



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

# **TRABAJO FIN DE GRADO**

## **ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> A TRAVÉS DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DE TENERIFE**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor:** Ricardo García González

**Tutor:** Óscar García Afonso

**San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2021**





**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

# **ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> A TRAVÉS DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DE TENERIFE**

## **ÍNDICE**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor:** Ricardo García González

**Tutor:** Óscar García Afonso

**San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2021**

**ÍNDICE GENERAL**

**MEMORIA ..... 1**

**ANEXO I: CONFIGURACIÓN FASTSIM ..... 78**

**ANEXO II: ANÁLISIS GRUPO 2 – VEHÍCULOS SUV ..... 83**

## ÍNDICE FIGURAS

Figura 1.1 Perfil de velocidades del ciclo WLTC de la clase 3b [2].	6
Figura 1.2 Equipo PEMS [4].	7
Figura 1.3 Perfil de velocidades del ciclo EPA FTP-75 [5].	8
Figura 1.4 Perfil de velocidades ciclo SFTP-US06.	9
Figura 1.5 Perfil de velocidades ciclo SFTP-SC03.	10
Figura 1.6 Tipos de arquitecturas de motor.	10
Figura 1.7 Vehículo microhíbrido.	12
Figura 1.8 Vehículo híbrido suave.	12
Figura 1.9 Vehículo híbrido enchufable.	13
Figura 1.10 Vehículo eléctrico de batería.	14
Figura 1.11 Vehículo de pila de combustible.	15
Figura 1.12 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en pendiente [11].	16
Figura 1.13 Curva de eficiencia en función de la potencia de un motor térmico en FASTSim.	18
Figura 1.14 Comparativa de curva de eficiencia de un modelo en FASTSim vs Nissan Leaf.	18
Figura 1.15 Sección de entrada de datos FASTSim.	20
Figura 1.16 Sección de simulación FASTSim.	21
Figura 1.17 Sección de resultados FASTSim.	21
Figura 2.1 Mapa de la isla de Tenerife.	22
Figura 2.2 Perfil de velocidades de un ciclo.	23
Figura 2.3 Distribución de la distancia de los ciclos.	24
Figura 2.4 Distribución de la velocidad media de los ciclos.	24
Figura 2.5 Distribución del gradiente promedio de los ciclos.	25
Figura 2.6 Distribución del tiempo en ralentí de los ciclos.	25
Figura 2.7 Perfil de velocidades y gradiente del ciclo TF_11.	28
Figura 2.8 a) Datos del ciclo de conducción TF_11 para el modelo SUV gasolina. b) Operación del MCIA del modelo SUV gasolina en el ciclo TF_11. c) Eficiencia del motor de combustión del modelo SUV gasolina para el ciclo TF_11.	29
Figura 2.9 a) Datos del ciclo de conducción TF_11 para el modelo SUV HEV. b) Operación del MCIA y de la batería del modelo SUV HEV para el ciclo TF_11. c) Eficiencia del MCIA del modelo SUV HEV para el ciclo TF_11.	

d) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV HEV para el ciclo TF_11.....	31
Figura 2.10 a) Datos del ciclo TF_11 para el modelo SUV PHEV b) Operación del MCIA y la batería del modelo SUV PHEV en el ciclo TF_11 c) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV PHEV para el ciclo TF_11 d) Eficiencia del motor térmico del modelo SUV PHEV para el ciclo TF_11.....	33
Figura 2.11 a) Datos del ciclo TF_11 para el modelo SUV BEV b) Operación de la batería del modelo SUV BEV para el ciclo TF_11 c) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV BEV para el ciclo TF_11. ....	34
Figura 2.12 Validación de modelos convencionales, HEV y PHEV. ....	36
Figura 2.13 Validación de Modelos BEV y PHEV .....	36
Figura 3.1 Histograma de consumo del modelo Sedán gasolina.....	38
Figura 3.2 Histograma de consumo del modelo Sedán diésel.....	38
Figura 3.3 Histograma de consumo del modelo Sedán GLP .....	39
Figura 3.4 Histograma de consumo del modelo Sedán HEV .....	40
Figura 3.5 Histograma de consumo del motor térmico del modelo Sedán PHEV. ....	40
Figura 3.6 Comparativa de consumo del motor térmico de diferentes modelos (grupo 1). ....	41
Figura 3.7 Histograma de consumo del motor eléctrico del modelo Sedán PHEV. ....	42
Figura 3.8 Histograma de consumo del modelo Sedán BEV. ....	43
Figura 3.9 Comparativa de consumo del motor eléctrico de diferentes modelos (grupo 1). ....	43
Figura 3.10 Comparativa del consumo del motor térmico de diferentes modelos (grupo 2). ....	45
Figura 3.11 Comparativa de consumo eléctrico de diferentes modelos (grupo 2). ....	46
Figura 3.12 Comparativa de consumo de los modelos convencionales. ....	47
Figura 3.13 Comparativa de consumo de los modelos HEV.....	48
Figura 3.14 Comparativa de consumo del motor térmico de los modelos PHEV ...	49
Figura 3.15 Comparativa de consumo del motor eléctrico de los modelos PHEV. ....	49
Figura 3.16 Comparativa de consumo de los modelos BEV.....	50
Figura 3.17 Consumo con respecto al peso de diferentes modelos (motores térmicos). ....	51

---

Figura 3.18 Consumo con respecto al peso de diferentes modelos (motores eléctricos).....	52
Figura 4.1 Representación del análisis Well-To-Wheels.....	53
Figura 4.2 Comparativa de emisiones de CO <sub>2</sub> de los diferentes modelos (grupo1). ....	56
Figura 4.3 Comparativa de emisiones de CO <sub>2</sub> de los diferentes modelos (grupo 2).....	56
Figura 4.4 Emisiones de CO <sub>2</sub> del modelo SUV BEV y otros modelos Sedán. ....	58
Figura 5.1 Comparativa Escenario1 vs Escenario 2. ....	62
Figura 5.2 Comparativa Escenario 1 vs Escenario 3. ....	63
Figura 5.3 Comparativa Escenario 2 vs Escenario 3 ....	64
Figura 8.1 Vista general de la pestaña VehicleIO de FASTSim.....	69
Figura 8.2 Herramienta para importar vehículos ligeros de FASTSim.....	69
Figura 8.3 Herramienta para calcular los pesos de los diferentes componentes en FASTSim.....	70
Figura 8.4 Apartados Fuel Storage y Fuel Converter de FastSim. ....	70
Figura 8.5 Apartados Motor y Traction Battery de FASTSim. ....	71
Figura 8.6 Apartado Validation Data de FastSim. ....	71
Figura 8.7 Pestaña de resultados de consumos y autonomía de FastSim. ....	72
Figura 9.1 Histograma de consumo del modelo SUV gasolina.....	73
Figura 9.2 Histograma de consumo del modelo SUV diésel.....	74
Figura 9.3 Histograma de consumo del modelo SUV HEV.....	75
Figura 9.4 Histograma de consumo del motor térmico del modelo SUV PHEV. ....	75
Figura 9.5 Histograma de consumo eléctrico del modelo SUV PHEV.....	76
Figura 9.6 Histograma de consumo del modelo SUV BEV. ....	77

## ÍNDICE TABLAS

Tabla 1.1 Valores característicos del ciclo WLTC clase 3b [2].	6
Tabla 1.2 Requerimientos ciclo RDE.	7
Tabla 1.3 Características principales ciclos de homologación EPA.	9
Tabla 2.1 Características principales de diferentes ciclos y datos promedio de los ciclos Tenerife.	26
Tabla 2.2 Resumen de los modelos con motor térmico.	27
Tabla 2.3 Resumen de los modelos PHEV y BEV (motor eléctrico).	27
Tabla 2.4 Validación consumos del motor eléctrico de los modelos de FASTSim.	35
Tabla 2.5 Validación consumos del MCIA de los modelos de FASTSim.	35
Tabla 3.1 Composición grupo 1.	37
Tabla 3.2 Comparativa de consumos grupo 1.	44
Tabla 3.3 Composición grupo 2.	45
Tabla 3.4 Comparativa de consumos grupo 2.	46
Tabla 3.5 Diferencia de peso y consumo entre modelos sedán y SUV.	51
Tabla 4.1 Factores de emisión de diferentes combustibles [15].	54
Tabla 4.2 Reducción de emisiones con respecto al modelo Sedán gasolina.	57
Tabla 4.3 Reducción de emisiones con respecto al modelo SUV gasolina.	57
Tabla 4.4 Comparativa emisiones de CO <sub>2</sub> modelo SUV BEV y otros modelos Sedán.	58
Tabla 5.1 Parque de turismos de la Zona Metropolitana.	60
Tabla 5.2 Emisiones medias por motorización.	60
Tabla 5.3 Evolución Escenario 1.	61
Tabla 5.4 Evolución Escenario 2.	61
Tabla 5.5 Evolución Escenario 3.	62
Tabla 5.6 Comparativa Escenario 2 y 3.	63
Tabla 5.7 Emisiones de turismos respecto a emisiones del sistema eléctrico insular.	64
Tabla 9.1 Composición grupo 2.	73



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

**TRABAJO FIN DE GRADO**

**ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE  
REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> A  
TRAVÉS DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL  
PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DE  
TENERIFE**

**MEMORIA**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor:** Ricardo García González

**Tutor:** Óscar García Afonso

**San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2021**

## ÍNDICE MEMORIA

<b>1</b>	<b>INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>3</b>
1.1	Resumen.....	3
1.2	Abstract .....	3
1.3	Antecedentes .....	4
1.4	Objetivos .....	4
1.5	Ciclos de homologación.....	4
1.5.1	Ciclo WLTP .....	5
1.5.2	Ciclos RDE.....	7
1.5.3	Ciclo FTP-75 .....	8
1.6	Tipos de motorización.....	10
1.6.1	Vehículos convencionales .....	11
1.6.2	Vehículos híbridos .....	11
1.6.3	Vehículos eléctricos .....	14
1.7	Software de simulación: FASTSim .....	15
<b>2</b>	<b>METODOLOGÍA</b> .....	<b>22</b>
2.1	Adquisición de los ciclos .....	22
2.2	Análisis de los ciclos .....	23
2.3	Configuración y validación de los modelos.....	26
<b>3</b>	<b>ANÁLISIS</b> .....	<b>37</b>
3.1	Análisis grupo 1 – Vehículos sedán.....	37
3.2	Análisis grupo 2 – Vehículos SUV .....	44
3.3	Análisis por arquitecturas.....	47
<b>4</b>	<b>EMISIONES CO<sub>2</sub></b> .....	<b>53</b>
4.1	Análisis Well to Wheels (WTW) .....	53
4.2	Análisis de las emisiones .....	54
<b>5</b>	<b>POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES A CORTO Y MEDIO PLAZO</b> .....	<b>59</b>
5.1	Escenario 1 .....	60
5.2	Escenario 2 .....	61
5.3	Escenario 3 .....	62
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>65</b>
<b>7</b>	<b>REFERENCIAS</b> .....	<b>67</b>
<b>8</b>	<b>ANEXO I: CONFIGURACIÓN FASTSIM</b> .....	<b>69</b>

---

**9 ANEXO II: ANÁLISIS GRUPO 2 – VEHÍCULOS SUV .....73**

---

# 1 INTRODUCCIÓN

## 1.1 Resumen

---

El presente Trabajo Fin de Grado tiene como objeto el estudio del potencial de reducción de emisiones de dióxido de carbono a través de la electrificación del parque de turismos de Tenerife.

Para ello, se recopilan 490 ciclos de conducción real de residentes en la isla de diferentes edades y géneros, obteniendo así las principales características de la conducción en la isla.

Mediante el programa FASTSim, se crean modelos de vehículos de diferentes sistemas propulsivos que posteriormente se utilizan para simular los ciclos de conducción, obteniendo así el consumo y las emisiones de dióxido de carbono asociadas a cada motorización. Con estos datos se presentan una serie de acciones que se consideran las más apropiadas para conseguir una reducción de emisiones efectiva.

Por último, se presentan una serie de escenarios futuros para mostrar de forma más intuitiva el potencial del vehículo eléctrico e híbrido en la reducción de emisiones de dióxido de carbono de Tenerife.

## 1.2 Abstract

---

The aim of this Final Degree Project is the study of the potential for reduce carbon dioxide emissions through the electrification of the vehicle fleet of Tenerife.

For this, 490 real driving cycles of residents on the island with different ages and genders are collected. Thus, obtaining the main characteristics of driving on the island.

Through FASTSim, vehicle models of different powertrains are created and subsequently used to simulate the driving cycles, thus obtaining the fuel economy and carbon dioxide emissions associated to each engine. With these data, a series of actions that are considered the most appropriate to achieve an effective emission reduction are presented.

Finally, a series of futures scenarios are presented to show in a clear way the potential of the electric and hybrid vehicle in reduce the carbon dioxide emissions in Tenerife.

### 1.3 Antecedentes

En los últimos años ha habido un creciente interés por parte de la población y de la Administración Pública en la incorporación al parque automóvil tinerfeño de un mayor número de coches eléctricos e híbridos, con el objetivo de reducir las emisiones de dióxido de carbono a la atmósfera y también la endémica dependencia energética de las Islas Canarias.

Esto coincide con el cambio de normativa de la Unión Europea (UE) por la cual se limita el nivel de emisiones de CO<sub>2</sub> de los vehículos ligeros nuevos que se venden en territorio de la UE a 95 gCO<sub>2</sub>/km de media por fabricante, obligando a la industria automóvil a incrementar sus ventas de vehículos eléctricos o híbridos para poder alcanzar estos niveles que son los más exigentes del mundo, ya que en China son de 117 gCO<sub>2</sub>/ km, en Japón 122 gCO<sub>2</sub>/ km y en Estados Unidos 125 gCO<sub>2</sub>/ km.

Además, la UE cambió en 2017 el ciclo de homologación New European Driving Cycle (NEDC) por el nuevo y más exigente Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP) para medir las emisiones de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) y el consumo, añadiéndole además un ciclo Real Driving Emissions (RDE) para las emisiones de partículas, monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>). Este ciclo no se realiza en laboratorio si no en condiciones de conducción real, consiguiendo así unos valores de consumo de homologación mucho más exactos que los que se obtenían con el antiguo ciclo NEDC, en el cual se subestimaba notablemente el consumo de combustible real del vehículo y por tanto sus emisiones contaminantes.

A pesar de estas mejoras, el ciclo WLTP no consigue reproducir fielmente lo que ocurre en la conducción real, por lo que se prevé que se sustituya definitivamente por el RDE y las emisiones de CO<sub>2</sub> pasen a completarse con este último.

### 1.4 Objetivos

Este trabajo tiene por objetivo el estudio del potencial de reducción de emisiones de dióxido de carbono en Tenerife mediante la electrificación del parque de turismos de esta. Para ello se estimarán las emisiones de este gas contaminante a partir del consumo de energía del vehículo en ciclos de conducción real de residentes en la isla de diferentes edades, teniendo en cuenta la composición actual del mix energético de Tenerife. Finalmente, se establecerán escenarios futuros simplificados de introducción de diferentes sistemas propulsivos en el parque automovilístico.

### 1.5 Ciclos de homologación

Los ciclos de homologación son utilizados por organismos oficiales para certificar los valores de consumo y de emisiones de gases contaminantes por parte del vehículo que es sometido al mismo. Cada país o región posee su propio ciclo de homologación, por ejemplo, en el caso de Europa, se utiliza el ciclo WLTP para

cuantificar las emisiones de dióxido de carbono y el consumo del vehículo, mientras que, para partículas, monóxido de carbono, hidrocarburos y NO<sub>x</sub> se le añade un ciclo RDE al WLTP. Por otro lado, en Estados Unidos se utiliza el EPA Federal Test Procedure (FTP-75).

Además, estos ciclos son los utilizados por las marcas para justificar sus mejoras en los consumos de los vehículos y sus consiguientes reducciones de emisiones de gases de efecto invernadero. Esto hace que conseguir ciclos de homologación lo más realistas posibles sea una prioridad, ya que de ellos depende la etiqueta medioambiental que se le otorgue a un vehículo, el coste de determinados impuestos, o si el fabricante (en la Unión Europea) tendrá que enfrentarse a multas a final de año por emitir de media sus vehículos nuevos más de 95 gCO<sub>2</sub>/km [1].

### 1.5.1 Ciclo WLTP

Este ciclo entró en vigor en el año 2017 en sustitución del NEDC, ya que se observó que este último ciclo tenía deficiencias a la hora de reproducir el comportamiento real del vehículo en carretera.

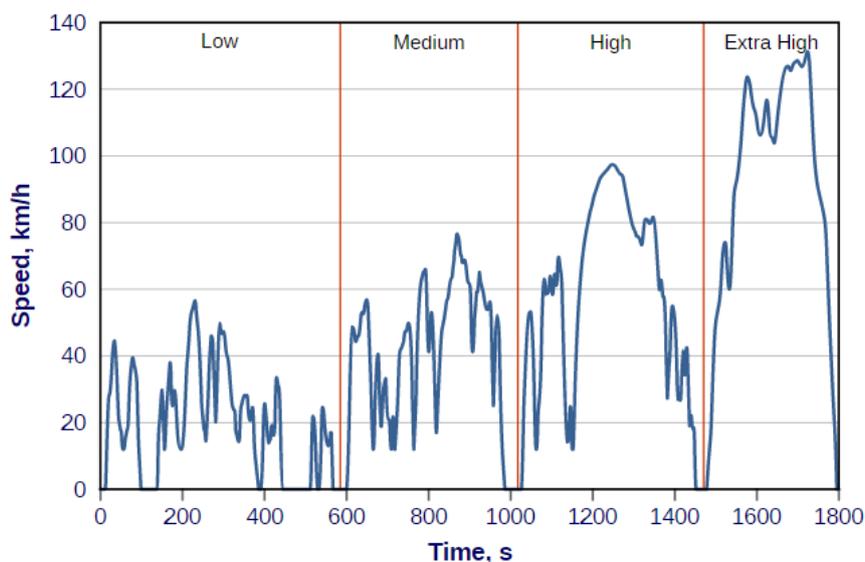
El ciclo WLTP se realiza en laboratorio con la ayuda de rodillos y su diseño se basa en una recopilación de datos reales de conducción de diferentes conductores, tratando de plasmar en él situaciones reales de aceleración, frenado o parada entre otras, lo más realista posible.

El ciclo de homologación WLTP, consiste en diferentes ciclos World harmonized Light vehicles Test Cycles (WLTC) según la relación potencia-masa de este, siendo el WLTC Clase 3b el representativo para Europa, ya que tiene una velocidad máxima igual o mayor a 120 km/h y la relación potencia-masa es la más alta de todos los ciclos de WLTP [2].

Este ciclo consta de cuatro fases de conducción, que vienen a reproducir conducciones por ciudad, por carreteras interurbanas y por autopistas. El ciclo comienza por la fase de baja velocidad (ciudad), que se desarrolla durante 589 segundos y una velocidad máxima de 56,5 km/h. La siguiente fase es la de velocidad media (interurbano), que dura 433 segundos y su velocidad máxima es de 76,6 km/h. A continuación, se desarrolla la fase de alta velocidad durante 455 segundos y una velocidad máxima de 97,4 km/h. Para terminar, la fase de muy alta velocidad durante 323 segundos y una velocidad máxima de 131,3 km/h. En la Figura 1.1 se expone el perfil de velocidades del ciclo WLTC 3b y en la Tabla 1.1 una serie de características del mismo.

**Tabla 1.1** Valores característicos del ciclo WLTC clase 3b [2].

Fase	Tiempo (s)	Tiempo en ralentí (s)	Tiempo en ralentí (%)	Distancia (m)	Velocidad media (km/h)
<b>Baja</b>	589	156	26,5%	3095	18,9
<b>Media</b>	433	48	11,1%	4756	39,5
<b>Alta</b>	455	31	6,8%	7162	56,7
<b>Muy alta</b>	323	7	2,2%	8254	92
<b>Total</b>	1800	242	13,4%	23266	46,6

**Figura 1.1** Perfil de velocidades del ciclo WLTC de la clase 3b [2]

Como se puede deducir de la Tabla 1.1, en las fases de alta velocidad los tiempos de parada son menores y las velocidades medias más altas en comparación a la fase de baja velocidad, reproduciendo así el comportamiento en las diferentes vías existentes (carreteras urbanas, interurbanas y autopistas).

Este ciclo lleva aparejado una prueba de carga en carretera, que se lleva a cabo antes de la realización de este, en la cual se mide la energía necesaria para que el vehículo circule a una velocidad determinada y poder así configurar los rodillos del banco de pruebas. Esta prueba de carga permite conocer el valor del coeficiente aerodinámico del coche, la resistencia a la rodadura y las pérdidas mecánicas de este [3].

Cabe destacar que cuando el modelo a homologar es un híbrido enchufable (PHEV) se realiza el ciclo de homologación en modo charge-depleting y en modo charge-sustaining. El primero consiste en conducción totalmente eléctrica y el segundo se trata de realizar el ciclo con la batería cargándose por la acción del motor térmico y la frenada regenerativa.

### 1.5.2 Ciclos RDE

Estos ciclos, como su nombre indica, se realizan en carretera abierta al tráfico normal y con ellos se complementan las mediciones de contaminantes del ciclo WLTP. Para poder realizar un ciclo RDE es necesario equipar el vehículo a homologar con un equipo de emisiones portátil PEMS (Portable Emissions Measurement System). Este sistema es el encargado de medir los valores de consumo, partículas emitidas y gases contaminantes, además, aporta los valores de las condiciones ambientales y la posición GPS del vehículo a prueba [4].



Figura 1.2 Equipo PEMS [4].

La realización de este tipo de ciclo de homologación tiene una serie de requisitos ya que al producirse en carretera no es posible reproducirlo completamente. Estos requisitos se muestran en la Tabla 2.1.

Tabla 1.2 Requerimientos ciclo RDE

	Urbano	Interurbano	Autopista
<b>Velocidad (km/h)</b>	0-60	60-90	90-145
<b>Distancia mínima (km)</b>	16	16	16
<b>Porcentaje distancia (%)</b>	29-44	23-43	23-43
<b>Velocidad media (km/h)</b>	15-40	no aplica	no aplica
<b>Diferencia de altitud (m)</b>	≤ 100		
<b>Tiempo de parada (s)</b>	300	no aplica	no aplica
<b>Tiempo total (min)</b>	90-120		

Fuente: Elaboración propia

Como se puede observar, el ciclo está dividido en tres fases, urbana, interurbana y autopista. Cada uno con una longitud de al menos 16 kilómetros y deberán suponer como mínimo un 29% de la ruta en el caso de la fase urbana y un 23% para la interurbana y la de autopista. Por otra parte, la velocidad media para la fase urbana debe estar entre 15 y 40 km/h con una velocidad máxima de 60 km/h, para la interurbana esta velocidad máxima será de 90 km/h y la mínima de 60 km/h y para la fase autopista la velocidad deberá estar entre 145 km/h y 90 km/h, permaneciendo

además por encima de 100 km/h durante al menos 5 minutos. En cuanto al tiempo de parada, este debe ser de 300 segundos como máximo y estas paradas deben darse únicamente en fase urbana. En total, el ciclo RDE debe durar entre 90 y 120 minutos y la diferencia de altura entre el punto inicial y el final debe ser de menos de 100 metros.

Complementariamente a esto, se exige que el estilo de conducción no sea ni demasiado agresivo ni muy pasivo, por lo que se estiman unos valores máximos de “v\*a+” (velocity times positive acceleration), con el cual se estima si la conducción es demasiado agresiva, y mínimos de RPA (Relative Positive Acceleration), que mide si por el contrario la conducción es demasiado pasiva.

Cabe destacar que los ciclos que se van a utilizar en este Trabajo Fin de Grado, aún siendo en condiciones reales de conducción, no se pueden considerar ciclos RDE la mayoría de ellos ya que no cumplen alguna o ninguna de las condiciones para serlo. Igualmente, el objetivo no era obtener este tipo de ciclo si no conducciones totalmente reales.

### 1.5.3 Ciclo FTP-75

El ciclo Federal Test Procedure 75 de la Environmental Protection Agency (EPA), es el ciclo de homologación utilizado en los Estados Unidos y se realiza, al igual que el WLTP, en laboratorio con ayuda de rodillos. Este ciclo consiste en cuatro fases diferenciadas como se puede observar en la Figura 1.4:

- Fase transitoria de arranque en frío, con una duración de 505 segundos.
- Fase de estabilización, de 866 segundos.
- Parada en caliente de entre 540 y 660 segundos.
- Fase transitoria de arranque en caliente de otros 505 segundos.

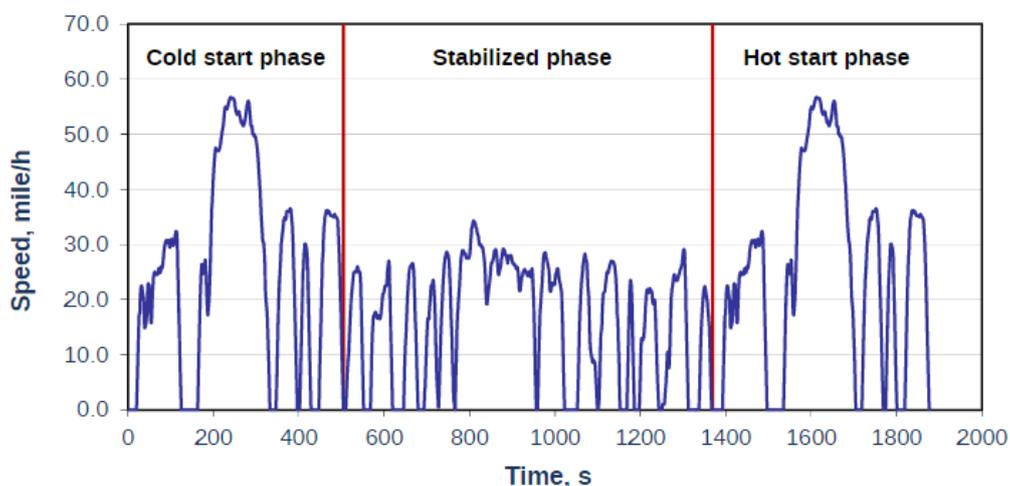


Figura 1.3 Perfil de velocidades del ciclo EPA FTP-75 [5].

El ciclo dura 1877 segundos sin contar los aproximadamente 10 minutos de la tercera fase, se recorre una distancia de 17,77 kilómetros, su velocidad media es de 34,12 km/h y la velocidad máxima es de 91,25 km/h [5].

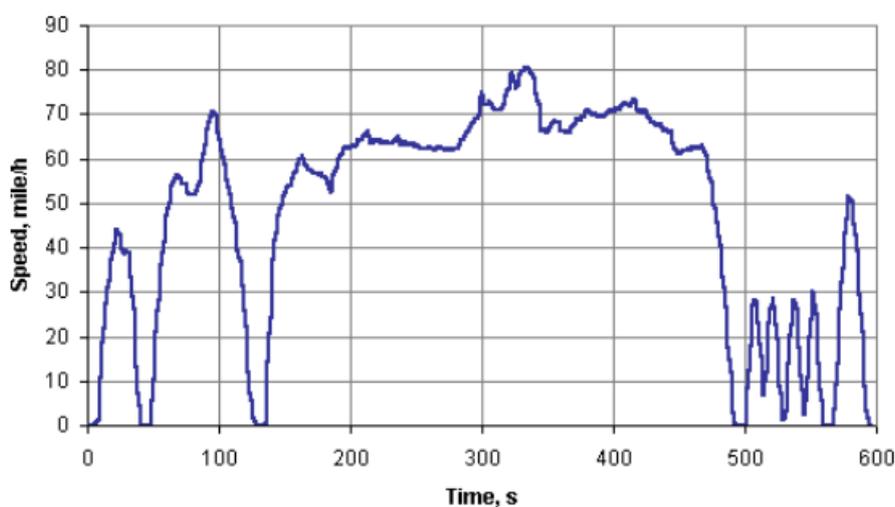
Desde el año 2000 a este ciclo se le añaden dos ciclos suplementarios designados Supplemental Federal Test Procedures (SFTP) para mejorar la precisión de la homologación, estos ciclos suplementarios son el US06 que representa una conducción agresiva y rápida y el SC03 en el cual se recoge el uso del aire acondicionado. A continuación, se exponen las principales características de los ciclos SFTP y del FTP-75 en la Tabla 1.3 [5],[6] y [7].

**Tabla 1.3** Características principales ciclos de homologación EPA

Ciclo	Distancia (km)	Velocidad media (km/h)	Velocidad máxima (km/h)	Tiempo (s)
<b>SFTP-US06</b>	12,8	77,9	129	596
<b>SFTP-SC03</b>	5,8	34,8	88,2	596
<b>FTP-75</b>	17,8	34,1	91,2	18,8

**Fuente:** Elaboración propia.

El carácter más agresivo y rápido del ciclo SFTP-US06 se puede apreciar rápidamente al observar su perfil de velocidades (Figura 1.4), mientras que en el SFTP-SC03 las velocidades son más bajas (Figura 1.5).



