



MÁSTER EN INGENIERÍA DE AUTOMOCIÓN

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FIN DE MÁSTER

COMPARATIVA DEL RENAULT TWIZY CON DIFERENTES TRENES DE POTENCIA

Autor: D. Álvaro Sebastián Torres Macció

Tutor: Dr. Andrés Melgar Bachiller

Valladolid, febrero de 2018

Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España





Escuela Ingenierías Industriales

Depto. Ing^a Energética y Fluidomecánica

Paseo del Cauce 59

47011 Valladolid
(España)



Fundación Cidaut

Parque Tecnológico de Boecillo, 209

47151 Boecillo (Valladolid)

España



COMPARATIVA DEL RENAULT TWIZY CON DIFERENTES TRENES DE POTENCIA

RESUMEN BREVE

Palabras clave: Twizy, vehículo, gasolina, eléctrico, híbrido.

El presente trabajo realiza el **estudio y análisis del vehículo urbano Renault Twizy con el fin de comparar la configuración original eléctrica versus una configuración convencional a gasolina y otra híbrida**. El trabajo incluye comparativa de velocidades, aceleraciones, consumos, emisiones, autonomías y costes para cada versión. El cálculo comparativo de las configuraciones del Twizy **se realiza mediante el software de simulación llamado AVL CRUISE™** en conjunto con las ecuaciones de dinámica vehicular y las características técnicas de cada configuración.

También se realiza estudio y análisis **comparativo de los consumos, emisiones de CO₂ y autonomías de las tres configuraciones del Twizy contra otras opciones de vehículos urbanos disponibles actualmente en España**. La comparativa con otras versiones del mercado se realiza empleando los balances energéticos en cada vehículo de acuerdo al nuevo ciclo de homologación WLTC Clase 2.

COMPARATIVE OF RENAULT TWIZY WITH DIFFERENT POWER TRAINS

SHORT ABSTRACT

Keywords: Twizy, vehicle, gasoline, electric, hybrid.

The present work realizes the **study and analysis of the urban vehicle Renault Twizy with the purpose of comparing the original electrical configuration versus a conventional to gasoline and another**. The work includes a comparison of speeds, accelerations, consumption, emissions, autonomies and costs for each version. The comparative calculation of the configurations of the Twizy **is done by the simulation software called AVL CRUISE™** in conjunction with the vehicular dynamics equations and the technical characteristics of each configuration.

Also, a study and **comparative analysis of the consumptions, CO₂ emissions and autonomies of the three Twizy configurations against other urban vehicle options currently available in Spain is carried out**. The comparison with other versions of the market is made using the energy balances in each vehicle according to the new homologation cycle WLTC Class 2.

COMPARATIVA DEL RENAULT TWIZY CON DIFERENTES TRENES DE POTENCIA

RESUMEN EJECUTIVO

Las administraciones de las ciudades tienen la responsabilidad de establecer las ordenanzas para sus ciudadanos de forma tal que permitan la convivencia en armonía y permita el acceso a servicios con los más altos estándares de calidad. A una de las categorías que más protagonismo y recursos se les viene asignando, es la gestión de la movilidad urbana, la cual resulta en una tarea compleja con planes de corto, mediano y largo plazo que buscan desarrollar lo que se conoce como “**Movilidad Urbana Sostenible**”.

Estas políticas sumadas a los alarmantes indicadores de calentamiento global causados entre otras cosas por las altas emisiones generadas por los vehículos, generan una concienciación en la población que ha potenciado la **investigación y desarrollo de nuevas tecnologías en el transporte**, las cuales hasta hace unos años eran una quimera.

Una de las tecnologías que ha tomado mayor impulso en el transporte es la promoción del **vehículo eléctrico**. Cada día se tienen noticias que hablan de nuevos avances en baterías o fabricantes que invierten grandes sumas de dinero en su desarrollo. Uno de los vehículos precursores en esta tecnología es el **Renault Twizy, un citycar que en 2012 fue el vehículo eléctrico más vendido de Europa**.

El presente trabajo se motiva en aprovechar las características particulares que presenta este vehículo para su uso en la ciudad. **De pequeño tamaño lo cual lo hace fácil para aparcar y movilizarse por la ciudad y, bajo peso arrastrado que beneficia el consumo de energía**. Es una alternativa que prácticamente no se observa en ningún fabricante importante en Europa ni en una configuración eléctrica ni térmica.

El objetivo de este trabajo es analizar las distintas prestaciones, consumos, emisiones y costes que presenta el Renault Twizy eléctrico con su configuración original versus dos alternativas del mismo vehículo pero con un tren de potencia convencional con motor térmico a gasolina y, otra híbrida no enchufable de base térmica a gasolina. Estas configuraciones alternativas se benefician de una reducción de peso adicional al disminuir la importante masa que representa la batería del Twizy y, de brindar **opciones de base térmica a gasolina que independizan al usuario de las complicadas recargas eléctricas cuando no se posee la infraestructura adecuada para la conexión en el domicilio particular**.

Adicionalmente al objetivo anterior, se realiza un análisis de consumos, emisiones y autonomías de las tres configuraciones del Renault Twizy contra alternativas de citycars eléctricas y convencionales que se tiene actualmente a la venta en España.

Se plantean los balances energéticos en un vehículo, que incluyen los cálculos de dinámica vehicular y los necesarios para someter cada vehículo al **ciclo WLTC Clase 2**, indicado para vehículos pequeños de baja potencia destinados al uso en la ciudad.

Por medio de los resultados anteriores y las características técnicas de cada configuración del Twizy, eléctrica, convencional e híbrida, se plantean las comparaciones con apoyo en el software de simulación AVL CRUISE™. A modo de ejemplo, en esta sección se plantean los pasos para la

simulación de la versión eléctrica, siendo análogos los cálculos para las configuraciones convencional e híbrida, los cuales se desarrollan en el Anexo 10.3. Se extraen los resultados y se realiza un análisis de los mismos. Se destaca los **beneficios de la configuración eléctrica en cuanto a aceleración, consumos y bajas emisiones pese a ser un vehículo de mayor peso debido a la batería**. La Tabla 1 muestra un resumen de estas características para las tres versiones.

Tabla 1. Resumen comparativo de las tres configuraciones del Twizy evaluadas mediante AVL CRUISE™.

Prestación	Eléctrico	Convencional	Híbrido
Aceleración 0 a 50 km/h (s)	7,8	13,4	15,3
Consumo (kWh/100km - l/100km) ¹	8,6	2,7	1,9
Emisiones CO ₂ , wtw ²	26	74	53

El siguiente capítulo **se realiza un estudio de costes** para las tres configuraciones en distintos escenarios de años de uso y kilómetros rodados, donde se incluyen los costes de adquisición de los vehículos, su valor residual, costes de mantenimiento y costes de energéticos (electricidad o gasolina). **La Fig. 29 (página 48) recoge las ventajas económicas que presenta la versión híbrida y convencional frente a la eléctrica**, en los distintos escenarios.

Finalmente se **estudian los consumos, emisiones de CO₂ (tanto WtW como TtW) y autonomías** que presentan las configuraciones del Twizy frente a otras alternativas de vehículos urbanos a la venta actualmente en España. Se observan **claras ventajas** que presentan las tres configuraciones **del Twizy frente a sus homólogas versiones eléctricas o convencionales** de otros fabricantes. Esto se debe fundamentalmente al reducido peso del vehículo frente a los de la competencia que evita las masas arrastradas en beneficio de optimizar el consumo de energéticos, lo cual convierte a cada configuración del Twizy en una opción altamente atractiva para diversos tipos de consumidores, tanto los que buscan opciones eléctricas como los que prefieren mecánicas convencionales.

Al final del trabajo **se anexa figuras y tablas con las características técnicas de los vehículos comparados**, los **catálogos** del fabricante Renault del modelo **Renault Twizy** y, los **procedimientos de simulación para las configuraciones convencional e híbrida en AVL CRUISE™**.

¹ Kilovatios hora a los 100 kilómetros corresponde a la configuración eléctrica; litros a los 100 kilómetros corresponde a las configuraciones convencional e híbrida.

² Según mix español Enero – Octubre de 2017, se generaron 279 gCO₂/kWh producido (promedio en bornes de las centrales). Incluye 92% correspondiente al rendimiento del transporte y distribución de energía eléctrica (Red Eléctrica de España, 2017).

COMPARATIVE OF RENAULT TWIZY WITH DIFFERENT POWER TRAINS

EXECUTIVE ABSTRACT

City administrations have the responsibility of establishing ordinances for their citizens in a way that allows harmonious coexistence and allows access to services with the highest quality standards. One of the categories that have been assigned the most prominence and resources is the management of urban mobility, which results in a complex task with short, medium and long-term plans that seek to develop what is known as "**Sustainable Urban Mobility**".

These policies added to the alarming indicators of global warming caused among other things by the high emissions generated by the vehicles, generate an awareness in the population that has promoted the **research and development of new technologies in transport**, which until a few years ago were a chimera.

One of the technologies that have taken most momentum in transportation is the promotion of the **electric vehicle**. Every day there is news that talks about new advances in batteries or manufacturers that invest large sums of money in their development. One of the precursor vehicles in this technology is the **Renault Twizy, a citycar that in 2012 was the best-selling electric vehicle in Europe**.

The present work is motivated in taking advantage of the particular characteristics that this vehicle presents for its use in the city. **Of small size which makes it easy to park and move around the city and, under dragged weight that benefits the energy consumption**. It is an alternative that is practically not observed in any major manufacturer in Europe or in an electrical or thermal configuration.

The objective of this work is to analyze the different features, consumption, emissions and costs presented by the Renault Twizy electric with its original configuration versus two alternatives of the same vehicle but with a conventional power train with a petrol thermal engine and another hybrid non-pluggable petrol thermal base. These alternative configurations benefit from an additional weight reduction by decreasing the significant mass represented by the Twizy's battery and by **providing gasoline thermal base options that make the user independent of the complicated electrical recharges when the adequate infrastructure is not available connection in the private home**.

In addition to the previous objective, an analysis is made of consumption, emissions and autonomies of the three configurations of the Renault Twizy against alternative electric and conventional citycars that are currently on sale in Spain.

The energy balances in a vehicle are included, which include the vehicle dynamics calculations and those necessary to subject each vehicle to the **WLTC Cycle 2 Class**, indicated for small low-power vehicles destined for use in the city.

By means of the previous results and the technical characteristics of each configuration of the Twizy, electric, conventional and hybrid, the comparisons are proposed with support in the simulation software AVL CRUISE™. As an example, in this section the steps for the simulation of the electrical version are presented, being analogous the calculations for the conventional and hybrid configurations, which are developed in Annex 10.3. The results are extracted and an analysis of them is made. **It highlights the benefits of the electrical configuration in terms of acceleration, consumption and low emissions despite being a vehicle of greater weight due to the battery**. Table 2 shows a summary of these characteristics for the three versions.

Table 2. Comparative summary of the three Twizy configurations evaluated by AVL CRUISE™.

Capability	Electric	Conventional	Hybrid
Acceleration 0 to 50 km/h (s)	7,8	13,4	15,3
Consumption (kWh/100km - l/100km) ³	8,6	2,7	1,9
Emissions CO ₂ , <i>WtW</i> ⁴	26	74	53

The following chapter is a **cost study** for the three configurations in different scenarios of years of use and kilometers rolled, which include the costs of acquisition of vehicles, their residual value, maintenance costs and energy costs (electricity or gasoline). **Fig. 29 (page 48) shows the economic advantages of the hybrid and conventional version compared to the electric one**, in the different scenarios.

Finally, **the consumption, CO₂ emissions (both *WtW* and *TtW*) and autonomies presented by Twizy configurations are compared with other alternatives for urban vehicles currently on sale in Spain. There are clear advantages that have the three configurations of the Twizy compared to their counterpart's electric or conventional versions of other manufacturers.** This is mainly due to the reduced weight of the vehicle compared to those of the competition that avoids dragging masses in order to optimize the consumption of energy, which makes each Twizy configuration a highly attractive option for different types of consumers, both those looking for electric options and those who prefer conventional mechanics.

At the end of the work, **figures and tables are annexed with the technical characteristics of the vehicles compared, the catalogs of the manufacturer Renault of the Renault Twizy model and, the simulation procedures for the conventional and hybrid configurations in AVL CRUISE™.**

³ Kilowatt hour to 100 kilometers corresponds to the electrical configuration; liters to 100 kilometers corresponds to conventional and hybrid configurations.

⁴ According to the Spanish mix January - October 2017, 279 gCO₂ / kWh produced (average in terminals of the plants) were generated. Includes 92% corresponding to the performance of transportation and distribution of electric power (Red Eléctrica de España, 2017).

AGRADECIMIENTOS

Agradecer a mi familia, el haberme ayudado y apoyado durante cada día a lo largo de mi vida. Sin ellos no podría haber llegado hasta aquí. En especial a mi esposa Claudia quien ha estado a mi lado apoyándome durante los últimos diez años y ha sacrificado mucho de su tiempo para que pueda concretar mis estudios.

Amigos, compañeros, profesores y demás personas influyentes en mi vida y que me han enseñado todo lo que ahora sé.

También agradecer a mi tutor Andrés Melgar y al coordinador del máster Francisco Tinaut Fluixá, que me han ayudado con sus conocimientos, consejos y aportaciones en la construcción de este trabajo final de máster.

ÍNDICE

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Antecedentes y justificación del TFM	1
1.1.1	Alternativa del vehículo eléctrico	2
1.2	Fundamentos del Trabajo Final de Máster	5
1.3	Objetivos	6
1.4	Alcance y desarrollo del TFM	6
2	ESTADO DEL ARTE	9
2.1	Renault Twizy	9
2.2	Inserción en el mercado	10
2.3	Tren de potencia eléctrico	11
2.3.1	Batería	11
2.3.2	Cargador	12
2.3.3	Convertidor	12
2.3.4	Motor eléctrico	12
2.3.5	Reductor	13
3	BALANCES ENERGÉTICOS EN UN VEHÍCULO	15
3.1	Dinámica vehicular	15
3.1.1	Resistencia a la rodadura	16
3.1.2	Resistencia aerodinámica	16
3.1.3	Resistencia a las pendientes	18
3.1.4	Fuerza en rueda	18
3.2	Potencia y energía	19
3.2.1	Potencia en motor y energético (combustible / electricidad)	19
3.2.2	Energía por unidad de longitud recorrida	20
3.2.3	Energía primaria y emisiones de CO ₂	21
3.3	Ciclo de conducción WLTC	22
3.3.1	Distribución de aceleraciones	23
3.3.2	Cálculo para un ciclo WLTC Ciclo Clase 2, con regeneración	23
3.3.3	Consumo en el ciclo WLTC Ciclo Clase 2	24
4	MODELADO Y SIMULACIÓN EN AVL CRUISE	27
4.1	Modelado	27
4.2	Simulación en AVL CRUISE™	28
4.3	Componentes y sistemas modelados para el Twizy eléctrico	28
5	RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS	35
5.1	Aceleración Máxima	36
5.1.1	Potencia	36

5.1.2	Velocidad	38
5.2	Ciclo WLTC Clase 2	40
5.2.1	Modelación del ciclo en AVL CRUISE™	40
5.2.2	Consumos	41
5.2.3	Emisiones	42
6	ESTUDIOS DE COSTES	45
6.1	Costes de adquisición de los vehículos	45
6.2	Valor residual de los vehículos	46
6.3	Coste de mantenimiento	47
6.4	Coste de energéticos	47
6.5	Comparativo de costes	47
7	CONSUMOS, EMISIONES DE CO ₂ Y AUTONOMÍAS	51
7.1	Consumos urbanos según ciclo WLTC Clase 2	51
7.2	Emisiones urbanas según ciclo WLTC Clase 2	51
7.3	Autonomía	54
8	CONCLUSIONES	57
8.1	Conclusiones	57
8.2	Principales aportaciones del autor del TFM	58
8.3	Sugerencias para trabajos futuros	58
9	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	61
10	ANEXOS	63
10.1	Cotización Renault Twizy	63
10.2	Datos de vehículos	65
10.3	Modelado en AVL CRUISE de las configuraciones convencional e híbrida	67
10.3.1	Vehículo convencional	67
10.3.2	Vehículo híbrido	75

ÍNDICE DE FIGURAS

FIG. 1. TASAS DE OCUPACIÓN POR VEHÍCULO Y POR PAÍS (TRENDS., 2010).	1
FIG. 2. TÍPICO ESCENARIO DE CONGESTIÓN DE VÍA URBANA DURANTE EL AMANECER DE UN DÍA DE SEMANA. 2	
FIG. 3. EVOLUCIÓN Y ESCENARIO FUTURO DE VENTA DE VEHÍCULOS LIGEROS POR TIPO DE TECNOLOGÍA (FULTON, 2010).....	5
FIG. 4. RENAULT TWIZY (GROUP RENAULT, 2017).....	6
FIG. 5. CHASIS TUBULAR DE PERFIL CUADRANGULAR DEL RENAULT TWIZY.....	10
FIG. 6. HISTÓRICO DE VENTAS POR AÑO DEL RENAULT TWIZY EN EL MUNDO (GROUPE RENAULT, 2017).....	10
FIG. 7. UBICACIÓN FÍSICA DE LOS COMPONENTES DEL TREN DE POTENCIA DEL RENAULT TWIZY.....	11
FIG. 8. BATERÍA RENAULT TWIZY, DENOMINACIÓN INTERNA BT3.....	12
FIG. 9. MOTOR ELÉCTRICO, CONVERTIDOR Y REDUCTOR DEL RENAULT TWIZY.	12
FIG. 10. MOTOR RENAULT TWIZY.....	13
FIG. 11. CURVA DE PAR Y POTENCIA DEL RENAULT TWIZY 80.....	13
FIG. 12. REDUCTOR DEL RENAULT TWIZY (COMEC SPA, 2018).....	14
FIG. 13. FUERZAS APLICADAS EN UN VEHÍCULO.....	15
FIG. 14. VELOCIDAD Y ACELERACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO PARA EL CICLO WLTC CLASE 2.	23
FIG. 15. COMPONENTES DEL MODELO DE VEHÍCULO ELÉCTRICO EN AVL CRUISE™.....	29
FIG. 16. COMPONENTES Y CONFIGURACIÓN DEL TWIZY ELÉCTRICO EN AVL CRUISE™.	29
FIG. 17. MAPA DE EFICIENCIA DEL MOTOR ELÉCTRICO EN EL BEV.	33
FIG. 18. FUERZAS DE RESISTENCIA DE RODADURA Y AERODINÁMICA EN LLANO PARA LAS CONFIGURACIONES DEL TWIZY.	35
FIG. 19. POTENCIA Y PAR A PLENA CARGA PARA EL MOTOR ELÉCTRICO DEL BEV.	36
FIG. 20. POTENCIA Y PAR A PLENA CARGA PARA EL MOTOR TÉRMICO DEL ICEV.	37
FIG. 21. POTENCIA Y PAR A PLENA CARGA PARA EL MOTOR ELÉCTRICO DEL HEV.	37
FIG. 22. POTENCIA Y PAR A PLENA CARGA PARA EL MOTOR TÉRMICO DEL HEV.	38
FIG. 23. ACELERACIÓN Y VELOCIDAD MÁXIMA SIN PENDIENTE PARA LAS TRES CONFIGURACIONES DEL TWIZY.	39
FIG. 24. ACELERACIÓN Y VELOCIDAD SIN PENDIENTE PARA LAS TRES CONFIGURACIONES DEL TWIZY AMPLIADO A LOS PRIMEROS 20 SEGUNDOS.	40
FIG. 25. CICLO WLTC CLASE 2 MODELADO EN ALV CRUISE™.....	40
FIG. 26. ACUMULADO DE CONSUMOS DE ENERGÉTICO DURANTE LA SIMULACIÓN DEL CICLO WLTC CLASE 2 EN AVL CRUISE™.....	41
FIG. 27. EMISIONES ACUMULADAS DURANTE EL CICLO WLTC CLASE 2 SIMULADO EN AVL CRUISE™.	42
FIG. 28. EMISIONES POR KILÓMETRO PARA LAS CONFIGURACIONES DEL TWIZY.	43
FIG. 29. COSTE TOTAL DEL RENAULT TWIZY EN LAS VERSIONES BEV CON ALQUILER O ADQUISICIÓN DE BATERÍAS, ICEV Y HEV.....	48
FIG. 30. PORCENTAJE DE AHORRO TOTAL DEL RENAULT TWIZY EN LAS VERSIONES BEV CON ADQUISICIÓN DE BATERÍAS, ICEV Y HEV CON RESPECTO A LA VERSIÓN BEV CON ALQUILER DE BATERÍAS.....	49
FIG. 31. CONSUMOS MEDIOS DE COMBUSTIBLE / ELECTRICIDAD SEGÚN CICLO WLTC CLASE 2.	52
FIG. 32. EMISIONES MEDIAS DE CO ₂ SEGÚN CICLO WLTC CLASE 2.....	53
FIG. 33. AUTONOMÍA SEGÚN CICLO WLTC CLASE 2.....	55
FIG. 34. COTIZACIÓN RENAULT TWIZY LIFE 45 FLEXI, RENTA DE BATERÍA (RENAULT ESPAÑA, 2018A).	63
FIG. 35. COTIZACIÓN RENAULT TWIZY LIFE 80 FLEXI, RENTA DE BATERÍA (RENAULT ESPAÑA, 2018A).	64
FIG. 36. COTIZACIÓN RENAULT TWIZY LIFE 80, COMPRA DE BATERÍA (RENAULT ESPAÑA, 2018A).....	65
FIG. 37. COMPONENTES DEL MODELO DE VEHÍCULO CONVENCIONAL EN AVL CRUISE.	67
FIG. 38. COMPONENTES Y CONFIGURACIÓN DEL TWIZY CONVENCIONAL EN AVL CRUISE.	68
FIG. 39. CONFIGURACIÓN DE PARÁMETROS DEL START – STOP PARA EL TWIZY ICEV.	73
FIG. 40. CONEXIONES EN AVL CRUISE DEL STOP – START EN LA CONFIGURACIÓN ICEV.....	74
FIG. 41. COMPONENTES DEL MODELO DE VEHÍCULO HÍBRIDO EN AVL CRUISE.....	75
FIG. 42. COMPONENTES Y CONFIGURACIÓN DEL TWIZY HÍBRIDO EN AVL CRUISE.	75
FIG. 43. MAPA DE EFICIENCIA DEL MOTOR TÉRMICO EN EL HEV.	80
FIG. 44. MAPA DE EFICIENCIA DEL MOTOR / GENERADOR ELÉCTRICO EN EL HEV.	83

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. RESUMEN COMPARATIVO DE LAS TRES CONFIGURACIONES DEL TWIZY EVALUADAS MEDIANTE AVL CRUISE™.	IV
TABLE 2. COMPARATIVE SUMMARY OF THE THREE TWIZY CONFIGURATIONS EVALUATED BY AVL CRUISE™. .	VI
TABLA 3. COMPARACIÓN DE DIFERENTES CELDAS QUÍMICAS (JOHNSON MATTHEY, 2015).	3
TABLA 4. COMPARATIVA DE PRECIOS DE VEHÍCULOS CUADRICICLOS Y LIGEROS (CONFECCIÓN PROPIA, MERCADO ESPAÑOL A NOVIEMBRE DE 2017 INCLUYE IMPUESTOS Y BONIFICACIONES DEL GOBIERNO)..	4
TABLA 5. TIPOS DE CONFIGURACIONES ESTUDIADAS EN EL RENAULT TWIZY.	7
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS DEL RENAULT TWIZY 80 (GROUP RENAULT, 2017).....	9
TABLA 7. PARÁMETROS DEL CICLO WLTC CLASE 2 (DIESELNET, 2017).	22
TABLA 8. PESOS DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES DE RENAULT TWIZY ESTUDIADAS.	27
TABLA 9. CRITERIOS PARA LA CATEGORÍA L7E-A2 (RENAULT TWIZY).	27
TABLA 10. MODELADO DEL VEHÍCULO EN EL BEV.	30
TABLA 11. MODELADO DE LAS RUEDAS DELANTERAS EN EL BEV.....	30
TABLA 12. MODELADO DE LAS RUEDAS TRASERAS EN EL BEV.	31
TABLA 13. FACTOR DE RESISTENCIA A LA RODADURA PARA RUEDAS DELANTERAS Y TRASERAS EN EL BEV.	31
TABLA 14. MODELADO DE LOS FRENOS EN EL BEV.	32
TABLA 15. MODELADO DEL MOTOR ELÉCTRICO EN EL BEV.....	32
TABLA 16. MODELADO DEL REDUCTOR EN EL BEV.....	33
TABLA 17. MODELADO DE LA BATERÍA EN EL BEV.	34
TABLA 18. POTENCIA Y PAR MÁXIMO DE LOS MOTORES UTILIZADOS EN LAS CONFIGURACIONES DEL TWIZY.	35
TABLA 19. CONSUMOS DE ENERGÉTICOS A LOS 100 KM DE LAS CONFIGURACIONES DEL TWIZY.	41
TABLA 20. PRECIOS AL PÚBLICO DE LAS ALTERNATIVAS DE RENAULT TWIZY.....	46
TABLA 21. DEPRECIACIÓN EN CADA CASO DE ESTUDIO.	46
TABLA 22. VALOR RESIDUAL DE CADA VEHÍCULO PARA CADA CASO DE ESTUDIO.	46
TABLA 23. COSTE DE MANTENIMIENTO DE CADA VEHÍCULO.....	47
TABLA 24. RESUMEN COMPARATIVO DE LAS TRES CONFIGURACIONES DEL TWIZY EVALUADAS MEDIANTE AVL CRUISE™.	58
TABLA 25. INFORMACIÓN TÉCNICA DE LOS VEHÍCULOS UTILIZADOS.	66
TABLA 26. MODELADO DEL VEHÍCULO EN EL ICEV.	69
TABLA 27. MODELADO DE LAS RUEDAS DELANTERAS EN EL ICEV.	69
TABLA 28. MODELADO DE LAS RUEDAS TRASERAS EN EL ICEV.	70
TABLA 29. FACTOR DE RESISTENCIA A LA RODADURA PARA RUEDAS DELANTERAS Y TRASERAS EN EL ICEV.	70
TABLA 30. MODELADO DE LOS FRENOS EN EL ICEV.	71
TABLA 31. MODELADO DEL MOTOR TÉRMICO EN EL ICEV.	72
TABLA 32. MAPA DE EFICIENCIA DEL MOTOR TÉRMICO EN EL ICEV.....	73
TABLA 33. MODELADO DEL VEHÍCULO EN EL HEV.	76
TABLA 34. MODELADO DE LAS RUEDAS DELANTERAS EN EL HEV.....	76
TABLA 35. MODELADO DE LAS RUEDAS TRASERAS EN EL HEV.	77
TABLA 36. FACTOR DE RESISTENCIA A LA RODADURA PARA RUEDAS DELANTERAS Y TRASERAS EN EL HEV.	77
TABLA 37. MODELADO DE LOS FRENOS EN EL HEV.	78
TABLA 38. MODELADO DEL REDUCTOR EN EL HEV.....	78
TABLA 39. MODELADO DEL MOTOR TÉRMICO EN EL HEV.	79
TABLA 40. MODELADO DE LA BATERÍA EN EL HEV.	81
TABLA 42. MODELADO DEL MOTOR / GENERADOR ELÉCTRICO EN EL HEV.....	82

NOMENCLATURA

<u>Símbolos</u>	<u>Descripción</u>	<u>Unidad</u>
€	Euro	
A_f	Área frontal	m^2
AT	Transmisión Automática	
BEV	Battery Electric Vehicle	
BSFC	Brake Specific Fuel Consumption	
CAI	Controlled Auto Ignition	
C_d	Coefficiente de penetración aerodinámico adimensional	
CO	Carbon monoxide	
CO ₂	Carbon dioxide	
C_r	Coefficiente de rodadura adimensional	
CVT	Transmisión Continamente Variable	
DI	Direct Injection	
E	Energía	Wh - J
e_{CO_2}	Emisiones de dióxido de carbono	
EGR	Exhaust Gas Recirculation	
F	Fuerza	N
g	Constante gravitacional universal	m/s^2
GDI	Gasoline Direct Injection	
HC	Hydrocarbon	
HCCI	Homogeneous charge compression ignition	
HDV	Heavy-duty vehicles (vehículos pesados)	
HEV	Hybrid Vehicle Drivetrain	
H_{fuel}	Poder caorífico del combustible	J/kg
ICE	Internal Combustion Engine	
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle	
kt	Kilo toneladas	
L7e-A2	Cuadriciclo pesado para carretera	
LNT	Lean NO _x Trap	
m	Masa del vehículo	kg
MCI	Motor de Combustión Interna	
Mt	Miles de toneladas	
MT	Transmisión Manual	
NEDC	New European Driving Cycle	
NO _x	Óxidos de Nitrógeno	
P	Potencia	W
PLDV	Passenger light-duty vehicles (vehículos livianos de pasajeros)	
PM _{2.5}	Material Particulado $\leq 2.5 \mu m$ en diámetro	
RDE	Real Driving Emissions	
SCCI	Stratied Charge Compression Ignition	

SCR	Selective Catalytic Reduction	
SI	Spark-Ignited	
SO _x	Óxidos de Azufre	
TJI	Turbulent Jet Ignition	
UE	Unión Europea	
v	Velocidad	km/h - m/s
VCT	Variable Cam Timing	
VVA	Variable Valve Actuation	
VVT	Variable Valve Timing	
v _w	Velocidad de la componente del viento	m/s
W	Peso	N
WLTC	Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle	
η	Rendimiento adimensional	
θ	Ángulo (pendiente)	°
μ	Coefficiente de fricción adimensional	
ρ	Densidad	kg/m ³

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Antecedentes y justificación del TFM

El mundo ha requerido y requiere de medios para el transporte de mercancía y/o personas, que resulten económicos, sostenibles y especialmente prácticos para el usuario. La particularidad de las grandes urbes donde los espacios suelen estar acotados y las tendencias políticas de las administraciones se orientan a peatonalizar las calles y retirar los vehículos de la superficie, está posibilitando el desarrollo de medios alternativos de transporte, haciendo especial **hincapié en el transporte público** el cual aún debe optimizar sus servicios a los efectos de satisfacer las necesidades de sus usuarios.

Por otra parte se promueven medios de transporte que emitan mínimas o nulas cantidades de gases contaminantes para mejorar el aire de las ciudades, impulsando tecnología libre de humo como los vehículos eléctricos. Actualmente se cree en este tipo de vehículos como la solución necesaria y definitiva hacia el futuro de las ciudades, junto a otras medidas que básicamente pasan por maximizar el uso **compartido de los medios de transporte**, ya sea mediante transporte público o privado.

Estas ideas se vienen desarrollando con firmeza por parte de los gobiernos pero aún presentan dificultades técnicas y de concienciación de la población. Se debe transitar un proceso de evolución en las personas, donde se conciben cambios mentales que generen la aceptación y adaptación de la población a las nuevas alternativas de transporte.

Se observa que el transporte privado mediante automóviles brinda independencia en el movimiento de sus usuarios, pero también es inmensamente ineficiente cuando los vehículos utilizados poseen capacidades para más de cuatro personas y **son ocupados por menos de dos personas** como se observa en la Fig. 1, la cual indica una tendencia clara a la utilización individualizada del vehículo.

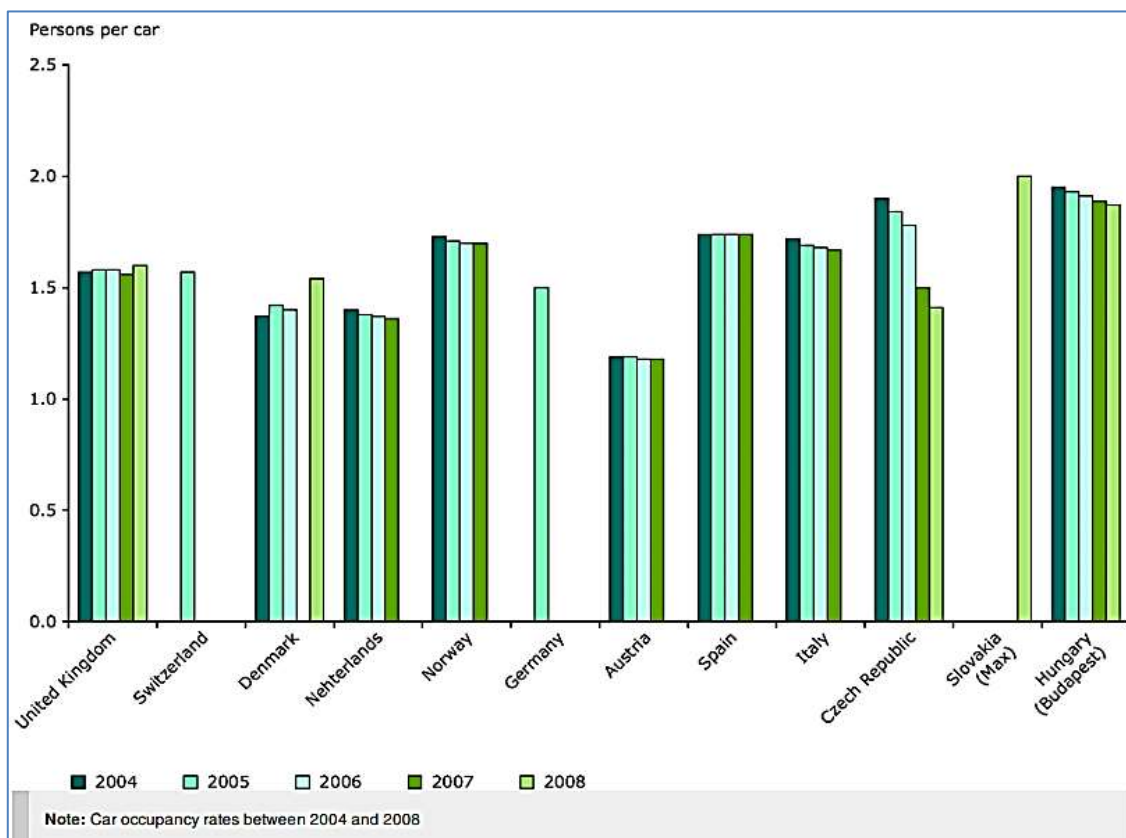


Fig. 1. Tasas de ocupación por vehículo y por país (Trends., 2010).

