \sqrt{((a_1 + c)^2 + h^2 + (b_1 + f)^2)}}{-(a_1 + c) + \sqrt{((a_1 + c)^2 + h^2 + e^2)}} + p \\
 & \cdot \ln \frac{p + \sqrt{(p^2 + h^2 + q^2)}}{p + \sqrt{(p^2 + h^2 + (b_1 + e)^2)}} + (a_2 - c) \cdot \ln \frac{(a_2 - c) + \sqrt{((a_2 - c)^2 + h^2 + (b_1 + e)^2)}}{(a_2 - c) + \sqrt{((a_2 - c)^2 + h^2 + q^2)}} + c \\
 & \cdot \ln \frac{-c + \sqrt{(c^2 + h^2 + (b_1 + e)^2)}}{-c + \sqrt{(c^2 + h^2 + q^2)}} + (a_1 + c) \cdot \ln \frac{-(a_1 + c) + \sqrt{((a_1 + c)^2 + h^2 + q^2)}}{-(a_1 + c) + \sqrt{((a_1 + c)^2 + h^2 + (b_1 + e)^2)}} + (b_2 - b_1 - e) \\
 & \cdot \ln \frac{(b_2 - b_1 - e) + \sqrt{(q^2 + h^2 + (a_1 + c)^2)}}{(b_2 - b_1 - e) + \sqrt{(q^2 + h^2 + d^2)}} + (b_2 - e) \cdot \ln \frac{(b_2 - e) + \sqrt{((b_2 - e)^2 + h^2 + d^2)}}{(b_2 - e) + \sqrt{((b_2 - e)^2 + h^2 + (a_1 + c)^2)}} + (b_1 + e) \\
 & \cdot \ln \frac{-(b_1 + e) + \sqrt{((b_1 + e)^2 + h^2 + (a_1 + c)^2)}}{-(b_1 + e) + \sqrt{((b_1 + e)^2 + h^2 + d^2)}} + e \cdot \ln \frac{-e + \sqrt{(e^2 + h^2 + d^2)}}{-e + \sqrt{(e^2 + h^2 + (a_1 + c)^2)}} + q \\
 & \cdot \ln \frac{q + \sqrt{(q^2 + h^2 + (a_1 + d)^2)}}{q + \sqrt{(q^2 + h^2 + c^2)}} + (b_2 - e) \cdot \ln \frac{(b_2 - e) + \sqrt{((b_2 - e)^2 + h^2 + c^2)}}{(b_2 - e) + \sqrt{((b_2 - e)^2 + h^2 + (a_1 + d)^2)}} + (b_1 + e) \\
 & \cdot \ln \frac{-(b_1 + e) + \sqrt{((b_1 + e)^2 + h^2 + (a_1 + d)^2)}}{-(b_1 + e) + \sqrt{((b_1 + e)^2 + h^2 + c^2)}} + e \cdot \ln \frac{-e + \sqrt{(e^2 + h^2 + c^2)}}{-e + \sqrt{(e^2 + h^2 + (a_1 + d)^2)}} + \sqrt{e^2 + h^2 + p^2} \\
 & - \sqrt{h^2 + e^2 + (a_2 - c)^2} - \sqrt{h^2 + e^2 + (a_1 + c)^2} + \sqrt{h^2 + e^2 + c^2} + \sqrt{h^2 + (b_1 + f)^2 + (a_2 - c)^2} \\
 & - \sqrt{h^2 + (b_1 + f)^2 + p^2} + \sqrt{h^2 + (b_1 + f)^2 + (a_1 + c)^2} - \sqrt{h^2 + (b_1 + f)^2 + c^2} + \sqrt{h^2 + (b_1 + e)^2 + p^2} \\
 & - \sqrt{h^2 + (b_1 + e)^2 + (a_2 - c)^2} - \sqrt{h^2 + (b_1 + e)^2 + (a_1 + c)^2} + \sqrt{h^2 + (b_1 + e)^2 + c^2} + \sqrt{h^2 + q^2 + (a_2 - c)^2} \\
 & - \sqrt{q^2 + h^2 + p^2} + \sqrt{q^2 + h^2 + (a_1 + c)^2} - \sqrt{q^2 + h^2 + c^2} + \sqrt{q^2 + h^2 + d^2} - \sqrt{h^2 + d^2 + (b_2 - e)^2} \\
 & - \sqrt{h^2 + d^2 + (b_1 - e)^2} + \sqrt{e^2 + h^2 + d^2} + \sqrt{h^2 + (a_1 + c)^2 + (b_2 - e)^2} - \sqrt{h^2 + (a_1 + c)^2 + q^2} \\
 & + \sqrt{h^2 + (a_1 + c)^2 + (b_1 + e)^2} - \sqrt{h^2 + (a_1 + c)^2 + e^2} + \sqrt{q^2 + h^2 + c^2} - \sqrt{h^2 + c^2 + (b_2 - e)^2} \\
 & - \sqrt{h^2 + c^2 + (b_1 + e)^2} + \sqrt{e^2 + h^2 + c^2} + \sqrt{h^2 + (a_1 + d)^2 + (b_2 - e)^2} - \sqrt{h^2 + (a_1 + d)^2 + q^2} \\
 & \left. + \sqrt{h^2 + (a_1 + d)^2 + (b_1 + e)^2} - \sqrt{h^2 + (a_1 + d)^2 + e^2} \right]
 \end{aligned}$$

