



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

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE VEHÍCULOS PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS PROPULSIVOS APLICADOS AL TRANSPORTE LIGERO POR CARRETERA

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: César Pérez Domínguez

Tutor: Óscar García Afonso

San Cristóbal de La Laguna, junio de 2022



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

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE
MODELOS DE VEHÍCULOS PARA EL
ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS
PROPULSIVOS APLICADOS AL
TRANSPORTE LIGERO POR CARRETERA**

ÍNDICE GENERAL

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: César Pérez Domínguez

Tutor: Óscar García Afonso

San Cristóbal de La Laguna, junio de 2022

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA	1
ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN FASTSIM	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Producción anual de vehículos de transporte ligero por carretera.....	2
Figura 1.2 Distribución global de ventas según tipo de arquitectura en 2021.....	3
Figura 1.3 Evolución temporal de ventas de vehículos en Europa según tipo de arquitectura	4
Figura 1.4 Diferencia entre emisiones CO ₂ reales y homologadas a través del ciclo NEDC.....	4
Figura 1.5 Diferencia entre emisiones CO ₂ reales y homologadas a través del ciclo WLTP	5
Figura 2.1 Perfil de velocidades ciclo NEDC.....	6
Figura 2.2 Perfil de velocidades ciclo WLTP Clase 3b.....	9
Figura 2.3 Protocolo de medición WLTP para híbridos enchufables	10
Figura 2.4 Comparativa del perfil de velocidades entre NEDC y WLTP	11
Figura 2.5 Curva de desaceleración libre.....	12
Figura 2.6 Obtención de los coeficientes de carretera.....	13
Figura 2.7 Equipo PEMS	14
Figura 2.8 Condiciones para determinar la dinámica del ciclo	18
Figura 2.9 Ventana de promediado móvil.....	19
Figura 2.10 Perfil de velocidades ciclo FTP-75	19
Figura 2.11 Perfil de velocidades ciclos complementarios US06 y EC03.....	20
Figura 3.1 Belt Integrated Starter Generator (BISG).....	22
Figura 3.2 Híbrido no enchufable (HEV)	23
Figura 3.3 Híbrido enchufable (PHEV)	23
Figura 3.4 Vehículo eléctrico de batería (BEV)	24
Figura 4.1 Dispositivo ELM 327.....	25
Figura 4.2 Posibles localizaciones puerto OBDII	25
Figura 4.3 Significado de los terminales del conector OBDII	26
Figura 4.4 Conexión entre el ordenador y el dispositivo ELM327	27
Figura 4.5 Establecimiento del protocolo de comunicación	27
Figura 4.6 Grabado de datos en tiempo real en gráficos	27
Figura 4.7 Selección modelo de vehículo Car Scanner	28

Figura 4.8 Módulo receptor GNSS100L	29
Figura 4.9 Información satelital tras el conexionado del módulo	30
Figura 4.10 GPS Speed Pro	30
Figura 4.11 Escaneo GPX a través de código QR	31
Figura 4.12 GPX Scan.....	31
Figura 4.13 Intensidad media horaria en carreteras de Tenerife durante 2021	32
Figura 4.14 Comparativa del perfil de velocidades entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro	33
Figura 4.15 Comparativa a baja velocidad entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro.....	33
Figura 4.16 Comparativa a alta velocidad entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro.....	34
Figura 4.17 Opel Corsa D 1.2.....	35
Figura 4.18 Perfil de velocidades ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2.....	37
Figura 4.19 Perfil de velocidades ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2.....	37
Figura 4.20 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Opel Corsa D 1.2.....	38
Figura 4.21 Dinámica general de los ciclos de conducción según $v \cdot a_{pos}$ Opel Corsa D 1.2.....	38
Figura 4.22 Hyundai Kona eléctrico	39
Figura 4.23 Mapa ciclo de conducción 3 Hyundai Kona	41
Figura 4.24 Perfil de velocidades ciclo de conducción 3 Hyundai Kona	41
Figura 4.25 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Hyundai Kona.....	42
Figura 4.26 Dinámica general de los ciclos de conducción según $v \cdot a_{pos}$ Hyundai Kona.....	42
Figura 4.27 Comparativa de las curvas par-potencia entre un vehículo eléctrico y uno convencional	43
Figura 4.28 Toyota C-HR	43
Figura 4.29 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Toyota C-HR	45
Figura 4.30 Dinámica general de los ciclos de conducción según $v \cdot a_{pos}$ Toyota C-HR	45

Figura 4.31 Frecuencia de muestreo rpm Opel Corsa D 1.2	46
Figura 4.32 Comparativa entre rpm a frecuencia natural e interpolada a 1Hz.....	47
Figura 4.33 Sensor de flujo de aire MAF	47
Figura 4.34 Sensor de oxígeno	48
Figura 4.35 Sensor de oxígeno	49
Figura 4.36 Relación entre valores lambda y ajustes de la mezcla a corto plazo ..	49
Figura 4.37 Mapa de combustible	50
Figura 4.38 Obtención de parámetros del Hyundai Kona a través de la app Car Scanner Pro	51
Figura 4.39 Operación básica de un HEV serie-paralelo	52
Figura 4.40 Medidas vehículo	54
Figura 4.41 Curva de eficiencia frente a potencia de un motor térmico en FastSim	55
Figura 4.42 Curvas de eficiencia frente a potencia para dos motores diferentes ...	56
Figura 4.43 Obtención de la curva eficiencia-potencia a través de un mapa motor	56
Figura 4.44 Obtención de la curva eficiencia-potencia vehículo eléctrico a través de un mapa motor	57
Figura 4.45 Significado de la nomenclatura de neumáticos.....	58
Figura 4.46 Eficiencia de la regeneración en frenada frente a la velocidad.....	59
Figura 4.47 Interfaz gráfica para establecer los parámetros de entrada.....	59
Figura 5.1 Comparativa entre valores homologados y modelados Opel Corsa D 1.2	61
Figura 5.2 Validación inicial Opel Corsa D 1.2	61
Figura 5.3 Consumo medio de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2	62
Figura 5.4 Perfil de consumo Opel Corsa D 1.2.....	63
Figura 5.5 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Opel Corsa D 1.2	64
Figura 5.6 Consumo de combustible frente a gradiente ciclo Opel Corsa D 1.2	64
Figura 5.7 Potencia desarrollada durante el ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2.....	65

Figura 5.8 Mapa de eficiencia motor durante el ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2.....	65
Figura 5.9 Curva par-potencia Opel Corsa D 1.2.....	66
Figura 5.10 Perfil de régimen de giro 500-700s ciclo de conducción 1.....	66
Figura 5.11 Comparativa entre valores homologados y modelados Hyundai Kona.....	68
Figura 5.12 Validación inicial Hyundai Kona.....	68
Figura 5.13 Consumo medio de los ciclos de conducción Hyundai Kona.....	69
Figura 5.14 Perfil del estado de carga (SOC) ciclo de conducción 3.....	70
Figura 5.15 Perfil de velocidad ciclo de conducción 3 Hyundai Kona.....	70
Figura 5.16 Frenado regenerativo ajustable Hyundai Kona.....	71
Figura 5.17 Mapa de eficiencia de la frenada regenerativa ciclo de conducción 3.....	72
Figura 5.18 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Hyundai Kona.....	72
Figura 5.19 Estimación del consumo ciclo 0% gradiente medio Hyundai Kona.....	73
Figura 5.20 Consumo medio de los ciclos de conducción + estimación Hyundai Kona.....	74
Figura 5.21 Potencia desarrollada y regenerada ciclo de conducción 3 Hyundai Kona.....	75
Figura 5.22 Curva eficiencia-potencia Hyundai Kona.....	75
Figura 5.23 Mapa de eficiencia motor ciclo de conducción 3 Hyundai Kona.....	76
Figura 5.24 Desglose energético ciclos de conducción Hyundai Kona.....	77
Figura 5.25 Comparativa entre valores homologados y modelados Toyota C-HR.....	78
Figura 5.26 Validación inicial del modelo Toyota C-HR.....	79
Figura 5.27 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Toyota C-HR.....	80
Figura 5.28 Consumo medio de los ciclos de conducción Toyota C-HR.....	80
Figura 5.29 Perfil de velocidades ciclo de conducción 3 Toyota C-HR.....	81
Figura 5.30 Perfil de consumo de combustible ciclo de conducción 3 Toyota C-HR.....	82