Es un fenómeno que genera serios inconvenientes especialmente en las grandes ciudades, donde este uso individualizado aumenta la congestión del tráfico, generando una pérdida de calidad de las vías al disminuir las velocidades medias de circulación por las mismas, y por lo tanto un aumento del tiempo medio empleado para el traslado de los usuarios desde un punto a otro, aumentando también las pérdidas de tiempo de los usuarios las cuales generan aumentos en los niveles de estrés y fatiga al volante, ver Fig. 2.



Fig. 2. Típico escenario de congestión de vía urbana durante el amanecer de un día de semana.

La calidad de las vías es fundamental no sólo para la movilidad agradable de los usuarios sino también para proporcionar un movimiento seguro, eficiente y ambientalmente responsable. Las administraciones están realizando importantes esfuerzos por disminuir los altos grados de contaminación del aire que se genera especialmente por los vehículos con motores de combustión interna. Se estima que alrededor de **100.000 muertes al año podrían estar relacionadas con la contaminación ambiental vehicular únicamente en las ciudades de la Región Europea** según la Organización Mundial de la Salud (WHO), y reduce la esperanza de vida en un promedio de un año. El número de víctimas atribuidas a la contaminación atmosférica vehicular es comparable con el número de muertes por accidentes de tránsito, y su huella se observa en todos los grupos de edad, incluidos los niños (WHO, 2005).

1.1.1 Alternativa del vehículo eléctrico

Se presentan dificultades cuando se analiza la utilidad del **vehículo eléctrico** como tal, dificultades desde la tecnología empleada en el mismo, particularmente la densidad de carga de las baterías actualmente utilizadas, hasta los medios de infraestructura necesarios para realizar las recargas eléctricas en diversas situaciones.

Cuando se habla de medios especialmente prácticos para el transporte, se observa que los vehículos eléctricos **presentan:**

- Una **baja densidad de energía de las baterías** actualmente desarrolladas, que incrementan significativamente los pesos de los vehículos. La gasolina ofrece un potencial energético de 11.800

Wh/kg de media con una densidad energética media de 8.800 Wh/L, mientras que una batería de ion-Litio (las de mayor aplicación en los vehículos eléctricos) no supera los 300 Wh/kg y unos 600 Wh/L como se observa en la Tabla 3. Estas densidades energéticas penalizan a los vehículos eléctricos y más aún cuando **se buscan vehículos pequeños con el menor peso posible para las ciudades, que disminuyan la masa arrastrada que únicamente genera pérdidas de energía.**


























Tabla 3. Comparación de diferentes celdas químicas (Johnson Matthey, 2015).

Application	Unit of measurement	Lead acid	NiCd	NiMH	Lithium-ion
Cell Voltage	Volts	2	1.2	1.2	2.4-3.8
Specific Energy	Wh/kg	30-40	35-80	55-110	100-300
Energy Density	Wh/l	50-90	50-70	160-420	125-600+
Power Density	W/kg	100-200	100-150	100-500	500-5000
Maximum Discharge	Rate	6-10C	20C	15C	80C
Useful Capacity	Depth of Discharge %	50	50	50-80	>80
Charge Efficiency	%	60-80	60-80	70-90	>95
Self-Discharge	%/Month	3-4	15-20	15-30	2-3
Temperature Range	°C	-40 to 60	-20 to 70	-20 to 65	-30 to 70
Cycle Life	Number of cycles	200-400	300-1000	500-1000	>2000
Memory Effect		No	Yes	Yes (<NiCd)	No
Micro-Cycle Tolerance		Deteriorates	Deteriorates	Yes	Yes
Robustness (Over/under Voltage)		Yes	Yes	Yes	Needs BMS

Para mitigar el punto anterior en los vehículos pequeños se suelen colocar baterías de alrededor de 15 kWh que suelen superar los 100 kg de peso, lo cual deriva en un aumento del consumo de energía y muy bajas autonomías. Para los usuarios que poseen la infraestructura para realizar recargas semanales de varias horas (incluso diarias) esto no resulta un problema importante, pero a los que tienen acceso limitado a esta infraestructura les resulta una opción poco atractiva.

- Una **tecnología de elevado precio** para su adquisición por la mayor parte de la población actual. La Tabla 4 recoge algunas alternativas de vehículos para la ciudad actualmente a la venta en el mercado español, tanto eléctricos como térmicos, donde se observa que la media de precios de los vehículos eléctricos (incluidas ayudas económicas del gobierno), prácticamente duplica a las alternativas convencionales con motores térmicos, 21,7 k€ versus 12,7 k€ respectivamente.
- Actualmente **no es común tener garajes con cargadores especialmente si se vive en edificios**, por lo cual resulta un serio inconveniente poseer un vehículo eléctrico y muy poco práctico si se tiene que acceder a cargadores públicos ubicados en otros sitios alejados del domicilio particular.
- **Pocas alternativas de vehículos eléctricos para uno o dos ocupantes**, cuando se observan tasas de ocupación promedio en Europa del orden de 1,5 ocupantes por vehículo (Trends., 2010).

Tabla 4. Comparativa de precios de vehículos cuadríciclos y ligeros (confección propia, mercado español a noviembre de 2017 incluye impuestos y bonificaciones del gobierno).

Marca Modelo	Imagen	Categoría	Energético	Plazas (Nº)	PMA (kg)	Largo (m)	Ancho (m)	Alto (m)	Precio (€) imp incluidos
Renault Twizy 80		Cuadríciclo	Electricidad	2	690	2,338	1,094	1,454	14.310
Sukoy L7e		Cuadríciclo	Electricidad	2	736	2,893	1,554	1,512	18.000
Tazzari EM1		Cuadríciclo	Electricidad	2	758	2,880	1,560	1,425	23.800
Tazzari Zero Classic		Cuadríciclo	Electricidad	2	758	2,880	1,560	1,425	22.800
Smart Fortwo Electric Drive		Pequeño	Electricidad	2	1.310	2,695	1,663	1,555	25.500
Aixam Evo COUPÉ GTI 600 D		Cuadríciclo	Diésel	2	760	3,000	1,500	1,540	14.995
Smart Forfour Passion 66 kW		Pequeño	Gasolina	4	1.450	3,495	1,665	1,554	14.215
Fiat 500C 1.2 Mirror		Pequeño	Gasolina	4	1.335	3,571	1,627	1,488	16.270
Renault Twingo Zen TCe 66 kW		Pequeño	Gasolina	4	1.382	3,595	1,646	1,554	12.950
Volkswagen up! 1.0 TSI		Pequeño	Gasolina	4	1.360	3,600	1,645	1,504	12.980
Toyota Aygo 70		Pequeño	Gasolina	4	1.240	3,455	1,615	1,460	10.720
Peugeot 108 1.2 PureTech 82		Pequeño	Gasolina	4	1.240	3,475	1,615	1,460	11.190
Kia Picanto 1.2 CVVT GT Line		Pequeño	Gasolina	4	1.400	3,595	1,595	1,485	12.561
Suzuki Ignis		Pequeño	Gasolina	4	1.330	3,700	1,690	1,595	12.650
Aixam Mega e-City		Cuadríciclo	Electricidad	4	1.055	2,959	1,492	1,540	18.990
Eve M1.1le		Cuadríciclo	Electricidad	4	1.044	3,090	1,420	1,480	12.000
Mahindra e2o Plus		Pequeño	Electricidad	4	1.260	3,590	1,575	1,585	16.000
Citroën E-Mehari		Pequeño	Electricidad	4	1.838	3,809	1,728	1,653	29.879
Smart Forfour Electric Drive		Pequeño	Electricidad	4	1.560	3,495	1,665	1,554	23.970
Citroën C-Zero		Pequeño	Electricidad	4	1.450	3,475	1,475	1,608	24.624
Peugeot iOn		Pequeño	Electricidad	4	1.450	3,475	1,475	1,608	26.450
Mitsubishi i-MiEV		Pequeño	Electricidad	4	1.450	3,475	1,475	1,610	25.000
Volkswagen e-up!		Pequeño	Electricidad	4	1.500	3,540	1,645	1,481	22.550
Hyundai I10 1.0 MPI 49 kW		Pequeño	Gasolina	5	1.420	3,665	1,660	1,500	10.240
Mitsubishi SpaceStar 120 MPI Motion		Pequeño	Gasolina	5	1.340	3,795	1,665	1,505	11.400

1.2 Fundamentos del Trabajo Final de Máster

La investigación de sistemas de propulsión alternativos busca **métodos más sostenibles de transporte** que los basados en combustibles fósiles, desarrollando nuevas formas de generación y utilización de la energía en automoción a los efectos de minimizar los efectos contaminantes globales y locales. Entre estos podemos encontrar **vehículos eléctricos, híbridos y de hidrógeno**, los cuales se incrementarán fuertemente hacia el futuro como se proyecta en la Fig. 3.

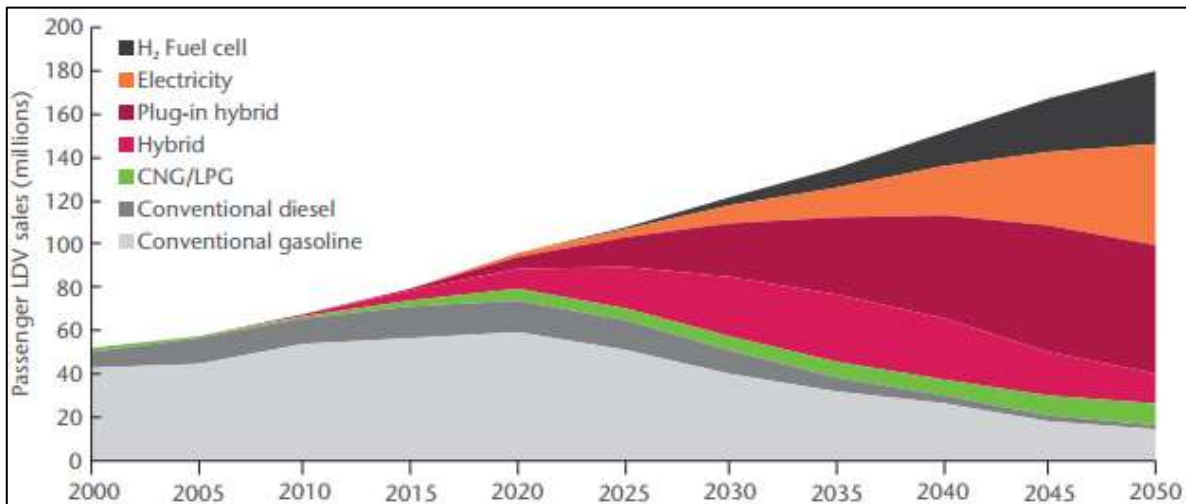


Fig. 3. Evolución y escenario futuro de venta de vehículos ligeros por tipo de tecnología (Fulton, 2010).

La alternativa eléctrica es probablemente la solución a los problemas de contaminación y optimización de la energía que demandan cada vez con mayor ímpetu todas las grandes ciudades. Pero se observa que la tecnología aún debe dar varios pasos hacia adelante con el fin de satisfacer las necesidades de los usuarios a precios competitivos con otras alternativas.

Particularmente, la baja **disponibilidad de cargadores de baterías en cocheras y aparcamientos** de las grandes ciudades (edificios, centros comerciales, parking privados, etc.), presentan dificultades insalvables por los usuarios de vehículos eléctricos que pese a disponer de la voluntad y el dinero para la adquisición de un vehículo eléctrico no pueden acceder al mismo porque no tienen los medios de recarga disponibles.

Si bien los gobiernos vienen realizando importantes esfuerzos políticos y económicos para la introducción de vehículos eléctricos, se cree que **la infraestructura necesaria requerirá de varios años para estar disponible** para todos los habitantes de las ciudades. Mientras tanto se sigue con políticas de restricción del acceso de vehículos a las ciudades cuando los niveles de contaminación superan ciertos límites, ya sea por la prohibición total de circulación de vehículos dentro de determinadas áreas o por medidas menos restrictivas que únicamente permiten el acceso a vehículos de bajas emisiones.

Dado que el cambio hacia otras alternativas energéticas insumirá varios años, **es necesario continuar conviviendo en paralelo con los combustibles fósiles** y, por lo tanto, se continúa investigando en nueva tecnología que optimice los motores de combustión interna, incorporando dispositivos que disminuyan el consumo como la sobrealimentación e inyección directa y otros que disminuyen las emisiones contaminantes como son los sistemas post-tratamiento en las líneas de escape, entre otros.

Es importante contar con alternativas convencionales que satisfagan las necesidades de transporte privado durante el período de evolución hacia el vehículo eléctrico. Es aquí donde resulta importante plantear soluciones a los problemas energéticos actuales **desarrollando tecnologías que nos permitan, no solo un mejor aprovechamiento de la energía, sino también el aprovechamiento de la infraestructura actual.**

Por otra parte, la movilidad en entornos urbanos no requiere de vehículos con grandes autonomías y elevadas velocidades, ni el traslado de varios pasajeros y equipajes de importante volumen y masa.

La situación descrita en los puntos anteriores estimula la realización de este trabajo, **buscando alternativas tecnológicas que se adapte a la demanda de este sector y brinde una mejor respuesta.**

Dado que en el mercado Europeo actual no se cuenta con alternativas de vehículos con motor térmico, que utilicen la gasolina como fuente principal de energía y principalmente que sean de **reducido peso y volumen a los efectos de optimizar los consumos de energía y maximizar la movilidad en la ciudad**, se plantea el uso de un vehículo pequeño (cuadriciclo) actualmente a la venta pero como vehículo eléctrico, el cual puede resultar en una **eficiente alternativa para el usuario a precios contenidos.**

1.3 Objetivos

El objetivo de este trabajo es **comparar el vehículo eléctrico marca Renault, modelo Twizy, ver Fig. 4, contra el mismo vehículo asumiendo que el tren de potencia eléctrico se cambia por las siguientes configuraciones que utilizan gasolina como combustible primario:**

1. Un motor térmico de encendido provocado a gasolina o;
2. Un vehículo híbrido de alto rendimiento.

Para ello se pretende configurar las opciones térmica e híbrida a partir de la base del Twizy eléctrico, realizar un **análisis comparativo de costes, emisiones, autonomías, capacidad de aceleración**, entre otras, intentando extraer resultados útiles para el mercado de usuarios que a día de hoy no ven con seguridad las ventajas y desventajas de la opción eléctrica, convencional o híbrida.

También se quiere **comparar las autonomías, consumos y emisiones de las tres configuraciones del Twizy contra otras opciones de vehículos pequeños disponibles en el mercado español** para el uso en la ciudad, con el fin de establecer si alguna de las configuraciones del Twizy presenta ventajas y por lo tanto es atractiva para los usuarios.



Fig. 4. Renault Twizy (Group Renault, 2017).

1.4 Alcance y desarrollo del TFM

El diseño de un vehículo en sí mismo engloba numerosos pasos de investigación, diseño, pruebas, etc., incluso el diseño de una pequeña parte de un vehículo constituye un campo de estudio en sí mismo que excede el alcance de este trabajo.

Por lo tanto, **se parte de la base del Renault Twizy**, un vehículo cuadríciclo que se vende desde el año 2012 en toda Europa así como en otros mercados donde el fabricante Renault tiene presencia, con el objetivo de **comparar su cadena de potencia eléctrica contra una térmica a gasolina y otra híbrida no enchufable de base térmica también a gasolina**.

El desarrollo del trabajo **incluye el cálculo de potencia y energía, análisis de velocidades, capacidades de aceleración, autonomías y emisiones de gases contaminantes**, donde se consideran las características técnicas del vehículo eléctrico original además de los límites que supone un vehículo de esta categoría, mientras que para las configuraciones térmica e híbrida se estudian y definen trenes de potencia de acuerdo a las últimas tecnologías priorizando el bajo consumo.

Para la **comparación de las configuraciones del Twizy** se realiza una simulación de cada una de ellas mediante una potente herramienta como es el **software AVL CRUISE™** y se analizan los resultados obtenidos.

También se plantean las ecuaciones de dinámica vehicular que rigen el movimiento de un vehículo así como aquellas que emulan la prueba **WLTC Cycle 2 Class**, correspondiente a la nueva normativa Europea para vehículos de baja potencia destinados a la ciudad, para obtener los consumos medios así como autonomías y emisiones de CO₂ de los distintos vehículos del mercado.

Por último **se realiza un análisis económico** donde se visualiza las ventajas y desventajas que suponen para el consumidor la adquisición y utilización de cada tipo de configuración.

A los efectos de brindar una visión clara de las distintas configuraciones, la Tabla 5 refleja los conceptos de Renault Twizy que son objeto de comparación y estudio en este trabajo, entre ellos y contra otras opciones del mercado.

Tabla 5. Tipos de configuraciones estudiadas en el Renault Twizy.

Acrónimo en Inglés	Definición	Propulsado por	Fuente exterior de Energía
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicle – Vehículo con Motor de Combustión Interna	<input checked="" type="checkbox"/> Motor Eléctrico <input checked="" type="checkbox"/> Motor MCI	<input checked="" type="checkbox"/> Combustible <input checked="" type="checkbox"/> Electricidad
HEV	Hybrid Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico Híbrido	<input checked="" type="checkbox"/> Motor Eléctrico <input checked="" type="checkbox"/> Motor MCI	<input checked="" type="checkbox"/> Combustible <input checked="" type="checkbox"/> Electricidad
BEV	Battery Electric Vehicle – Vehículo Eléctrico de Batería	<input checked="" type="checkbox"/> Motor Eléctrico <input checked="" type="checkbox"/> Motor MCI	<input checked="" type="checkbox"/> Combustible <input checked="" type="checkbox"/> Electricidad

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 Renault Twizy


El Renault Twizy ha sido toda una revolución mediática antes y durante su desembarco en el mercado, un modelo eléctrico a medio camino entre la moto y el coche que ofrecía una solución de movilidad principalmente pensado para zonas urbanas, un concepto novedoso que llegaba de la mano de un diseño sencillo y funcional, además de hacerlo con una costosa campaña publicitaria a nivel europeo a su espalda (F.C.Eléctricos, 2013).

Se trata de un vehículo que pertenece a la **categoría L7e-A Quad Pesado para Carretera**, establecido en el Reglamento (UE) N° 168/2013 del Parlamento Europeo y del Consejo de 15 de enero de 2013, relativo a la homologación de los vehículos de dos o tres ruedas y los cuadríciclos, y a la vigilancia del mercado de dichos vehículos (Europeo, Consejo, & Uni, 2013).

Se fabrica en la factoría que el Grupo Renault posee en la ciudad de Valladolid, España, y se ofrece al mercado desde el año 2012 en cuatro versiones, dos biplaza y dos monoplaza ambas con dos potencias diferentes, además de varios opcionales de acabado y equipamiento. Todos comparten el mismo motor y baterías variando únicamente su convertidor y limitador de velocidad.

En este trabajo nos centraremos en la versión denominada **Twizy 80** la cual posee las **características que se resumen en la Tabla 6**. Cuenta con un chasis tubular de perfil cuadrangular, ver Fig. 5, y todos los elementos exteriores son de material compuesto (Cesvimap, 2014).

Tabla 6. Características del Renault Twizy 80⁵ (Group Renault, 2017).

TIPO DE VEHÍCULO		DIRECCIÓN	
Homologación L7e - Cuadríciclo pesado		Tipo	Cremallera Directa - No asistida
N° de Plazas	2	Radio de Giro (m)	3,4
MOTOR		N° de giros del volante	2,8
Potencia Máxima kW CEE (cv)	13 (17) @ 7250 rpm	SUSPENSIÓN	
Par Máximo Nm CEE	57 @ 2100 rpm	Tipo tren delantero y trasero	
Energético	Eléctrico	Pseudo-Mc Pherson - Combinado muelle / amortiguador / eje flexible	
CAJA DE VELOCIDADES		Ø barra est. delantera / trasera (mm)	Delantera y trasera ø=23 mm
Tipo	Automática / Reductor	RUEDAS	
N° de velocidades	1	Delantera	125/80 R13
Relación de desmultiplicación	1 - 9,23	Trasera	145/80 R13
Reversa	Si	FRENOS	
CONSUMOS CICLO URB. ECE-15		Delanteros	Disco ø=214 mm
CO ₂ TtW (g/km)	0	Traseros	Disco ø=204 mm
Autonomía (km)	90	BATERÍA	
Autonomía real (km)	60 a 70	Almacenamiento (kW)	6,1
Wh/km	63	Cátodo	Li+
PRESTACIONES		MASAS	
Velocidad Máxima (km/h)	80	Vacío Orden de Marcha sin batería (kg)	375
50 m salida parada (s)	6,6	Vacío Orden de Marcha con batería (kg)	474
0-45 km/h (s)	6,1	Total MTR (kg)	690
30-60 km/h (s)	8,1		
DIMENSIONES			
Largo x Ancho x Alto (m)	2,338 x 1,094 x 1,454		
S x C _d (m ²)	0,64		

⁵ TtW: *Tank to Wheel* – Emisiones de CO₂ en el uso local del vehículo, desde el tanque a la rueda. No incluye emisiones globales en la producción, transmisión y distribución de la energía eléctrica.



Fig. 5. Chasis tubular de perfil cuadrangular del Renault Twizy.

2.2 Inserción en el mercado

En la presentación al mundo en el año 2009, el Grupo Renault anunciaba que proyectaba vender 20 mil unidades por año de su modelo Twizy desde su lanzamiento en 2012 (EL MUNDO, 2009). Sin embargo las ventas no fueron como lo planificado y tuvieron una tendencia descendiente hasta estabilizarse en el entorno a las **2,5 miles de unidades al año** como lo muestra la Fig. 6, que representa tan solo un 12,5% de las ventas proyectadas.

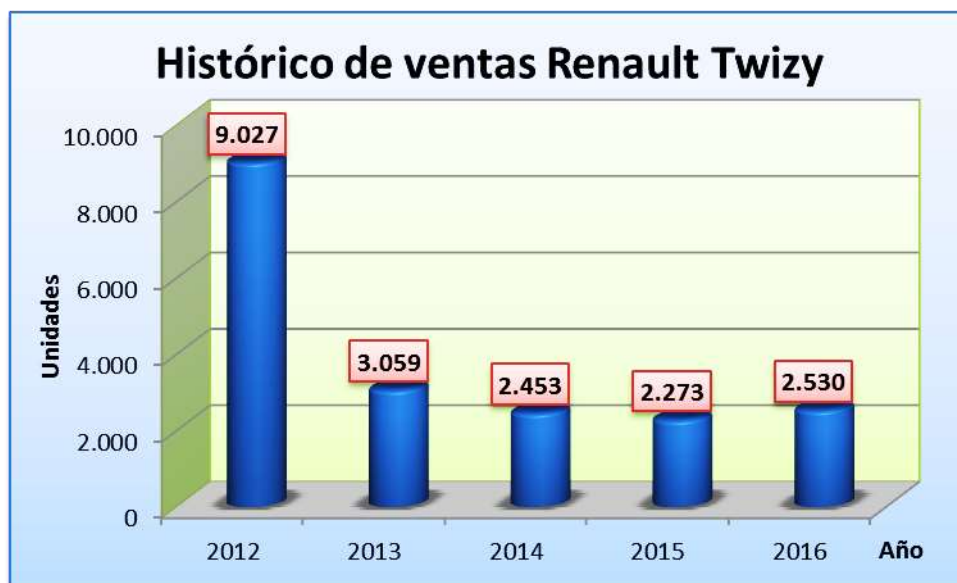


Fig. 6. Histórico de ventas por año del Renault Twizy en el mundo (Groupe Renault, 2017).

El primer año si bien no se alcanzaron las ventas esperadas, igualmente fue un éxito para la compañía ya que el Renault Twizy fue el vehículo eléctrico más vendido en Europa, pero los años siguientes las ventas cayeron bruscamente. Existen diversas teorías sobre las causas del bajo nivel de ventas y mayoritariamente son puramente hipotéticos, pero una de las teorías más fuerte indica que **durante el**

primer año fue fundamental el efecto de novedad donde cientos de usuarios aguardaban ansiosamente su lanzamiento.

Probablemente parte de **las ventas también se vieran afectadas por el precio elevado del vehículo**, que en su opción con batería incluida y ayuda del gobierno supera en precio a opciones de vehículos convencionales con motor térmico con mayor equipamiento y adecuados tanto para la ciudad como para fuera de la misma. El Twizy no ha resultado una opción seductora para sus potenciales usuarios.

También **la ausencia de ciertas comodidades que a día de hoy parecen básicas como un habitáculo cerrado, calefacción y aire acondicionado, no han podido compensar las bondades de este vehículo** para el uso en la ciudad.

Por último y no menos importante, la falta de infraestructura para las recargas eléctricas en los aparcamientos de los grandes edificios de las ciudades suponen un claro obstáculo para el acceso a este tipo de vehículos.

2.3 Tren de potencia eléctrico

El tren de potencia del Renault Twizy está **compuesto básicamente por el cargador, batería, convertidor, motor eléctrico, reductor y ejes de transmisión** como se observa en la Fig. 7. El cargador transforma la corriente de la red en corriente continua, que se almacena en la batería. Cuando el Twizy está en circulación, la batería alimenta el motor vía el convertidor que transforma la energía almacenada en energía útil (corriente alterna trifásica). Mientras más corriente reciba, más potencia. La corriente recibida por la parte fija del motor, el estator, se envía al rotor que, mediante el reductor y luego los ejes de transmisión, acciona las ruedas traseras del Twizy.

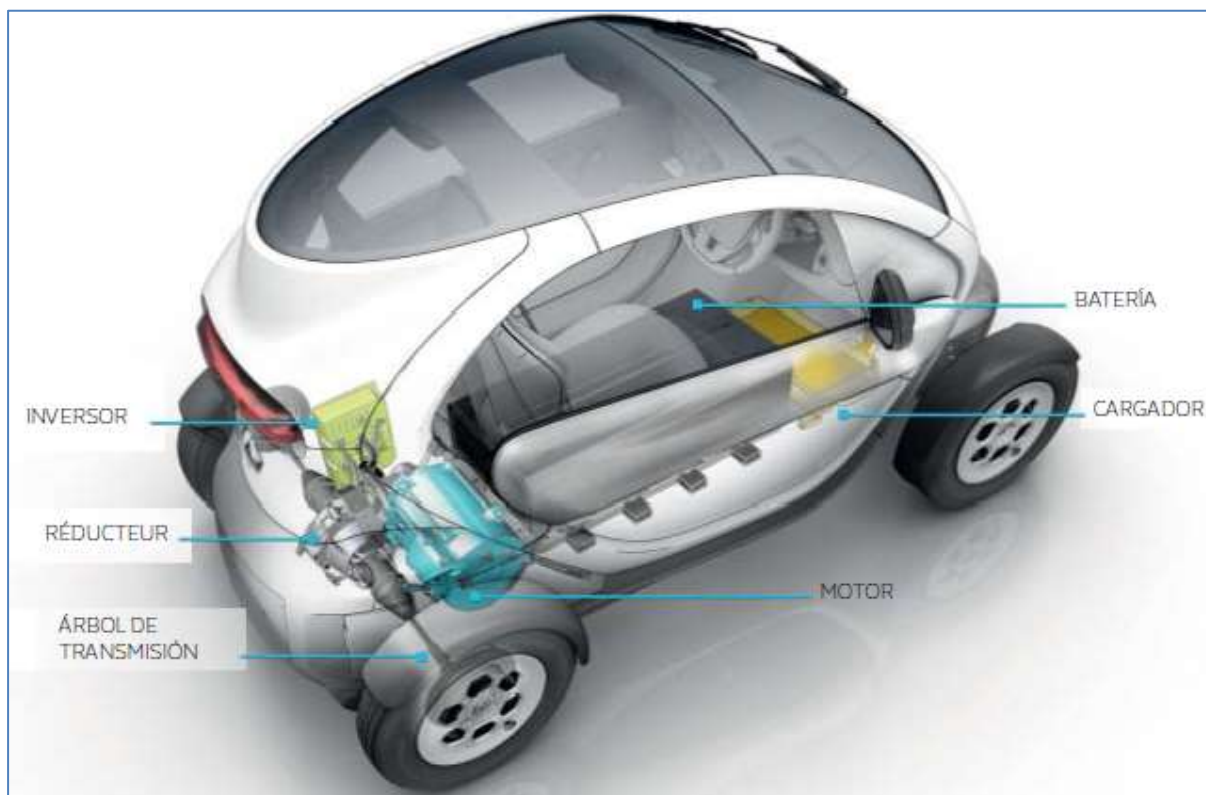


Fig. 7. Ubicación física de los componentes del tren de potencia del Renault Twizy.

2.3.1 Batería

Suministra la energía eléctrica, a través del convertidor, al motor. La batería consta de 42 celdas, dispuestas en siete módulos de seis celdas de **ión-litio**. Dentro de un módulo, las celdas se disponen

en 2S3P (dos en serie con 3 en paralelo), lo que significa que hay una serie total de 14 paquetes de 3 celdas paralelas cada uno. Tiene una capacidad nominal de 6,1 kW, un rango de voltaje entre 46 – 58 V y corriente máxima de 360 A, de **98 kg de peso** y dimensiones 828 x 478 x 233 mm fabricada por LG Chem (ver Fig. 8).



Fig. 8. Batería Renault Twizy, denominación interna BT3.

2.3.2 Cargador

Es un dispositivo que se conecta a la red eléctrica de corriente alterna de 220 V y la convierte a 60 V pero en corriente continua para recargar la batería de tracción.

La recarga de las baterías del Twizy se realiza en un **enchufe convencional de 220 V / 10 A**, gracias al cable de recarga de tres metros de longitud que está situado en un alojamiento ubicado en el frontal del vehículo a tal efecto. El tiempo estimado de **recarga completa es de 3 horas y media**.

2.3.3 Convertidor

Convierte la corriente continua proveniente de la batería de tracción a corriente alterna, para alimentar al motor eléctrico trifásico y viceversa (ver Fig. 9).

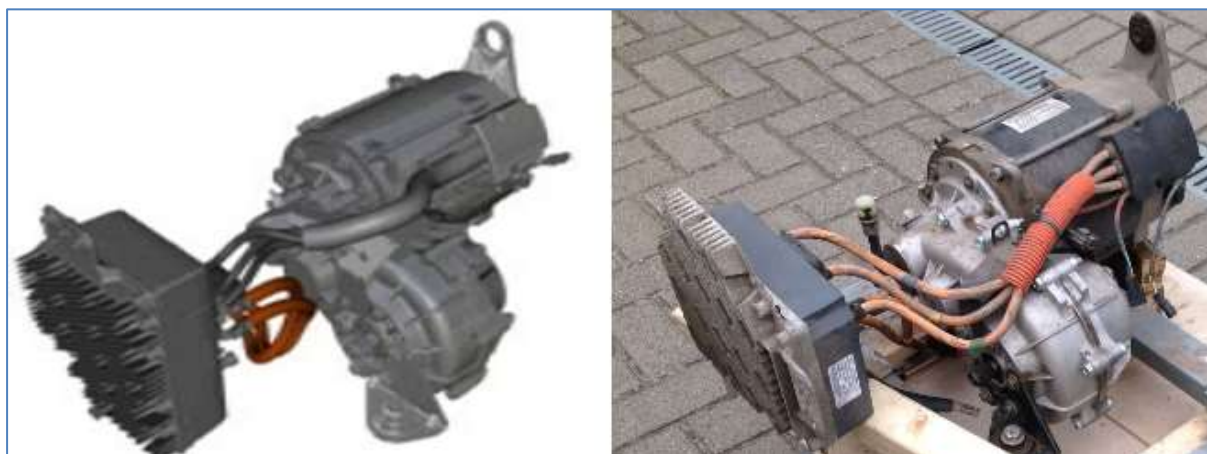


Fig. 9. Motor eléctrico, Convertidor y Reductor del Renault Twizy.

2.3.4 Motor eléctrico

Se trata de un motor asíncrono de inducción, de **60 kg de peso** (junto a la transmisión y convertidor), fabricado por Letrika Iskra AMV7118 AC inducción (Letrika, n.d.), ver Fig. 10. Es el mismo para las dos versiones de potencia, es el convertidor el que varía del modelo Twizy 45 al Twizy 80, haciendo girar al motor a 6.000 o 7250 rpm, respectivamente. El Twizy 80 dispone de una **motorización de 13 kW (17**

cv) a 7.250 rpm, con un par máximo de 57 Nm entre 0 y 2.100 rpm y una velocidad máxima de 80 km/h, ver curva de par y potencia en la Fig. 11.



Fig. 10. Motor Renault Twizy.

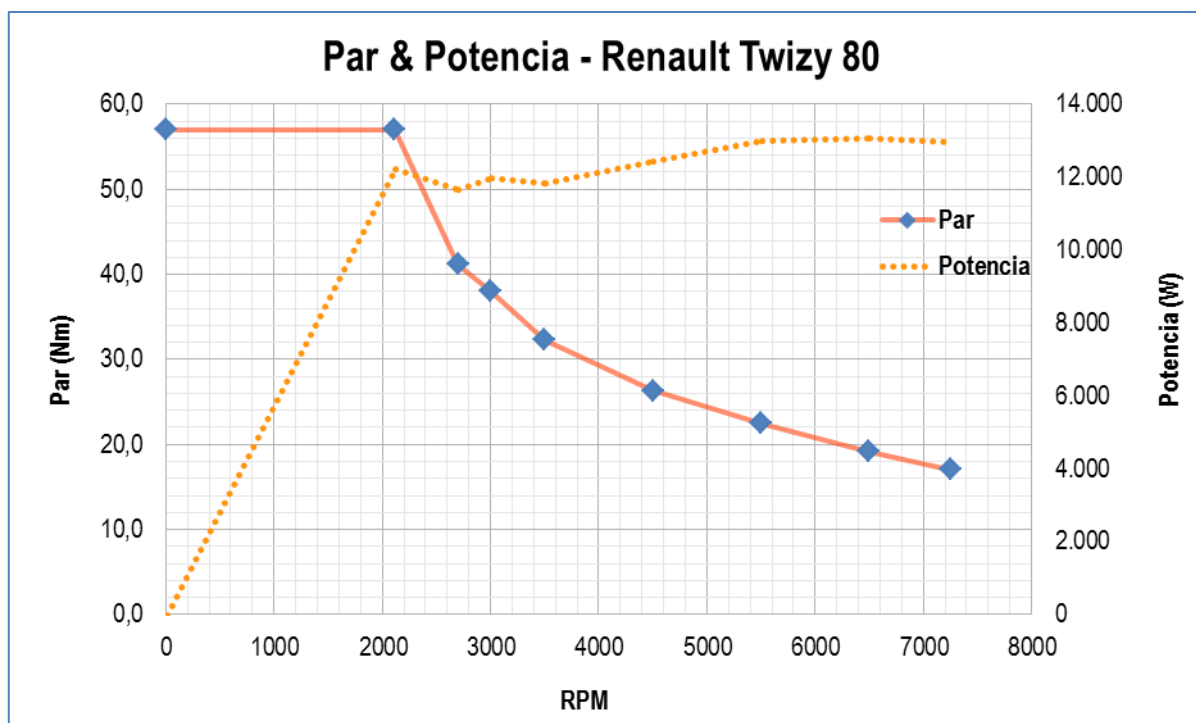


Fig. 11. Curva de Par y Potencia del Renault Twizy 80.