**Figura 1.4** Perfil de velocidades ciclo SFTP-US06.

**Fuente:** [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com) [6]

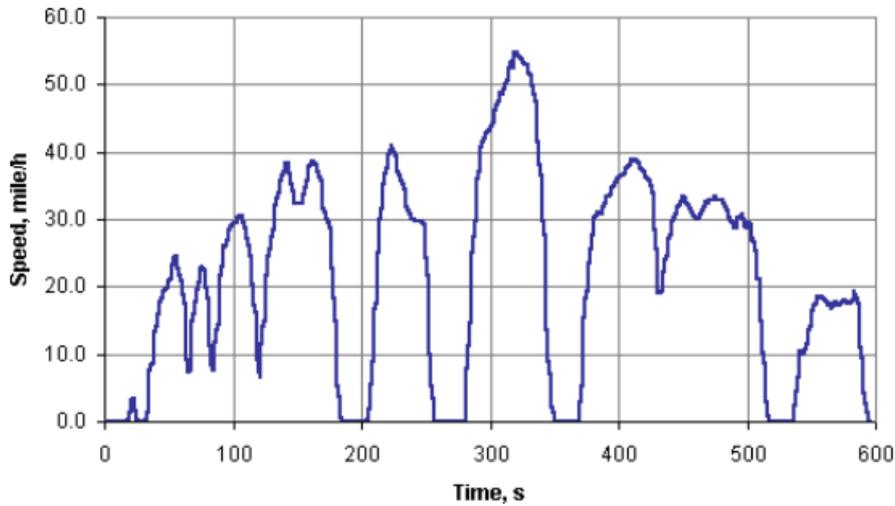


Figura 1.5 Perfil de velocidades ciclo SFTP-SC03.

Fuente: [www.dieselnet.com](http://www.dieselnet.com) [7]

## 1.6 Tipos de motorización

Actualmente existen vehículos en el mercado con diferentes arquitecturas de sistemas propulsivos, desde los motores de combustión interna alternativos (MCIA), hasta los motores eléctricos, pasando por los híbridos y los de pila de combustible como se puede ver en la Figura 1.6.

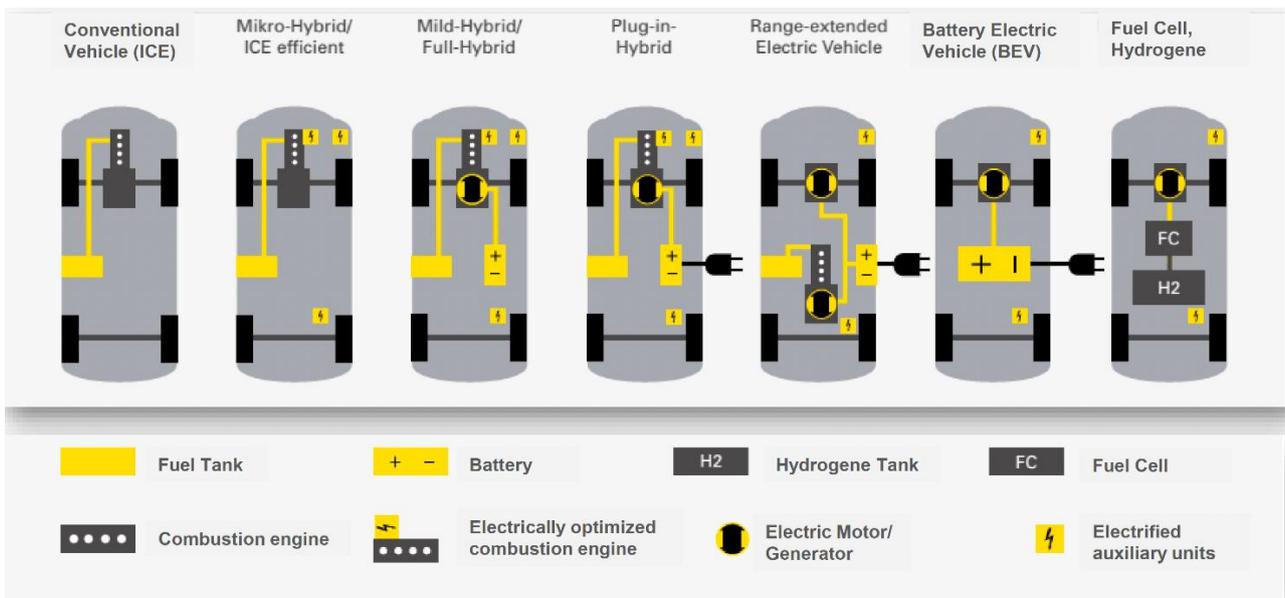


Figura 1.6 Tipos de arquitecturas de motor

Fuente: [www.industrialunion.org](http://www.industrialunion.org)

Este estudio se centrará primordialmente en los vehículos convencionales (impulsados por un MCI A), en los híbridos enchufables (PHEV) y no enchufables (HEV) y en los vehículos eléctricos (BEV). Esto se debe a que el parque de turismos de Tenerife se compone principalmente de modelos convencionales y aunque los modelos híbridos y los BEV son minoritarios en la actualidad, tienen una proyección de crecimiento notable a medio plazo.

A continuación, se expondrán las características principales de cada una de las motorizaciones expuestas en la Figura 1.6.

### **1.6.1 Vehículos convencionales**

Estos turismos tienen como fuente de propulsión un MCI A. El funcionamiento de estos motores se basa en la obtención de un movimiento alternativo mediante la combustión del fluido que lo atraviesa (combustible más aire). Existen infinidad de tipos de motores de combustión interna alternativos, pero lo más utilizados en los turismos comerciales son los motores de encendido provocado (MEP, ciclo Otto) y los de encendido por compresión (MEC, ciclo Diesel).

Las ventajas de estos motores son que tienen una alta autonomía, existe una gran red de suministro de combustible y que es la motorización más barata. En cuanto a las desventajas, son contaminantes ya que emiten CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> y otros gases y partículas contaminantes. Además, el combustible es limitado ya que depende del petróleo.

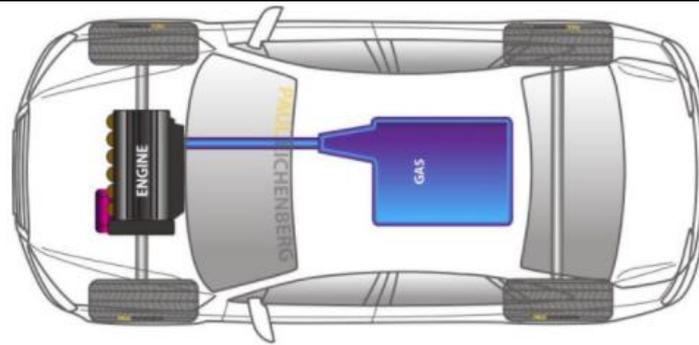
### **1.6.2 Vehículos híbridos**

Esta arquitectura está basada en el empleo de dos motores, uno eléctrico y un MCI A. Esta motorización es capaz de desplazar el vehículo de diferentes formas, solo con el MCI A, el motor térmico en conjunción con el eléctrico o solo este último.

Las motorizaciones híbridas se pueden dividir en microhíbridas, mild-hybrid o híbridos suaves, híbridos convencionales o no enchufables y, por último, híbridos enchufables.

#### **Microhíbridos**

Esta arquitectura consta de un MCI A al que se le añade una batería de 12 V que se encarga de accionar el sistema Start-Stop, el cual permite parar el motor cuando no se está circulando y volver a arrancarlo en menos de 400 milisegundos cuando el conductor desee emprender de nuevo la marcha. Este tipo de motorización consigue unas pequeñas reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> y del consumo de combustible a cambio de un reducido incremento en el precio del vehículo. Ver Figura 1.7.

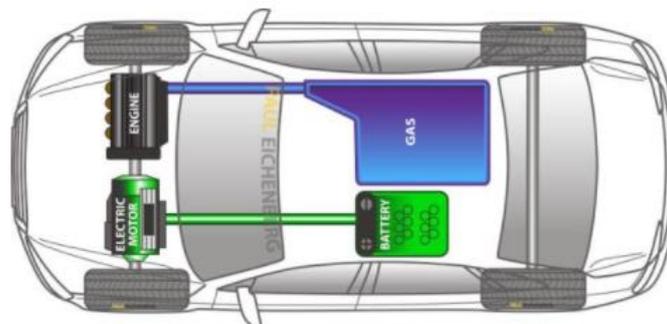


**Figura 1.7** Vehículo microhíbrido

Fuente: [www.pauleichenberg.com](http://www.pauleichenberg.com)

### Híbridos suaves

Esta motorización está basada en un MCIAs y un motor eléctrico accionado por una batería de 48 V. En este caso el MCIAs se desconecta tanto en las paradas como en momentos de circulación sin aceleración o con aceleraciones muy bajas. En estos vehículos el motor eléctrico funciona como complemento del térmico, trabajando en serie a este, en los momentos de baja eficiencia del MCIAs como los inicios de marcha. En los híbridos suaves se integra un sistema de frenada regenerativa para aprovechar la energía generada por los frenos cuando actúan. En la Figura 1.8 se puede observar un esquema de esta arquitectura.



**Figura 1.8** Vehículo híbrido suave

Fuente: [www.pauleichenberg.com](http://www.pauleichenberg.com)

Los híbridos suaves consiguen reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> de entorno al 10% con respecto a un vehículo convencional con un sobrecoste de aproximadamente 1000 € [8].

## Híbridos no enchufables o convencionales (HEV)

Los vehículos con este tipo de motorización funcionan principalmente con el motor de combustión, pero en los momentos de baja eficiencia de este, como los inicios de marcha, o apagan el MCI y pasan a funcionar solo con el eléctrico, o funcionan con ambos. En esta arquitectura el motor eléctrico y la batería son bastante pequeños y la circulación solo con este motor es limitada. En cuanto a la carga de la batería, esta se produce mediante un sistema de frenada regenerativa y a través de un generador acoplado al motor de combustión (ver Figura 1.6). Esta arquitectura consigue una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de entorno al 20 % con un sobrecoste aproximado de 3000 € [8].

## Híbridos enchufables (PHEV)

En este caso el motor principal sigue siendo el térmico, pero el eléctrico y la batería son sensiblemente mayores que en los HEV ya que en estos vehículos también se recarga la batería mediante la conexión a la red eléctrica a través de un punto de carga (ver Figura 1.9). En estos, caso la autonomía de conducción eléctrica es bastante mayor que en los híbridos convencionales, por lo que, dependiendo del tipo de conducción, de la carretera y de si la batería está cargada, se puede realizar trayectos en modo eléctrico la mayor parte del tiempo o incluso durante todo el viaje.

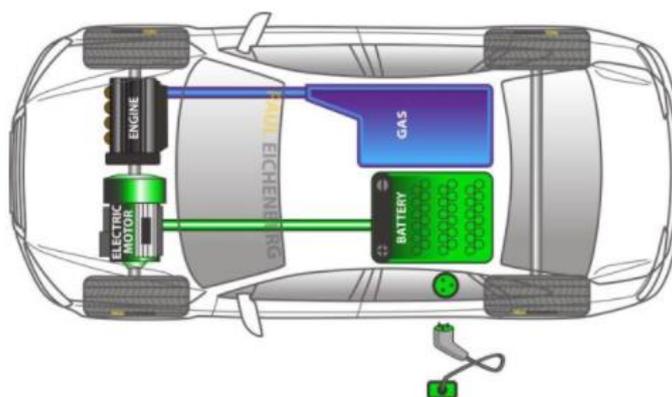


Figura 1.9 Vehículo híbrido enchufable

Fuente: [www.pauleichenberg.com](http://www.pauleichenberg.com)

## Eléctricos de autonomía extendida (REX)

Esta motorización incorpora un motor eléctrico como motor principal y un motor térmico que se encarga de recargar la batería y que en ningún momento impulsa el vehículo sobre el que se monta. Esta arquitectura, que se puede observar en la Figura 1.6, es bastante minoritaria y se ideó para mejorar la baja autonomía de las baterías eléctricas disponibles.

### 1.6.3 Vehículos eléctricos

#### Eléctricos de batería (BEV)

Los vehículos eléctricos de batería son aquellos que son propulsados en su totalidad por un motor eléctrico alimentado por una batería y que por lo tanto no presentan emisiones directas de gases contaminantes. Al igual que en los PHEV la batería se recarga mediante un sistema de frenada regenerativa y mediante la conexión a la red eléctrica. Como desventajas tienen su alto precio de mercado, la escasa red de puntos de carga existente y que para conseguir autonomías parecidas a los vehículos propulsados por MCI necesitan equipar baterías muy pesadas.

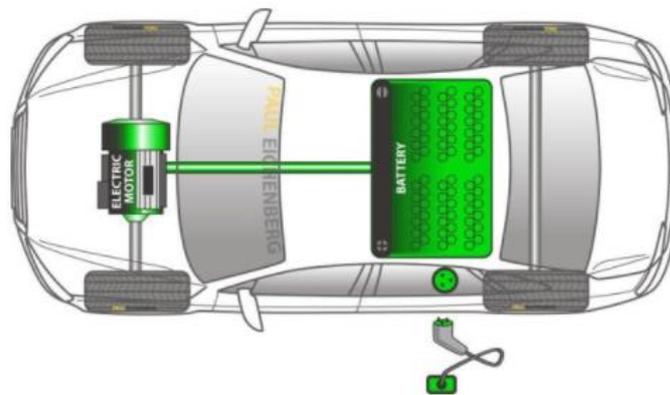


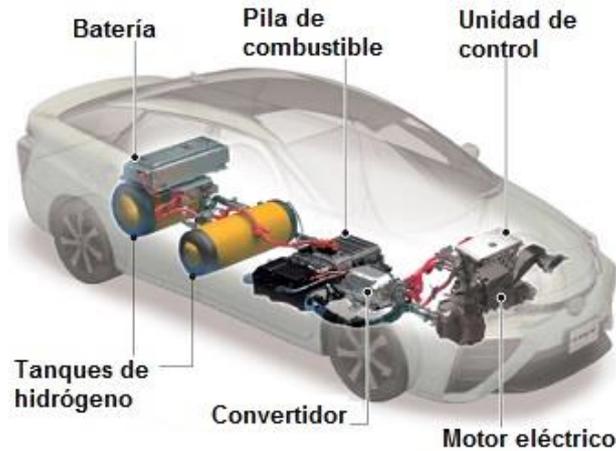
Figura 1.10 Vehículo eléctrico de batería

Fuente: [www.pauleichenberg.com](http://www.pauleichenberg.com)

#### Eléctricos de pila de combustible (FCEV)

Esta arquitectura está basada en la utilización de hidrógeno como elemento principal para generar la corriente eléctrica que alimentará el motor. La electricidad se produce mediante la reacción entre el hidrógeno y el oxígeno en la pila de combustible. Además, también incorporan una batería para almacenar la energía que aporta el sistema de frenada regenerativa. Esta motorización permite que el vehículo no produzca emisiones de gases contaminantes cuando circula, ya que por el tubo de escape se expulsará vapor de agua.

Las principales ventajas de esta motorización es que no tiene emisiones directas de gases de efecto invernadero y que el hidrógeno se puede obtener en cualquier parte del mundo, eliminando la dependencia energética de países sin recursos naturales. Sin embargo, este tipo de vehículos presentan una serie de desventajas como la alta inflamabilidad de las pilas de combustible, la alta dificultad para almacenar y transportar el hidrógeno listo para usarse y el alto precio del combustible.



**Figura 1.11** Vehículo de pila de combustible

**Fuente:** [www.ingemecanica.com](http://www.ingemecanica.com)

## 1.7 Software de simulación: FASTSim

Para realizar la simulación de los ciclos de conducción reales en la isla de Tenerife, se utilizará el programa de simulación FASTSim (Future Automotive Systems Technology Simulator). Este software está desarrollado por el National Renewable Energy Laboratory de los Estados Unidos y basado en Microsoft Excel [9].

FastSim trabaja a través de modelos físico-matemáticos que consiguen representar de forma simplificada el comportamiento del vehículo creado. Para facilitar el entendimiento de las capacidades del programa, se van a exponer en primera instancia las fuerzas que actúan sobre un vehículo.

La fuerza de desplazamiento es la producida por el motor al crear un par que se transmite a las ruedas que al estar en contacto con el suelo generan esta fuerza en el sentido de la marcha. Esta fuerza depende de las prestaciones del motor, la transmisión del vehículo y de las ruedas:

$$F_d = \frac{T \cdot N_t \cdot N_f}{r_c} \eta_{tf} \quad (1.1)$$

Siendo  $T$  el par generador por el motor,  $N_t$  la relación de transmisión de la marcha  $t$ ,  $N_f$  la relación de desmultiplicación,  $\eta_{tf}$  el rendimiento de la transmisión y  $r_c$  el radio bajo carga del neumático.

Además, actúan una serie de fuerzas que se oponen al desplazamiento del vehículo, como la fuerza de rozamiento entre el asfalto y los neumáticos, la resistencia aerodinámica y en caso de que el vehículo esté en una pendiente, el peso del propio coche.

La fuerza de rozamiento debida a la rodadura depende del coeficiente de rozamiento suelo-neumático y del peso del vehículo.

$$F_r = \mu \cdot P \quad (1.2)$$

La resistencia aerodinámica del vehículo se produce debido al paso del aire sobre el vehículo, por lo tanto, su valor es directamente proporcional al área frontal del coche, a la velocidad de desplazamiento, a la densidad del aire y al coeficiente de rozamiento aerodinámico. En la ecuación (1.3)  $C_x$  el coeficiente de rozamiento aerodinámico,  $A_f$  el área frontal del vehículo,  $V$  la velocidad y  $\rho$  la densidad del aire.

$$F_a = \frac{1}{2} \rho \cdot C_x \cdot A_f \cdot V^2 \quad (1.3)$$

Como se nombró anteriormente, el peso del vehículo solo actuará en favor del desplazamiento o en contra según si se encuentra en una pendiente descendente o ascendente, en llano no afectará al movimiento del coche. [10]

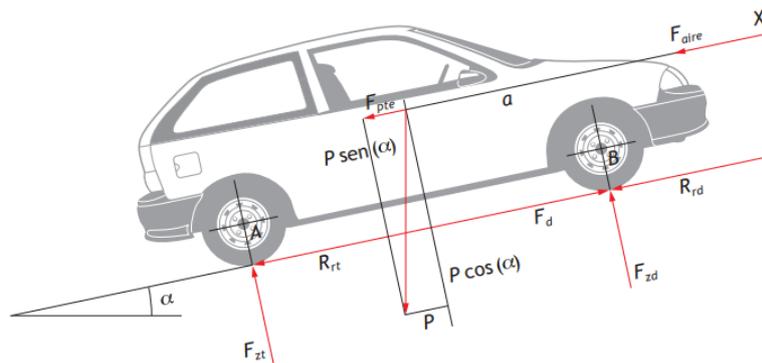


Figura 1.12 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en pendiente [11].

Una vez expuestas las fuerzas que intervienen en el desplazamiento de un vehículo se procede a la explicación del funcionamiento de FASTSim.

El programa utiliza una serie de entradas de datos que están relacionadas con el vehículo, así como con el motor térmico o eléctrico del vehículo, la batería en el caso de los híbridos y eléctricos, el depósito de combustible, las ruedas y la estrategia de gestión de la energía para los híbridos y eléctricos. Con todos estos datos, FASTSim es capaz de crear un modelo de vehículo.

Los parámetros requeridos relacionados con el vehículo son los siguientes:

- Coeficiente aerodinámico.
- Área frontal del vehículo.
- Peso en vacío.

- Peso de carga.
- Centro de gravedad del vehículo.
- Cociente de distribución del peso entre ejes.
- Batalla del vehículo.

Los primeros cuatro parámetros intervienen en los cálculos de potencia necesaria para realizar el ciclo que se simula y los otros están ligados a cálculos de tracción.

En cuanto al depósito de combustible, FASTSim lo modela a partir de cuatro parámetros:

- Potencia.
- Tiempo a plena potencia.
- Energía.
- Coeficiente de masa.

Con estos parámetros se calculan limitaciones de potencia, autonomía del vehículo y la masa del depósito según el tipo de combustible, líquido o gaseoso, que utilice el vehículo. El tiempo a plena potencia interviene en los cálculos de trasiego de combustible, la energía representa la cantidad de combustible que hay expresada en términos de energía y el coeficiente de masa se usa para calcular los cambios de masa según la energía almacenada.

Sobre el motor térmico se requieren otros cuatro parámetros y además una curva de eficiencia. Los parámetros son:

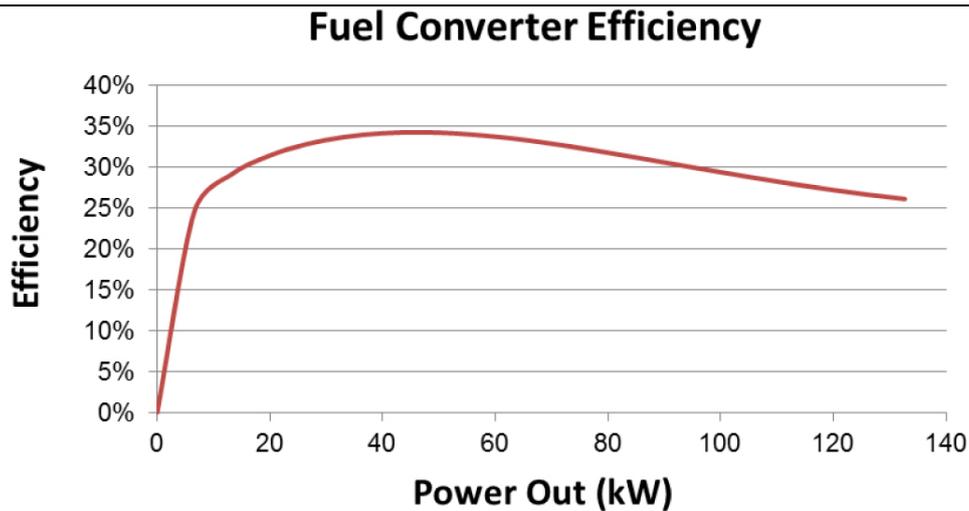
- Potencia.
- Tiempo a plena potencia.
- Peso base.
- Potencia específica.

Los dos primeros parámetros intervienen en los cálculos sobre el desempeño del motor térmico y los dos últimos se utilizan para estimar la masa del motor a partir de la potencia de este.

La eficiencia del MCI se estima a partir de las curvas de eficiencia frente a la potencia (ver Figura 1.13). FASTSim tiene disponible cinco tipos:

- Encendido por chispa.
- Atkinson.
- Diesel.
- Pila de combustible.
- Diesel híbrido.

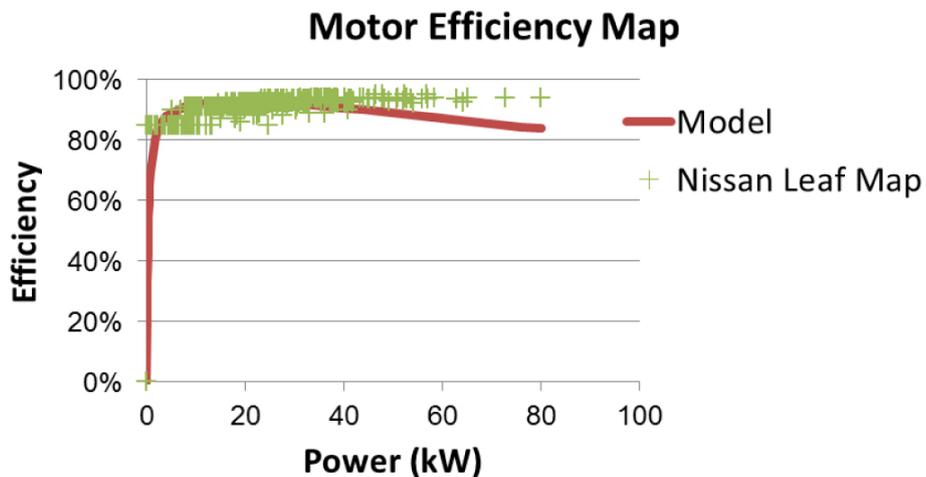
La opción Atkinson es básicamente un motor de encendido por chispa que usa el ciclo Atkinson [12], este ciclo es el que se utiliza en las motorizaciones híbridas.



**Figura 1.13** Curva de eficiencia en función de la potencia de un motor térmico en FASTSim.

**Fuente:** National Renewable Energy Laboratory (EE. UU.) [13].

En el caso del motor eléctrico, viene definido por los mismos parámetros que un motor térmico, pero en este caso la curva de eficiencia será distinta ya que se basa en los puntos de operación, obtenidos de manera experimental, de un motor eléctrico como se puede ver en la Figura 1.14. Esta curva igualmente se puede modificar si fuera necesario.



**Figura 1.14** Comparativa de curva de eficiencia de un modelo en FASTSim vs Nissan Leaf.

**Fuente:** National Renewable Energy Laboratory (EE. UU.) [13].

Para la batería que alimenta el motor eléctrico, se utilizan los siguientes seis parámetros:

- Potencia.
- Energía.

- Peso base.
- Energía específica.
- Eficiencia de ida y vuelta.
- Dos coeficientes de vida de batería.

En el caso de la batería, el programa asume una eficiencia constante, ya que con las tecnologías actuales no se producen caídas de tensión significativas. Con esto se simplifica bastante el proceso de construcción del modelo y del escalado de la batería según los datos introducidos.

En el caso de las ruedas, se introducen cinco parámetros que se usarán para calcular los límites de tracción del vehículo:

- Inercia.
- Número de ruedas.
- Coeficiente de resistencia a la rodadura.
- Radio de la rueda.
- Coeficiente de rozamiento.

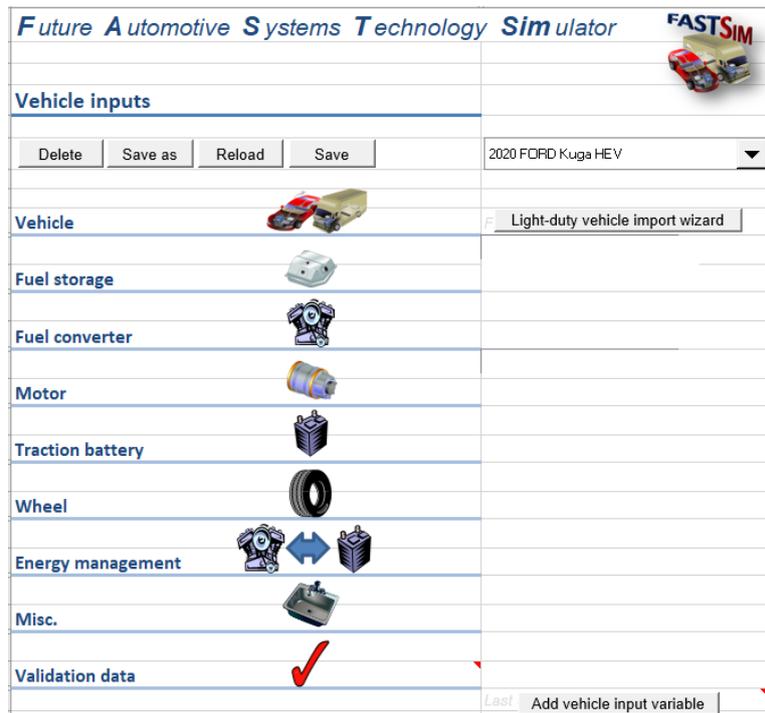
Para la estrategia de gestión de energía, la cual se encarga de decidir cuándo y cómo operan los motores térmico y eléctrico se añaden ocho parámetros de entrada:

- Carga mínima de la batería.
- Carga máxima de la batería.
- Nivel de descarga destinado a mejorar la eficiencia del motor térmico.
- Nivel de carga destinado a mejorar la eficiencia del motor térmico.
- Velocidad a la cual la carga de la batería reservada para ayudar a la aceleración es cero.
- Porcentaje de carga destinado a ayudar en la aceleración.
- Velocidad a la que el motor térmico se arranca.
- Potencia a la que el motor térmico se arranca.

Por último, se encuentran otros parámetros adicionales que ayudan a calibrar el modelo a fin de obtener resultados cercanos a la realidad.

- Eficiencia del alternador.
- Eficiencia del cargador.
- Cargas auxiliares (aire acondicionado, dirección asistida...).
- Peso de la transmisión.
- Eficiencia de la transmisión.
- Multiplicador del peso de los componentes.
- Frenada regenerativa máxima.

Una vez terminado con la fase de introducción de datos, se encuentra el bloque de simulación, como podemos ver en las Figuras 1.15, 1.16 y 1.17. En este bloque se pueden añadir los ciclos de conducción que se desean simular en el programa. Al comenzar la simulación, el programa simulará los ciclos seleccionados y se mostrarán los resultados tanto de consumo del modelo como de peso final, autonomía, aceleración y vida de la batería en el caso de que el modelo posea una. Además, se crearán nuevas pestañas por cada ciclo seleccionado con unos resultados pormenorizados acompañados de gráficas como se mostrará en el Capítulo 2.4 Validación y configuración de los modelos.