Figura 5.31 Perfil del estado de carga medido ciclo de conducción 3 Toyota C-HR	82
Figura 5.32 Estrategia de control de máximo SOC en HEV	83
Figura 5.33 Estrategia de control de máximo SOC a través de las curvas de eficiencia	84
Figura 5.34 Estrategia de control Modo Termostato	84
Figura 5.35 Perfil de estado de la carga para diferentes valores iniciales	85
Figura 5.36 Mapas de eficiencia MClA y eléctrico ciclo de conducción 3 Toyota C-HR	86
Figura 5.37 Curvas eficiencia-potencia MClA y eléctrico ciclo de conducción 3 Toyota C-HR	86
Figura 5.38 Comparativa del consumo específico promedio medido y modelado de diferentes arquitecturas	87
Figura 8.1 Ventana para importar el modelo de vehículo deseado en FastSim	94
Figura 8.2 Renombrar y ordenar el modelo de vehículo en FastSim	95
Figura 8.3 Características del vehículo FastSim	95
Figura 8.4 Incorporación del peso en vacío en FastSim	96
Figura 8.5 Características del depósito de combustible FastSim	96
Figura 8.6 Características motor de combustión FastSim	97
Figura 8.7 Características motor eléctrico y batería FastSim	97
Figura 8.8 Características neumáticos FastSim	98
Figura 8.9 Herramienta para el cálculo del radio de la rueda en FastSim	98
Figura 8.10 Estrategia de la energía en FastSim	98
Figura 8.11 Otros componentes en FastSim	99
Figura 8.12 Simular ciclo personalizado	99
Figura 8.13 Incorporación de un ciclo personalizado a FastSim	100
Figura 8.14 Resultados en FastSim	100
Figura 8.15 Resultados de un ciclo en FastSim	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Características del ciclo NEDC	7
Tabla 2.2 Clases del ciclo WLTP.....	8
Tabla 2.3 Características del ciclo WLTP Clase 3b	9
Tabla 2.4 Comparativa entre los ciclos NEDC y WLTP	11
Tabla 2.5 Requisitos generales del trayecto RDE.....	15
Tabla 2.6 Valores máximos contaminantes para RDE.....	16
Tabla 4.1 Protocolos de comunicación de los vehículos.....	26
Tabla 4.2 Comparativa de distancias recorridas entre OBDII, GNSS100L y GPS Speed Pro	34
Tabla 4.3 Características y presentaciones Opel Corsa D 1.2	36
Tabla 4.4 Características de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2.....	36
Tabla 4.5 Características y presentaciones Hyundai Kona.....	40
Tabla 4.6 Características de los ciclos de conducción Hyundai Kona	40
Tabla 4.6 Características y presentaciones Toyota C-HR	44
Tabla 4.5 Características de los ciclos de conducción Toyota C-HR HEV	44
Tabla 5.1 Validación del modelo a través del ciclo NEDC Opel Corsa D 1.2	60
Tabla 5.2 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2.....	62
Tabla 5.3 Validación del modelo a través del ciclo WLTP Hyundai Kona.....	67
Tabla 5.4 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Hyundai Kona.....	69
Tabla 5.5 Resultados estimación del consumo ciclo 0% gradiente medio Hyundai Kona	73
Tabla 5.6 Comparativa entre consumo WLTP homologado, modelado y estimación Hyundai Kona	74
Tabla 5.7 Desglose energético de los ciclos de conducción Hyundai Kona	76
Tabla 5.8 Validación del modelo a través del ciclo NEDC Toyota C-HR	78
Tabla 5.9 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Toyota C- HR.....	79
Tabla 5.10 Consumos específicos promedio medidos y modelados	87
Tabla 8.1 Energía por unidad de volumen según combustible	96



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

TRABAJO FIN DE GRADO

DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE MODELOS DE VEHÍCULOS PARA EL ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS PROPULSIVOS APLICADOS AL TRANSPORTE LIGERO POR CARRETERA

ÍNDICE MEMORIA

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: César Pérez Domínguez

Tutor: Óscar García Afonso

San Cristóbal de La Laguna, junio de 2022

ÍNDICE MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Resumen.....	1
1.2	Abstract	1
1.3	Antecedentes	2
1.4	Objetivos	5
2	CICLOS DE HOMOLOGACIÓN	6
2.1	Introducción a los ciclos de homologación	6
2.2	Ciclo NEDC	6
2.3	Ciclo WLTP	7
2.4	Comparativa entre los ciclos NEDC y WLTP	10
2.5	Prueba de carga en carretera	12
2.6	Ciclo RDE	13
2.7	Requisitos del ciclo RDE.....	14
2.7.1	Requisitos generales	14
2.7.2	Condiciones ambientales.....	16
2.7.3	Condiciones dinámicas	16
2.8	Ciclo FTP-75	19
3	TIPOS DE VEHÍCULOS	21
3.1	Vehículos convencionales	21
3.2	Vehículos híbridos	21
3.2.1	Microhíbridos	21
3.2.2	Híbridos suaves (MHEV)	22
3.2.3	Híbrido no enchufable (HEV)	22
3.2.4	Híbrido enchufable (PHEV).....	23
3.3	Vehículos eléctricos	23
3.3.1	Vehículos eléctricos de batería (BEV)	24
3.3.2	Vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV)	24
4	METODOLOGÍA	25
4.1	Instrumentación y softwares correspondientes	25
4.1.1	Dispositivo ELM 327	25
4.1.2	ScanMaster-ELM	26
4.1.3	Car Scanner Pro	28
4.1.4	Módulo receptor GNSS100L.....	29

4.1.5	U-Center	29
4.1.6	GPS Speed Pro	30
4.1.7	GPX Scan	31
4.2	Realización de los ensayos	31
4.3	Descripción de los ciclos realizados	35
4.3.1	Opel Corsa D 1.2	35
4.3.2	Ciclos de conducción Hyundai Kona	39
4.3.3	Ciclos de conducción Toyota C-HR	43
4.4	Datos obtenidos a través del puerto OBDII y procesado.....	46
4.4.1	Opel Corsa D 1.2	47
4.4.2	Hyundai Kona	51
4.4.3	Toyota C-HR	52
4.5	FastSim	53
4.5.1	Parámetros de entrada	53
5	RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN	60
5.1	Opel Corsa D 1.2	60
5.2	Hundai Kona	67
5.3	Toyota C-HR	78
5.4	Comparativa entre arquitecturas.....	87
6	CONCLUSIONES	89
7	BIBLIOGRAFÍA	91
7.1	Referencias.....	91
7.2	Artículos	92
8	ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN FASTSIM	1

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

El presente Trabajo Fin de Grado aborda el desarrollo y la validación de modelos de diferentes tecnologías propulsivas aplicadas al transporte ligero por carretera, con la intención de obtener una herramienta que sea capaz de realizar un análisis energético detallado y fiable sobre cualquier ruta de conducción real, y más concretamente en la Isla de Tenerife. Por consiguiente, el estudio permite extraer resultados que reducen la brecha existente entre los consumos medios homologados y reales.