2.3.5 Reductor

Es el encargado de transmitir el movimiento del motor eléctrico a las ruedas a través de los ejes, actuando como su nombre indica, como reductor de giro. Realiza una reducción en dos etapas con ejes paralelos fabricados por COMEX. El uso de cárter externo en aleación de aluminio y engranajes en acero aleado con endurecimiento de superficie asegura el menor peso y la mayor durabilidad. Además, los dientes de los engranajes son bien acabados para optimizar la eficiencia y reducir el ruido durante el funcionamiento bajo carga. Este elemento también varía según la versión del Twizy, de acuerdo a su

velocidad máxima y para la versión del Twizy 80 la **relación de desmultiplicación es de 1:9,23 con un peso de 11,3 kg** (ver Fig. 12).



Fig. 12. Reductor del Renault Twizy (COMEC spa, 2018).

3 BALANCES ENERGÉTICOS EN UN VEHÍCULO

3.1 Dinámica vehicular

La dinámica del vehículo tiene como **objetivo describir cómo un vehículo se mueve** en la superficie de una carretera mientras está bajo la influencia de las fuerzas entre el neumático y la carretera, así como la aerodinámica y la gravedad.

Durante la fase de diseño del tren motriz, el conocimiento básico de la dinámica del vehículo es esencial, ya que revela qué cargas y niveles de carga debe soportar el tren motriz durante la conducción. La comprensión de la dinámica del vehículo es igualmente importante al evaluar el impacto del tren motriz en el rendimiento del vehículo (generalmente evaluado a través de simulaciones).

Al igual que con el modelado de cualquier objeto, un vehículo rodante se puede modelar con varios niveles de detalle dependiendo de qué fenómenos principales se estudien. El tipo de estudios dinámicos que se realizará en este trabajo permitirá analizar los niveles de carga del tren motriz y el consumo de energía, suponiendo una carrocería del vehículo rígida, por lo tanto puede modelarse como una masa concentrada en el centro de gravedad del vehículo. Además, se analiza sólo la dinámica en una dirección, la dirección longitudinal hacia adelante, bajo la suposición de que la estabilidad del vehículo no se vulnera bajo ninguna circunstancia (Gillespie, 1992).

De acuerdo con la **segunda ley de Newton**, el movimiento dinámico de un vehículo en un eje coordenado está completamente determinado por la suma de todas las fuerzas que actúan sobre él en ese mismo eje de dirección, como se describe en la forma traslacional:

$$m \cdot a = m \cdot \frac{d}{dt} v(t) = F_{tracción}(t) - F_{resistiva}(t)$$

Donde $m(\text{kg})$ es la masa equivalente a acelerar incluyendo posibles inercias rotatorias en el tren de potencia y $\frac{d}{dt} v(t)$ es la tasa de cambio de velocidad del vehículo $v(t)(\text{m/s})$, es decir, aceleración $a(\text{m/s}^2)$. $F_{tracción}(t)(\text{N})$ es la suma de todas las fuerzas de tracción que actúan para aumentar la velocidad del vehículo y $F_{resistiva}(t)(\text{N})$ es la suma de las fuerzas resistivas que actúan para disminuir la velocidad.

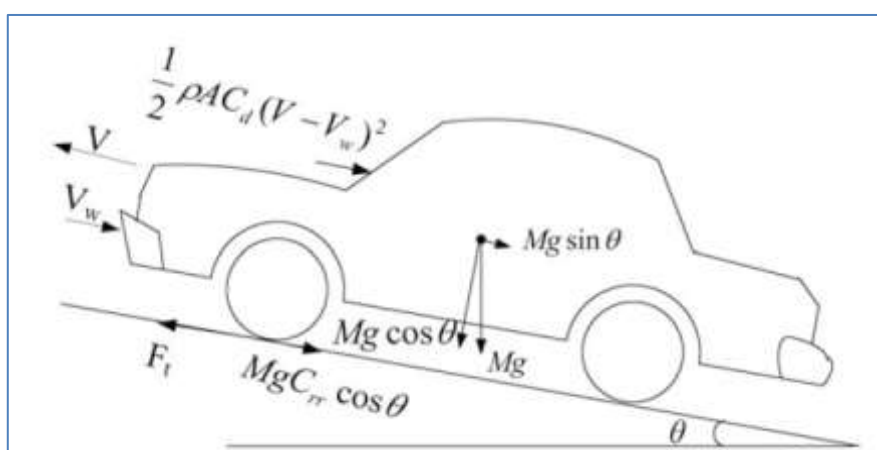


Fig. 13. Fuerzas aplicadas en un vehículo.

La fuerza de tracción principal es la que se ejerce desde el tren motriz a través de la transmisión, el diferencial y el eje de la rueda hasta el área de contacto entre las ruedas y la carretera. Durante la conducción cuesta abajo, la gravedad también puede servir como una gran fuerza de tracción, sin embargo, durante la conducción cuesta arriba puede ser una gran fuerza de resistencia. Otras fuerzas resistivas importantes son la resistencia aerodinámica al arrastre y la rodadura, así como el frenado

regenerativo utilizando el tren de potencia eléctrica y el frenado utilizando frenos de fricción convencionales. La suma de fuerzas longitudinales del vehículo se observan a la Fig. 13.

En resumen, un vehículo acelerará cuando la suma de las fuerzas de tracción sea mayor que la suma de las fuerzas de resistencia, y por lo tanto se desacelerará cuando se aplique lo opuesto. Para mantener una velocidad constante, la fuerza resistiva neta debe coincidir exactamente con la fuerza de tracción neta.

3.1.1 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es **causada por una serie de fenómenos diferentes que tienen lugar dentro y alrededor de los neumáticos del automóvil durante el rodamiento**. Uno de los principales efectos es que la **deflexión** repetida del neumático causa una histéresis dentro del material del neumático, lo que da lugar a una fuerza interna que resiste el movimiento. Aun así, la resistencia a la rodadura depende de otros fenómenos diferentes como la **temperatura del neumático, la presión de hinchado y la carga del neumático, la velocidad del vehículo, el material y el diseño del neumático, el deslizamiento del neumático sobre el suelo, etc.**; lo que hace que la estimación de la resistencia a la rodadura a través del modelado analítico sea complejo. Por lo tanto, la fuerza de resistencia al rodamiento, F_{rod} que actúa sobre un vehículo en la dirección longitudinal, se expresa generalmente como la carga normal efectiva del vehículo multiplicada por el coeficiente de resistencia al rodamiento adimensional, C_r como:

$$F_{rod}(N) = W \cdot \cos \theta \cdot C_r$$

Tal que W es la masa del vehículo $m(kg)$ por la constante de gravedad $g(m/s^2) = 9,81 m/s^2$, θ es el ángulo de pendiente por el que circula el vehículo en rad y C_r es el coeficiente de resistencia adimensional, el cual para neumáticos radiales los aproximamos por la siguiente expresión (BOSCH GmbH, 1986):

$$C_r = \begin{cases} 0.01 \cdot \left(1 + \frac{v(km/h)}{160}\right) & \text{con } 0 \leq v < 60 \text{ km/h} \\ 0.0136 + 0.4 \times 10^{-7} \cdot v(km/h)^2 & \text{con } v \geq 60 \text{ km/h} \end{cases}$$

Donde v es la velocidad del vehículo en km/h .

Los estudios empíricos muestran que el valor de C_r depende de factores tales como el material y diseño del neumático, pero también condiciones de trabajo del neumático como presión de inflado (disminución de C_r con presión creciente), temperatura del neumático (disminución de C_r con temperatura creciente), superficie del camino (tipo, mojado, seco) y velocidad (aumento de C_r con velocidad creciente).

Para niveles de baja velocidad, C_r aumenta solo ligeramente con la velocidad, mientras que a niveles de velocidad más altos, C_r aumenta casi con el cuadrado de la velocidad. A niveles de velocidad aún más altos, aparece una onda estacionaria en el neumático que aumenta en gran medida la pérdida de energía y el aumento de temperatura en el neumático, una condición que puede eventualmente conducir a la falla del neumático.

3.1.2 Resistencia aerodinámica

La resistencia aerodinámica a la que cualquier vehículo se ve inevitablemente expuesta durante la conducción, **surge del flujo de aire alrededor y a través del vehículo**, que también se conoce como flujos externos e internos.

Debido a la forma compleja de los automóviles y a la naturaleza aún más compleja de la dinámica de fluidos, es muy difícil desarrollar modelos analíticos precisos y confiables de arrastre aerodinámico, incluso con softwares CFD avanzados. Un compromiso que se usa a menudo para modelar la fuerza de arrastre aerodinámica, F_{aero} , es en parte empírico, y en parte se basa en la expresión de la presión dinámica, que muestra una fuerte dependencia del cuadrado de la velocidad del vehículo como se muestra en la siguiente ecuación:

$$F_{aero}(N) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_d \cdot (v + v_w)^2$$

Tal que ρ es la densidad del aire en kg/m^3 , A_f es el área efectiva de la sección transversal del vehículo en m^2 , C_d es el coeficiente de penetración aerodinámico adimensional, v es la velocidad del vehículo en m/s y v_w es la velocidad de la componente del viento moviéndose en contra a la velocidad del vehículo en m/s . La resistencia aerodinámica aumenta con la velocidad del viento en la parte frontal.

La densidad del aire varía según la temperatura, la humedad y la presión, y esta última tiene una dependencia de la altitud del medio donde circula el vehículo. Para estudios comparativos, a menudo se usa el valor de densidad de $1,225 \text{ kg/m}^3$, que representa condiciones estandarizadas tales como aire seco a 15°C a presión atmosférica estándar $1013,25 \text{ Pa}$, es decir, a nivel del mar. En caso de variar las condiciones se debe hacer una corrección como se explica a continuación.

Atmósfera Estándar Internacional o International Standard Atmosphere (ISA), es un modelo atmosférico terrestre invariante creado por la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Se utiliza principalmente en la navegación aérea. A continuación se dan las ecuaciones de variación de la temperatura $T(K)$, la presión $P(\text{Pa})$ y la densidad $\rho(\text{kg/m}^3)$ según la altitud $z(m)$ dentro de la tropósfera ($0 \text{ m} \leq z \leq 11000 \text{ m}$ de altitud), y utilizando siempre el sistema internacional:

$$\text{Constantes} \rightarrow \begin{cases} \text{Masa molecular del aire:} & M_{aire} = 28,9 \times 10^{-3} \text{ kg/mol} \\ \text{Constante universal de los gases ideales:} & R = 8,314472 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \\ \text{Constante de gas ideal del aire:} & R_{aire} = \frac{R}{M_{aire}} = 287 \text{ m}^2/\text{s}^2 \cdot \text{K} \\ \text{Gradiente térmico:} & \tau = \frac{dT}{dz} = -6,5 \times 10^{-3} \text{ K/m} \\ \text{Temperatura a 0 m:} & T_0 = 288 \text{ K} \\ \text{Presión a 0 m} & P_0 = 101325 \text{ Pa} \\ \text{Densidad del aire a 0 m} & \rho_0 = 1,225 \text{ kg/m}^3 \end{cases}$$

$$T(z) = T_0 + \tau \cdot z$$

$$P(z) = P_0 \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_0} \cdot z\right)^{\frac{g}{\tau \cdot R_{aire}}}$$

$$\rho_{aire}(z) = \frac{P}{R_{aire} \cdot T} = \rho_0 \cdot \left(1 - \frac{\tau}{T_0} \cdot z\right)^{\frac{g}{\tau \cdot R_{aire}} - 1}$$

Para temperaturas entre -30°C y 50°C , la densidad del aire seco puede ser del 80 al 110% de la densidad del aire estándar respectivamente, mientras que un aumento en altitud de aproximadamente 300 m sobre el nivel del mar produce una disminución en la densidad del aire seco de aproximadamente 3% relativo a la densidad de aire estándar.

Para este trabajo se toma como referencia las condiciones de la ciudad de Valladolid, la cual posee una altitud de 690 m y una temperatura media de 288 K. Asumiendo una presión estándar de $1013,25 \text{ Pa}$ se obtiene un valor de densidad de $1,15 \text{ kg/m}^3$.

El área efectiva de la sección transversal del vehículo varía según el tamaño y la forma del vehículo. Para los fabricantes de automóviles, el valor del área de cierto modelo de automóvil se puede encontrar a través de dibujos detallados o quizás pruebas de túnel de viento, sin embargo, el valor resultante no siempre se publican en las especificaciones oficiales del vehículo. Por lo tanto, los investigadores externos a menudo se ven obligados a realizar estimaciones aproximadas que relacionan el área con el producto de la altura y el ancho de un vehículo o ancho de vía. Varias de tales estimaciones se pueden encontrar en la literatura y por lo general suelen tomar valores entre el 81% y 90% de referido producto.

El **coeficiente de arrastre C_d** , es un **parámetro adimensional que representa todos los efectos de arrastre que están activos en el vehículo, es decir, tanto externo como interno**. Para obtener una estimación precisa, debe medirse. Por lo tanto, los fabricantes de automóviles miden la fuerza de arrastre total, F_a en túneles de viento, así como el área de la sección transversal, la densidad del aire y la velocidad del vehículo. Entonces, el coeficiente de arrastre se puede encontrar a través de la ecuación anterior. En comparación con el área, este parámetro a menudo se oficializa y se comunica en las especificaciones del modelo del automóvil. Normalmente, el valor de C_d está en el rango 0,25-0,35 en los automóviles de pasajeros de hoy, sin embargo, puede variar entre 0,15 para una forma más aerodinámica hasta 0,5 o superior para convertibles abiertos, vehículos todoterreno u otros vehículos con formas rugosas. Además, el valor de C_d cambiará si el flujo de aire alrededor y a través del vehículo se altera durante la conducción, por ejemplo, una ventana lateral abierta puede aumentar el valor de C_d en aproximadamente un 5%. Durante las últimas décadas, la tendencia general ha sido la disminución de los valores de C_d en los turismos nuevos, en gran parte debido al mayor interés en la eficiencia del combustible y las emisiones. Para no comprometer demasiado el diseño y la comodidad del compartimento para los pasajeros, la mayoría de los trabajos sobre reducción aerodinámica del arrastre probablemente se centren en el valor de C_d en lugar de en el área.

3.1.3 Resistencia a las pendientes

En caso de un **grado de inclinación de la carretera**, la dinámica del vehículo se verá afectada por el componente de la fuerza gravitacional F_{grav} que es paralela a la carretera como:

$$F_{grav}(N) = W \cdot \sin \theta$$

Tal que W es el la masa del vehículo $m(kg)$ por la constante de gravedad $g(m/s^2) = 9,81 m/s^2$ y θ es el ángulo (pendiente) que forma la vía por la que circula el vehículo y la horizontal en *rad*. Este ángulo también se suele expresar mediante:

$$\theta = \arctan\left(\frac{\% \text{ grado}}{100}\right)$$

Donde la pendiente de la carretera se expresa en términos de “% grado” (porcentaje de inclinación con respecto a la horizontal), por lo tanto, esta terminología se utilizará a lo largo de este trabajo.

Desde una perspectiva energética, conducir en una carretera no nivelada causará variación de la energía potencial en el vehículo. Sin embargo, dado que los vehículos de pasajeros suelen desplazarse en ida y vuelta durante más o menos un día, desde su posición inicial (por ejemplo, su casa), sea cual sea la ruta recorrida, la energía potencial sigue siendo la misma al volver al punto de partida. Al igual que con la desaceleración, un vehículo eléctrico normalmente puede recuperar parte de la energía de ir cuesta abajo.

3.1.4 Fuerza en rueda

La fuerza de tracción en rueda, F_{Rueda} que tiene que llegar a las ruedas desde el tren motriz para mantener un cierto nivel de velocidad, grado de la carretera y aceleración se puede encontrar como:

$$F_{Rueda}(t) = F_{acel}(t) + F_{rod}(t) + F_{aero}(t) + F_{grav}(t)$$

Donde $F_{acel}(t)$ es la fuerza requerida para acelerar la masa del vehículo a una cierta magnitud de aceleración ($F_{acel}(t) = m \cdot a(t)$). Un valor positivo de F_{Rueda} representa una aceleración del vehículo, mientras que un valor negativo puede representar una fuerza de frenado regenerativo o un frenado por fricción. Finalmente, si $F_{Rueda}(t) = 0$ y el freno de fricción está desconectado, se dice que el vehículo está navegando, únicamente F_{acel} , F_{rod} y posiblemente F_{grav} están actuando sobre el vehículo.

La fuerza de tracción máxima en las ruedas motrices puede verse limitada por la capacidad de fuerza máxima del tren motriz o la capacidad adhesiva máxima entre el neumático y el suelo que se puede aplicar en la rueda sin perder el agarre en la carretera, es decir, comenzar a girar o deslizarse. Esta última está limitada por la fuerza normal actual en las ruedas motrices, F_N y el coeficiente de fricción entre el neumático y la carretera:

$$F_{Rueda, \text{ máx}} = \mu \cdot F_N$$

La carga normal en las ruedas motrices (o del par de ruedas motrices) se ve afectada por la distribución del peso en el automóvil, por lo que varía de un automóvil a otro e incluso de una ocasión a otra para el mismo automóvil, ya que la carga puede variar y por lo tanto el cambio de distribución de peso durante una aceleración o desaceleración.

3.2 Potencia y energía

La potencia de tracción instantánea que debe llegar a las ruedas P_{rueda} desde el tren motriz para mantener un cierto nivel de velocidad, el grado de la carretera y la aceleración está determinada por la fuerza de tracción y la velocidad del vehículo como:

$$P_{rueda}(t) = F_{Rueda}(t) \cdot v(t)$$

La energía total consumida en la rueda se puede encontrar a partir de la integral en el tiempo de la potencia como:

$$E_{rueda} = \int P_{rueda}(t) \cdot dt$$

Durante el frenado regenerativo mientras F_{Rueda} es negativa, P_{rueda} también será negativa, por lo tanto, la energía total consumida a lo largo del tiempo se reducirá. Esta es una oportunidad para recuperar energía en los vehículos que vienen equipados con sistemas de recuperación de energía, lo cual mejora el consumo global del vehículo así como su autonomía.

3.2.1 Potencia en motor y energético (combustible / electricidad)

La potencia en rueda necesaria en cada instante t para propulsar el vehículo, es la resultante de la suma de las cuatro resistencias anteriores por la velocidad del vehículo:

$$P_{rueda}(kW) = (F_{acel}(N) + F_{rod}(N) + F_{aero}(N) + F_{grav}(N)) \cdot v(m/s)$$

Mientras que la potencia del motor y del combustible es:

$$\text{Motor térmico} \begin{cases} P_{motor}(kW) = \frac{P_{rueda}(kW)}{\eta_{transmisión}} + P_{accionamientos}(kW) \\ P_{combustible}(kW) = \frac{P_{motor}(kW)}{\eta_{motor \text{ térmico}}} \end{cases}$$

$$\text{Motor eléctrico} \begin{cases} P_{\text{motor}}(kW) = \frac{P_{\text{rueda}}(kW)}{\eta_{\text{transmisión}}} \\ P_{\text{combustible}}(kW) = \frac{P_{\text{motor}}(kW)}{\eta_{\text{motor eléctrico}} \cdot \eta_{\text{descarga batería}}} \end{cases}$$

3.2.2 Energía por unidad de longitud recorrida

A continuación se representa el cálculo de la energía para el movimiento del vehículo en función de la velocidad y la correspondiente del combustible o la electricidad por unidad de longitud recorrida (en J/km y en Wh/km) en los casos de los vehículos considerados y con las alternativas de propulsión térmica y eléctrica.

Para el caso de la energía para el movimiento se calcula⁶:

$$E_{\text{requerida}}(Wh/km) = \frac{Pot_{\text{rodadura}} + Pot_{\text{aerodinámica}}(W)}{v(km/h)}$$

$$E_{\text{requerida}}(J/km) = 3.600 \cdot E_{\text{requerida}}(Wh/km)$$

Para el caso de la energía del combustible y/o eléctrica requerida por el vehículo con motor térmico y/o eléctrico se calcula⁷:

En *Watt hora/kilómetro*:

$$E_{\text{Combustible}}(Wh/km) = \frac{Pot_{\text{combustible}}(W)}{v(km/h)} \quad \text{Motor Térm}$$

$$E_{\text{Electricidad}}(Wh/km) = \frac{Pot_{\text{combustible}}(W)}{v(km/h)} \quad \text{Motor Eléc}$$

En *Joule/kilómetro*:

$$E_{\text{Combustible}}(J/km) = 3.600 \cdot E_{\text{Combustible}}(Wh/km)$$

$$E_{\text{Electricidad}}(J/km) = 3.600 \cdot E_{\text{Electricidad}}(Wh/km)$$

⁶ Para el caso de velocidad nula, se toma un valor infinitesimal de 0,1 km/h a los efectos de mostrar los efectos de consumo de energía con vehículo parado o circulando muy lento.

⁷ Para el caso de velocidad nula, se toma un valor infinitesimal de 0,1 km/h a los efectos de mostrar los efectos de consumo de energía con vehículo parado o circulando muy lento.

3.2.3 Energía primaria y emisiones de CO₂

A continuación se representa el cálculo de la energía primaria consumida y las emisiones de CO₂ generadas por km en función de la velocidad, donde los valores de rendimientos son los valores de referencia para el mercado español (Tinaut Fluixá, 2017):

Vehículo motor térmico:

$$E_{\text{primaria}} \left(\text{Wh}/\text{km} \right) = \frac{E_{\text{combustible}} \left(\text{Wh}/\text{km} \right)}{\eta_{\text{WT}, \text{tér}}}$$
 tal que $\eta_{\text{WT}, \text{tér}} = 0,86$

Vehículo eléctrico:

$$E_{\text{primaria}} \left(\text{Wh}/\text{km} \right) = \frac{E_{\text{eléctrica}} \left(\text{Wh}/\text{km} \right)}{\eta_{\text{mix eléct}} \cdot \eta_{\text{dist}} \cdot \eta_{\text{carga batería}}}$$
 tal que

$$\eta_{\text{mix eléct}} = 0,45; \eta_{\text{dist}} = 0,92; \eta_{\text{carga batería}} = 0,90$$

Las emisiones de CO₂ se representan de la siguiente forma según sea el caso:

Vehículo Gasolina y diésel:

$$E_{\text{CO}_2} \left(\text{g CO}_2/\text{km} \right) = 10 \cdot \rho_{\text{fuel}} \left(\text{kg}/\text{l} \right) \cdot V_{\text{fuel}} \left(\text{l}/100\text{km} \right) \cdot e_{\text{CO}_2} \left(\frac{\text{g CO}_2}{\text{g fuel}} \right)$$
 tal que:

$$10 \cdot \rho_{\text{fuel}} \cdot e_{\text{CO}_2} = \begin{cases} 23,0 \text{ g CO}_2/\text{l} & \text{para la gasolina} \\ 26,5 \text{ g CO}_2/\text{l} & \text{para el diésel} \end{cases}$$

$$V_{\text{fuel}} \left(\text{l}/100\text{km} \right) = \frac{100 \cdot E_{\text{combustible}} \left(\text{Wh}/\text{km} \right)}{H_{\text{fuel}} \left(\text{MJ}/\text{kg} \right) \cdot \rho_{\text{fuel}} \left(\text{kg}/\text{l} \right) \cdot \frac{1}{3,6 \text{ MJ}/\text{kWh}} \cdot 10^3 \text{ Wh}/\text{kWh}}$$
 tal que:

$$H_{\text{fuel}} \left(\text{MJ}/\text{kg} \right) \cdot \rho_{\text{fuel}} \left(\text{kg}/\text{l} \right) = \begin{cases} 42,5 \left(\text{MJ}/\text{kg} \right) \cdot 0,745 \left(\text{kg}/\text{l} \right) & \text{para la gasolina} \\ 43,0 \left(\text{MJ}/\text{kg} \right) \cdot 0,837 \left(\text{kg}/\text{l} \right) & \text{para el diésel} \end{cases}$$

Vehículo eléctrico:

Las emisiones de CO₂ locales para el vehículo eléctrico son nulas, pero no las globales **Well to Wheel**, la cuales dependen del mix energético eléctrico desde el cual se ha obtenido la energía eléctrica para cargar al vehículo eléctrico. Según el mix español 2017 se han emitido 279 g CO₂/kWh generado (promedio en bornes de las centrales – sin incluir rendimiento estimado 0,92 del transporte y distribución de energía eléctrica que se toma para el cálculo de energía primaria

nombrado anteriormente) (Red Eléctrica de España, 2017). Por lo tanto, las emisiones globales WtW del vehículo eléctrico son:

$$E_{CO_2} \left(g CO_2/km \right) = 279 \left(g CO_2/kWh \right) \cdot \frac{E_{eléctrica} (Wh/km)}{\eta_{dist} \cdot \eta_{carga\ batería}}$$

3.3 Ciclo de conducción WLTC

Desde 2008, la Comisión Económica de las Naciones Unidas para Europa (UN-ECE) está trabajando en una propuesta para un nuevo **Ciclo de Pruebas de vehículos ligero armonizado** a Nivel Mundial (WLTC), que se puede utilizar para calcular el consumo de combustible y las emisiones. El ciclo tiene como objetivo representar la conducción típica a escala global. Los datos del vehículo se han recogido de vehículos instrumentados en EE. UU., Japón, India, Corea y los países europeos Bélgica, Alemania, España, Francia, Italia, Polonia, Eslovenia, Suiza, Reino Unido y Suecia. Los datos registrados se han dividido en micro recorridos que a su vez se han categorizado para su posterior análisis (UN/ECE, 2013).

Se han desarrollado tres clases de ciclos de manejo, donde **la Clase 1 debe ser utilizada por vehículos con una relación de potencia y masa $\leq 22 W/kg$, la Clase 2 por vehículos con relaciones de potencia a masa $> 22 y \leq 34 W/kg$, y finalmente la Clase 3 por vehículos con relaciones $> 34 W/kg$** . Cada clase consta de 2 a 4 ciclos llamados: bajo, medio, alto y extra alto, que se refieren a niveles de velocidad. Tienen diferentes características, como la velocidad y los niveles de aceleración, y cubren escenarios como la congestión del tráfico y el flujo libre.

El nuevo ciclo tiene mejoras con respecto al ciclo NEDC utilizado hasta el momento en Europa. Los mayores ciclos de aceleración y de frenado consiguen un mayor dinamismo del ensayo. El método de medición también se ha mejorado. Lo que se intenta conseguir con este ciclo es tener valores más realistas y que se asemejen más a la conducción cotidiana de los conductores.

En este trabajo se estudia un vehículo tipo cuadríciclo pesado L7e, el cual posee un peso máximo de 450 kg y una potencia máxima de 15 kW. El ratio potencia/masa es $15000 W/450 kg = 33 W/kg$, por lo cual se selecciona el ciclo Clase 2 para los cálculos de energía y emisiones.

Los vehículos que se someten al ciclo **WLTC Clase 2** circularán por 3 vías diferentes, Low, Medium y High de acuerdo a los parámetros establecidos en la Tabla 7 (se excluye Extra-High) y las velocidades y aceleraciones se observan en la Fig. 14.

Tabla 7. Parámetros del Ciclo WLTC Clase 2 (Dieselnet, 2017).

Phase	Duration	Stop Duration	Distance	p_stop	v_max	v_ave w/o stops	v_ave w/ stops	a_min	a_max
	s	s	m		km/h	km/h	km/h	m/s ²	m/s ²
Low 2	589	155	3101	26.3%	51.4	25.7	19.0	-0.94	0.90
Medium 2	433	48	4737	11.1%	74.7	44.3	39.4	-0.93	0.96
High 2	455	30	6792	6.6%	85.2	57.5	53.7	-1.11	0.85
Extra-High 2	323	7	8019	2.2%	123.1	91.4	89.4	-1.06	0.65
Total	1800	240	22649						

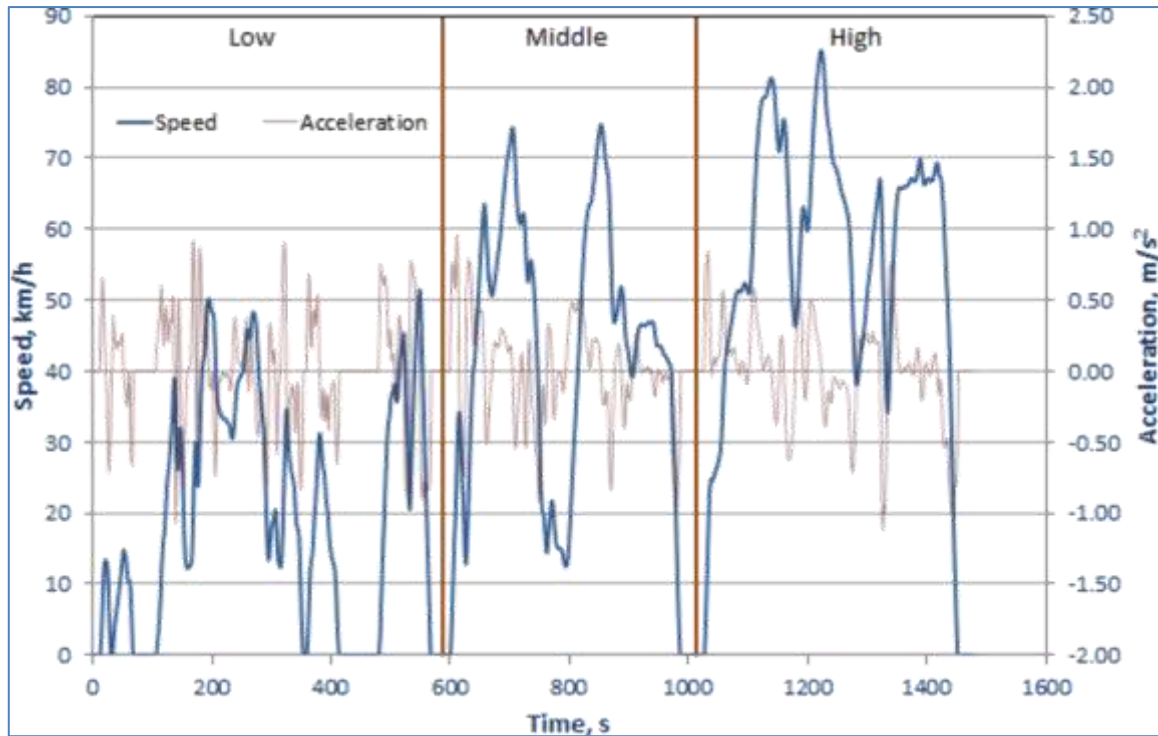


Fig. 14. Velocidad y aceleración en función del tiempo para el Ciclo WLTC Clase 2.

3.3.1 Distribución de aceleraciones

Dado que la fuerza pico y la potencia en las ruedas a menudo se debe a la aceleración del vehículo, es vital estudiar qué niveles de aceleración se esperan que ocurran durante la conducción normal en los tres tipos de vías diferentes.

En esta sección, se estudiarán los niveles de aceleración en función de la velocidad y el tiempo. Para los ciclos de prueba oficiales, se da la serie temporal de velocidad, generalmente como un valor por segundo. La aceleración se ha calculado considerando un paso adelante y uno atrás:

$$a(i) = \frac{dv}{dt} = \frac{v(i+1) - v(i-1)}{t(i+1) - t(i-1)}$$

Se ha demostrado que se minimiza el error de estimación, en comparación con solo considerar un paso de tiempo en la dirección hacia delante o hacia atrás (Euler hacia delante o Euler hacia atrás).

3.3.2 Cálculo para un ciclo WLTC Ciclo Clase 2, con regeneración

Se calculan los valores de espacio recorrido, energía consumida con regeneración del 80% y energía consumida sin regeneración, con el fin de calcular el ahorro que se obtiene a través de la regeneración de energía. Los valores obtenidos corresponden a las siguientes expresiones:

Espacio recorrido:

$$x_f = x_i + v_f * (t_f - t_i) + (t_f - t_i)^2 * \frac{(v_f - v_i)}{(t_f - t_i)/2} \text{ tal que:}$$

x_f : Posición final (m).

x_i : Posición inicial (m).

v_i : Velocidad inicial (m/s).

v_f : Velocidad final (m/s).

t_i : Tiempo inicial (s).

t_f : Tiempo final (s).

Energía consumida con regeneración 80%:

$$E_{con\ 80\% reg} = E_i + \left(\left(\frac{\max(P_f, 0) + \max(P_i, 0)}{2} \right) + 0.8 * \left(\frac{\max(P_f, 0) + \min(P_i, 0)}{2} \right) \right) * (t_f - t_i) \text{ tal que:}$$

P_i : Potencia inicial (kW).

P_f : Potencia final (kW).

t_i : Tiempo inicial (s).

t_f : Tiempo final (s).

Energía consumida sin regeneración:

$$E_{con\ 80\% reg} = E_i + \left(\left(\frac{\max(P_f, 0) + \max(P_i, 0)}{2} \right) \right) * (t_f - t_i) \text{ tal que:}$$

P_i : Potencia inicial (kW).