Donde:

$$p = a_2 - a_1 - c$$

$$q = b_2 - b_1 - e$$

Anexo III

Código implementado en Matlab para la realización de cálculos eléctricos:

```
%Fermín Trujillo Valverde
%Determinación Parámetros eléctricos DWPT 30 kW
%Esquema Compensación SS
clear all;
clc;
%Definimos variables del sistema
V1=420;
%dimensión de las bobinas y número de vueltas
a1=0.6;
a2=0.6;
b1=0.5;
b2=1.0;
N1=10;
N2=5;
%Sección de cable a utilizar
s1=95e-6;
s2=95e-6;
%Resistencia de carga
RL=5.3;
ZL=RL;
%Posición relativa entre bobinas, para el cálculo solo hay que modificar la
% distancia de los valores ·f y d
e=0;
f=0.5;
c=0;
d=0;
h=0.25;
%Factor multiplicativo de frecuencia de resonancia para obtener frecuencia
%de trabajo
KD=38.0794;
%Calculo coeficiente de inducción mutua según ecuación Anexo II
p=a2-a1-c;
q=b2-b1-e;

M1=p*(log((p+sqrt(p^2+h^2+(b1+f)^2))/(p+sqrt(p^2+h^2+e^2))));
M2=(a2-c)*log(((a2-c)+sqrt((a2-c)^2+h^2+e^2))/((a2-c)+sqrt((a2-
c)^2+h^2+(b1+f)^2)));
M3=c*(log((-c+sqrt(c^2+h^2+e^2))/(-c+sqrt(c^2+h^2+(b1+f)^2)));
M4=(a1+c)*(log((- (a1+c)+sqrt((a1+c)^2+h^2+(b1+f)^2))/(-
(a1+c)+sqrt((a1+c)^2+h^2+e^2)));
M5=p*(log((p+sqrt(p^2+h^2+q^2))/(p+sqrt(p^2+h^2+(b1+e)^2)));
M6=(a2-c)*log(((a2-c)+sqrt((a2-c)^2+h^2+(b1+e)^2))/((a2-c)+sqrt((a2-
c)^2+h^2+q^2)));
M7=c*(log((-c+sqrt(c^2+h^2+(b1+e)^2))/(-c+sqrt(c^2+h^2+q^2)));
M8=(a1+c)*(log((- (a1+c)+sqrt((a1+c)^2+h^2+q^2))/(-
(a1+c)+sqrt((a1+c)^2+h^2+(b1+e)^2)));
M9=(b2-b1-e)*(log(((b2-b1-e)+sqrt((a1+c)^2+h^2+q^2))/((b2-b1-
e)+sqrt(q^2+h^2+d^2))));
```

```

M10=(b2-e)*log(((b2-e)+sqrt((b2-e)^2+h^2+d^2))/((b2-e)+sqrt((b2-
e)^2+h^2+(a1+c)^2)));
M11=(b1+e)*log((- (b1+e)+sqrt((b1+e)^2+h^2+(a1+c)^2))/(-
(b1+e)+sqrt((b1+e)^2+h^2+d^2)));
M12=e*(log((-e+sqrt(e^2+h^2+d^2))/(-e+sqrt(e^2+h^2+(a1+c)^2))););
M13=q*(log((q+sqrt(q^2+h^2+(a1+d)^2))/(q+sqrt(q^2+h^2+c^2))););
M14=(b2-e)*log(((b2-e)+sqrt((b2-e)^2+h^2+c^2))/((b2-e)+sqrt((b2-
e)^2+h^2+(a1+d)^2)));
M15=(b1+e)*log((- (b1+e)+sqrt((b1+e)^2+h^2+(a1+d)^2))/(-
(b1+e)+sqrt((b1+e)^2+h^2+c^2)));
M16=e*(log((-e+sqrt(e^2+h^2+c^2))/(-e+sqrt(e^2+h^2+(a1+d)^2))););
M17=sqrt(h^2+e^2+p^2)-sqrt(h^2+e^2+(a2-c)^2)-
sqrt(h^2+e^2+(a1+c)^2)+sqrt(h^2+e^2+c^2)+sqrt(h^2+(b1+f)^2+(a2-c)^2);
M18=-sqrt(h^2+(b1+f)^2+p^2)+sqrt(h^2+(b1+f)^2+(a1+c)^2)-
sqrt(h^2+(b1+f)^2+c^2)+sqrt(h^2+(b1+e)^2+p^2);
M19=-sqrt(h^2+(b1+e)^2+(a2-c)^2)-
sqrt(h^2+(b1+e)^2+(a1+c)^2)+sqrt(h^2+(b1+e)^2+c^2)+sqrt(h^2+q^2+(a2-c)^2);
M20=-sqrt(h^2+q^2+p^2)+sqrt(h^2+q^2+(a1+c)^2)-
sqrt(h^2+q^2+c^2)+sqrt(h^2+q^2+d^2)-sqrt(h^2+d^2+(b2-e)^2);
M21=-sqrt(h^2+d^2+(b1+e)^2)+sqrt(h^2+d^2+e^2)+sqrt(h^2+(a1+c)^2+(b2-e)^2)-
sqrt(h^2+(a1+c)^2+q^2);
M22=sqrt(h^2+(a1+c)^2+(b1+e)^2)-sqrt(h^2+(a1+c)^2+e^2)+sqrt(h^2+c^2+q^2)-
sqrt(h^2+c^2+(b2-e)^2);
M23=-sqrt(h^2+c^2+(b1+e)^2)+sqrt(h^2+c^2+e^2)+sqrt(h^2+(a1+d)^2+(b2-e)^2)-
sqrt(h^2+(a1+d)^2+q^2);
M24=sqrt(h^2+(a1+d)^2+(b1+e)^2)-sqrt(h^2+(a1+d)^2+e^2);
MM=M1+M2+M3+M4+M5+M6+M7+M8+M9+M10+M11+M12+M13+M14+M15+M16+M17+M18+M19+M20+M21+M22
+M23+M24;
M=N1*N2*1e-7*MM;
%calculos previos para simplificar ecuación de coeficiente de autoinducción
X01=sqrt(N1*s1/pi);
X02=sqrt(N2*s2/pi);
Y01=sqrt(a1^2+b1^2);
Y02=sqrt(a2^2+b2^2);
%Cálculo de coeficiente de autoinducción según ecuación 22
L1=(4*10^(-
7))*(N1^2)*(a1*log(2*a1*b1/(X01*(a1+Y01)))+b1*log(2*a1*b1/(X01*(b1+Y01)))-
2*(a1+b1-Y01)+0.25*(a1+b1));
L2=(4*10^(-
7))*(N2^2)*(a2*log(2*a2*b2/(X02*(a2+Y02)))+b2*log(2*a2*b2/(X02*(b2+Y02)))-
2*(a2+b2-Y02)+0.25*(a2+b2));
%Factor de acoplamiento
k=M/(sqrt(L1*L2))

%Cálculo de resistencia de bobinados según ecuación 24
R1=(0.0172)*N1^2*(b1+a1)/(s1*1e6);
R2=(0.0172)*N2^2*(b2+a2)/(s2*1e6);
%Determinación de frecuencia de trabajo
w0=(KD*sqrt(R1*(R2+RL)))/M;
f0=w0/(2*pi)
T=1/f0;
%Determinación de frecuencia de resonancia
wr=(sqrt(R1*(R2+RL)))/M;
f_r=wr/(2*pi);
%Determinación condensadores según ecuación 45