Para ello, el análisis cuenta con la recopilación de numerosos ciclos de conducción cotidianos, llevados a cabo en la zona norte y metropolitana de la isla por diferentes habitantes, buscando englobar el mayor espectro de rutas y perfiles de conducción posible.

A través del empleo de un GPS de alta precisión y un sistema universal de diagnóstico a bordo, se desarrolla una metodología capaz de monitorizar las características principales de la ruta, así como el consumo energético real de cada vehículo. Esto permite lograr un modelo validado y fiel mediante el software FastSim, con la capacidad de reproducir la realidad dentro de un margen de error esperado.

1.2 Abstract

The present Final Degree Project tackles the development and validation of different propulsive system technologies for light road transport models, with the aim of obtaining a tool capable of predicting a detailed and reliable energy analysis on any real driving route, and more specifically on the Island of Tenerife. Therefore, the study allows obtaining results that reduce the existing gap between certified and actual average consumption.

For that purpose, the analysis includes the compilation of numerous daily driving cycles, carried out in the northern and metropolitan area of the island by different inhabitants, in order to encompass the widest possible spectrum of routes and driving profiles.

Through the use of a high-precision GPS and a universal on-board diagnostic system, the Project develop a methodology capable of monitoring the main characteristics of the route, as well as the real energy consumption of the vehicle. This allows to have a validated and faithful model through FastSim software, with the ability to reproduce reality within an acceptable margin of error.

1.3 Antecedentes

Actualmente, los vehículos de transporte ligero por carretera desempeñan un papel extremadamente importante, no solo en la economía mundial, sino también en el desarrollo de las sociedades e incluso en el diseño de las ciudades. Se trata de una herramienta imprescindible en el día a día y que se ha convertido prácticamente en una necesidad social.

Por ello, la flota de nuevos vehículos vendidos en el mundo ha crecido exponencialmente en la última década, a excepción de los dos últimos años debido a la crisis económica producida por la pandemia.

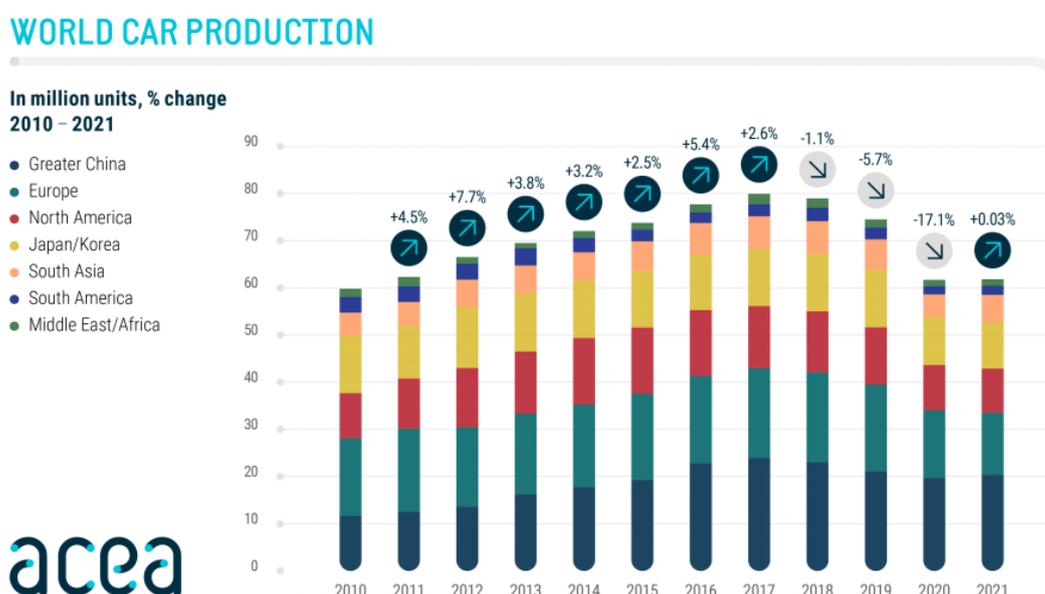


Figura 1.1 Producción anual de vehículos de transporte ligero por carretera

Fuente: www.acea.auto

Así mismo, entre los diferentes tipos de sistemas propulsivos que se encuentran en el mercado, los vehículos convencionales de combustión interna alternativos (MCIA) son la tecnología más extendida, significando el 59,6% (diésel y gasolina) de la totalidad de vehículos comercializados en el mundo en el pasado año 2021, seguido de los vehículos híbridos no enchufables (HEV) con un 19,6% y de los eléctricos de batería (BEV) con un total de ventas del 9,1% [1].

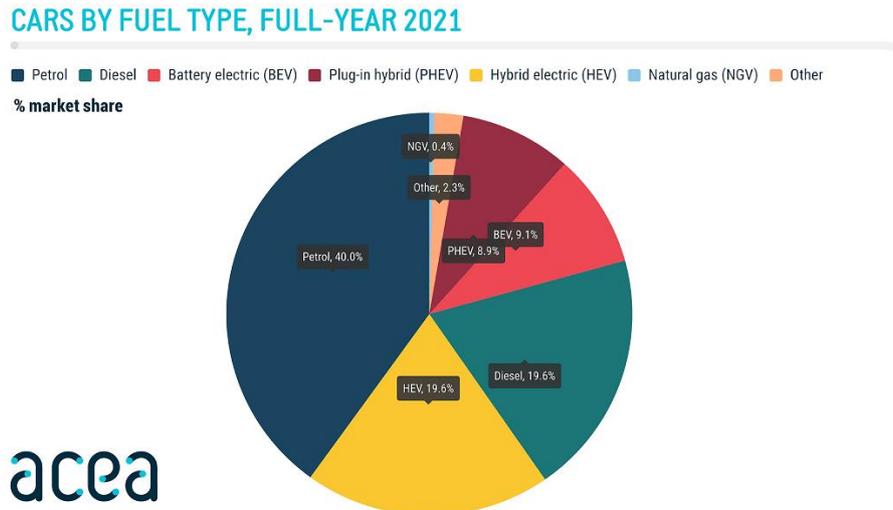


Figura 1.2 Distribución global de ventas según tipo de arquitectura en 2021

Fuente: www.aceea.auto

Con el objetivo de reducir el impacto medioambiental que produce el uso de los sistemas propulsivos convencionales, en Europa desde 1992 con la entrada en vigor de la normativa Euro 1 hasta la actualidad, se ha evolucionado bastante en lo que a limitaciones de emisiones contaminantes y consumo de combustible respecta. Ello se debe a una serie de políticas y medidas, como el establecimiento de estándares tecnológicos para las emisiones de los vehículos y la calidad de los combustibles o la legislación sobre los límites para la calidad del aire entre muchas otras.