P_f : Potencia final (kW).

t_i : Tiempo inicial (s).

t_f : Tiempo final (s).

Una vez ya seleccionados los valores, el ahorro de energía para un vehículo con 80% de regeneración es:

$$\text{Ahorro de energía} = \frac{E_{CONSUMIDA SIN REG} - E_{CONSUMIDA CON 80\% REG}}{E_{CONSUMIDA SIN REG}}$$

3.3.3 Consumo en el ciclo WLTC Ciclo Clase 2

Se calcula el consumo de combustible instantáneo y su equivalente en litros a los 100 km en un ciclo WLTC Cycle 2 Class, de acuerdo a las siguientes expresiones⁸.

Consumo instantáneo de Fuel sin regeneración sin sistema Stop/Start:

⁸ Para el caso de velocidad nula, se toma un valor infinitesimal de 0,1 km/h a los efectos de mostrar los efectos de consumo de energía con vehículo parado.

$$G_{fuel}(g/s) = \frac{\frac{Pot_{rueda}(kW)}{\eta_{transmisión}} + Pot_{accionamientos}(kW)}{\eta_{motor} \cdot \frac{H_{fuel} \left(\frac{MJ}{kg} \right)}{1.000 \frac{g}{kg}} \cdot \frac{1}{3,6 \frac{MJ}{kWh}} \cdot 3.600 \frac{s}{h}} \quad \text{tal que}$$

$$Pot_{rueda}(kW) = Pot_{v=cte}(kW) + \max(Pot_{acelerar}; 0)(kW)$$

$$H_{fuel} \left(\frac{MJ}{kg} \right) = \begin{cases} 42,5 \frac{MJ}{kg} & \text{para la gasolina} \\ 43,0 \frac{MJ}{kg} & \text{para el diésel} \end{cases}$$

Consumo volumétrico:

$$V_{fuel} \left(\frac{l}{100km} \right) = \frac{100 \cdot G_{fuel}(g/s) \cdot \frac{1}{1.000 \frac{g}{kg}} \cdot 3.600 \frac{s}{h}}{\rho_{fuel} \left(\frac{kg}{l} \right) \cdot v(km/h)} \quad \text{tal que:}$$

$$\rho_{fuel} \left(\frac{kg}{l} \right) = \begin{cases} 0,745 \frac{kg}{l} & \text{para la gasolina} \\ 0,837 \frac{kg}{l} & \text{para el diésel} \end{cases}$$

Consumo instantáneo de FUEL sin regeneración con sistema Stop/Start:

Ídem al caso sin regeneración pero suprimiendo $Pot_{accionamientos}(kW)$.

Consumo instantáneo de FUEL con 80% de regeneración y sin sistema Stop/Start:

Ídem al caso sin regeneración tal que:

$$Pot_{rueda}(kW) = Pot_{v=cte} + \max(Pot_{acelerar}; 0) + X \cdot \min(Pot_{acelerar}; 0)$$

Tal que X es 80%.

Consumo instantáneo de FUEL con 80% de regeneración y con sistema Stop/Start:

Ídem al caso anterior pero suprimiendo $Pot_{accionamientos}(kW)$.

4 MODELADO Y SIMULACIÓN EN AVL CRUISE

4.1 Modelado

Todos los cálculos se realizaron en base a los datos que se recabaron en bibliografía, catálogos de fabricantes y/o estimaciones explicadas en este trabajo. Esta información se encuentra en el Anexo 10.2.

Las configuraciones de Renault Twizy que se analizan serán tres:

- 1) **Twizy Eléctrico (BEV):** versión original donde se estima una regeneración de la energía empleada en deceleración del vehículo. La información técnica como masa, coeficiente aerodinámico, dimensiones, etc., se encuentra en la tabla del Anexo 10.2.
- 2) **Twizy Convencional (ICEV):** configuración que parte de la versión original del Twizy eléctrico, donde se extrae el tren de potencia (motor + convertidor), batería y cargador, y se sustituye por un motor de combustión interna a gasolina y transmisión CVT (ver Anexo 10.3.1), sistema de almacenamiento de combustible y sistema de refrigeración entre otros. Con este cambio se obtiene una importante disminución del peso del vehículo como se observa en la Tabla 8.
- 3) **Twizy Híbrido (HEV):** configuración que parte de la versión original del Renault Twizy eléctrico, donde se adapta el tren de potencia original, la batería se extrae y se instala 1/3 parte de la capacidad de almacenamiento original y, se retira el cargador (no tiene opción de recarga externa). Además se añade un motor de combustión interna a gasolina (ver Anexo 10.3.2), sistema de almacenamiento de combustible y sistema de refrigeración entre otros. Con este cambio se obtiene una disminución del peso del vehículo con respecto al BEV pero con un ligero incremento respecto al ICEV como observa en la Tabla 8.

Tabla 8. Pesos de las distintas configuraciones de Renault Twizy estudiadas.

VEHÍCULO	Renault Twizy Eléctrico	Renault Twizy Gasolina	Renault Twizy híbrido	
	Electricidad	Gasolina	Gasolina	Electricidad
Tipo de Almacenamiento	Electricidad	Gasolina	Gasolina	Electricidad
Peso batería / Tanque combustible lleno (kg)	99	14	12	33
Peso ME + Convertidor (kg) / Peso MCI gasolina (Incl. Transmisión)	60	31	31	60
Peso de circuito de refrigeración	0	10	10	0
Peso del cargador	33	0	0	0
Peso (kg)	474	337	428	
Peso máx. aut. (kg)	690	553	644	
Longitud (m)	2,338	2,338	2,338	
Ancho (m)	1,094	1,094	1,094	
Alto (m)	1,454	1,454	1,454	

Se recuerda que la categoría del Renault Twizy es un vehículo **cuadriciclo L7e-A2** y para el mismo se define que la potencia máxima del motor debe ser inferior a 15 kW, lo cual será un parámetro determinante para conocer las velocidades máximas, aceleraciones y consumos de cada configuración estudiada. Otras características de esta categoría se recogen en la Tabla 9 (Europeo et al., 2013).

Tabla 9. Criterios para la categoría L7e-A2 (Renault Twizy).

CATEGORÍA L7e-A2 – Cuadriciclo pesado para carretera	
Ruedas	Cuatro
Masa en orden de marcha (sin baterías)	≤ 450 kg
Potencia nominal o neta continua	≤ 15 kW

Plazas	Un máximo de dos plazas de asiento no a horcajadas, incluida la plaza de asiento del conductor.
Velocidad máxima	≤ 90 km/h

4.2 Simulación en AVL CRUISE™

El uso de la simulación en el diseño de vehículos tiene varias ventajas y es un método apropiado para fines de desarrollo técnico. **Se observa el funcionamiento de cada componente y, permite seguir la variación de cada uno en el tiempo** proporcionando una visión accesible y documentada del comportamiento del sistema, acortando el desarrollo del prototipo, y permitiendo el estudio teórico de los resultados obtenidos.

Las técnicas de simulación son indispensables en el desarrollo del automóvil y más allá. La necesidad de simular varios sistemas electromecánicos surgió debido a la necesidad de reducir los costes para diseñar y fabricar prototipos y acortar el intervalo de tiempo desde la concepción inicial hasta la realización de la producción en serie.

En este trabajo se realiza la **simulación mediante el software AVL CRUISE™ la cual es una eficaz herramienta donde se pueden simular múltiples configuraciones de vehículos**, la cual tiene muchas ventajas, tales como: simple en la fabricación de modelos de vehículos, el tiempo de cálculo del modelo es corto, la información de los resultados de los cálculos es bastante precisa y fácil de cambiar la configuración del vehículo.

Este trabajo no pretende realizar una explicación exhaustiva de cada paso dado en la conformación de cada configuración del Twizy (eléctrico, convencional e híbrido) en el software, sino que se parte de los modelos básicos proporcionados por AVL CRUISE™ en el mismo software y se realizan las modificaciones técnicas para adaptar la simulación al objetivo que se busca de comparar las tres versiones del Twizy. Tampoco se exponen todos los detalles y funcionalidades del software ya que los mismos extenderían este trabajo sin gran valor añadido, dado que los mismos se pueden consultar en el manual de usuario del software o en diversos trabajos que se pueden descargar de la web como trabajos de fin de máster de otros años (Suárez Sanz, 2016).

En este capítulo se describe las modificaciones realizadas al modelo de vehículo eléctrico desarrollado por AVL CRUISE™, para que el mismo se adapte a las características técnicas del Twizy en su versión eléctrica. Se presenta paso a paso las modificaciones que se realiza a cada componente del modelo y se omite describir los detalles de cada una de las variables que permanecen por defecto según aparecen en el modelo del software.

Las configuraciones del Twizy convencional e híbrida se realizan de forma análoga pero no se desarrollan en este capítulo sino que se exponen en el Anexo 10.3. Cabe destacar que:

- Los modelos de vehículo eléctrico e híbrido se debieron modificar y convertir en tracción trasera, como se observa en los diagramas que se exponen más adelante.
- En el caso del vehículo convencional se tuvo que agregar el componente Stop – Start, implantación y configuración que se describe en el Anexo 10.3.
- Fue necesario la creación del ciclo de homologación WLTC clase 2 porque el sistema únicamente dispone del clase 3 además de otras opciones no válidas para el objetivo de este trabajo.

4.3 Componentes y sistemas modelados para el Twizy eléctrico

La Fig. 15 muestra el modelo de un vehículo eléctrico tal cual aparece en AVL CRUISE™, mientras que en la Fig. 16 se observa el mismo modelo pero con las modificaciones necesarias para el Twizy

eléctrico. Cada cuadro en la figura representa un módulo que se puede personalizar según las especificaciones del usuario. Las líneas azules muestran una conexión mecánica entre los componentes, o "conexión de energía". Las líneas rojas muestran una conexión de energía eléctrica. Además de las conexiones de energía que se muestran en la figura, los componentes también se conectan a través de conexiones de información a través de un centro de datos (Suárez Sanz, 2016).

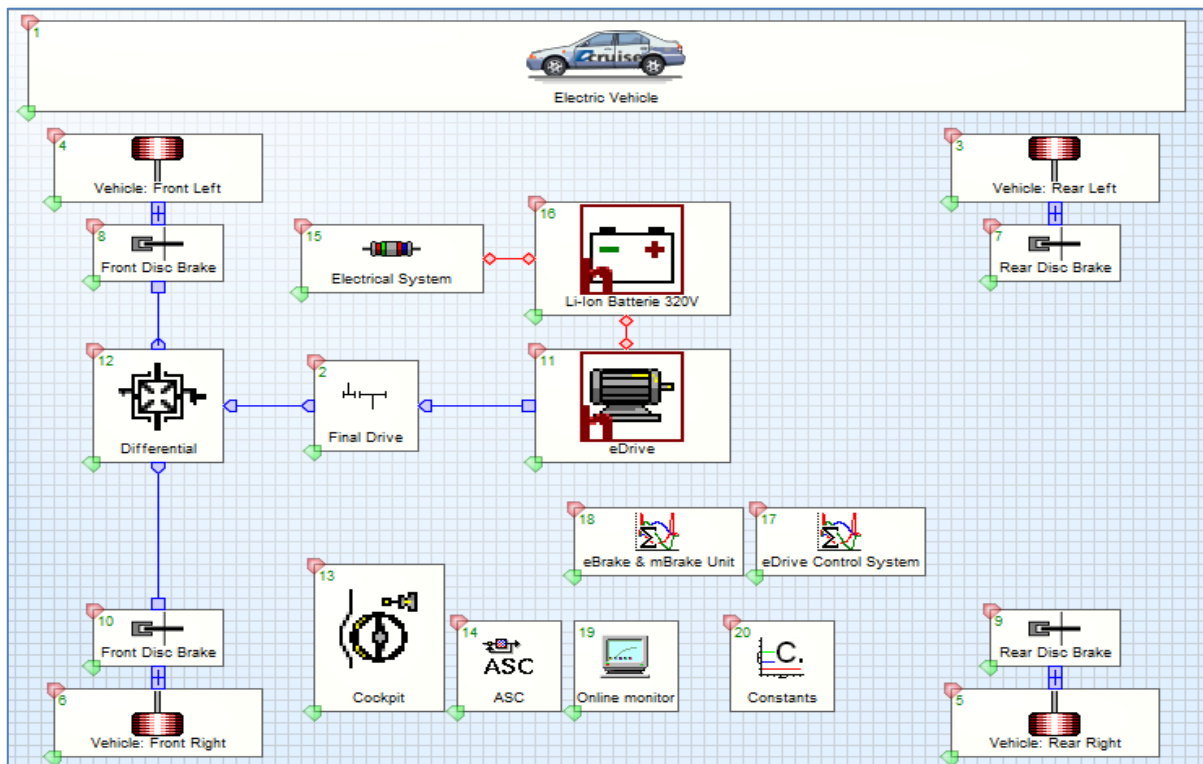


Fig. 15. Componentes del modelo de vehículo eléctrico en AVL CRUISE™.

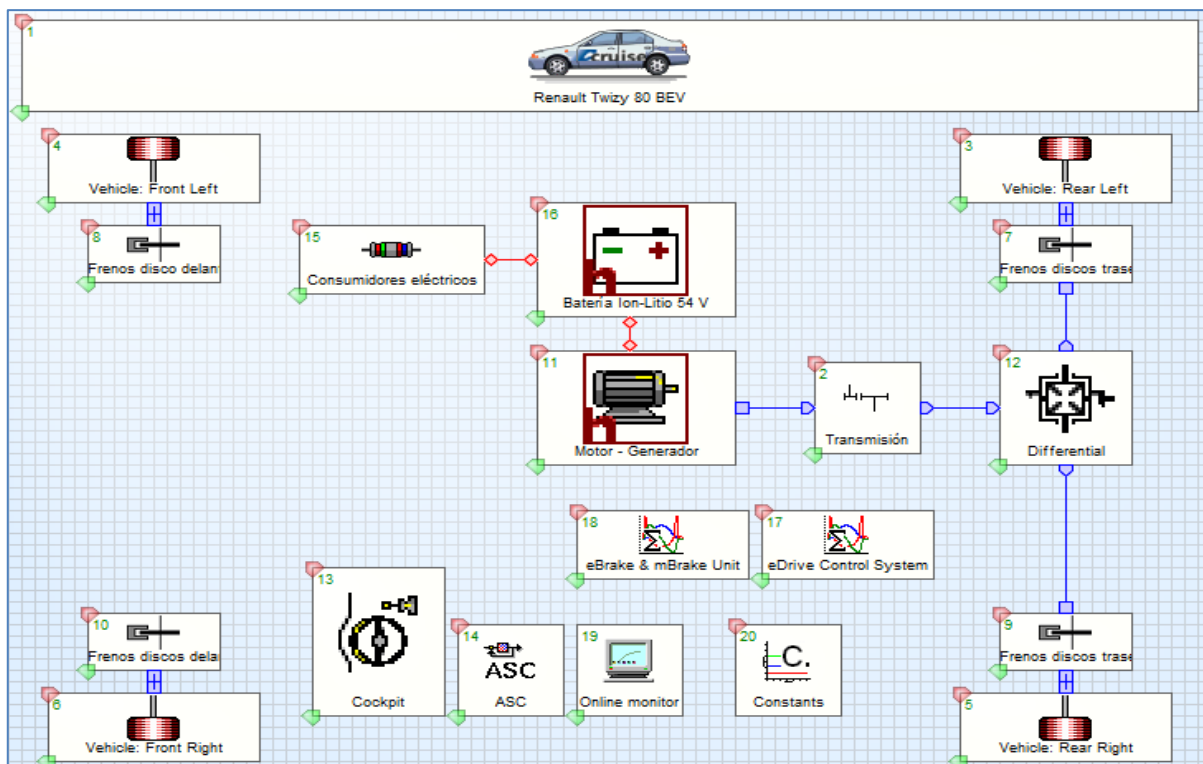


Fig. 16. Componentes y configuración del Twizy eléctrico en AVL CRUISE™.

Las siguientes tablas describen las configuraciones de cada uno de los componentes de acuerdo a las características técnicas del Twizy eléctrico (BEV), estimaciones realizadas y parámetros extraídos del modelo básico proporcionado por AVL CRUISE™.

Tabla 10. Modelado del vehículo en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Renault Twizy 80 BEV		
Observación 1	Eléctrico		
Observación 2	T tracción ruedas traseras		
Volumen del tanque de combustible	0	l	Ficha
Dif. Presión entre motor/medioambiente	0	mbar	Cruise
Dif. Temp. entre motor/medioambiente	0	K	Cruise
Dimensiones del vehículo			
Dist. desde parte trasera a delantera	2338	mm	Ficha
Dist. entre ejes	1686	mm	Ficha
Altura del punto de apoyo en banco de pruebas	500	mm	Cruise
Características de carga			
Estado de carga	Distancia al centro gravedad		
Vacío	1200	mm	Estimado
Medio	1200	mm	Estimado
Lleno	1200	mm	Estimado
Peso nominal			
En vacío	474	kg	Ficha
Bruto	690	kg	Ficha
Aerodinámica			
Área frontal	1,59	m ²	Ficha
Cd	0,402		Ficha

Tabla 11. Modelado de las ruedas delanteras en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Ruedas delanteras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas delanteras		
Observación 1	125/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,3414	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	1353,8	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	233	mm	Calculado
Dinámico	245	mm	Calculado

Tabla 12. Modelado de las ruedas traseras en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Ruedas traseras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas traseras		
Observación 1	145/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,4251	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	2030,7	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	244	mm	Calculado
Dinámico	259	mm	Calculado

Tabla 13. Factor de resistencia a la rodadura para ruedas delanteras y traseras en el BEV.

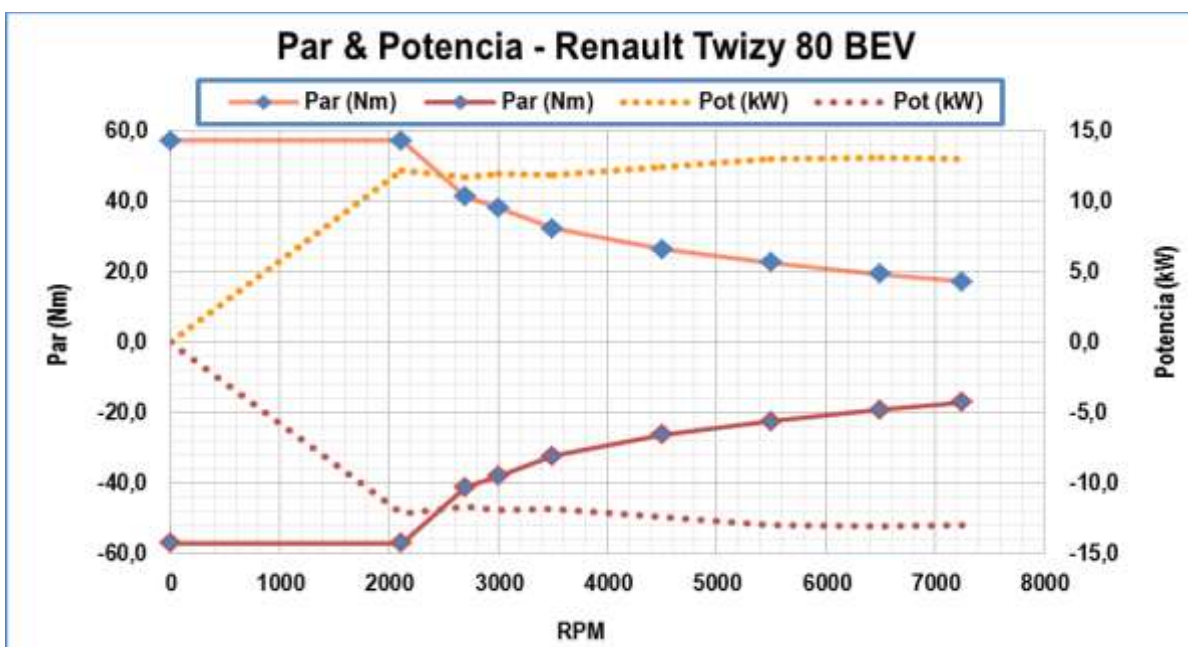
Curva de factor de resistencia a la rodadura			
Se activa en Cruise curva estándar de factor de resistencia a la rodadura según velocidad del vehículo.			
El Factor de Resistencia Neto se calcula en base a los cálculos de dinámica vehicular del capítulo anterior.			
Velocidad (km/h)	Factor de Resistencia (%)	Neto	
0	1,0000	0,0100	
10	1,0625	0,0106	
20	1,1250	0,0113	
30	1,1875	0,0119	
40	1,2500	0,0125	
50	1,3125	0,0131	
60	1,3744	0,0137	
70	1,3796	0,0138	
80	1,3856	0,0139	
90	1,3924	0,0139	
100	1,4000	0,0140	
110	1,4084	0,0141	
120	1,4176	0,0142	
130	1,4276	0,0143	
140	1,4384	0,0144	
150	1,4500	0,0145	
160	1,4624	0,0146	

Tabla 14. Modelado de los frenos en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Frenos delanteros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco delanteros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	107	mm	Ficha
Momento de inercia	0,015	kg/m ²	Calculado
Frenos traseros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco traseros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	102	mm	Ficha
Momento de inercia	0,012	kg/m ²	Calculado

Tabla 15. Modelado del motor eléctrico en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Motor - Generador		
Observación 1	13 kW (17 hp) @ 7250 rpm		Ficha
Observación 2	57 Nm @ 2100 rpm		Ficha
Observación 3	AC inducción		
Tipo de motor	ASM		
Voltaje nominal	60	V	Ficha
Curva de Par			



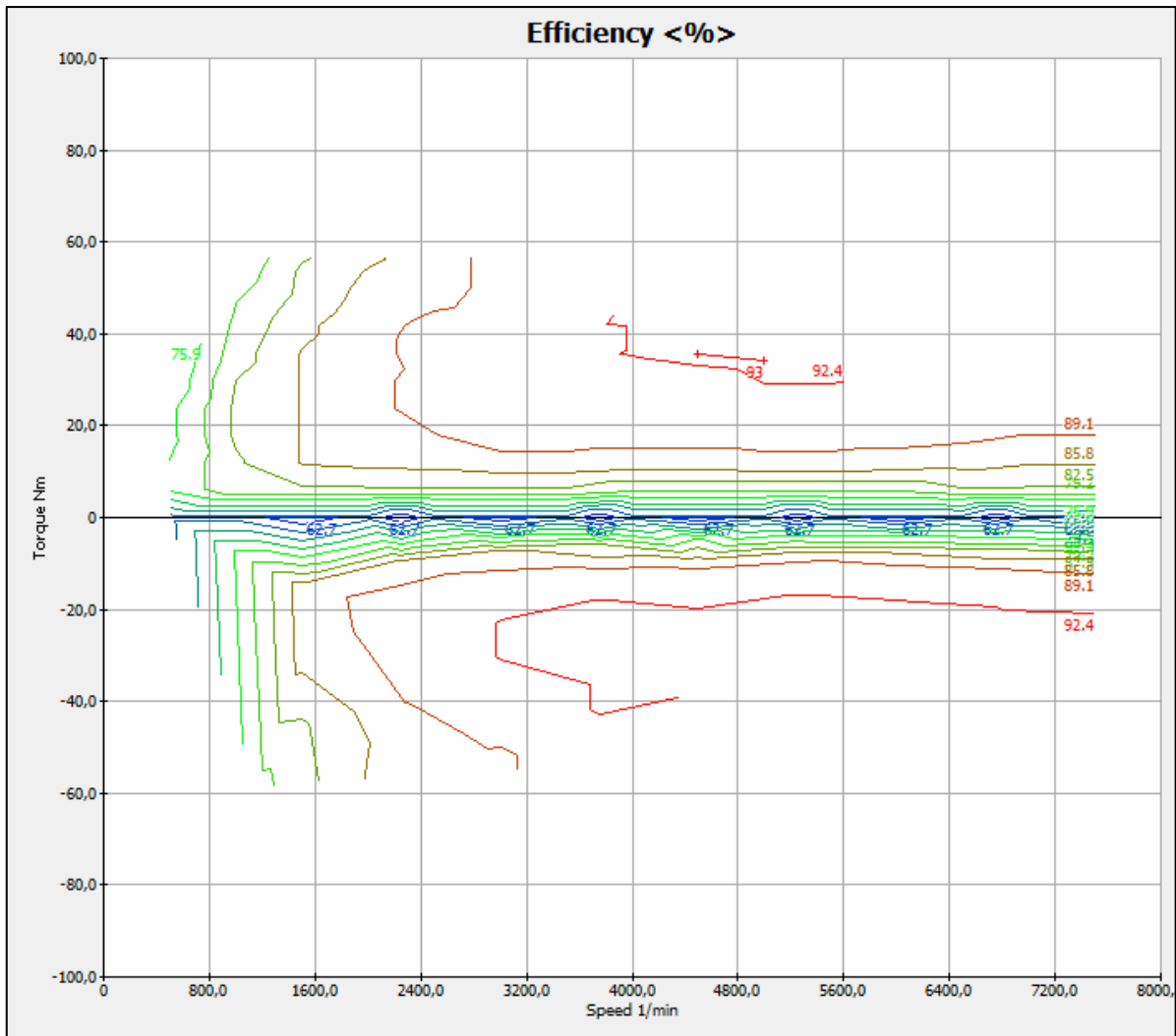


Fig. 17. Mapa de eficiencia del motor eléctrico en el BEV.

Tabla 16. Modelado del reductor en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Transmisión		
Observación 1	Reductor		
Relación de desmultiplicación	9,23		Ficha

Tabla 17. Modelado de la batería en el BEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Batería Ion-Litio 54 V		
Carga máxima de la celda	43	Ah	Ficha
Voltaje nominal de la celda	53,9	V	Ficha
Voltaje máx. de la celda	60,2	V	Estimado
Voltaje mín. de la celda	35,0	V	Estimado
Número de celdas por fila de celdas	1		Ficha
Número de filas de celdas	3		Ficha
Resistencia interna carga	0,042	Ω	Estimada
Resistencia interna descarga	0,031	Ω	Estimada
Estado de Carga			
SOC (%)	Voltaje (V)		Ficha
	20	54,8	
	30	55,2	
	40	55,8	
	50	56,3	
	60	56,8	
	70	57,4	
	80	57,9	
	90	58,4	
	100	58,9	

5 RESULTADOS Y ANÁLISIS DE LOS MISMOS

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos en la simulación en AVL CRUISE™ de las distintas configuraciones de trenes de potencia para el vehículo Renault Twizy y se realiza un post-procesado a los efectos de comparar el uno con el otro. En la Tabla 18 se recogen las potencias y pares máximos desarrollados por cada uno de los motores empleados en las configuraciones de los vehículos. En el caso del BEV el motor corresponde al original del Twizy 80; en la versión ICEV se ha utilizado el motor implantado en AVL CRUISE™ mediante la reducción de cilindrada en forma automática que realiza el mismo software, respetando la potencia máxima permitida de 15 kW; y para la versión HEV se ha procedido de idéntica forma pero se ha reducido aún más la cilindrada y la potencia ya que esta versión cuenta con el apoyo de un motor eléctrico, que corresponde al motor empleado por el mismo Twizy pero en su versión 45.

Tabla 18. Potencia y par máximo de los motores utilizados en las configuraciones del Twizy.

MOTOR	Características	Potencia Máxima	Par Máximo
Eléctrico (BEV)	Asíncrono 60 V Motor – Generador	13 kW (17 hp) @ 7250 rpm	57 Nm @ 2100 rpm
Térmico (ICEV)	Gasolina de 369 cm ³ 4T Monocilindro	14,8 kW (19,6 hp) @ 5400 rpm	29 Nm @ 3500 rpm
Térmico (HEV)	Gasolina de 249 cm ³ 4T Monocilindro	10,9 kW (14,6 hp) @ 5000 rpm	22 Nm @ 3500 rpm
Eléctrico (HEV)	Asíncrono 60 V Motor – Generador	7,7 kW (10 hp) @ 6000 rpm	33 Nm @ 2100 rpm

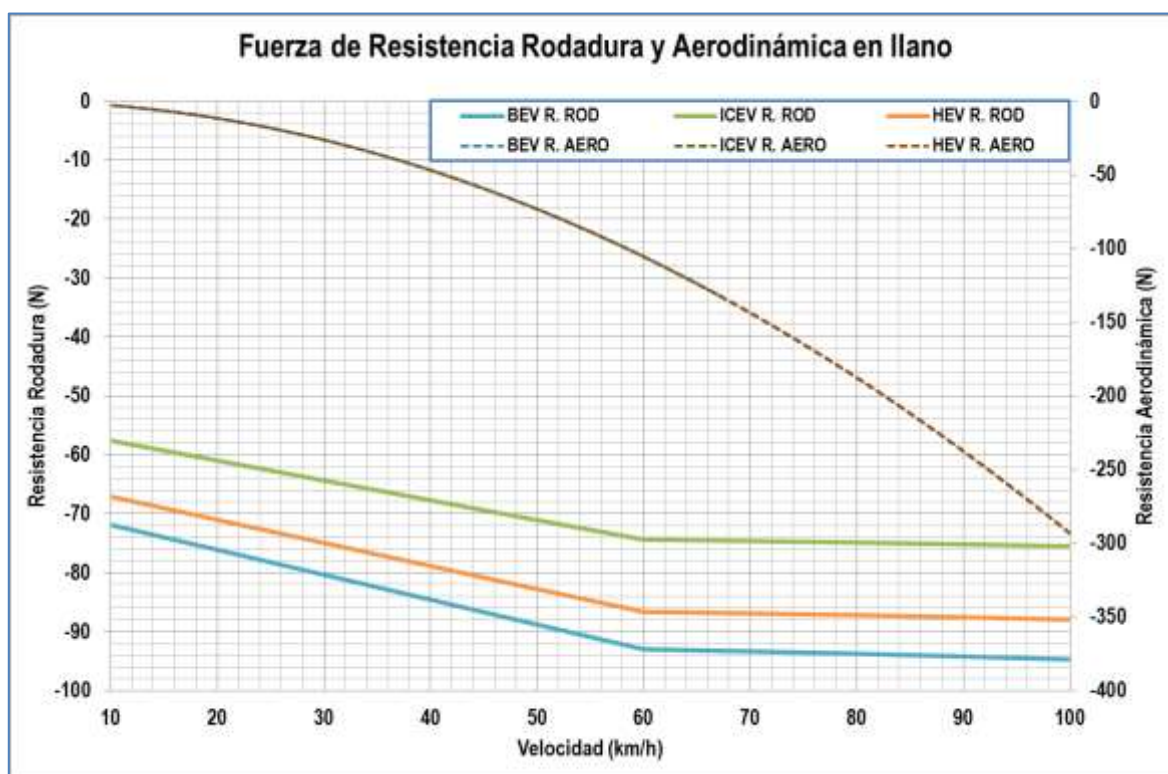


Fig. 18. Fuerzas de resistencia de rodadura y aerodinámica en llano para las configuraciones del Twizy.

La Fig. 18 recoge las fuerzas de resistencia para cada configuración del Twizy. El trazo continuo representa la fuerza de resistencia de rodadura, la cual es mayor para la versión BEV, luego la versión HEV y la menor corresponde a la versión ICEV, debido fundamentalmente al mayor peso respectivamente. El trazo discontinuo representa la fuerza de resistencia aerodinámica y dado que las tres configuraciones son idénticas, la fuerza también lo es.

5.1 Aceleración Máxima

En esta sección se observa el comportamiento de las tres configuraciones del Twizy (BEV, ICEV y HEV) cuando **se los somete a un ciclo de aceleración a plena carga**. En primer lugar se estudia la potencia que desarrolla y luego sus velocidades, en función del tiempo y la distancia recorrida.

5.1.1 Potencia

En las Fig. 19, Fig. 20, Fig. 21 y Fig. 22 se observan las potencias máximas que desarrollan los motores de las configuraciones BEV, ICEV y HEV (motor eléctrico y térmico) respectivamente, según AVL CRUISE™. Como se ha visto, **la categoría L7e no puede superar los 15 kW de potencia máxima** y, si se observa tanto el BEV como ICEV no superan estos valores, mientras que en el caso del híbrido es necesario sumar los valores de potencia tanto del motor eléctrico como el térmico (ambos giran al unísono) observando que tampoco supera los 15 kW.

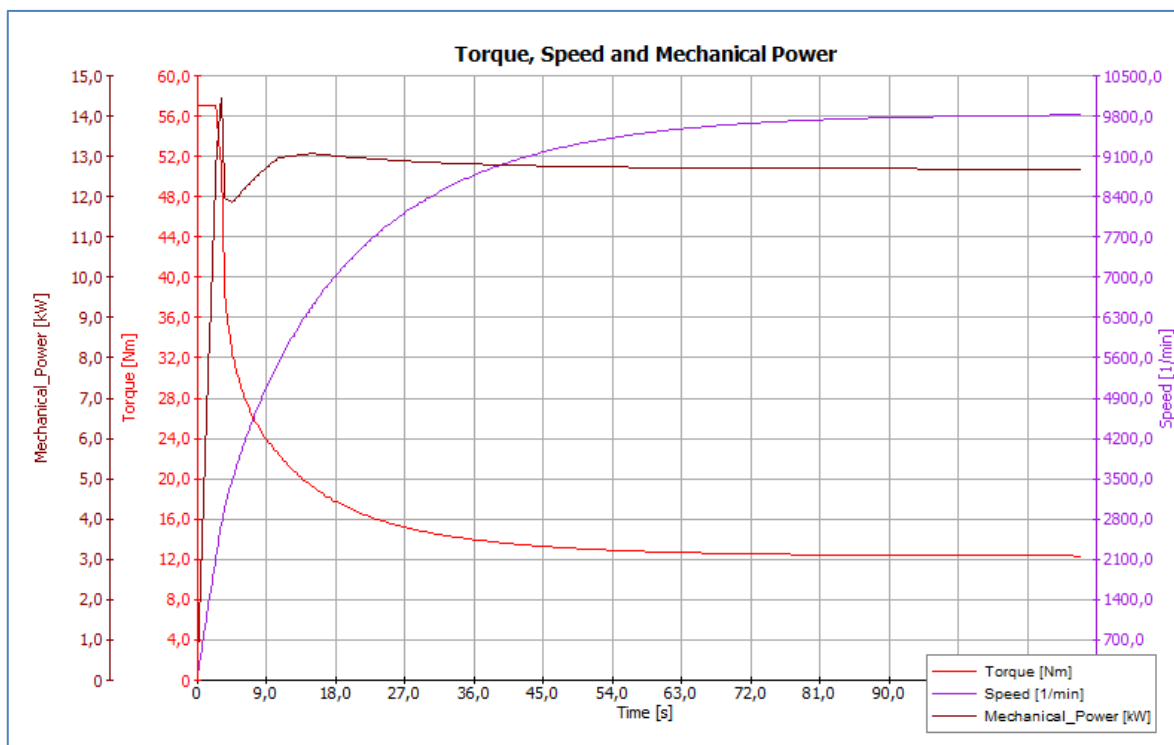


Fig. 19. Potencia y par a plena carga para el motor eléctrico del BEV.