```

```

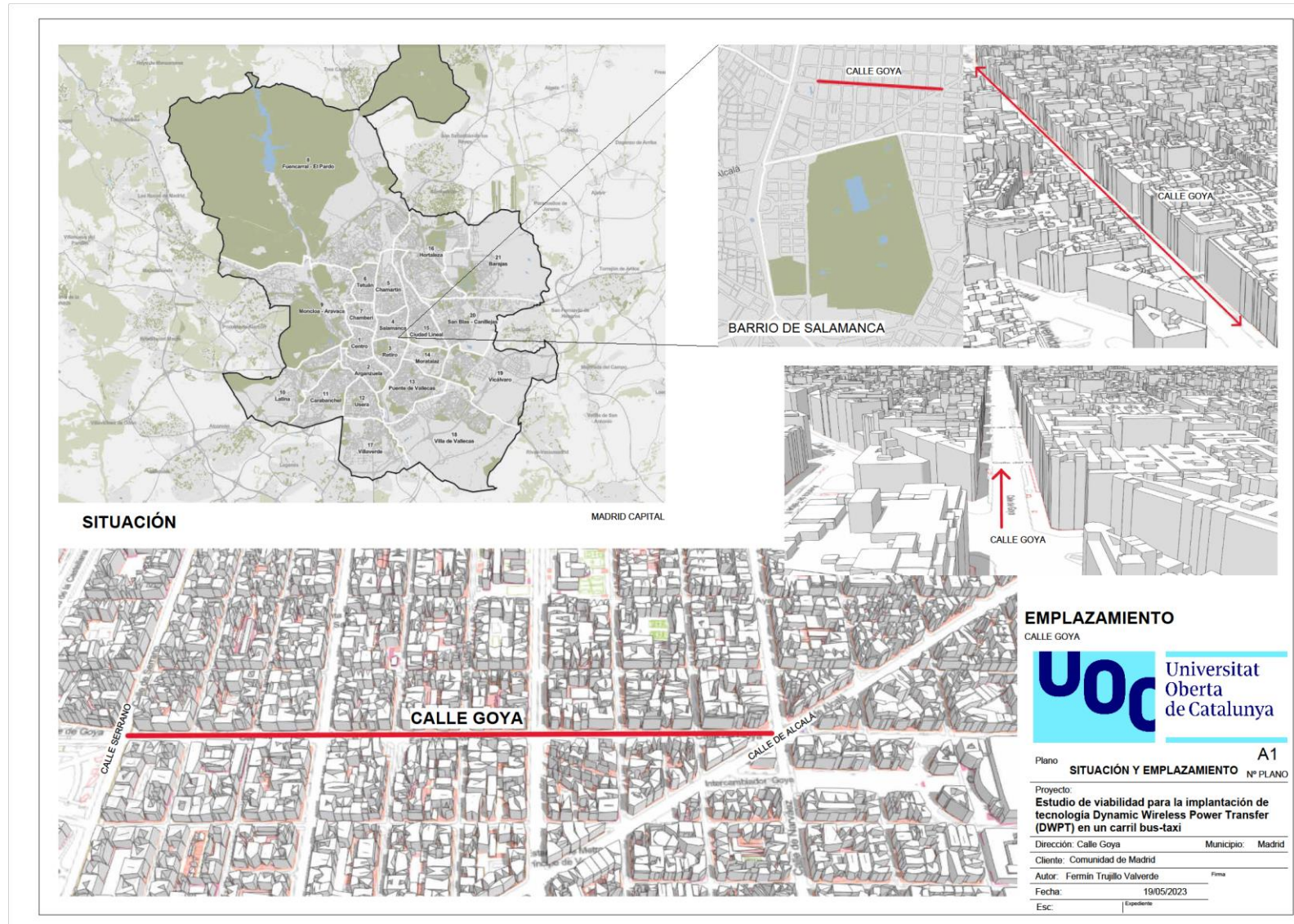
C1=1/(L1*(w0^2));
C2=1/((L2)*(w0^2));
%Cálculo Impedancia reflejada según ecuación 29
ZT=(R1+j*(L1*w0-(1/(C1*w0)))+(w0^2*M^2)/(RL+R2+j*(L2*w0-(1/(C2*w0)))));
%Determinación parámetros eléctricos de tabla 10
I1compleja=V1/ZT;
I1=abs(I1compleja);
I2compleja=I1compleja*j*w0*M/(RL+R2+j*(L2*w0-(1/(C2*w0))));
I2=abs(I2compleja);
VC1=I1*(1/(C1*w0));
VC2=I2*(1/(C2*w0));
VL=abs(ZL*I2);
IL=VL/RL;
PL=VL*IL;
%Calculo del rendimiento del sistema
P2=RL*(I2^2);
P1=real(V1*I1compleja);
rend=P2/P1;
%FACTORES DE CALIDAD
Qp=L1*RL/(w0*M^2); Qs=w0*L2/RL;
QPP=(4*Qs^3)/((4*Qs^2)-1);
if Qp>QPP

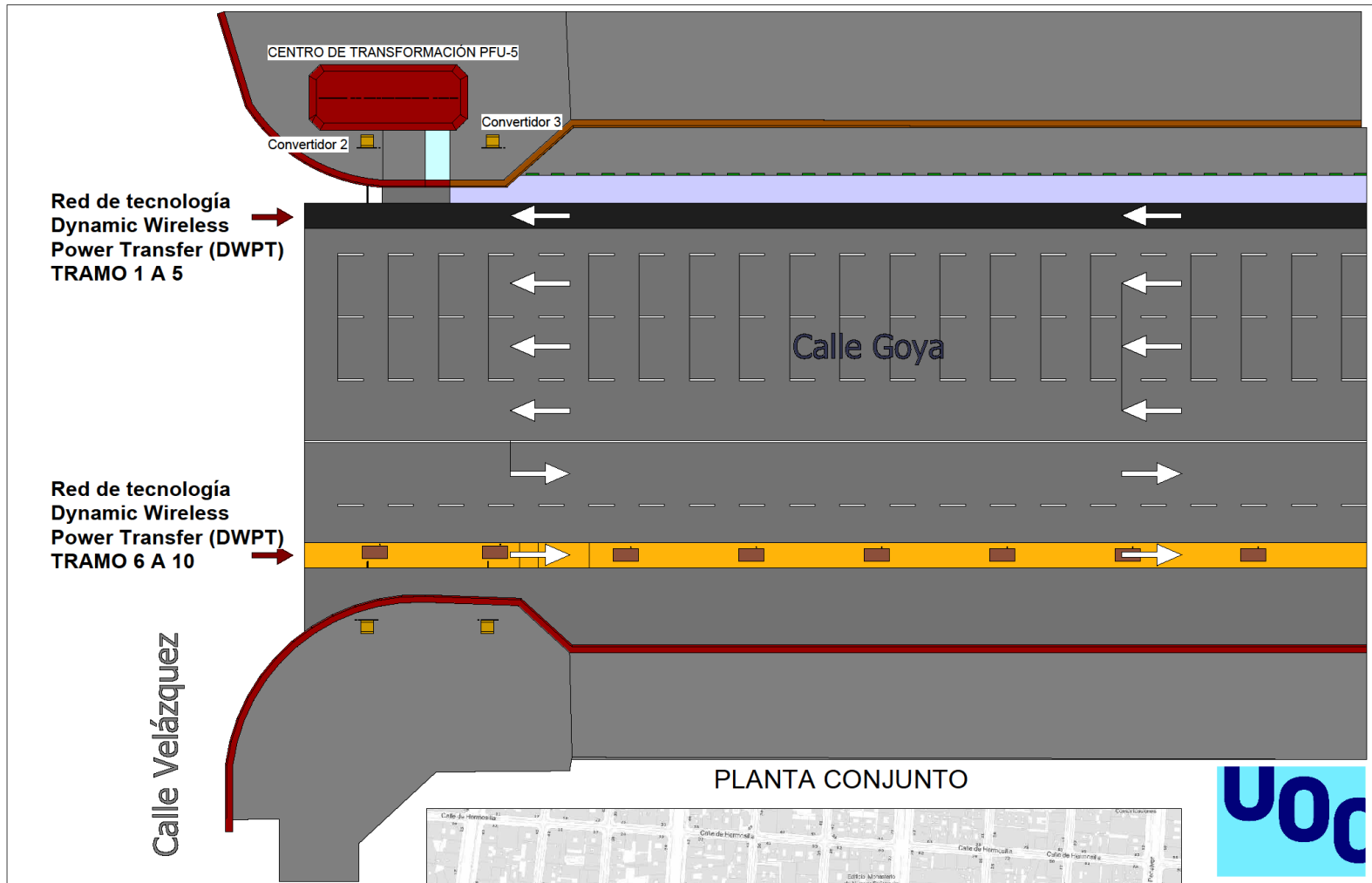
    disp('El sistema es estable')
else
    disp('El sistema no es estable')
end