**Figura 1.15** Sección de entrada de datos FASTSim.

**Fuente:** Elaboración propia.

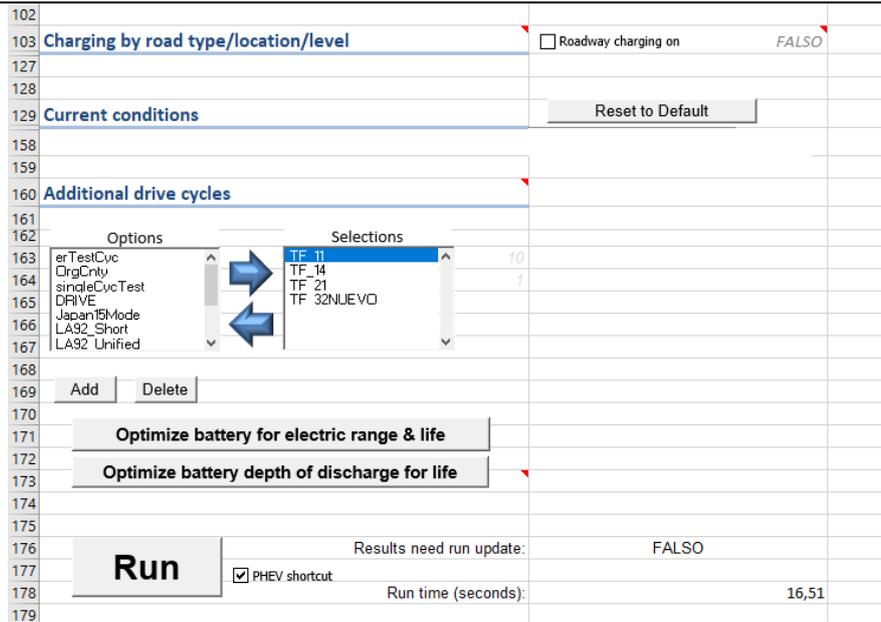


Figura 1.16 Sección de simulación FASTSim.

Fuente: Elaboración propia.

Results	
Error checking parameters	 <i>resStartCell</i>
Laboratory fuel economy	
Adjusted fuel economy	
Performance	
Cost (to consumer pre tax)	
Additional cycle results	
Misc	
PHEV details	FALSO VERDADERO

Figura 1.17 Sección de resultados FASTSim.

Fuente: Elaboración propia.

## 2 METODOLOGÍA

### 2.1 Adquisición de los ciclos

En la obtención de los ciclos de conducción reales participaron 10 personas residentes en la isla de Tenerife de diferentes edades y géneros, seleccionadas buscando tener una muestra de todo tipo de conductores y así obtener diferentes patrones de conducción.

La totalidad de los ciclos se realizaron en la Zona Metropolitana de Tenerife (ver Figura 2.1.), que la componen los municipios de Santa Cruz de Tenerife, San Cristóbal de La Laguna, El Rosario y Tegueste.

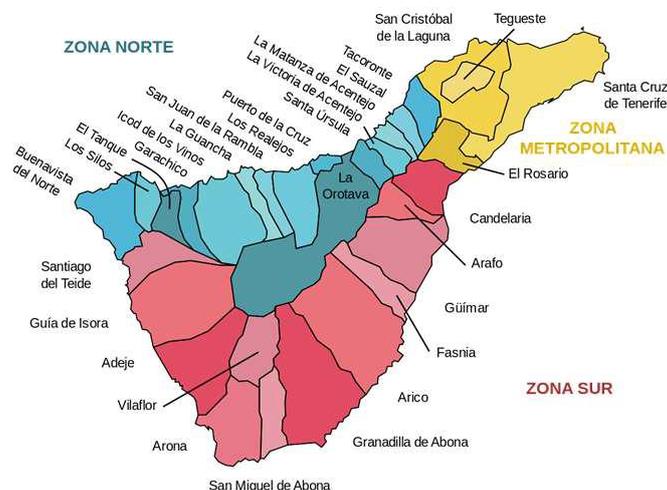


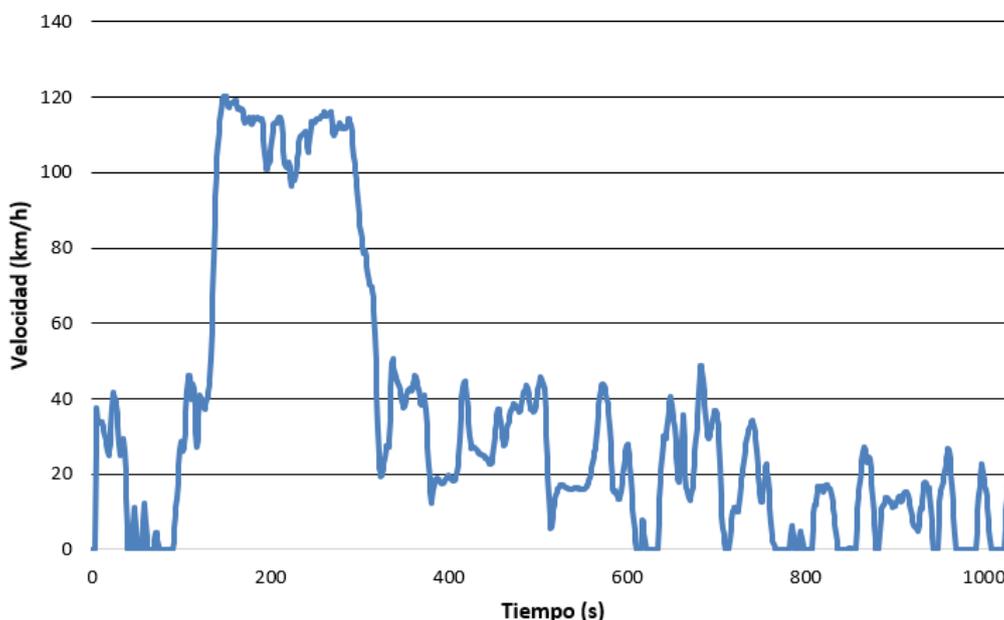
Figura 2.1 Mapa de la isla de Tenerife

Estos ciclos de conducción se obtuvieron a través de la aplicación móvil Speed View GPS, la cual toma datos de posición y altitud con una frecuencia de 1 Hz. A partir de esta información, se puede obtener la velocidad del vehículo y el gradiente en función del tiempo.

Para obtener los datos de conducción los participantes activaban la aplicación al iniciar sus trayectos en coche y la detenían al terminarlos. De esta manera, se obtiene un ciclo de conducción en bruto que posteriormente será procesado a fin de obtener el ciclo de conducción que será utilizado en el análisis. En la Figura 2.2 se muestra un ejemplo del perfil de velocidad del vehículo frente al tiempo. En cuanto al procesado de los ciclos, esto queda fuera del trabajo personal del presente Trabajo Fin de Grado. Finalmente se obtuvieron 490 ciclos de conducción real.

Cabe destacar que estos viajes son trayectos reales del día a día de los participantes, tales como desplazamientos a los centros de trabajo o de estudios,

por ocio, etc. El objetivo de este análisis es estudiar las emisiones de CO<sub>2</sub> en condiciones reales en la isla de Tenerife, por lo que en ningún caso se estudiaron rutas a realizar o se dieron instrucciones sobre el estilo de conducción.



**Figura 2.2** Perfil de velocidades de un ciclo.

**Fuente:** Elaboración propia.

## 2.2 Análisis de los ciclos

Los ciclos obtenidos se caracterizan por recorridos cortos, tal como se puede observar en la Figura 2.3. El número de ciclos por encima de 20 km es muy reducido debido al área de análisis, la Zona Metropolitana de Tenerife. Por otra parte, en la Figura 2.4 se expone la distribución de la velocidad promedio de los ciclos. Esta velocidad se encuentra mayoritariamente entre 40-45 km/h, situándose la mediana de los datos en 38,7 km/h. Los valores de velocidad bajos son característicos de conducciones urbanas, mientras que los ciclos con velocidades promedio mayores corresponden con conducciones en autopista o carreteras extraurbanas. En el caso de la Figura 2.5, se muestran los datos del gradiente medio de los ciclos y se puede afirmar que la muestra está equilibrada, ya que la mediana de los datos es de 0,01%. Además, al analizar el histograma se observa claramente como se recoge el notable desnivel de la Zona Metropolitana de Tenerife, ya que los gradientes medios de los ciclos son bastante pronunciados. Por último, en la Figura 2.6 se encuentran los datos de tiempo en ralentí y se puede apreciar como estos están desplazados a la izquierda, con un notable pico en 6% y la centralidad de los datos en el 11%. Este

agrupamiento a la izquierda de los datos denota que la proporción de conducciones urbanas, interurbanas y de autopista está bien equilibrada, ya que, una distribución muy desplazada a la derecha significaría una alta proporción de conducción urbana con tráfico alto, lo que implicaría datos poco representativos.

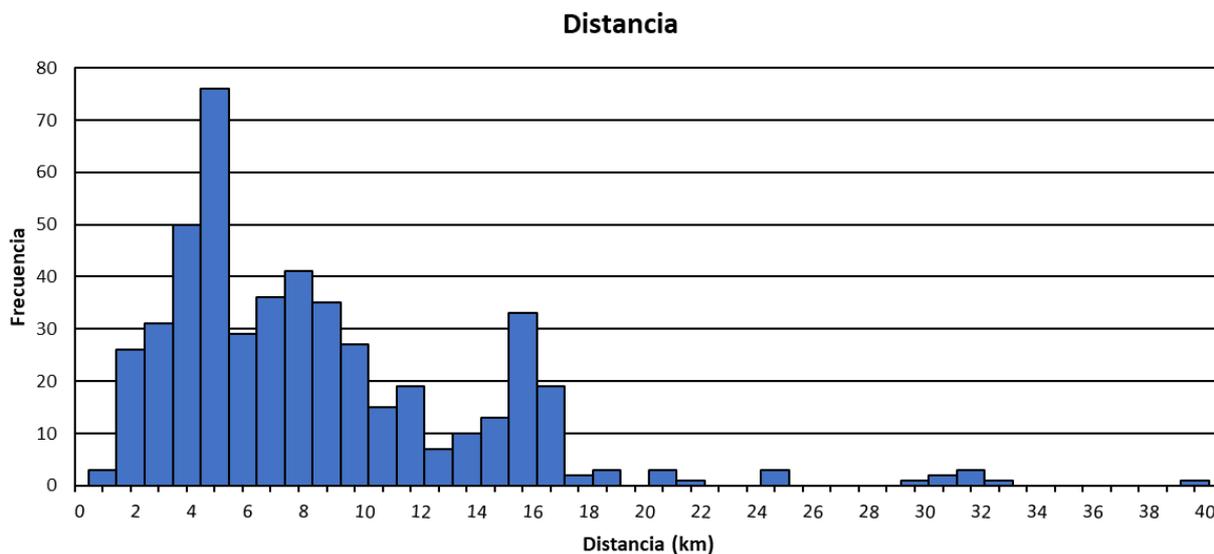


Figura 2.3 Distribución de la distancia de los ciclos.

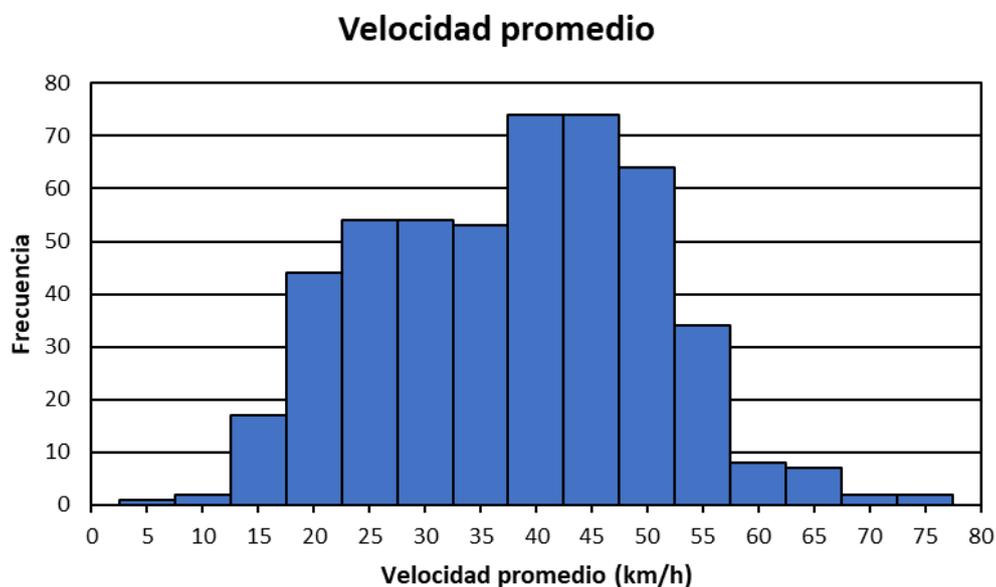
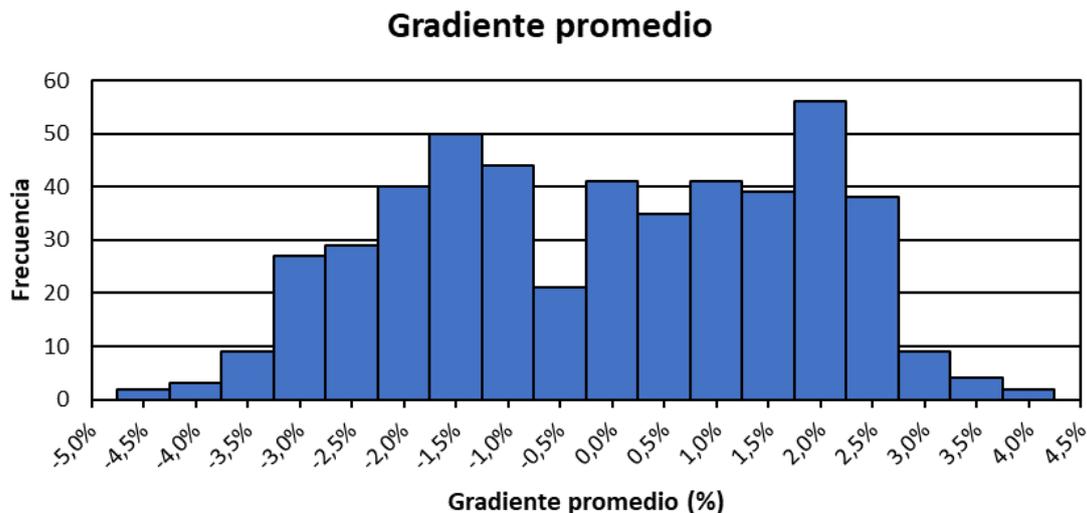
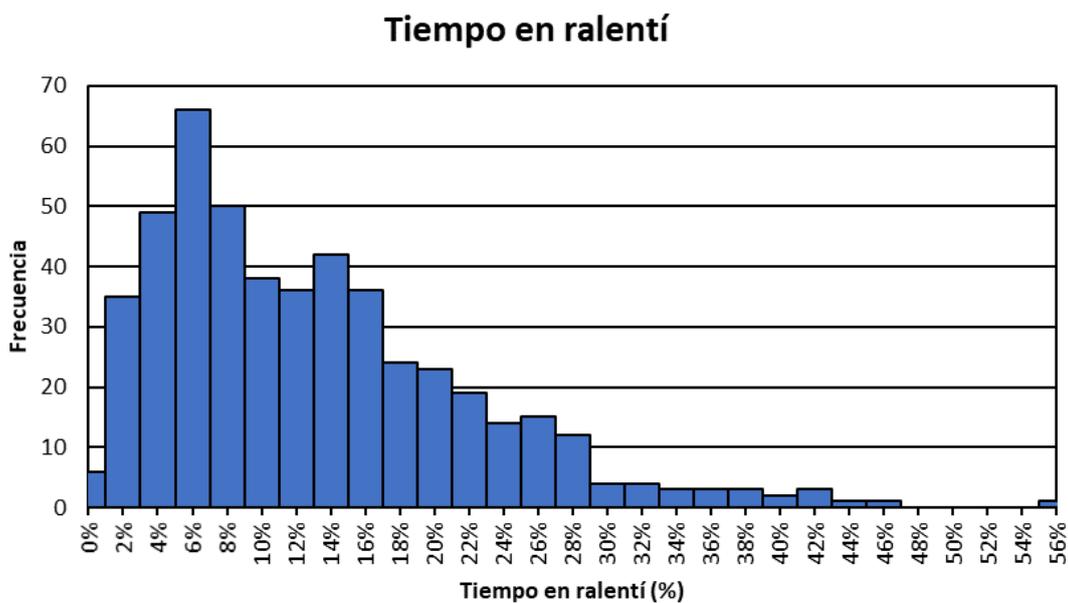


Figura 2.4 Distribución de la velocidad media de los ciclos.



**Figura 2.5** Distribución del gradiente promedio de los ciclos.



**Figura 2.6** Distribución del tiempo en ralentí de los ciclos.

A continuación, se expone, en la Tabla 2.1, una comparación de las características principales de los ciclos de homologación WLTP, FTP-75 y NEDC con los valores promedio de los ciclos obtenidos.

**Tabla 2.1** Características principales de diferentes ciclos y datos promedio de los ciclos Tenerife.

Ciclo	Distancia (km)	Velocidad media (km/h)	Tiempo (s)	Tiempo en ralentí (%)
<b>Promedio Tenerife</b>	8,7	37,9	810,8	12,9%
<b>WLTC 3b</b>	23,3	51,8	1800	13,4%
<b>FTP-75</b>	17,8	34,1	1877	19,1%
<b>NEDC</b>	10,9	33,4	1180	22,6%

**Fuente:** Elaboración propia.

Se observa claramente en la Tabla 2.1 como la distancia media de los 490 ciclos es la menor de todas la comparativa, destaca la diferencia con el WLTC 3b. Por contra, la velocidad media se asemeja con los ciclos FTP-75 y NEDC mientras que nuevamente el WLTC 3b es el que tiene un valor más alto. En cuanto al tiempo de duración del ciclo, sigue siendo bastante bajo en comparación al resto y el tiempo en ralentí con respecto al total del ciclo se asemeja con el valor para el ciclo de homologación WLTC 3b. A la luz de estos datos se puede aseverar que la conducción en Tenerife está basada en viajes cortos y de una velocidad más baja en comparación con el ciclos de homologación WLTC 3b, lo que significa una menor conducción extraurbana.

## 2.3 Configuración y validación de los modelos

En este estudio se han analizado 11 modelos de vehículos, diferenciados por tecnología de sistema propulsivo y según su peso y clase de vehículo. Cuando se compare el desempeño de diferentes motorizaciones, para igualar en condiciones a cada una de ellas, se tendrá en cuenta el peso de los vehículos.

El estudio se va a realizar en dos grupos diferenciados por pesos. En el primero de ellos, se agruparán modelos sedán, de peso reducido, y en el segundo grupo lo compondrá modelos SUV, más pesados que los del primer grupo. Además, se estudiará un modelo sedán GLP, en aras de incluir en la comparativa combustibles alternativos. A continuación, se presentan la Tabla 2.2 y la Tabla 2.3 donde se realiza una comparativa de los modelos.

**Tabla 2.2** Resumen de los modelos con motor térmico.

Modelo	Peso (kg)	Drag	Batería (kWh)	Pot MCIA (kW)	Pot elect (kW)	Ciudad (L/100km)	Autopista (L/100km)	Combinado (L/100km)
Sedán gasolina	1667	0,30	-	119	-	8,1	6,9	7,6
SUV gasolina	1894	0,36	-	125	-	9,3	7,8	8,6
Sedán diesel	1667	0,30	-	119	-	6,6	5,9	7,1
SUV diesel	1894	0,36	-	125	-	7,1	6,0	7,4
Sedán HEV	1735	0,30	1,6	163	88	4,9	5,2	5,0
SUV HEV	1906	0,35	1,1	112	92	5,2	5,9	5,5
Sedán PHEV	1796	0,27	8,8	71	66,2	4,4	4,6	4,5
SUV PHEV	1980	0,30	14,4	165	97	5,3	6,1	5,6
Sedán GLP	1618	0,30	-	88	-	7,9	6,3	5,0

**Tabla 2.3** Resumen de los modelos PHEV y BEV (motor eléctrico).

Modelo	Peso (kg)	Drag	Batería (kWh)	Pot MCIA (kW)	Pot elect (kW)	Ciudad (kWh/100k)	Autopista (Kwh/100k)	Combinado (kWh/100k)	Aut elect (km)
Sedán PHEV	1796	0,27	8,8	71	66,2	15,9	16,0	15,9	42,0
SUV PHEV	1980	0,30	14,4	165	97	19,1	22,7	20,7	62,9
Sedán BEV	1769	0,32	40	-	110	17,1	22,1	19,3	225,3
SUV BEV	2129	0,30	82	-	150	21,0	24,5	22,6	379,8

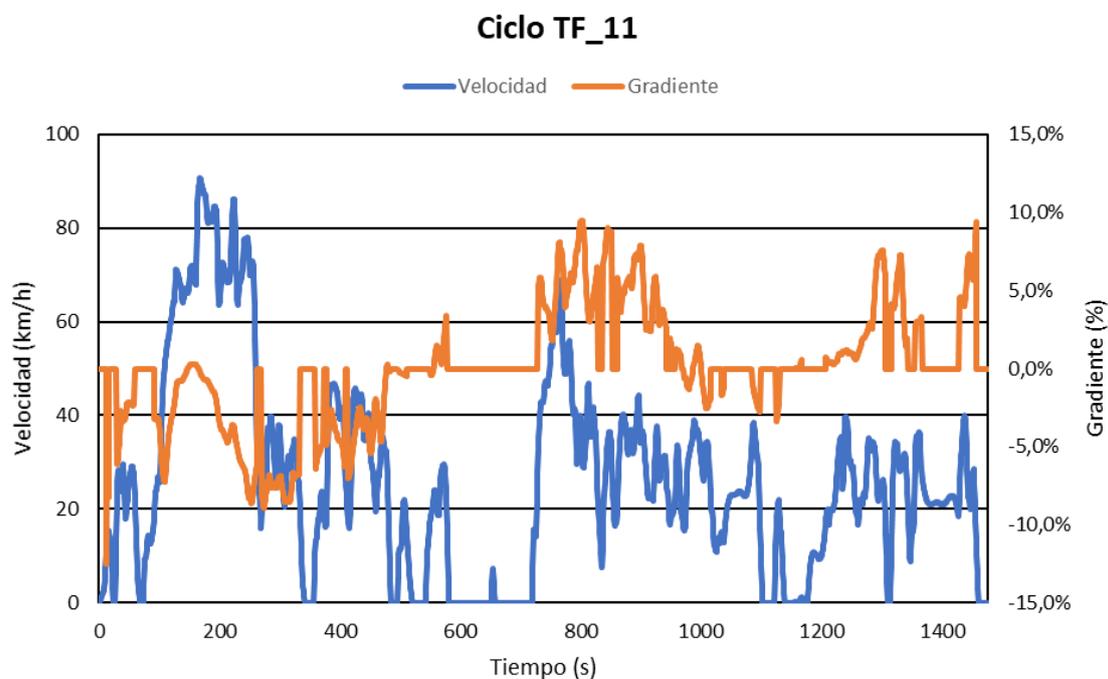
Siendo en la Tabla 2.3 las abreviaturas “Pot” para potencia, “elect” para eléctrica y “aut” para autonomía.

Los datos de consumo energético y autonomía han sido estimados por FASTSim basándose en los resultados de la simulación del ciclo FTP-75. Cabe destacar que para el caso de los HEV la simulación de este ciclo se realiza varias veces con diferentes niveles de carga inicial de la batería hasta obtener el mismo nivel de carga al inicio y al final del ciclo [12]. Para los PHEV realiza un ciclo en modo descarga hasta vaciar la batería y otro sin carga, aplicando después los ajustes de EPA para obtener el valor de consumo [12].

En las Tablas 2.2 y 2.3 se puede apreciar claramente como las notables diferencias de peso entre los modelos Sedán y SUV provocan incrementos de los consumos en los segundos, justificando la creación de dos grupos diferenciados por clase de vehículo. Además, también se observa como a mayor grado de electrificación mayor peso, debido al tamaño de las baterías, esto produce que los eléctricos sean los más pesados, seguidos de los PHEV, luego los HEV y como los más ligeros quedan los modelos convencionales.

Debido a la variedad de modelos que se van a utilizar para este estudio, se tuvieron que importar algunos vehículos más al programa. Para explicar este proceso y el de simulación, se incluye en el Anexo I una muestra en detalle de estos.

A fin de entender los perfiles de consumo y operación del tren de potencia de cada tipología, se van a presentar los resultados arrojados por el modelo cuando se simula un ciclo de conducción de ejemplo que pertenece al conjunto de datos obtenidos. El perfil de velocidad y gradiente del ciclo escogido se muestra en la Figura 2.14. Este es un ciclo que consta de conducción urbana y extraurbana, como se desprende del perfil de velocidad, y además tiene gradientes tanto positivos como negativos, facilitando así la comprensión de la operación de los modelos en diferentes situaciones. Esta simulación se realizará con cada una de las arquitecturas que se van a utilizar en este análisis (convencional, HEV, PHEV y BEV).

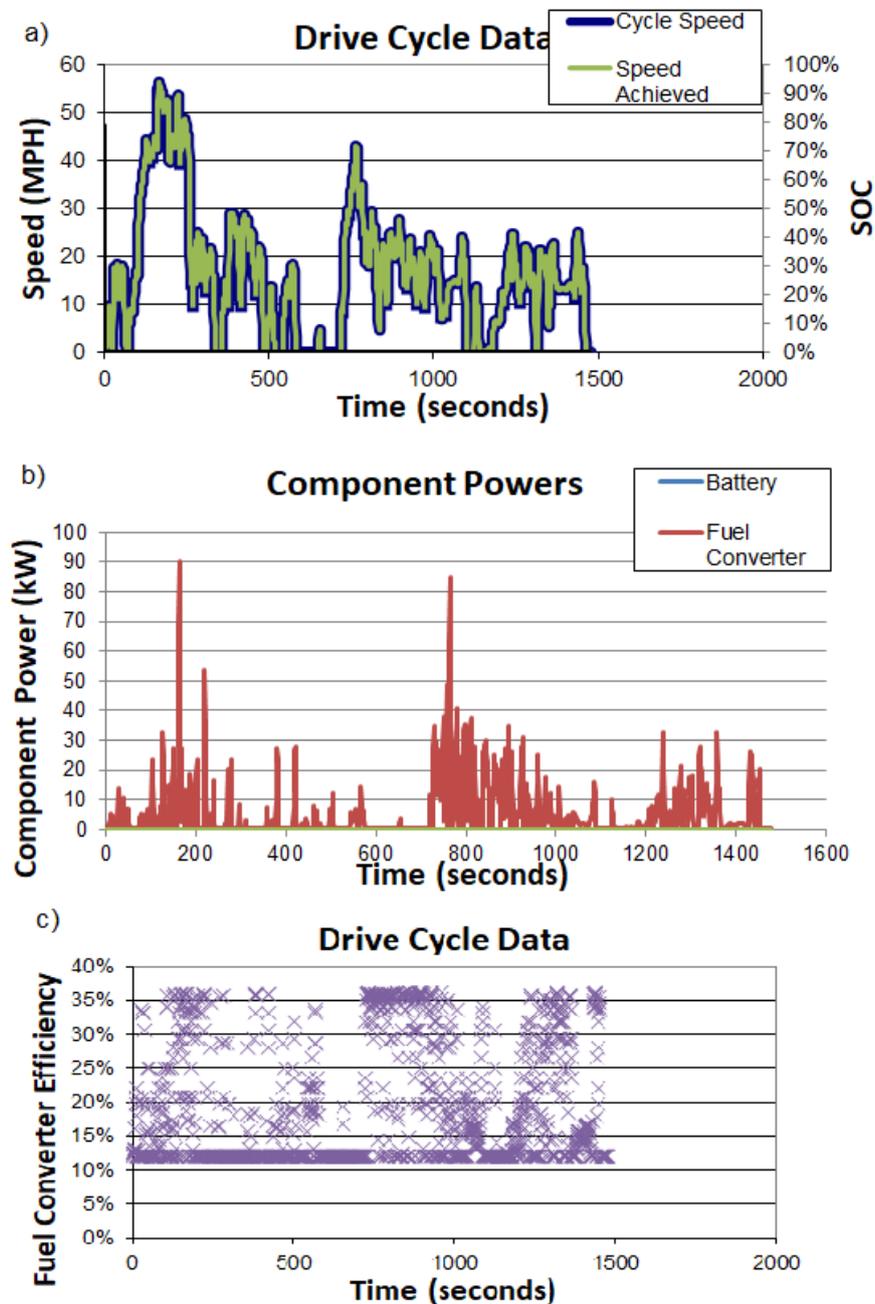


**Figura 2.7** Perfil de velocidades y gradiente del ciclo TF\_11.

Para el modelo convencional se usará el SUV gasolina, el cual al simularlo en el ciclo TF\_11 nos genera el programa los resultados expuestos en la Figura 2.8 (a), (b) y (c).

Como se observa en la Figura 2.8 (a) el modelo SUV gasolina es capaz de reproducir el ciclo de conducción en todo momento ya que tiene las prestaciones suficientes para realizar las aceleraciones y frenadas requeridas, por otra parte, en la figura 2.8 (b) se comprueba como al ser un modelo convencional, el aporte de potencia al

vehículo se produce a través del motor térmico (fuel converter en el software), que es el único que posee, coincidiendo los picos de potencia con los momentos de mayor aceleración del ciclo. Por último, en la Figura 2.8 (c) se muestra el mapa de eficiencia del motor en el que se observa como varía en una franja entre el 12%, para los momentos de peor eficiencia (baja carga del motor), y del 36% para los más eficientes, siendo esto lo habitual en los MCIA de encendido provocado.