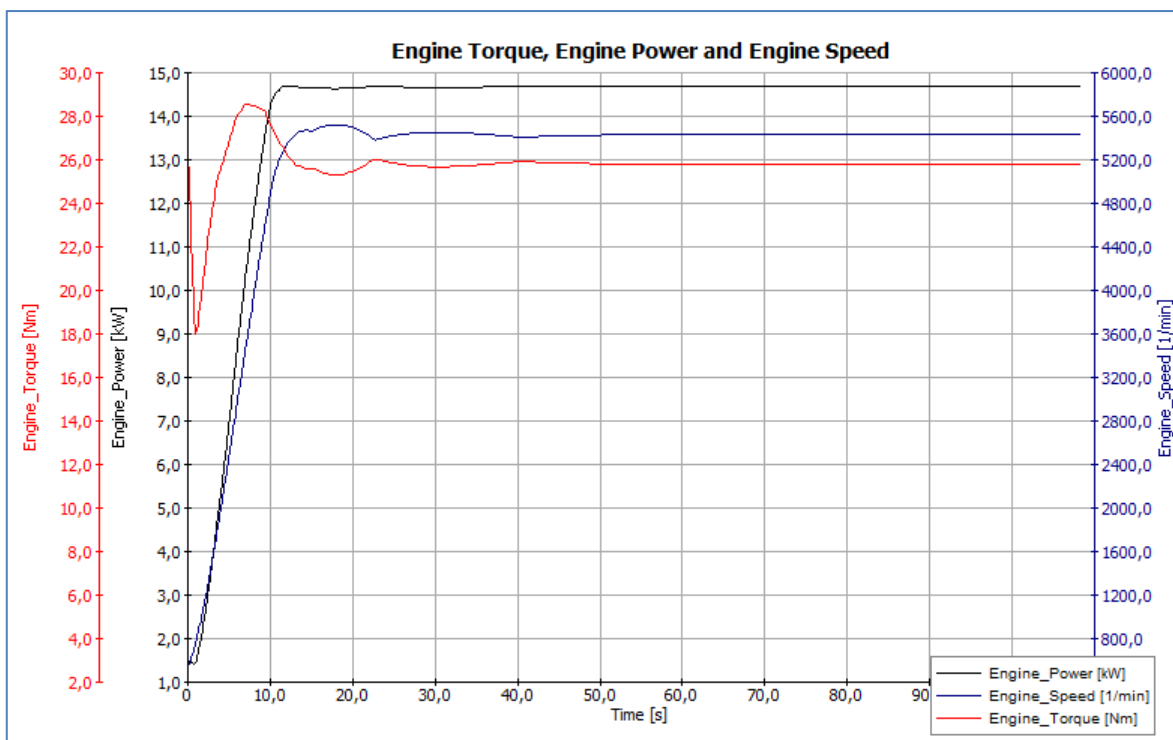


Fig. 20. Potencia y par a plena carga para el motor térmico del ICEV.

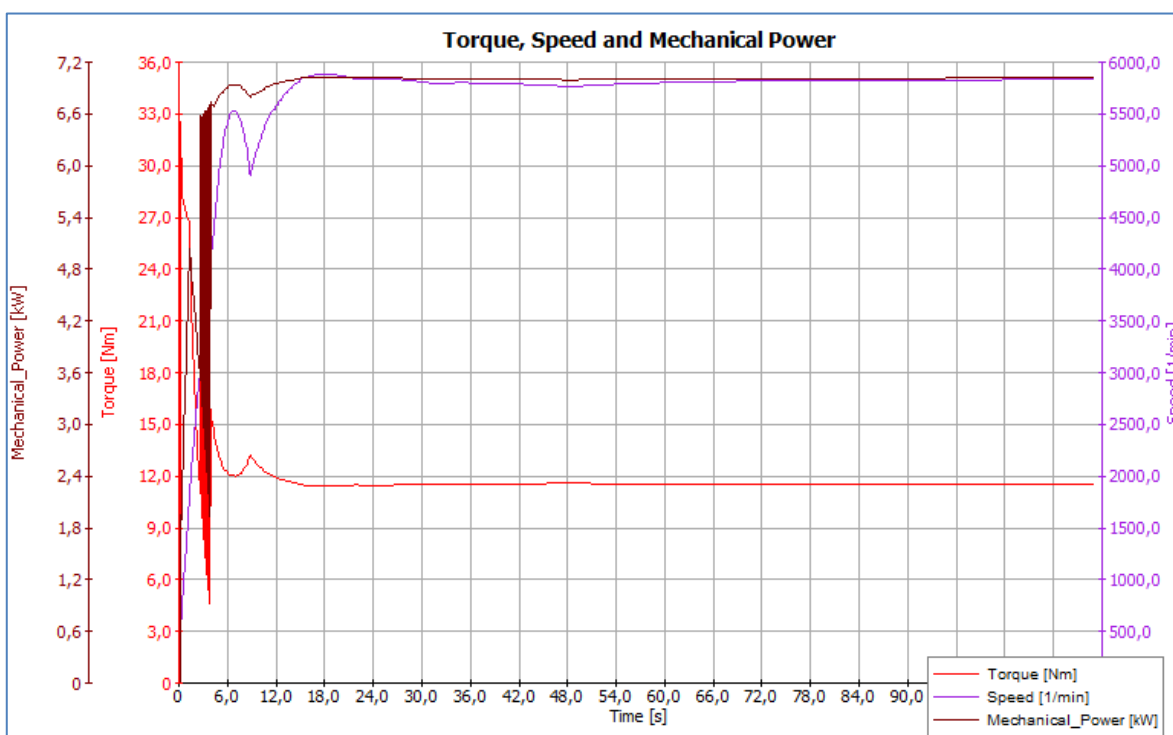


Fig. 21. Potencia y par a plena carga para el motor eléctrico del HEV.

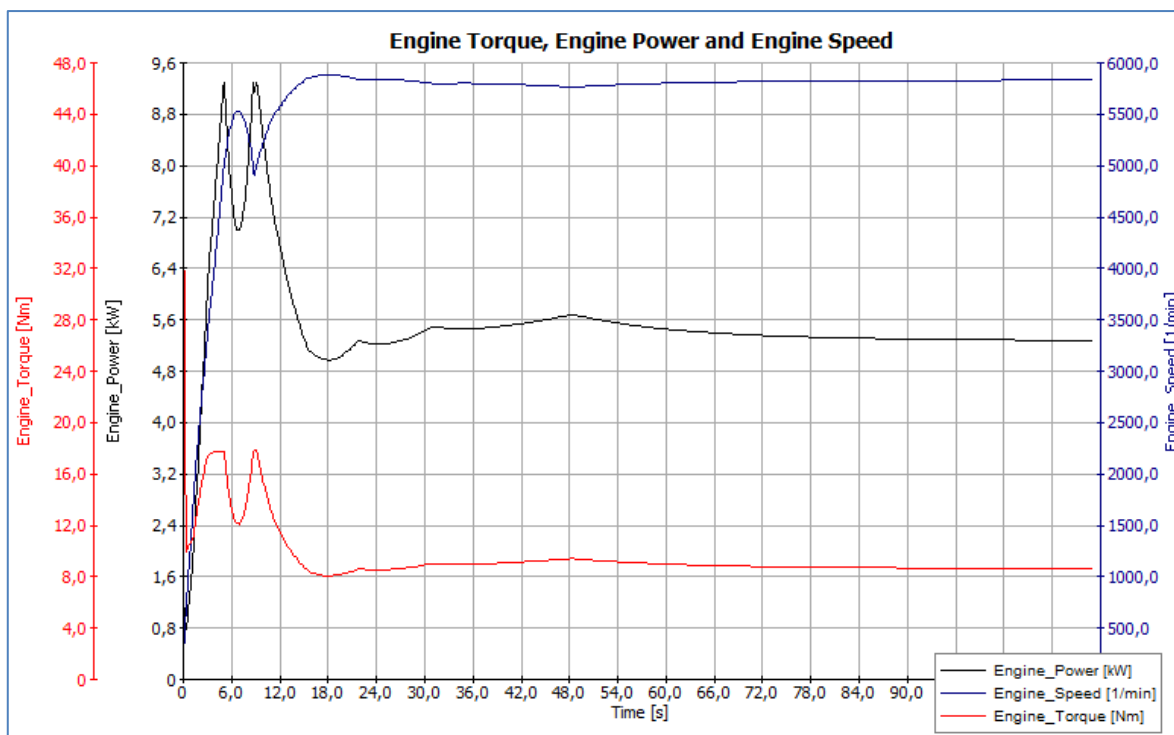


Fig. 22. Potencia y par a plena carga para el motor térmico del HEV.

5.1.2 Velocidad

La Fig. 23 recoge las aceleraciones de las tres configuraciones. Con trazo continuo se observan las velocidades de los vehículos mientras que los trazos discontinuos representan las distancias desplazadas en función del tiempo.

Pese a ser el de menor peso, **el Twizy convencional (ICEV) es el que desarrolla la menor velocidad máxima, 99 km/h versus 104 km/h y 112 km/h para el BEV y HEV respectivamente.** Esto se debe a que posee el motor de menor potencia máxima cuando se encuentra a altos regímenes de giro del motor, mientras que el Twizy eléctrico (BEV) e híbrido (HEV) puede desarrollar una mayor potencia final gracias a la posibilidad de incrementar su régimen de giro en el motor eléctrico, lo que significa que poseen una mayor potencia a altas velocidades.

Se ha estudiado la posibilidad de variar **la relación de desmultiplicación en la transmisión del vehículo convencional** logrando alcanzar velocidades mayores pero penalizando en sus tiempos de aceleración. Dado que se trata de un vehículo definido para el ámbito urbano, **se tuvo preferencia por mayores aceleraciones que velocidades altas.** Recordar que los vehículos de la categoría L7e no deben superar los 90 km/h.

También se destaca el **tiempo que transcurre de acelerar desde el reposo hasta los primeros 1000 metros, viendo que la configuración BEV tiene el menor tiempo, 49 versus 54 y 57 segundos,** gracias al mayor par que goza a bajos regímenes de giro con respecto a las otras dos configuraciones. Igualmente este valor representa una diferencia significativa ya que las tres versiones tienen tiempos similares. La diferencia más importante está en los primeros segundos de aceleración donde el Twizy BEV consigue acelerar con mayor ímpetu que las otras versiones.

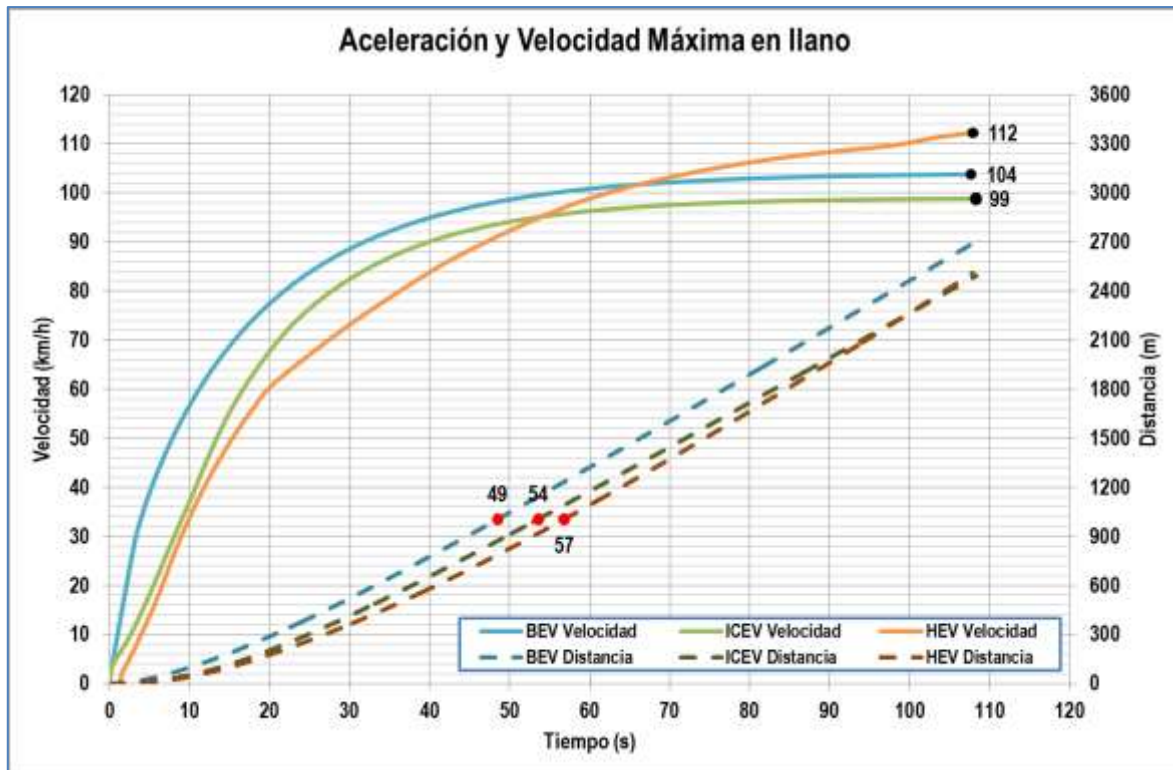


Fig. 23. Aceleración y velocidad máxima sin pendiente para las tres configuraciones del Twizy.

La Fig. 24 representa también la aceleración de los vehículos pero ampliada para los primeros 20 segundos. Se observa nuevamente la aceleración mayor del vehículo eléctrico gracias a su mayor par a bajos regímenes de giro del motor (57 Nm), mientras que la peor es para el vehículo híbrido lo cual también se corresponde con el menor par que representa su motor eléctrico (33 Nm) dado que a bajos regímenes en el HEV se prioriza el uso del motor eléctrico por sobre el térmico que prácticamente no entrega par como se ha observado en la Fig. 22. Además se observa que próximo a los 6 segundos el HEV tiene un ligero incremento en su velocidad, señal que indica que el motor térmico comienza a generar un par mayor pero aún insuficiente para superar a las restantes versiones.

También se destaca que según las prestaciones técnicas del fabricante Renault, la aceleración de 0 a 45 km/h para el Twizy 80 eléctrico es de 6,1 segundos (Group Renault, 2017), lo cual es inferior a los 6,5 segundos que se observan en la Fig. 24, pero esto se debe con probabilidad a que en la simulación realizada en AVL CRUISE™ se ha utilizado el peso máximo del vehículo, mientras que en el ensayo del fabricante se desconoce el peso considerado.

Se señala en la Fig. 24 los tiempos que suponen acelerar desde parado hasta **los primeros 100 metros viendo que la configuración BEV tiene el menor tiempo, 10,1 versus 13,8 y 15,0 segundos de las versiones ICEV y HEV respectivamente**, gracias al mayor par que goza a bajos regímenes de giro con respecto a las otras dos configuraciones. También se observa que los tiempos de **aceleración desde 0 a 50 km/h es de 7,8 segundos para la versión BEV, 13,4 segundos en el ICEV y 15,3 segundos en el HEV.**

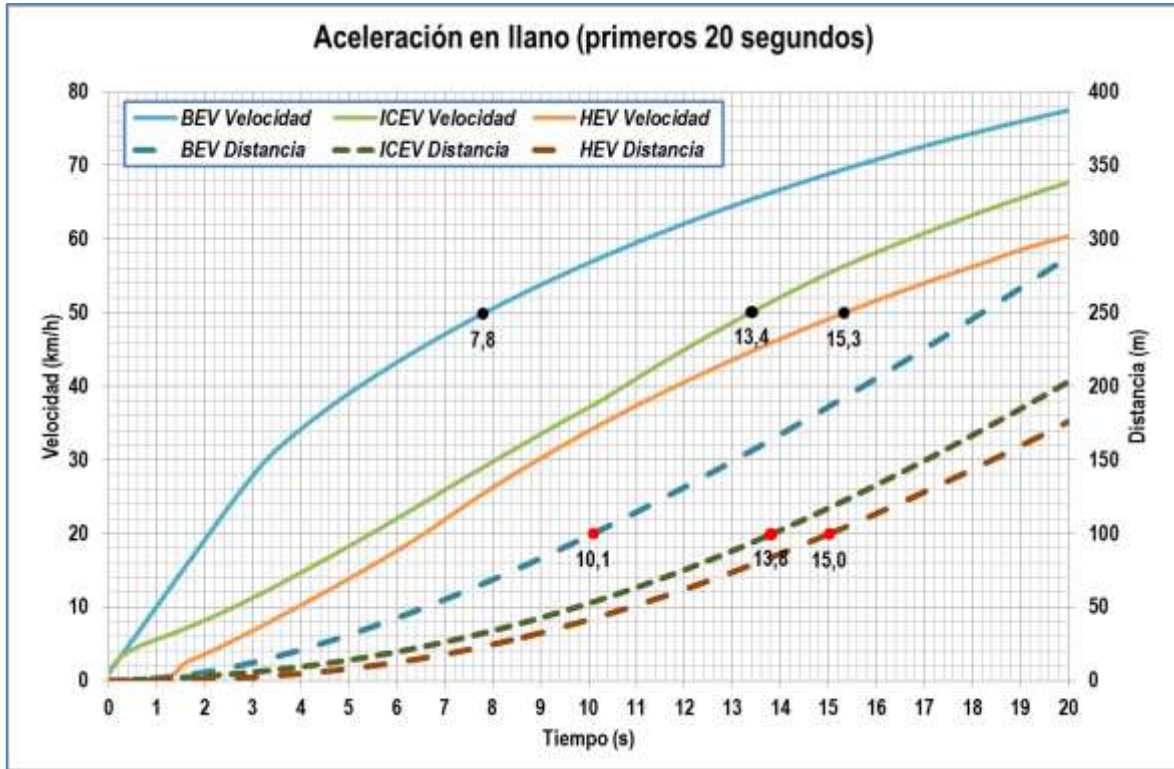


Fig. 24. Aceleración y velocidad sin pendiente para las tres configuraciones del Twizy ampliado a los primeros 20 segundos.

5.2 Ciclo WLTC Clase 2

5.2.1 Modelación del ciclo en AVL CRUISE™

Antes de pasar a los resultados, se debe mencionar que **ha sido necesario crear el ciclo WLTC Clase 2 en AVL CRUISE™** porque el mismo no se encuentra disponible dentro de los modelos preestablecidos en el software. Para esto se ha tomado el ciclo WLTC Clase 3 que viene como uno de los modelos del software y se realizaron los cambios en las velocidades y tiempos de acuerdo al ciclo WLTC Clase 2, así como las velocidades mínimas y máximas que se establecieron en ± 1 km/h respecto al valor objetivo. La Fig. 25 muestra el ciclo ya modelado en AVL CRUISE™.

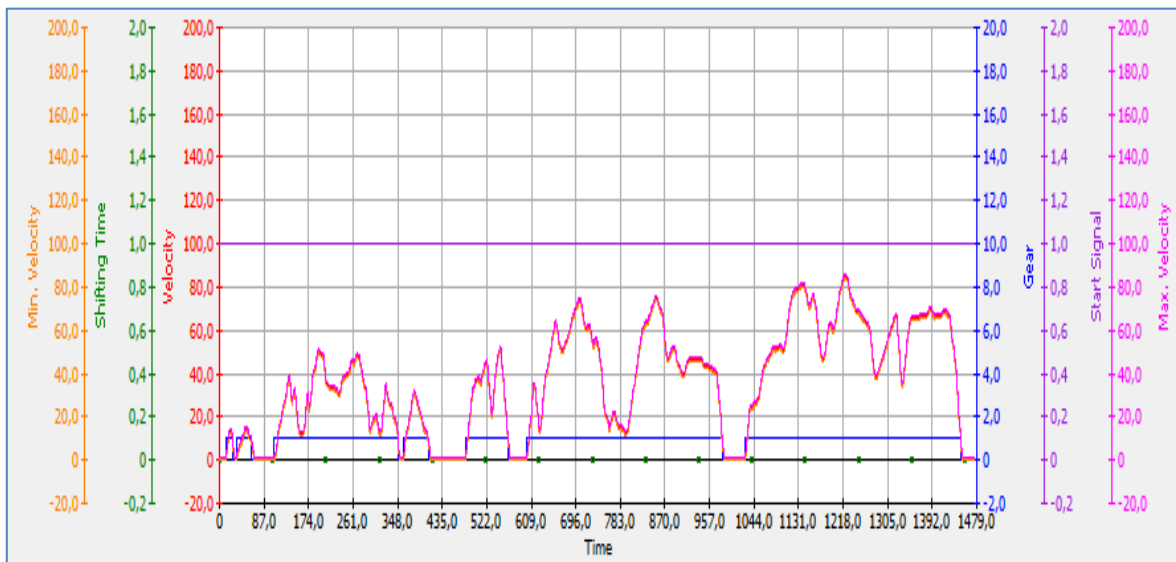


Fig. 25. Ciclo WLTC Clase 2 modelado en ALV CRUISE™.

5.2.2 Consumos

La Fig. 26 recoge los diferentes consumos acumulados de energéticos (electricidad y gasolina) que requieren las configuraciones del Twizy para simular el recorrido del ciclo WLTC clase 2 mediante el software AVL CRUISE™. Del gráfico se extraen los valores promedios de consumo a los 100 km los cuales se presenta en la Tabla 19. Se observa que el consumo eléctrico es realmente bajo si se considera el coste del kWh de energía eléctrica (dicho estudio de costes se desarrolla en el capítulo 0). Además se observa que **el consumo del modelo híbrido mejora aproximadamente un 25% el consumo de gasolina con respecto a la versión convencional para este tipo de ciclo urbano**, debido fundamentalmente a la regeneración de la energía durante la desaceleración del vehículo y, a una mejor optimización en el HEV mediante la incorporación de un motor térmico de menor cilindrada al empleado en el ICEV (369 cm³ versus 249 cm³), funcionando en conjunto con un motor – generador de menor potencia que el empleado en el BEV.

Tabla 19. Consumos de energéticos a los 100 km de las configuraciones del Twizy.

Consumo energético	
BEV (kWh/100 km)	8,56
ICEV (l/100 km)	2,66
HEV (l/100 km)	1,91

Según las prestaciones del BEV publicadas por el fabricante, el consumo de electricidad en el Twizy 80 asciende a 6,3 kWh/100 km según ciclo ECE-15 (Group Renault, 2017). Este valor es un 26% inferior al valor de 8,56 kWh/100 km que se obtiene en la simulación realizada en AVL CRUISE™ mediante el ciclo WLTC clase 2. Resulta un dato cercano si se tiene en consideración que el ciclo ECE-15 tiene menores magnitudes de aceleración, y además para el caso simulado se ha considerado la masa máxima del vehículo.

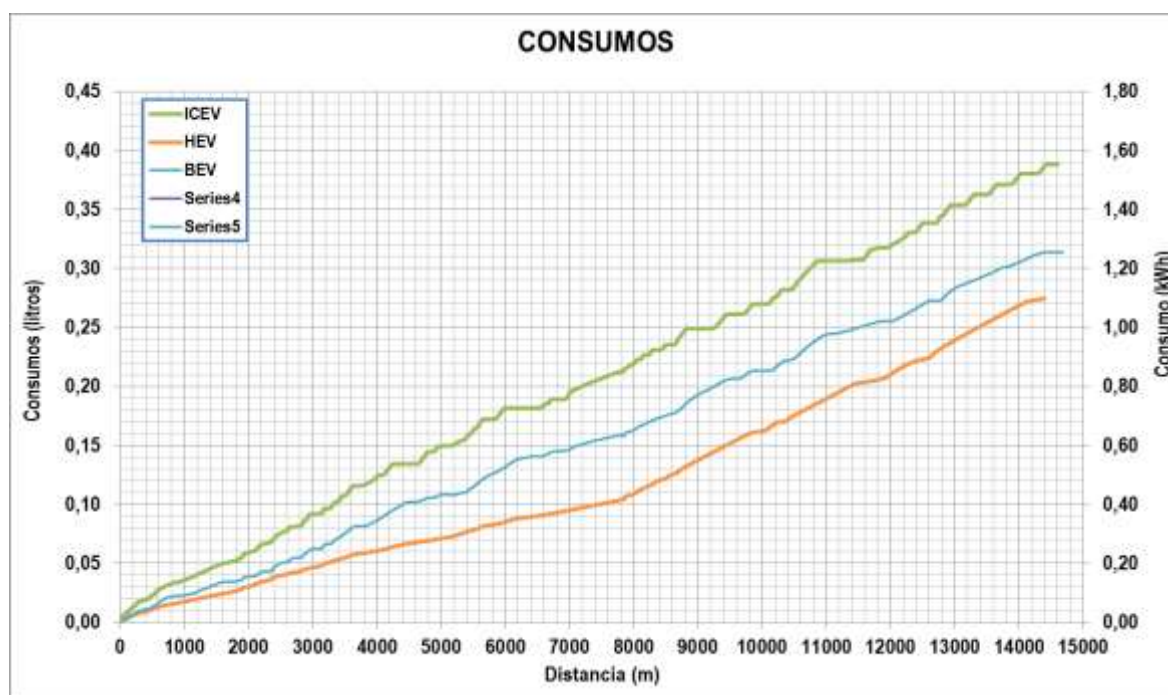


Fig. 26. Acumulado de consumos de energético durante la simulación del ciclo WLTC clase 2 en AVL CRUISE™.

5.2.3 Emisiones

La Fig. 27 recoge las emisiones registradas mediante AVL CRUISE™ en la simulación del ciclo WLTC Clase 2, agrupadas para las tres versiones del Twizy con el fin de observar las diferencias que surgen durante la simulación. Se observa que la versión BEV es la de menor emisión seguida por la versión HEV y ICEV respectivamente, lo cual está en línea con los menores consumos que se describieron anteriormente.

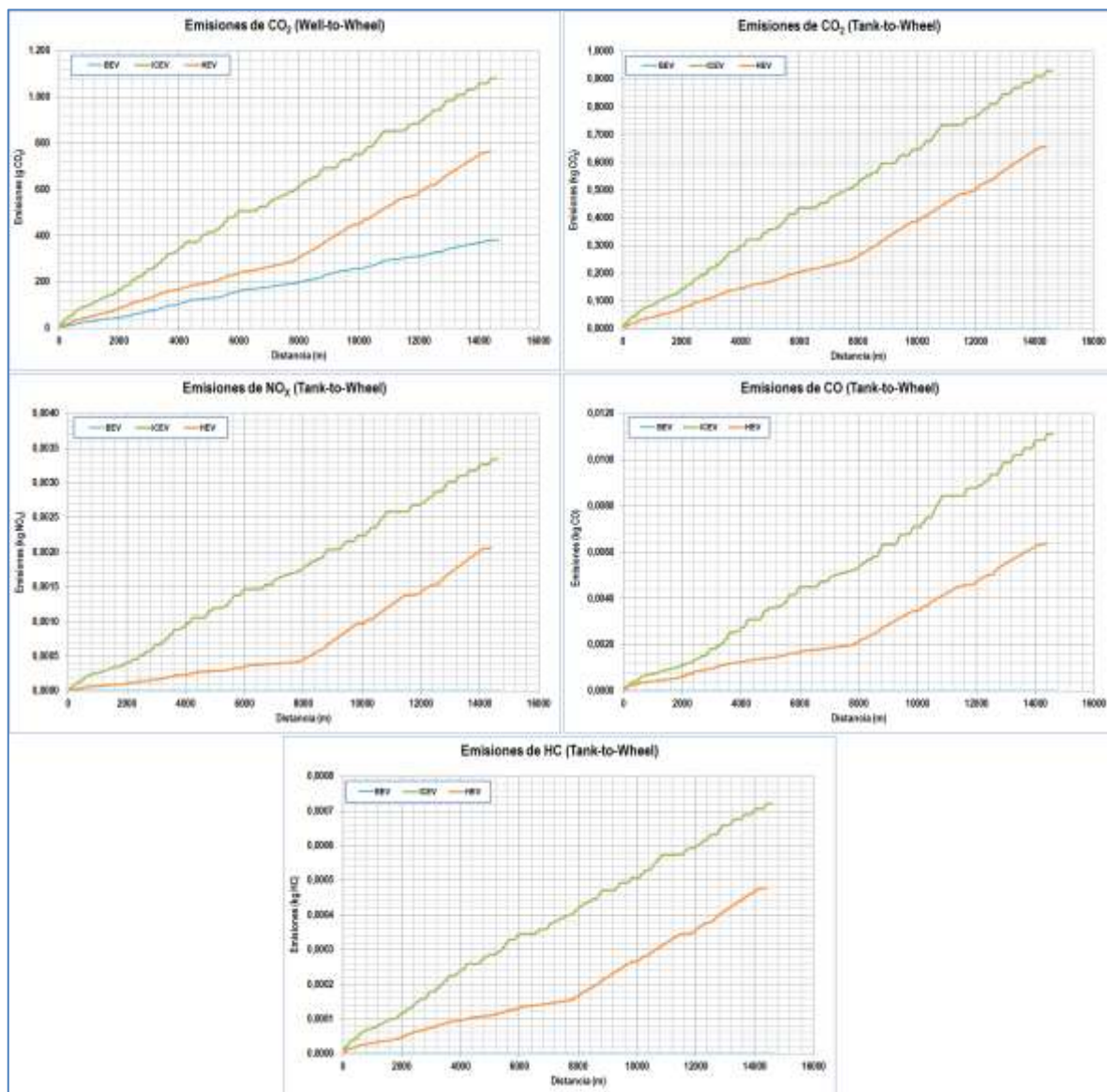


Fig. 27. Emisiones acumuladas durante el ciclo WLTC clase 2 simulado en AVL CRUISE™.

De los gráficos anteriores se extraen los valores promedio de emisiones por kilómetro, valores que se procesan y se presenta en la Fig. 28. Se observa que las **emisiones de CO₂ TtW son nulas para el BEV**, mientras que en el caso de las **WTW son mayores para el ICEV (74 gCO₂/km)**, seguido por el HEV (53 gCO₂/km) y el BEV (26 gCO₂/km) considerando el promedio enero – octubre de emisiones de CO₂ del mix eléctrico español para 2017, el cual ha sido de 279 gCO₂/kWh (Red Eléctrica de España, 2017).

Para el caso de otros territorios, como la comunidad autónoma de Canarias o Islas Baleares, que presentaron para el mismo período un promedio de **emisiones de 775 y 719 gCO₂/kWh respectivamente**, debido fundamentalmente a que su producción de energía eléctrica se basa en combustibles fósiles (el sistema peninsular español posee un mix más variado empleando energías

renovables y energía nuclear que bajan notoriamente los niveles medios de emisión de CO₂ por kilovatio hora producido), **incrementan las emisiones de CO₂ para el BEV en estos territorios hasta los 72 y 67 gCO₂ por kilómetro lo cual representa valores similares a los emitidos por el ICEV (74 gCO₂/km) y mayores incluso que en el HEV (53 gCO₂/km)**. Esto pone de manifiesto que los vehículos eléctricos logran disminuir el nivel de emisiones de CO₂ siempre que se tenga una matriz energética con un componente importante de su producción con bajas emisiones.

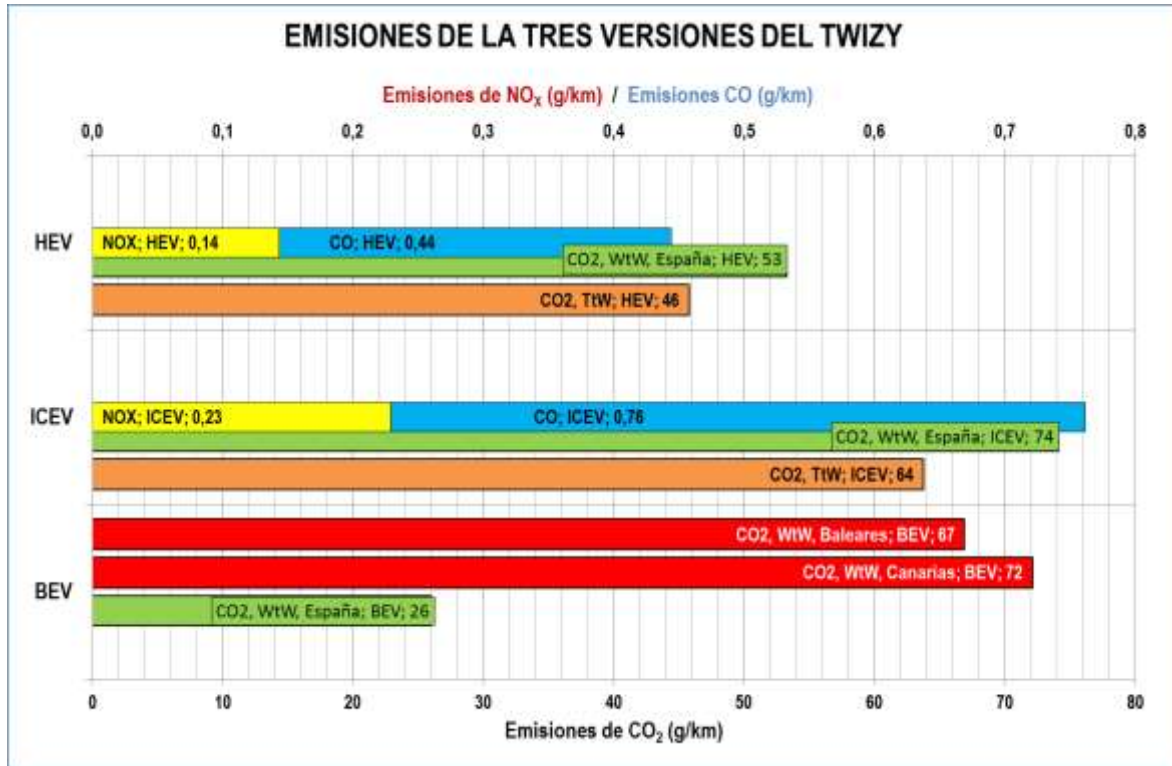


Fig. 28. Emisiones por kilómetro para las configuraciones del Twizy.