```

Anexo IV

Planos diseñados.





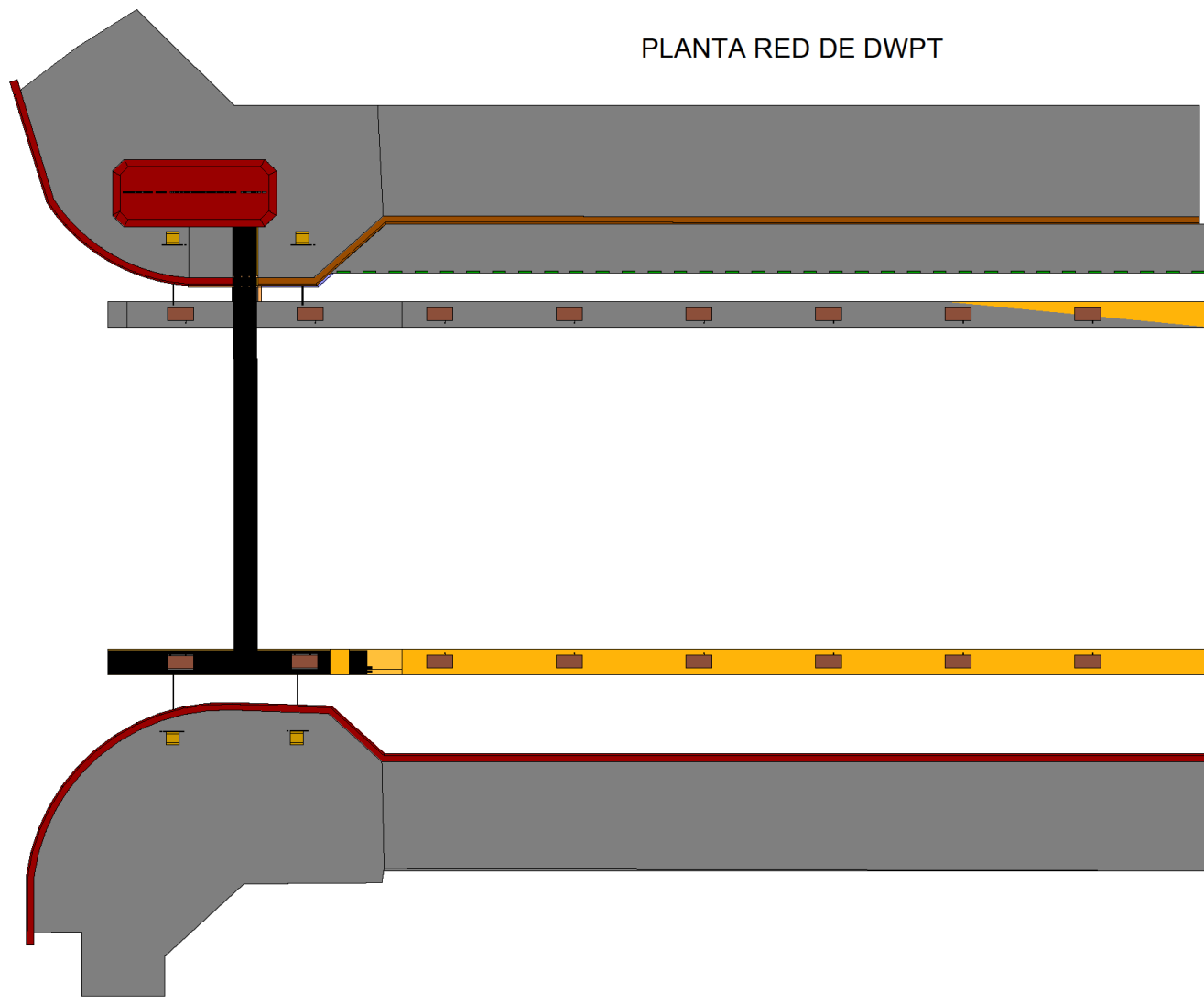
PLANTA CONJUNTO

NOTA: El tramo representado corresponde a 42 metros de la calle Goya comprendidos entre la calle Velázquez y la calle Núñez de Balboa del 35 al 43.



Plano	A2	
PLANO DE CONJUNTO		
Nº PLANO		
Proyecto:		
Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi		
Dirección:	Calle Goya	Municipio: Madrid
Cliente:	Comunidad de Madrid	
Autor:	Fermin Trujillo Valverde	Firma
Fecha:	19/05/2023	
Esc:	1 : 125	Expediente

