



Escuela de
Ingeniería y Arquitectura
Universidad Zaragoza



Departamento de
Ingeniería Mecánica
Universidad Zaragoza

PROYECTO FIN DE CARRERA

Ingeniería Industrial

Curso 2011-2012

Introducción de Elementos Estructurales para la Mejora de la Seguridad Pasiva en un Vehículo Comercial para el Transporte Urbano

Enrique Yáñez Fraile

Abril de 2012

Director: Mario Maza Frechín

Especialidad: Diseño de Máquinas y Vehículos

Departamento de Ingeniería Mecánica

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Universidad de Zaragoza

RESUMEN

Gracias al auge experimentado por los vehículos eléctricos en los últimos años han surgido grandes novedades tecnológicas en el sector de la automoción. Un ejemplo de ello son los “*in-wheel motors*” o motores rueda. Se trata de una tecnología que aprovecha las reducidas dimensiones de los motores eléctricos para trasladar su ubicación a las ruedas. Con ello, se busca simplificar al máximo el número de componentes del sistema de tracción para, de este modo, aumentar la eficiencia mecánica.

En este proyecto se lleva a cabo una evaluación de las posibilidades que pueden ofrecer los motores rueda para la propulsión de vehículos, así como para la mejora de la seguridad de los ocupantes. Se utiliza como modelo de estudio un vehículo con características similares a las de una furgoneta Mercedes Vito, que es equipado con dos motores de este tipo comercializados por la empresa Protean Electric.

En primer lugar, sobre el modelo se ha realizado un análisis comparativo de las prestaciones ofrecidas frente a las de un vehículo convencional, cuyos resultados muestran la validez de la configuración escogida para la tracción. Se obtienen valores adecuados para la aceleración y la velocidad máxima y mejoras sustanciales para el consumo y el coste por kilómetro. Tan sólo la autonomía se ve mermada ligeramente por la limitación de la batería.

Posteriormente, mediante un estudio frecuencial y temporal del comportamiento de la suspensión se ha podido comprobar la influencia que tiene el traslado de masa hacia las ruedas. El comportamiento dinámico del vehículo se ve afectado por el aumento de la masa no suspendida, pero no así el confort de los pasajeros, que se mantiene gracias al trabajo de la suspensión.

La instalación de motores rueda libera un gran espacio en la zona frontal del vehículo, ya que el espacio habitualmente ocupado por el motor de combustión queda libre de componentes. Este hecho es aprovechado para establecer una nueva distribución de los componentes, que se escenifica con la creación de un modelo del vehículo en tres dimensiones. A partir de este modelo se buscan nuevas soluciones que ayuden a mejorar la seguridad pasiva del vehículo. En este sentido, en la última parte de este proyecto se presentan tres propuestas para la modificación del chasis del vehículo, que permiten optimizar la absorción de la energía de impacto.

CONTENIDO

MEMORIA	9
1 Introducción	11
1.1 Contexto	11
1.2 Motivación y trabajos relacionados	11
1.3 Objetivo y alcance del proyecto	12
1.4 Organización de la memoria	13
2 Análisis del tren de potencia de un vehículo eléctrico con motores rueda	15
2.1 Introducción.....	15
2.2 Definición de los componentes constituyentes.....	15
2.3 Selección de componentes para el vehículo a estudio	16
2.4 Comparativa de prestaciones frente a un vehículo convencional.....	18
2.4.1 Curvas de par de los motores de tracción	20
2.4.2 Curvas de fuerza de tracción y resistencias al avance	22
2.4.3 Aceleración	25
2.4.4 Velocidad máxima	28
2.4.5 Consumo y autonomía.....	29
2.4.6 Economía	32
2.4.7 Resumen de la comparativa	33

3	Efectos de la adición de masa no suspendida	35
3.1	Introducción.....	35
3.2	Modelo cuarto de vehículo.....	35
3.3	Análisis frecuencial.....	36
3.4	Simulación temporal	38
4	Distribución espacial de los componentes del tren de potencia eléctrico	43
4.1	Introducción.....	43
4.2	Dimensiones y colocación de la batería	43
4.3	Dimensiones y colocación del motor eléctrico	45
4.4	Otros componentes.....	46
4.5	Representación de componentes en un modelo	46
4.6	Diferencias respecto a un vehículo convencional.....	48
5	Soluciones para la mejora de la seguridad pasiva en vehículos eléctricos equipados con motores rueda	51
5.1	Introducción.....	51
5.2	Problemática actual	51
5.3	Nuevas oportunidades derivadas del sistema de propulsión eléctrico	52
5.4	Propuestas para la mejora de la seguridad de los ocupantes	54
5.4.1	Nose cone	54
5.4.2	Rediseño de la parte delantera del chasis.....	56
6	Conclusiones y líneas futuras	59
6.1	Conclusiones	59
6.2	Líneas futuras.....	60
7	Bibliografía	61

ANEXOS	63
<i>ANEXO I. Obtención de la ecuación dinámica para la dirección longitudinal de un vehículo</i>	65
<i>ANEXO II. Archivos de MATLAB empleados en la comparativa de prestaciones</i>	71
II-1. Cálculo y representación de las curvas Fm-Rt para el vehículo diésel.....	71
II-2. Cálculo y representación de las curvas Fm-Rt para el vehículo eléctrico	72
II-3. Cálculo aceleración máxima vehículo diésel	73
II-4. Cálculo aceleración máxima vehículo diésel	75
<i>ANEXO III. Utilización de la librería QSS para el cálculo de consumos: Explicaciones y resultados detallados</i>	77
III-1. Desarrollo de la herramienta.....	77
III-2. Fundamento teórico.....	77
III-3. Modelos utilizados	78
III-4. Resultados detallados	89
<i>ANEXO IV. Obtención de las funciones de transferencia para el modelo de cuarto de vehículo</i>	97

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subsistemas que componen un vehículo eléctrico (3).....	15
Figura 2. Configuración empleada en el vehículo eléctrico a estudio (3)	16
Figura 3. Motor rueda Protean Electric PD18 (7)	17
Figura 4. Baterías montadas en el Tesla Model S (izq.) y Nissan Leaf (dcha.) (8)	17
Figura 5. Modelo de referencia N1: Opel Vivaro	18
Figura 6. Sistema de tracción en un vehículo convencional (3).....	18
Figura 7. Mapa motor vehículo diésel	20
Figura 8. Mapa motor vehículo eléctrico	21
Figura 9. Fuerzas de tracción y resistencias en el vehículo diésel	23
Figura 10. Fuerzas de tracción y resistencias en el vehículo eléctrico	24
Figura 11. Máxima aceleración vehículo diésel.....	26
Figura 12. Máxima aceleración vehículo eléctrico	27
Figura 13. Recuperación 80-120 km/h para vehículo diésel (izq.) y eléctrico (dcha.).....	28
Figura 14. Representación esquemática del modelo cuarto de vehículo (6).....	35
Figura 15. Diagrama de Bode para la respuesta de las ruedas	37
Figura 16. Diagrama de Bode para la respuesta de la carrocería	37
Figura 17. Pulsos empleados como entrada para representar un bache de 10 cm x 10 cm superado a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.).....	39
Figura 18. Respuesta de la carrocería al superar un bache a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)	39

Figura 19. Respuesta de las ruedas al superar un bache a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.) ..	40
Figura 20. Respuesta de la carrocería al superar una sucesión de baches a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.).....	40
Figura 21. Respuesta de las ruedas al superar una sucesión de baches a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.).....	41
Figura 22. Módulo constituyente de la batería del Nissan Leaf.....	43
Figura 23. Motor rueda Protean Electric PD18 (9)	45
Figura 24. Unidad de control eléctrico del vehículo (7).....	46
Figura 25. Modelo en tres dimensiones del vehículo eléctrico	47
Figura 26. Disposición del tren de potencia en un vehículo convencional (7).....	48
Figura 27. Componentes principales del frontal de un vehículo de combustión.....	49
Figura 28. Disposición del tren de potencia en un vehículo eléctrico con motores rueda (7)	49
Figura 29. Principales causas de muerte en EEUU (izq.) y causas de pérdida de años productivos (dcha.) (10).....	51
Figura 30. Zonas de deformación en caso de accidente (10).....	52
Figura 31. Porcentajes de absorción de energía en la estructura frontal de un vehículo (11) ...	53
Figura 32. Chasis perteneciente a un vehículo de combustión de la clase N1	54
Figura 33. Estructura del “Nose Cone”	55
Figura 34. Bastidor y chasis de una furgoneta Ford Transit.....	56
Figura 35. Ejemplos de la estructura frontal de dos turismos (12).....	57
Figura 36. Esquema básico del frontal sugerido.....	57
Figura 37. Esquema de fuerzas actuantes en un vehículo (12).....	65
Figura 38. Diagrama de presiones para el neumático en estático (izq.) y rodando (dcha.) (3)...	66
Figura 39. Modelo QSS/Simulink del vehículo diésel.....	79
Figura 40. Modelo QSS/Simulink del vehículo eléctrico	79
Figura 41. Ciclos NEDC (arriba) y FTP 75 (abajo)	80
Figura 42. Modelo QSS/Simulink del ciclo de conducción.....	81

Figura 43. Modelo QSS/Simulink del vehículo	82
Figura 44. Menú de selección de las especificaciones del vehículo.....	83
Figura 45. Modelo QSS/Simulink de la caja de cambios manual	84
Figura 46. Modelo QSS/Simulink del motor de combustión	85
Figura 47. Mapa de eficiencias motor eléctrico.	86
Figura 48. Modelo QSS/Simulink del motor eléctrico.....	87
Figura 49. Modelo QSS/Simulink de la batería	88
Figura 50. Consumo de combustible instantáneo del motor	89
Figura 51. Consumo de combustible acumulado en el vehículo diésel	90
Figura 52. Consumo de electricidad acumulado en el vehículo eléctrico.....	91
Figura 53. Estado de carga de la batería	91
Figura 54. Puntos de operación del motor diésel durante el ciclo NEDC	92
Figura 55. Puntos de operación del motor eléctrico durante el ciclo NEDC.....	93
Figura 56. Puntos de operación del motor diésel durante el ciclo FTP 75.....	93
Figura 57. Puntos de operación del motor eléctrico durante el ciclo FTP 75	94
Figura 58. Puntos de operación del motor diésel a 120 km/h.....	94
Figura 59. Puntos de operación del motor eléctrico a 120 km/h	95
Figura 60. Modelo de cuarto de vehículo.....	97

MEMORIA

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto

El siguiente trabajo se encuadra en el marco del proyecto europeo que tiene por título “*Optimized structural components and add-ons to improve passive safety in new Electric Light Trucks and Vans*” y que cuenta con la participación del grupo de investigación VEHIVIAL, perteneciente al departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes de la Universidad de Zaragoza. Bajo el acrónimo OPTIBODY, dicho proyecto busca nuevos conceptos estructurales para furgonetas eléctricas de mediano tamaño (ELTV), basados en una arquitectura modular y que permitan, además, la mejora de la seguridad pasiva del vehículo. La mayor libertad existente en vehículos eléctricos para la ubicación de componentes, por ejemplo, mediante el uso de motores rueda, trata de ser aprovechada para la implementación de soluciones novedosas en términos de seguridad pasiva.

1.2 Motivación y trabajos relacionados

Durante los últimos años los vehículos eléctricos han recibido gran parte de las miradas de la industria automovilística, lo que les ha llevado a experimentar un notable desarrollo y crecimiento. La concienciación por el medio ambiente ha hecho que las desventajas que empujaron a estos vehículos al declive después de 1910 hayan pasado ahora a un segundo plano. Los vehículos con motor de combustión, que se impusieron entonces debido a la elevada energía específica del combustible, tiempos de recarga muy bajos y precios ajustados, están causando serios problemas para el medio ambiente y el agotamiento de los recursos derivados del petróleo (1). Por ello, el interés por los vehículos eléctricos se ha renovado y éstos aparecen como una de las soluciones más prometedoras para el futuro próximo (2).

Los vehículos eléctricos poseen ventajas frente a los actuales de combustión, como la ausencia de emisiones, una alta eficiencia, independencia del petróleo y una operación suave y silenciosa (1), (3). Los fabricantes de automóviles se han dado cuenta de que estos vehículos permiten satisfacer las necesidades de transporte de la mayoría de usuarios de un turismo convencional y, es por ello, que casi todas las grandes marcas han lanzado modelos eléctricos.

Un sistema de propulsión eléctrico abre nuevas posibilidades en la distribución de los componentes del vehículo, máxime con la introducción de motores rueda. Frente a disposiciones tradicionales, bastante inflexibles y dominadas por la posición del motor de combustión, una configuración eléctrica con motores rueda permite repartir la generación de par entre varios puntos distintos del vehículo (4). Gracias a ello, es posible introducir cambios en la estructura frontal del vehículo que mejoren la seguridad pasiva de los ocupantes mediante una absorción más efectiva de la energía de choque.

Mediante la utilización de motores rueda se facilita también la inclusión de ayudas electrónicas a la conducción, pudiéndose implementar diversos sistemas, como el asistente para la frenada, el control de velocidad o los diferenciales activos, a través de simples actualizaciones de

software (2). Así mismo, se pueden eliminar algunos componentes tradicionales de la transmisión, como la caja de cambios y el diferencial, lo que incrementa la eficiencia mecánica del sistema (5).

Sin embargo, la adición de masa en las ruedas ocasionada al ubicar los motores en ellas, puede tener consecuencias negativas en el confort de los pasajeros y en el comportamiento del vehículo. El peso de la rueda es inversamente proporcional a su habilidad para seguir el perfil de la carretera, por lo que una rueda ligera tendrá mayor agarre que una más pesada (5). Diversos estudios han tratado esta cuestión, concluyendo que las diferencias resultan pequeñas en cuanto al confort de los pasajeros y algo más importantes en la dinámica del vehículo (4), (6). En cualquier caso, el rediseño de la suspensión puede minimizar la pérdida de prestaciones que sufriría el vehículo (4).

1.3 Objetivo y alcance del proyecto

El presente proyecto se centra en el estudio de la viabilidad de la instalación de motores rueda y las posibilidades que podrían ofrecer dichos motores para introducir cambios estructurales que mejoren la seguridad de los vehículos. Para ello, se trabaja con una furgoneta perteneciente a la clase N1, que se ajusta a los requerimientos especificados en el proyecto OPTIBODY y que es propulsada por dos motores rueda fabricados por la empresa Protean Electric.

Los objetivos del proyecto se pueden resumir en:

- Evaluar la viabilidad de equipar un vehículo con motores rueda, por una parte, desde un punto de vista prestacional y, por otra, desde un punto de vista de la seguridad y el confort de los pasajeros.
- Seleccionar, dimensionar y distribuir los componentes necesarios para el funcionamiento de un vehículo eléctrico con motores rueda.
- Investigar nuevas soluciones de diseño para la parte frontal del vehículo, favorecidas por la distribución eléctrica escogida y que puedan incrementar la protección de los ocupantes.

El trabajo llevado a cabo en este proyecto se puede dividir en cuatro partes diferenciadas que se detallan a continuación.

En la primera parte se realiza una comparativa de prestaciones entre el vehículo eléctrico seleccionado y un vehículo con motorización diésel de similar potencia. Se comparan parámetros como la aceleración, la velocidad máxima, el consumo, la autonomía o el coste para recorrer 100 km. En esta primera parte se utiliza el software informático MATLAB, con el que se resuelven las ecuaciones que gobiernan el movimiento de un vehículo y se grafican los resultados para los parámetros mencionados. Para el caso concreto del cálculo de consumos, se simula el comportamiento del vehículo ante diferentes ciclos de conducción mediante el uso de SIMULINK, entorno para simulación de sistemas perteneciente a MATLAB.

En segundo lugar, se analizan las consecuencias derivadas del traslado de masa desde el chasis a las ruedas ocasionado al colocar los motores en las mismas. Se considera el llamado “modelo de cuarto de vehículo”, mediante el cual se calcula el movimiento de las ruedas y la carrocería ante diferentes excitaciones de la carretera. Nuevamente, el software MATLAB/SIMULINK facilita el trabajo con herramientas propias de simulación de sistemas dinámicos, como diagramas de Bode o simulaciones temporales.

La tercera parte comprende un análisis de los componentes físicos propios del vehículo eléctrico, que concluye con una posible distribución de los mismos representada en un modelo. Previa a la realización del modelo, se presentan las dimensiones de los motores, se estiman las que debería tener el pack de baterías y se detallan el resto de componentes necesarios para el funcionamiento del vehículo. Todos estos componentes son colocados en sus ubicaciones más probables para formar un modelo 3D del vehículo que se lleva a cabo mediante la herramienta de diseño gráfico SOLIDWORKS.

Por último, se realiza una búsqueda de posibles soluciones estructurales para la parte frontal del vehículo que puedan aprovechar la nueva distribución eléctrica para mejorar la seguridad. Para ello, se recurre a bibliografía existente, en la que se trata la protección de los ocupantes y de la que se intentan extraer propuestas aplicables al vehículo eléctrico de estudio. Es de especial utilidad la información publicada en el proyecto APROSYS, realizado entre los años 2004 y 2009 con el objetivo de desarrollar nuevas tecnologías que mejoren la seguridad pasiva para todos los usuarios y tipologías de accidentes.

1.4 Organización de la memoria

La memoria de este proyecto sigue una estructura coincidente con la expuesta anteriormente, con cuatro secciones diferentes, una para cada una de las partes mencionadas y que se ordenan de la siguiente manera:

En la sección dos, denominada “Análisis del tren de potencia de un vehículo eléctrico con motores rueda”, se realiza una selección de componentes que equipan el vehículo eléctrico y una comparativa de prestaciones de éste frente a un vehículo de similar potencia diésel.

La sección número tres, “Efectos de la adición de masa no suspendida”, evalúa las consecuencias de instalar motores rueda para la dinámica del vehículo y el confort de los pasajeros.

En el capítulo cuarto, cuyo título es “Distribución espacial de los componentes del tren de potencia” se realiza un modelo completo del vehículo en tres dimensiones ubicando los componentes seleccionados en sus lugares de montaje.

En la sección quinta, con título “Soluciones para la mejora de la seguridad pasiva en vehículos eléctricos equipados con motores rueda”, se proponen dos posibles rediseños de la parte frontal que permitirían mejorar la protección de los ocupantes del vehículo.