6 ESTUDIOS DE COSTES

Se realiza una estimación de los **costes que implican para el usuario final** cada una de las configuraciones del Twizy analizadas. Para el cálculo se tiene en cuenta el coste inicial de adquisición del vehículo, su depreciación para evaluar su valor residual, los costes de mantenimiento, coste de reposición y/o alquiler de baterías (si corresponde) y coste de los energéticos utilizados para ocho situaciones donde se simulan la adquisición y uso **del vehículo por un período** de años y kilómetros al año, a saber: cuatro a **5 años y cuatro a 10 años, cada una evaluada para 2.500, 5.000, 7.500 y 10.000 kilómetros por año**, valores representativos para un vehículos de características urbanas.

Se omiten otros costes relacionados con contingencias que pueden ocurrir y en consecuencia pueden tener costes muy variados dependiendo de los componentes a reemplazar y las reparaciones a efectuar.

6.1 Costes de adquisición de los vehículos

Los costes de adquisición pueden variar para la **configuración eléctrica**, de acuerdo a si el cliente adquiere la batería en propiedad o si la alquila. Se evalúan ambas configuraciones considerando los precios de mercado a enero de 2018 con impuestos y ayudas del gobierno incluidas (ver anexo 10.1). Para el caso de la opción en **alquiler de la batería, su coste varía entre € 52 y € 56 al mes** de acuerdo a si los kilómetros recorridos al año son iguales o inferiores a 7500 km o superiores respectivamente (máximo 10000 al año), siempre en la opción con contrato de alquiler superior a 5 años (Renault España, 2018a).

Por otra parte, el coste de adquisición del **vehículo convencional** se estima en base al precio del Twizy 45 sin baterías y adicionando un 15% con el fin de compensar la instalación, montaje y componentes del tren de potencia con motor de combustión en sustitución del tren de potencia eléctrico. También se considera que los costes de investigación y desarrollo en el tren de potencia ICEV en un fabricante como Renault que cuenta con el know-how de décadas de experiencia, permiten optimizar el precio de venta en esta versión. El resultado procura mantener coherencia en el precio de salida al mercado para un vehículo cuadríciclo de estas características, con precios que no superen a las versiones que el mismo fabricante dispone en el mercado pero pertenecen a una categoría superior, por ejemplo el Renault Clio y/o Dacia Sandero, ambas se pueden encontrar por € 9.750 y € 7.036 respectivamente en su versión de entrada a la gama (Renault España, 2018b) (Dacia España, 2018). También se observa que la diferencia de precios entre la versión BEV y ICEV suele ser de 30% a 50% inferior para el ICEV (incluido descuentos e incentivos del gobierno en la versión BEV), y en el caso de la estimación para el precio del **Twizy ICEV es 34% inferior a su equivalente versión BEV con batería incluida**.

Para el **vehículo híbrido**, dado que se mantiene el motor eléctrico y se unifica mediante la caja de cambios al motor de combustión interna, se elige como base al Renault Twizy 45 y se adiciona un 15% que corresponde a la instalación, montaje y componentes del tren de potencia con motor de combustión. También se adiciona una tercera parte del costo de la batería, dado que el vehículo híbrido según este estudio mantiene en el Twizy una tercera parte de la capacidad de la batería que este monta de originalmente como vehículo BEV. Al igual que la versión del Twizy con tren de potencia ICEV, se intenta mantener coherencia en los precios de mercado donde se observa que un HEV suele ser de 15% a 20% superior en precio al público con respecto a su versión ICEV, por ejemplo en la gama Toyota Auris se tiene a la versión Active tanto con ICEV como HEV por € 16.450 y € 19.650 respectivamente (Toyota España, 2018) lo cual es 19% superior. En **el caso del Twizy HEV es 20% superior a su equivalente versión ICEV**.

Finalmente obtenemos los costes del Renault Twizy para cada una de las versiones ICEV, HEV y BEV en la Tabla 20.

Tabla 20. Precios al público de las alternativas de Renault Twizy.

VEHÍCULO	Eléctrico (Baterías Alquiladas)	Eléctrico (Baterías adquiridas)	Gasolina	Híbrido
Coste de compra (€)	6.820	11.320	7.487	8.987

6.2 Valor residual de los vehículos

La depreciación **se estima de acuerdo a los años y kilómetros de uso** del vehículo de acuerdo a la siguiente fórmula:

$$Depreciación(\%) = 1 - (1 - dep(\%/año))^{N^{\circ} \text{ de años}} \cdot (1 - dep(\%/25000))^{\frac{\text{Kilómetros}}{25000}}$$

Donde la $dep(\%/año)$ corresponde al porcentaje de depreciación del vehículo por año y la $dep(\%/25000)$ corresponde al porcentaje de depreciación del vehículo cada 25.000 kilómetros recorridos. Luego de varias iteraciones en base al mercado español de vehículos usados, se concluye que un 15% y 5% son valores representativos para la $dep(\%/año)$ y $dep(\%/25000)$ respectivamente, en el rango de 1 a 15 años y hasta los 200.000 kilómetros.

En la Tabla 21 se observan los valores de **depreciación para los ocho casos de estudio**, los cuales multiplicados por el coste de compra de cada vehículo visto en la sección anterior da el valor residual de cada uno como lo recoge la Tabla 22.

Tabla 21. Depreciación en cada caso de estudio.

Depreciación	km/año	años	km Total	€/mes	Depreciación
5 años y 2500 km/año	2.500	5	12.500	52	57%
5 años y 5000 km/año	5.000	5	25.000	52	58%
5 años y 7500 km/año	7.500	5	37.500	56	59%
5 años y 10000 km/año	10.000	5	50.000	56	60%
10 años y 2500 km/año	2.500	10	25.000	52	81%
10 años y 5000 km/año	5.000	10	50.000	52	82%
10 años y 7500 km/año	7.500	10	75.000	56	83%
10 años y 10000 km/año	10.000	10	100.000	56	84%

Tabla 22. Valor residual de cada vehículo para cada caso de estudio.

Valor residual	Eléctrico (Baterías Alquiladas)	Eléctrico (Baterías adquiridas)	Gasolina	Híbrido
Coste de compra (€)	6.820	11.320	7.487	8.987
A los 5 años y 2500 km/año (€)	2.949	4.896	3.238	3.886
A los 5 años y 5000 km/año (€)	2.875	4.772	3.156	3.788
A los 5 años y 7500 km/año (€)	2.802	4.651	3.076	3.692
A los 5 años y 10000 km/año (€)	2.731	4.533	2.998	3.599
A los 10 años y 2500 km/año (€)	1.276	2.117	1.400	1.681
A los 10 años y 5000 km/año (€)	1.212	2.011	1.330	1.597
A los 10 años y 7500 km/año (€)	1.151	1.911	1.264	1.517
A los 10 años y 10000 km/año (€)	1.094	1.815	1.201	1.441

6.3 Coste de mantenimiento

El coste de mantenimiento puede variar de un fabricante a otro y un estudio pormenorizado podría componer un trabajo académico en sí mismo. Por esto, se realiza una estimación en base a un porcentaje del coste de adquisición de cada vehículo, intentando mantener coherencia con los costes de mercado actuales para un vehículo urbano. Se decide aplicar como **coste de mantenimiento cada 5000 kilómetros, un 0.5% de su coste de adquisición a los BEV y 1.5% tanto a los ICEV como los HEV de su coste de adquisición**, como se recoge en la Tabla 23.

Tabla 23. Coste de mantenimiento de cada vehículo.

VEHÍCULO	Eléctrico (Baterías Alquiladas)	Eléctrico (Baterías adquiridas)	Gasolina	Híbrido
Coste de compra (€)	6.820	11.320	7.487	8.987
Mantenimiento (€/5000 km)	34	34	112	135

6.4 Coste de energéticos

En los casos estudiados los costes de energéticos se resumen al precio de kWh de electricidad en el domicilio particular de cada usuario y al precio de la gasolina en la estación expendedora de combustibles.

Para el caso de la **gasolina** se selecciona el precio medio de la gasolina en España para el último trimestre del año 2017, el cual asciende a **1,22 por litro** (GlobalPetrolPrices, 2018).

Para el caso de la **electricidad** se selecciona el precio medio de la electricidad en España en 2017, para la factura eléctrica de los consumidores con una potencia contratada no superior a 10 kW y que estén acogidos al PVPC (Precio Voluntario para el Pequeño Consumidor), el cual es **€ 118,98 por megavatio hora** (Red Eléctrica de España, 2018).

6.5 Comparativo de costes

En base a los datos detallados en las secciones anteriores se realizan los cálculos y se obtienen los resultados que se observan en la Fig. 29 y Fig. 30.

En los gráficos queda de manifiesto que las versiones ICEV y HEV son marcadamente más económicas para el usuario que las versiones BEV. En el caso **del ICEV es entre un 21% y 43% (entre 5100 y 1600 euros) más económica que la versión BEV** en su opción con alquiler de baterías dependiendo fundamentalmente del número de kilómetros rodados.

Para el caso del **HEV** las diferencias son menores que el caso de ICEV pero también **se tiene un ahorro entre 15% y 34% (entre 4100 y 1200 euros) con respecto a la versión BEV** en su opción con alquiler de baterías dependiendo nuevamente del número de kilómetros rodados.

Se observa que esta ventaja de coste disminuye a medida que los kilómetros rodados aumentan, debido fundamentalmente al costo superior del combustible frente a la energía eléctrica. Dado que en entornos urbanos el número de kilómetros rodados por los usuarios suele ser inferior a los valores utilizados en este estudio, se deduce que **desde el punto de vista del coste se debería disminuir el coste de alquiler y/o adquisición de las baterías o aumentar la distancia entre los costes del combustible y la energía eléctrica para que el BEV resulte rentable actualmente**. Los costes de los energéticos pueden variar pero son variables que dependen del mercado. Por el contrario, el coste de las baterías depende de los fabricantes y la tendencia de los últimos años muestra que vienen disminuyendo su coste.

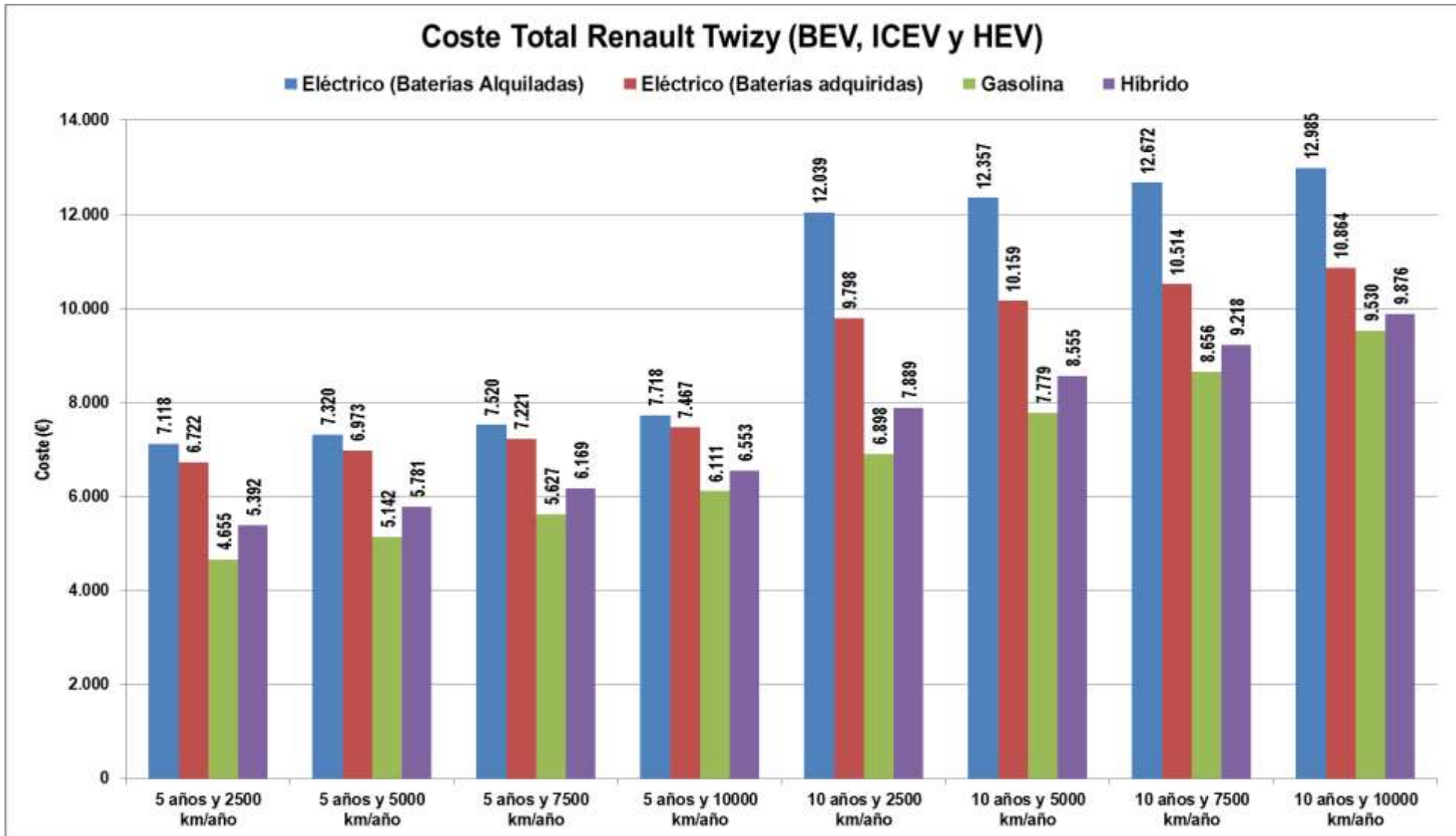


Fig. 29. Coste total del Renault Twizy en las versiones BEV con alquiler o adquisición de baterías, ICEV y HEV.

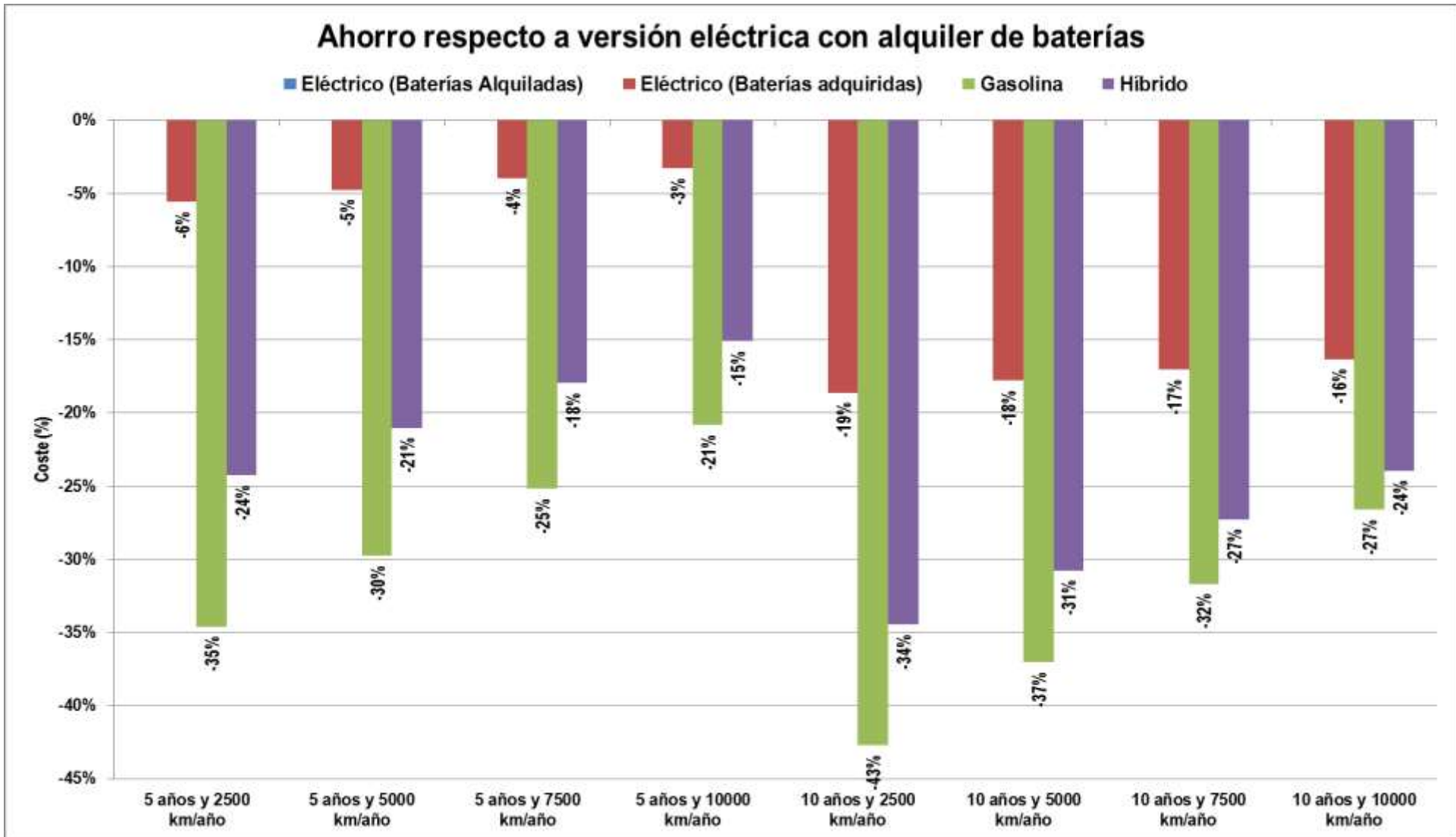


Fig. 30. Porcentaje de ahorro total del Renault Twizy en las versiones BEV con adquisición de baterías, ICEV y HEV con respecto a la versión BEV con alquiler de baterías.

7 CONSUMOS, EMISIONES DE CO₂ Y AUTONOMÍAS

En este capítulo se realiza un estudio de los consumos, emisiones de CO₂ y autonomías de las configuraciones del Twizy estudiadas contra varias opciones de vehículos livianos (también llamados citycar, urbancar o minicar) disponibles en el mercado español, utilizando los balances de energía detallados en el capítulo 3 y los resultados obtenidos mediante la simulación en el software AVL CRUISE™ para las tres configuraciones del Twizy.

7.1 Consumos urbanos según ciclo WLTC Clase 2

La Fig. 31 recoge los resultados de los consumos de gasolina / electricidad para distintos vehículos según ciclo WLTP clase 2, incluyendo las configuraciones estudiadas del Renault Twizy.

En primer lugar **se observa los bajos consumos tanto de electricidad como de gasolina que tiene el Renault Twizy frente a otras opciones del mercado**, lo cual lo convierte en una alternativa excelente desde el punto de vista de consumos de energía. También se observa que las alternativas en vehículos de gasolina de pequeñas dimensiones son prácticamente inexistentes, lo cual convierte al Twizy ICEV o HEV en una opción muy interesante.

7.2 Emisiones urbanas según ciclo WLTC Clase 2

La Fig. 32 recoge los resultados de las emisiones de CO₂ para distintos vehículos según ciclo WLTP clase 2, incluyendo las configuraciones estudiadas del Renault Twizy.

Para el caso de los vehículos eléctricos se muestran las emisiones Well-to-Wheel (WtW) dado que las emisiones Tank-to-Wheel (TtW) son nulas para este tipo de vehículos. En el caso de los vehículos convencionales se recogen tanto las emisiones TtW como las emisiones WtW.

Si se comparan las configuraciones de BEV, ICEV y HEV del Renault Twizy frente a la gama de vehículos urbanos, al igual que se observó con el consumo de carburantes, éstas tienen un nivel de emisiones de CO₂ notablemente inferiores, lo cual permite una disminución importante del impacto ambiental que se presenta en los ámbitos urbanos.

Por otra parte, si se estudian las configuraciones del Renault Twizy, se observa que las emisiones de CO₂ globales de las versiones a gasolina son un 100% a 200% mayores a la eléctrica en sus configuraciones de HEV y ICEV respectivamente. Estos resultados son de esperar en países como España donde el mix eléctrico desde enero a octubre de 2017 ha emitido *279 g CO₂ por kWh* generado (promedio en bornes de las centrales – sin incluir rendimiento estimado 0,92 del transporte y distribución de energía eléctrica que se toma para el cálculo de energía primaria nombrado anteriormente) (Red Eléctrica de España, 2017), donde las fuentes de energía renovable y nuclear tiene un papel importante en el total de energía producida. Incluso se podrían alcanzar resultados superiores si estas últimas fuentes incrementan su presencia.

Sin embargo, en regiones particulares como Canarias con más de 3 millones de habitantes, la cual presenta una producción de energía eléctrica fuertemente basada en combustibles fósiles y tiene un mix eléctrico desde enero a octubre de 2017 que ha emitido *775 g CO₂ por kWh* generado (Red Eléctrica de España, 2017), las emisiones de CO₂ de los BEV no solo no son menores sino que pueden superar fuertemente las emisiones de los ICEV y HEV.

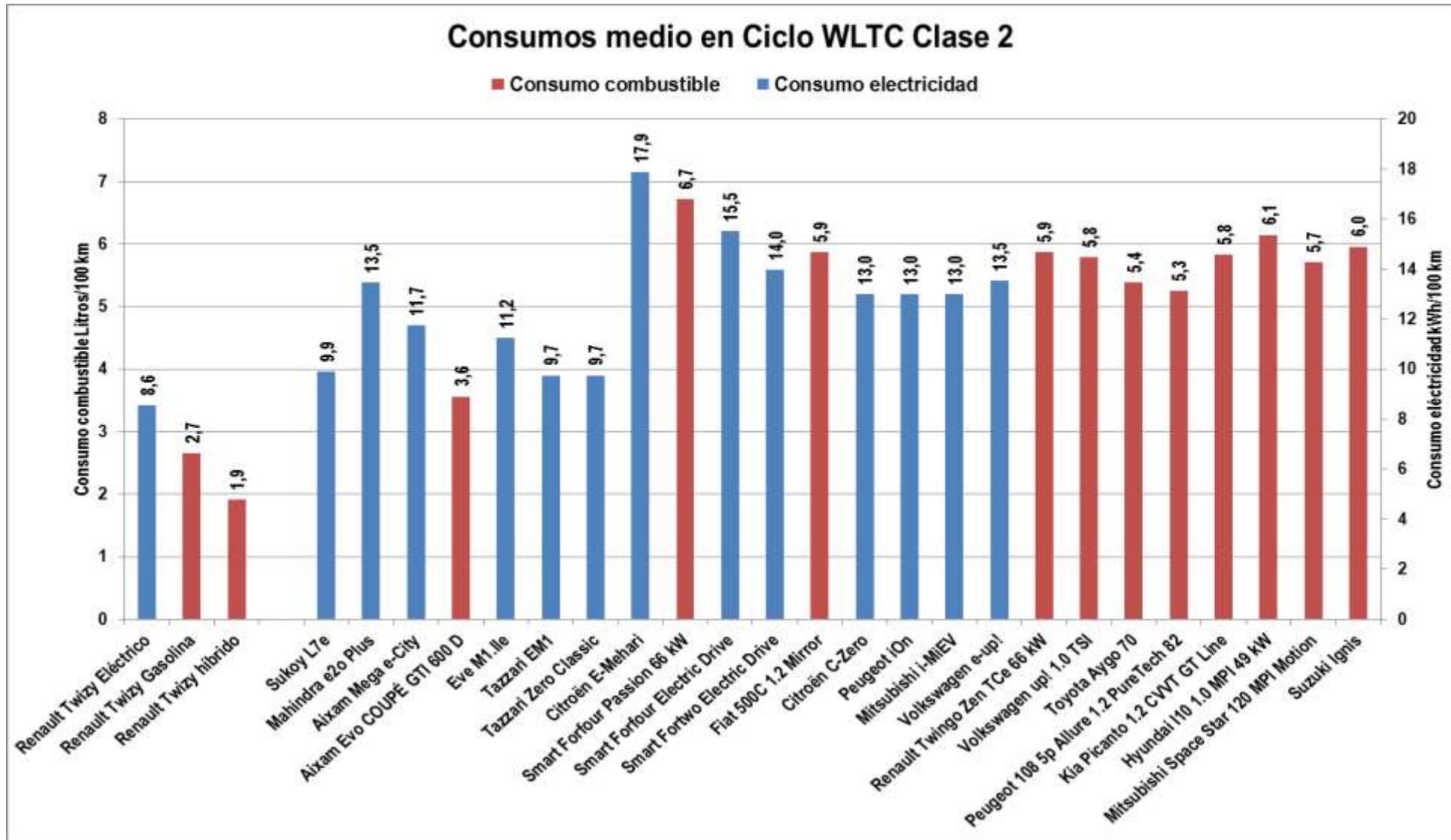


Fig. 31. Consumos medios de combustible / electricidad según ciclo WLTC clase 2.

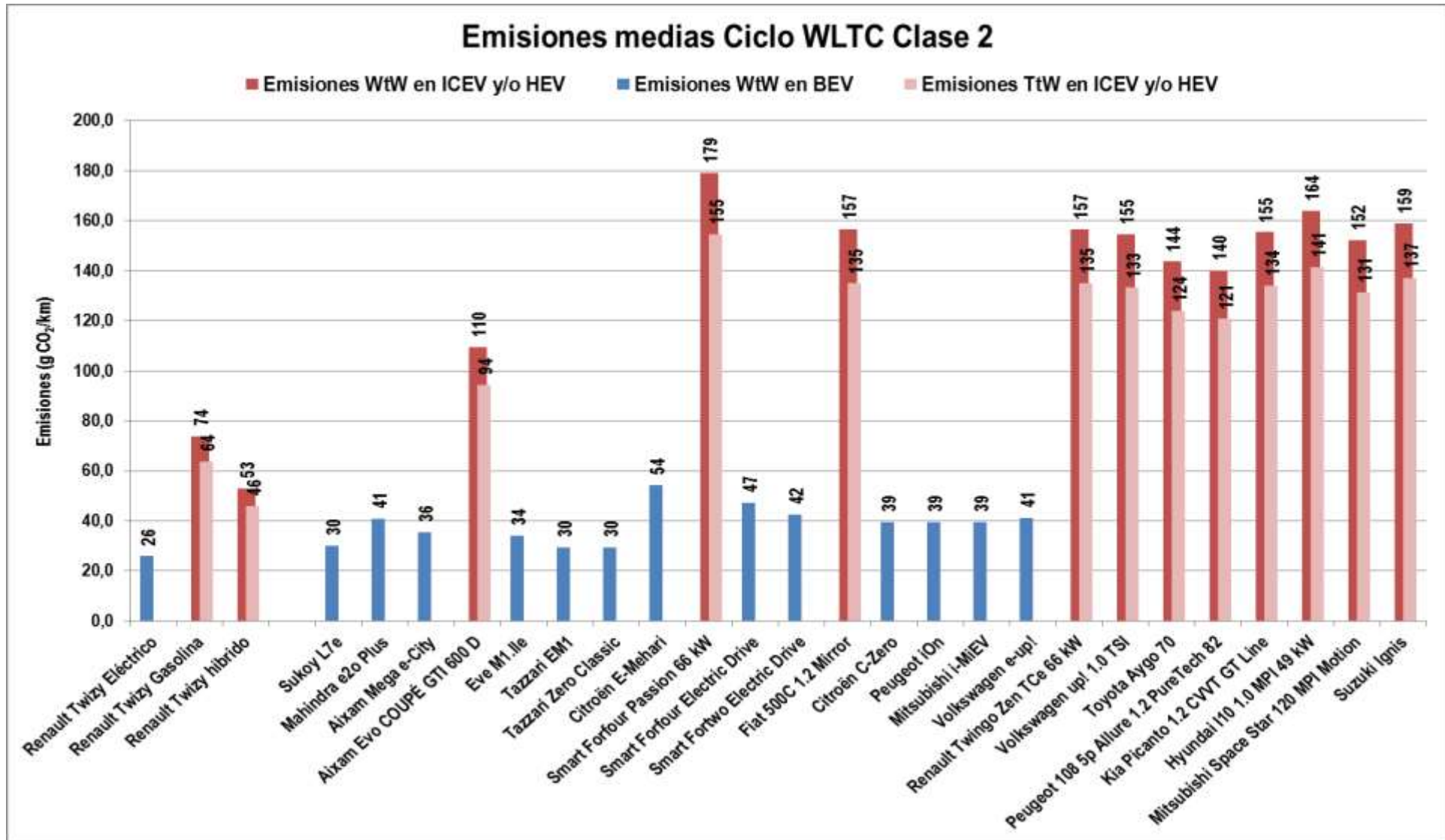


Fig. 32. Emisiones medias de CO₂ según ciclo WLTC clase 2.

7.3 Autonomía

La Fig. 33 recoge los resultados de las autonomías según ciclo WLTC clase 2 para la gama de vehículos estudiados, incluyendo las configuraciones del Renault Twizy.

Se observa que **las autonomías de los BEV son notablemente inferiores a las versiones de ICEV y HEV**. Esto se debe específicamente a la baja densidad de carga de las baterías empleadas en los vehículos actuales, las cuales tienen pendiente dar un salto significativo para obtener mejores valores. También es posible aumentar el almacenamiento total de energía eléctrica aumentando el tamaño de las baterías, pero penalizaría enormemente la masa del vehículo teniendo como contra partida un incremento en el consumo de energía y una disminución en la dinámica vehicular (recordar que estos vehículos de categoría L7e están limitados a 15 kW de potencia máxima).

Igualmente, al tratarse de vehículos destinados al uso urbano, las autonomías no conforman un factor determinante a no ser que se tengan inconvenientes para acceder con cierta frecuencia a cargadores eléctricos.

Si se estudian las configuraciones del Renault Twizy, se observa que las autonomías de las versiones a gasolina son entre 7 y 8 veces mayores a las del vehículo eléctrico en sus configuraciones de ICEV y HEV respectivamente. Esta característica es una fortaleza importante para aquellas personas que desean un vehículo pequeño, económico y que no posean los medios de recarga eléctrica en sus domicilios.

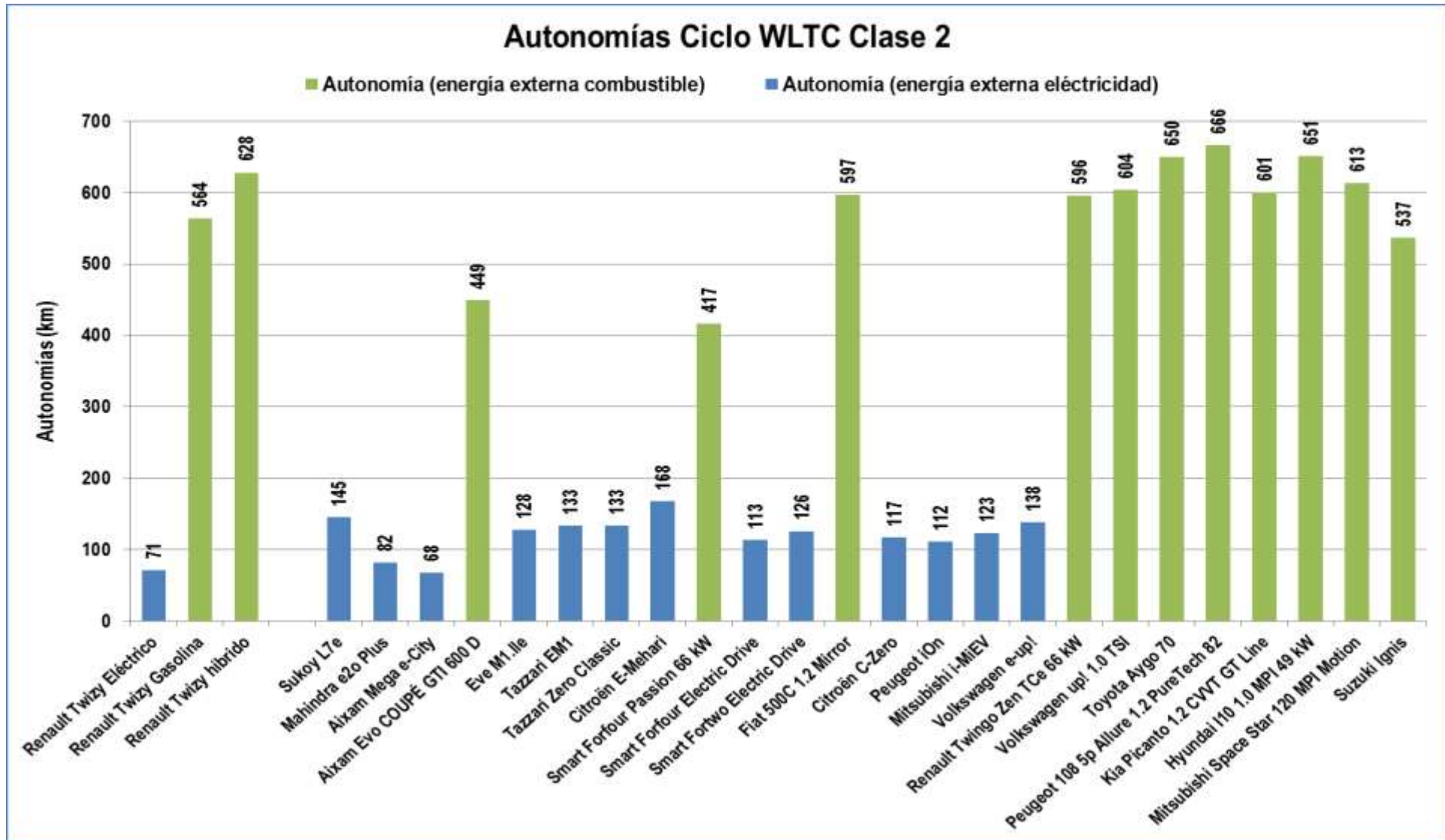


Fig. 33. Autonomía según ciclo WLTC clase 2.