Por su parte, la conformidad y validación del vehículo con los límites marcados por esta normativa se comprueba a través de procedimientos estandarizados, es decir, los ciclos de homologación.

Actualmente, en la Unión Europea solo pueden comercializarse vehículos Euro 6 [2] y más concretamente, aquellos en fase 6d (Reglamentos (CE) 715/2007 y 1347/2017 respectivamente) que hayan sido homologados tras el cumplimiento del ciclo WLTP y su complementario RDE [3].

Con todo ello, se ha conseguido una reducción importante tanto en emisiones como en consumos a lo largo de los años, pero también ha supuesto grandes desafíos a los fabricantes para implementar y diseñar nuevas tecnologías y/o sistemas que cumplan la normativa (filtro de partículas, recirculación de gases de escape, sistema AdBlue...).

Consecuencia de ello, el porcentaje de vehículos convencionales comercializados a lo largo del tiempo ha ido disminuyendo, optándose cada vez más por nuevas tecnologías, tal y como se observa en la siguiente imagen.

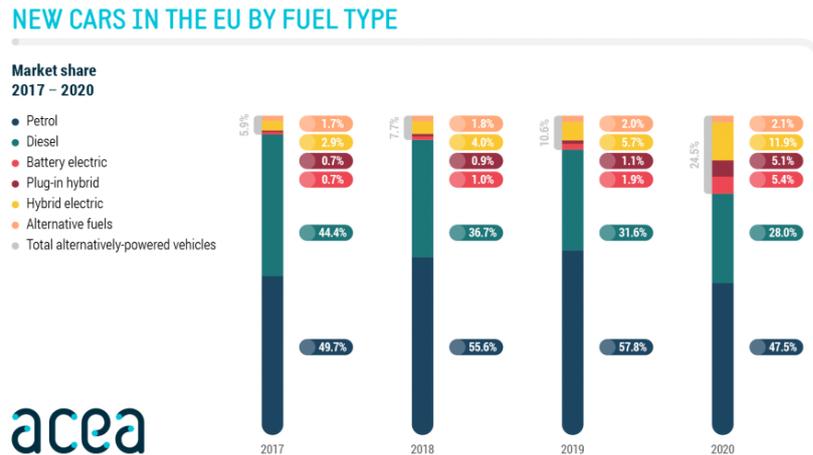


Figura 1.3 Evolución temporal de ventas de vehículos en Europa según tipo de arquitectura

Fuente: www.acea.auto

A pesar de lograr dicha disminución, es sabido por todos los conductores la dificultad de conseguir valores de consumo, y por tanto de emisiones CO₂, cercanos a los homologados por el fabricante en las conducciones cotidianas por carreteras que requieran de una mayor dinamicidad.

Más concretamente, el informe realizado por T&E (Transport & Environment) a través de datos de emisiones recogidos por el International Council on Clean Transportation (ICCT), revela una diferencia situada en un 9% en el año 2000, aumentando al 17% en 2008 y a un 42% en 2017 [4], haciéndose visible que el ciclo de homologación vigente durante esos años ya no era representativo (NEDC).

La siguiente imagen muestra claramente la tendencia decreciente de emisiones de los vehículos, así como el aumento de la diferencia entre los valores reales y homologados a través del ciclo NEDC.

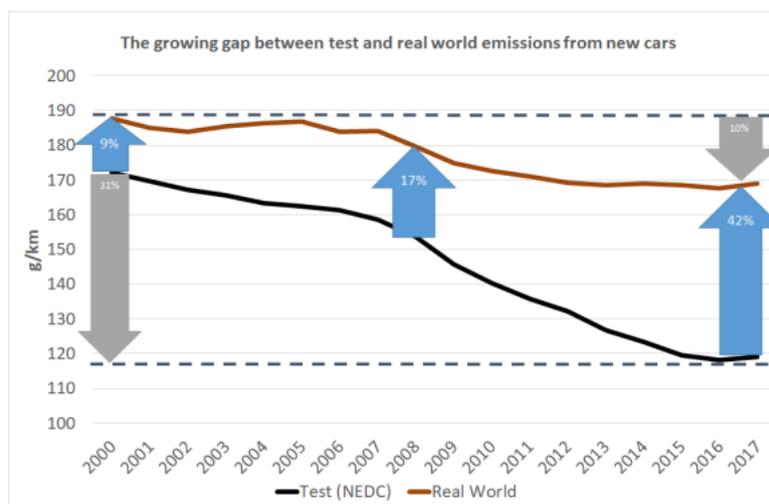


Figura 1.4 Diferencia entre emisiones CO₂ reales y homologadas a través del ciclo NEDC

Fuente: <https://www.transportenvironment.org>

A partir del año 2017, con la entrada en vigor del ciclo WLTP, estas diferencias se volvieron a situar en torno al 10-15% [5], mientras que, definitivamente en 2019, con la aprobación del ciclo complementario de conducción real RDE, las emisiones de CO₂, y por tanto consumos, reales y homologados se aproximaron más, tal y como se observa en la imagen.

No obstante, esta diferencia está incrementándose nuevamente, siendo este el motivo por el que se desarrolla el presente Trabajo Fin de Grado.

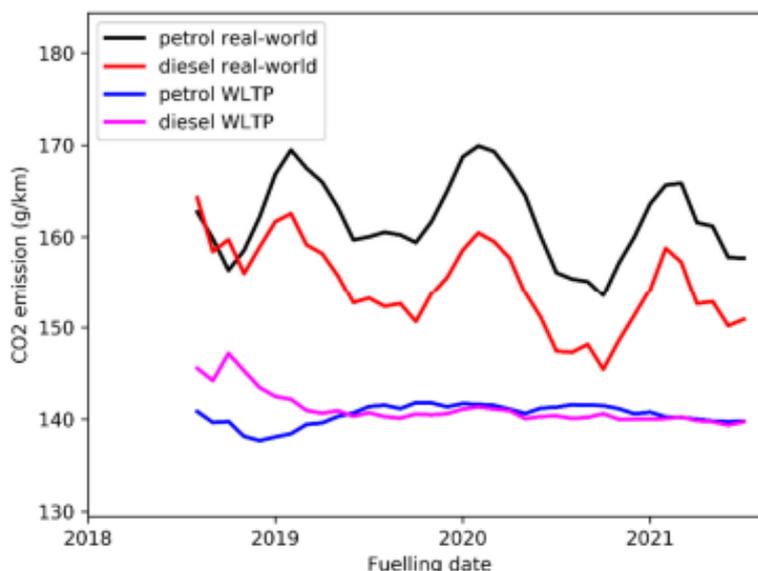


Figura 1.5 Diferencia entre emisiones CO₂ reales y homologadas a través del ciclo WLTP

Fuente: <https://www.tno.nl>

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo Fin de Grado es obtener modelos de vehículos validados mediante datos experimentales, con la finalidad de lograr una herramienta capaz de estimar un análisis energético fiable de cualquier ruta de conducción real.

Para ello, se comparan los consumos calculados a partir de datos reales medidos y los valores proporcionados por el modelo creado a través de la herramienta de simulación FastSim, pudiendo ajustar el mismo hasta lograr resultados situados dentro de una horquilla de error prevista.

2 CICLOS DE HOMOLOGACIÓN

2.1 Introducción a los ciclos de homologación

Los ciclos de conducción representan un conjunto de puntos de velocidad con respecto al tiempo y en los que se evalúan características geográficas, así como las particularidades en la forma de conducción de cada persona e incluso el clima y obviamente, el tipo de vehículo empleado.