Por último, el apartado seis expone las conclusiones que se pueden extraer de la realización de este proyecto y propone futuras líneas de investigación para continuar el trabajo realizado.

2 ANÁLISIS DEL TREN DE POTENCIA DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO CON MOTORES RUEDA

2.1 Introducción

Uno de los primeros pasos para comprobar la viabilidad de propulsar un vehículo mediante motores eléctricos consiste en analizar si es posible mantener las prestaciones que ofrecen los vehículos actuales. En este apartado se realiza un estudio del rendimiento ofrecido por un vehículo eléctrico equipado con motores rueda en comparación con uno de similar potencia con motorización diésel. Se comparan aspectos como la aceleración, la velocidad máxima o el consumo para un vehículo con las mismas especificaciones, que pertenece a la clase N1 de la legislación vigente.

2.2 Definición de los componentes constituyentes

En un vehículo eléctrico el motor transforma la energía eléctrica proporcionada por una fuente de energía, como baterías o ultra condensadores, en energía mecánica que alimenta las ruedas. Normalmente, en este tipo de vehículos este proceso es reversible, ya que también es posible regenerar energía eléctrica durante las frenadas y almacenar esta energía para su posterior uso. La Figura 1 esquematiza el tren de potencia que compone un vehículo eléctrico y que se puede dividir en tres subsistemas diferentes: sistema de propulsión, sistema de energía y sistema de auxiliares.

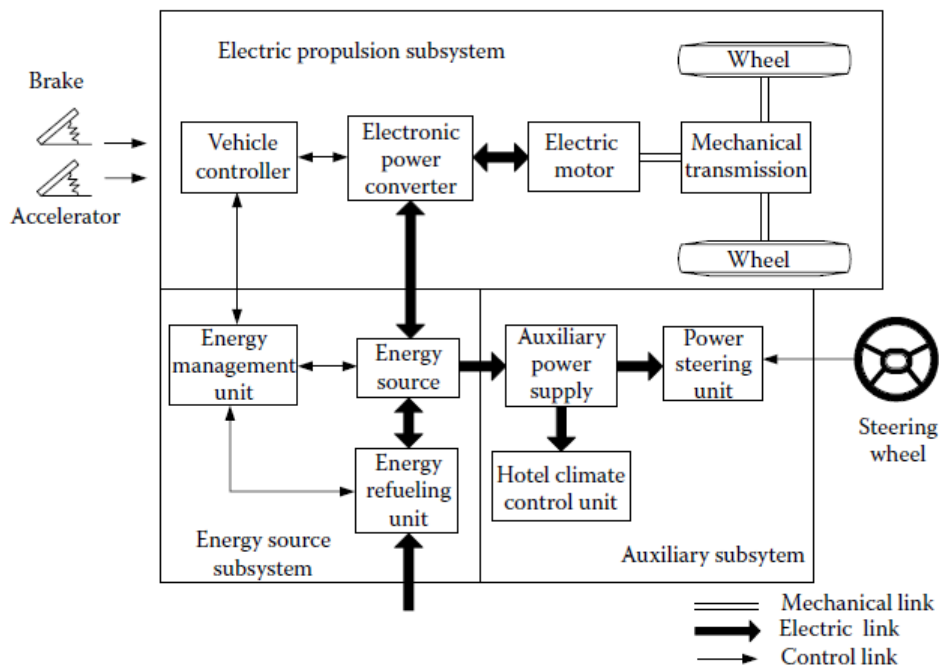


Figura 1. Subsistemas que componen un vehículo eléctrico (3)

El subsistema de propulsión está compuesto por la unidad de control del vehículo, la etapa de conversión electrónica de potencia, el motor eléctrico, la transmisión y las ruedas. A su vez, el subsistema de energía lo componen la fuente de energía, su unidad de gestión y la unidad de recarga. Por último, en el sistema de auxiliares se incluyen otros componentes comunes a vehículos convencionales, por ejemplo, la unidad de climatización, la unidad de dirección o la fuente de potencia auxiliar.

A partir de este esquema básico las configuraciones presentes en los modelos eléctricos varían dependiendo de la ubicación o de la tipología particular de los componentes empleados. En este sentido, las mayores diferencias constructivas se encuentran en los motores y en la fuente de energía, mientras que las variaciones de la unidad de control y de las etapas de conversión de potencia únicamente modifican el modo de funcionamiento de los primeros.

2.3 Selección de componentes para el vehículo a estudio

Una vez expuesta la configuración estándar de cualquier vehículo eléctrico, se va a realizar una descripción de los componentes que se han seleccionado para el modelo eléctrico objeto de estudio. La característica más destacada de dicho vehículo es el montaje de dos motores eléctricos de tracción, que están integrados en las llantas de cada una de las ruedas traseras. Se prescinde, por lo tanto, de cualquier tipo de caja de cambios o transmisión reductora para conectar los motores y las ruedas. En la Figura 2 se muestra una representación esquemática de esta configuración empleada para el tren de potencia.

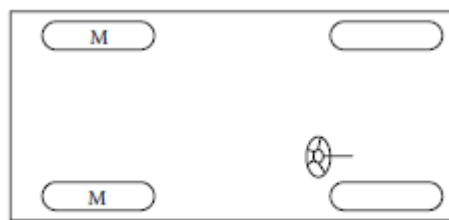


Figura 2. Configuración empleada en el vehículo eléctrico a estudio (3)

Los motores rueda seleccionados son comercializados por la empresa Protean Electric, que realiza un diseño enfocado a su montaje sin transmisión, con una velocidad de giro acorde con las necesidades de las ruedas y unos valores de par suficientemente altos para el arranque sin embrague ni caja de cambios. En cuanto a su construcción, son motores de corriente alterna con imanes permanentes que cuentan con micro inversores integrados en el estator para la conversión de corriente continua en alterna. La potencia máxima nominal de cada uno de los motores es de 64 kW, aunque las especificaciones completas con valores de potencia, par y revoluciones se pueden encontrar en posteriores apartados. El módulo completo que contiene el motor rueda se puede observar en color verde en la Figura 3, tal y como iría montado en la llanta del vehículo real.

Además de los motores, como en cualquier otro vehículo eléctrico son necesarios otros componentes como la fuente de energía, que almacena la energía a bordo y la suministra al

motor, o una centralita electrónica, que controla la interconexión de los componentes. Como fuente de energía se utiliza un pack de baterías de ion-litio con una capacidad de almacenamiento de 40 kWh, que se podrá recargar mediante frenada regenerativa y mediante conexión a la red eléctrica.



Figura 3. Motor rueda Protean Electric PD18 (7)

En la Figura 4 se muestran el pack de baterías de dos modelos eléctricos, el Tesla Model S y el Nissan Leaf, cuyas especificaciones se han tomado como referencia para asignar los valores de la batería a utilizar. Baterías de ion-litio como éstas poseen en término medio una energía específica de 140 Wh/kg y una potencia específica en torno a 1000 W/kg. El montaje también se supone similar al existente en los dos vehículos mencionados, es decir, se colocan debajo de los asientos de los pasajeros, ocupando la zona central-trasera del suelo del vehículo, con el fin de reducir la altura del centro de gravedad. Junto a las baterías se montará la unidad de gestión de las mismas, necesaria para controlar la temperatura, el estado de carga y la entrega de intensidad y voltaje adecuados.



Figura 4. Baterías montadas en el Tesla Model S (izq.) y Nissan Leaf (dcha.) (8)

El resto de componentes del tren de potencia eléctrico lo formarán la unidad de control y las etapas de electrónica de potencia. Como ya se ha mencionado anteriormente, estos componentes modifican la manera en que batería y motor trabajan conjuntamente, pero no afectan para el estudio llevado a cabo en este trabajo, por lo que no se seleccionan modelos concretos.

2.4 Comparativa de prestaciones frente a un vehículo convencional

En este apartado se va a realizar una comparativa de las prestaciones que ofrece el vehículo equipado con el sistema de tracción eléctrico frente a otro de similares características con motorización convencional. Los vehículos a comparar se encuadran en la clase N1 de la directiva 70/156/CEE, que engloba a vehículos de motor destinados al transporte de mercancías, que tengan por lo menos cuatro ruedas y con una masa máxima no superior a 3,5 toneladas. Para este trabajo se han tomado unas especificaciones similares a varias furgonetas comerciales de tamaño medio, semejantes a una Mercedes Vito, una Opel Vivaro o a una Volkswagen Transporter.



Figura 5. Modelo de referencia N1: Opel Vivaro

Dado que el objetivo de esta comparativa es evaluar la influencia de dos sistemas de tracción distintos, eléctrico y convencional, se utilizan las mismas medidas y masa para ambos vehículos. Por lo tanto, las resistencias que habrá que vencer para el movimiento de los vehículos serán las mismas y las diferencias en términos de prestaciones vendrán dadas exclusivamente por la configuración utilizada en cada caso.

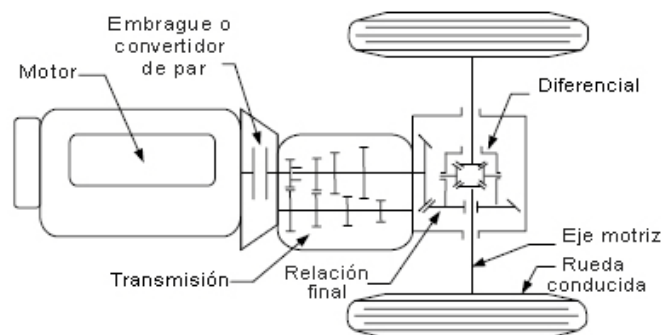


Figura 6. Sistema de tracción en un vehículo convencional (3)

El vehículo con motorización convencional está impulsado por un motor diésel acoplado a una transmisión manual, que contiene los componentes indicados en la Figura 6 y, que al igual que en el caso anterior, impulsa las ruedas traseras. El criterio utilizado para seleccionar el motor

diésel ha sido considerar un modelo de similar potencia máxima que la suma de potencias continuas de los motores eléctricos. Para realizar la comparativa se ha utilizado el software informático MATLAB, que permite efectuar los cálculos necesarios para conocer las prestaciones de ambos vehículos, así como realizar gráficas de los resultados que se presentan en los apartados siguientes.

ESPECIFICACIONES	DIÉSEL	ELÉCTRICO
<i>Clase</i>		N1
<i>Vehículo referencia</i>	Mercedes-Benz España Vito Furgón	
<i>Motor</i>	2.0 BiTDI	Protean Electric PD 18 (2x)
<i>Potencia continua</i>	132 kW	128 kW
<i>Par continuo</i>	400 Nm	1000 Nm
<i>Potencia de pico</i>	-	162 kW
<i>Par de pico</i>	-	1600 Nm
<i>Transmisión</i>	Caja de cambios manual 6 vel.	Directa, relación 1:1
<i>i1</i>	5,076	-
<i>i2</i>	2,61	-
<i>i3</i>	1,518	-
<i>i4</i>	1	-
<i>i5</i>	0,791	-
<i>i6</i>	0,675	-
<i>i Final</i>	3,455	-
<i>Rendimiento mecánico</i>	0,88	0,98
<i>Masa</i>	2500 kg	
<i>Área frontal</i>	3,1 m ²	
<i>Coefficiente Cx</i>	0,34	
<i>Coefficiente de rodadura</i>	0,011	
<i>Neumáticos</i>	205/50 R17	
<i>Radio efectivo</i>	0,3184 m	
<i>Baterías</i>	-	Ion-litio
<i>Capacidad</i>	-	100 Ah
<i>Voltaje</i>	-	400 V
<i>Energía almacenada</i>	-	40 kWh
<i>Peso aproximado</i>	-	265-300 kg
<i>Combustible</i>	Diésel	-
<i>Depósito</i>	60 L	-

Tabla 1. Especificaciones de los vehículos diésel y eléctrico utilizadas en la comparativa

2.4.1 Curvas de par de los motores de tracción

A priori, dos de los datos más importantes para calcular las prestaciones que puede ofrecer un vehículo son los valores de par y potencia del motor de tracción. Normalmente, en las hojas de especificaciones de un vehículo, solo se ofrecen los valores máximos de estos parámetros, así como las revoluciones a las que se dan. Sin embargo, para realizar cálculos de prestaciones y consumos resulta necesario conocer el mapa motor completo de valores de par y velocidad de giro. El motor puede funcionar en cualquier punto por debajo de la curva de par o potencia máxima dependiendo de la posición del acelerador, o lo que es lo mismo, dependiendo de la composición de la mezcla aire-gasolina.

En la Figura 7 se puede observar el mapa motor perteneciente al vehículo diésel. Se trata de un motor diésel de dos litros de cilindrada con dos turbocompresores, que ofrece un par motor máximo de 400 Nm en el rango de giro de 1500 a 2000 revoluciones por minuto. La curva de par máximo pertenece a un motor real, comercializado actualmente por un fabricante generalista en su gama de furgonetas y cuyos datos se pueden encontrar en internet o en folletos comerciales. En la gráfica también se indica, mediante las curvas de nivel coloreadas, el consumo de gasoil por kilovatio hora o, señalada entre paréntesis, la eficiencia en la conversión de energía. Dado que los fabricantes no suministran habitualmente estas curvas de eficiencia en sus catálogos, para la representación de este dato, se han utilizado valores correspondientes a un motor diésel genérico escalados de acuerdo a la curva de par máximo. En cualquier caso el mapa que se muestra no debería diferir demasiado con el del motor biturbodiésel real.

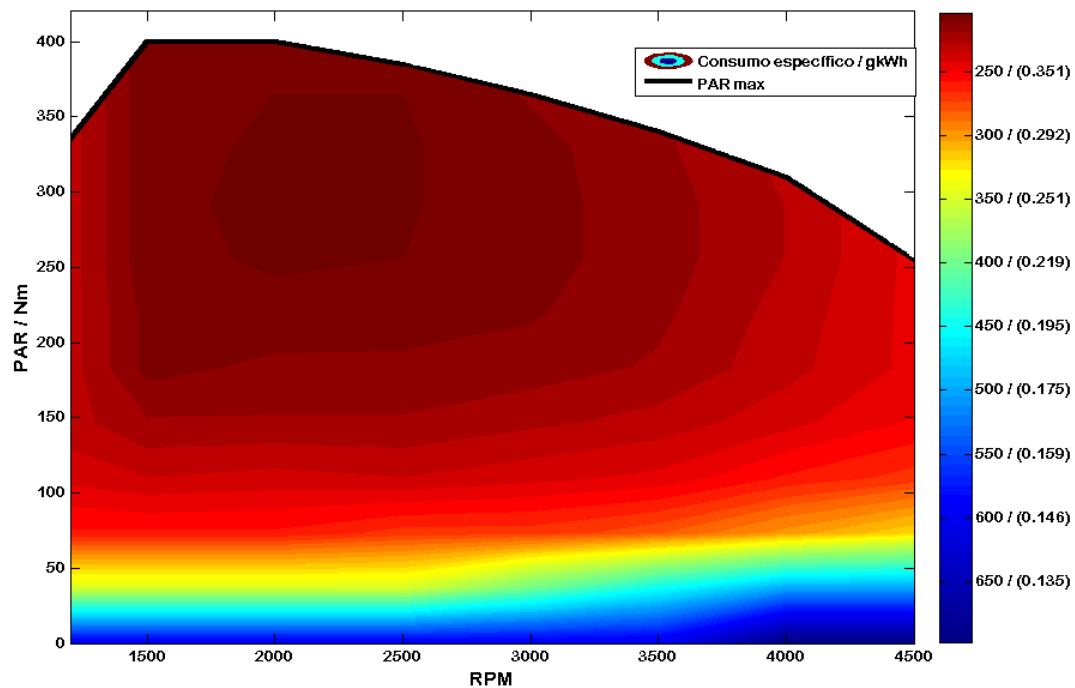


Figura 7. Mapa motor vehículo diésel

En la Figura 8 se muestra el mapa motor correspondiente al vehículo eléctrico, que cuenta para su impulsión con dos motores rueda situados en el interior de las llantas traseras. En ella se proporciona, para el caso del vehículo eléctrico, el valor de par máximo de ambos motores sumados. Es decir, cuando se dispone de 1600 Nm de par, cada uno de los motores por separado suministra 800 Nm de par. A pesar de que en el vehículo real cada motor podría trabajar a una velocidad de rotación diferente y entregar distinto valor de par, se supondrá, por simplicidad, que ambos motores trabajan en el mismo punto de funcionamiento. Además, de igual modo que para el motor diésel, para cada punto de funcionamiento se tiene una eficiencia de los motores, que está representada por las curvas coloreadas de la figura.

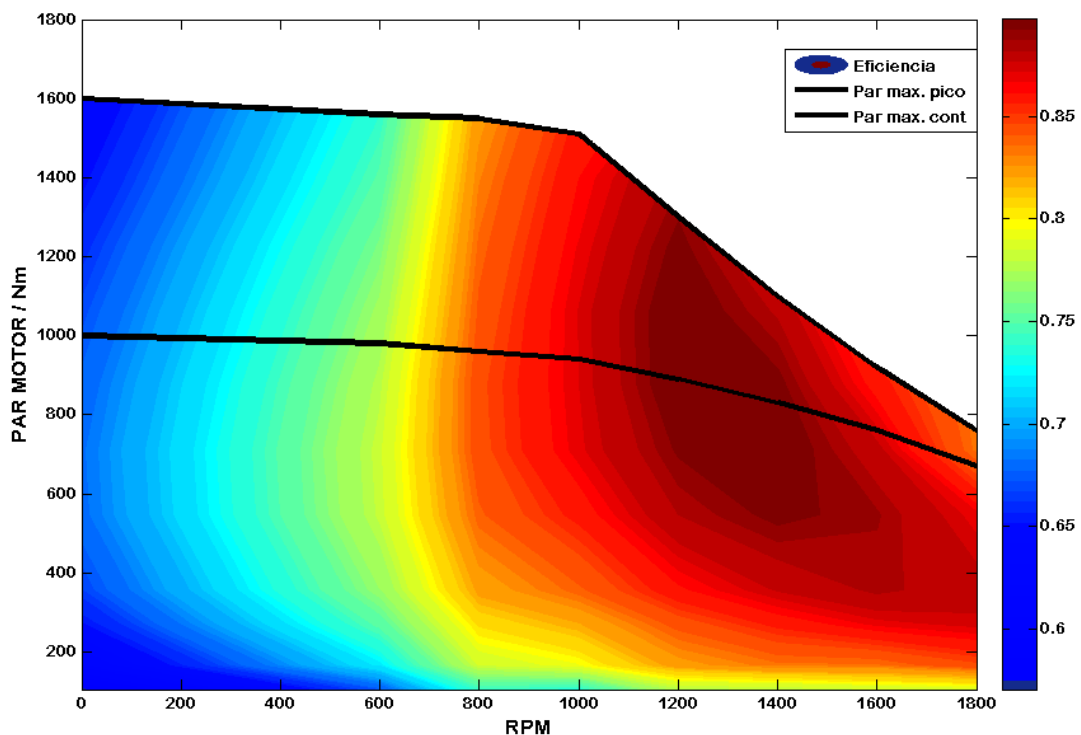


Figura 8. Mapa motor vehículo eléctrico

Cabe señalar que los colores son relativos en cada una de las gráficas, por lo que no se debe comparar la eficiencia de ambos motores directamente a través de los colores. Sin embargo, si se observan los valores de la leyenda, sí que se pueden extraer conclusiones interesantes. La máxima eficiencia del motor diésel está en torno al 40%, mientras que en el eléctrico alcanza el 90%. Además, **cualquier punto de funcionamiento del motor eléctrico tendrá una mayor eficiencia que el diésel en su punto óptimo**. Los buenos valores del motor eléctrico se verán ligeramente reducidos al tener en cuenta la eficiencia de carga y descarga de las baterías, que se estima en torno al 90%.