8 CONCLUSIONES

8.1 Conclusiones.

Las características físicas de este vehículo lo convierten en una alternativa eficaz para el transporte de personas en ámbitos urbanos debido a:

- **Su menor volumen** así como la posibilidad de transportar hasta dos personas permite a este vehículo **mejorar la calidad de las vías de tránsito urbano** con respecto a vehículos convencionales, **disminuir la congestión** y, por lo tanto, **reduce los niveles estrés de los conductores así como los tiempos de traslado** entre puntos de las vías.
- **Su reducido peso permite la disminución del consumo de energía** y, por lo tanto, reduce los niveles de contaminación tanto local (*TtW*) como global (*WtW*) con respecto a vehículos convencionales de motor térmico disponibles en el mercado.

Las alternativas a vehículo convencional e híbrido no enchufable frente al eléctrico permite:

- El acceso de todos los usuarios que residen en medios urbanos donde se carece de aparcamiento con cargadores eléctricos, **utilizando la infraestructura actual de estaciones de servicio** expendedoras de gasolina.
- La **reducción de peso** del vehículo al retirar la importante masa y volumen que ocupa la batería, **en el orden de 20% y 7% para las configuraciones convencional e híbrida respectivamente.**
- Multiplicar de 7 a 8 veces la **autonomía real del vehículo** con pequeños depósitos de gasolina del orden de 12 a 15 litros.

En cuanto a costes se observa que:

- **El Twizy eléctrico, se observa que la opción más económica de compra resulta ser mediante la adquisición de la batería**, porque la suma del alquiler y la energía eléctrica para cargar las baterías termina por descompensar los beneficios. La diferencia varía en el rango de 3% a 19% según años y kilómetros de uso.
- Cuando comparamos el BEV contra sus alternativas de ICEV e HEV se observa que **los costes totales son inferiores a los del BEV, en el rango de 21% y 43% para la versión convencional y de 15% a 34% para la versión HEV, según años y kilómetros de uso.**
- Se observa que **la menor diferencia entre el ICEV y el BEV en su opción con adquisición de batería es aproximadamente de € 1300 para el caso de estudio a 10 años y 10000 km/año.** Si se tiene en cuenta que el coste de la batería es de € 4500, estos resultados nos proyectan que **mínimamente la batería debería disminuir su coste en un 29% para ser competitivos desde el punto de vista del coste para el usuario final.** Es un valor que probablemente se pueda conseguir en los próximos años, pero mientras sería interesante contar con una versión ICEV del Renault Twizy.

Si se observa los niveles de emisión **el BEV no emite directamente donde circula**, lo cual resulta en una ventaja fundamental para reducir los niveles de contaminación local de la ciudad. Por otra parte, como se observa en este trabajo, las emisiones globales del BEV dependen fundamentalmente del mix de producción eléctrica de cada región. **Para el mix de producción eléctrico de España las emisiones globales del BEV son del orden de 64% y 51% inferiores a las emitidas por la configuración ICEV y HEV, pero si se observa otras regiones como la comunidad de Canarias donde el mix eléctrico es mayoritariamente en base a combustibles fósiles, la opción de BEV únicamente emite un 3% menos que la opción ICEV e incluso emite un 36% más que la opción HEV a nivel global (WtW).** Esto es significativo si se considera que el BEV se vende como la opción

verde para cuidar el planeta, pero en determinadas regiones puede resultar en un contaminador mayor a una mecánica convencional o híbrida.

Se destaca los **beneficios de la configuración eléctrica en cuanto a aceleración, consumos y bajas emisiones** pese a ser un vehículo de mayor peso (debido a la batería). La **Tabla 24** recoge un resumen de estas características para las tres versiones.

Tabla 24. Resumen comparativo de las tres configuraciones del Twizy evaluadas mediante AVL CRUISE™.

Prestación	Eléctrico	Convencional	Híbrido
Aceleración 0 a 50 km/h (s)	7,8	13,4	15,3
Consumo (kWh/100km - l/100km) ⁹	8,6	2,7	1,9
Emisiones CO ₂ , w _{ttw} ¹⁰	26	74	53

Finalmente se obtuvo un estudio de los beneficios de contar por el fabricante Renault de una opción convencional o híbrida que **permita a los usuarios acceder a un vehículo urbano con adecuadas prestaciones, niveles bajo de consumo y emisiones, con disponibilidad de circular con amplias autonomías además de disponer de un amplio número de estaciones de recarga de gasolina.**

8.2 Principales aportaciones del autor del TFM

En este trabajo se plantea un problema concreto de un vehículo urbano disponible en el mercado y se lo compara con sus semejantes pero con distintos trenes de potencia. **El estudio deja de manifiesto que la alternativa eléctrica aún en 2018 tiene algunas desventajas claras en cuanto a costes, autonomías e infraestructura, dando las claves y números donde se tiene que mejorar para que la opción eléctrica resulte atractiva.** Los fabricantes pueden consultar este estudio como referencia a los efectos de focalizar sus puntos débiles y apuntar el problema de desarrollo de un vehículo eléctrico con unos objetivos específicos en cuanto a precios de venta, requerimientos de la batería para un coste y precio competitivo y las alternativas del mercado de citycars contra los que compete.

También se realiza un **planteo didáctico en un software de altas prestaciones como AVL CRUISE™ brindando los pasos fundamentales para la configuración y simulación de vehículos eléctricos, convencionales e híbridos**, valiendo como guía para quien requiera del uso de esta herramienta.

8.3 Sugerencias para trabajos futuros

Cuando se estudiaron las aceleraciones máximas a plena carga, se observó que la peor aceleración correspondía a la versión HEV. Pero es importante mencionar que la limitación de potencia total impuesta por la normativa que regula los vehículos L7e (15 kW) impide utilizar tanto un motor térmico como eléctrico de mayor potencia en conjunto según la configuración utilizada en la simulación en AVL CRUISE™ de este trabajo. **Resulta interesante configurar una nueva versión donde se implante un sistema híbrido en paralelo** (similar al que utiliza en el Toyota Prius no enchufable), **y modelar su funcionamiento** para que a bajas velocidades (por ejemplo, menores a 30 km/h) funcione únicamente

⁹ Kilovatios hora a los 100 kilómetros corresponde a la configuración eléctrica; litros a los 100 kilómetros corresponde a las configuraciones convencional e híbrida.

¹⁰ Según mix español Enero – Octubre de 2017, se generaron 279 gCO₂/kWh producido (promedio en bornes de las centrales). Incluye 92% correspondiente al rendimiento del transporte y distribución de energía eléctrica.

el motor eléctrico mientras que a mayores velocidades se priorice al motor térmico con el apoyo del eléctrico, **configurando el sistema para que la potencia de salida en el conjunto de ambos motores nunca supere los 15 kW. Esto implica la programación de una estrategia en MATLAB la cual se puede incorporar a AVL CRUISE™** para controlar las potencias entregadas en cada momento, pero el trabajo de programación y puesta a punto del sistema podría conllevar todo un trabajo final de máster en sí mismo.

9 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BOSCH GmbH, R. (1986). *Automotive Handbook* (2nd ed.).
- Cesvimap. (2014). Renault Twizy - Pequeño, urbano y rápido. Retrieved from <http://www.appcesvimap.com/revista/revista88/pdfs/sobreruedas.pdf>
- COMEC spa. (2018). Riduttori differenziali. Retrieved from <http://www.comexspa.com/index.php/it/prodotti/item/6-riduttori-differenziali&catid=3:riduttori-differenziali>
- Dacia España. (2018). Sandero – Gama Dacia - Dacia España. Retrieved January 6, 2018, from <https://www.dacia.es/gama-dacia/dacia-sandero/>
- Dieselnet. (2017). Emission Test Cycles: WLTC. Retrieved December 11, 2017, from <https://www.dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php>
- EL MUNDO. (2009). Renault Valladolid hará el eléctrico Twizy | Empresa | Motor | elmundo.es. Retrieved December 9, 2017, from <http://www.elmundo.es/elmundomotor/2009/11/06/empresa/1257496180.html>
- Europeo, E. L. P., Consejo, E. L., & Uni, D. E. L. A. (2013). REGLAMENTO (UE) N o 168/2013 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO de 15 de enero de 2013 relativo, 2012(7). Retrieved from <http://www.minetad.gob.es/industria/GIAVEH/DirectivasMarco/R-UE-168-2013.pdf>
- F.C.Eléctricos. (2013). ¿Qué ha pasado con el Renault Twizy? | forococheselectricos. Retrieved December 9, 2017, from <http://forococheselectricos.com/2013/06/que-ha-pasado-con-el-renault-twizy.html>
- Fulton, L. (2010). Electric and plug-in hybrid electric vehicles. Retrieved from https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/EV_PHEV_Roadmap.pdf
- Gillespie, T. D. (1992). Fundamentals of Vehicle Dynamics. <https://doi.org/10.4271/R-114>
- GlobalPetrolPrices. (2018). España precios de la gasolina GlobalPetrolPrices.com. Retrieved January 6, 2018, from http://es.globalpetrolprices.com/Spain/gasoline_prices/
- Group Renault. (2017). Renault TWIZY. Retrieved December 9, 2017, from <https://www.renault.es/gama-renault/gama-vehiculos-electricos/twizy/twizy/>
- Groupe Renault. (2017). Monthly sales - Groupe Renault. Retrieved December 9, 2017, from <https://group.renault.com/en/finance-2/financial-information/key-figures/monthly-sales/>
- Johnson Matthey, B. S. (2015). Guide to Batteries ur 3rd Edition. Retrieved from <http://www.jmbatterysystems.com/JMBS/media/JMBS/Documents/JMBS-23946-Battery-Guide-Update-August-2015-Web.pdf>
- Letrika. (n.d.). Weblet Importer. Retrieved November 28, 2018, from <http://www.letrika.com/katalog/basic.html?lang=E&tab=0&koda=IM7043>
- Red Eléctrica de España. (2017). Red Eléctrica de España | Series estadísticas nacionales. Retrieved December 11, 2017, from <http://www.ree.es/es/estadisticas-del-sistema-electrico-espanol/series-estadisticas/series-estadisticas-nacionales>
- Red Eléctrica de España. (2018). Análisis | ESIOS electricidad · datos · transparencia. Retrieved January 6, 2018, from https://www.esios.ree.es/es/analisis/10229?vis=1&start_date=01-01-2017T00%3A00&end_date=31-12-2017T23%3A50&compare_start_date=01-01-2016T00%3A00&groupby=year&compare_indicators=10230,10231
- Renault España. (2018a). Configurador Renault. Retrieved January 6, 2018, from https://www.renault.es/gama-renault/gama-vehiculos-electricos/twizy/twizy-new/configurador-3D/index_twizy.jsp#/configurator
- Renault España. (2018b). Renault CLIO - El coche urbano a tu medida - Renault España. Retrieved January 6, 2018, from <https://www.renault.es/gama-renault/renault-vehiculos-turismos/gama-clio/clio/>
- Suárez Sanz, M. (2016). *Master en ingeniería de automoción*. Universidad de Valladolid. Escuela de Ingenierías Industriales. Retrieved from <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/19988>
- Tinaut Fluixá, F. (2017). Apuntes de Clases de Sistemas de Propulsión Alternativos - Máster en

Ingeniería de Automoción.

Toyota España. (2018). Precios y promociones del Toyota Auris | Vehículos Toyota. Retrieved January 6, 2018, from <https://www.toyota.es/coches/auris/index/prices>

Trends., U. transport trends D. T. (2010). Occupancy rates of passenger vehicles. Retrieved from <https://www.eea.europa.eu/downloads/90455cbdf89c2c6149387ee11e4ea/1441389594/occupancy-rates-of-passenger-vehicles-1.pdf?direct=1>

UN/ECE. (2013). WLTP-DHC-draft_technical_report_ver131101-4. Retrieved from https://www2.unece.org/wiki/download/attachments/%0A15237269/WLTP-DHC-draft_technical_report_ver131101-4.doc?api=v2


WHO. (2005). Health effects of transport-related air pollution. Retrieved from http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0006/74715/E86650.pdf

10 ANEXOS

10.1 Cotización Renault Twizy

A continuación se exponen las cotizaciones de las tres configuraciones de Renault Twizy que se han utilizado en el estudio de costes.

MI CONFIGURACIÓN RENAULT TWIZY



06/01/18 10:31 € 510,00 €

Twizy Life 45 Flexi
Motor: Motor eléctrico 48
Nivel de equipamiento: Life Alquiler batería

Energía: Eléctrico
Caja de cambios automática Reductora

MIS OPCIONES Y ACCESORIOS

ACCESORIO	PRECIO
Alfz New (tipo foto)	0,00 €
Alfz New (en negro)	0,00 €
Alfz Center	0,00 €
Proteccións laterales <small>Protecciones laterales que te permiten estar respaldado, atenuando el confort y sugiriendo a Twizy.</small>	195,00 €
Llaves de dirección 3D (3D) Dirección <small>Para el máximo confort de conducción, Twizy te propone las llaves de dirección 3D (3D) Alfa re-empje.</small>	350,00 €
RF Bluetooth con 2 altavoces (reproducido como comentario) <small>El RF Bluetooth con 2 altavoces reproduce como comentario. Selecciona el idioma de tu teléfono, re-empje en la opción de configuración y conectar Twizy.</small>	340,00 €

MIS EQUIPAMENTOS DE SERIE

CONFORT
Cinturón de seguridad
Asiento con respaldo reclinable

ESPECÍFICO Z.E.
Cable especial de carga rápida

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

ARQUITECTURA CARROCERÍA
Tipo de carrocería: 11 (Cuerpo 3D 11)
Material de pintura: B

PRESTACIONES
Velocidad máxima (km/h): 40

DIMENSIONES
Ancho total: 1104
Ancho de vía: 1100
Alto exterior: 1424
Longitud total: 2100
Distancia entre ejes: 1000
Volúmenes de carga: 100

MOTOR
Potencia máxima (kW CV): 104 (140)
Par máximo (Nm): 100
Cilindros: 1

DIRECCIÓN
Distancia de eje a eje (mm): 1000

TIPO VEHICULO
Tipo de vehículo: 1
Número de ejes: 2
Volúmenes de carga: 100

RUEDAS Y PNEUMÁTICOS
Neumáticos de referencia: 100R14 10

TUS SERVICIOS Z.E.

BATTERY_RENTAL_COSTS: 52,00 € / Mes

CONSUMO
CO2 (g/km): 0
Ciclo urbano (l/100 km): 0
Ciclo extra-urbano (l/100 km): 0
Ciclo mixto (l/100 km): 0
Consumo Z.E. (Wh/km): 58
Autonomía Z.E. (km): 100

MODO DE COMERCIALIZACIÓN
Alquiler batería

DESIGNO
Estados de conservación: 100 (100%) original

CAPACIDADES
Volúmenes máximos de volumen (litros): 100
Volúmenes máximos del volumen (litros): 100

EQUIPAMIENTO
Material de alfz: B
Material de alfz: B
Material de alfz: B
Tipo de caja de cambios: Reductora
Material: 100 (100%) original

CAJA DE CAMBIOS
Tipo de caja de cambios: Reductora

PESOS
Peso en vacío (en la distribución normal): 440
Peso total en orden de marcha: 600
Carga útil: 160
Peso máximo autorizado en el eje delantero (kg): 100
Peso máximo autorizado en el eje trasero (kg): 100

AERODINÁMICA
Cx: 0,24

Fig. 34. Cotización Renault Twizy Life 45 Flexi, renta de batería (Renault España, 2018a).

MI CONFIGURACIÓN RENAULT
TWIZY



06/01/18 10:32 € 820,00 €

Twizy Life 80 Flexi
Motor: Motor eléctrico 60
Nivel de equipamiento: Life Alquiler batería

Energía: Eléctrico
Caja de cambios automática, Reductora

MIS OPCIONES Y ACCESORIOS | MIS OPCIONES

	Alcornoque Negro (opción)	0,00 €
	Asientos en negro (opción)	0,00 €
	Asaí Carbon (opción)	0,00 €
	Protecciones laterales (opción) Protecciones laterales que te permiten irte con seguridad, estabilidad y seguridad a Twizy.	595,00 €
	Llaves de dirección (opción) Para más ligeros en la conducción, Twizy te propone las llaves de dirección (opción) para un mayor confort.	350,00 €
	Kit de mantenimiento con 2 alternadores (entendido como accesorio) (opción) El kit de mantenimiento de Twizy te permite estar preparado en cualquier momento de tu vida. Mantén tu Twizy en perfecto estado.	340,00 €

MIS EQUIPAMENTOS | DE SERIE

MODO DE COMERCIALIZACIÓN
Alquiler batería

DESEÑO
Asientos en negro, Ocio (37) negro.

ESPECÍFICO Z.E.
Cable especial de carga en paralelo.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

ARQUITECTURA CARROCERÍA

Tipo de carrocería	CLASIFICACIÓN
Número de puertas	0

PRESTACIONES

Velocidad máxima (km/h)	80
-------------------------	----

DIMENSIONES

Anchura (mm)	1124
Altura (mm)	1110
Alteza al suelo (mm)	1404
Longitud (mm)	2130
Distancia entre ejes (mm)	1380
Distancia al suelo (mm)	110

MOTOR

Potencia (kW) (CV) (kW) (CV)	55 (75) (55) (75)
Par motor (kgm) (kgm) (kgm) (kgm)	37
Carburante	Eléctrico

DIRECCIÓN

Clasificación de dirección (opción)	0,00 €
-------------------------------------	--------

TIPO VEHICULO

Motor eléctrico (opción)	0
Distancia al suelo (mm)	110
Velocidad (km/h)	80 (V80)

RUEDAS Y NEUMÁTICOS

Resistencia al rollo (opción)	0,00 €
-------------------------------	--------

TUS SERVICIOS Z.E.

BATTERY_RENTAL_CODE	11188 (RENTAL_BAT) 11188 (RENTAL_BAT) 11188 (RENTAL_BAT) 11188 (RENTAL_BAT)	52,00 €/Mes (IVA incluido)
---------------------	---	----------------------------

CONSUMO

CO2 (g/km)	0
Ciclo urbano (l/100 km)	0
Ciclo extra-urbano (l/100 km)	0
Ciclo mixto (l/100 km)	0
Consumo Z.E. (Wh/km)	65
Autonomía Z.E. (km)	90

CONFORT

Protección con función de escape	0
Cuentas con Run	0
Autoparada automática	0

FRENOS

Pinza Trasera (opción) (opción) (opción) (opción)	0
Pinza (opción) (opción) (opción) (opción)	0

CAPACIDADES

Volúmenes interiores de maletero (litros)	0
Volúmenes exteriores de maletero (litros)	0

EQUIPAMIENTO

Motor eléctrico	0
Autoparada automática	0
Pinza (opción) (opción) (opción) (opción)	0
Pinza Trasera (opción) (opción) (opción) (opción)	0

CAJA DE CAMBIOS

Caja de cambio automática	0
---------------------------	---

RESERVA

Pinza (opción) (opción) (opción) (opción)	0
Pinza Trasera (opción) (opción) (opción) (opción)	0
Caja de cambio automática	0
Pinza (opción) (opción) (opción) (opción)	0

AERODINÁMICA

Cx	0,24
----	------

Fig. 35. Cotización Renault Twizy Life 80 Flexi, renta de batería (Renault España, 2018a).








MI CONFIGURACIÓN RENAULT		MIS EQUIPAMENTOS DE SERIE	
TWIZY  06/01/10 10:33 11.320,00 € Sin Itege de 1.000.000 €, con el descuento de 1.000.000 €		MODO DE COMERCIALIZACIÓN Compra batería DISEÑO Multi-Escenario, hasta 1071 cc/seg. ESPECÍFICO Z.E. Cable integral de carga integrado	
MIS OPCIONES Y ACCESORIOS MIS OPCIONES		CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	
Twizy Life 80 Motor: Motor eléctrico 80 Energía: Eléctrico Nivel de equipamiento: Life Carga batería Caja de cambios automática: Reductora		ARQUITECTURA CARROCERÍA Tipo de carrocería 3 PUERTAS Número de puertas 2 PRESTACIONES Velocidad máxima (km/h) 80 DIMENSIONES Ancho (mm) 1034 Altura (mm) 1270 Longitud (mm) 1800 Volumen de carga (litros) 100 MOTOR Motor eléctrico (CV/kW) 80/57/410 Pot. máxima (kW/1500 rpm) 57 Capacidad (kWh) 18,5 DIRECCIÓN Dirección de giro (modo estándar) D/A TIPO VEHICULO Vehículo tipo 2 Número de ejes 2 Chasis AC/1700 RUEDAS Y NEUMÁTICOS Situación de referencia 220/40 R 13	
	Wash & Seal (tipo film) MIS OPCION 0,00 €	COMFORT Climatizador con función deshumidificadora Cierre centralizado Aviso cuando se está desbloqueado	
	Asientos en negro MIS OPCION 0,00 €	FRENOS Sistema: Tracción delantera (D), freno de freno de mano (D) 209/204 Frenos (principales, tipo) D, freno ABS Tipo de D (D) freno de mano	
	Asel Center MIS OPCION 0,00 €	CAPACIDADES Volumen máximo de cargable (litros) 100 Volumen máximo de cargable (litros) 100	
	Protección lateral Protección lateral que le permite estar respaldado, ofreciéndole confort y seguridad a Twizy. MIS OPCION 595,00 €	EQUIPAMIENTO Puntos de USB 0 Motorización Motor eléctrico (80) Potencia (kW) 57 Tipo de caja de cambios Reductora Avanzado	
	Llantas de aleación 13" (13") Chromatec Para el modelo en la gama de equipamiento. Twizy se prepara en versiones de aleación (D) y (D) (D) en negro. MIS OPCION 350,00 €	CAJA DE CAMBIOS Tipo de caja de cambios Reductora	
	Kit de accesorios con 2 accesorios (batería como accesorio) MIS OPCION 540,00 €	RESOS Peso en condiciones estándar (kg) 475 Peso máximo autorizado (kg) 493 Carga útil 160 Peso máximo autorizado (kg) 493 Peso máximo autorizado (kg) 493	
CONSUMO CO2 (g/km) 0 Ciclo urbano (l/100 km) 0 Ciclo extra-urbano (l/100 km) 0 Ciclo mixto (l/100 km) 0 Consumo Z.E. (Wh/km) 63 Autonomía Z.E. (km) 90		AERODINÁMICA Cx 0,34	
TUS SERVICIOS Z.E. BATTERY_RENTAL_CODE 52,00 €/Mes IVA incluido			

Fig. 36. Cotización Renault Twizy Life 80, compra de batería (Renault España, 2018a).

10.2 Datos de vehículos

La siguiente Tabla 25 recoge los datos que se han utilizado en este trabajo para los cálculos de la dinámica vehicular, extraídos de las bibliografías, catálogos de fabricantes y/o estimaciones explicadas en el trabajo.

10.3 Modelado en AVL CRUISE de las configuraciones convencional e híbrida

10.3.1 Vehículo convencional

La Fig. 37 muestra el modelo de un vehículo convencional con transmisión CVT y tracción trasera tal cual aparece en AVL CRUISE, mientras que en la Fig. 38 se observa el mismo modelo pero con las modificaciones necesarias para el Twizy convencional (ICEV). Se destaca la incorporación de un sistema Stop – Start que brinda menor consumo en el ciclo WLTC.

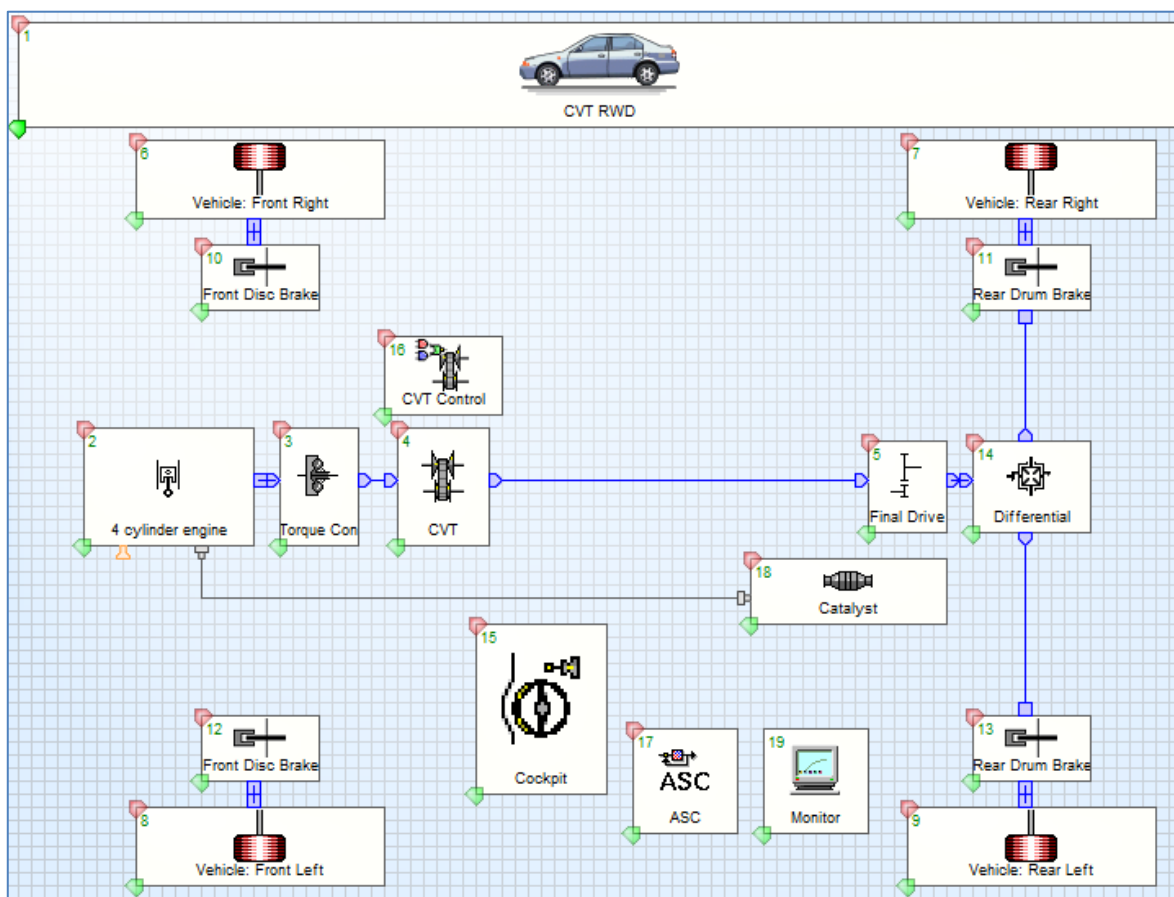


Fig. 37. Componentes del modelo de vehículo convencional en AVL CRUISE.

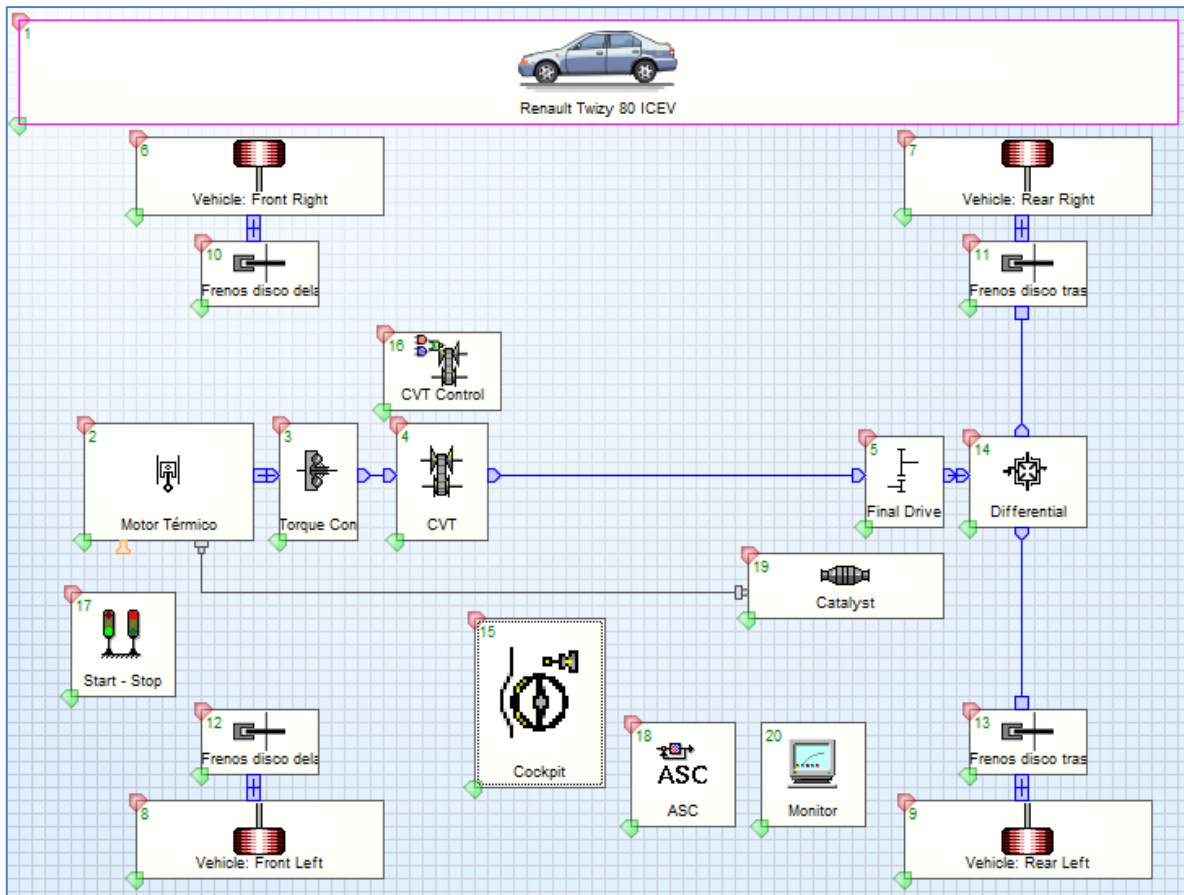


Fig. 38. Componentes y configuración del Twizy convencional en AVL CRUISE.

Las siguientes tablas describen las configuraciones de cada uno de los componentes de acuerdo a las características técnicas del Twizy convencional, estimaciones realizadas y parámetros extraídos del modelo básico proporcionado por AVL CRUISE.

Tabla 26. Modelado del vehículo en el ICEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Renault Twizy 80 ICEV		
Observación 1	Convencional		
Observación 2	CVT		
Observación 3	Motor Térmico Gasolina		
Volumen del tanque de combustible	0,015	m ³	Ficha
Dif. Presión entre motor/medioambiente	0	mbar	Cruise
Dif. Temp. entre motor/medioambiente	0	K	Cruise
Dimensiones del vehículo			
Dist. desde parte trasera a delantera	2338	mm	Ficha
Dist. entre ejes	1686	mm	Ficha
Altura del punto de apoyo en banco de pruebas	100	mm	Cruise
Características de carga			
Estado de carga	Distancia al centro gravedad		
Vacío	1200	mm	Estimado
Medio	1200	mm	Estimado
Lleno	1200	mm	Estimado
Peso nominal			
En vacío	337	kg	Ficha
Bruto	553	kg	Ficha
Aerodinámica			
Área frontal	1,59	m ²	Ficha
Cd	0,402		Ficha

Tabla 27. Modelado de las ruedas delanteras en el ICEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Ruedas delanteras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas delanteras		
Observación 1	125/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,3414	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	1085,3	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	233	mm	Calculado
Dinámico	245	mm	Calculado

Tabla 28. Modelado de las ruedas traseras en el ICEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Ruedas traseras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas traseras		
Observación 1	145/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,4251	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	1628,0	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	244	mm	Calculado
Dinámico	259	mm	Calculado

Tabla 29. Factor de resistencia a la rodadura para ruedas delanteras y traseras en el ICEV.