Por tanto, el análisis de estos ciclos permite conocer el rendimiento del vehículo, estimar el consumo energético y las emisiones contaminantes entre otras cosas. Es por ello que son utilizados por organismos oficiales para poder certificar y homologar nuevos modelos de vehículos para su posterior salida al mercado.

Actualmente, cada región aplica su propio ciclo de homologación. En el caso de Europa, dicho ciclo es el WLTP, el cuál entró en vigor en el año 2017 sustituyendo a su vez al ciclo NEDC. Sin embargo, en Estados Unidos, la EPA (Environmental Protection Agency o Agencia de Protección del Medio Ambiente) es el organismo encargado de establecer los estándares de consumos de combustible y emisiones de gases contaminantes a través del ciclo FTP-75.

2.2 Ciclo NEDC

El New European Driving Cycle (Nuevo Ciclo Europeo de Conducción) fue el ciclo de homologación exigido en Europa desde 1992 hasta el 2017, a través del cual se evaluaba el impacto medioambiental de los vehículos y se permitía homologar consumos y emisiones de CO₂.

La homologación bajo dicho ciclo se lleva a cabo en un laboratorio sobre un banco de rodillos y bajo unas condiciones determinadas. A su vez, este se divide en dos partes: cuatro ciclos de conducción ECE-15 y posteriormente uno extra urbano (EUDC).

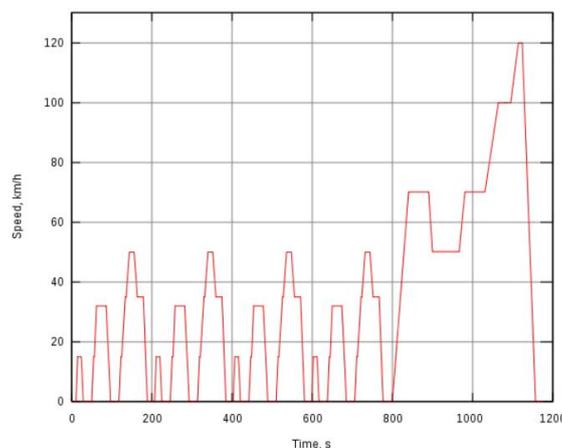


Figura 2.1 Perfil de velocidades ciclo NEDC

Fuente: <https://nergiza.com>

Por un lado, los ciclos de conducción ECE-15 simulan una conducción urbana o UDC (Urban Driving Cycle) en hora punta con atascos y con el motor frío (no ha sido encendido durante toda la noche), mientras que la prueba de conducción extraurbana o EUDC (Extra Urban Driving Cycle) trata de reproducir una conducción en carretera cuya velocidad máxima son los 120 km/h [6].

Observando el perfil de velocidades se puede distinguir claramente los primeros cuatro ciclos urbanos y a continuación la conducción extraurbana.

Igualmente, de manera tabulada se observan las características de cada una de las fases, caracterizadas por distancias recorridas, tiempo de duración, así como paradas, velocidades y aceleraciones máximas.

Tabla 2.1 Características del ciclo NEDC

Fase	Distancia recorrida (km)	Duración (s)	Tiempo de parada (s)	% de parada	Velocidad máxima (km/h)	Velocidad media (km/h)	Aceleración máxima (m/s ²)
Ciclos EC-15 UDC	0,9441 c/u	195 c/u	57 c/u	29,23	50	18,35	0,599
Ciclo EUDC	6,95	400	39	9,75	120	62,59	0,833
TOTAL	10,93	1180	267	22,63			

Fuente: Elaboración propia

La crítica principal de este ciclo, y el motivo por el que fue sustituido, es la incapacidad para representar una prueba en condiciones reales y adaptarse a estilos de conducción más agresivos. Esto se debe a que la mayor parte de la estructura del ciclo reproduce un patrón de aceleraciones suaves, velocidades constantes (velocidad media estimada de 33,6 km/h) y muchas fases a ralentí, tal y como se observa en el perfil de velocidades mostrado anteriormente.

2.3 Ciclo WLTP

El WLTP (New Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) es un método de ensayo armonizado a nivel internacional e implantado en 2017 como procedimiento europeo de homologación de vehículos a través del Reglamento Europeo 2017/1151.

Este nuevo procedimiento de homologación centra sus esfuerzos en garantizar una mejor representatividad de las condiciones de uso real de los vehículos, con el

objetivo de cubrir todo el espectro de arquitecturas, además de reducir la diferencia entre los ensayos de laboratorio y la conducción real cotidiana.

Para ello, se definen condiciones de ensayo mucho más estrictas y un perfil de conducción más dinámico que el NEDC, basado en datos y hábitos reales con diferentes etapas de paradas, aceleración, frenadas...

Los procedimientos WLTP están compuestos por varios ciclos de prueba WLTC (World harmonized Light vehicles Test Cycles) aplicables a diferentes categorías de vehículos en función de su relación potencia-masa (PMR), parámetro definido como la razón entre la potencia nominal del vehículo (W) y la masa en orden de marcha (kg), la cual incluye al conductor con un peso estimado de 75 kg y los sistemas que contienen líquidos (excepto los destinados al agua usada, que deben permanecer vacíos) llenos al 90 % de la capacidad especificada por el fabricante [7].

$$PMR = \frac{\text{Potencia nominal del vehículo (W)}}{\text{Masa en orden de marcha (kg)}} \quad (2.1)$$

Asimismo, la definición del ciclo también puede variar en función de la velocidad máxima del vehículo, declarada por el fabricante y no por restricciones o limitaciones en materia de seguridad vial.

Tabla 2.2 Clases del ciclo WLTP

Categoría	PMR (W/kg)	Velocidad máxima (km/h)
Clase 3b	>34	≥ 120
Clase 3a		<120
Clase 2	$34 \geq PMR > 34$	-
Clase 1	$PMR \leq 22$	-

Fuente: Elaboración propia

El ciclo de prueba más representativo en Europa es el de Clase 3 (alta relación potencia-masa), y más concretamente el WLTC Clase 3b, debido a los valores de velocidad máxima que pueden alcanzar los vehículos comercializados actualmente.

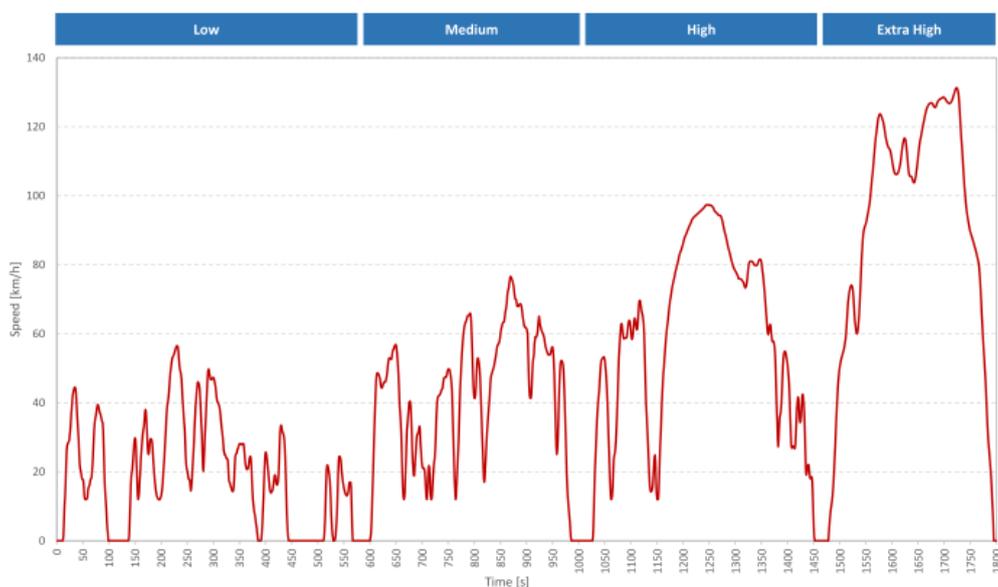
Este ciclo de conducción está compuesto por cuatro fases bien diferenciadas, englobando en un mismo procedimiento la conducción urbana, interurbana, y por autopista, cada una de ellas caracterizadas por un perfil de velocidades, tiempos de parada, aceleraciones y distancias recorridas, todo ello resumido a continuación en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Características del ciclo WLTP Clase 3b