Otra de las diferencias que se observan al comparar ambas figuras se encuentra en la velocidad de giro de ambos motores. El rango de funcionamiento del motor diésel se extiende entre las 1000 y las 4500 RPM, mientras que en el caso del motor eléctrico este rango se sitúa entre 0 y 1800 RPM. Esta desigualdad de valores permite **prescindir, en la configuración**

eléctrica, de tres elementos fundamentales en los vehículos de combustión, la caja de cambios, el embrague y el diferencial. La presencia de la caja de cambios está completamente justificada en el caso de motores de combustión, ya que permite adaptar la velocidad y el par suministrados por el motor a los requerimientos en las ruedas. Sin embargo, esta necesidad desaparece en motores eléctricos, como el utilizado en este caso, que entrega altos valores de par a las velocidades de funcionamiento. Por su parte, el embrague desaparece en la configuración eléctrica ya que el par máximo se tiene desde cero RPM, lo que permite el inicio de la marcha sin la necesidad de este elemento. Además, al no tener caja de cambios, tampoco es necesario el embrague para realizar cambios de marcha. Por último, la función del diferencial, que permite a las ruedas de un mismo eje girar a distinta velocidad, se puede implementar mediante el control electrónico de los motores.

Respecto a las curvas de par máximo, además de la diferencia entre los valores del diésel y el eléctrico, existe otra diferencia entre ambos, y es que este último posee dos curvas de par máximo. La línea que muestra unos valores más bajos indica el valor máximo de par que puede ser mantenido indefinidamente, especificado para una temperatura de refrigerante y un rango de valores de voltaje. A partir de esta línea y hasta la segunda, el motor podrá trabajar únicamente durante unos segundos, ya que es necesaria la aplicación de una sobre intensidad que producirá un calentamiento del mismo.

2.4.2 Curvas de fuerza de tracción y resistencias al avance

Como se ha mencionado en el apartado anterior, la caja de cambios convierte los valores de par y velocidad disponibles en el cigüeñal. Es por ello, que la obtención de par a la salida del motor es solo el primer paso en la transmisión de potencia al asfalto. Para comparar adecuadamente ambos vehículos, resulta necesario calcular la fuerza de tracción que podrán entregar en las ruedas, ya que será ésta la que deberá vencer las resistencias que se oponen al movimiento del coche.

La fuerza de tracción en las ruedas del vehículo se obtiene a partir del par del motor, de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$F_t = \frac{T_p i_g i_o \eta_t}{R_d} \quad (2.1)$$

Con las siguientes variables, $T_p =$ Par en el cigüeñal [Nm]

$i_g =$ Relación de transmisión para cada marcha

$i_o =$ Relación de transmisión del diferencial

$\eta_t =$ Rendimiento de transmisión

$R_d =$ Radio efectivo de las ruedas [m]

En el eje de abscisas, la velocidad de giro del motor se puede convertir en velocidad lineal del vehículo para cada marcha utilizando la siguiente relación:

$$V = \frac{\pi N_p R_d}{30 i_g i_o} \cdot 3,6 \quad (2.2)$$

Con, $N_p = \text{Velocidad de giro del motor [RPM]}$

Por su parte, la obtención de las resistencias que se oponen al movimiento del vehículo se explica en detalle en el ANEXO I, en el que se llega a la siguiente ecuación:

$$R_t = M g f_r \cos \alpha + M g \sin \alpha + \frac{C_x A \rho v^2}{2} \quad (2.3)$$

Las variables de esta ecuación se pueden encontrar definidas en el citado anexo.

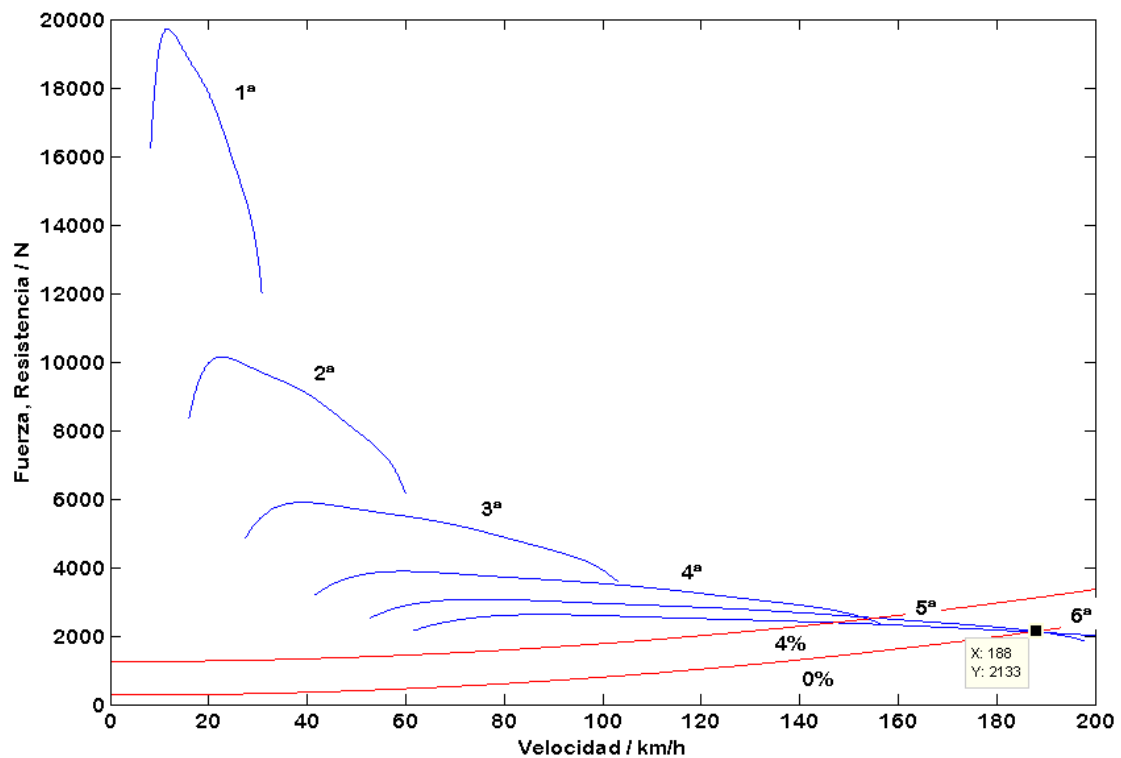


Figura 9. Fuerzas de tracción y resistencias en el vehículo diésel

Para el vehículo diésel, la fuerza de tracción, en azul, y dos curvas de resistencia, en rojo, se muestran en la Figura 9. Se observa que la fuerza de tracción no es una línea continua a medida que aumenta la velocidad, sino que existen saltos en la misma, según sea la marcha engranada. Ésta es una de las desventajas de incluir la caja de cambios, el tiempo que las ruedas pasan sin recibir par mientras se cambia de marcha. Sin embargo, es un elemento necesario para poder usar los motores de combustión, ya que adapta el par y velocidad a las necesidades requeridas en la conducción. Gracias a la caja de cambios, la fuerza máxima se

alcanza en primera velocidad, es decir, circulando a bajas velocidades, momento en el se producen las aceleraciones que requieren mayor par. A medida que la velocidad aumenta y se engranan marchas superiores la fuerza de tracción va disminuyendo progresivamente.

La Figura 10 muestra una representación análoga para el caso del vehículo eléctrico. De la comparación de ambas gráficas se puede concluir que la función de la transmisión resulta determinante. **El valor máximo de par proporcionado por el motor eléctrico, que es cuatro veces mayor que el máximo proporcionado por el diésel (1600 Nm frente a 400 Nm) se traduce en una fuerza de tracción cuatro veces menor en las ruedas del vehículo eléctrico (5000 N frente a 20000 N).** El motivo es la transmisión directa con la que se equipa al vehículo eléctrico, que posee ventajas como la sencillez mecánica y la elevada eficiencia en la entrega de par, pero que obliga a tener un motor eléctrico con muy buenas características para competir con el vehículo diésel. A pesar de ello, es necesario destacar que **la fuerza de tracción se va igualando a medida que la velocidad de circulación es mayor**, de manera que a partir de unos 80 km/h el eléctrico posee igual o mayor fuerza de tracción que el diésel.

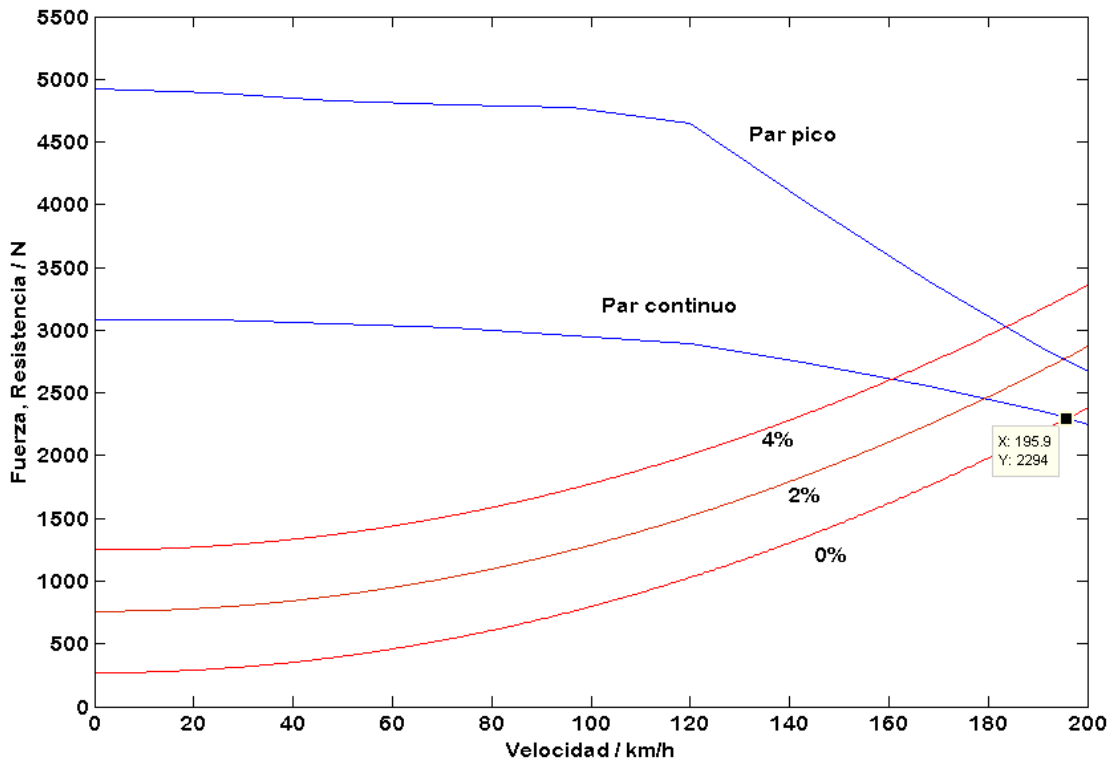


Figura 10. Fuerzas de tracción y resistencias en el vehículo eléctrico

Por otra parte, los datos proporcionados por estas gráficas deben tomarse con precaución, ya que la capacidad de tracción puede verse limitada por otro factor que no se ha mencionado hasta ahora, la adherencia entre el neumático y la carretera. A pesar de que la transmisión pueda entregar cierta fuerza de tracción, es posible que el contacto rueda-suelo no sea capaz de soportarla. En ese caso, las ruedas derraparían en el asfalto sin traccionar.

Para comprobar la máxima fuerza de tracción que pueden soportar las ruedas sin deslizar se utiliza la siguiente expresión:

$$F_{ttmax} = \frac{\mu Mg \cos \alpha (l_1 - h\mu_r)}{L - \mu h} \quad (2.4)$$

Donde, $\mu =$ Coeficiente de rozamiento

$l_1 =$ Distancia del eje delantero al centro de gravedad [m]

$h =$ Altura del centro de gravedad [m]

$L =$ Batalla o distancia entre ejes del vehículo [m]

Esta expresión es válida para el caso de vehículos con tracción trasera, que poseen mayor capacidad de tracción que aquellos con tracción delantera. Los datos de los vehículos utilizados para este cálculo son iguales para el vehículo diésel y el eléctrico, proporcionando un valor máximo para la fuerza de tracción igual a:

$$F_{ttmax} = 14958,38 \text{ N}$$

Así, mientras el vehículo eléctrico podría aprovechar toda la fuerza de tracción entregada por el motor para acelerar, el diésel no podría utilizar toda la capacidad del motor en primera velocidad.

2.4.3 Aceleración

Una vez comparados los motores y la capacidad de tracción de ambos vehículos se van a analizar otros parámetros que resultarán más familiares para la mayoría de usuarios de cualquier vehículo, como son la aceleración, la velocidad máxima y el consumo. En primer lugar, se obtendrá el tiempo aproximado para acelerar el vehículo de 0 a 100 km/h y el tiempo para una recuperación de 80 a 120 km/h. Para ello, hay que resolver la siguiente ecuación diferencial, que resulta de realizar un análisis dinámico del vehículo en su dirección longitudinal.

$$F_t = \left(M + I \frac{G^2}{\eta_t R_d^2} \right) \frac{dv}{dt} + F_r + F_a + F_g \quad (2.5)$$

La obtención de la fórmula anterior se explica paso a paso en el ANEXO I. Según se desprende de ella la capacidad de aceleración coincide con la diferencia entre la fuerza de tracción y la resistencia total, es decir, el área existente en la Figura 9 y en la Figura 10 entre las curvas azules y las rojas. El término $I \frac{G^2}{\eta_t R_d^2} \cdot \frac{dv}{dt}$ se refiere a la fuerza necesaria para proporcionar aceleración angular a las partes rotativas del sistema de tracción. Dado que no se tienen todos los datos para proporcionar el valor exacto de dicho término se van a utilizar dos soluciones aproximadas. Para el vehículo diésel se utiliza el llamado coeficiente de Chudakov que mayor

el valor de la masa, de manera variable, en función de la marcha en la que se circula. Para el vehículo eléctrico se añade un 5% de masa para tener en cuenta este término.

Utilizando el software matemático MATLAB se programa un script con el que resolver numéricamente la ecuación diferencial mostrada. Para la integración, se trabaja con intervalos discretos de tiempo de 0,02 segundos a lo largo de un tiempo total de 200 segundos. Las expresiones para la fuerza de tracción y para las resistencias totales se han obtenido previamente en el apartado anterior. En el caso del vehículo diésel se tienen seis ecuaciones distintas para la fuerza de tracción, una para cada marcha de la transmisión, así que habrá que elegir la velocidad de cambio de marcha. Como criterio para este cambio se ha escogido realizar el cambio de marcha a las revoluciones del motor a las que se entrega la potencia máxima.

En la Figura 11 se muestra la representación de la velocidad frente al tiempo para el vehículo diésel y siempre acelerando con la máxima fuerza de tracción posible. Para considerar la máxima fuerza de tracción, se ha tenido en cuenta la adherencia del vehículo, de manera que en caso de superar el valor máximo admisible por el contacto rueda-suelo se utiliza dicho valor para la fuerza de tracción. Los pequeños descensos de velocidad que se pueden observar corresponden con cambios de marcha, es decir, periodos durante los cuales las ruedas dejan de recibir par. En este caso se ha establecido dicho tiempo de cambio de marcha en 0,5 segundos, un valor razonable para un conductor experimentado que utilice una caja de cambios manual.