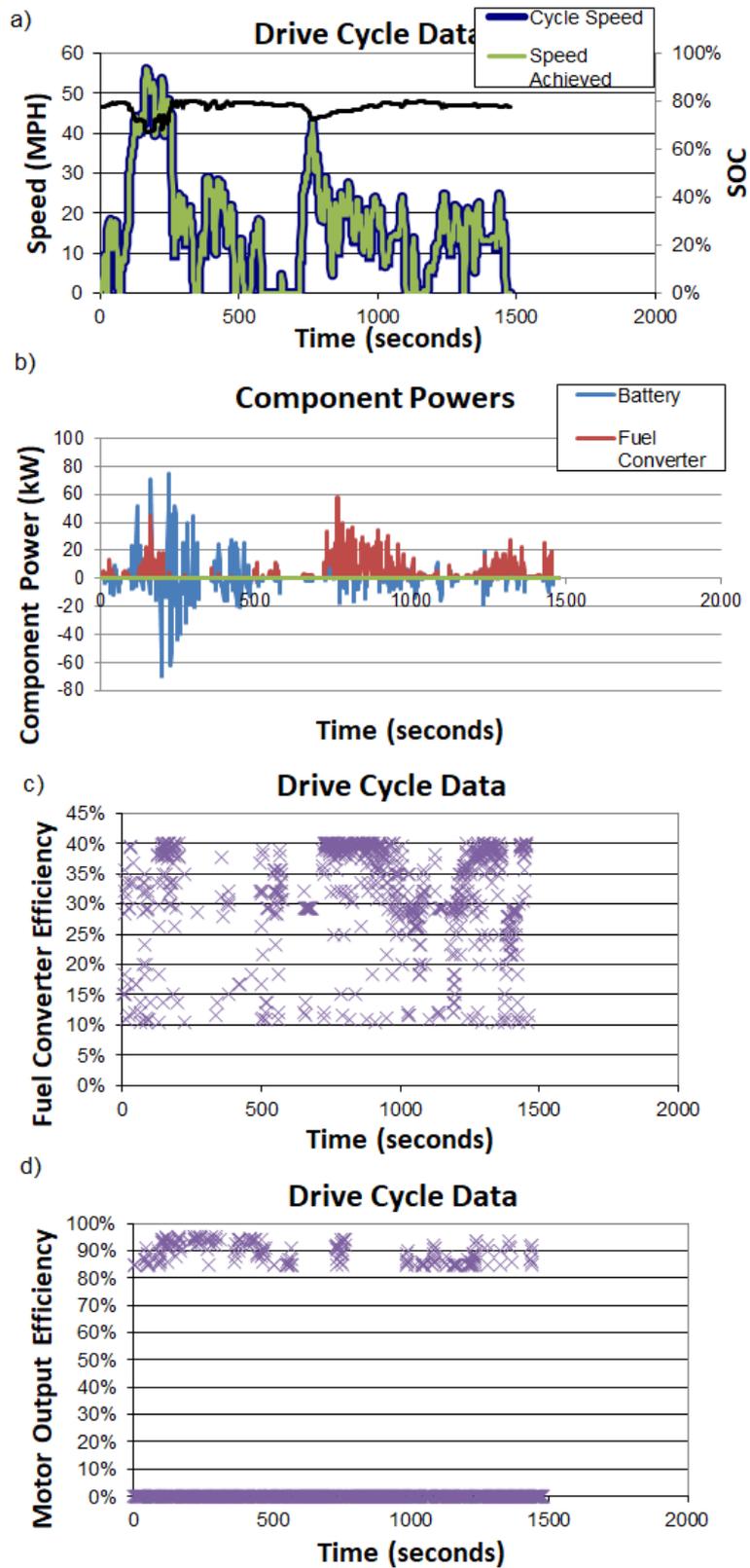
**Figura 2.8 a)** Datos del ciclo de conducción TF\_11 para el modelo SUV gasolina. **b)** Operación del MCIA del modelo SUV gasolina en el ciclo TF\_11. **c)** Eficiencia del motor de combustión del modelo SUV gasolina para el ciclo TF\_11.

Fuente: FASTSim.

A continuación, en la Figura 2.9 (a), (b), (c) y (d) se expondrán los resultados del ciclo TF\_11 para el modelo SUV HEV. Al tratarse de un modelo híbrido convencional, en la Figura 2.9 (a) se aprecia como además del perfil de velocidades del ciclo y la velocidad alcanzada por el vehículo, que se puede confirmar que consigue reproducir el ciclo en todo momento, aparece la curva "SOC" que es el acrónimo de State Of Charge, es decir, el nivel de carga de la batería eléctrica. Cuando FastSim trabaja con un HEV, realiza varias iteraciones para que el valor de SOC sea igual al principio y al final del ciclo, para así poder recoger el efecto de la descarga y la carga de la batería a través de la frenada regenerativa y MCIA. De esta manera, se evita una sobreestimación de la eficiencia energética del vehículo, ya que la batería no es cargada mediante conexión a la red eléctrica.

En la Figura 2.9 (b) se puede apreciar como los momentos de carga de la batería coinciden con desaceleraciones, destacando la fuerte frenada que se produce en el primer tercio del ciclo. Al ser un modelo HEV, se aprecia en la Figura 2.9 (b) como operan en el ciclo ambos motores, ya que lo que el programa denomina Battery es la operación del motor eléctrico para los valores positivos y la carga de la batería para los valores negativos. También se observa en esta figura como se carga la batería en diferentes puntos que si se miran conjuntamente las Figura 2.9 (a) y (b) se confirma que se produce en las desaceleraciones.

La mejora en la eficiencia del vehículo se puede apreciar claramente en las Figuras 2.9 (c) y (d), ya que si se compara la primera de ellas con la Figura 2.8 (c) en la que se muestra el mapa de eficiencia del modelo SUV gasolina, se ve como para el mapa de eficiencia del MCIA del SUV HEV han disminuido considerablemente los puntos de eficiencia por debajo del 20%, impulsando en esos momentos el vehículo el motor eléctrico con eficiencias bastante más altas que se sitúan sobre el 90% como se puede confirmar en la Figura 2.9 (d). Además, debe tenerse en cuenta que los motores térmicos de los vehículos híbridos operan mediante el ciclo Atkinson [12], el cual alcanza una eficiencia del 40% debido a que en este ciclo la carrera de expansión es mayor que la de compresión, resultando en un mayor rendimiento en comparación a un motor de misma relación de compresión y ciclo Otto. Sin embargo, la potencia específica del motor de ciclo Atkinson es menor debido a que la carga de mezcla fresca (combustible más aire) es menor que en un motor de ciclo Otto de la misma cilindrada.



**Figura 2.9** a) Datos del ciclo de conducción TF\_11 para el modelo SUV HEV. b) Operación del MCIA y de la batería del modelo SUV HEV para el ciclo TF\_11. c) Eficiencia del MCIA del modelo SUV HEV para el ciclo TF\_11. d) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV HEV para el ciclo TF\_11.

Fuente: FASTSim.

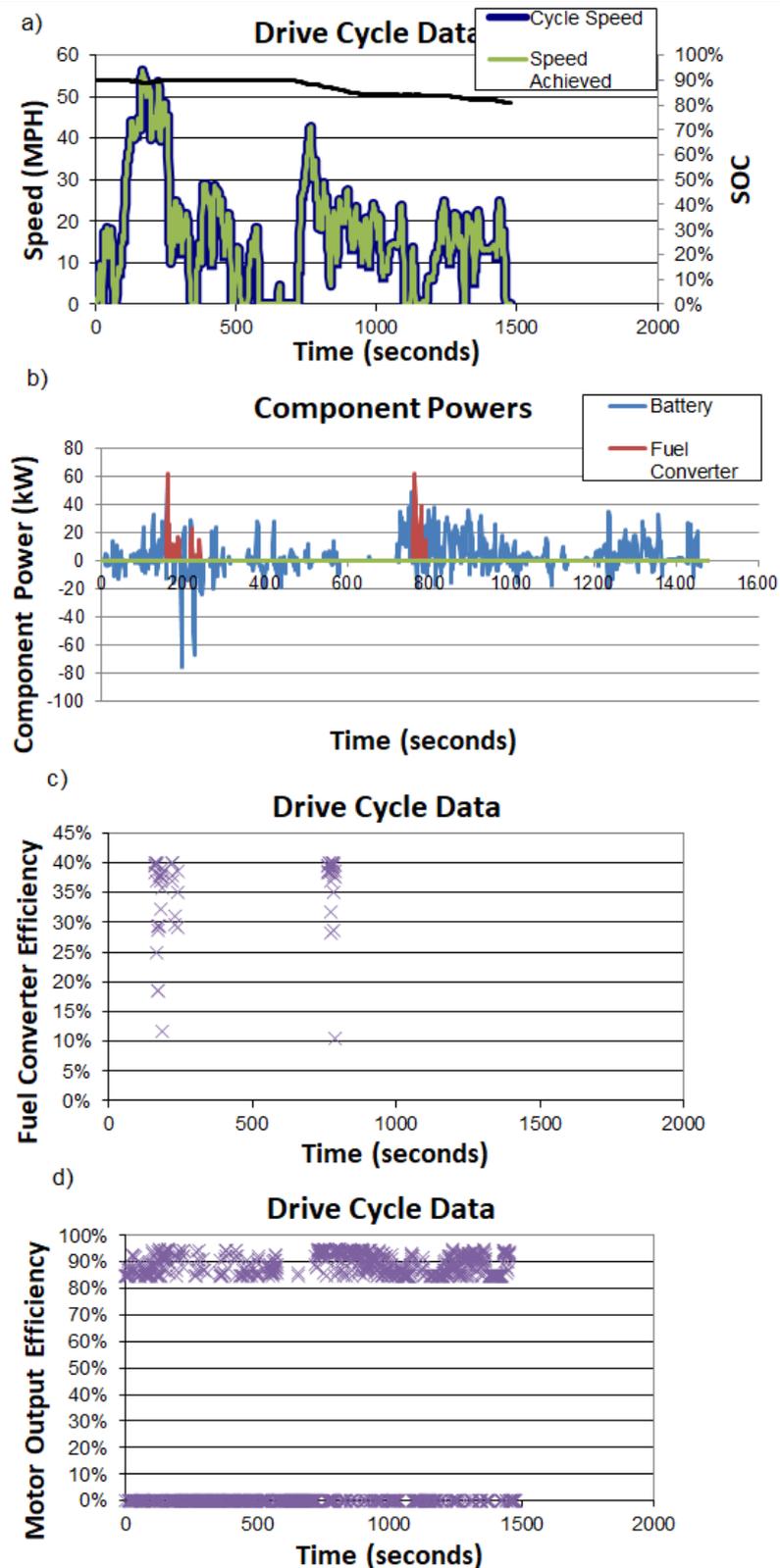
Los resultados de la simulación con la arquitectura PHEV se muestran en la Figura 2.10 (a), (b), (c) y (d). Como cabía esperar, en la Figura 2.10 (a) se confirma que el modelo SUV PHEV es capaz de reproducir el ciclo TF\_11 en todo momento y, además, en la misma figura también se observa que en este caso el valor de SOC no empieza y termina en el mismo valor al tratarse de un híbrido enchufable y no tener que cumplir esta condición. Cabe destacar que la fluctuación de la carga de la batería es menor que en el modelo HEV debido a que en este caso la capacidad en kWh del modelo es bastante superior, concretamente el SUV HEV tiene una batería de 1,1 kWh y el SUV PHEV de 14,4 kWh.

De la Figura 2.10 (b) se desprende claramente que en el caso del SUV PHEV la mayor parte del ciclo se realiza únicamente con propulsión eléctrica, a la par que la batería se recarga en las desaceleraciones. Solo se utiliza el motor térmico en los puntos de máxima potencia y cuando las aceleraciones son más fuertes. En cuanto a los mapas de eficiencia de las Figuras 2.10 (c) y (d), se observa claramente como en el caso del motor eléctrico la eficiencia ronda el 90% y como el motor térmico solo se arranca en momentos puntuales que coinciden con regímenes de trabajo en los cuales es más eficiente.

En el modelo SUV BEV desaparece el motor térmico, por lo que al realizar el ciclo TF\_11 solo impulsará el vehículo el motor eléctrico y la gráfica de operación del motor será similar a la del convencional, con el añadido de la recarga de la batería en las desaceleraciones. Ver Figura 2.11 (a), (b) y (c).

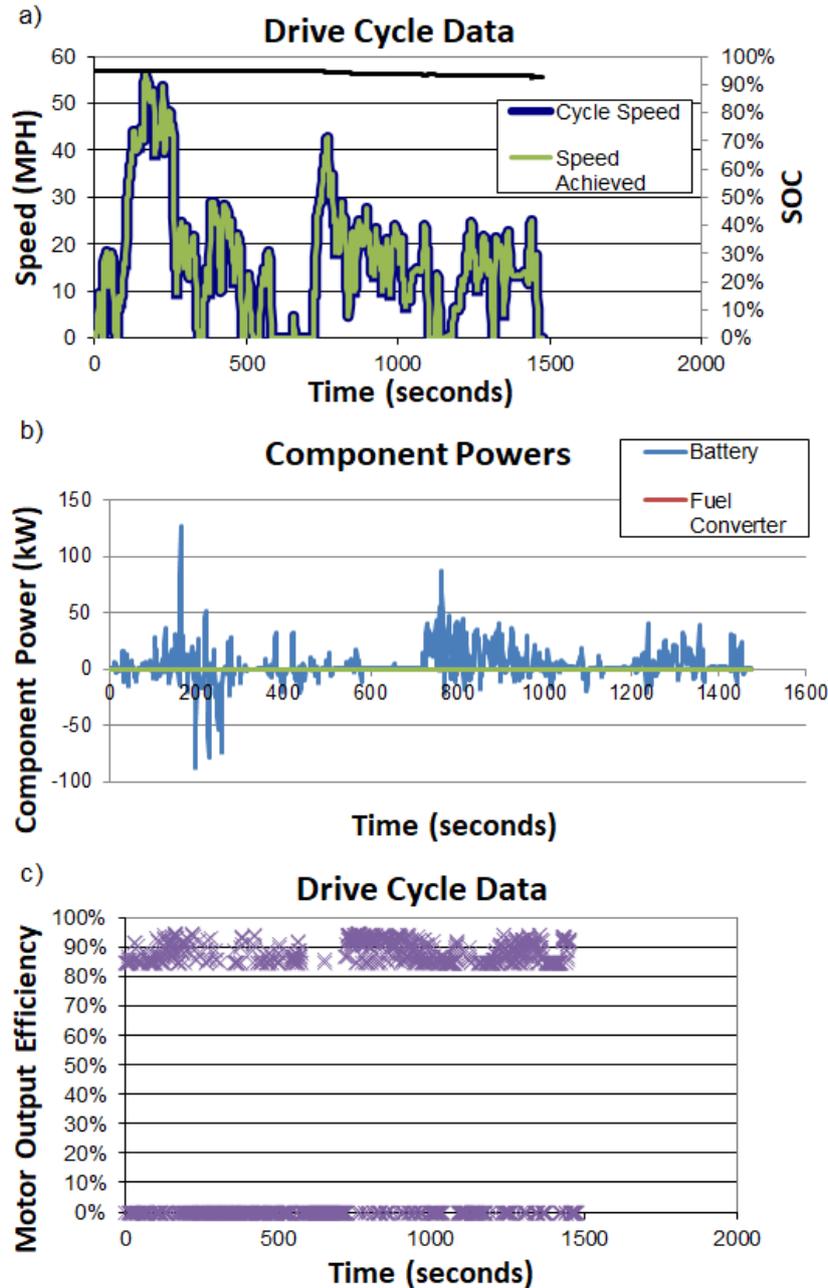
Como se observa en la Figura 2.11 (a), el modelo vuelve a poder realizar sin problemas el ciclo TF\_11 y en este caso la descarga de la batería es mínima al no llegar a perder ni el 5% de su carga.

En la Figura 2.11 (b) se contempla como el ciclo es realizado completamente por la batería, como es lógico en un modelo BEV, y como se recarga la batería en las desaceleraciones. Además, se aprecian claramente los picos de potencia del ciclo que en los demás modelos solían ser realizados por el motor térmico. En cuanto al mapa de eficiencia mostrado en la Figura 2.11 (c), se observa la típica operación de un motor eléctrico, con eficiencias en el rango del 85%-95%.



**Figura 2.10** a) Datos del ciclo TF\_11 para el modelo SUV PHEV b) Operación del MClA y la batería del modelo SUV PHEV en el ciclo TF\_11 c) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV PHEV para el ciclo TF\_11 d) Eficiencia del motor térmico del modelo SUV PHEV para el ciclo TF\_11.

Fuente: FASTSim.



**Figura 2.11** a) Datos del ciclo TF\_11 para el modelo SUV BEV b) Operación de la batería del modelo SUV BEV para el ciclo TF\_11 c) Eficiencia del motor eléctrico del modelo SUV BEV para el ciclo TF\_11.

**Fuente:** FASTSim.

Una vez mostrado como simula las diferentes arquitecturas FAST Sim, se procederá a mostrar los resultados de la validación de cada modelo con los datos de consumo aportado por los fabricantes. Dicha comparación se muestra en las Figuras 2.12 y 2.13 y en las Tablas 2.4 y 2.5. Cabe destacar que, para este análisis, todos los valores de consumo de los modelos usados se encuentran dentro de un margen de error del 5% como máximo entre el valor dado por la Environmental Protection Agency (EPA) de los Estados Unidos [14], usando el ciclo FTP-75 de la propia

agencia, y el del modelo creado en FASTSim. Esto no aplica para los modelos Diesel, que al crearse en base a los modelos gasolina no existen datos EPA para ellos y tampoco para el modelo GLP, que al no comercializarse en Estados Unidos se usan datos del ciclo WLTP.

Como se ha nombrado, el modelo es capaz de reproducir los consumos de los vehículos con un bajo error, permitiendo abordar el análisis con seguridad en la obtención de los resultados. Cabe destacar que, para la obtención del consumo del motor térmico de los modelos híbridos enchufables, el ciclo se realiza en Charge Sustaining, es decir, con la batería descargada y funcionando el modelo como un híbrido clásico.

**Tabla 2.4** Validación consumos del motor eléctrico de los modelos de FASTSim.

Modelo	Combinado FastSim (kWh/100 km)	Combinado declarado (kWh/100km)	Error (%)
Sedán PHEV	17,46	16,77	4,11%
SUV PHEV	20,69	20,51	0,91%
Sedán BEV	19,32	18,64	3,67%
SUV BEV	22,62	21,75	4,00%

**Tabla 2.5** Validación consumos del MCIA de los modelos de FASTSim.

Modelo	Combinado (L/100 km)	Combinado declarado (L/100km)	Error (%)
Sedán gasolina	7,6	7,6	0,10%
SUV gasolina	8,6	9,0	4,48%
Sedán diesel	6,6		
SUV diesel	7,4		
Sedán GLP	7,2	7,5	4,00%
Sedan HEV	5,0	5,1	1,29%
SUV HEV	5,5	5,7	3,82%
Sedán PHEV	4,5	4,4	3,25%
SUV PHEV	5,6	5,7	1,44%

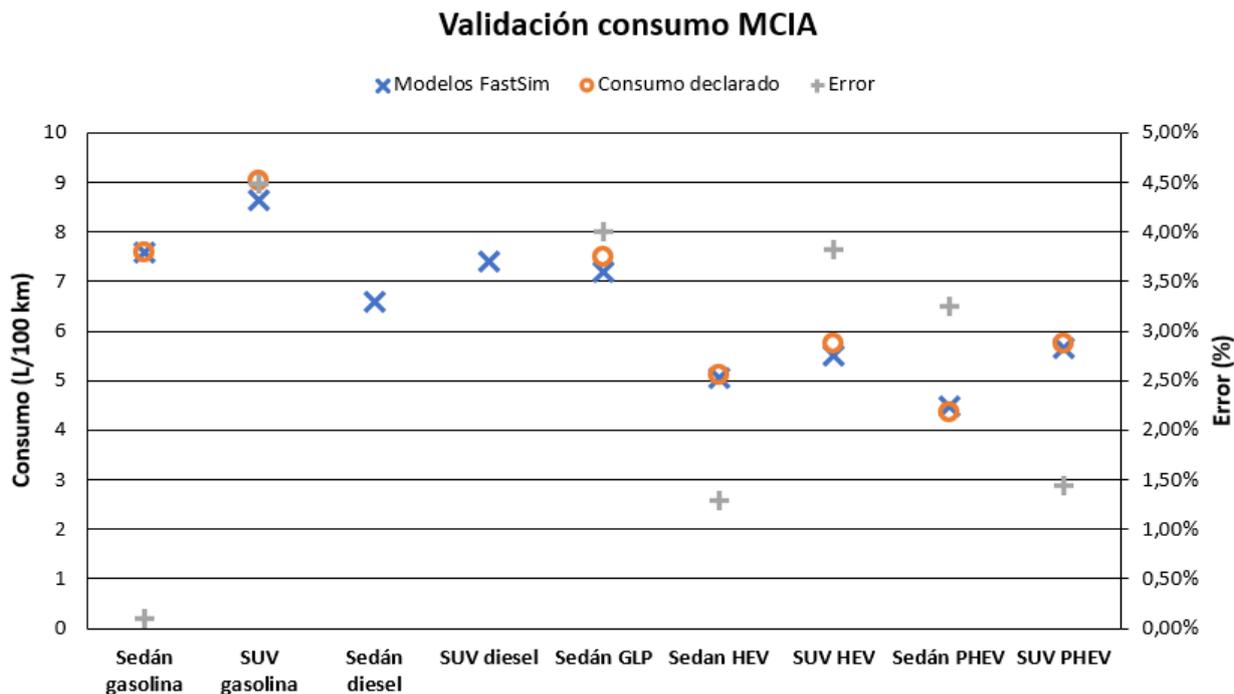


Figura 2.12 Validación de modelos convencionales, HEV y PHEV.

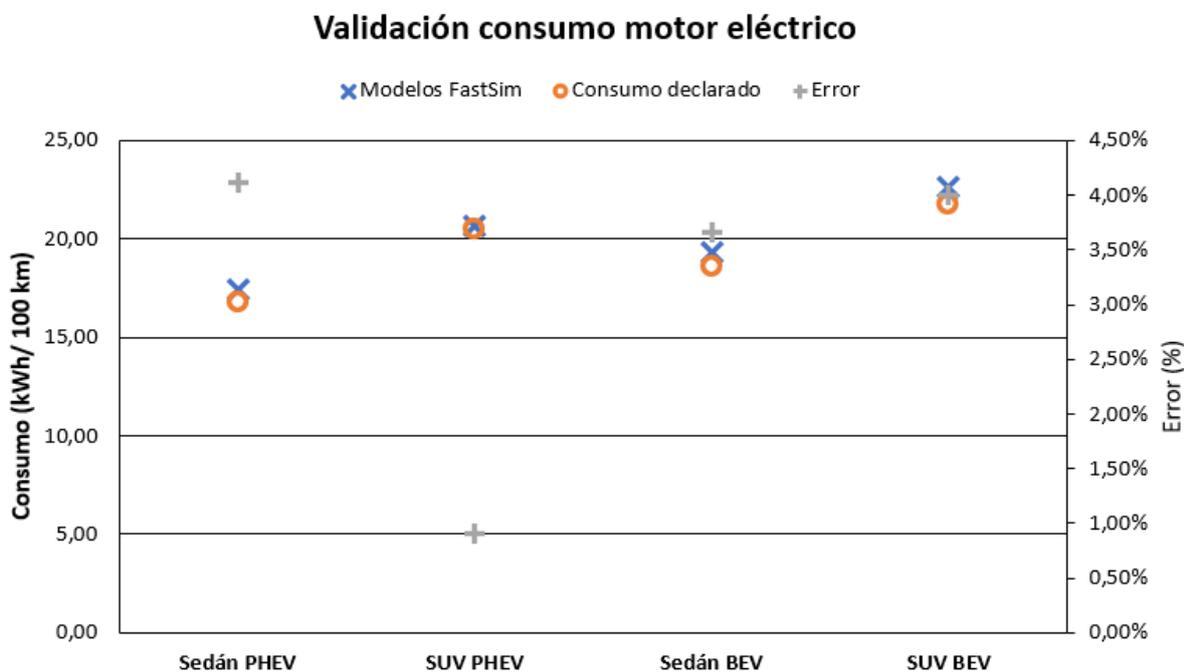


Figura 2.13 Validación de Modelos BEV y PHEV

### 3 ANÁLISIS

Una vez configurados y validados los modelos a usar se procede a utilizar la herramienta batch de FASTSim. Esta herramienta permite simular un gran número de ciclos de una sola vez para el modelo seleccionado, dando como resultado una serie de datos útiles para analizar el comportamiento en conducción real del modelo que se simula [11]. Entre estos datos se pueden encontrar el consumo del motor, o motores en el caso de los modelos híbridos, la eficiencia de estos, la masa total del modelo, la distancia recorrida o la aceleración máxima.

Para analizar los resultados arrojados por FASTSim al simular los 490 ciclos para cada modelo, estos se dividirán en dos grupos por pesos como se comentó anteriormente, siendo el grupo 1 el correspondiente a los modelos sedán y el grupo 2 a los SUV. También se compararán las motorizaciones entre sí mismas para mostrar la influencia del peso sobre el consumo.

Para mostrar el análisis de los resultados obtenidos se utilizará el grupo 1 de ejemplo y el análisis de los resultados del grupo 2 se mostrará en el Anexo II Análisis Grupo 2 – Vehículos SUV para un estudio de los detalles del mismo si el lector lo desea, aunque si se añadirá en el apartado 3.2 el resumen del mismo.

#### 3.1 Análisis grupo 1 – Vehículos sedán

En primer lugar, se muestra en la Tabla 3.1 la composición de este grupo con las características principales de los modelos y su consumo homologado por FASTSim.

**Tabla 3.1** Composición grupo 1.

Grupo	Modelo	Peso (kg)	Drag	Batería (kWh)	Pot MCIA (kW)	Pot elect (kW)	Combinado FASTSim (L/100 km)	Combinado FASTSim (kWh/100 km)
1	Sedán gasolina	1667	0,30	-	119	-	7,6	-
1	Sedán diesel	1667	0,30	-	119	-	6,6	-
1	Sedán GLP	1618	0,30	-	88	-	7,2	-
1	Sedán HEV	1735	0,30	1,6	163	88	5,0	-
1	Sedán PHEV	1796	0,27	8,8	71	66,2	4,5	17,5
1	Sedán BEV	1769	0,32	40	-	110	-	19,3

En el caso del Sedán gasolina, al realizar el batch se obtiene una distribución de consumos con un pico muy claro en 10 L/100 km y un agrupamiento de los consumos sobre los 4-5 L/100 km (ver Figura 3.1), encontrándose la centralidad de los datos en 7,3 L/100 km. Además, la media de consumo de los 490 ciclos es de 7,5 L/100 km, el máximo consumo es de 14,8 L/100 km y el mínimo de 1,8 L/100 km. Esta distribución tan dispar se debe a los diferentes tipos de rutas que se incluyen. Los consumos muy bajos corresponden a ciclos con pendiente media negativa, mientras

que los consumos más altos se deben a demandas energéticas altas, es decir, pendientes medias positivas y velocidades altas.

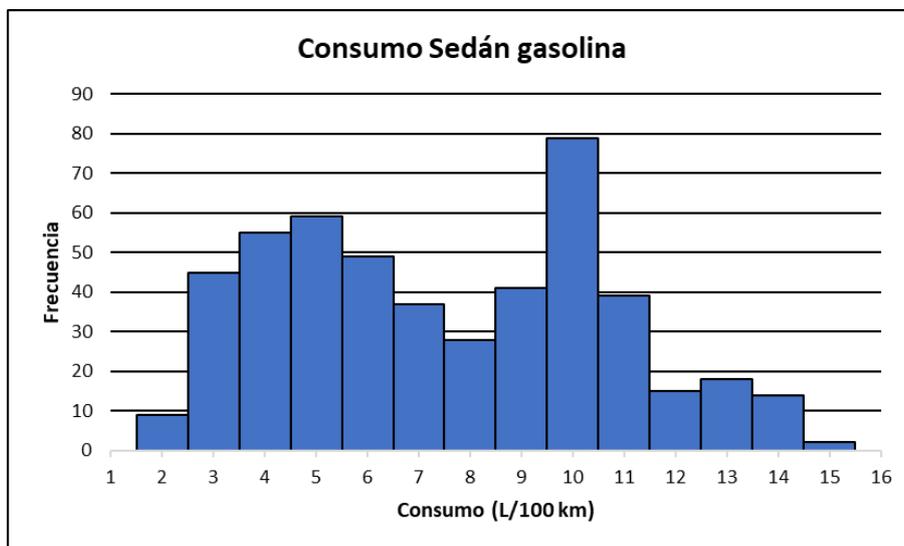


Figura 3.1 Histograma de consumo del modelo Sedán gasolina.