PLANTA RED DE DWPT



Red de tecnología
Dynamic Wireless
Power Transfer (DWPT)
TRAMO 1 A 5

Red de tecnología
Dynamic Wireless
Power Transfer (DWPT)
TRAMO 6 A 10



Plano **PLANTA RED (DWPT)** A3
Nº PLANO

Proyecto:
Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi

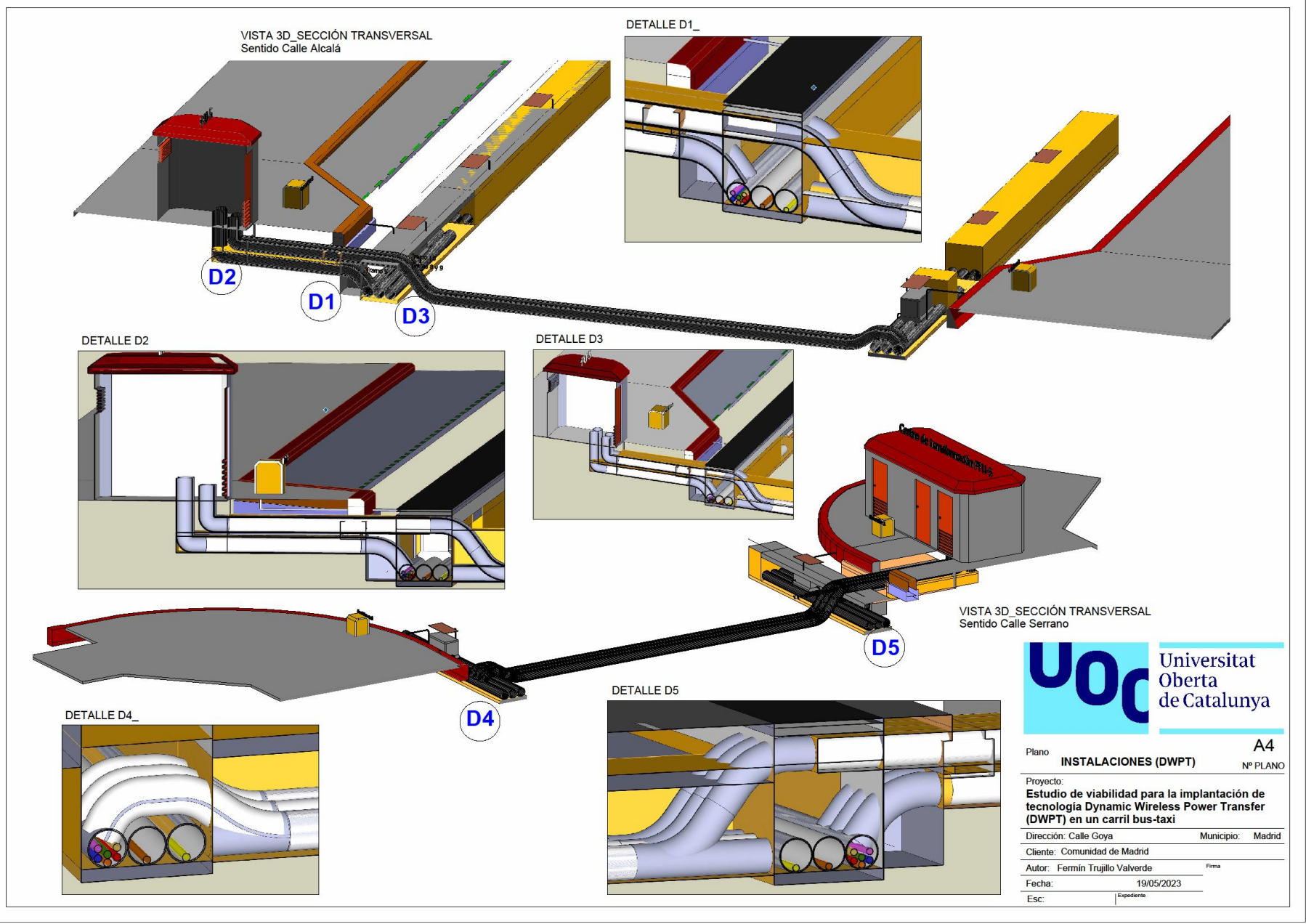
Dirección: Calle Goya Municipio: Madrid

Cliente: Comunidad de Madrid

Autor: Fermin Trujillo Valverde Firma

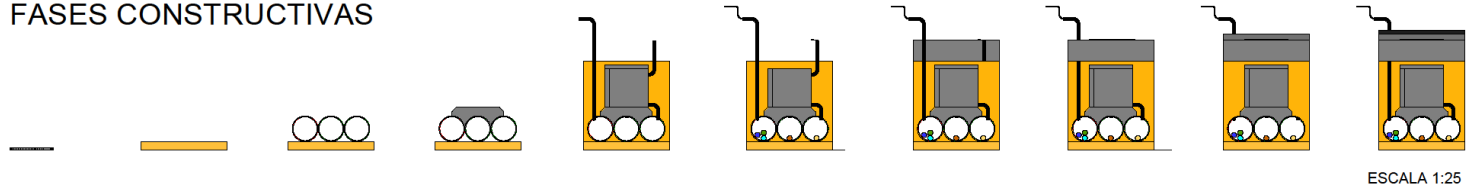
Fecha: 19/05/2023

Esc: 1 : 125 Expediente



Universitat Oberta de Catalunya
 A4
 Plano **INSTALACIONES (DWPT)** Nº PLANO
 Proyecto: **Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi**