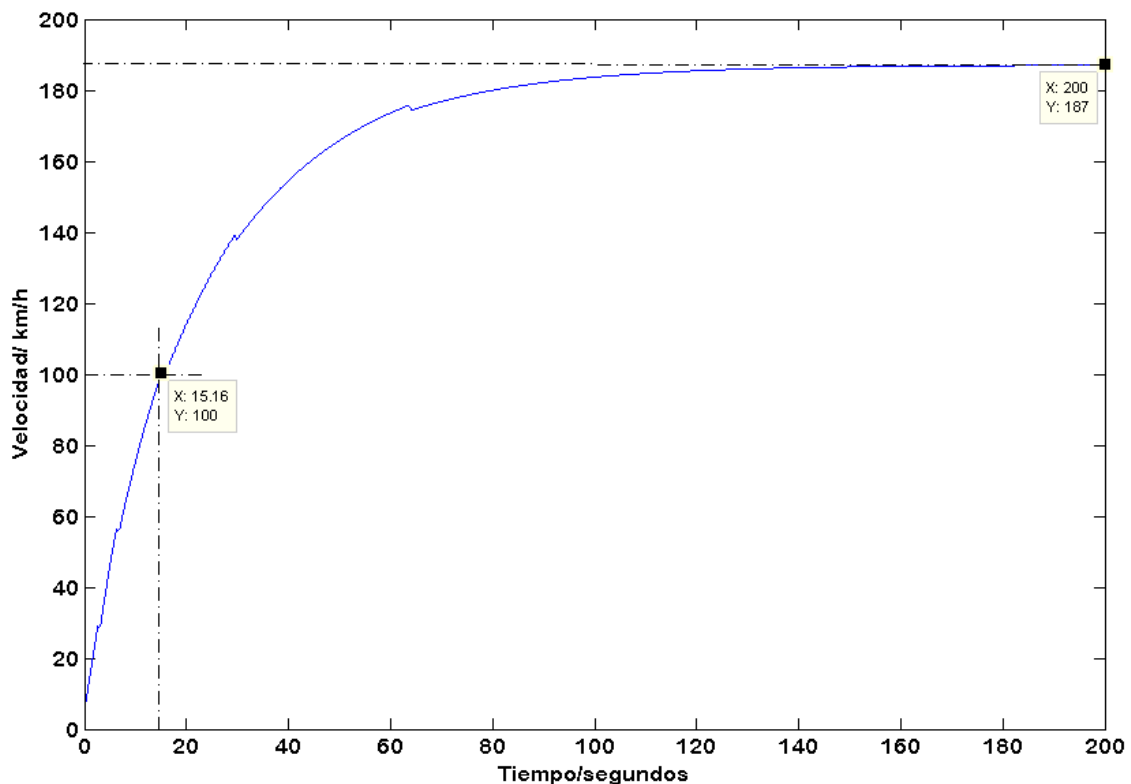


Figura 11. Máxima aceleración vehículo diésel

Resolviendo la ecuación diferencial para el caso del vehículo eléctrico se puede obtener una curva semejante para la aceleración de éste, Figura 12. A diferencia del vehículo diésel, el eléctrico posee una aceleración que no se ve interrumpida en ningún momento, ya que la transmisión de potencia es directa desde el motor a las ruedas. Además, en el caso del eléctrico se presentan dos curvas, una haciendo uso del par máximo disponible sin sobreexcitar el motor y otra haciendo uso del par de pico que puede proporcionar el motor. Ya se ha comentado en el apartado 2.3.1 que esta sobre intensidad no se puede mantener más allá de unos pocos segundos sin dañar el motor, con lo que no se podrá realizar una aceleración completa durante todo el recorrido que muestra la curva.

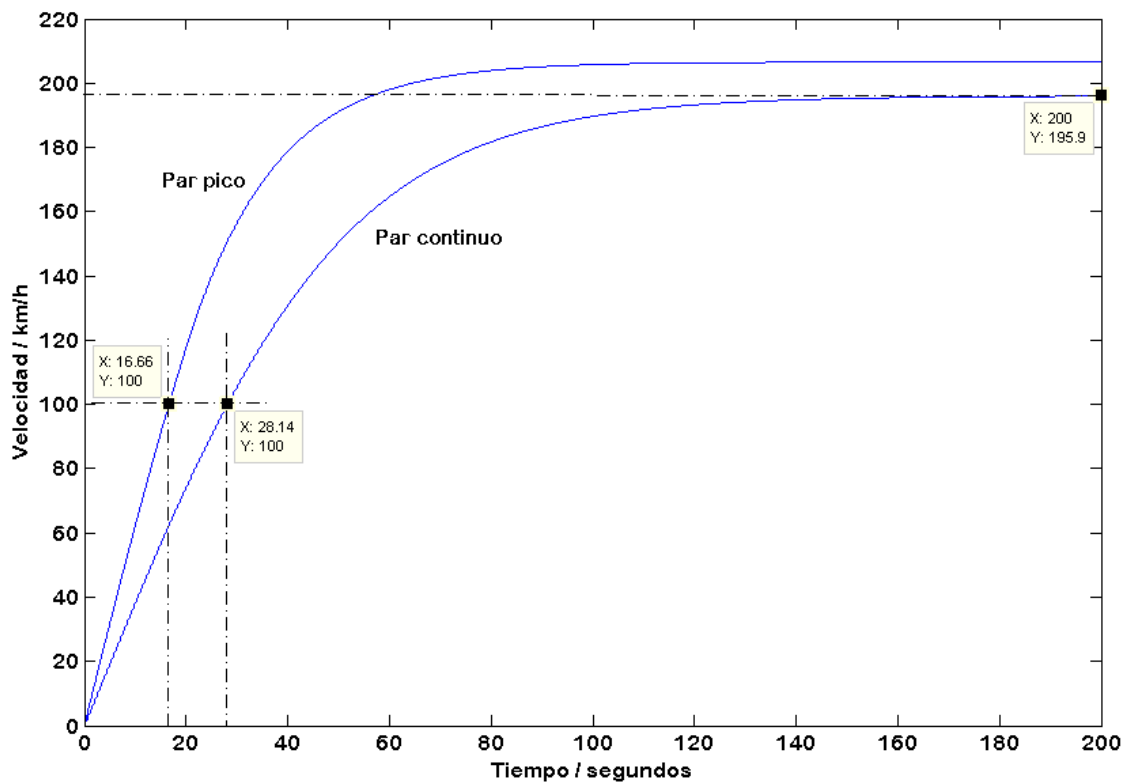


Figura 12. Máxima aceleración vehículo eléctrico

Por otra parte, se ha obtenido también el tiempo que le costaría a ambos vehículos realizar una recuperación de 80 a 120 km/h, Figura 13. En el vehículo diésel dicha aceleración se calcula circulando en 4ª velocidad, por lo que la curva difiere levemente de la mostrada con la aceleración máxima, que tenía un cambio de marcha en el intervalo entre dichas velocidades. En el caso del vehículo eléctrico sí que se podría tomar el tiempo en pasar de 80 a 120 km/h de la Figura 12, aunque se ha realizado una gráfica adicional para mostrar estos tiempos más claramente.

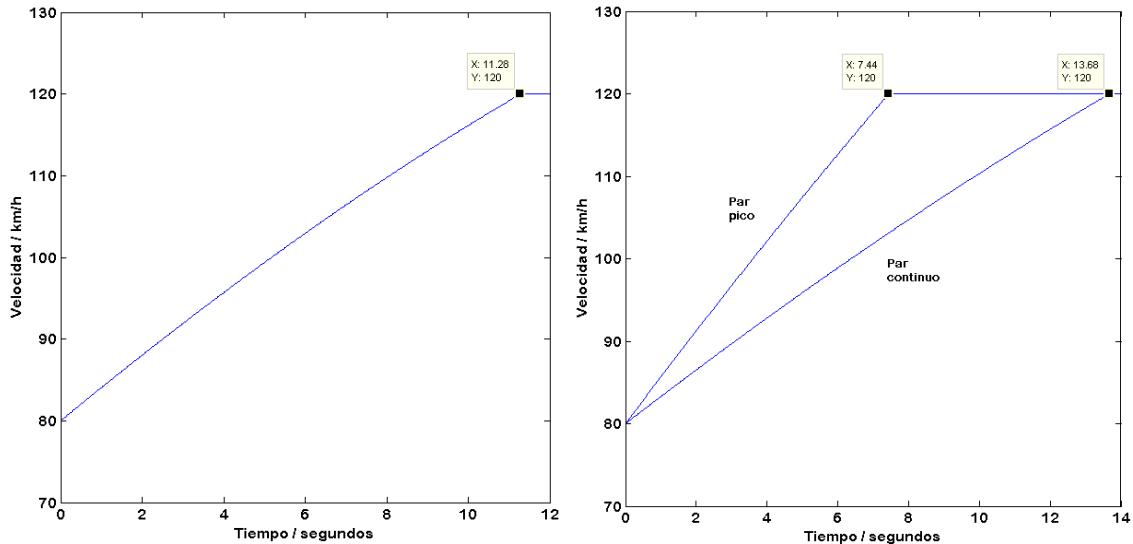


Figura 13. Recuperación 80-120 km/h para vehículo diésel (izq.) y eléctrico (dcha.)

Comparando la aceleración de ambas motorizaciones se puede concluir que **el diésel es claramente superior en términos de aceleración desde parado, pero los tiempos se igualan cuando se requiere aceleración circulando a mayor velocidad**. En aceleración de 0 a 100 km/h, el tiempo utilizado por el eléctrico (28,14 segundos) casi dobla al utilizado por el diésel (15,16 segundos), aunque esta diferencia puede reducirse si se hace uso del par de pico que puede realizar el motor eléctrico. **En una aceleración de 80 a 120 km/h, que equivaldría a una maniobra de adelantamiento en una carretera de un único sentido, el eléctrico alcanza casi las mismas prestaciones que el diésel (13,68 frente a 11,28 segundos)**, e incluso las supera si se usa el par de pico. Con la ayuda de controladores electrónicos se decide cuándo es apropiado utilizar este par de pico del motor, de acuerdo a factores como la posición del acelerador, la temperatura del motor o el estado de carga de la batería.

En la Tabla 2 se recogen todos estos resultados de manera más ordenada:

ACELERACIÓN	DIÉSEL	ELÉCTRICO	
		CONTINUA	PICO
0-100 km/h	15,16 seg.	28,14 seg.	16,66 seg.
80-120 km/h	11,28 seg.	13,68 seg.	7,44 seg.

Tabla 2. Tiempo empleado en las aceleraciones de los vehículos diésel y eléctrico

2.4.4 Velocidad máxima

Otro dato ampliamente utilizado en catálogos y comparativas de vehículos es el valor de la velocidad máxima alcanzable por un vehículo en una carretera sin pendiente. Dicha velocidad se alcanza en el momento en el que la fuerza de tracción que ejercen las ruedas del vehículo se iguala con las resistencias que se oponen al movimiento del mismo. La manera más sencilla de

obtenerla consiste en igualar la potencia máxima del motor y la potencia consumida por las resistencias que se oponen al movimiento. Es un método aproximado porque se utilizan valores del motor y, probablemente, proporcione un valor mayor al real, ya que las relaciones de la caja de cambios suelen limitar más restrictivamente la velocidad. Para obtener este valor es necesario despejar el valor de la velocidad de la siguiente fórmula:

$$P_{max} \cdot \eta_t = \left(f_r Mg \cos \alpha + Mg \sen \alpha + \frac{1}{2} \rho C_x A_f v^2 \right) \cdot v \quad (2.6)$$

El término P_{max} es la potencia máxima que puede entregar el motor, dato suministrado por el fabricante y que se encuentra en la Tabla 1. Despejando la incógnita de la velocidad se obtienen unos valores de 189,8 km/h para el vehículo diésel y 195,9 km/h para el eléctrico.

El cálculo de la velocidad máxima de manera exacta se puede obtener de las representaciones gráficas que ya se han utilizado en los apartados 2.3.2 y 2.3.3. En la Figura 9 y Figura 10, los datos utilizados corresponden a valores en las ruedas, por lo que el punto de corte entre las curvas de fuerza de tracción y las resistencias totales marcará la velocidad máxima real. En los recuadros amarillos de ambas figuras se pueden observar los valores de velocidad en el punto de corte, 188 km/h para el diésel y 195,9 km/h para el eléctrico. La velocidad máxima del eléctrico coincide con la obtenida según el primer procedimiento, puesto que este vehículo no posee caja de cambios, que como se ha dicho, puede modificar la velocidad máxima alcanzable por potencia. No ocurre lo mismo en el caso del vehículo diésel, cuya velocidad máxima queda limitada a 188 km/h, conseguida en 5ª velocidad.

VELOCIDAD	DIÉSEL		ELÉCTRICO	
			CONTINUA	PICO
Velocidad máxima	188 km/h		195,9 km/h	205 km/h aprox.

Tabla 3. Velocidades máximas alcanzables por los vehículos diésel y eléctrico

2.4.5 Consumo y autonomía

A continuación, se estima el consumo que tendrían ambos vehículos en dos situaciones bien diferenciadas, en primer lugar, en la conducción a lo largo de dos ciclos estandarizados y, posteriormente, circulando a una velocidad constante de 120 km/h. En los ciclos estandarizados de conducción se intenta establecer un patrón que reproduzca el uso más habitual que daría un conductor a su vehículo. Entre los más extendidos se encuentran el NEDC (New European Driving Cycle) y el FTP_75 (Federal Test Procedure), utilizados en la UE y en EEUU respectivamente para la homologación de consumos y emisiones en turismos. Ambos son los utilizados en esta comparativa para el análisis de consumos en los vehículos de estudio. El primero de ellos, consta de un recorrido de unos 11 km realizados en un tiempo de 1220 segundos y se puede dividir en dos partes, la primera, compuesta por cuatro repeticiones del ciclo ECE-R15, con bajas velocidades y que simula un periodo de conducción por ciudad, y la

segunda compuesta por el ciclo EUDC (Extra Urban Driving Cycle), que simula una conducción interurbana a mayor velocidad. Por su parte, el ciclo FTP_75 simula un recorrido de 11,04 millas (17,77 km) en 1874 segundos, en los que se alcanza una velocidad máxima de 90 km/h. La representación gráfica velocidad frente a tiempo, para ambos ciclos, se puede encontrar en el ANEXO II.

Para realizar los cálculos de consumo en el ciclo NEDC se ha trabajado con Simulink, una plataforma para la simulación de sistemas dinámicos que funciona sobre el entorno de programación MATLAB. Utilizando dicha herramienta se ha creado un modelo del sistema a partir de bloques interconectados que representan el ciclo de conducción, el vehículo, el motor y la fuente de energía y que son provistos en la librería QSS (QuasiStatic Simulation Toolbox). La simulación se basa en una discretización del ciclo con un paso de un segundo, de manera que, para cada segundo, se calcula el par y la velocidad necesaria en las ruedas, el par y velocidad en el motor y de ahí, la eficiencia y el consumo del mismo. Se puede obtener una información más detallada acerca del procedimiento seguido, así como imágenes de los modelos utilizados y gráficas con los resultados en el ANEXO II.

En el caso del vehículo eléctrico, éste se alimenta de una batería capaz de almacenar 40 kWh, por lo que el consumo se obtiene en kWh/100km y es necesario realizar una conversión para poder compararlo con el consumo del diésel. En dicha conversión se usan los valores más habituales de densidad y poder calorífico inferior del gasóleo, 0,840 kg/l y 35,70 MJ/l respectivamente. De acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\text{Consumo} \left[\frac{l}{100km} \right] = \text{Consumo} \left[\frac{kWh}{100km} \right] \cdot 3,6 \left[\frac{MJ}{kWh} \right] \cdot \frac{1}{35,7} \left[\frac{l}{MJ} \right] \quad (2.7)$$

Los resultados que se han obtenido de las simulaciones se presentan en la siguiente tabla:

CICLO NEDC	DIÉSEL	ELÉCTRICO
Consumo	8,471 $\frac{l}{100km}$	18,974 $\frac{kWh}{100km} = 1,913 \frac{l}{100km}$
Autonomía	708 km	211 km

Tabla 4. Consumo y autonomía de los vehículos diésel y eléctrico en el ciclo NEDC

El menor consumo del vehículo eléctrico frente al diésel se puede razonar con los siguientes tres argumentos. En primer lugar, la **mayor eficiencia del sistema de tracción eléctrico a lo largo de todo el ciclo**. En segundo lugar, el **consumo de energía en los instantes en los que el vehículo está parado es nulo para el vehículo eléctrico**. Sin embargo, en el diésel, el motor continúa girando al ralenti desembragado de las ruedas, consumiendo con ello cierta cantidad de combustible. Por último, el **vehículo eléctrico permite regenerar parte de la energía que se perdería en forma de calor en las frenadas**, consiguiendo con ello aumentar la carga de las baterías y, por tanto, reduciendo el consumo global.

Con los consumos obtenidos y con las capacidades de depósito y batería especificadas en la Tabla 1, la autonomía será de 708 km en el caso del vehículo diésel y 211 km en el caso del eléctrico. A pesar de la alta eficiencia y bajo consumo del motor eléctrico, la energía específica que se obtiene a día de hoy con las baterías es muy baja comparada con la obtenida en la combustión de los carburantes. A partir del poder calorífico del gasóleo se obtiene un valor de energía de 43,1 MJ/kg en la combustión del mismo, mientras que la batería seleccionada proporciona 0,54 MJ/kg. De ahí que, **con un peso de baterías aproximadamente 5 veces superior al de gasóleo se obtenga una autonomía 3,5 veces inferior, aun teniendo un motor mucho más eficiente.**

CICLO FTP 75	DIÉSEL	ELÉCTRICO
Consumo	$8,8 \frac{l}{100km}$	$19,195 \frac{kWh}{100km} = 1,936 \frac{l}{100km}$
Autonomía	681 km	208 km

Tabla 5. Consumo y autonomía de los vehículos diésel y eléctrico en el ciclo FTP 75

Tras la simulación realizada para el ciclo FTP 75 se obtienen unos resultados bastante similares a los ya vistos para el ciclo NEDC. Sin embargo, cuando se analiza el comportamiento de ambos vehículos a una velocidad constante de 120 km/h se encuentran valores significativamente diferentes. Circulando a esa velocidad, el consumo energético que se realizará para vencer las resistencias al avance se estima en $28,583 \frac{kWh}{100km}$ para ambos vehículos. Así mismo, la eficiencia de los motores diésel y eléctrico a esta velocidad se encuentra en 0,394 y 0,84 respectivamente y los rendimientos de transmisión en 0,88 y 0,98. Por lo tanto, los consumos que se obtienen para ambos vehículos circulando a 120 km/h y 6ª velocidad en el caso del diésel son:

120 KM/H	DIÉSEL	ELÉCTRICO
Consumo	$7,972 \frac{l}{100km}$	$28,583 \frac{kWh}{100km} = 3,486 \frac{l}{100km}$
Autonomía	752 km	115 km

Tabla 6. Consumo y autonomía de los vehículos diésel y eléctrico circulando a 120 km/h

Comparando el consumo obtenido para los ciclos NEDC y FTP_75, y el obtenido 120 km/h se puede observar que, mientras para el vehículo diésel éste se reduce ligeramente (9,4%), para el vehículo eléctrico se produce un incremento de hasta un 83%. De los tres argumentos esgrimidos anteriormente para justificar el bajo consumo del vehículo eléctrico, el segundo y el tercero han quedado sin validez, por lo que se ha igualado la diferencia entre ambos vehículos. **Circulando a una velocidad constante de 120 km/h, el vehículo eléctrico pierde las ventajas que obtenía durante los tiempos de parada y en las deceleraciones.** Además, el motor diésel

trabaja cerca de su punto óptimo cuando se circula a 120 km/h y en sexta velocidad, lo que hace que incluso se reduzca su consumo comparado con el del ciclo NEDC.