Fase	Duración (s)	Tiempo de parada (s)	Distancia recorrida (m)	% de parada	Velocidad máxima (km/h)	Aceleración máxima (m/s ²)	Aceleración mínima (m/s ²)
Velocidad baja	589	156	3095	26,5	56,5	1,47	-1,47
Velocidad media	433	48	4756	11,1	76,6	1,57	-1,49
Velocidad alta	455	31	7162	6,8	97,4	1,58	-1,49
Velocidad extra alta	323	7	8254	2,2	131,3	1,03	-1,21
TOTAL	1800	242	23266				

Fuente: Elaboración propia

Graficando el perfil de velocidades del ciclo se obtiene la siguiente representación, en la que se puede observar las distintas fases, así como los tiempos de parada, siendo estos de menor frecuencia para zonas de velocidades altas en comparación a fases de velocidad moderada media-baja, lo que viene a reproducir el posible comportamiento en distintas carreteras (urbana, interurbana y autopista).

**Figura 2.2** Perfil de velocidades ciclo WLTP Clase 3b

Fuente: <https://www.hibridosyelectricos.com>

En el caso de los ensayos del ciclo de homologación WLTP para coches híbridos enchufables (PHEV), estos se centran principalmente en valores de autonomía, teniendo un protocolo de medición diferente en comparación con el de los coches de combustión convencionales (esto no ocurría así con el NEDC).

El procedimiento comienza con la batería cargada al máximo y sometiendo al vehículo a pruebas sucesivas hasta agotar por completo la batería (Charge-Depleting). De esta manera, el motor de combustión tiene que aportar cada vez más debido a la descarga progresiva de la batería.

Una vez la batería se agota, se efectúa un nuevo test, contando solo con el motor térmico y las frenadas regenerativas (Charge-Sustaining).

De esta manera, se puede determinar de forma lo más precisa posible el consumo energético tanto eléctrico como de combustible, lo que permite conocer la autonomía y las emisiones contaminantes del vehículo.

Esto se puede entender claramente en el gráfico mostrado a continuación, en el que se representa el porcentaje de carga de la batería, o más conocido como State of Charge (SOC) frente al tiempo, pudiendo diferenciar el ensayo Charge-Depleting (denotado como CD) y el posterior Charge-Sustaining (CS), en el que principalmente se encuentra operando el motor térmico y la recarga de la batería solamente se produce en momentos de frenada.

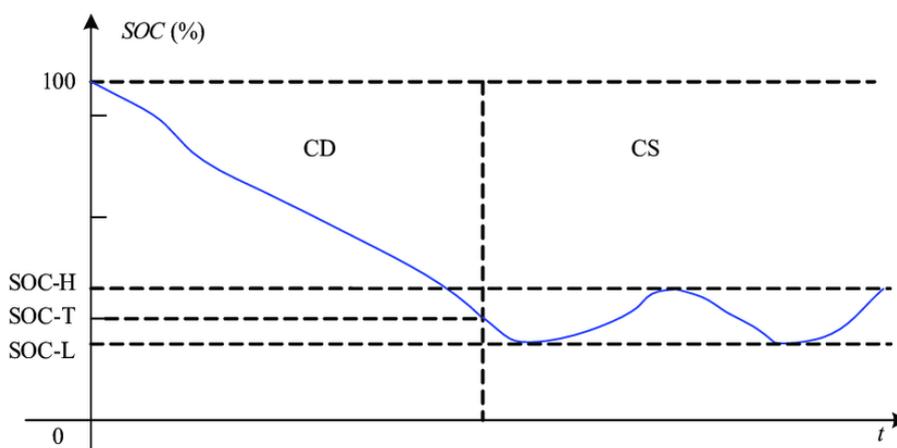


Figura 2.3 Protocolo de medición WLTP para híbridos enchufables

Fuente: <https://www.researchgate.net>

2.4 Comparativa entre los ciclos NEDC y WLTP

Como se ha podido comprobar, tanto el ciclo NEDC como el WLTP comparten el mismo objetivo: la medición de emisiones contaminantes reguladas y del consumo de combustible. No obstante, el WLTP ha supuesto una transición importante, redefiniendo por completo el ciclo, con unas condiciones más estrictas y una conducción que se acerca más a la realidad.

A continuación, en la Tabla 2.4 se presentan las principales diferencias entre ambos ciclos de homologación.

Tabla 2.4 Comparativa entre los ciclos NEDC y WLTP

	NEDC	WLTP
Distancia recorrida (km)	10,93	23,3
Duración (s)	1180	1800
Número de paradas	9	14
Tiempo de parada (%)	24	12,5
Velocidad media (km/h)	33,6	46,5
Velocidad máxima (km/h)	120	131
Fases de conducción	2 fases	4 fases más dinámicas

Fuente: Elaboración propia

Las diferencias más notables que se pueden distinguir entre el ciclo WLTP y el NEDC es el aumento de la velocidad media y máxima, así como del número de paradas efectuadas, pero no el tiempo total de estas. Asimismo, se trata de un ciclo con más del doble de recorrido, lo cual se puede observar claramente en la Figura 2.4.

De esta manera, el WLTP se convierte en un ciclo mucho más representativo y ajustado a estilos de conducción cotidianos, con lo que se solucionan los problemas del ciclo NEDC a la hora de conseguir consumos y emisiones fidedignos.