Para el Sedán diésel, se observa una distribución de consumos más bajos, con dos picos, uno en 9 L/100 km y otro en 3 L/100 km (ver Figura 3.2) y su mediana en 6,2 L/100 km. Por otra parte, el consumo medio es de 6,5 L/100 km, el máximo de 13 L/100 km y el mínimo de 1,6 L/100km. Como era de esperar, el modelo MEC tiene un consumo medio menor que el MEP, de aproximadamente 1 L/100 km menos en este caso, debido a la superior eficiencia de los primeros.

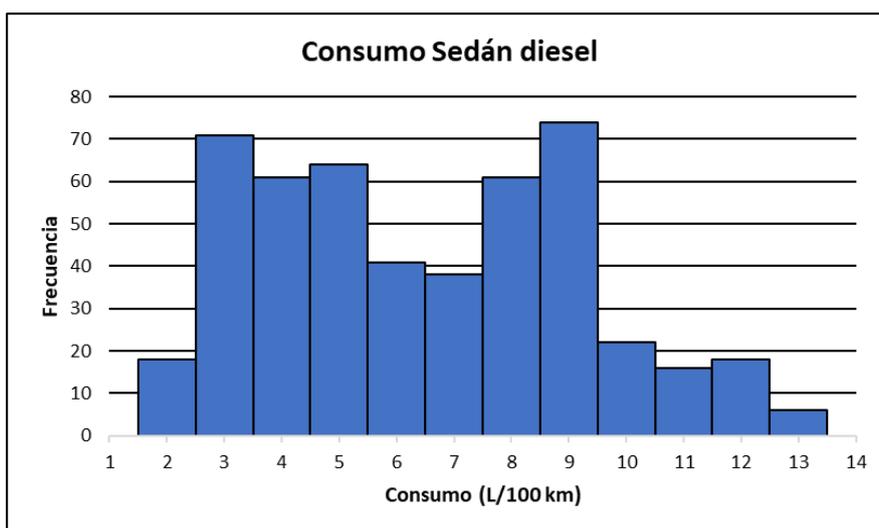


Figura 3.2 Histograma de consumo del modelo Sedán diésel.

Siguiendo con el modelo Sedán GLP, se observa una distribución muy parecida a la del Sedán gasolina, con un pico en 10 y un agrupamiento en torno a 5L/100 km,

como se observa en la Figura 3.3. Para este modelo la mediana es de 7,2 L/100 km, el consumo promedio es de 7,5 L/100 km, el máximo de 14,9 L/100 km y el mínimo de 1,9 L/100 km. En definitiva, datos prácticamente iguales a los del modelo Sedán gasolina. Esto se debe a que la única diferencia entre la motorización de ambos es el combustible que utilizan, siendo sus arquitecturas y el ciclo de trabajo iguales.

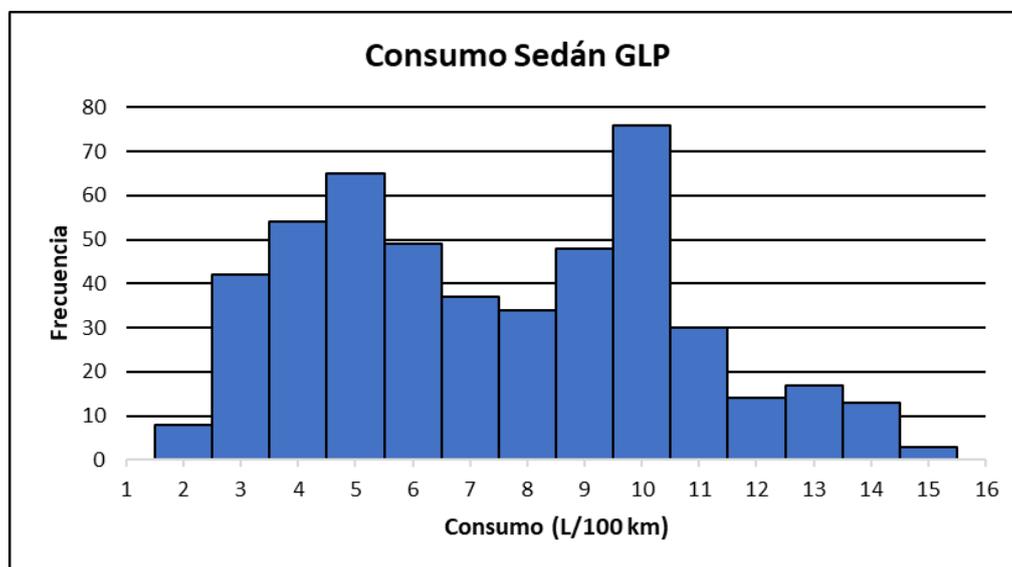
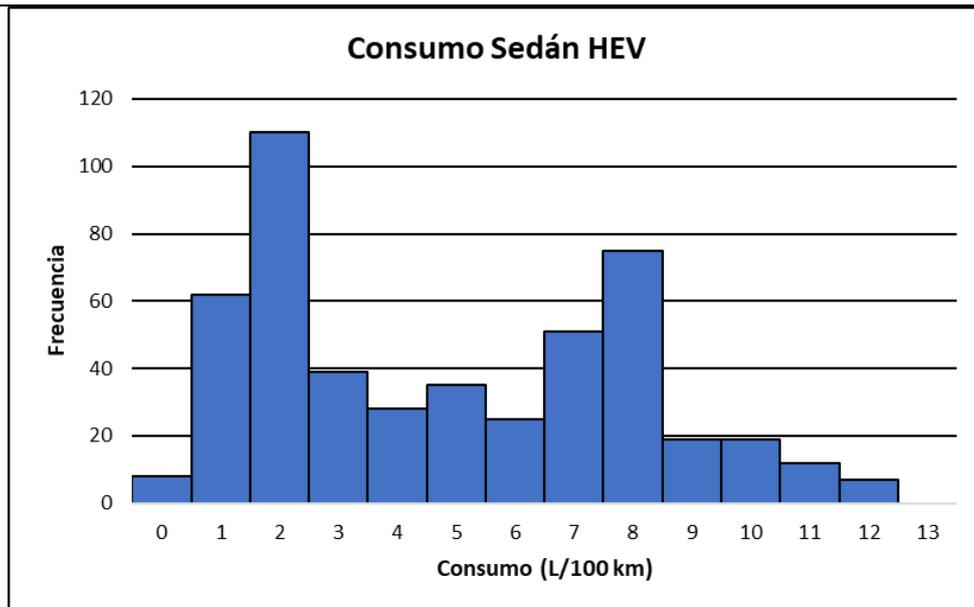


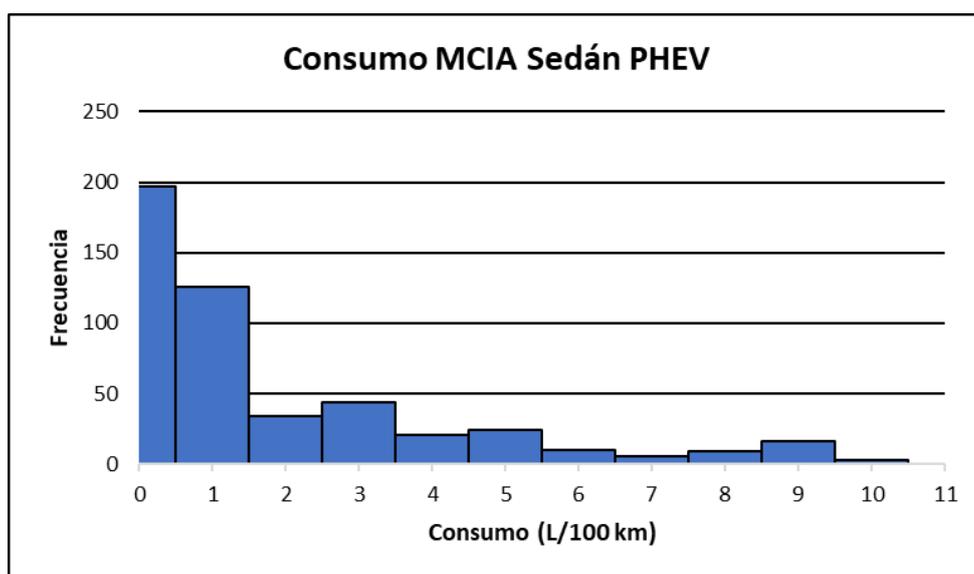
Figura 3.3 Histograma de consumo del modelo Sedán GLP

Una vez terminado con los modelos convencionales, el siguiente es el modelo Sedán HEV. En este caso, se obtiene una distribución de consumos con dos picos que destacan claramente en la Figura 3.4, el primero de ellos en 2 L/100 km y el otro en 8 L/100 km. Para este modelo, el centro de los datos se encuentra en 4,5 L/100 km, mientras que el consumo promedio se sitúa en 4,8 L/100 km, bastante por debajo del de los modelos convencionales. Por otra parte, su consumo máximo es de 12,4 L/100 km y el mínimo de 0,3 L/100 km también sensiblemente más bajo que en los modelos convencionales. Estos datos desprenden el gran potencial que tiene esta arquitectura para reducir el consumo con respecto a los modelos convencionales sin llevar aparejada la construcción de una nueva infraestructura de recarga pública o privada de las baterías.



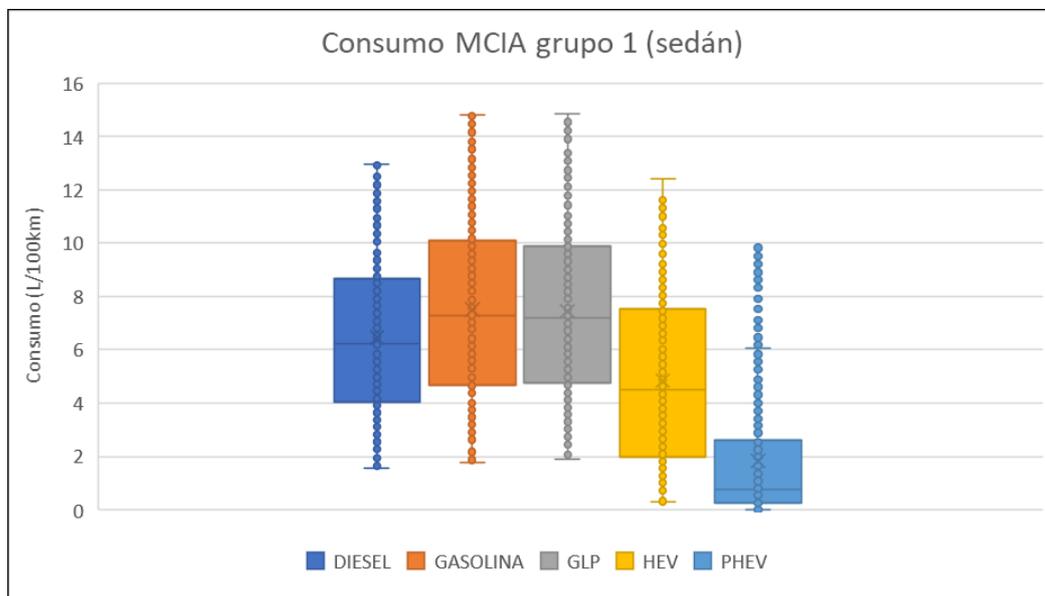
**Figura 3.4** Histograma de consumo del modelo Sedán HEV

A continuación, se muestra la Figura 3.5 la distribución de consumos del motor térmico del modelo Sedán PHEV. En este caso, se observa como la gráfica está claramente desplazada a la izquierda, hacia los valores más bajos de consumo, y como en los valores entre 0 y 1,5 L/100 km se concentran en torno al 60% de los datos, haciendo que la mediana se sitúe en 0,76 L/100 km. Para el modelo híbrido enchufable, el consumo medio del motor térmico en los 490 ciclos es de 1,8 L/100 km, su máximo es de 9,9 L/100 km y su mínimo es de 0 L/100 km, es decir, el modelo es capaz de realizar ciclos de conducción en circulación 100% eléctrica como se observa en la gráfica.



**Figura 3.5** Histograma de consumo del motor térmico del modelo Sedán PHEV.

A continuación, se muestra en la Figura 3.6 un diagrama de cajas en el que se realiza una comparativa de los consumos de los motores térmicos de los modelos convencionales, HEV y PHEV mencionados hasta ahora.

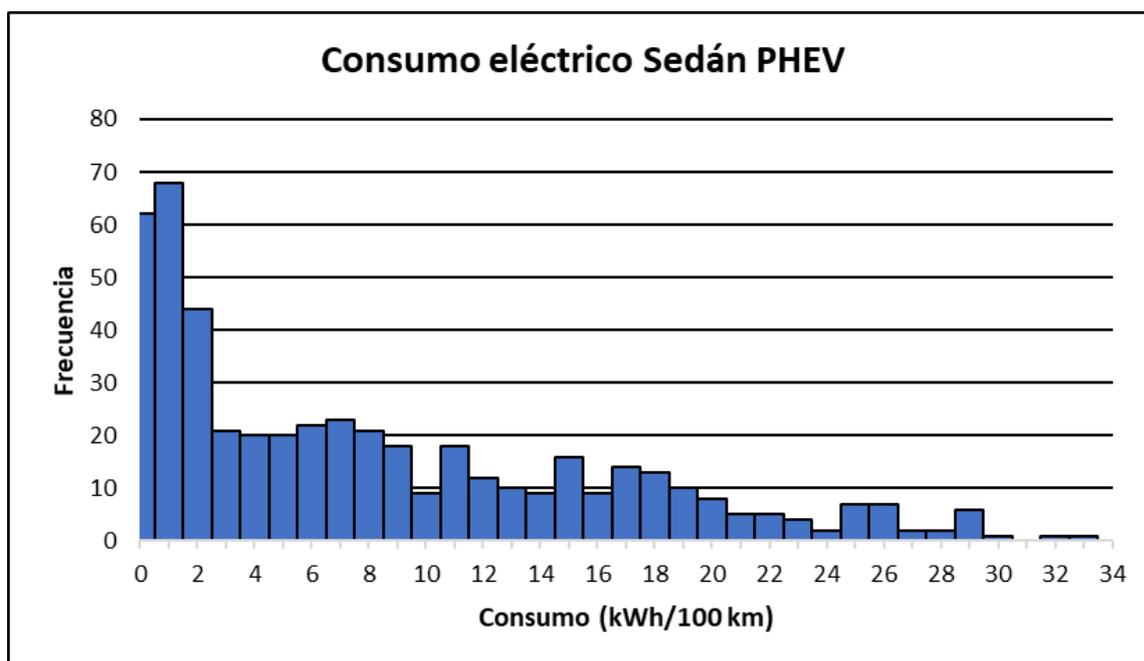


**Figura 3.6** Comparativa de consumo del motor térmico de diferentes modelos (grupo 1).

Como era de esperar, los valores medios de consumo del motor Diésel son menores que los del gasolina y del GLP. Además, se puede observar claramente como estos dos se comportan prácticamente igual en cuanto a consumo se refiere, siendo las únicas ventajas del GLP el menor precio del combustible frente a la gasolina y una menor emisión de partículas. Por otro parte, también se puede apreciar como las motorizaciones híbridas consumen menos combustible fósil, al estar los valores centrales del HEV entre 7,5 y 2 L/100 km y los del PHEV entre aproximadamente 0,5 y 2,5 L/100 km, mientras que los del gasolina y el GLP se encuentran entre 5 y 10 L/100 km y el del sedán diésel entre 4 y 8,5 L/100 km.

Cabe destacar que para el modelo híbrido enchufable, la dispersión es bastante más pequeña que en el resto de modelos aunque también aparecen muchos valores que se podrían clasificar como atípicos, esto se debe al funcionamiento de los PHEV, ya que al tener la capacidad de circular durante muchos kilómetros en modo 100% eléctrico, los valores de consumo del motor térmico disminuyen mucho llegando incluso a ser cero, pero esto también tiene una contra partida, y es que, cuando la batería se agota o los requerimientos energéticos del ciclo requieren del uso constante del MCIA, el consumo del vehículo se iguala al de un modelo HEV, pero con mayor peso debido a la mayor batería y motor eléctrico, y por eso aparecen esos valores por encima del límite superior.

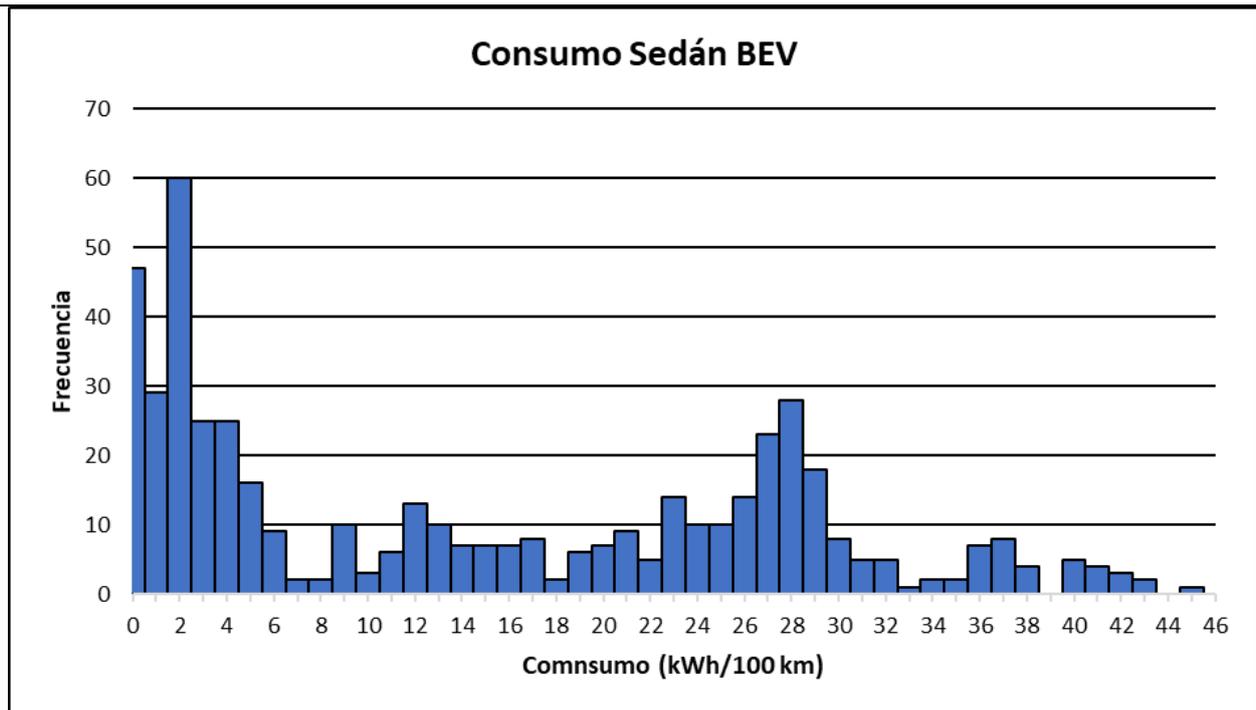
Ahora se mostrarán los valores de consumo del motor eléctrico del modelo Sedán PHEV y del Sedán BEV en las Figuras 3.7 y 3.8.



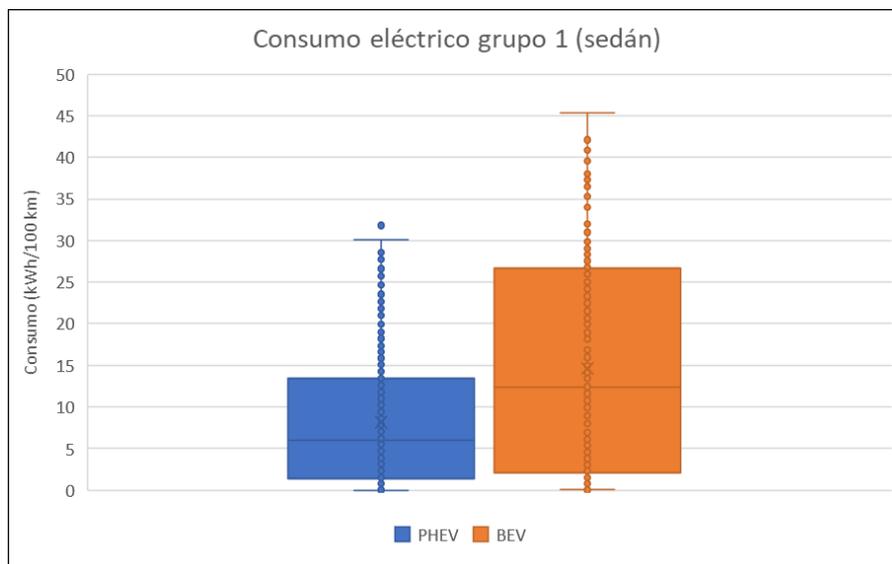
**Figura 3.7** Histograma de consumo del motor eléctrico del modelo Sedán PHEV.

En la Figura 3.7 se observa claramente como hay una concentración de consumos entre 0 y 2 kWh/100 km y como el diagrama se alarga y va descendiendo poco a poco hasta llegar al valor del consumo máximo de este modelo que es de 32,5 kWh/100 km, esto hace que su mediana se encuentre en 6 kWh/100 km. Para el motor eléctrico, el consumo medio del Sedán PHEV es de 8,2 kWh/100 km y el mínimo es de 0,0042 kWh/100 km, es decir, que en algún ciclo se recuperó una gran cantidad de energía debido a la fuerte y/o prolongada pendiente negativa.

En el caso del modelo Sedán BEV, se aprecia en la Figura 3.8 un pico de datos en 2 kWh/100 km, aunque los valores se dispersan de manera más o menos regular hasta llegar a la zona entre 26 y 29 kWh/100 km en la que se produce una pequeña concentración de consumos. Para este modelo, el centro de los datos se encuentra en 12,4 kWh/100 km, y el consumo medio es de 14,6 kWh/100 km. Por otra parte, el consumo máximo es de 45,3 kWh/100 km y el mínimo de 0,01 kWh/100 km. Este valor mínimo tan bajo se puede deber a que coincida con un ciclo de gradiente negativo, en el que no se exija demasiado al motor y en el que además se recupere mucha energía mediante la frenada regenerativa.



**Figura 3.8** Histograma de consumo del modelo Sedán BEV.



**Figura 3.9** Comparativa de consumo del motor eléctrico de diferentes modelos (grupo 1).

En la Figura 3.9 se muestra una comparativa del consumo eléctrico de los modelos PHEV y BEV del grupo 1. En esta gráfica, se observa claramente como los datos de consumo del modelo BEV están bastante más dispersos que los del PHEV debido a que los valores centrales del primero se encuentran entre 26 y 3 kWh/100 km y los

del híbrido enchufable entre 14 y 2,5 kWh/ 100 km. Esto es lo esperable debido a que el consumo eléctrico del Sedán PHEV siempre será más bajo al tratarse de una motorización híbrida en la cual se reparte el consumo entre el motor térmico y el eléctrico.

En la Tabla 3.2 se muestra una tabla comparativa de los consumos obtenidos por FASTSim, los declarados por EPA y la media de los obtenidos al simular los 490 ciclos en Tenerife para este grupo 1.

**Tabla 3.2** Comparativa de consumos grupo 1

Grupo	Modelo	Consumo declarado (L/100 km)	Consumo declarado (kWh/100 km)	Consumo FASTSim (L/100 km)	Consumo FASTSim (kWh/100 km)	Consumo Tenerife (L/100 km)	Consumo Tenerife (kWh/100km)
1	Sedán gasolina	7,6	-	7,6	-	7,5	-
1	Sedán diesel	-	-	6,6	-	6,5	-
1	Sedán GLP	7,5	-	7,2	-	7,5	-
1	Sedán HEV	5,1	-	5,0	-	4,8	-
1	Sedán PHEV	4,4	16,8	4,5	17,5	1,8	8,2
1	Sedán BEV	-	18,6	-	19,3	-	14,6

La Tabla 3.2 desprende claramente como el consumo de los modelos Sedán gasolina y GLP es muy parecido en los tres casos, al igual que en el modelo diésel. Por otra parte, para el modelo HEV la variación de consumo también es muy pequeña, no así para el Sedán PHEV tanto en su parte eléctrica como en la térmica, ya que tiene un consumo declarado de más del doble. Esto se debe a que, a la hora de obtener el valor de consumo, tanto EPA como FASTSim, realizan un ciclo en modo conducción eléctrica y otro con la batería agotada y después realizan unos ajustes para obtener el consumo declarado, mientras que cuando se realiza el batch en FASTSim, el programa simula el ciclo y según la configuración de la gestión de energía entra en acción un motor u otro como en la conducción real. Por último, para el modelo Sedán BEV se aprecia un descenso notable del consumo en los ciclos de conducción real.

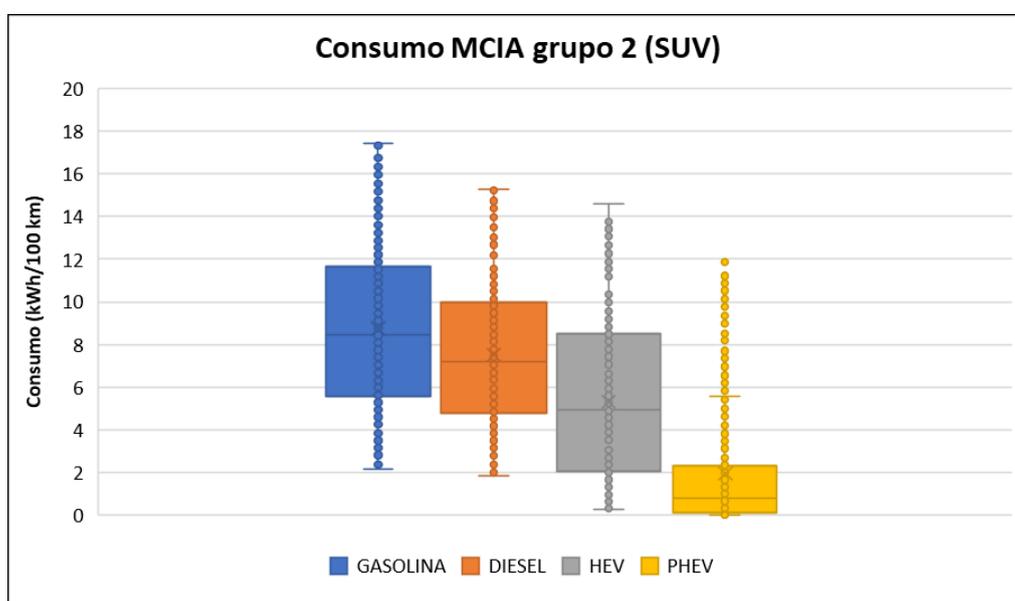
### 3.2 Análisis grupo 2 – Vehículos SUV

Como se comentó anteriormente, en este apartado se muestra el resumen del análisis de los resultados para el grupo 2. Inicialmente se procede a mostrar en la Tabla 3.3 los modelos que componen este grupo.

**Tabla 3.3** Composición grupo 2

Grupo	Modelo	Peso (kg)	Drag	Batería (kWh)	Pot MClA (kW)	Pot elect (kW)	Combinado FASTSim (L/100 km)	Combinado FASTSim (kWh/100)
2	SUV gasolina	1894	0,36	-	125	-	8,6	-
2	SUV diesel	1894	0,36	-	125	-	7,4	-
2	SUV HEV	1906	0,35	1,1	112	92	5,5	-
2	SUV PHEV	1980	0,30	14,4	165	97	5,6	20,7
2	SUV BEV	2129	0,30	82	-	150	-	22,6

En la Figura 3.10 se muestra una comparativa de los datos de consumo del motor térmico de los diferentes modelos SUV con este tipo de motor.



**Figura 3.10** Comparativa del consumo del motor térmico de diferentes modelos (grupo 2).

En la Figura 3.10 se observa claramente el descenso paulatino de los consumos, según la tecnología empleada en cada modelo, correspondiéndose la más alta con el gasolina y la más baja con el PHEV. Además, se aprecia claramente como los datos del modelo HEV son los más dispersos de todos debido a que su zona de valores centrales es la más grande ya que se extiende desde 2 L/100 km hasta los 8,5 L/100 km. Por otra parte, se observa nuevamente una serie de valores que podrían considerarse atípicos al encontrarse por encima del límite superior del modelo híbrido enchufable, pero como ya se explicó para el modelo Sedán PHEV, esto se debe al funcionamiento de esta arquitectura.