2.4.6 Economía

En último lugar, se analiza el coste que conllevaría recorrer 100 kilómetros con cada uno de los vehículos de estudio. No se tendrán en cuenta los gastos que podría suponer la compra del vehículo o su mantenimiento, sino únicamente, el coste del carburante y electricidad consumidos en el recorrido especificado.

Para ello, se utilizan los consumos calculados en el apartado 2.3.8 y los precios medios de gasolina y electricidad en España a Diciembre de 2011. Los datos relativos a los precios se han extraído de informes elaborados por el Ministerio de Industria. Dado que el vehículo de combustión posee un motor diésel se ha utilizado el precio del gasóleo A para automoción. En el caso particular de la electricidad, se supondrá un usuario que recargue el vehículo en su domicilio particular, en el que tendrá contratada la tarifa de último recurso sin discriminación horaria. Además de lo anterior, se considerará solamente el término de energía, al que se añadirá el impuesto especial sobre la electricidad y el IVA.

El precio medio del gasóleo A para automoción se sitúa en $1,295 \frac{\text{€}}{\text{l}}$ con impuestos incluidos. El precio de la electricidad para la TUR sin discriminación horaria es $0,152559 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$. A este precio habrá que añadir el impuesto especial sobre la electricidad y el IVA, calculados según:

$$IEE = \text{Precio kWh} \times 1,015113 \times 4,864\% = 0,007533 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$IVA = (\text{Precio kWh} + IEE) \times 18\% = 0,028816 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

Luego, el precio final de ambas fuentes de energía será:

$$\text{Gasóleo A} = 1,295 \frac{\text{€}}{\text{l}} \qquad \text{Electricidad} = 0,188908 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

En la Tabla 7 se muestran los costes obtenidos para ambos vehículos en las tres situaciones estudiadas.

COSTE 100KM	DIÉSEL	ELÉCTRICO
Ciclo NEDC	$10,97 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$	$3,58 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$
Ciclo FTP_75	$11,4 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$	$3,63 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$
120 km/h	$10,77 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$	$5,4 \frac{\text{€}}{100\text{km}}$

Tabla 7. Coste por cada 100 km recorridos con los vehículos diésel y eléctrico

2.4.7 Resumen de la comparativa

Para una mejor visualización de los datos obtenidos en los apartados anteriores, en la siguiente tabla se recogen los valores más significativos que conformarían las prestaciones de ambos vehículos. Para el vehículo eléctrico se diferencia en dos columnas los valores que se obtienen utilizando el par máximo nominal o bien, el par máximo de pico.

PRESTACIONES	DIÉSEL	ELÉCTRICO	
		CONTINUO	PICO
<i>Par máximo</i>	400 Nm	1000 Nm	1600 Nm
<i>Potencia máxima</i>	132 kW	128 kW	162 kW
<i>Aceleración</i>			
<i>0-100 km/h</i>	15,16 seg.	28,14 seg.	16,66 seg.
<i>80-120 km/h</i>	11,28 seg.	13,68 seg.	7,44 seg.
<i>Velocidad máxima</i>	188 km/h	195,9 km/h	205 km/h aprox.
<i>Consumo</i>			
<i>Ciclo NEDC</i>	8,471 l/100km		1,913 l/100km
<i>Ciclo FTP_75</i>	8,8 l/100km		1,936 l/100km
<i>120 km/h</i>	8,314 l/100km		3,486 l/100km
<i>Autonomía</i>			
<i>Ciclo NEDC</i>	708 km		211 km
<i>Ciclo FTP_75</i>	681 km		208 km
<i>120 km/h</i>	722 km		115 km
<i>Coste 100 km</i>			
<i>Ciclo NEDC</i>	10,97 €/100km		3,58 €/100km
<i>Ciclo FTP_75</i>	11,4 €/100km		3,63 €/100km
<i>120 km/h</i>	10,77€/100km		5,4€/100km

Tabla 8. Prestaciones completas de los vehículos diésel y eléctrico

3 EFECTOS DE LA ADICIÓN DE MASA NO SUSPENDIDA

3.1 Introducción

Ubicar los motores en las ruedas, como se ha propuesto para el vehículo eléctrico, supone la adición de masa no suspendida, que es aquella no soportada por la suspensión y compuesta por la masa de los neumáticos, llantas, ejes, rodamientos, frenos, y parte de la masa de la suspensión. La intención de este apartado es estudiar las consecuencias que provoca este aumento de masa en la estabilidad, seguridad y confort del vehículo.

Para analizar cómo influye la modificación de la masa no suspendida, se compara el comportamiento vertical de los vehículos diésel y eléctrico mediante dos herramientas para el estudio de sistemas dinámicos, análisis frecuencial y temporal de la respuesta.

3.2 Modelo cuarto de vehículo

El cociente entre la masa no suspendida y la masa suspendida juega un papel importante para el correcto funcionamiento del sistema de suspensión. Entre las funciones de la suspensión se encuentran aislar a los pasajeros de las irregularidades de la carretera, proveer al vehículo de las capacidades de aceleración, frenado y dirección necesarias para su manejo y soportar el peso estático del vehículo. Pues bien, para cumplir adecuadamente estas funciones se recomienda que la masa no suspendida no exceda el 20 % de la masa suspendida. En la mayoría de vehículos, este porcentaje suele estar en torno al 10 %.

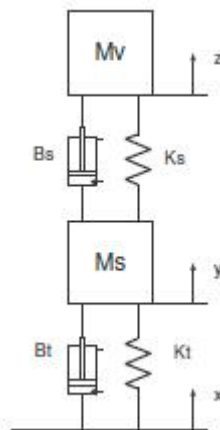


Figura 14. Representación esquemática del modelo cuarto de vehículo (6)

El modelo empleado para analizar el comportamiento vertical del vehículo se muestra en la Figura 14. Se trata de un sistema con dos grados de libertad, consistente en dos masas suspendidas por sendos conjuntos muelle-amortiguador, que representan un cuarto del vehículo. M_v simboliza la masa suspendida, M_s la masa no suspendida, B_s y B_t los coeficientes de amortiguación y K_s y K_t los coeficientes de rigidez de los muelles. Por su parte, x , y , z se

refieren, respectivamente, a los desplazamientos de la carretera, la masa no suspendida y la masa suspendida.

Mediante la aplicación de la segunda ley de Newton al esquema de la Figura 14 se obtienen las ecuaciones dinámicas para el movimiento del sistema:

$$M_v \ddot{z} = -K_s(z - y) - B_s(\dot{z} - \dot{y}) \quad (3.1)$$

$$M_s \ddot{y} = K_s(z - y) + B_s(\dot{z} - \dot{y}) - K_t(y - x) - B_t(\dot{y} - \dot{x}) \quad (3.1)$$

Dichas ecuaciones se utilizan para predecir el comportamiento vertical de los vehículos diésel y eléctrico. Concretamente, se trabaja con las funciones de transferencia $\frac{y}{x}$, $\frac{z}{x}$, que se obtienen tras pasar al dominio de Laplace y operar las ecuaciones dinámicas. El desarrollo empleado para la obtención de las funciones de transferencia y las expresiones de las mismas se detalla en el ANEXO IV.

De la misma manera que en la primera parte de este proyecto, se supondrán ambos vehículos con una misma masa total, 2500 kg y la diferencia residirá en el porcentaje de masa no suspendida en ellos. Igualmente, los valores para las constantes de la suspensión se suponen idénticos en ambos modelos. Todos los datos utilizados para la realización de los cálculos se encuentran en la Tabla 9.

	DIÉSEL	ELÉCTRICO
<i>Masa total</i>	2500 kg	2500 kg
<i>Masa suspendida</i>	565 kg	525 kg
<i>Masa no suspendida</i>	60 kg	100 kg
K_s	60000 N/m	
B_s	2500 Ns/m	
K_t	200000 N/m	
B_t	150 Ns/m	

Tabla 9. Parámetros seleccionados para el modelo cuarto de vehículo

3.3 Análisis frecuencial

El análisis frecuencial se lleva a cabo mediante el uso de diagramas de Bode, en los que se representa la ganancia y la fase de la función de transferencia en función de la frecuencia. Para la representación de dichos diagramas se recurre, nuevamente, al software matemático MatLab.

Los diagramas de Bode obtenidos para el desplazamiento de las ruedas y el desplazamiento de la carrocería se muestran en la Figura 15 y en la Figura 16, respectivamente.

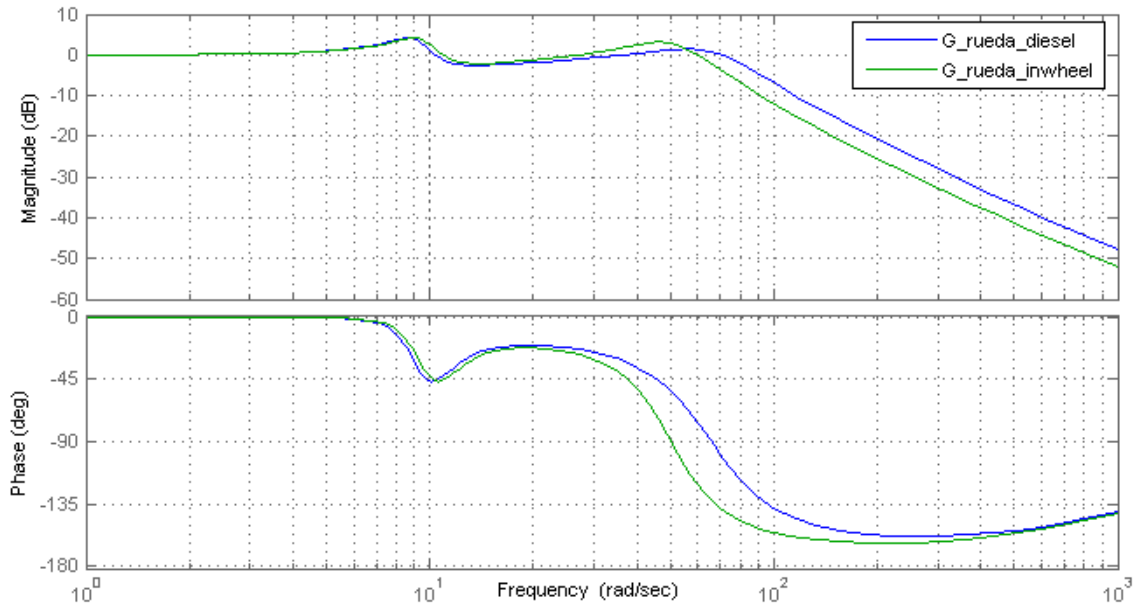


Figura 15. Diagrama de Bode para la respuesta de las ruedas

El diagrama de Bode proporciona información sobre la estabilidad del sistema. Para que un sistema sea estable se debe cumplir que el margen de ganancia y el margen de fase sean positivos. De acuerdo a estos criterios, se puede afirmar que, tanto en el caso de las ruedas como en el de la carrocería e **independientemente del vehículo, el sistema es estable**.

Por otra parte, del diagrama de Bode también se puede extraer información acerca de las frecuencias naturales del sistema, que son aquellas que producirían la máxima oscilación de las salidas. En este caso, con dos grados de libertad existen dos frecuencias naturales, una para el chasis y otra para las ruedas.

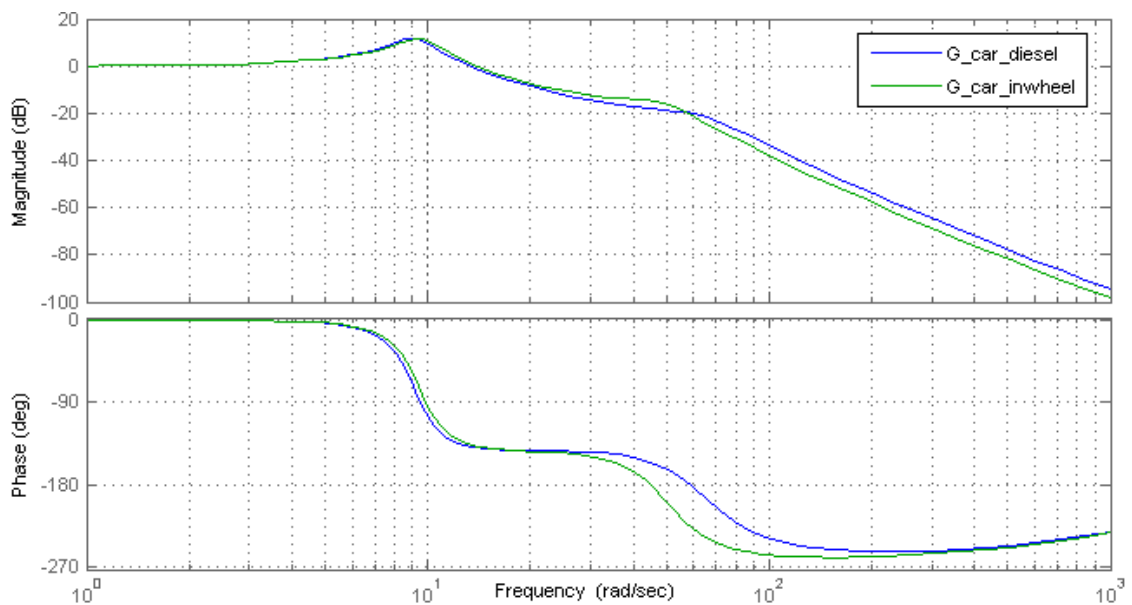


Figura 16. Diagrama de Bode para la respuesta de la carrocería

Las frecuencias naturales en el diagrama de Bode se encuentran en los puntos en los que la pendiente de la ganancia baja 20 dB. A partir de la observación visual, estas frecuencias se sitúan, aproximadamente, en 9 rad/s para la carrocería de ambos coches y en unos 45-60 rad/s para las ruedas. Se pueden obtener valores numéricos mediante la resolución de la siguiente expresión, que proporciona las frecuencias naturales para el sistema sin amortiguación:

$$w^2 = \frac{K_t + K_s}{2 M_s} + \frac{K_s}{2 M_v} \pm \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{K_t + K_s}{M_s} + \frac{K_s}{M_v} \right)^2 - \frac{K_t K_s}{M_s M_v}}$$

Los resultados que se obtienen al sustituir los valores de las constantes son:

$$w1_{diesel} = 9,012 \frac{rad}{s} = 1,434 Hz \qquad w2_{diesel} = 66,017 \frac{rad}{s} = 10,507 Hz$$

$$w1_{electrico} = 9,331 \frac{rad}{s} = 1,485 Hz \qquad w2_{electrico} = 51,257 \frac{rad}{s} = 8,158 Hz$$

Del estudio de los diagramas de Bode y las frecuencias naturales de oscilación se puede concluir que el aumento del porcentaje de masa no suspendida no provoca grandes alteraciones. El mayor cambio se produce en la frecuencia de resonancia de las ruedas que disminuye de 10,5 Hz a 8 Hz. Dicho cambio no supondría mayor problema si no fuese porque, además, aumenta el nivel de respuesta a esa frecuencia, pasando la ganancia de 1,47 dB a 3,16 dB. Esto significa que las ruedas se despegarán de la carretera en mayor medida en el vehículo eléctrico para entradas cercanas a la frecuencia natural.

En cuanto a la frecuencia de resonancia de la carrocería, la variación que se da en el caso del vehículo eléctrico es mínima y permanece dentro de los límites recomendados para las personas (óptimo en torno a 1,5Hz []).

Así pues, a **partir del análisis frecuencial, se puede decir que el incremento de masa no suspendida no afecta al confort de los pasajeros, pero sí tiene consecuencias en el comportamiento del vehículo, que perderá cualidades dinámicas.**

3.4 Simulación temporal

Para verificar los datos proporcionados por el análisis en frecuencia se va a comprobar la respuesta temporal de las ruedas y la carrocería en diferentes situaciones. De igual modo que en el apartado 2.4.5, se trabaja en el entorno Simulink, que permite simular la respuesta del modelo de cuarto de vehículo frente a diferentes entradas de la carretera.

Las entradas utilizadas representan un bache de 10 cm de alto por 10 cm de ancho, que los vehículos superarán a velocidades de 10 km/h y 60 km/h. Además, se simula el comportamiento de los vehículos ante un único bache de las características mencionadas y ante una sucesión de esos mismos baches de manera indefinida. En la Figura 17 se muestran las entradas proporcionadas al sistema para representar los baches descritos anteriormente.

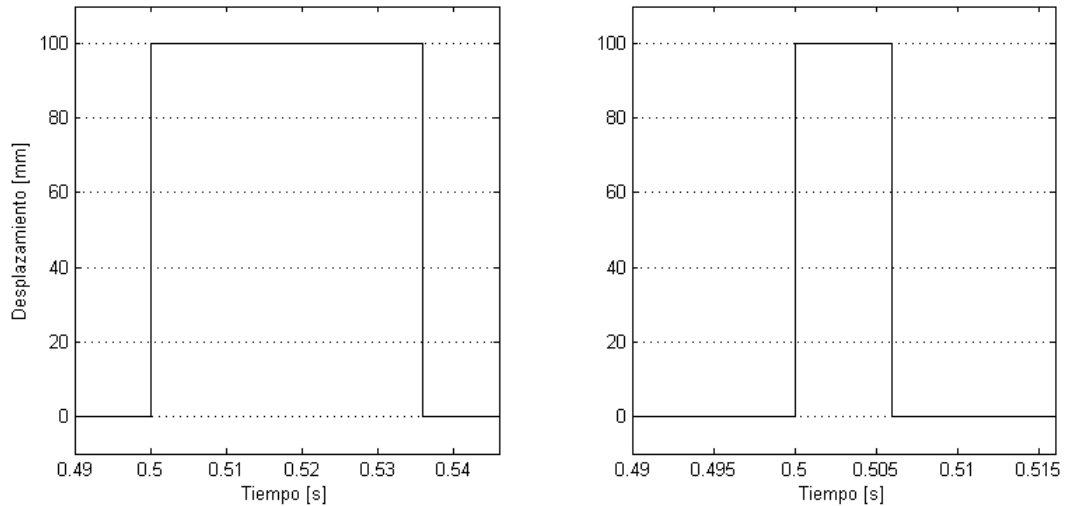


Figura 17. Pulsos empleados como entrada para representar un bache de 10 cm x 10 cm superado a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)

La respuesta de la carrocería frente a un único bache superado a las velocidades mencionadas se muestra en la Figura 18. Tanto a baja como a alta velocidad la respuesta de la carrocería es estable frente a la entrada, volviendo a la posición de equilibrio tras realizar un movimiento oscilatorio que se atenúa con el tiempo. La frecuencia de este movimiento coincide con la frecuencia natural calculada en el diagrama de bode en el apartado anterior.