 Dirección: Calle Goya Municipio: Madrid
 Cliente: Comunidad de Madrid
 Autor: Fermín Trujillo Valverde Firma
 Fecha: 19/05/2023
 Esc: Expediente

FASES CONSTRUCTIVAS



ESCALA 1:25



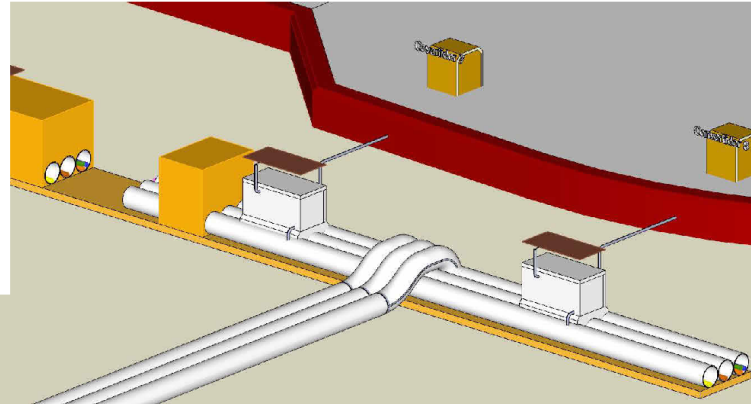
ESCALA 1:35

SECCIÓN TRANSVERSAL

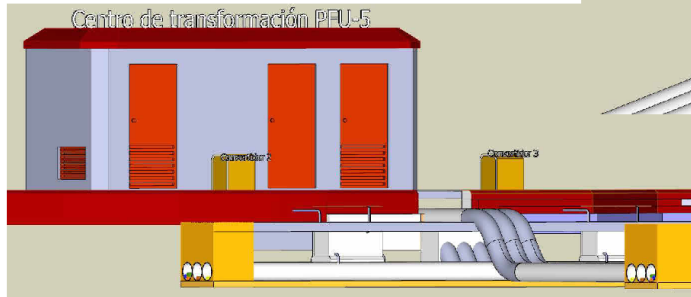
D1

D2

DETALLE D2

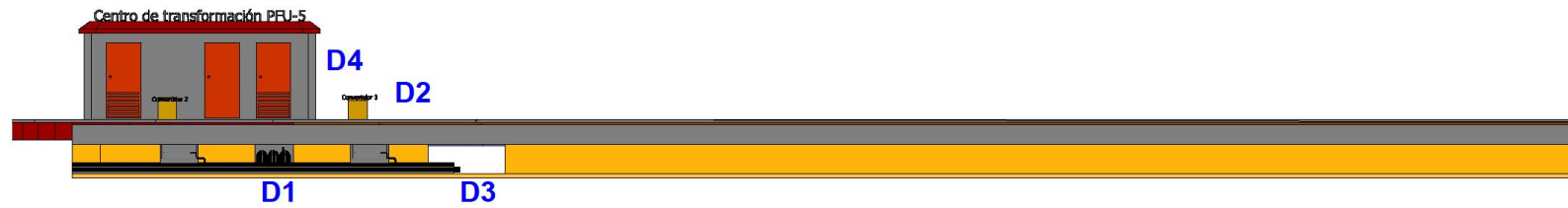


DETALLE D1

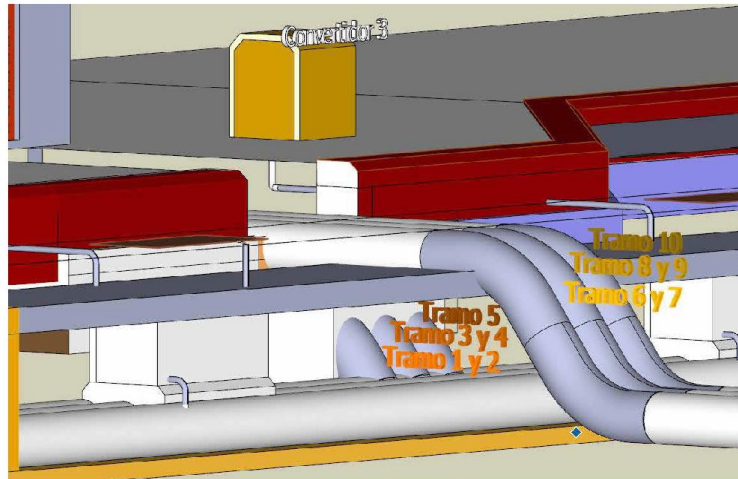


Plano	A5	
SECCIONES TRANSVERSALES	Nº PLANO	
Proyecto:		
Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi		
Dirección: Calle Goya	Municipio:	Madrid
Cliente: Comunidad de Madrid		
Autor: Fermín Trujillo Valverde	Firma	
Fecha:	19/05/2023	
Esc:	Expediente	