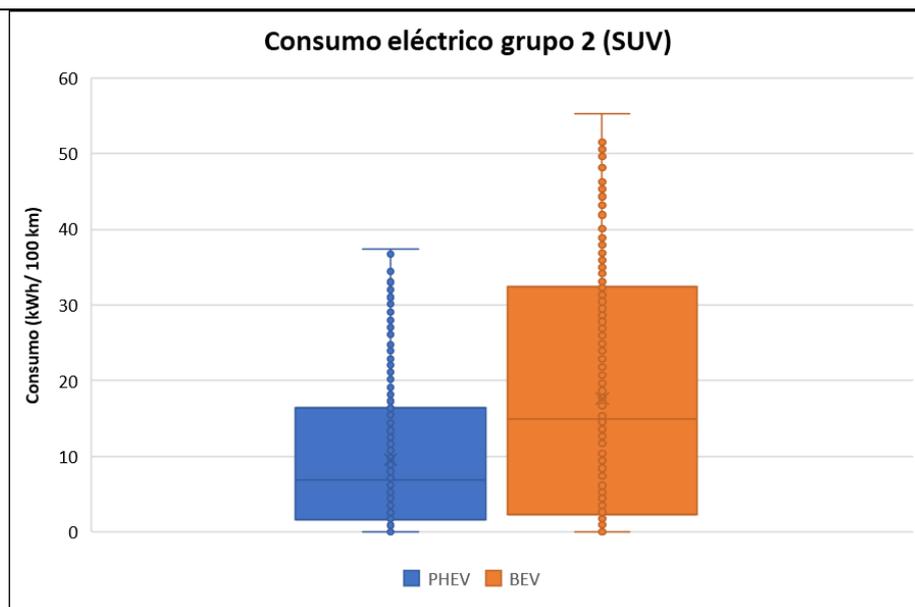


Figura 3.11 Comparativa de consumo eléctrico de diferentes modelos (grupo 2).

En la Figura 3.11 se observa claramente como el modelo SUV BEV tiene unos datos de consumo mucho más dispersos que el modelo SUV PHEV, ya que los valores centrales del primero se encuentran entre 2 y 32 kWh/100 km y los del segundo entre 1,5 y 16 kWh/100 km. Esto es lógico debido a que, al ser híbrido, el modelo PHEV tiende a tener siempre valores bajos de consumo, mientras que el modelo SUV BEV, al solo tener motor eléctrico, los consumos serán más altos y numerosos en esas zonas altas.

Una vez presentados todos los histogramas de consumo del grupo 2, en la Tabla 3.4 se muestra una comparación de los consumos obtenidos por la validación de FASTSim, por EPA y el consumo promedio de cada modelo.

Tabla 3.4 Comparativa de consumos grupo 2.

Grupo	Modelo	Consumo declarado (L/100km)	Consumo declarado (kWh/100km)	Consumo FASTSim (L/100 km)	Consumo FASTSim (kWh/100 km)	Consumo Tenerife (L/100 km)	Consumo Tenerife (kWh/100 km)
2	SUV gasolina	9,0	-	8,6	-	8,8	-
2	SUV diesel	-	-	7,4	-	7,5	-
2	SUV HEV	5,1	-	5,5	-	5,3	-
2	SUV PHEV	5,7	20,5	5,6	20,7	2,0	9,6
2	SUV BEV	-	21,8	-	22,6	-	17,6

En la Tabla 3.4 se aprecia como para el modelo SUV gasolina los tres resultados de consumo son muy parecidos, con apenas 0,4 L/100 km de diferencia máxima. En el caso del diésel, la diferencia es de apenas 0,1 L/100 km. Pasando a los modelos híbridos, para el HEV se aprecia lo mismo que en el caso del SUV gasolina, en el híbrido enchufable las diferencias son muy notables, sobre todo en el consumo eléctrico, por las razones que se expusieron al analizar la Tabla 3.2. Por último, El

modelo SUV BEV presenta una diferencia sustancial entre el consumo promedio de los 490 ciclos y los calculados por EPA y FASTSim, esto se puede deber al gradiente pronunciado de las carreteras de Tenerife y su consiguiente beneficio al incorporar un sistema de frenada regenerativa.

### 3.3 Análisis por arquitecturas

Una vez analizados los grupos por separado, se procede a estudiar el consumo por arquitecturas para así mostrar el efecto de la diferencia de peso y de coeficiente aerodinámico en el consumo tanto del motor térmico como del motor eléctrico.

A continuación, se muestra en la Figura 3.12 una comparativa de los consumos de los modelos convencionales usados en este análisis.

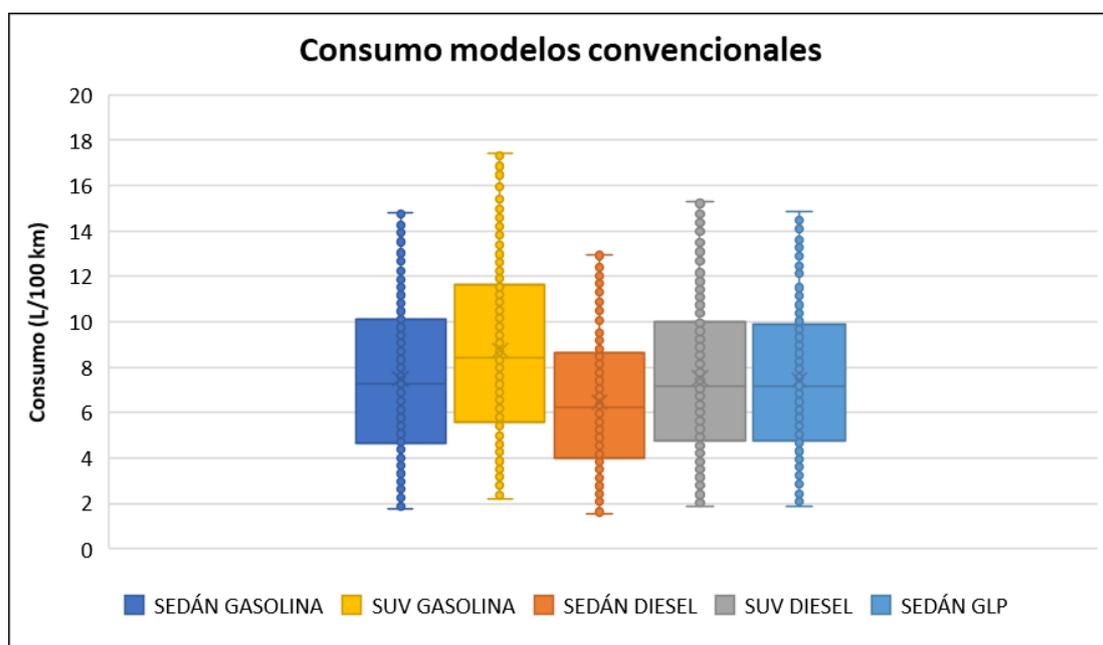
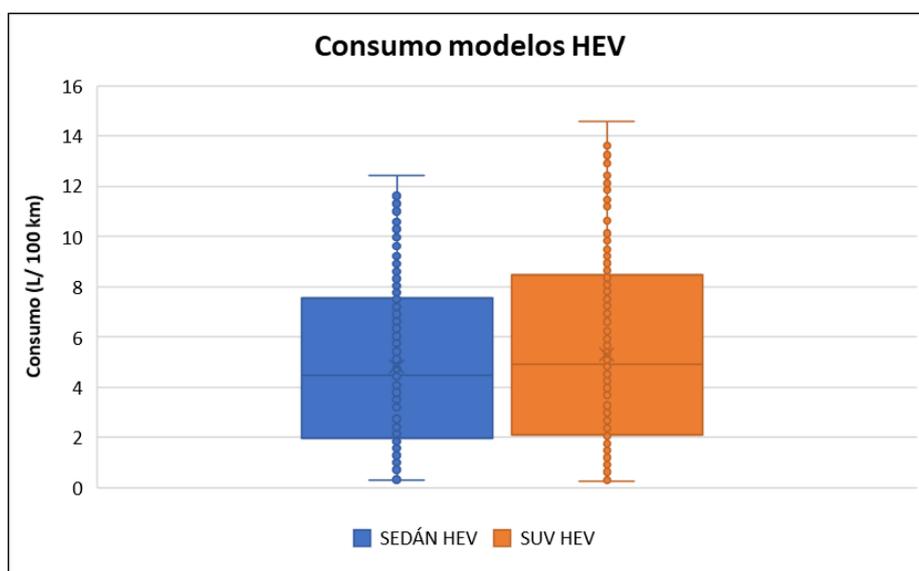


Figura 3.12 Comparativa de consumo de los modelos convencionales.

En la Figura 3.12 se aprecia claramente como en los modelos SUV el consumo es más alto que en los Sedán, ya que, por ejemplo, los valores centrales del modelo Sedán gasolina se sitúan aproximadamente entre 10 y 5 L/100 km y los del SUV gasolina entre unos 11,5 y 6 L/100 km, siendo el consumo medio del Sedán gasolina de 7,5 L/100 km y el del SUV gasolina de 8,8 L/100 km, es decir, un incremento de 1,3 L/100 km lo que supone un consumo adicional del 17,3%. Esto mismo aplica también en los modelos diésel, aunque en este caso el aumento del consumo medio en el SUV es de 1 L/100 km o de un 16,3%. En cuanto al Sedán GLP, se puede afirmar, al igual que en el apartado 3.1 Análisis grupo 1, que tiene un comportamiento

muy similar al del modelo Sedán gasolina. Por último, cabe destacar que las diferencias entre modelos se encuentran fundamentalmente en los valores centrales y en el límite superior, ya que en el límite inferior todos los valores son próximos a 2 L/100 km.

En cuanto a los modelos híbridos no enchufables, se muestra en la Figura 3.13 una comparativa entre el consumo de los modelos Sedán y SUV de la arquitectura HEV. En ella se observa también como el modelo SUV tiene unos consumos más altos, además de una dispersión de datos algo mayor, aunque en comparación con los modelos convencionales esta diferencia de consumos es más pequeña. Esto último se aprecia claramente en los consumos medios de cada modelo, ya que para el Sedán HEV el consumo medio es de 4,8 L/100 km y para el SUV HEV 5,3 L/100 km, siendo la diferencia de solo 0,5 L/100 km, mientras que entre los modelos gasolina llegaba a 1,3 L/100 km.



**Figura 3.13** Comparativa de consumo de los modelos HEV.

En la Figura 3.14 se presenta una comparativa de consumos del motor térmico de los modelos PHEV y en la Figura 3.15 la referida a los motores eléctricos.

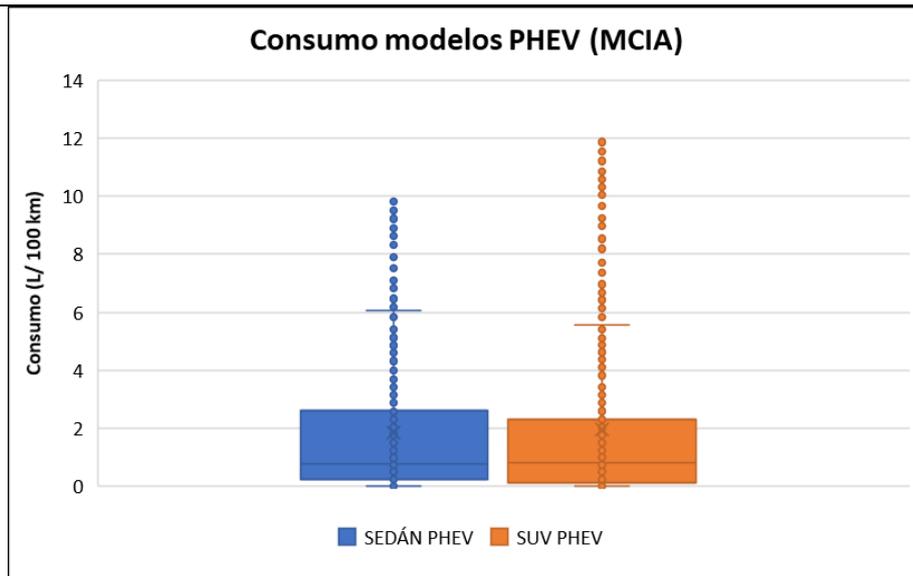


Figura 3.14 Comparativa de consumo del motor térmico de los modelos PHEV

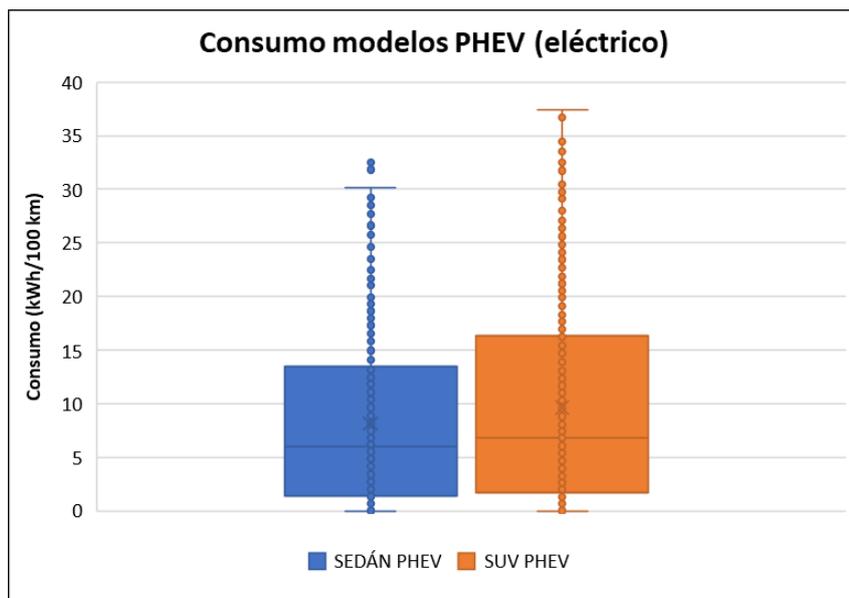


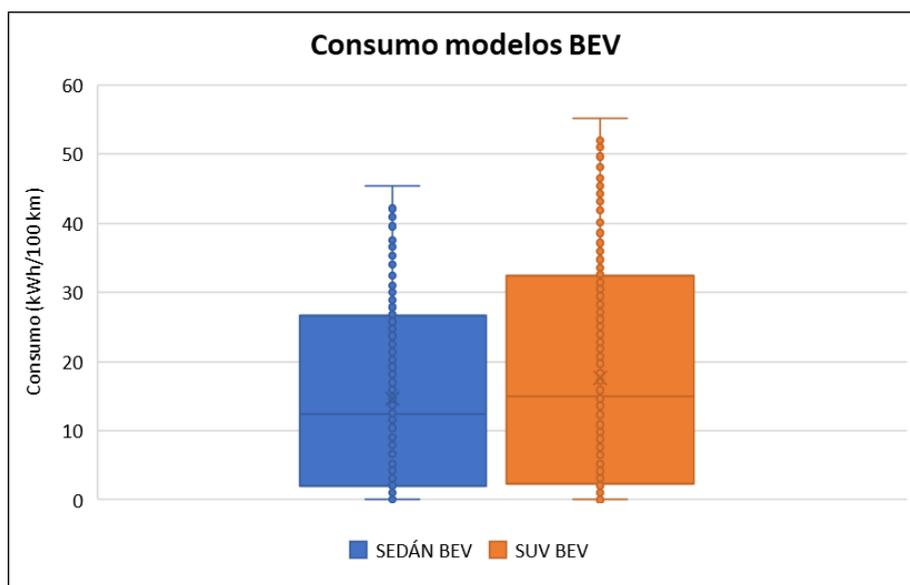
Figura 3.15 Comparativa de consumo del motor eléctrico de los modelos PHEV.

En la Figura 3.14 se observa como en este caso los valores centrales del modelo Sedán PHEV son más altos que los del SUV PHEV, mientras que los valores de consumo más altos se dan en el segundo modelo. Esto se debe a que el Sedán tiene una batería de 8,8 kWh y el SUV de 14,4 kWh, esta diferencia significativa de capacidad hace que el modelo SUV tenga una autonomía eléctrica sensiblemente mayor, por lo que al poder realizar más distancia en conducción 100% eléctrica, tendrá un mayor número de valores de consumo del motor térmico en la zona baja, pero una vez agotada la batería, el consumo aumenta hasta los valores característicos para un SUV HEV, haciendo que tenga los valores más altos de la

Figura 3.14. Todo esto hace que los valores de consumo promedio de ambos modelos sean bastante cercanos, siendo el del modelo Sedán de 1,8 L/100 km y el del SUV de 2 L/100 km, apenas 0,2 L/ 100 km de diferencia.

En la Figura 3.15, donde se muestra al comparativa de consumo del motor eléctrico de los modelos PHEV, si se aprecia como el modelo más pesado, el SUV PHEV, es el que posee tanto unos valores centrales de consumo más alto como un límite superior más alto. Esto se puede observar claramente con las medias de consumo eléctrico de ambos vehículos, ya que la del Sedán es de 8,2 kWh/100 km y la del SUV de 9,6 kWh/ 100 km, una diferencia cuatro veces mayor a la del motor térmico.

Por último, en la Figura 3.16 se comparan los consumos de los modelos BEV. En ella se observa una clara diferencia entre ambos modelos, ya que los valores centrales del modelo SUV se encuentran entre 2,2 y 32,4 kWh/100 km y los del Sedán BEV entre 2 y 26,7 kWh/100 km, además la media de consumo del primero es de 17,6 kWh/100 km y la del segundo es de 14,6 kWh/100 km, quedando una notable diferencia de 3 kWh/100 km.



**Figura 3.16** Comparativa de consumo de los modelos BEV.

Una vez presentados los diagramas de cajas y bigotes para cada arquitectura, queda patente como a mayor peso mayor consumo en todas las arquitecturas, a excepción del híbrido enchufable en el que también es un factor muy relevante la capacidad de la batería que alimenta al motor eléctrico.

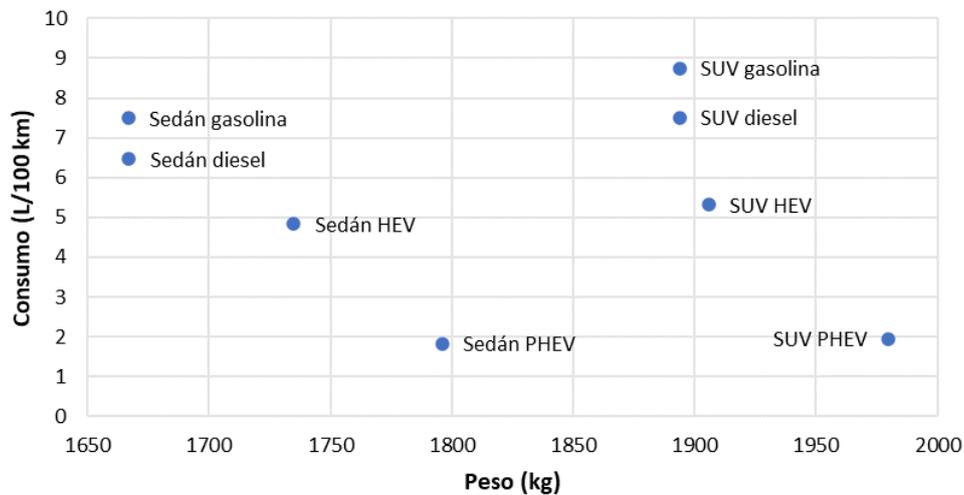
En la Tabla 3.5 se exponen las diferencias de peso y consumo de los modelos sedán y SUV para cada arquitectura, siendo “% térmico” y “% eléctrico” el incremento del consumo del motor convencional y del motor eléctrico en tanto por ciento. Además, se presentan las Figuras 3.17 y 3.18 con esta misma información para una mejor

comprensión. Al estudiar estas figuras y la tabla se llega a la conclusión de que la arquitectura 100 % eléctrica es la menos afectada por el aumento de peso. Por otra parte, cabe destacar el caso de la motorización híbrida enchufable. En esta, el aumento del consumo del motor térmico debido al peso es mínimo, mientras que para el motor eléctrico este aumento es notable, siendo similar a la arquitectura BEV teniendo un aumento de peso de aproximadamente la mitad.

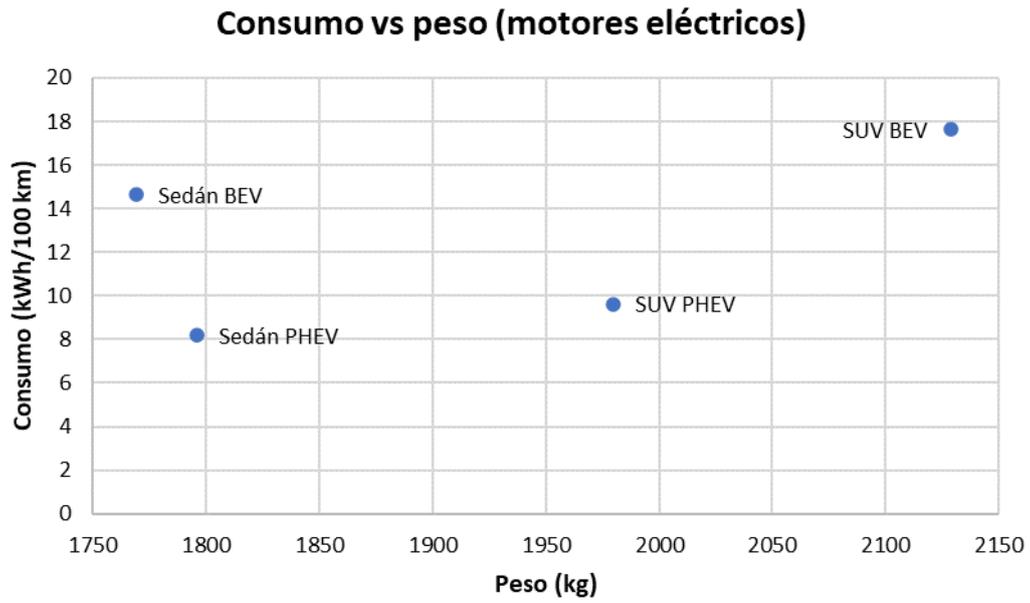
**Tabla 3.5** Diferencia de peso y consumo entre modelos sedán y SUV.

	MEP	MEC	HEV	PHEV	BEV
$\Delta$ L/100 km	1,2	1,0	0,5	0,1	-
$\Delta$ kWh/100 km	-	-	-	1,4	3,0
% térmico	16,6%	16,2%	9,9%	6,6%	-
% eléctrico	-	-	-	17,6%	20,5%
$\Delta$ masa (kg)	227	227	171	184	360
$\Delta$ masa (%)	13,6%	13,6%	9,9%	10,2%	20,4%

**Consumo vs peso (motores térmicos)**



**Figura 3.17** Consumo con respecto al peso de diferentes modelos (motores térmicos).



**Figura 3.18** Consumo con respecto al peso de diferentes modelos (motores eléctricos).

## 4 EMISIONES CO<sub>2</sub>

Una vez simulados los 490 ciclos de conducción de Tenerife en FASTSim y analizados los resultados obtenidos, se procede a calcular las emisiones de dióxido de carbono a partir de los datos de consumo obtenidos por el programa. Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se utilizará el análisis Well to Wheels (Pozo a Ruedas en español). Una vez obtenidas las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) se realizará un análisis de los resultados comparando las diferentes arquitecturas y posteriormente dentro de cada una de estas, se analizará para las dos clases de vehículos que se han utilizado en este estudio.

### 4.1 Análisis Well to Wheels (WTW)

Para certificar las emisiones de GEI de un vehículo, las Administraciones Públicas siempre se han valido de mediciones directas, es decir, se toman las emisiones fruto de la combustión del MCI en el tubo de escape del vehículo. Sin embargo, en el análisis Well to Wheels, se incluyen las emisiones producidas en la cadena de suministro desde la extracción de la materia prima hasta su utilización. Esto incluye los tratamientos que se le hacen a la materia prima para convertirla en combustible y su transporte en todas las etapas (ver Figura 4.1).

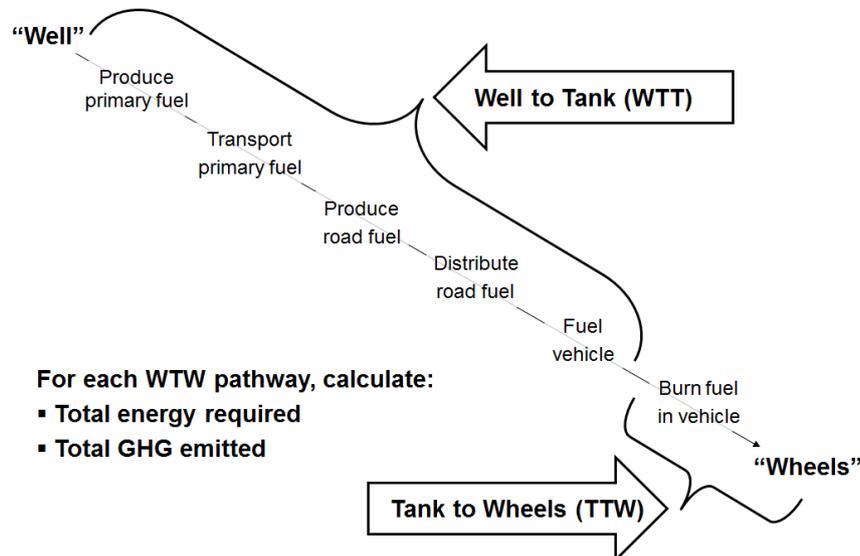


Figura 4.1 Representación del análisis Well-To-Wheels.

Fuente: JRC-Eucar-Concawe (JEC).

Usando este análisis, se puede realizar una comparativa real entre las emisiones de GEI de vehículos con diferentes motorizaciones, ya que, si se midiera directamente en el vehículo las emisiones de estos gases, es decir, si se realizara un análisis Tank to Wheels, las emisiones de GEI de los modelos eléctricos serían nulas. Este método

induciría a sobreestimar la capacidad de reducción de emisiones de GEI de los modelos enchufables.

En este estudio se van a utilizar unos factores de emisión obtenidos por el método Well to Wheels y extraídos de [15]: de 0,314  $tCO_2eq/MWh$  para la gasolina, 0,306  $tCO_2eq/MWh$  para el diésel y 0,281  $tCO_2eq/MWh$  para el GLP (ver Tabla 4.1). En cuanto al factor de emisión de la red eléctrica de la isla de Tenerife, se utilizará el valor dado por [16] de 680  $gCO_2eq/kWh$ . Este alto valor de emisión de GEI es debido a la baja penetración de energías renovables, que es el 18,8% de la energía producida en el año 2019 según [17] y de la alta dependencia en tecnologías de combustión como son el Ciclo Combinado (42,3%), Turbina de Vapor (30,9%), Motores Diésel (5,2%) y Turbina de Gas (2,8%). Además, estas tecnologías no funcionan siempre en sus puntos de operación óptimos, ya que, al tratarse de un sistema eléctrico aislado, estas tecnologías deben variar su carga para adaptarse a la demanda existente en cada momento, contribuyendo así a una mayor emisión de GEI.

A cada uno de los modelos se le aplicará el factor de emisión que corresponda al combustible que utilicen, mientras que, para los PHEV, se calculan las emisiones del motor eléctrico con el factor de emisión del mix energético de la isla y las del motor térmico con el factor de emisión de la gasolina, sumando finalmente las emisiones de ambos motores.

**Tabla 4.1** Factores de emisión de diferentes combustibles [15].

Combustible	Factor de emisión (t CO <sub>2</sub> eq/MWh)
GLP	0,281
Gasolina	0,314
Diésel	0,306

## 4.2 Análisis de las emisiones

Una vez obtenidos los datos emisiones de GEI de cada uno de los modelos en cada ciclo, se representan estos datos en sendos diagramas de cajas expuestos en las Figuras 4.2 y 4.3, siendo la primera de esta la perteneciente al grupo de vehículos sedán y la segunda a los SUV. En la Figura 4.2 se observa claramente como los modelos convencionales son los que presentan mayores emisiones de CO<sub>2</sub> equivalente, ya que, en el caso del gasolina, su mediana se encuentra en 202,1  $gCO_2eq/km$ , mientras que en el Sedán diésel la mediana se sitúa en 193,4  $gCO_2eq/km$ . Por otro lado, el GLP tiene unas emisiones de CO<sub>2</sub> sensiblemente menores al situarse su mediana en 148,4  $gCO_2eq/km$ , siendo este valor más cercano

al modelo HEV que a los otros convencionales. Esto se debe a que, aunque los valores mínimos de emisiones de los modelos diésel y gasolina se encuentran en torno a 50  $gCO_2eq/km$  y los del GLP sobre los 40  $gCO_2eq/kWh$ , en los valores máximos si hay una gran diferencia, ya que, mientras que para el modelo GLP este valor es de 307,2  $gCO_2eq/km$ , en los otros modelos convencionales se encuentra en torno a 405  $gCO_2eq/km$ .

Pasando a los modelos híbridos, en el caso del HEV, su mediana se encuentra en 124,8  $gCO_2eq/km$ , su valor máximo sobre 350  $gCO_2eq/km$  y el mínimo en 8,5  $gCO_2eq/kWh$ . Para el PHEV, la mediana se encuentra en 93,6  $gCO_2eq/kWh$ , el valor máximo es de 343,5  $gCO_2eq/km$  y el mínimo en este caso es de 0,3  $gCO_2eq/km$ . En el caso del modelo 100% eléctrico, los valores de la mediana, el mínimo y el máximo son prácticamente iguales que los del PHEV, siendo el primero de ellos de 93,8  $gCO_2eq/km$ , el segundo 0,1  $gCO_2eq/km$  y el último 342,5  $gCO_2eq/km$ .