Las diferencias entre la respuesta del vehículo diésel y el eléctrico son mínimas. En ambos casos, la suspensión absorbe la irregularidad del terreno limitando el movimiento de la carrocería a unos 30 mm en el caso de circular a 10 km/h y a poco más de 5 mm a 60 km/h. Únicamente se aprecia un ligero aumento del nivel de respuesta (14 % mayor) coincidente con la primera oscilación de la carrocería y no reproducido en las siguientes oscilaciones.

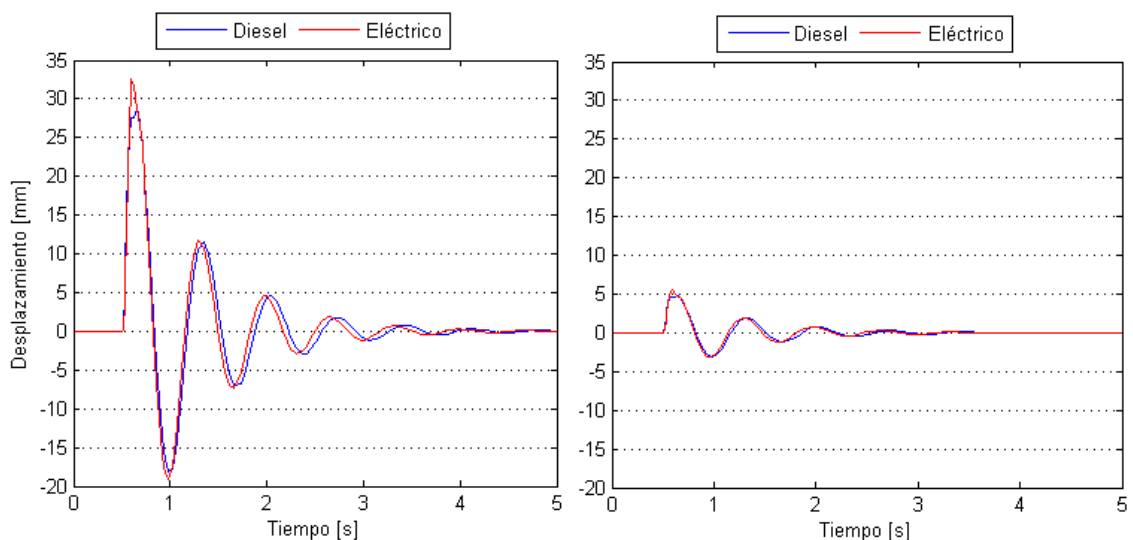


Figura 18. Respuesta de la carrocería al superar un bache a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)

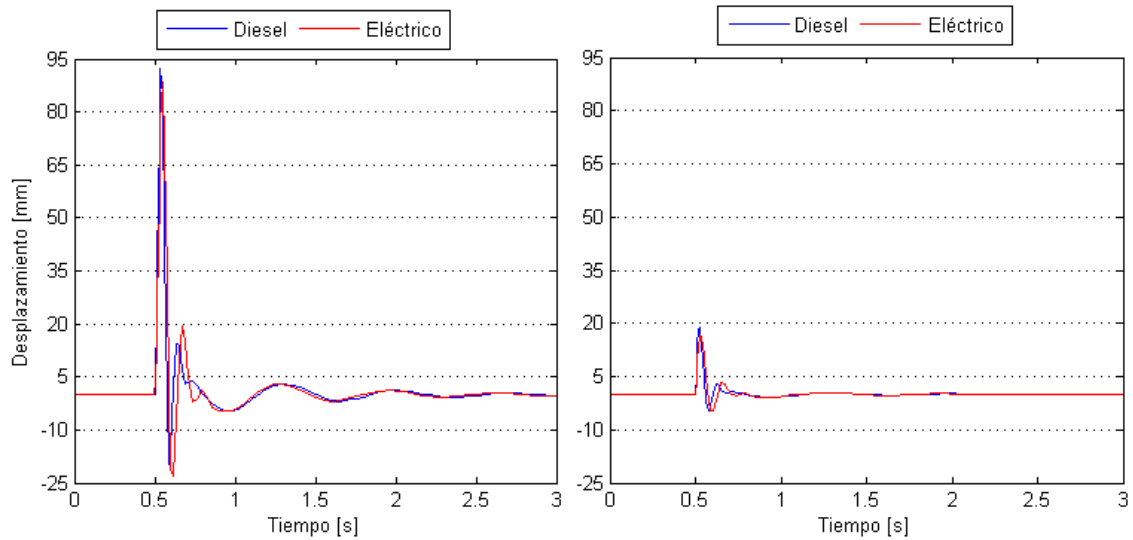


Figura 19. Respuesta de las ruedas al superar un bache a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)

En la Figura 19 se aprecia el movimiento de las ruedas para el caso análogo al anterior, un único bache a velocidades de 10 y 60 kilómetros por hora. Para el movimiento de las ruedas el interés reside en que éstas sigan de la mejor manera posible el perfil de la carretera. De esta manera se consigue que el vehículo posea un comportamiento dinámico adecuado.

Nuevamente, las diferencias entre el vehículo diésel y el eléctrico son mínimas. A 10 km/h el desplazamiento llega casi a 95 mm en ambos casos, aunque existe un pequeño desfase en la respuesta, un poco más lenta para el vehículo eléctrico. A mayor velocidad, la rueda no es capaz de subir y bajar tan rápidamente como la carretera, sino que el neumático se comprime y el desplazamiento sólo llega a 20 mm. En cualquier caso, no hay pérdida de prestaciones en el vehículo eléctrico ya que el efecto mencionado ocurre de igual manera en ambos vehículos.

A continuación, se analiza la respuesta frente a una sucesión de baches a 10 y 60 km/h. La respuesta de la carrocería y las ruedas continúa siendo estable, aunque con una leve variación.

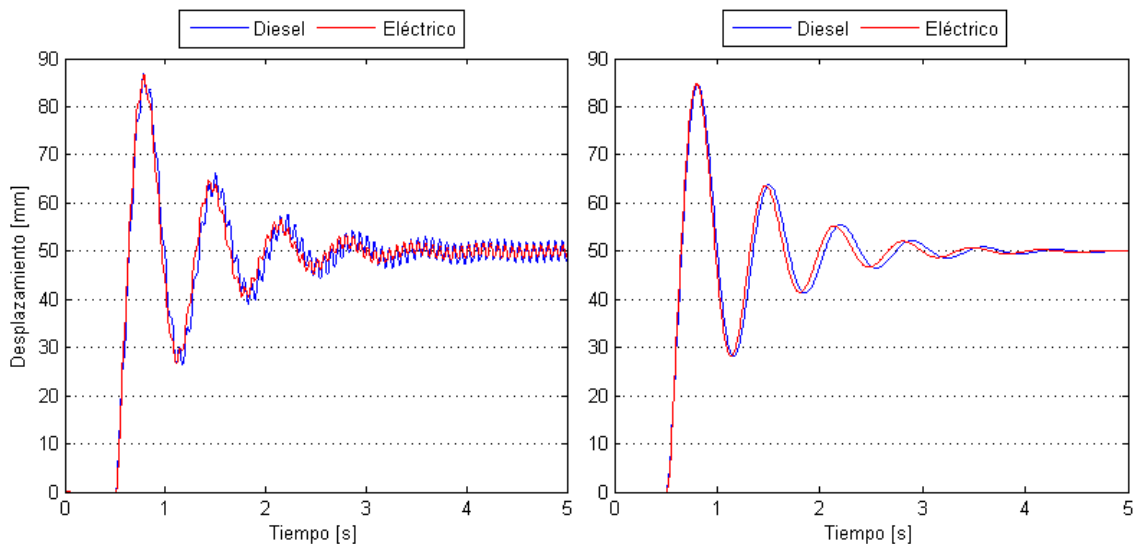


Figura 20. Respuesta de la carrocería al superar una sucesión de baches a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)

Al superar un único bache, la carrocería y las ruedas alcanzan, tras el equilibrio, la posición inicial. Sin embargo, para una sucesión de baches, la situación de equilibrio se produce con un desplazamiento igual a la mitad de la altura del bache.

En la Figura 20 se observa el comportamiento de la carrocería ante la sucesión de baches. La suspensión absorbe el grueso de las vibraciones, de tal manera que, el movimiento principal de la carrocería se produce a su frecuencia natural. Pese a ello, existe un acoplamiento con la frecuencia natural de las ruedas, que provoca un movimiento oscilatorio de menor amplitud. Dicho movimiento, más notorio a baja velocidad, es atenuado en mayor medida por la suspensión del vehículo eléctrico, lo que le confiere una ligera ventaja en términos de confort.

Finalmente, en la Figura 21 se muestra el comportamiento de las ruedas frente a una sucesión de baches. A baja velocidad se produce la mayor diferencia entre el vehículo diésel y el eléctrico de todos los casos vistos hasta ahora. Las ruedas del vehículo diésel siguen el perfil de la carretera con mayor exactitud, llegando a subir y bajar unos 80 mm. Por el contrario, en el vehículo eléctrico la amplitud del movimiento es atenuada en mayor medida y el desplazamiento se reduce a unos 40 mm. El vehículo eléctrico probablemente perderá capacidades dinámicas de tracción, frenada o giro frente al diésel. A alta velocidad, ambos vehículos filtran en gran medida las vibraciones y, prácticamente, no se desplazan siguiendo la carretera.

Tras el análisis temporal las conclusiones a las que se llega son similares a las obtenidas con la respuesta en frecuencia. **El confort de los pasajeros no se verá mermado por el hecho de tener mayor masa no suspendida, pero el comportamiento del vehículo puede resultar ligeramente perjudicado.** Aun así, sería posible variar los parámetros de la suspensión para tratar de compensar la pérdida de prestaciones. Un aumento del coeficiente de amortiguación B_s , y de la rigidez de los neumáticos, K_t , proporcionaría al vehículo eléctrico unos resultados más similares al diésel.

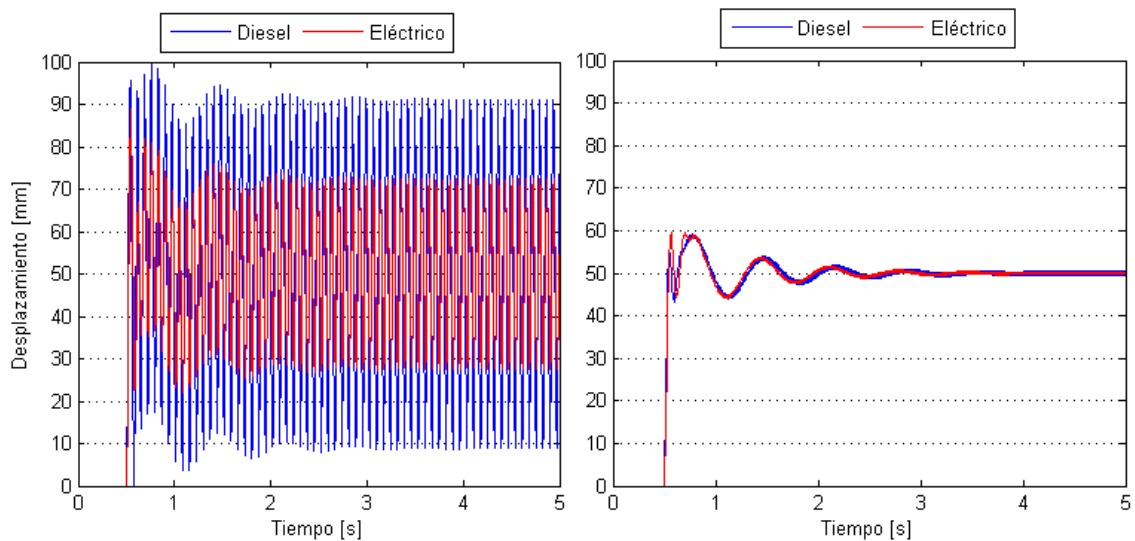


Figura 21. Respuesta de las ruedas al superar una sucesión de baches a 10 km/h (izq.) y a 60 km/h (dcha.)

4 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LOS COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA ELÉCTRICO

4.1 Introducción

En el capítulo 2 se han mencionado los componentes principales que constituyen el sistema de tracción del vehículo eléctrico. A continuación se trata el dimensionado y la colocación de dichos componentes para formar el vehículo. Para las baterías de litio se realiza una estimación de sus dimensiones a partir del estado del arte existente en esta tecnología. Así mismo se realizan unos breves comentarios acerca del resto de componentes necesarios. Por último, se concluye el capítulo con una representación en tres dimensiones de un vehículo equipado con motores rueda y se comentan sus diferencias con uno convencional.

4.2 Dimensiones y colocación de la batería

De acuerdo con diferentes estudios acerca del estado del arte en baterías de iones de litio, éstas poseen unos valores teóricos de densidad energética y de energía específica en torno a 175 Wh/dm^3 y 144 Wh/kg respectivamente. Sin embargo, estos valores corresponden a las celdas electroquímicas que componen las baterías. El posterior empaquetamiento de las mismas para formar la batería completa reduce la densidad energética y energía específica.

Dado que los valores teóricos son aproximados, para la estimación de las dimensiones, se ha realizado una búsqueda de las especificaciones que poseen los packs de baterías montados en vehículos eléctricos a la venta actualmente. A partir de ellas se eligen las medidas que tendrá la batería de 40 kWh montada en el vehículo eléctrico. Los vehículos elegidos como referencia han sido el Chevrolet Volt (Opel Ampera en Europa), Nissan Leaf y el Tesla Roadster.

Todos ellos poseen baterías de iones de litio de última generación compuestas por celdas electroquímicas rectangulares o cuadradas. En la Figura 22 se muestra uno de los 48 módulos que conforman la batería del Nissan Leaf y que en su interior aloja 4 celdas rectangulares de un espesor muy pequeño.



Figura 22. Módulo constituyente de la batería del Nissan Leaf

	CHEVROLET VOLT	NISSAN LEAF	TESLA ROADSTER
<i>Capacidad</i>	16 kWh	24 kWh	56 kWh
<i>Nº de celdas/módulos</i>	288 celdas	48 módulos	6831 celdas
<i>Dimensiones celda/módulo</i>	12,7 x 17,8 x 0,635 cm	30,3 x 22,3 x 3,5 cm	∅ 1,8 x 6,5 cm
<i>Peso celdas/módulos</i>	130,64 kg	182,4 kg	307,4 kg
<i>Volumen celdas/módulos</i>	41,34 dm ³	113 dm ³	113 dm ³
<i>Peso batería</i>	198,1 kg	294 kg	450kg
<i>Volumen batería</i>	138 dm ³	<u>350 dm³</u>	<u>283 dm³</u>
<i>Energía específica</i>	80 Wh/kg	82 Wh/kg	124 Wh/kg
<i>Densidad energética</i>	116 Wh/dm ³	68 Wh/dm ³	200 Wh/dm ³

Tabla 10. Especificaciones de tres modelos de baterías Li-ion

En la Tabla 10 se muestran las especificaciones para los tres modelos de baterías analizados. De ellas se puede destacar que la batería del Tesla Roadster consigue las mejores cifras de energía específica y densidad energética. La razón puede estar en la tecnología empleada en esta batería, que contiene celdas de geometría cilíndrica en lugar de las rectangulares empleadas en los otros dos vehículos.

Para el vehículo eléctrico estudiado en este proyecto se seleccionan las especificaciones indicadas en la Tabla 11, más cercanas a las que se consiguen con celdas rectangulares. La colocación del pack de baterías es otro tema a tratar. Dado que el espacio de carga de vehículos N1 suele situarse entre los 5200 y los 6500 dm³, parece razonable sacrificar parte de éste para colocar las baterías. Se elige, por tanto, ubicar las baterías en la zona central del espacio de carga y a la menor altura posible para no elevar la altura del centro de gravedad.

	VEHÍCULO ELÉCTRICO
<i>Capacidad</i>	40 kWh
<i>Peso batería</i>	400 kg
<i>Volumen batería</i>	392 dm ³
<i>Dimensiones batería</i>	140 x 140 x 20 cm
<i>Energía específica</i>	100 Wh/kg
<i>Densidad energética</i>	102 Wh/dm ³

Tabla 11. Dimensiones estimadas para la batería

4.3 Dimensiones y colocación del motor eléctrico

En el caso del motor eléctrico no es necesaria una estimación de las dimensiones, ya que éstas vienen dadas por la empresa fabricante de los mismos, Protean Electric. En la se muestran las especificaciones para cada uno de los dos motores empleados.

Los motores de la empresa Protean Electric cuentan con la ventaja de llevar micro inversores integrados para la conversión de corriente continua en alterna. De esta manera, se prescinde de la unidad de electrónica de potencia que ocuparía un gran espacio en el vehículo. Además, tampoco es necesaria la adición de caja de cambios, embrague o diferencial.

PROTEAN ELECTRIC PD 18	
Dimensiones	Ø 42 x 11,5 cm
Volumen	20,8 dm ³
Peso	31 kg

Tabla 12. Dimensiones del motor eléctrico Protean Electric PD18

Por su parte, la ubicación de los motores también ha sido tratada con anterioridad. Los dos motores que equipa el vehículo eléctrico irán colocados en el interior de las llantas traseras, proporcionando tracción directamente a las ruedas. En la Figura 23 se observa el montaje de uno de estos motores alojado en la llanta correspondiente.



Figura 23. Motor rueda Protean Electric PD18 (9)

4.4 Otros componentes

Los siguientes componentes representan volúmenes mucho más pequeños en comparación con la batería y los motores. Es por ello, que en el modelo de vehículo realizado en el apartado posterior aparecen representados con unas dimensiones orientativas. Todos estos componentes estarán también presentes en el vehículo eléctrico.