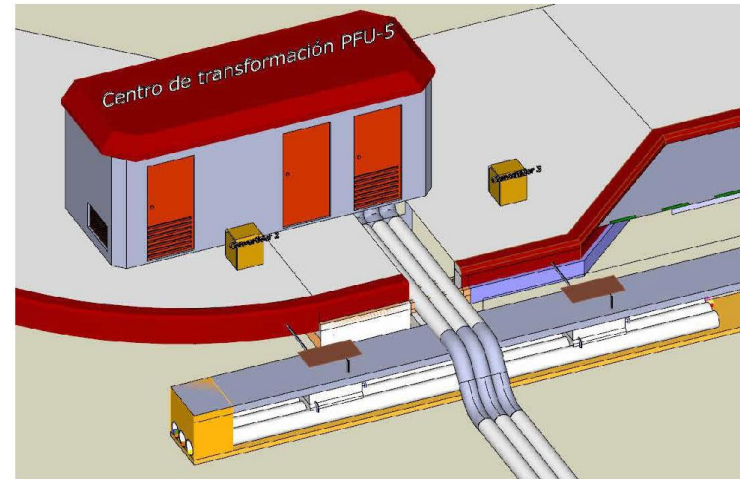
SECCIÓN LONGITUDINAL



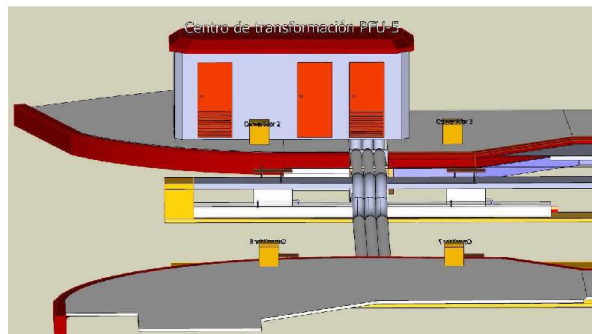
DETALLE D1



DETALLE D2



DETALLE D3



DETALLE D4



Plano **A6**
SECCIONES LONGITUDINALES Nº PLANO

Proyecto:
Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi

Dirección: Calle Goya Municipio: Madrid

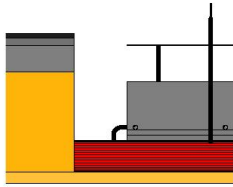
Cliente: Comunidad de Madrid

Autor: Fermín Trujillo Valverde Firma

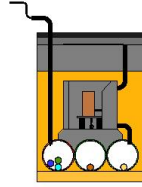
Fecha: 19/05/2023

Esc: Expediente

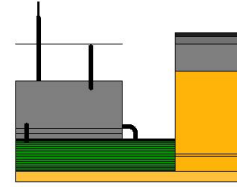
PERFIL IZQUIERDO



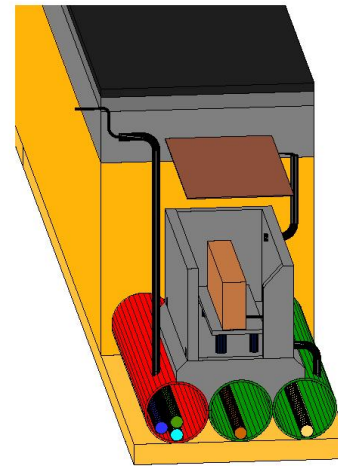
ALZADO



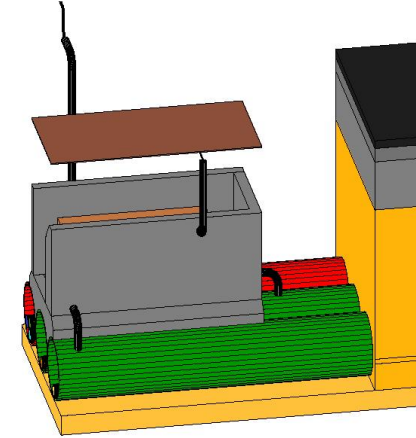
PERFIL DERECHO



DETALLE FRONTAL