Como se desprende de los datos presentados en la Figura 4.2, solo con el cambio de combustible de los motores convencionales a GLP, se consigue una cierta reducción de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Mientras que, al introducir la tecnología híbrida no enchufable, esta disminución de emisiones de GEI con respecto a los modelos convencionales ya es significativa, de en torno a 75  $gCO_2eq/km$  con respecto al modelo gasolina. Además, esta reducción de emisiones se consigue sin aumentar excesivamente el precio del vehículo y sin necesidad de desplegar una red de recarga eléctrica por parte de la Administración Pública, que según la Estrategia del Vehículo Eléctrico del Gobierno de Canarias [18], costará 24.791.000 € en el periodo 2021-2040 solo para la isla de Tenerife. Por otro lado, se observa claramente como para el BEV y el PHEV los valores de emisiones son prácticamente iguales, lo cual deja en evidencia que sin una mayor penetración de energías sin emisiones de GEI en el mix energético de Tenerife el vehículo eléctrico no consigue disminuir las emisiones de estos gases contaminantes con respecto a los PHEV y solo consigue disminuir ligeramente a los HEV.

Con respecto a la Figura 4.3, en los SUV se observa una dinámica muy parecida a los modelos sedán, con la diferencia de que los valores de emisiones son mayores debido al mayor consumo mostrado anteriormente. En los modelos SUV gasolina y diésel, sus medianas se sitúan en 234,7  $gCO_2eq/km$  y 223,3  $gCO_2eq/km$  respectivamente. Mientras que, para el HEV, la mediana se encuentra en 136,9  $gCO_2eq/km$ . Por otro lado, se observa cómo, en los SUVs, la mediana del modelo eléctrico es más alta que la del PHEV, siendo la de este último de 104,4  $gCO_2eq/km$  y la del BEV de 113,1  $gCO_2eq/km$ .

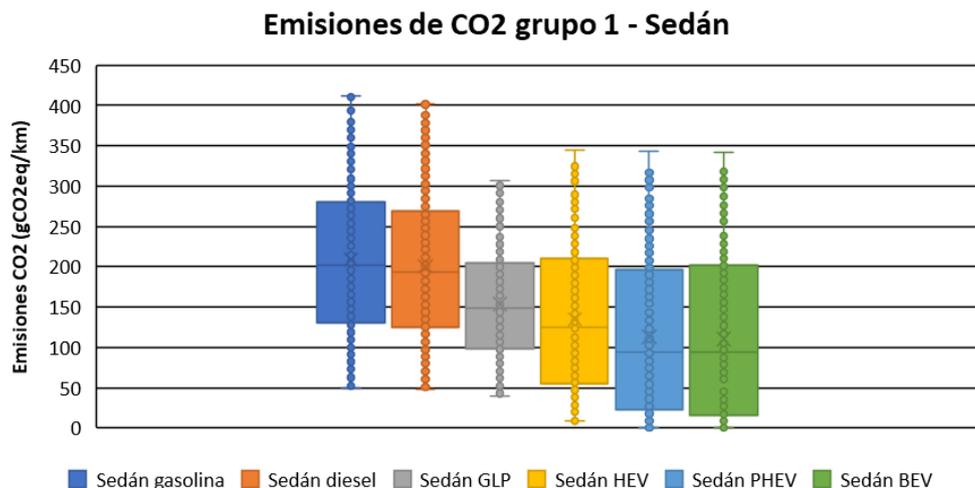


Figura 4.2 Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub> de los diferentes modelos (grupo1).

A la vista de los datos mostrados, se aprecia como en el caso de los SUV, la reducción de las emisiones de GEI que se produce al pasar de una motorización convencional de gasolina a una híbrida no enchufable es mayor que en los modelos sedán, ya que se consigue una disminución de en torno a 100  $gCO_2eq/km$ , mientras que en los sedán es de 75  $gCO_2eq/km$ . Aunque si se compara porcentualmente la reducción es similar (Ver Tabla 4.2 y 4.3). Por otra parte, se observa como las emisiones del BEV son más altas que las del PHEV. Esto se debe a que al ser mayor el peso del vehículo, mayor es el consumo eléctrico y esto sumado a la alta intensidad de emisión de la red eléctrica de Tenerife, lleva a que una arquitectura híbrida enchufable consiga emisiones de GEI ligeramente inferiores que una 100% eléctrica. Esto confirma que para la adopción del vehículo eléctrico en la isla de Tenerife se necesita una combinación de aumento de energías renovables en el mix energético y una mayor eficiencia del parque de generación convencional.

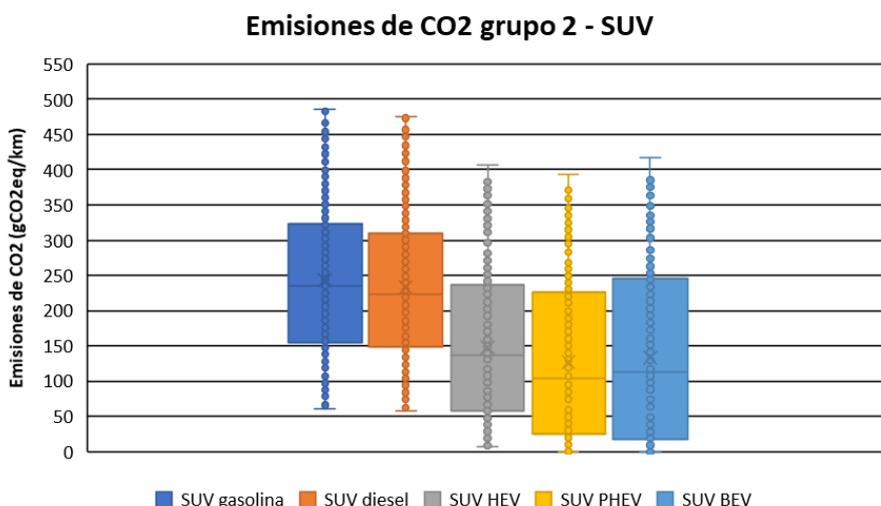


Figura 4.3 Comparativa de emisiones de CO<sub>2</sub> de los diferentes modelos (grupo 2).

**Tabla 4.2** Reducción de emisiones con respecto al modelo Sedán gasolina.

Modelo	emisiones CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> eq/km)	Reducción (%)
Sedán gasolina	202,1	-
Sedán diésel	193,4	-4,3%
Sedán HEV	124,8	-38,2%
Sedán PHEV	93,6	-53,7%
Sedán BEV	93,8	-53,6%

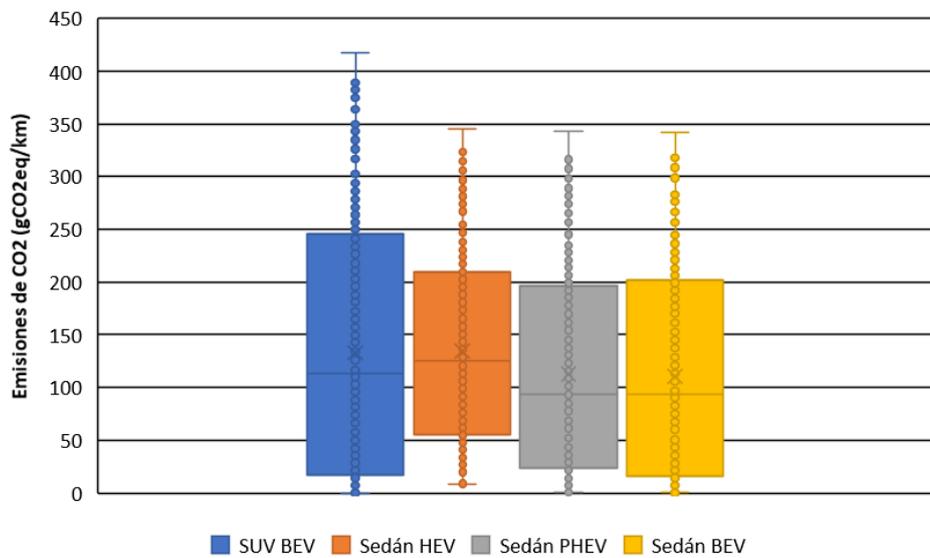
**Tabla 4.3** Reducción de emisiones con respecto al modelo SUV gasolina.

Modelo	emisiones CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> eq/km)	Reducción (%)
SUV gasolina	234,7	-
SUV diésel	223,3	-4,9%
SUV HEV	136,9	-41,7%
SUV PHEV	104,4	-55,5%
SUV BEV	113,1	-51,8%

Del estudio de las emisiones de GEI de los diferentes modelos se extrae también que el peso de los vehículos es un factor a tener en cuenta, ya que, como se puede observar en la Figura 4.4 y en la Tabla 4.4, el modelo SUV BEV tiene asociadas unas emisiones de CO<sub>2</sub> superiores a los modelos Sedán BEV y PHEV. También, al comparar con el modelo Sedán HEV se aprecia la penalización en las emisiones producida por el aumento de peso, ya que el modelo Sedán tiene su mediana de emisiones más alta que la del SUV BEV, pero sus medias son prácticamente iguales. Por lo tanto, si se desea conseguir una disminución importante de emisiones de CO<sub>2</sub> en la isla de Tenerife, sería conveniente revisar los programas de subvenciones y ayudas a la compra descartando los modelos de gran tamaño y peso y apostar por otros de dimensiones y pesos más contenidos, ya que con tecnologías híbridas en los modelos Sedán se consigue una disminución de las emisiones igual o superior que en los modelos SUV 100% eléctricos.

**Tabla 4.4** Comparativa emisiones de CO<sub>2</sub> modelo SUV BEV y otros modelos Sedán.

Modelo	Emisiones de CO <sub>2</sub> (gCO <sub>2</sub> eq/km)	
	Media	Mediana
SUV BEV	133,2	113,1
Sedán HEV	134,5	124,8
Sedán PHEV	112,8	93,6
Sedán BEV	110,5	93,8



**Figura 4.4** Emisiones de CO<sub>2</sub> del modelo SUV BEV y otros modelos Sedán.

## 5 POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES A CORTO Y MEDIO PLAZO

A continuación, se presenta un estudio preliminar de posibles escenarios futuros de las emisiones asociadas al parque de turismos de Tenerife, desde el año 2020 (último año con datos consolidados) hasta el año 2030. Este análisis permitirá obtener datos sobre el potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de diferentes arquitecturas. Para ello se deben tener en cuenta una serie de hipótesis:

- El estudio se centrará en la Zona Metropolitana de Tenerife, ya que es donde se ha realizado la toma de datos de viajes.
- La intensidad de carbono del mix energético de la isla se mantendrá en el valor actual (680 gCO<sub>2</sub>eq/kWh). Por lo tanto, el escenario de penetración de renovables será conservador, cubriendo solo el aumento de demanda global de la isla. Este escenario es especialmente moderado en cuanto a la penetración de renovables y posiblemente irreal, pero es útil a la hora de mostrar la importancia de reducir de forma notable la intensidad de CO<sub>2</sub> de la red eléctrica de la isla para que el esfuerzo en la introducción del vehículo eléctrico sea efectivo.
- Se tomará 8.619 como número de nuevas matriculaciones al año en la Zona Metropolitana, esta cifra se obtiene de realizar la media de matriculaciones desde el año 2003, ya que es el primer año disponible en la base de datos del Instituto Canario de Estadística (ISTAC) hasta el año 2019, se obvia el año 2020 dado que por la crisis derivada de la COVID-19 las matriculaciones caen considerablemente y no es representativo.
- Para realizar los cálculos se tomará como distancia diaria recorrida 14,7 km. Este dato es el doble de la mediana obtenida entre los 490 ciclos que se usan en este análisis. Se selecciona el doble de la mediana ya que, se tiene en cuenta que los desplazamientos son de ida y vuelta.
- Por último, el estudio de emisiones se realizará analizando tres escenarios: en el primero o Escenario 1, solo se matricularán vehículos convencionales MEP. En el Escenario 2, sólo entrarán a formar parte del parque de turismos vehículos HEV, y en el Escenario 3 solo se añadirán vehículos BEV.

Para empezar el estudio se debe tener en cuenta la composición del parque de turismos de la Zona Metropolitana en el año 2020. Como se observa en la Tabla 5.1, este se compone principalmente de vehículos de gasolina (81,6%) y en menor medida Diésel (18,1%) representando los eléctricos y los GLP solamente el 0,2% y el 0,1% respectivamente. Es por esto que se asumirá que el parque está compuesto únicamente por vehículos con motorización MEP en un 82% y MEC el 18% restante.

**Tabla 5.1** Parque de turismos de la Zona Metropolitana.

	TOTAL	Gasolina	Diésel	Eléctrico	GLP
Unidades	221.774	180.948	40.077	477	264
Cuota	100%	81,6%	18,1%	0,2%	0,1%

**Fuente:** Elaboración propia a partir de datos del ISTAC.

Para el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> se realizará una media entre los datos de emisión por kilómetro del modelo SUV y sedán de cada motorización. Posteriormente se calcula las emisiones anuales de cada motorización y se multiplica por el número de vehículos (Ver Tabla 5.3).

**Tabla 5.2** Emisiones medias por motorización.

Arquitectura	Distancia (km/día)	Emisiones gCO <sub>2</sub> eq/km	Emisiones diarias kgCO <sub>2</sub> eq/día	Emisiones anuales kgCO <sub>2</sub> eq/año
MEP	14,7	226,1	3,3	1.213
MEC	14,7	217,0	3,2	1.164
HEV	14,7	141,2	2,1	758
BEV	14,7	121,9	1,8	654

**Fuente:** Elaboración propia.

## 5.1 Escenario 1

En este escenario de trabajo, solo se matricularán vehículos convencionales desde el año 2020 al 2030. Este caso servirá de base de comparación con respecto a los otros dos. Además, cabe destacar que solo se incluyen matriculaciones de vehículos MEP a partir de 2021 ya que los MEC son minoritarios en comparación a los primeros y además hay generada una incertidumbre en torno a él que hace que en los últimos años sus ventas hayan disminuido considerablemente. Como se puede observar en la Tabla 5.3, las emisiones asociadas a los nuevos vehículos matriculados son unas 8.500 toneladas anuales, llegando emitir en 2030 96.098 toneladas de CO<sub>2</sub> y emitiendo en total en diez años unas 585.000 toneladas Siendo la motorización MEP la que más emisiones aporta como es de esperar al ser la mayoritaria.

**Tabla 5.3** Evolución Escenario 1.

Año	MEP (tCO <sub>2</sub> /año)	MEC (tCO <sub>2</sub> /año)	Total (tCO <sub>2</sub> /año)
2020	8.573	1.805	10.378
2021	17.144	1.805	18.950
2022	25.716	1.805	27.522
2023	34.288	1.805	36.094
2024	42.860	1.805	44.666
2025	51.432	1.805	53.238
2026	60.004	1.805	61.810
2027	68.577	1.805	70.382
2028	77.149	1.805	78.954
2029	85.721	1.805	87.526
2030	94.293	1.805	96.098
TOTAL	565.757	19.860	585.617

## 5.2 Escenario 2

En este escenario se introducen HEV, por lo que las emisiones de vehículos MEP y MEC se mantienen constantes (Ver Tabla 5.4 y Figura 5.1). En este caso, las emisiones aumentan en 6.500 toneladas anuales, lo que se traduce en unas 2.000 toneladas anuales de CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir con respecto al Escenario 1, llegando a un total de 112.318 toneladas de CO<sub>2</sub> que se dejan de emitir a la atmósfera en diez años, lo que supone una reducción del 24% de las emisiones del Escenario 1.

**Tabla 5.4** Evolución Escenario 2.

Año	MEP (tCO <sub>2</sub> /año)	MEC (tCO <sub>2</sub> /año)	HEV (tCO <sub>2</sub> /año)	Total (tCO <sub>2</sub> /año)	Reducción (tCO <sub>2</sub> /año)
2020	8.573	1.805	0	10.378	0
2021	8.573	1.805	6.530	16.908	2.042
2022	8.573	1.805	13.060	23.438	4.084
2023	8.573	1.805	19.589	29.967	6.126
2024	8.573	1.805	26.119	36.497	8.168
2025	8.573	1.805	32.649	43.027	10.211
2026	8.573	1.805	39.179	49.557	12.253
2027	8.573	1.805	45.709	56.087	14.295
2028	8.573	1.805	52.239	62.617	16.337
2029	8.573	1.805	58.768	69.146	18.380
2030	8.573	1.805	65.298	75.676	20.422
TOTAL	94.298	19.860	359.141	473.299	112.318

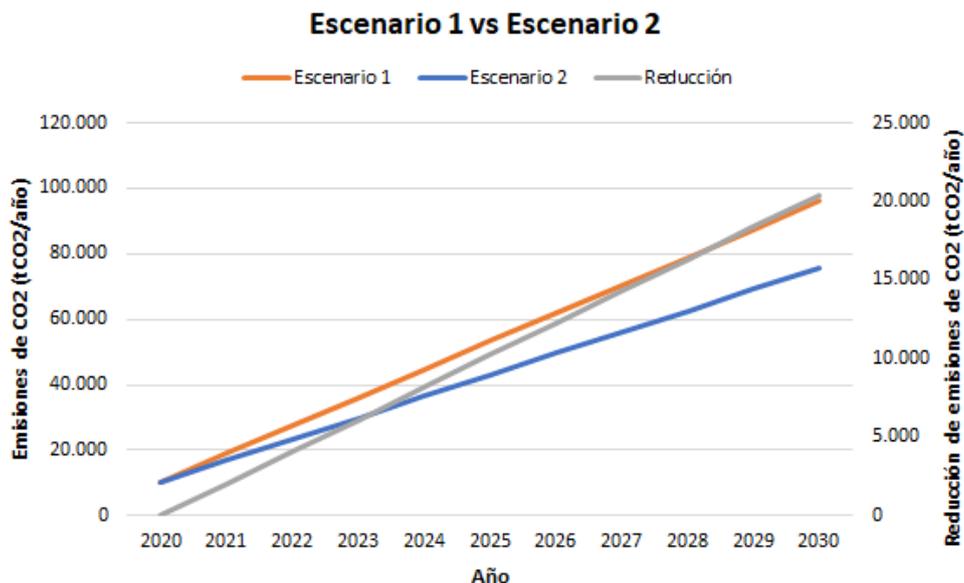


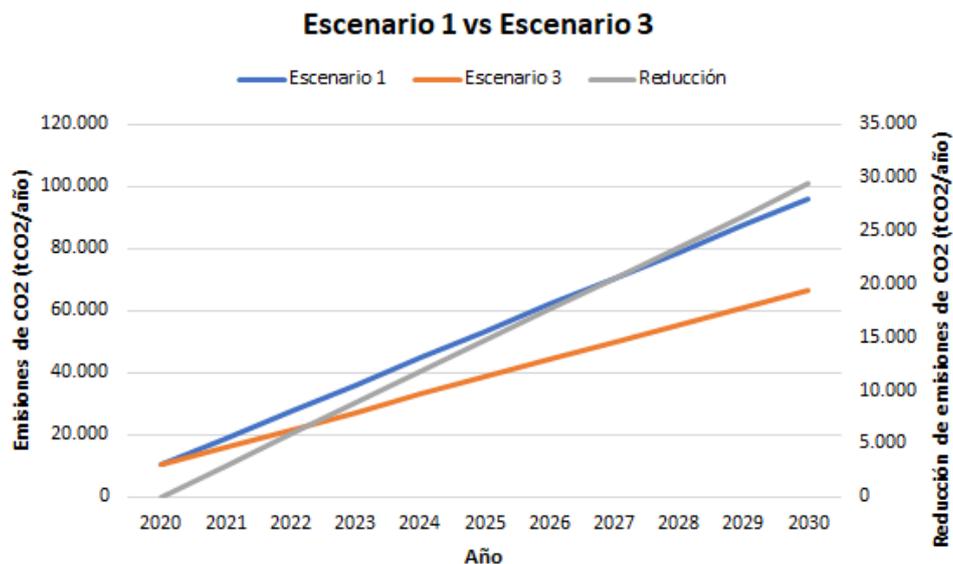
Figura 5.1 Comparativa Escenario1 vs Escenario 2.

### 5.3 Escenario 3

En este caso se introducen 8.619 modelos BEV cada año, manteniéndose nuevamente las emisiones asociadas a los MEP y MEC constantes (Tabla 5.5 y Figura 5.2). En este escenario las emisiones aumentan anualmente en unas 5.600 toneladas de CO<sub>2</sub>, consiguiendo así una reducción anual de emisiones con respecto al Escenario 1 de 2.937 toneladas de CO<sub>2</sub>. Al cabo de diez años se consigue una reducción acumulada 161.534 toneladas, o lo que es lo mismo, una reducción del 31% con respecto al escenario de referencia.

Tabla 5.5 Evolución Escenario 3.

Año	MEP (tCO <sub>2</sub> /año)	MEC (tCO <sub>2</sub> /año)	BEV (tCO <sub>2</sub> /año)	Total (tCO <sub>2</sub> /año)	Reducción (tCO <sub>2</sub> /año)
2020	8.573	1.805	0	10.378	0
2021	8.573	1.805	5.635	16.013	2.937
2022	8.573	1.805	11.270	21.648	5.874
2023	8.573	1.805	16.905	27.283	8.811
2024	8.573	1.805	22.540	32.918	11.748
2025	8.573	1.805	28.175	38.553	14.685
2026	8.573	1.805	33.810	44.188	17.622
2027	8.573	1.805	39.445	49.823	20.559
2028	8.573	1.805	45.080	55.458	23.496
2029	8.573	1.805	50.715	61.093	26.433
2030	8.573	1.805	56.350	66.728	29.370
TOTAL	94.298	19.860	309.924	424.082	161.534



**Figura 5.2** Comparativa Escenario 1 vs Escenario 3.

Por otro lado, si se comparan los Escenarios 2 y 3 entre sí, se desprende que la diferencia entre las emisiones de cada uno de ellos no es demasiado notable (Tabla 5.6 y Figura 5.3). Esto es debido a que la alta intensidad de carbono del mix energético de Tenerife se traduce en que los BEV no tengan una gran capacidad de disminuir las emisiones de CO<sub>2</sub>, pese a su elevado coste, frente a un HEV, los cuales con unas baterías que pueden oscilar entre 1 y 1,5 kWh y sin conexión a red, consiguen disminuciones de emisiones significativas sin un aumento de precio notable frente a modelos convencionales.

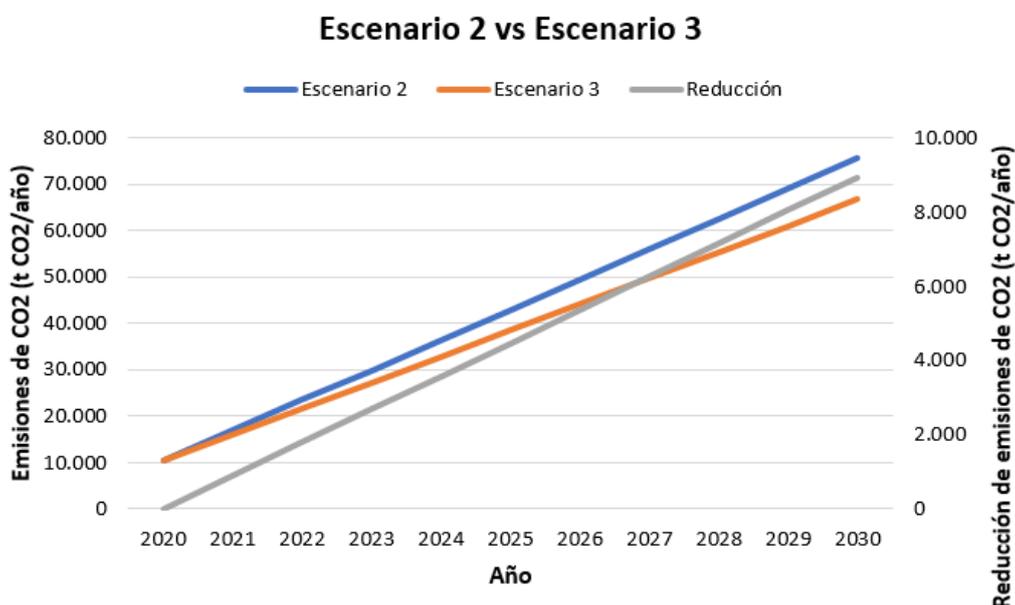
**Tabla 5.6** Comparativa Escenario 2 y 3.

Año	Escenario 2 (tCO <sub>2</sub> /año)	Escenario 3 (tCO <sub>2</sub> /año)	Diferencia (tCO <sub>2</sub> /año)
2020	10.378	10.378	0
2021	16.908	16.013	895
2022	23.438	21.648	1.790
2023	29.967	27.283	2.685
2024	36.497	32.918	3.579
2025	43.027	38.553	4.474
2026	49.557	44.188	5.369
2027	56.087	49.823	6.264
2028	62.617	55.458	7.159
2029	69.146	61.093	8.054
2030	75.676	66.728	8.948
TOTAL	473.299	424.082	49.217

Por último, a modo de muestra del potencial de estas tecnologías, se presenta una comparativa de la reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de cada uno de los Escenarios con las emisiones de CO<sub>2</sub> del sistema eléctrico de la isla de Tenerife en el año 2019,

último año disponible, dado por [17]. Estas emisiones son de 2.120.073 toneladas de CO<sub>2</sub> (Tabla 5.7).

En la Tabla 5.7 se aprecia como la reducción obtenida es mínima con respecto a las emisiones del sistema eléctrico de Tenerife, obteniéndose como máximo en el Escenario 3 una reducción equivalente al 1,4% de las emisiones de este. Además, cabe destacar que las diferencias entre los dos escenarios son mínimas inicialmente y para los últimos años llegan a ser de únicamente el 0,4%. Por lo tanto, el esfuerzo tendría que ir destinado en primera instancia a reducir las emisiones de la generación eléctrica a través de una mayor penetración de energías renovables y mejora de la eficiencia del sistema de generación convencional del sistema eléctrico insular.



**Figura 5.3** Comparativa Escenario 2 vs Escenario 3

**Tabla 5.7** Emisiones de turistas respecto a emisiones del sistema eléctrico insular.

Año	Escenario 2 (tCO <sub>2</sub> /año)	Relación mix (%)	Escenario 3 (tCO <sub>2</sub> /año)	Relación mix (%)
2020	0	0,0%	0	0,0%
2021	2.042	0,1%	2.937	0,1%
2022	4.084	0,2%	5.874	0,3%
2023	6.126	0,3%	8.811	0,4%
2024	8.168	0,4%	11.748	0,6%
2025	10.211	0,5%	14.685	0,7%
2026	12.253	0,6%	17.622	0,8%
2027	14.295	0,7%	20.559	1,0%
2028	16.337	0,8%	23.496	1,1%
2029	18.380	0,9%	26.433	1,2%
2030	20.422	1,0%	29.370	1,4%

## 6 CONCLUSIONES

Este análisis tiene como objetivo principal la obtención del potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> a través de la electrificación del parque automóvil de Tenerife, obteniendo de esta manera datos para evaluar las mejores opciones para reducir las emisiones de este gas de efecto invernadero.

Primero, se realizó la selección de conductores para el estudio y se procedió a la toma de los ciclos de conducción real en la Zona Metropolitana de Tenerife. Posteriormente se analizaron los datos obtenidos y se verificó que estos ciclos de conducción son representativos de la conducción en la isla. En segundo lugar, se construyeron los modelos de vehículos a utilizar en FASTSim y se validaron sus datos de consumo con los datos dados por EPA o por el ciclo WLTP, corroborando así que los modelos construidos en el programa son correctos.

Posteriormente, se simularon los 490 ciclos de conducción con los modelos construidos en FASTSim y se obtuvieron los datos de consumo de cada uno de los modelos para cada ciclo. Con estos resultados se realizó un análisis del consumo por pesos y por motorizaciones.

A continuación, se realizó el cálculo de las emisiones de CO<sub>2</sub> por el método de análisis Well to Wheels, teniendo en cuenta así las emisiones globales del vehículo desde la extracción del combustible hasta las producidas por la combustión del motor del vehículo. Con las emisiones obtenidas para cada modelo se realizó una comparativa entre las diferentes motorizaciones y pesos.

Por último, se realizó un estudio preliminar de diferentes escenarios futuros a diez años vista. En este análisis, se presentaron tres escenarios, en el primer caso solo se matriculan vehículos convencionales, en el segundo solo vehículos híbridos y en el tercero eléctricos. Con este pequeño estudio se consigue obtener un orden de magnitud del potencial de reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> de la electrificación del parque de turismos de Tenerife.

Finalmente, se obtienen una serie de datos importantes. Primeramente, se obtienen reducciones de emisiones de CO<sub>2</sub> con respecto a motorizaciones MEP de en torno al 40% para los HEV, del 54,5% para los PHEV y del 52,7% para los BEV. Por otra parte, se concluyó que los modelos con dimensiones más contenidas consiguen una mayor reducción de emisiones, debido a que el modelo SUV BEV emite más CO<sub>2</sub> que los modelos Sedán BEV y PHEV y la diferencia con el Sedán HEV es despreciable. Por último, destacar que en el estudio preliminar a diez años vista se obtienen reducciones equivalentes al 2,2% de las emisiones del mix energético de Tenerife para el escenario basado en modelos BEV y del 1,8% en el escenario basado en modelos HEV.