- **SECU (System Electronic Control Unit):** Se encarga de controlar y dirigir el comportamiento del motor y el vehículo en base a una selección de entradas. Estas entradas, por ejemplo demandas de aceleración o freno, son procesadas por el software contenido en la SECU y convertidas en comandos de par y velocidad de giro para cada rueda. De esta manera, es posible implementar controles como el ABS o el control de estabilidad de manera sencilla, gracias a la SECU y a la independencia de funcionamiento de los motores. En la Figura 24 se muestra un ejemplo de unidad de control de un vehículo.



Figura 24. Unidad de control eléctrico del vehículo (7)

- **BMS (Battery Management System):** Unidad electrónica de control para la batería. Se encarga del buen funcionamiento de la batería, mediante la supervisión y monitorización de variables como voltaje, intensidad, temperatura, estado de carga y de descarga, flujo de refrigerante, etc. Protege la batería manteniéndola dentro de sus límites seguros de operación.
- **Cableado CAN (Controller Area Network):** Conjunto de interconexiones entre motores, SECU y BMS para la transmisión de información y órdenes.
- **Cableado eléctrico:** Transporta la electricidad necesaria para el funcionamiento de los motores. Por lo tanto, conecta los polos de la batería con cada uno de los dos motores presentes en el vehículo.

4.5 Representación de componentes en un modelo

En la siguiente página se muestra una representación en tres dimensiones de la distribución que tendría el vehículo eléctrico equipado con motores rueda.

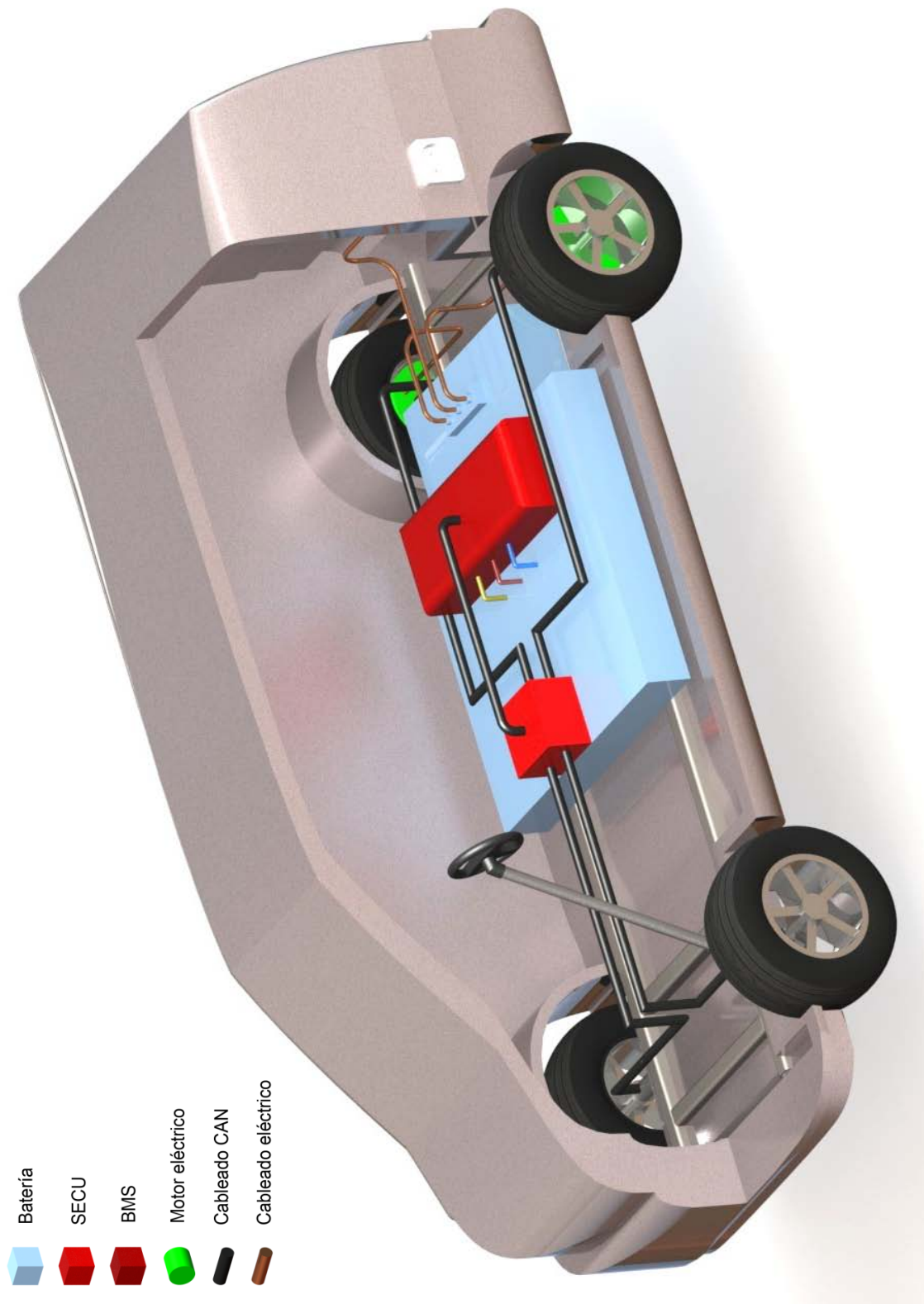


Figura 25. Modelo en tres dimensiones del vehículo eléctrico

4.6 Diferencias respecto a un vehículo convencional

La distribución mostrada en la Figura 25 para el vehículo eléctrico es bastante diferente a la que suele equipar un vehículo convencional con motor de combustión. A continuación se detallan los componentes que incluye habitualmente un vehículo con motor de combustión, la distribución de los mismos y las diferencias existentes con el vehículo eléctrico.

En la Figura 26 se puede observar la configuración más tradicional del tren de potencia para un vehículo con motor de combustión y tracción trasera. A pesar de contar con tracción trasera, el motor de combustión se suele situar en la parte frontal del vehículo y la tracción se transmite, desde la salida del motor, mediante un eje de transmisión que atraviesa la parte baja del vehículo. De la misma manera, el escape recorre el vehículo en la dirección longitudinal, desde la salida del motor hasta su desembocadura en la parte trasera. También se puede observar la colocación del depósito de combustible en la parte trasera del vehículo, justo debajo del espacio destinado a la carga.



Figura 26. Disposición del tren de potencia en un vehículo convencional (7)

Si se centra el análisis únicamente en la zona delantera del vehículo, lo más habitual es encontrar bajo el capó una distribución similar a la mostrada en la Figura 27. En ella se puede ver un motor de combustión de dos litros bi-turbodiésel con su correspondiente sistema de admisión. Además se pueden observar otros componentes como el sistema de refrigeración o la transmisión.

Los componentes mencionados ocupan la mayoría del espacio disponible en el vano motor de un vehículo de combustión. Sin embargo, otros elementos completan el espacio disponible hasta resultar en la acumulación de componentes que se aprecia al levantar el capó de un vehículo convencional. Es el caso del compresor para el aire acondicionado, los depósitos para los distintos líquidos (frenos, refrigerante, limpia parabrisas...), la batería de bajo voltaje, el alternador, etc.



Figura 27. Componentes principales del frontal de un vehículo de combustión.

Frente a la distribución habitual de los vehículos de combustión, en la Figura 28 se esquematizan los principales componentes del tren de potencia del vehículo eléctrico con motores rueda. Como se ha mencionado anteriormente, las diferencias con el vehículo de combustión son notables, ya que se reduce de manera drástica el número de componentes, principalmente en la parte frontal del vehículo. En el modelo en tres dimensiones presentado en el apartado anterior ya se detallaban los componentes necesarios en el vehículo eléctrico y, tanto en ese modelo, como en la Figura 28 es común el espacio disponible en la parte frontal del vehículo.



Figura 28. Disposición del tren de potencia en un vehículo eléctrico con motores rueda (7)

De acuerdo a lo visto en las figuras y lo comentado acerca de los componentes necesarios en el vehículo eléctrico se encuentran las siguientes diferencias con un vehículo convencional:

Componentes que se eliminan del frontal del vehículo:

- Motor de combustión interna / Motor de tracción
- Sistema de admisión y escape del motor
- Transmisión (Caja reductora, diferencial, eje de transmisión)
- Alternador / Inversor DC-AC

Componentes que se mantienen en el frontal del vehículo:

- Batería de 12 V
- Compresor aire acondicionado / Calentador
- Radiador / Elementos de refrigeración
- Depósitos para refrigerante, limpiaparabrisas y otros fluidos

Componentes que se añaden al vehículo (no necesariamente en el frontal):

- Batería de alto voltaje
- Conversor de tensión DC/DC
- Puerto de recarga eléctrica
- Cableado eléctrico de alto voltaje

5 SOLUCIONES PARA LA MEJORA DE LA SEGURIDAD PASIVA EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EQUIPADOS CON MOTORES RUEDA

5.1 Introducción

La distribución espacial del vehículo con motores rueda ha dado como resultado una zona frontal bastante despejada de componentes. Esto posibilita la introducción de cambios en el chasis que ayuden a proteger a los ocupantes en caso de accidente. En este apartado se exponen tres propuestas para la realización de cambios en el frontal, que han sido extraídas de otros proyectos europeos realizados con anterioridad.

5.2 Problemática actual

A pesar de que los nuevos vehículos que se lanzan al mercado cuentan con sistemas de protección de ocupantes cada vez más avanzados, el número de muertes en las carreteras es todavía muy elevado. Como se puede apreciar en la Figura 29 los accidentes de tráfico constituyen la cuarta causa de muerte en los EEUU y, más preocupante, la primera en cuanto a pérdida de años productivos.

Para acabar con este problema es necesario invertir grandes esfuerzos en encontrar soluciones novedosas que permitan reducir el número de accidentes, así como mitigar las lesiones de los pasajeros en caso de que el accidente se produzca. Muchos de los elementos introducidos hasta ahora con la finalidad de cumplir los objetivos anteriores ven limitada su utilidad a accidentes concretos, o incluso a la superación de determinados tests de homologación.

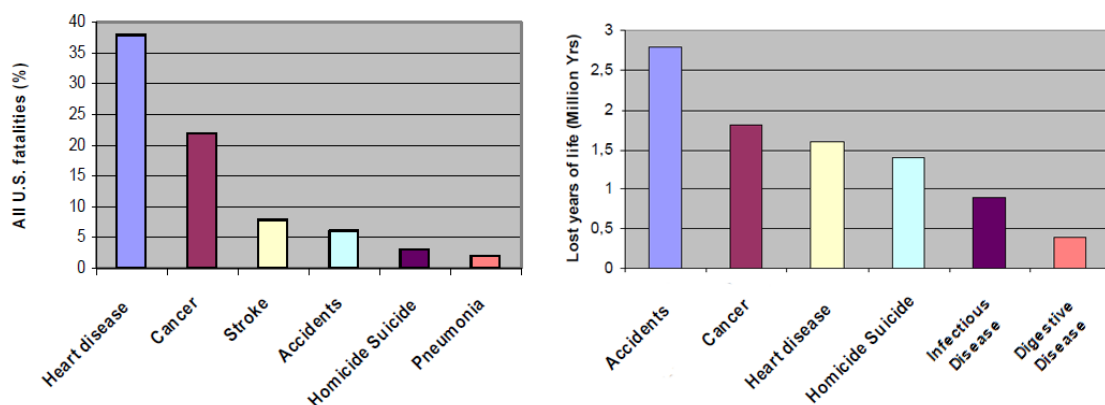


Figura 29. Principales causas de muerte en EEUU (izq.) y causas de pérdida de años productivos (dcha.) (10)

En el apartado 434 se van a proponer algunas soluciones en materia de seguridad pasiva que mejoren la protección de los ocupantes para casos de accidentes frontales. Para ello, se trata de aprovechar las novedades introducidas en la distribución del vehículo eléctrico realizada con el empleo de motores rueda.

5.3 Nuevas oportunidades derivadas del sistema de propulsión eléctrico

Cuando tiene lugar una colisión frontal, bien sea entre dos vehículos o entre un vehículo y un obstáculo, los objetivos principales para proteger adecuadamente a los pasajeros se centran en:

- Disminuir en la mayor medida posible la deceleración sufrida por los ocupantes del vehículo.
- Evitar la deformación del compartimento de conducción, así como la intrusión de elementos exteriores en el mismo.

Para el cumplimiento de ambos objetivos se ha de tener en cuenta que, en el momento de colisionar, la energía cinética que posee el vehículo se transforma en energía de deformación. Por ello, para prevenir niveles excesivos de deceleración, toda la distancia de deformación disponible por delante del compartimento de conducción tiene que ser aprovechada. Por ejemplo, en el vehículo mostrado en la Figura 30, la zona pintada en amarillo debería deformarse por completo, para absorber la mayor energía posible y reducir así la deceleración de los ocupantes. Sin embargo, cuando se selecciona una rigidez para los elementos del frontal, solo es posible el cumplimiento de lo anterior para una velocidad de choque determinada. En caso de que el choque se produzca a una velocidad distinta a la prevista en el diseño, los pasajeros pueden sufrir deceleraciones que supongan peligro para su salud.

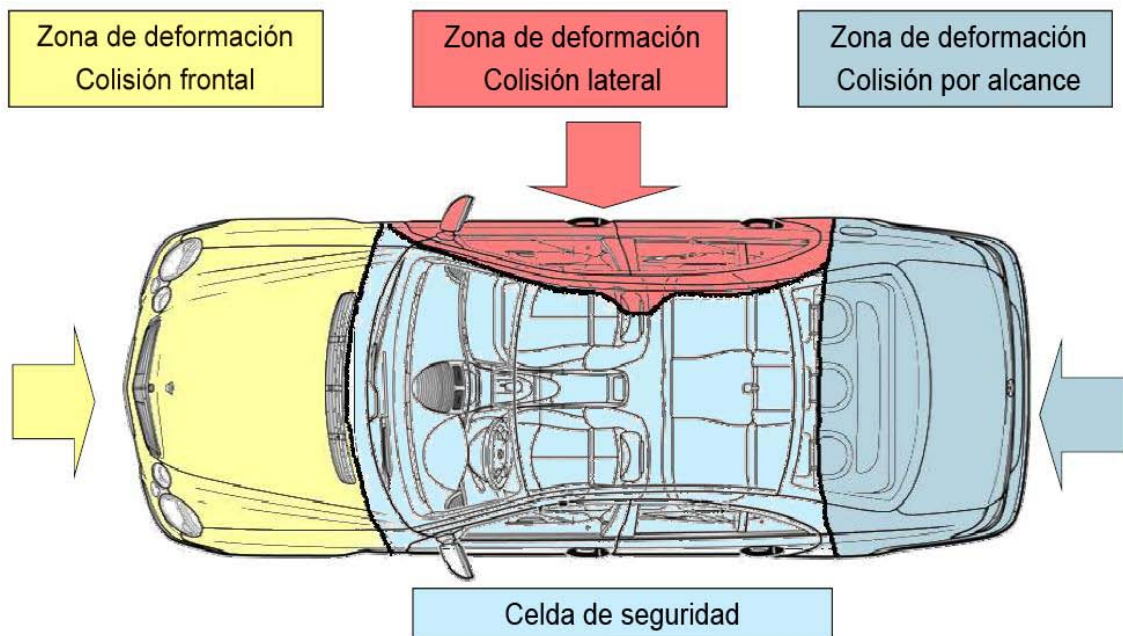


Figura 30. Zonas de deformación en caso de accidente (10)

Por su parte, la zona de color azul claro debe poseer una rigidez suficiente para permanecer sin deformarse en caso de producirse una colisión. Es el espacio ocupado por los pasajeros y se debe evitar la intrusión de elementos pertenecientes al chasis en él.

La principal ventaja que ofrece la instalación de motores rueda para la mejora de la seguridad es la supresión de numerosos componentes que habitualmente se sitúan en el

frontal de un vehículo y que no se encuentran optimizados para la absorción de energía. El más importante de estos componentes es el motor, que ocupa un gran volumen pero que, dada su rigidez, apenas absorbe el 20% de la energía producida en una colisión frontal.

En la Figura 31 se muestra cómo se reparte la energía de deformación entre los elementos que componen el frontal de un turismo convencional. La mayor absorción de energía, aproximadamente el 50% del total, se produce con la deformación controlada de los perfiles longitudinales inferiores. Dichos perfiles se diseñan para que al ser comprimidos por una fuerza sigan patrones de pliegue que maximicen la energía absorbida.

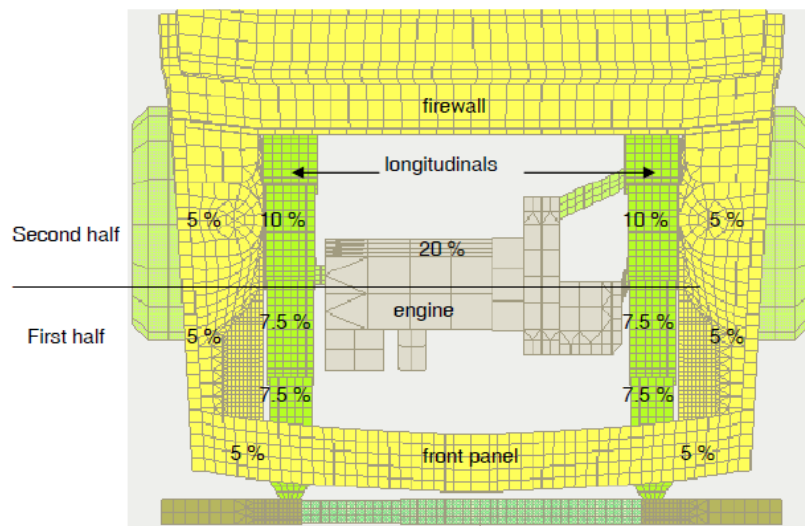


Figura 31. Porcentajes de absorción de energía en la estructura frontal de un vehículo (11)

Como se puede observar en la figura anterior, el motor junto con los elementos de la transmisión, solamente absorben en torno al 20 % de la energía total, a pesar de ocupar un volumen aproximado del 40 % del frontal. En la configuración con motores rueda, dada la ausencia del motor en la ubicación central, se puede utilizar este espacio para colocar nuevos perfiles optimizados.