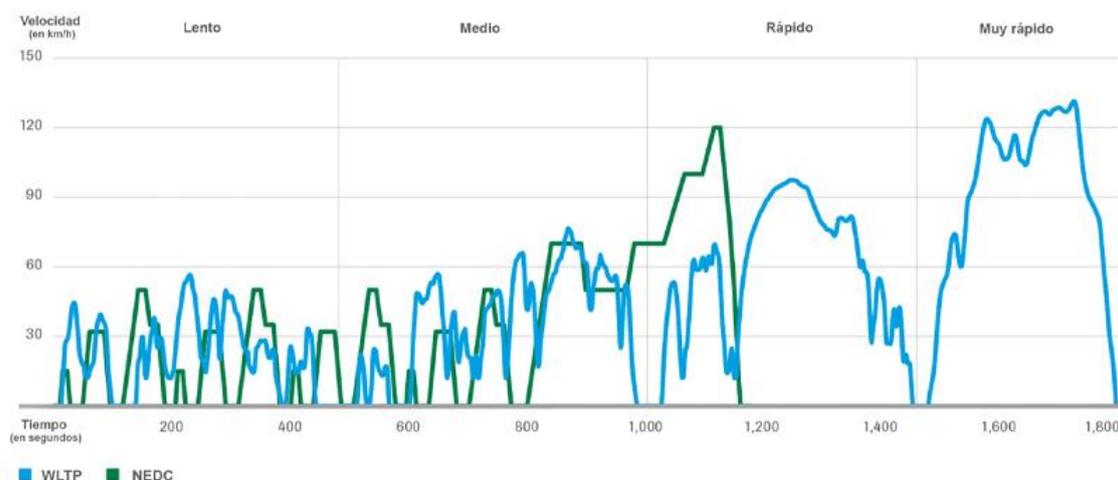


Figura 2.4 Comparativa del perfil de velocidades entre NEDC y WLTP

Fuente: <https://www.researchgate.net>

2.5 Prueba de carga en carretera

Además de los protocolos de ensayo en laboratorio, previamente, tanto el ciclo WLTP, como el NEDC en el pasado, también llevan a cabo una prueba de carga en carretera, con el objetivo de conocer la cantidad de energía necesaria para mantener el vehículo a una determinada velocidad y posteriormente ajustar el dinamómetro de chasis.

Más concretamente, entre la gran variedad de métodos existentes, el más comúnmente usado, es el conocido como coastdown o de desaceleración libre.

Este consiste en llevar un vehículo a una velocidad de 100 km/h, manteniéndolo unos segundos, y luego acelerando 5 km/h más, momento en el que se deja en punto muerto y se calcula el tiempo en los que la velocidad desciende hasta detenerse por completo [8]. De esta manera, se puede obtener un gráfico de velocidad frente al tiempo como el mostrado a continuación.

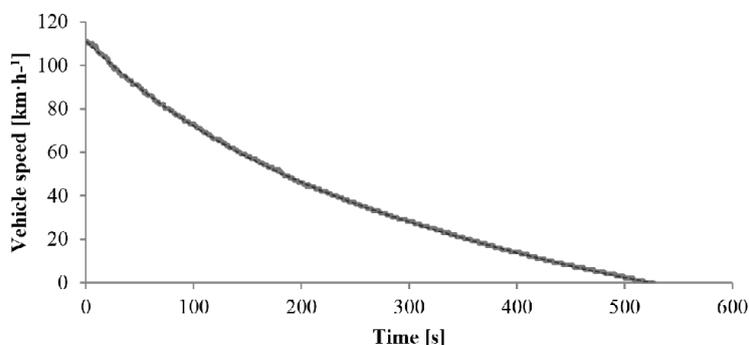


Figura 2.5 Curva de desaceleración libre

Fuente: <https://www.semanticscholar.org>

Con los valores obtenidos y siguiendo lo expuesto en la norma ISO-10521-1, se puede conocer la fuerza de resistencia como:

$$F = (m + m_r) \cdot \frac{\Delta v}{3,6 \cdot \Delta t} \quad (2.2)$$

Donde:

$m \equiv$ masa del vehículo sumando el peso del conductor (kg)

$m_r \equiv$ masa efectiva (kg). Se estima como el 3% de la masa del vehículo sin carga

$\Delta v \equiv$ variación de velocidad

$\Delta t \equiv$ variación de tiempo

Representando la fuerza respecto a la velocidad se obtiene una curva, a la que, aplicándole un ajuste de regresión cuadrática, se extrae una expresión del tipo:

$$f(x) = Csx^2 + Bsx + As \quad (2.3)$$

Donde A_s , B_s y C_s son los coeficientes de carretera que, junto a datos como el coeficiente de inercia, el coeficiente de arrastre y el coeficiente de rodadura, son los parámetros necesarios para configurar el dinamómetro de chasis.

En la siguiente imagen se observan tres diferentes pruebas de carga en carretera realizada a diversos vehículos, obteniendo la gráfica de fuerza de resistencia frente a velocidad para cada uno de ellos. De la misma manera, se muestra la función cuadrática dada por el ajuste, lo que indicará los coeficientes de carretera.

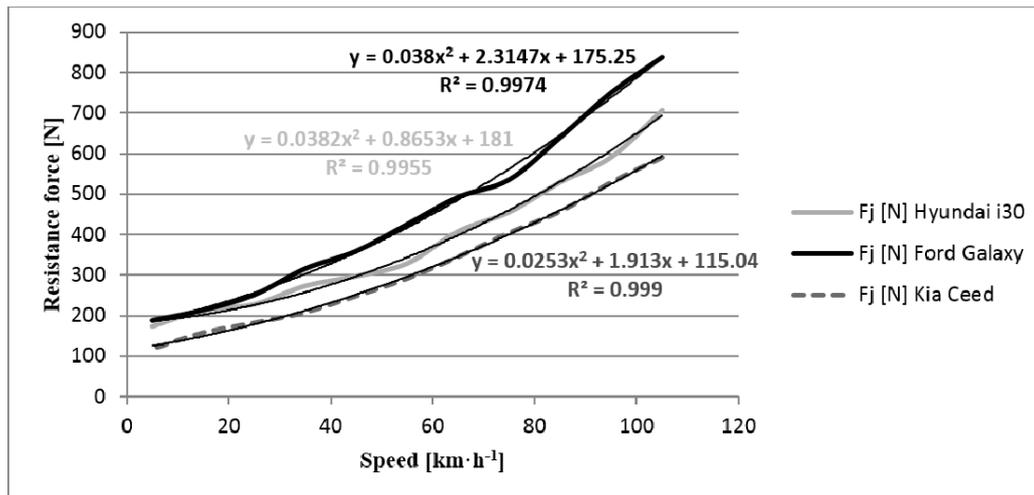


Figura 2.6 Obtención de los coeficientes de carretera

Fuente: <https://www.semanticscholar.org>

2.6 Ciclo RDE

En 2019, siguiendo el Reglamento Europeo 2016/427, se implantó en Europa la homologación a través del ciclo RDE (Real Driving Emissions), un ensayo de emisiones en condiciones reales de conducción por carretera. Este nuevo procedimiento no sustituye al WLTP, sino que complementa los valores tomados en laboratorio.

Durante dicho ciclo, el vehículo se conduce por carretera, bajo una infinidad de condiciones distintas como pueden ser diferentes altitudes, temperaturas, tráfico, diversas situaciones de carga o entornos entre otras.

Para ello, el vehículo que se desea homologar debe estar equipado con un sistema de emisiones portátil conocido como PEMS (Portable Emissions Measurement System), encargado de proporcionar un control exhaustivo en tiempo real de los principales contaminantes emitidos por el vehículo, en unidades de gramo por kilómetro siguiendo la expresión (2.4), como son el caso del CO, CO₂, NO, NO₂, HCs, los cuales no podrán ser superiores en ningún caso a los valores máximos establecidos por la normativa actual (Euro 6d).

$$Emisiones \left(\frac{g}{km} \right) = \frac{Concentración (\%) \cdot Volumen (m^3) \cdot Densidad \left(\frac{g}{m^3} \right)}{Distancia total recorrida (km)} \quad (2.4)$$

Para poder recibir del PEMS todos los datos de interés, este debe contar con los siguientes elementos en su interior:

- Sensores infrarrojos para la medición de CO y CO₂
- Detector de quimioluminiscencia para la medición de NO_x
- Fotometría de dispersión con luz láser para la medición de partículas
- Caudalímetro
- Sensores de temperatura y presión para gases de escape
- Estación meteorológica (presión, temperatura, humedad relativa...)
- Sistema GPS para determinar la velocidad, altura y posición
- Software de post procesados de datos



Figura 2.7 Equipo PEMS

Fuente: <https://www.dti.dk>

2.7 Requisitos del ciclo RDE

Obviamente, al ser un ciclo llevado a cabo en carretera abierta, nunca será 100% reproducible, pues existen una infinidad de parámetros que pueden alterar los resultados. No obstante, para lograr la mayor representatividad posible, el ciclo sigue una serie de directrices y características que están recogidas en el Reglamento (UE) 2016/646 de la Comisión del 20 de abril de 2016 y que son comentadas a continuación.