A modo de conclusión, cabe destacar que este trabajo consigue demostrar dos ideas. La primera es que se debe enfocar las ayudas y subvenciones a la adquisición de vehículos eléctricos e híbridos enchufables de peso y dimensiones contenidas (tanto del vehículo como de la batería), ya que el peso penaliza notablemente el consumo y por consiguiente las emisiones. Por último, también se demuestra que para que el esfuerzo económico en la transición al vehículo eléctrico sea efectivo, se debe apostar por aumentar la penetración de energías renovables en el mix energético de Tenerife.

## 7 REFERENCIAS

- [1] Reglamento (UE) 2019/631 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 17 de abril de 2019, por el que se establecen normas de comportamiento en materia de emisiones de CO<sub>2</sub> de los turismos nuevos y de los vehículos comerciales ligeros nuevos, y por el que se derogan los Reglamentos (CE) n.º 443/2009 y (UE) n.º 510/2011.
- [2] “Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Cycle (WLTC)”, *DieselNet*. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/wltp.php> (Accedido: 01-Ago-2021).
- [3] M Fergusson, “Mind the Gap! Why official car fuel economy figures don’t match up to reality”, T&E, Bélgica, accedido: 01-Ago-2021. [En línea]. Disponible: [https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Real%20World%20Fuel%20Consumption%20v15\\_final.pdf](https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/Real%20World%20Fuel%20Consumption%20v15_final.pdf)
- [4] “PEMS, un nuevo medio para el laboratorio del motor”, CTAG [En línea]. Disponible en: <https://ctag.com/pems-portable-emissions-measurement-system/>. (Accedido:04-Ago-2021).
- [5] “FTP-75”, *DieselNet*. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php> (Accedido: 04-Ago-2021).
- [6] “SFTP-US06”, *DieselNet*. [En línea]. Disponible en: [https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp\\_us06.php](https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp_us06.php) (Accedido: 04-Ago-2021).
- [7] “SFTP-SC03”, *DieselNet*. [En línea]. Disponible en: [https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp\\_sc03.php](https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp_sc03.php) (Accedido: 04-Ago-2021).
- [8] “Electrifying Automobiles: The Multiple Levels of Vehicle Electrification Explained”, *PAULEICHENBERG*. [En línea]. Disponible: <https://www.pauleichenberg.com/blog/multi-level-electrification-explained/>. (Accedido: 04-Ago-2021).
- [9] *FASTSim*. (2018). NREL. Disponible: <https://www.nrel.gov/transportation/fastsim.html>
- [10] J.A. López (2013). Dinámica longitudinal tracción. Resistencia al avance y diagrama de tracción, [En línea]. Disponible: [https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2013/455/42635/1/Documento6.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2013/455/42635/1/Documento6.pdf)
- [11] J. V. Paúl y J. I. R. García, *Sistemas de transmisión y frenado*. Macmillan Education, 2018.

- [12] F. Payri, J.M. Desante *et al*, *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Barcelona: Reverté, 2011.
- [13] A Brooker, J Gonder, L Wang. Et al, “FASTSim: A Model to Estimate Vehicle Efficiency, Cost and Performance”, SAE Technical Paper 2015-01-0973, 2015, doi: 10.4271/2015-01-0973.
- [14] US. Department of Energy. “fueleconomy.gov”.  
<https://www.fueleconomy.gov/feg/findacar.shtml> (Accedido: 25-Jul-2021).
- [15] B. Koffi, *et al*, “Greet (2017): CoM Default Emission Factors for Eastern Partner Countries - Version 2017”, European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/jrc-com-ef-come-ef-2017>.
- [16] O. García-Afonso, I. Santana-Méndez, A.M. Delgado-Torres y B. González-Díaz, “On the road to a sustainable transport mobility in isolated power systems: The role of light-duty powertrain electrification”, *JCLP*, vol. 320, oct, 2021.
- [17] “Anuario Energético de Canarias 2019”, GobCan, España, Inf. Tec, diciembre 2020.
- [18] “Estrategia del vehículo eléctrico de Canarias”, ITC, España, Accedido: 19-Ago-2021. [En línea]. Disponible:  
[https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/files/Estrategia\\_VehiculoElectrico.pdf](https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/files/Estrategia_VehiculoElectrico.pdf)



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

# **ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> A TRAVÉS DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DE TENERIFE**

## **ANEXO I: CONFIGURACIÓN FASTSIM**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor:** Ricardo García González

**Tutor:** Óscar García Afonso

**San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2021**

## 8 ANEXO I: CONFIGURACIÓN FASTSIM

En este anexo se expone el proceso de incorporación de vehículos y su posterior simulación.

Para añadir nuevos vehículos al programa se hace uso de la herramienta para importar vehículos ligeros de FASTSim como se puede observar en las Figuras 6.1 y 6.2.

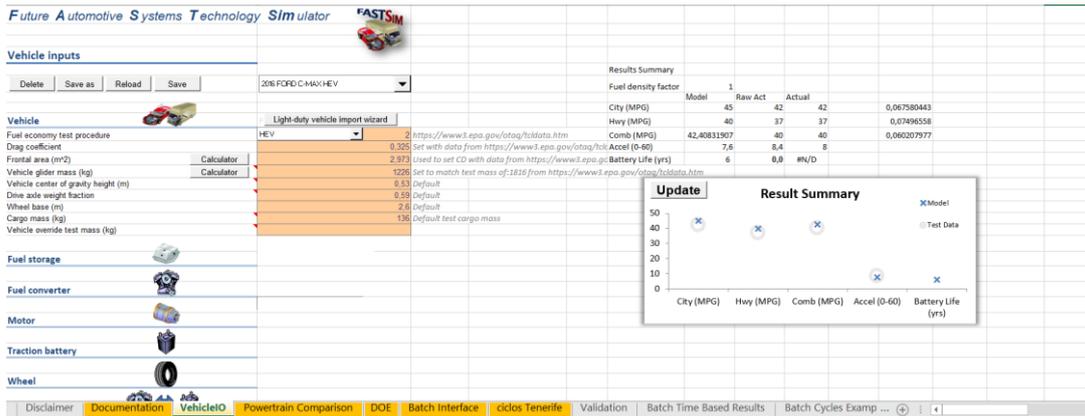


Figura 8.1 Vista general de la pestaña VehicleIO de FASTSim.

**Add Vehicle** ✕

This form helps import a new vehicle. It uses data from <https://www3.epa.gov/otaq/tcddata.htm> and <http://www.fueleconomy.gov/feg/download.shtml> to estimate mass, drag coefficient, rolling resistance, and fuel converter power.

Be sure to check the data before saving. After importing and confirming populated values, save FASTSim.xism.

Year:

Make:

Model:

Powertrain:

Width (Inches)

Height (Inches)

Fuel energy (GGE)

Fuel converter power (kW)

Battery power (kW)

Battery energy (kWh)

Motor power (kw)

Figura 8.2 Herramienta para importar vehículos ligeros de FASTSim.

Para introducir un modelo nuevo solo es necesario elegir un modelo sobre el cual basarlo, seleccionar la motorización que se va a introducir y añadir los valores de ancho y alto del vehículo en pulgadas, la potencia del motor o motores, la capacidad de la batería en caso de que sea un HEV, PHEV o BEV y el valor de fuel energy en GGE que para la gasolina es 1. Una vez importado el vehículo, se guarda y se procede a introducir el peso en vacío del vehículo en libras como se observa en la Figura 6.3.

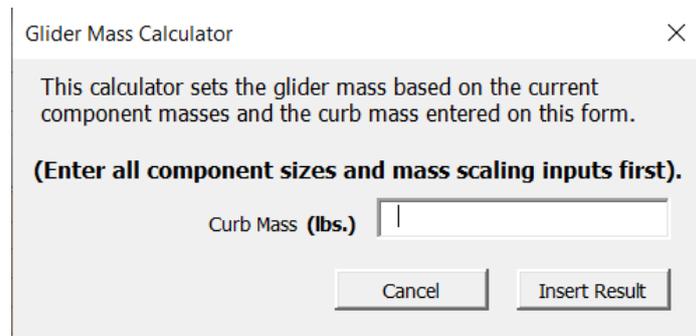


Figura 8.3 Herramienta para calcular los pesos de los diferentes componentes en FASTSim.

Al introducir el peso en vacío en esta herramienta, el programa calcula el peso aproximado de la carrocería, el motor y el resto de los elementos por separado. A continuación, en el apartado Fuel Storage, introducimos la capacidad del tanque del vehículo en kWh, ya que FastSim lo interpreta como energía almacenada.

En el apartado Fuel Converter (Figura 6.4) se puede confirmar que la potencia del motor térmico coincide con la introducida y además se puede seleccionar el ciclo térmico que seguirá el motor en cuestión. Para los HEV y PHEV el ciclo será el Atkinson, para los MCI gasolina será el Spark Ignition (SI) y para los Diesel el ciclo homónimo. En el caso de los coches eléctricos este apartado estará desactivado.

<b>Fuel storage</b> 	
Fuel storage power (kW)	2000
Fuel storage time to full power (s)	1
Fuel storage energy (kWh)	451
Fuel and fuel storage mass (kWh/kg)	9,89
<b>Fuel converter</b> 	
Fuel converter power (kW)	141
Fuel converter efficiency type	Atkinson 
Efficiency improvement	0,0%
Fuel converter time to full power (s)	6
Fuel converter base mass (kg)	61
Fuel converter specific power (kW/kg)	2,13
Minimum Engine-on Time (s)	30,00

Figura 8.4 Apartados Fuel Storage y Fuel Converter de FastSim.

Para los modelos que posean motor eléctrico, está disponible el apartado Motor y Traction Battery donde se muestran las características del motor eléctrico y de la batería que impulsa este (Figura 6.5).

<b>Motor</b>	
Motor power (kW)	35
Motor peak efficiency	95%
Motor time to full power (s)	4
Motor controller mass (kg/kW)	0,833
Motor controller base mass (kg)	21,6
<b>Traction battery</b>	
Battery power (kW)	35,0
Battery energy (kWh)	1,0
Battery mass (kg/kWh)	8,0
Battery base mass (kg)	75,0
Battery round trip efficiency	97,0%
Battery life coefficient A (product)	110
Battery life coefficient B (power)	-0,6811

Figura 8.5 Apartados Motor y Traction Battery de FASTSim.

Para terminar con la introducción de datos, se llega al apartado de validación de los modelos, Validation Data, donde se introducen los datos proporcionados por EPA de consumo, autonomía eléctrica y otros, para el modelo que se esté construyendo. Este apartado sirve para confirmar que el modelo creado se ajusta a la realidad del vehículo. Ver Figura 6.6.

<b>Validation data</b>	
EPA city fuel economy (MPGGE, diesel MPG, CS PHEV)	42
EPA highway fuel economy (MPGGE, diesel MPG, CS PHEV)	37
EPA combined fuel economy (MPGGE, diesel MPG, CS MPG)	40
City CD elect. consumption w/charging (kWh/mile)	
Highway CD elect. consumption w/charging (kWh/mile)	
Combined CD elect. consumption w/charging (kWh/mile)	
Charge depleting range (miles)	
Constant 65 MPH elect. consumption (kWh/mile)	
Constant 60 MPH elect. consumption (kWh/mile)	
Constant 55 MPH elect. consumption (kWh/mile)	
Constant 45 MPH elect. consumption (kWh/mile)	
Laboratory UDDS elect. consumption (kWh/mile)	
Laboratory highway elect. consumption (kWh/mile)	
0-60 MPH acceleration time (seconds)	8,4
Battery life (miles)	
Vehicle range (miles)	
Vehicle glider cost (no engine, battery, etc)	\$ 17.000
MSRP	\$ 24.170
Last Add vehicle input variable	

Figura 8.6 Apartado Validation Data de FastSim.

Por último, se ejecuta la simulación y se obtienen los datos para el ciclo de conducción seleccionado, confirmando así los valores de consumo, y también el de autonomía en el caso de los BEV y PHEV, con los de EPA (ver Figura 6.7).

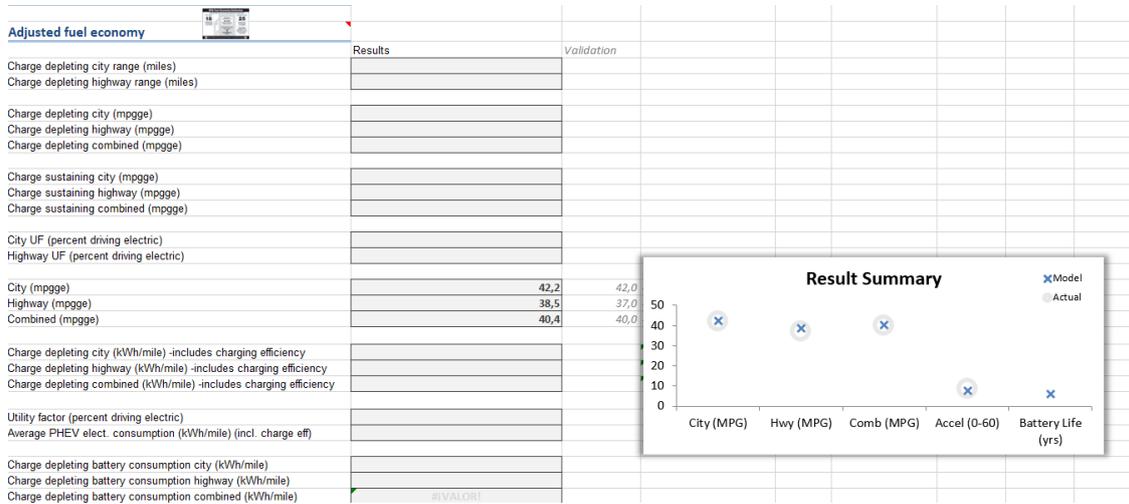


Figura 8.7 Pestaña de resultados de consumos y autonomía de FastSim.



**Escuela Superior  
de Ingeniería y Tecnología**  
Universidad de La Laguna

## **TRABAJO FIN DE GRADO**

# **ANÁLISIS DEL POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES DE CO<sub>2</sub> A TRAVÉS DE LA ELECTRIFICACIÓN DEL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DE TENERIFE**

## **ANEXO II: ANÁLISIS GRUPO 2 – VEHÍCULOS SUV**

**Titulación:** Grado en Ingeniería Mecánica

**Autor:** Ricardo García González

**Tutor:** Óscar García Afonso

**San Cristóbal de La Laguna, septiembre de 2021**

## 9 ANEXO II: ANÁLISIS GRUPO 2 – VEHÍCULOS SUV

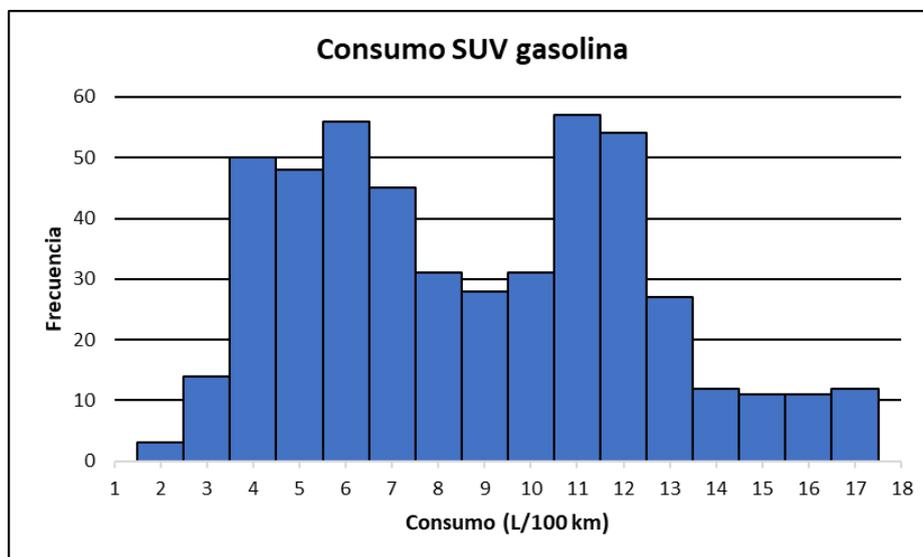
Primeramente, se procede a mostrar en la Tabla 9.1 los modelos que componen este grupo, el cual está formado íntegramente por SUVs.

**Tabla 9.1** Composición grupo 2

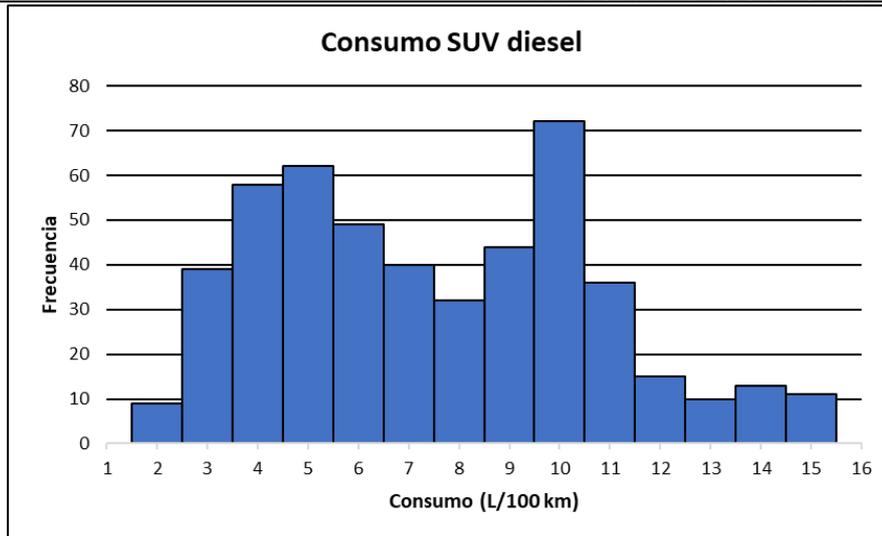
Grupo	Modelo	Peso (kg)	Drag	Batería (kWh)	Pot MCIA (kW)	Pot elect (kW)	Combinado FASTSim (L/100 km)	Combinado FASTSim (kWh/100)
2	SUV gasolina	1894	0,36	-	125	-	8,6	-
2	SUV diesel	1894	0,36	-	125	-	7,4	-
2	SUV HEV	1906	0,35	1,1	112	92	5,5	-
2	SUV PHEV	1980	0,30	14,4	165	97	5,6	20,7
2	SUV BEV	2129	0,30	82	-	150	-	22,6

**Fuente:** Elaboración propia.

Para el modelo SUV gasolina se puede observar en la Figura 9.1 un pico de consumos en torno a 11-12 L/100 km y otra concentración de consumos alrededor de los 6 L/100 km, haciendo que su mediana se sitúe en 8,44 L/100 km. El consumo promedio en los 490 ciclos es de 8,75 L/100 km, siendo el máximo de 17,4 L/100 km y el mínimo de 2,2 L/100 km. Sensiblemente mayores que los del modelo Sedán gasolina.



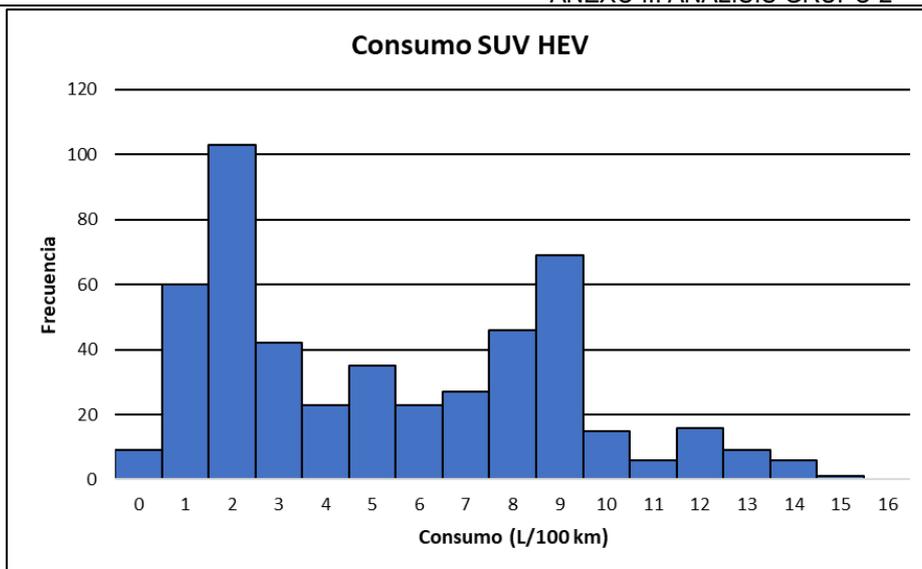
**Figura 9.1** Histograma de consumo del modelo SUV gasolina.



**Figura 9.2** Histograma de consumo del modelo SUV diésel..

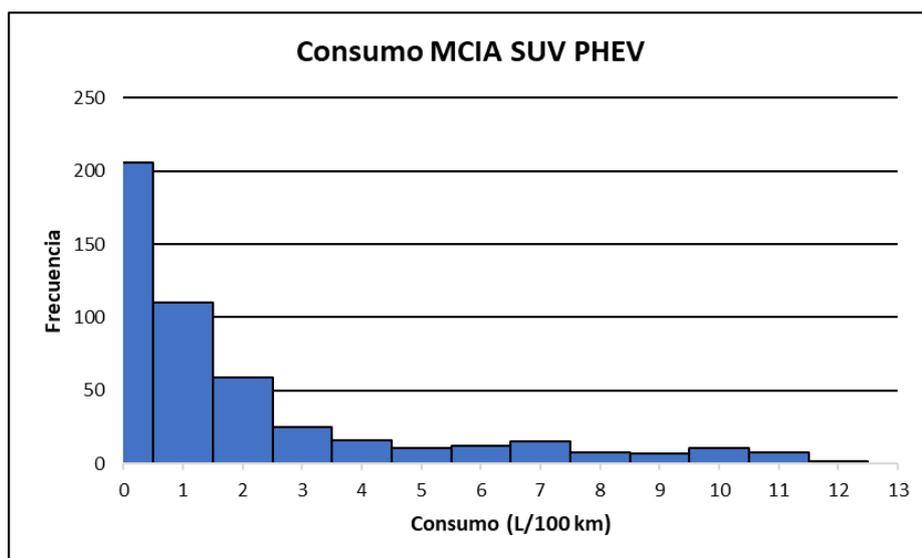
En cuanto al modelo SUV diésel, se observa en la Figura 9.2 un pico de frecuencias en 10 L/100 km, aunque la mediana se encuentra en 7,2 L/100 km. Para este modelo el consumo máximo es de 15,3 L/100 km, el mínimo 1,86 L/100 km y el consumo medio es de 7,51 L/100 km. Al igual que sucedía en el grupo 1, este modelo tiene un consumo menor que el de gasolina.

En la Figura 9.3 se muestra el histograma de consumo del modelo SUV HEV, en él se aprecian dos picos en 2 y 9 L/100 km. También se observa claramente como el diagrama está más escorado a la izquierda que en los modelos convencionales, esto se refleja en que la mediana se encuentra en 4,92 L/100 km, su consumo máximo en 14,6 L/100 km, el mínimo en 0,25 L/100 km y el consumo promedio es de 5,31 L/100 km. Estos valores son claramente más bajos que en los modelos que poseen únicamente un motor térmico, debido a que esta arquitectura consigue recuperar energía en los ciclos con pendiente negativa y además el motor térmico no opera en puntos de baja eficiencia.



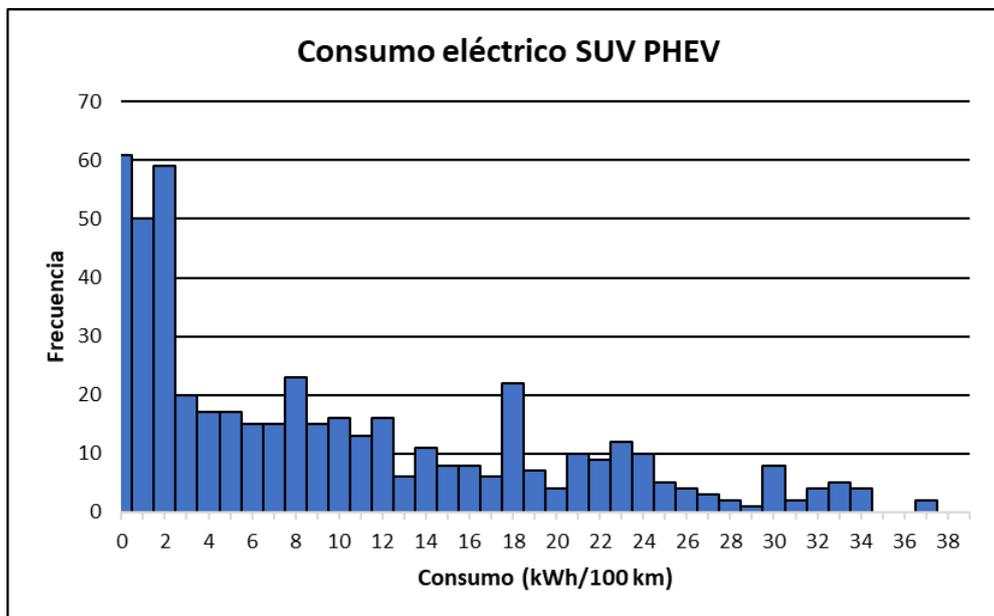
**Figura 9.3** Histograma de consumo del modelo SUV HEV.

Para terminar con los modelos que poseen motores térmicos del grupo 2, en la Figura 9.4 se muestra la distribución de los consumos del modelo SUV PHEV para su motor térmico. En esta figura se observa cómo la gráfica está realmente escorada a la izquierda, con los valores de consumo 0 y 1 L/100 km siendo los más numerosos. Esto hace que el centro de los datos se encuentre en 0,8 L/100 km y el consumo promedio sea de 2 L/100 km, lo que claramente hace que sean los menores consumos de motor térmico del grupo 2. Por otra parte, el consumo máximo es de 11,86 L/100 km y el mínimo es de 0 L/100 km, así que, al igual que en el grupo 1, esto significa que hay ciclos en los que la conducción es completamente eléctrica.



**Figura 9.4** Histograma de consumo del motor térmico del modelo SUV PHEV.

A continuación, se muestran los datos de consumo de los motores eléctricos de los modelos SUV PHEV y SUV BEV en las Figuras 9.5 y 9.6.



**Figura 9.5** Histograma de consumo eléctrico del modelo SUV PHEV.

Para el modelo SUV PHEV, mostrado en la Figura 9.5, los consumos se agrupan claramente hacia la izquierda del histograma, produciendo esto que, a pesar de que el consumo máximo es de 37,4 kWh/100 km, la mediana se encuentre en 6,83 kWh/100 km y el consumo promedio en 9,6 kWh/100 km. Por último, cabe destacar que el consumo eléctrico mínimo es de 0,002 kWh/100 km. Esto se debe principalmente a que existen ciclos de baja demanda de potencia en los que además se recupera una cantidad notable de energía en las frenadas, produciendo que el nivel de carga de la batería permanezca prácticamente invariable al final del ciclo.

En la Figura 9.6, los consumos del SUV BEV se agrupan en los valores más bajos del histograma, de 0 a 5 kWh/100km y después bajan hasta encontrar otra pequeña agrupación de datos entre 31 y 36 kWh/100 km, continuando hasta el consumo máximo que es de 55,2 kWh/100 km. Esto hace que la mediana se encuentre en 14,97, siendo esta la más alta de todas las medianas del grupo 2, el consumo promedio sea de 17,63 kWh/100 km y el mínimo de 0,01 kWh/100 km. Este consumo mínimo tan bajo se puede achacar a que se trate de un ciclo muy poco exigente y a la acción de la frenada regenerativa.

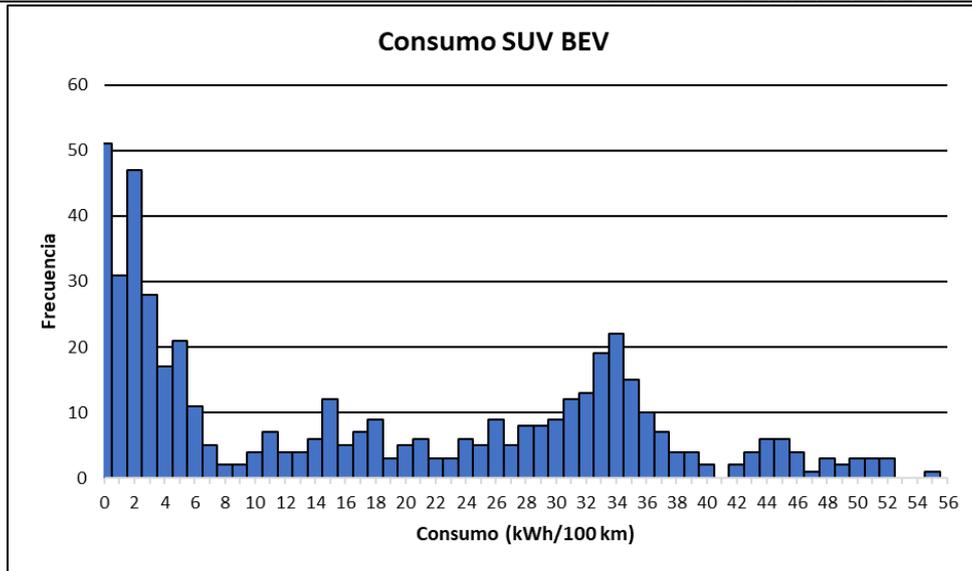


Figura 9.6 Histograma de consumo del modelo SUV BEV.