Curva de factor de resistencia a la rodadura			
Se activa en Cruise curva estándar de factor de resistencia a la rodadura según velocidad del vehículo.			
El Factor de Resistencia Neto se calcula en base a los cálculos de dinámica vehicular del capítulo anterior.			
Velocidad (km/h)	Factor de Resistencia (%)	Neto	
0	1,0000	0,0100	
10	1,0625	0,0106	
20	1,1250	0,0113	
30	1,1875	0,0119	
40	1,2500	0,0125	
50	1,3125	0,0131	
60	1,3744	0,0137	
70	1,3796	0,0138	
80	1,3856	0,0139	
90	1,3924	0,0139	
100	1,4000	0,0140	
110	1,4084	0,0141	
120	1,4176	0,0142	
130	1,4276	0,0143	
140	1,4384	0,0144	
150	1,4500	0,0145	
160	1,4624	0,0146	

Tabla 30. Modelado de los frenos en el ICEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Frenos delanteros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco delanteros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	107	mm	Ficha
Momento de inercia	0,015	kg/m ²	Calculado
Frenos traseros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco traseros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	102	mm	Ficha
Momento de inercia	0,012	kg/m ²	Calculado

Tabla 31. Modelado del motor térmico en el ICEV

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Motor Térmico		
Observación 1	Monocilindro		
Tipo de motor	Gasolina		
Turbocompresor	No		
Desplazamiento	369	cm ³	Definición
Potencia máxima	14,8 kW @ 5400 rpm		Cruise
Par máximo	29 Nm @ 3500 rpm		Cruise
Número de cilindros	1		Definición
Número de tiempos	4		Definición
Ralentí	850	rpm	Cruise
Velocidad del motor máxima	6000	rpm	Cruise
Curva de Potencia			

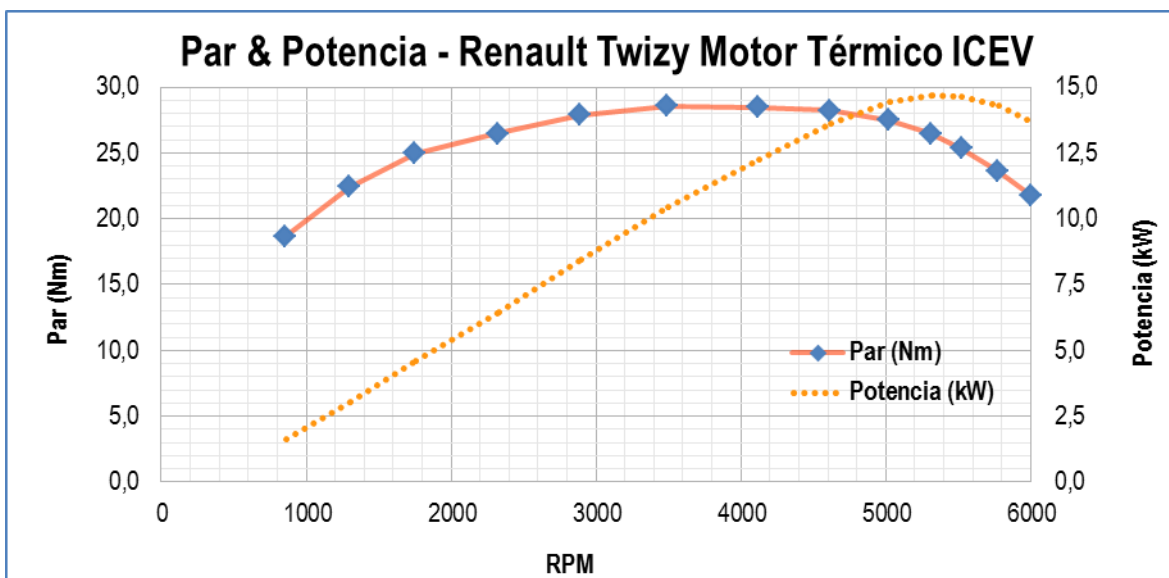
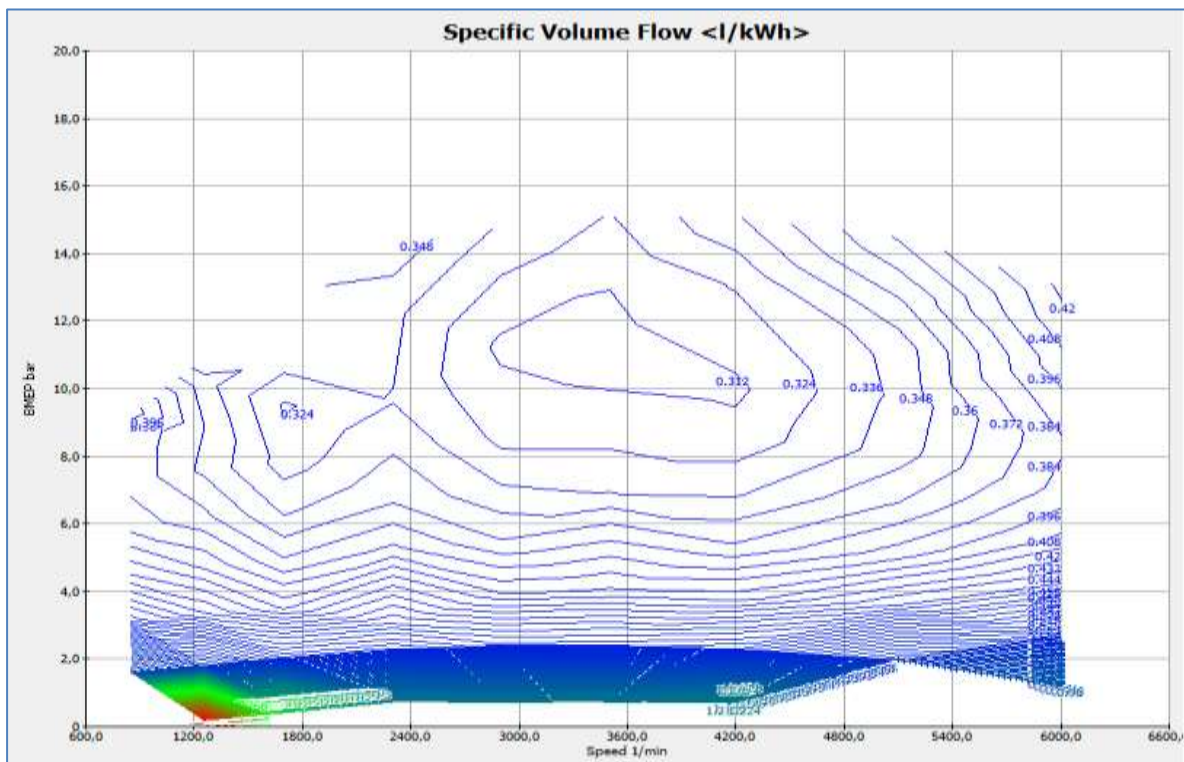


Tabla 32. Mapa de eficiencia del motor térmico en el ICEV.



La Fig. 39 detalla los parámetros configurados en AVL CRUISE para el funcionamiento del sistema Stop – Start, mientras que la Fig. 40 representa las interconexiones con los otros componentes.

Start Stop Automatic

Author: Torres

Comment: Start - Stop

Notice 1: [] Notice 2: []

Notice 3: [] Date of Development: 16. Jan 2018 22:19:33

First Activation Time: 15,0 s Reactivation Time: 0,1 s

Shut-off Time: 1,0 s Warm-up Temperature: 1,0 °C

Overshoot Time of the Engine: 0,1 s Lead Time of the Engine: 0,1 s

Maximum Velocity: 5,0 km/h Minimum Battery Charge: 1,0 Ah

Logical link: Input0

Input 0

Threshold: 850,0 Threshold Unit: - [kg] Direction: positive

Input 1

Threshold: 1,0 Threshold Unit: - [kg] Direction: positive

Input 2

Threshold: [] Threshold Unit: - [kg] Direction: positive

properties... ok ABC cancel

Fig. 39. Configuración de parámetros del Start – Stop para el Twizy ICEV.

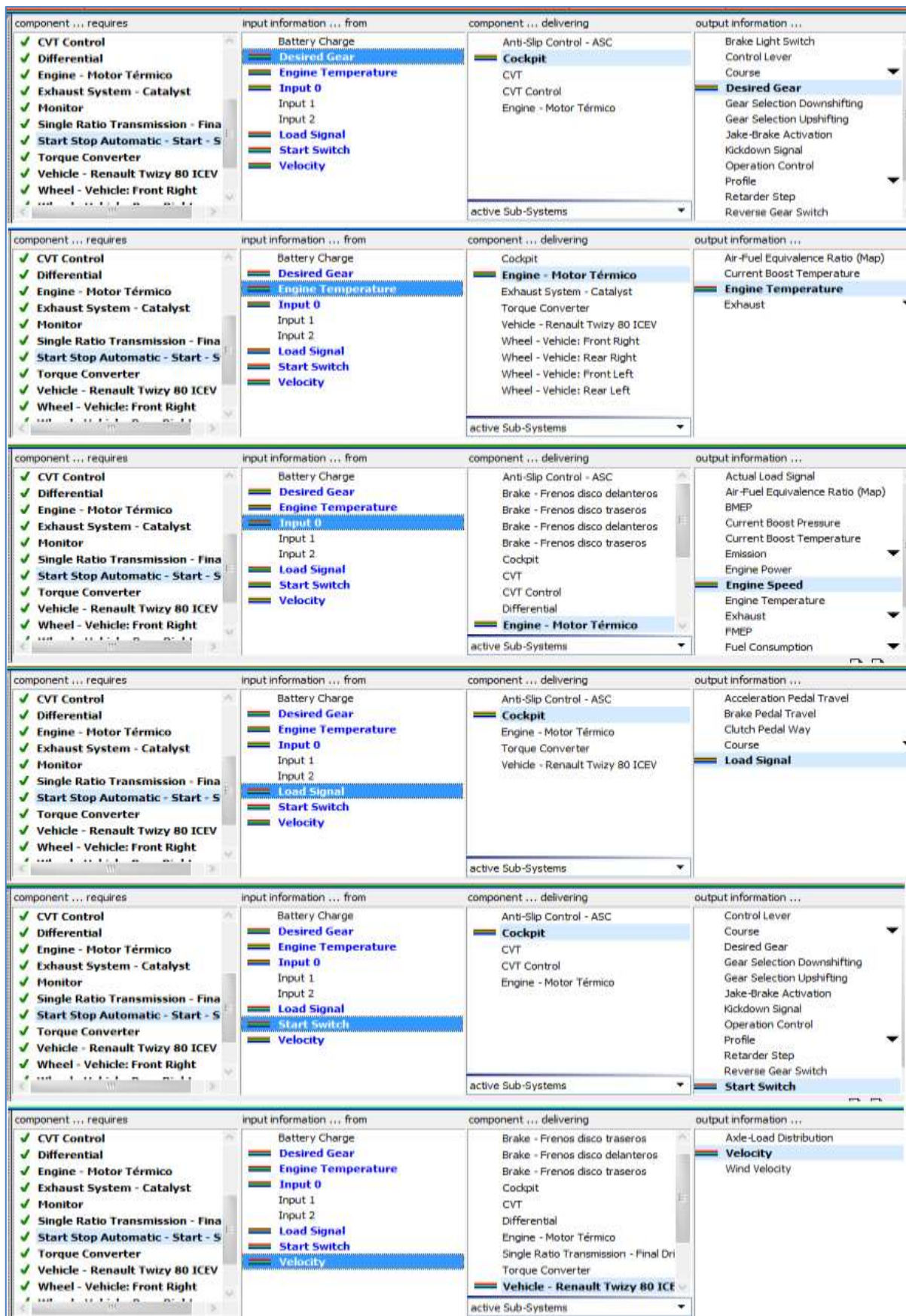


Fig. 40. Conexiones en AVL CRUISE del Stop – Start en la configuración ICEV.

10.3.2 Vehículo híbrido

La Fig. 41 muestra el modelo de un vehículo híbrido tal cual aparece en AVL CRUISE, mientras que en la Fig. 42 se observa el mismo modelo pero con las modificaciones necesarias para el Twizy híbrido. Se destaca el cambio de tracción delantera a trasera.

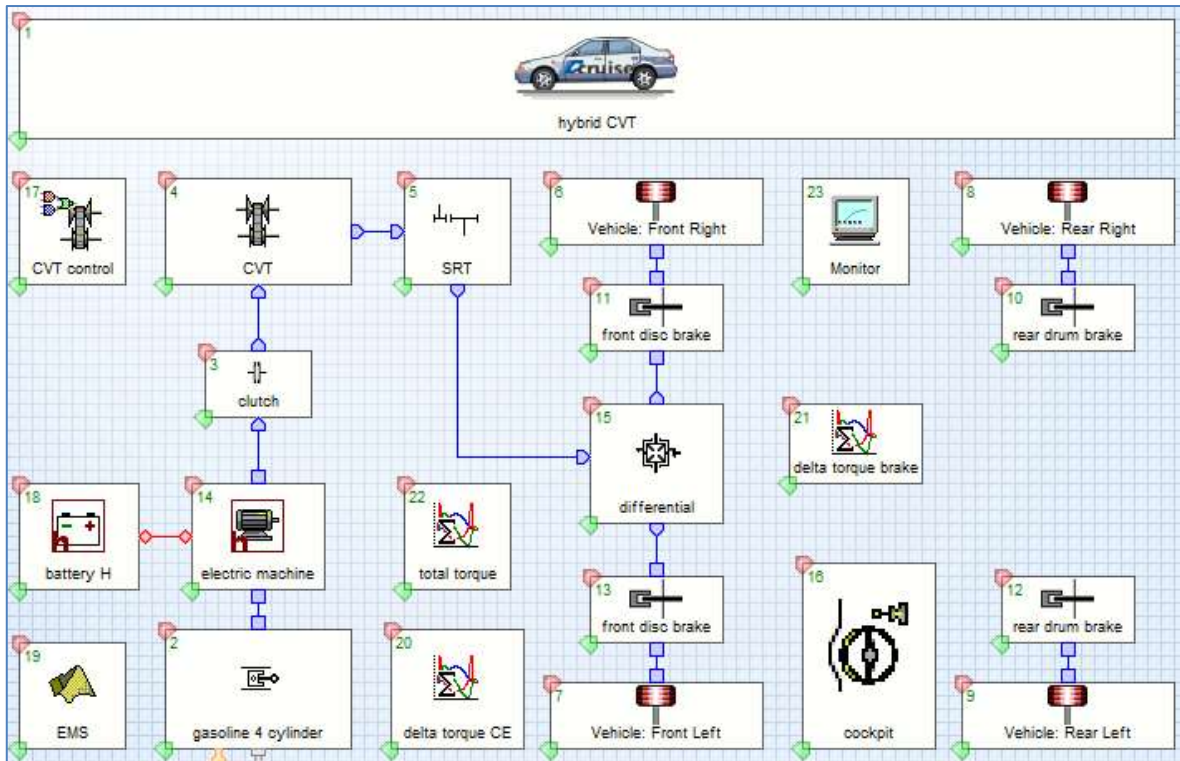


Fig. 41. Componentes del modelo de vehículo híbrido en AVL CRUISE.

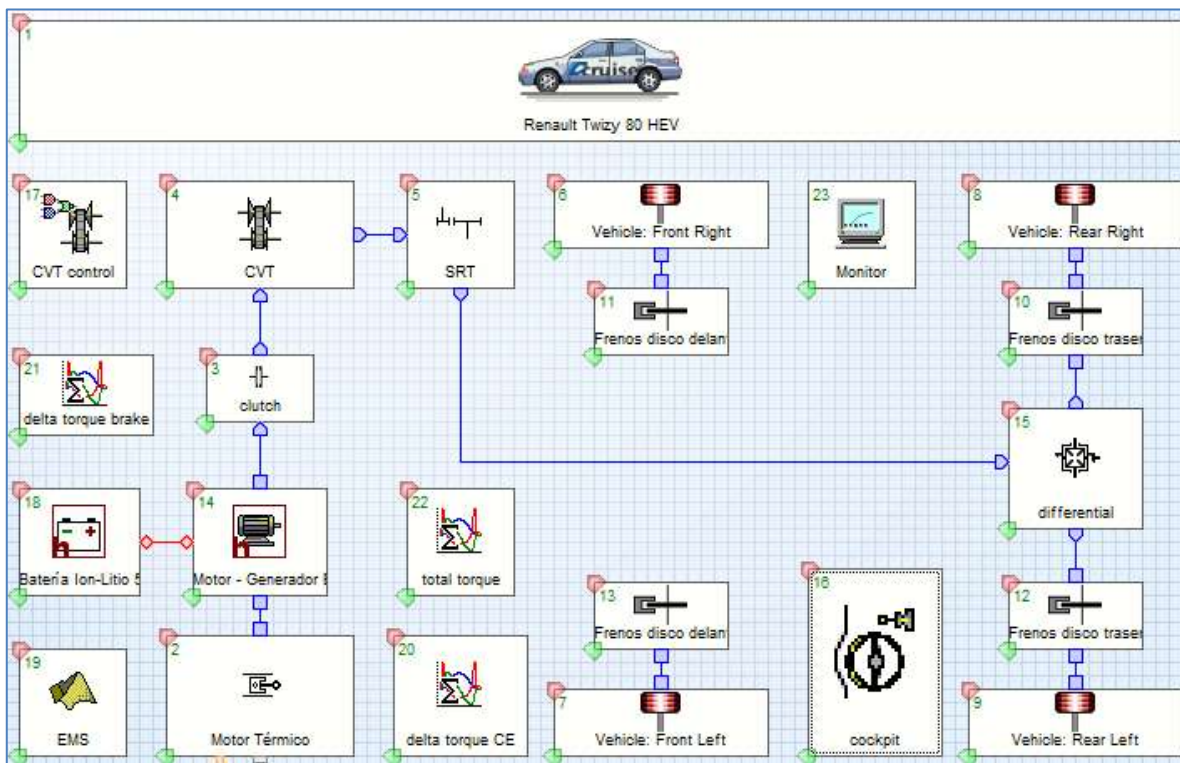


Fig. 42. Componentes y configuración del Twizy híbrido en AVL CRUISE.

Las siguientes tablas describen las configuraciones de cada uno de los componentes de acuerdo a las características técnicas del Twizy híbrido, estimaciones realizadas y parámetros extraídos del modelo básico proporcionado por AVL CRUISE.

Tabla 33. Modelado del vehículo en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Renault Twizy 80 HEV		
Observación 1	Híbrido Paralelo		
Observación 2	Motor Térmico + Eléctrico		
Observación 3			
Volumen del tanque de combustible	0,012	m ³	Ficha
Dif. Presión entre motor/medioambiente	0	mbar	Cruise
Dif. Temp. entre motor/medioambiente	0	K	Cruise
Dimensiones del vehículo			
Dist. desde parte trasera a delantera	2338	mm	Ficha
Dist. entre ejes	1686	mm	Ficha
Altura del punto de apoyo en banco de pruebas	100	mm	Cruise
Características de carga			
Estado de carga	Distancia al centro gravedad		
Vacío	1200	mm	Estimado
Medio	1200	mm	Estimado
Lleno	1200	mm	Estimado
Peso nominal			
En vacío	428	kg	Ficha
Bruto	644	kg	Ficha
Aerodinámica			
Área frontal	1,59	m ²	Ficha
Cd	0,402		Ficha

Tabla 34. Modelado de las ruedas delanteras en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Ruedas delanteras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas delanteras		
Observación 1	125/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,3414	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	1263,4	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	233	mm	Calculado
Dinámico	245	mm	Calculado

Tabla 35. Modelado de las ruedas traseras en el HEV.

Ruedas traseras			
Autor	Torres		
Comentario	Ruedas traseras		
Observación 1	145/80 R13		Ficha
Momento de Inercia	0,4251	kg/m ²	Calculado
Deslizamiento en rueda			
Referencia de carga en rueda	1895,1	N	Calculado
Radio de rodadura			
Estático	244	mm	Calculado
Dinámico	259	mm	Calculado

Tabla 36. Factor de resistencia a la rodadura para ruedas delanteras y traseras en el HEV.

Curva de factor de resistencia a la rodadura			
Se activa en Cruise curva estándar de factor de resistencia a la rodadura según velocidad del vehículo.			
El Factor de Resistencia Neto se calcula en base a los cálculos de dinámica vehicular del capítulo anterior.			
Velocidad (km/h)	Factor de Resistencia (%)	Neto	
0	1,0000	0,0100	
10	1,0625	0,0106	
20	1,1250	0,0113	
30	1,1875	0,0119	
40	1,2500	0,0125	
50	1,3125	0,0131	
60	1,3744	0,0137	
70	1,3796	0,0138	
80	1,3856	0,0139	
90	1,3924	0,0139	
100	1,4000	0,0140	
110	1,4084	0,0141	
120	1,4176	0,0142	
130	1,4276	0,0143	
140	1,4384	0,0144	
150	1,4500	0,0145	
160	1,4624	0,0146	

Tabla 37. Modelado de los frenos en el HEV.

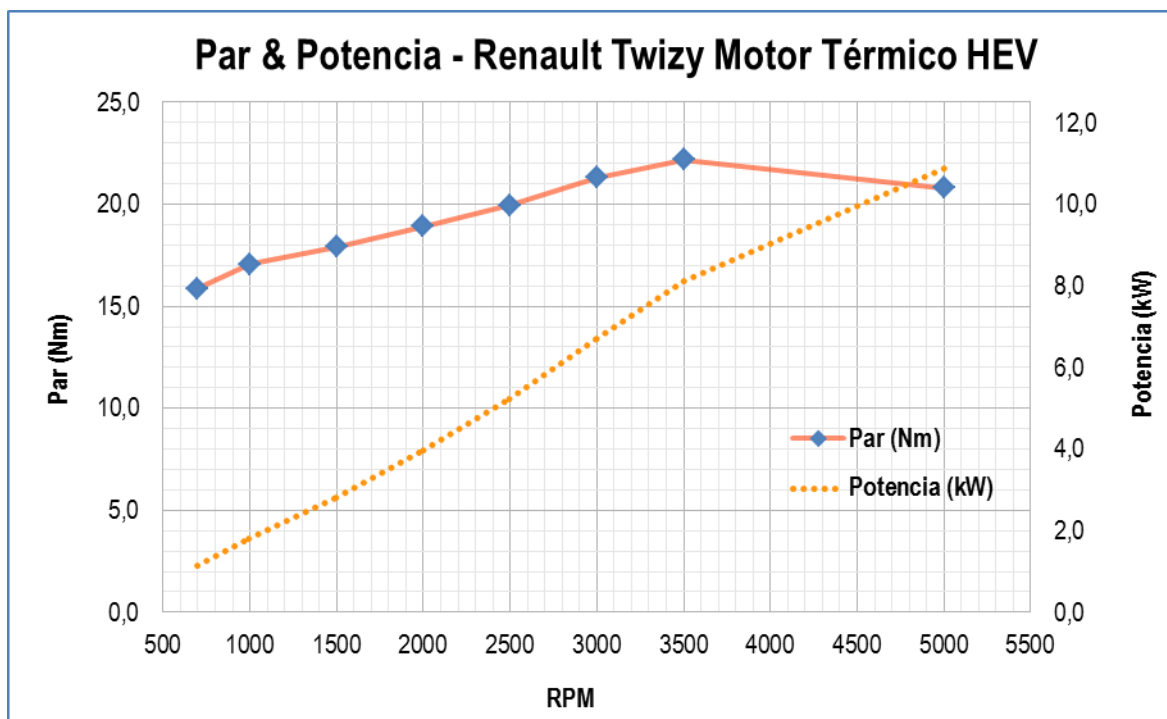
Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Frenos delanteros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco delanteros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	107	mm	Ficha
Momento de inercia	0,015	kg/m ²	Calculado
Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
Frenos traseros			
Autor	Torres		
Comentario	Frenos disco traseros		
Sup. pistón de freno	1300	mm ²	Estimado
Radio efectivo de fricción	102	mm	Ficha
Momento de inercia	0,012	kg/m ²	Calculado

Tabla 38. Modelado del reductor en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Transmisión		
Observación 1	Reductor		
Relación de desmultiplicación	8,0		Calculado

Tabla 39. Modelado del motor térmico en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Motor Térmico		
Observación 1	Monocilindro		
Tipo de motor	Gasolina		
Turbocompresor	No		
Desplazamiento	249	cm ³	Definición
Potencia máxima	10,9 kW @ 5000 rpm		Cruise
Par máximo	22 Nm @ 3500 rpm		Cruise
Número de cilindros	1		Definición
Número de tiempos	4		Definición
Ralentí	720	rpm	Cruise
Velocidad del motor máxima	6000	rpm	Cruise
Curva de Potencia			



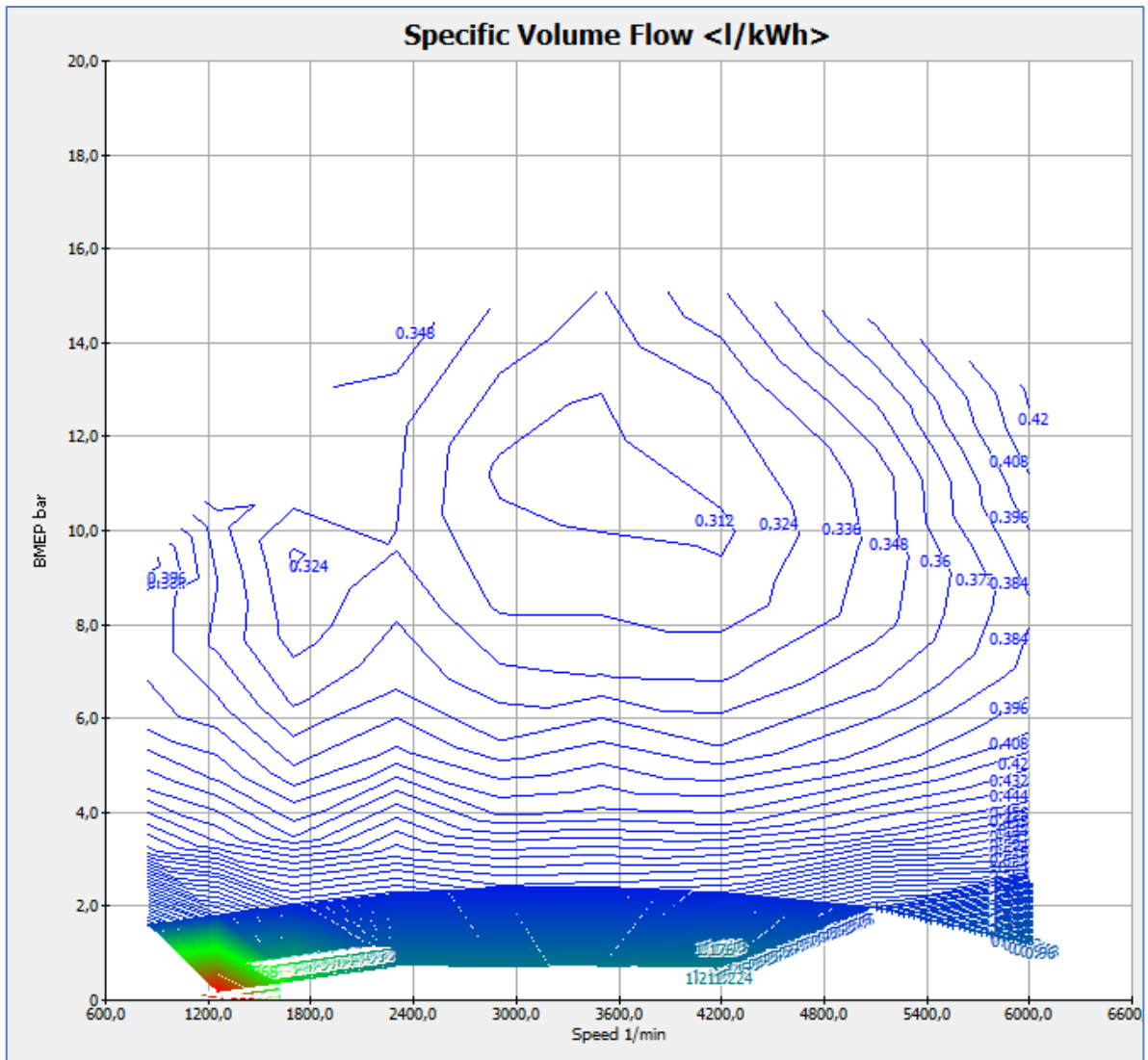


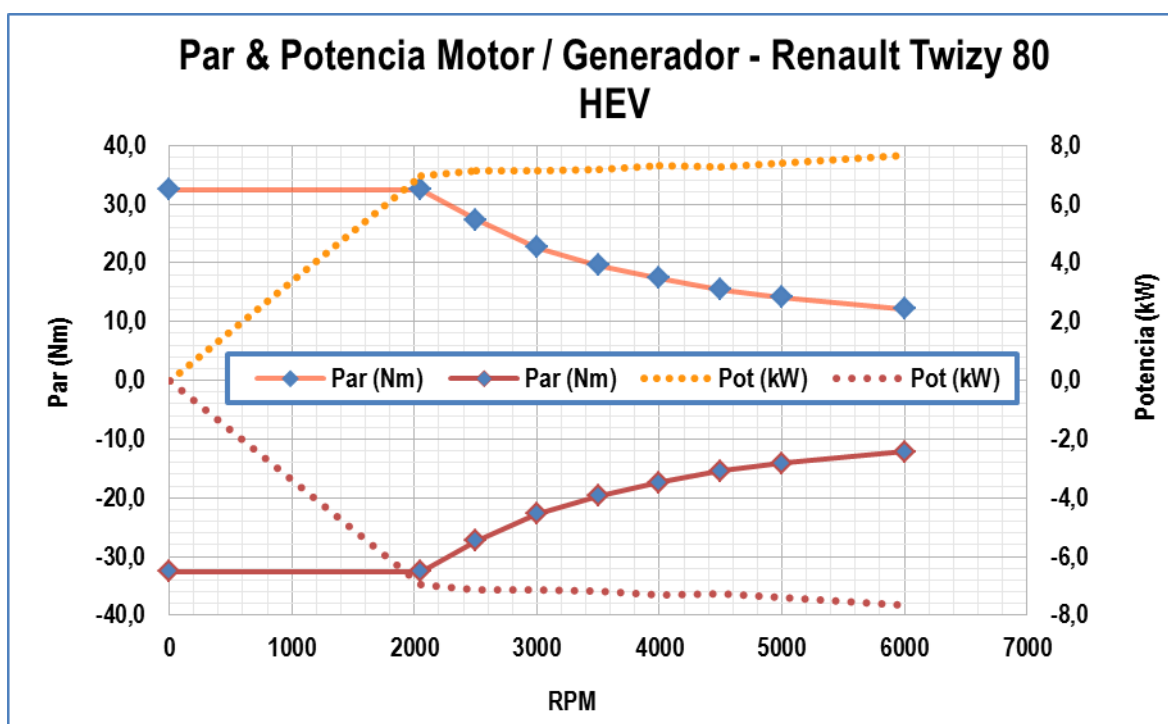
Fig. 43. Mapa de eficiencia del motor térmico en el HEV.

Tabla 40. Modelado de la batería en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Batería Ion-Litio 54 V		
Carga máxima de la celda	14	Ah	Ficha
Carga inicial	58	%	Cruise
Voltaje nominal de la celda	53,9	V	Ficha
Voltaje máx. de la celda	60,2	V	Estimado
Voltaje mín. de la celda	35,0	V	Estimado
Número de celdas por fila de celdas	1		Ficha
Número de filas de celdas	1		Ficha
Resistencia interna carga	0,014	Ω	Estimada
Resistencia interna descarga	0,010	Ω	Estimada
Estado de Carga			
SOC (%)	Voltaje (V)		Ficha
	0	54,1	
	10	55,4	
	20	56,2	
	30	56,8	
	40	57,2	
	50	57,6	
	60	57,9	
	70	58,1	
	80	58,5	
	90	59,2	
	100	62,6	

Tabla 41. Modelado del motor / generador eléctrico en el HEV.

Parámetro	Valor	Unidad	Referencia
General			
Autor	Torres		
Comentario	Motor / Generador Eléctrico		
Observación 1	7,7 kW (10 hp) @ 6000 rpm		Ficha
Observación 2	33 Nm @ 2100 rpm		Ficha
Observación 3	AC inducción		
Tipo de motor	ASM		
Voltaje nominal	60	V	Ficha



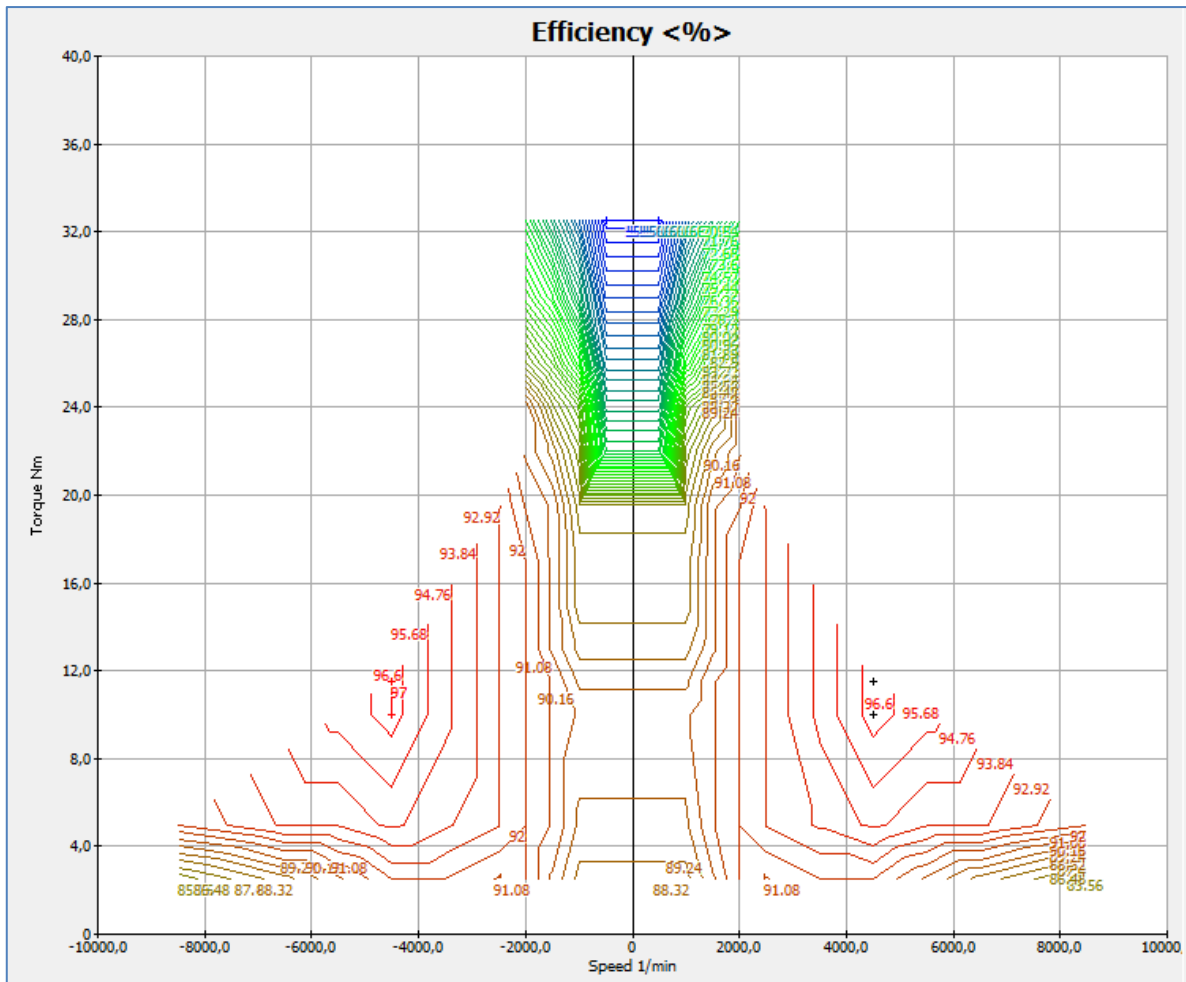


Fig. 44. Mapa de eficiencia del motor / generador eléctrico en el HEV.