Es habitual que los vehículos convencionales pertenecientes a la clase N1 cuenten con chasis constituidos por dos largueros principales y múltiples travesaños sobre los que se sitúan los componentes del tren de potencia. Sin embargo, no suele existir una segunda altura de elementos longitudinales que se deformen en caso de accidente. Tal y como se puede apreciar en la Figura 32, únicamente la carrocería, que se coloca apoyada sobre este chasis, puede ayudar parcialmente en la absorción de energía.



Figura 32. Chasis perteneciente a un vehículo de combustión de la clase N1

A continuación se proponen algunas soluciones concretas que aprovechan la nueva distribución de componentes para solucionar los problemas planteados y mejorar la seguridad pasiva.

5.4 Propuestas para la mejora de la seguridad de los ocupantes

5.4.1 *Nose cone*

La primera propuesta se extrae del proyecto APROSYS “*Advanced Protection Systems*”, cuyo objetivo es el desarrollo de nuevas tecnologías para la protección de cualquier usuario de las carreteras en todos los accidentes relevantes. En dicho proyecto aparece el llamado “*Nose Cone*” como una solución con gran potencial para reducir el riesgo de atropello y aplastamiento de usuarios vulnerables por parte de camiones. Además, se demuestra que esta propuesta tiene influencia positiva en:

- Reducción de la fuerza primaria de contacto sobre usuarios vulnerables de las carreteras (peatones, ciclistas...)
- Seguridad de los ocupantes del vehículo
- Compatibilidad entre vehículos
- Aerodinámica y consumo de combustible

Para los dos primeros puntos señalados la mejora se debe al aumento de la distancia deformable en el frontal del vehículo. Como se muestra en la Figura 33 esta solución consiste en la adición de una estructura para la zona delantera, que se integra por delante del frontal habitual y que incrementa las posibilidades de absorción. La mejora en compatibilidad y aerodinámica viene dada por la forma optimizada con la que se ha diseñado el modelo.



Figura 33. Estructura del “Nose Cone”

En el proyecto APROSYS se propone esta solución para añadirla en camiones con un frontal plano que ya se encuentren fabricados. Por ello, propone una unión a la estructura previa existente en estos vehículos mediante un sistema de bisagras y uniones atornilladas. Sin embargo, su implementación desde las fases iniciales de desarrollo del chasis podría mejorar aún más su efectividad en caso de accidente.

La estructura presentada en la Figura 33 utiliza como referencia los perfiles longitudinales del chasis. En el final de estos perfiles se coloca un perfil transversal junto a un marco con forma cuadrada para soportar y anclar el peso del resto de elementos. Para integrar esta propuesta en el diseño del chasis sería necesario alargar los dos perfiles laterales longitudinales del chasis hasta un punto más delantero. El resto de la estructura podría mantenerse igual a la propuesta presentada en APROSYS, si bien se podrían introducir uniones soldadas en lugar de atornilladas.

El “Nose Cone” se compone, por una parte, de un parachoques fabricado en espuma y, por otra, de diversos perfiles colocados transversalmente para dar forma a la estructura completa. Para los elementos de espuma se usará una espuma empleada típicamente en automoción con una densidad de 1,36 kg/dm³, un módulo de Young de 4100 MPa y un coeficiente de Poisson de 0,3. Por su parte, los perfiles longitudinales y el perfil principal transversal estarán fabricados en el mismo acero con el que se fabrique el chasis. De acuerdo a las indicaciones propuestas en APROSYS el resto de perfiles del “Nose Cone” se fabrican en aluminio, ya que tiene gran capacidad de absorción de energía y su baja densidad en comparación con el acero permite mantener el peso dentro de unos límites razonables. Se puede encontrar el diseño detallado realizado en el proyecto APROSYS en el ANEXO V.

Dada la estructura y la tipología de materiales empleados en el “Nose Cone” se puede considerar esta propuesta una manera efectiva de incrementar la protección de los ocupantes en impactos de baja velocidad, así como una posible solución a los atropellos de usuarios vulnerables.

5.4.2 Rediseño de la parte delantera del chasis

Como se ha comentado en el apartado 4.2 los vehículos pertenecientes a la clase N1 suelen contar con un bastidor compuesto por dos largueros longitudinales, como el de Figura 34, con cuya deformación se absorbe la mayor parte de la energía de impacto. Esta misma configuración se montaba en turismos años atrás por ser muy sencilla y poco costosa. Sin embargo, las exigencias en materia de seguridad dieron lugar a chasis más complejos entre los que destaca el más extendido en la actualidad, el chasis auto-portante. En este modelo la carrocería no se apoya sobre el chasis sino que forma parte de éste.



Figura 34. Bastidor y chasis de una furgoneta Ford Transit

La propuesta que se realiza a continuación consiste en transformar el chasis habitual de dos largueros, montado en vehículos de la clase N1, en un modelo más parecido al que se puede encontrar en turismos. No se trataría de una conversión completa en un chasis auto-portante sino solamente de la modificación de la zona delantera para añadir elementos que absorban energía de manera adecuada. Por ello, se señalan dos potenciales cambios a realizar en sobre el bastidor que podrían mejorar la seguridad pasiva.

- Chasis con elementos longitudinales superiores

De acuerdo a los porcentajes de absorción de energía presentados en la Figura 31, el panel frontal superior junto a los perfiles longitudinales superiores absorben en torno al 30% de energía. En una estructura de bastidor y carrocería apoyada sobre éste esos elementos son inexistentes, por lo que únicamente la chapa de la carrocería absorbe parte de la energía por deformación.

La creación de una segunda altura, que posea un par de perfiles longitudinales laterales o “escopetas” puede ser de gran beneficio para la seguridad. En la Figura 35 se pueden apreciar dos modelos de chasis para turismos que poseen esta altura superior. La idea sería reproducir una configuración similar en un chasis destinado a vehículos de la clase N1.

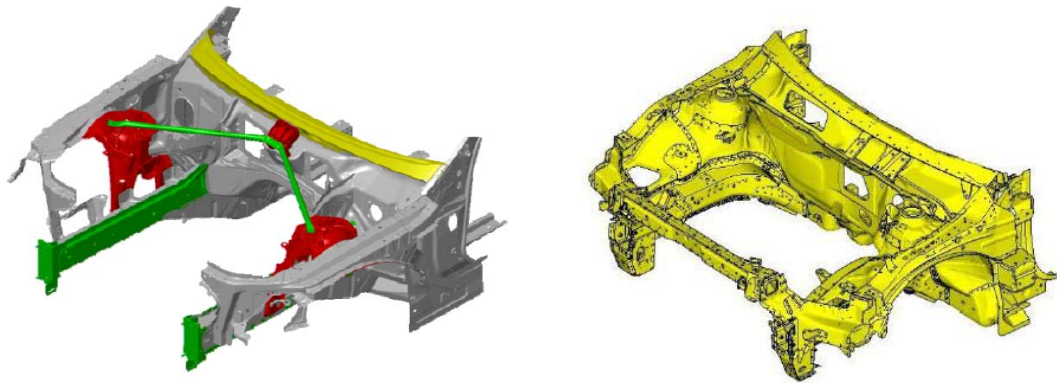


Figura 35. Ejemplos de la estructura frontal de dos turismos (12)

- Chasis con tres perfiles longitudinales inferiores

Otra posibilidad derivada del traslado del motor a las ruedas consiste en aprovechar el espacio antes ocupado por éste mediante la adición de un tercer perfil longitudinal. Si se observa la Figura 35, existe un hueco central entre los dos perfiles verdes, que puede ser cubierto por un nuevo elemento central deformable.

Esta solución con tres perfiles inferiores permitiría mejorar la respuesta en accidentes con solapamiento distinto del 100 %. Cuando dos vehículos chocan de manera perfectamente frontal la zona delantera del vehículo trabaja de la manera esperada con la deformación controlada de los elementos longitudinales. Sin embargo, en caso de colisiones con solapamiento, si solo uno de los elementos longitudinales es alcanzado, la rigidez total es menor y se sobrepasará la distancia de deformación prevista. Con la propuesta realizada, es más difícil que esto ocurra ya que al menos dos de los tres elementos serán deformados, salvo que el solapamiento sea muy pequeño.

En la Figura 36 se muestra un sencillo diseño realizado en Solidworks que reúne las dos propuestas realizadas. No se trata de un intento por realizar un diseño definitivo, sino de que el lector pueda tener una idea más clara de los cambios redactados.

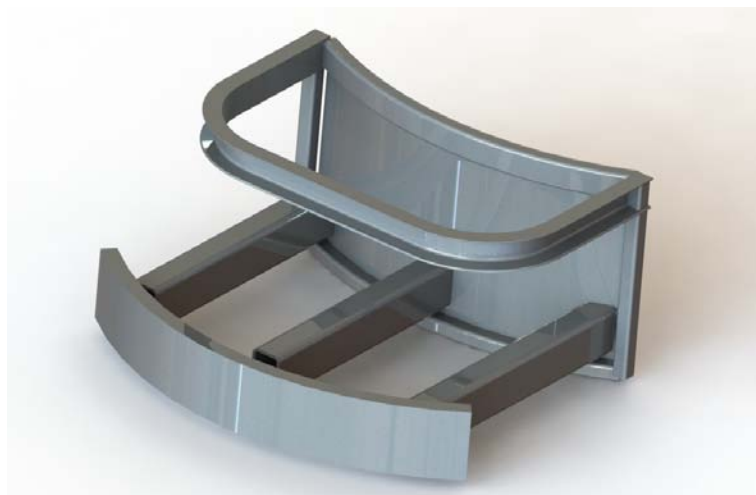


Figura 36. Esquema básico del frontal sugerido

6 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

6.1 Conclusiones

En líneas generales se puede concluir que un vehículo eléctrico equipado con motores rueda, como el propuesto en este trabajo, supone una alternativa válida a los actuales vehículos de combustión. Posee ventajas en común con los modelos eléctricos que ya se venden actualmente, a las que suma una mayor simplicidad mecánica y la posibilidad de distribuir los componentes con mayor libertad. De la misma manera que éstos la autonomía alcanzable con supone el mayor punto débil para unos conductores no habituados a recargas tan frecuentes. Dejando al margen cualquier consideración acerca de costes de diseño o de compra para el usuario final, que no se han tratado en este proyecto, el vehículo estudiado puede requerir nuevos esfuerzos de diseño, pero no posee mayores desventajas respecto a los vehículos actuales.

De la comparativa de prestaciones entre el vehículo equipado con motores rueda y su equivalente convencional, que se realizó en el apartado 2, se pueden extraer las siguientes conclusiones. **Los motores seleccionados, que fabrica la empresa Protean Electric, resultan adecuados para propulsar un vehículo con las especificaciones escogidas**, ya que el rendimiento es similar al alcanzable por el modelo diésel. La autonomía aparece como aspecto negativo, aunque es un problema común a cualquier vehículo eléctrico y no deriva del hecho de instalar motores rueda. Este problema es debido a la tecnología de baterías existente actualmente, que no alcanza los valores de densidad energética de los combustibles fósiles. En el lado contrario se encuentra el consumo, que se ve reducido en torno a la cuarta parte del que se obtendría en un vehículo convencional debido a la alta eficiencia del sistema de tracción. Consecuencia de ello, es el bajo coste obtenido para recorrer 100 km, reducido a la tercera parte o a la mitad en el peor de los casos.

En el análisis realizado para comprobar los efectos que tiene la adición de masa en las ruedas se ha podido ver que **existe una penalización sobre el comportamiento dinámico del vehículo**, dado principalmente por el incremento de la inercia de las ruedas. Este hecho se pone de manifiesto al simular la conducción del vehículo sobre una carretera bacheada. Sin embargo, no se ha observado que el emplazamiento de los motores en las ruedas tenga gran influencia en el movimiento de la carrocería y, por ende, en el confort de los ocupantes.

Las soluciones estructurales que se proponen en el apartado 4 sugieren posibles líneas a seguir en el diseño de un chasis para el vehículo con motores rueda. Aprovechando la característica distribución de componentes se ha modificado la parte frontal del chasis para añadir elementos que mejoren la seguridad pasiva. Dado que los vehículos de la clase N1 suelen montar la carrocería sobre bastidores de dos largueros longitudinales, este ha sido el punto de partida. **El espacio delantero entre los largueros longitudinales se despeja de elementos del tren de potencia para dar cabida a nuevos perfiles que absorban energía.**

Las ideas aportadas deberían ser beneficiosas en el caso de colisiones a baja velocidad, colisiones frontales con solapamiento distinto al 100% y en casos de atropellos a peatones. Resultaría necesario el diseño y construcción de un chasis que equipase en conjunto todas las soluciones propuestas para cuantificar la mejora que se puede obtener en cuanto a protección de ocupantes.

6.2 Líneas futuras

El principal objetivo a lograr para el futuro sería la implicación de las grandes empresas automovilísticas en el desarrollo de esta tecnología. Se ha demostrado con un ejemplo real que puede ser válida para equipar un vehículo y, además, puede tener beneficios en materia de seguridad. En todo caso, para concretar, entre las posibles líneas a investigar en un futuro se pueden destacar las siguientes:

- Inclusión desde la fase inicial de desarrollo el concepto de los motores rueda, de manera que el diseño del vehículo gire en torno a ellos. Los vehículos equipados hasta ahora con esta tecnología son, en su mayoría, conversiones realizadas por proveedores de estos motores sobre vehículos existentes.
- Estudio del tamaño óptimo para la batería, de acuerdo a las prestaciones buscadas y a factores limitantes como coste y peso.
- Optimización del sistema de suspensión con el objetivo de limitar en la mayor medida posible el efecto del aumento de la masa no suspendida en el comportamiento dinámico del vehículo.
- Realización de un diseño concreto de chasis que aúne las propuestas presentadas en el apartado 4. Para ello, será necesaria la determinación de la rigidez a alcanzar en el mismo, lo que dará lugar a la selección de materiales y a la adecuación de las dimensiones
- Simulación del comportamiento del chasis ante colisiones de distintas tipologías mediante programas de elementos finitos como por ejemplo LS-DYNA o MADYMO para validar los resultados esperados.
- Adaptación del trabajo realizado en este proyecto para un vehículo de la clase N1 a modelos con especificaciones diferentes, especialmente a turismos, ya que son los más abundantes en las carreteras.

7 BIBLIOGRAFÍA

1. **Larminie, James y Lowry, John.** *Electric Vehicle Technology Explained.* : John Wiley & Sons, Ltd, 2003.
2. **Rix, Arnold.** *Design, Comparison and Experimental Evaluation of Non-Overlap Winding Radial Flux Permanent Magnet Hub Drives for Electric Vehicles.* Stellenbosch, 2011.
3. **Ehsani, Mehrdad, Gao, Yimin y Emadi, Ali.** *Modern Electric, Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles: Fundamentals, Theory and Design.* : CRC Press.
4. **Anderson, Martyn y Harty, Damian.** *Unsprung Mass with In-Wheel Motors - Myths and Realities.* , 2010.
5. **Romero Perez, Sergio.** *Analysis of a Light Permanent Magnet In-wheel Motor for an Electric Vehicle with Autonomous Corner Modules.* Estocolmo, 2011.
6. **Van Schalkwyk, D.J. y Kamper, M.J.** *Effect of Hub Motor Mass on Stability and Comfort of Electric Vehicles.*
7. **Vallance, Andrew.** *Advanced In-wheel Electric Propulsion Technology.* [Presentación] : Protean Electric, Abril 2011.
8. **Battery, Charging System.** Nissan Leaf Wiki. [En línea] 25 de Septiembre de 2011.
http://nissanleafwiki.com/index.php?title=Battery,_Charging_System.
9. **Protean, Electric.** Protean Electric Company Site. [En línea] 2012.
<http://www.proteanelectric.com/>.
10. **Davidsson, Johan.** *Vehicle Safety & Crashworthiness.* [Presentación] Goteborg, Octubre 2011.
11. **Witteaman, Willibrordus J.** *Improved Vehicle Crashworthiness Design by Control of the Energy Absorption for Different Collision Situations.* Eindhoven, 1999. ISBN 90-386-0880-2.
12. **Baselga Ariño, Santiago y Maza Frechín, Mario.** *Principios Básicos para Cálculo de las Prestaciones del Automóvil.* Zaragoza : Copy Center, 2000. ISBN 84-931279-8-1.
13. **Guzzella, L. y Amstutz, A.** *The QSS Toolbox Manual.* Junio de 2005.
14. **Guzzella, Lino y Sciarretta, Antonio.** *Vehicle Propulsion Systems.* Zürich : Springer, 2005. ISBN 978-3-540-74691-1.
15. **Maza Frechín, Mario, Baselga Ariño, Santiago y Ortiz Sanchez-Lafuente, Jesús.** *Problemas de Diseño de Vehículos.* 2004.
16. **Maza Frechín, Mario y Baselga Ariño, Santiago.** *Simulación del Comportamiento Dinámico Vertical de Vehículos.* Zaragoza : Copy Center, 2001. ISBN 84-95475-22-7.

17. **Rodríguez Galbarro, Hermenegildo.** *Clasificación de Categorías y Tipos de Vehículos.* : ARATEC Ingeniería.
18. **Urban, Peter.** *Fundamentals of the Structural Design of Motor Vehicles.* [Presentación] Göteborg, Septiembre 2011.
19. —. *Applied Structural Design of Motor Vehicles.* [Presentación] Göteborg, Septiembre 2011.
20. **Chevrolet Volt, Battery.** Chevrolet Volt Media Portal. [En línea]
http://media.gm.com/content/dam/Media/microsites/product/volt/docs/battery_101.pdf.
21. **Berdichevsky, Gene, y otros.** *The Tesla Roadster Battery System.* [Documento] : Tesla Motors, Diciembre 2007.
22. **Bovenkerk, J. y Fassbender, S.** *Strategies for Enhanced Pedestrian and Cyclist Friendly Design.* : APROSYS SP2, 2006.
23. **Fassbender, S. y Gugler, J.** *Demonstrator module for new design concepts.* : APROSYS SP2, 2008.
24. **Feist, F. y Fassbender, S.** *System Description of the Experimental Safety Module.* : APROSYS SP2, 2008.
25. —. *Demonstration of Truck Front Design Improvements for Vulnerable Road Users.* : APROSYS SP2, 2008.