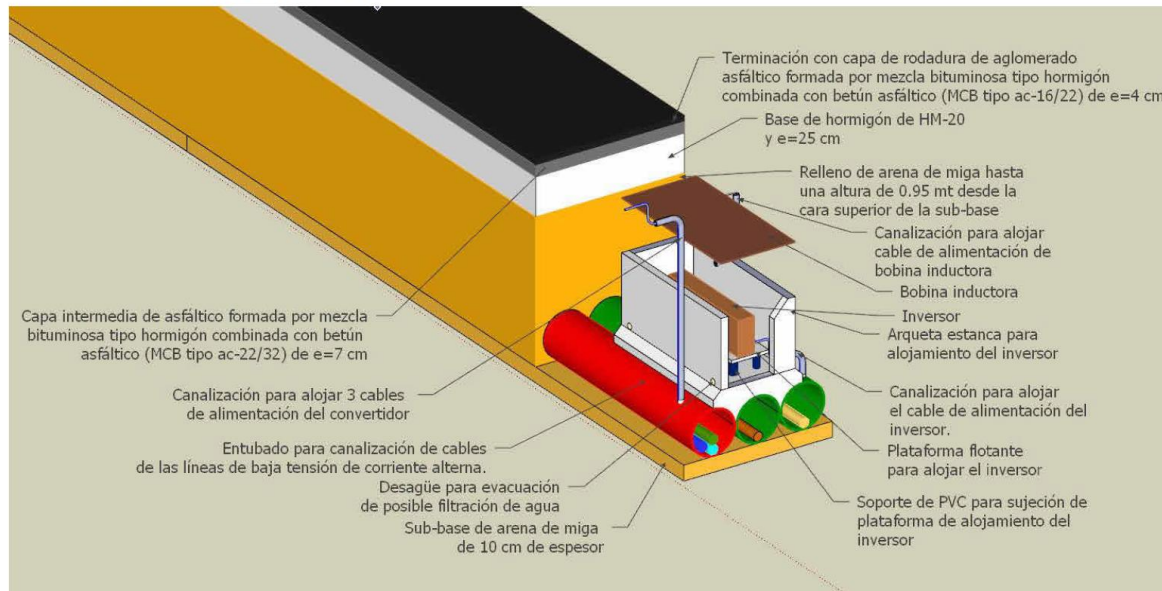
DETALLE LATERAL



PLANTA



DETALLE CONSTRUCTIVO



Plano **A7**
DETALLES CONSTRUCTIVOS Nº PLANO

Proyecto: **Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi**

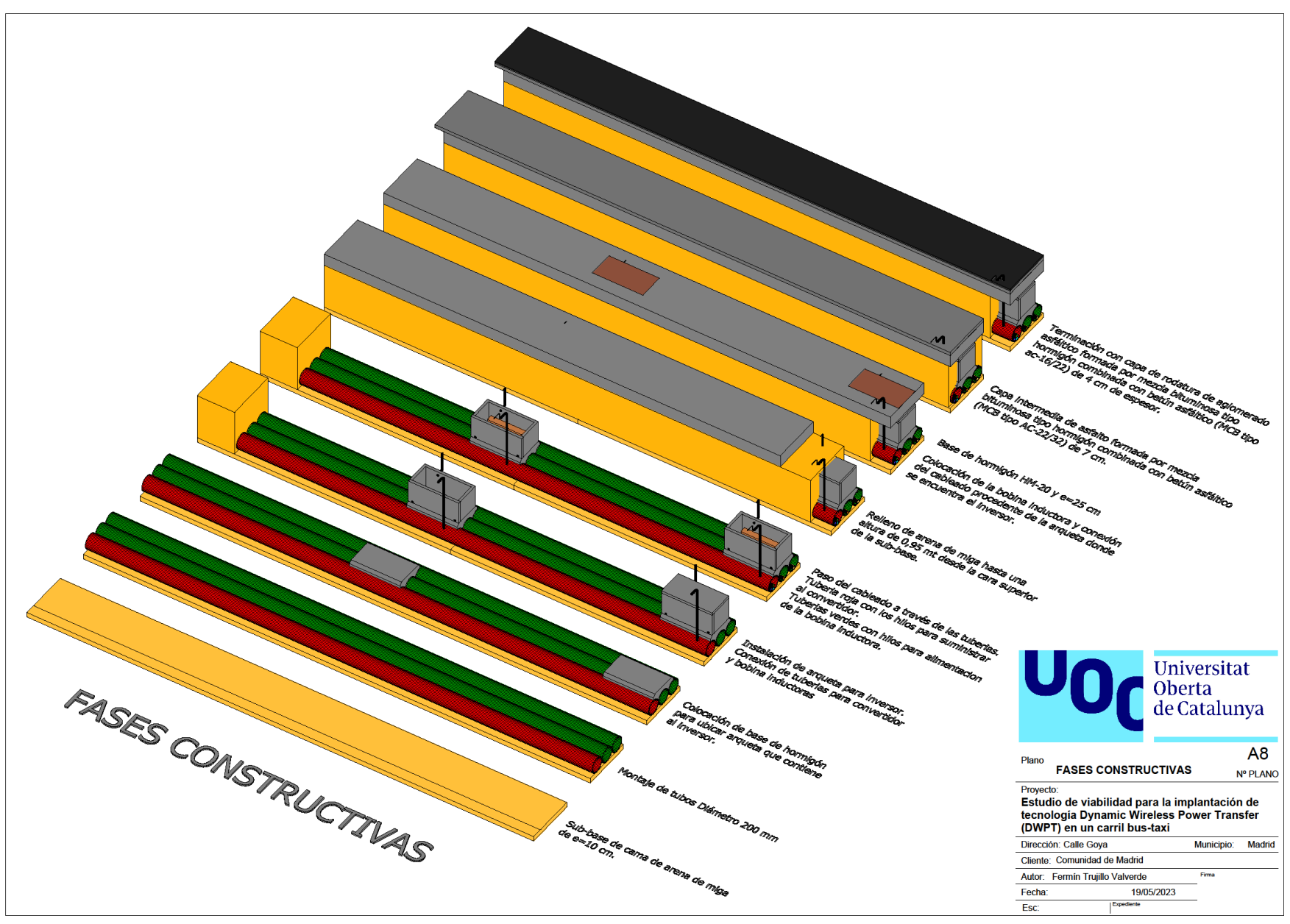
Dirección: Calle Goya Municipio: Madrid

Cliente: Comunidad de Madrid

Autor: Fermín Trujillo Valverde Firma

Fecha: 19/05/2023

Esc: Expediente



Plano	FASES CONSTRUCTIVAS	A8
		Nº PLANO
Proyecto:	Estudio de viabilidad para la implantación de tecnología Dynamic Wireless Power Transfer (DWPT) en un carril bus-taxi	
Dirección:	Calle Goya	Municipio: Madrid
Cliente:	Comunidad de Madrid	
Autor:	Fermin Trujillo Valverde	Firma
Fecha:	19/05/2023	
Esc:	Expediente	