2.7.1 Requisitos generales

Del mismo modo que para los ciclos descritos anteriormente, el RDE se desarrolla en varias fases, cada una de ellas caracterizadas por un perfil de velocidades, pero esta vez, condicionadas de alguna manera por las circunstancias presentes en la carretera.

Tabla 2.5 Requisitos generales del trayecto RDE

Fase	Velocidad (km/h)	Distancia mínima (km)	% distancia recorrida	Velocidad media (km/h)	Tiempo de parada (s)
Urbana	0-60	16	29-44	15-30	≤ 300
Interurbana	60-90	16	23-43	60-90	-
Autopista	90-145	16	23-43	>90 (>100 durante al menos 5 min)	-

Fuente: Elaboración propia

Este consta de 3 fases: urbana, interurbana y autopista con una distancia mínima recorrida en cada una de ellas de 16 kilómetros y significando un 34%, 33% y 33% de la distancia total recorrida respectivamente. Además, se admite una tolerancia sobre ese porcentaje de $\pm 10\%$, excepto en la zona urbana que debe representar al menos el 29%.

La velocidad media en zonas urbanas deberá situarse entre 15-30 km/h, en carretera interurbana entre 60-90 km/h, mientras que en autopista esta debe ser superior a 90 km/h y manteniéndose por encima de los 100 km/h durante al menos 5 minutos.

Por último, el trayecto está caracterizado por no suponer una diferencia de altitud mayor a los 100 metros entre el punto de partida y de llegada, además de tener una duración total de entre 90 y 120 minutos.

Por otro lado, debido a la dificultad de cumplir con los límites de emisiones contaminantes establecidos en la normativa actual Euro 6d en condiciones reales de conducción, se establece un factor de conformidad para cada contaminante, parámetro que tiene en cuenta las incertidumbres de la medición, además de las introducidas por el equipo PEMS (sujetas a reexamen periódico y que se revisarán a raíz de la mejora o del progreso técnico del equipo). Siendo así, la ecuación por la que se rigen los límites es:

$$NTE_{pollutant} = FC_{pollutant} \cdot Euro\ 6d \quad (2.5)$$

Donde Euro 6d representa el límite de emisiones para cada contaminante según la normativa y FC el factor de conformidad correspondiente. De esta manera, aplicando la ecuación (2.5), la emisión de cada contaminante no podrá superar los valores NTE (Not To Exceed) calculados en la Tabla 2.6.

Tabla 2.6 Valores máximos contaminantes para RDE

Contaminante	FC	Límite Euro 6 (g/km)	NTE (g/km)
CO	2,1	0,5	1,05
HC	2,1	0,09	0,189
NOx	2,1	0,08	0,168
HC+NOx	2,1	0,17	0,357
PM	2,1	0,005	0,0105

Fuente: Elaboración propia

Las propuestas actuales para la futura normativa Euro 7 (planteada para 2025) incluyen factores de conformidad mucho más estrictos que solo tendrán en cuenta las incertidumbres reales de las mediciones y no del propio equipo debido a su evolución tecnológica.

2.7.2 Condiciones ambientales

El ciclo RDE también debe cumplir con unas condiciones ambientales preestablecidas en cuanto a altitud y temperatura, las cuales se describen a continuación:

- Condiciones de altitud moderada: inferior o igual a 700 metros sobre el nivel del mar.
- Condiciones de altitud ampliadas: superior a 700 pero inferior o igual a 1300 metros sobre el nivel del mar.
- Condiciones de temperatura moderadas: superior o igual a 0°C e inferior o igual a 30°C.
- Condiciones de temperatura ampliadas: superior o igual a -7°C e inferior a 0°C o superior a 30°C e inferior a 35°C.

2.7.3 Condiciones dinámicas

Tienen en cuenta el efecto del gradiente de carretera, el tráfico, así como el viento frontal y la dinámica de conducción (aceleraciones y desaceleraciones). La verificación de este aspecto se lleva a cabo en 2 fases:

- 1 **Comprobación del exceso o de la insuficiencia de la dinámica general del trayecto.**

Los parámetros que se emplean con el fin de determinar el exceso o la ausencia generales de dinámica durante la conducción en zona urbana, en zona rural y en autopista son los siguientes:

- “ $v \cdot a_{pos}$ ” (velocity times positive acceleration): producto de la velocidad (en m/s) y aceleraciones positivas superiores a 0,1 (en m/s²)
- RPA (Relative Positive Acceleration): es la aceleración positiva relativa por intervalo de velocidad en m/s² calculada como:

$$RPA_k = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta t \cdot v_i \cdot a_{pos\ i})}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (2.6)$$

Donde:

$\Delta t \equiv$ diferencia de tiempo en segundos correspondiente a una frecuencia de muestreo de 1 Hz.

$v_i \equiv$ velocidad en m/s.

$a_{pos\ i} \equiv$ aceleración positiva en m/s².

$d_i \equiv$ distancia recorrida en metros.

Con estos dos parámetros se podrá conocer la validez de cada una de las fases del ciclo sabiendo las condiciones de contorno impuestas por el reglamento, por encima de las cuales el ciclo será muy agresivo, mientras que si se encuentran por debajo será muy pasivo.

- Para el producto velocidad-aceleración positiva: usado comúnmente como indicador de exceso de dinámica en el ciclo.

$$\text{Límite 1} \begin{cases} \bar{v}_k \leq 74,6 \text{ km/h} \\ (v \cdot a_{pos})_k > (0,136 \cdot \bar{v}_k + 14,44) \end{cases} \quad (2.7)$$

$$\text{Límite 2} \begin{cases} \bar{v}_k > 74,6 \text{ km/h} \\ (v \cdot a_{pos})_k > (0,0742 \cdot \bar{v}_k + 18,966) \end{cases} \quad (2.8)$$

- De manera análoga, para la aceleración positiva relativa (RPA): indica la deficiencia de dinámica.

$$\text{Límite 1} \begin{cases} \bar{v}_k \leq 94,05 \text{ km/h} \\ RPA_k < (-0,0016 \cdot \bar{v}_k + 0,1755) \end{cases} \quad (2.9)$$

$$\text{Límite 2} \begin{cases} \bar{v}_k > 94,05 \text{ km/h} \\ RPA_k < 0,025 \end{cases} \quad (2.10)$$

Donde el subíndice “k” representa cada una de las tres fases que componen el ciclo

Gráficamente, se puede observar el caso de un ciclo en el que se han representado para cada una de las tres fases, las posibles dinámicas de las misma y cómo difiere cada una de ellas con respecto a las condiciones de borde de un trayecto válido.

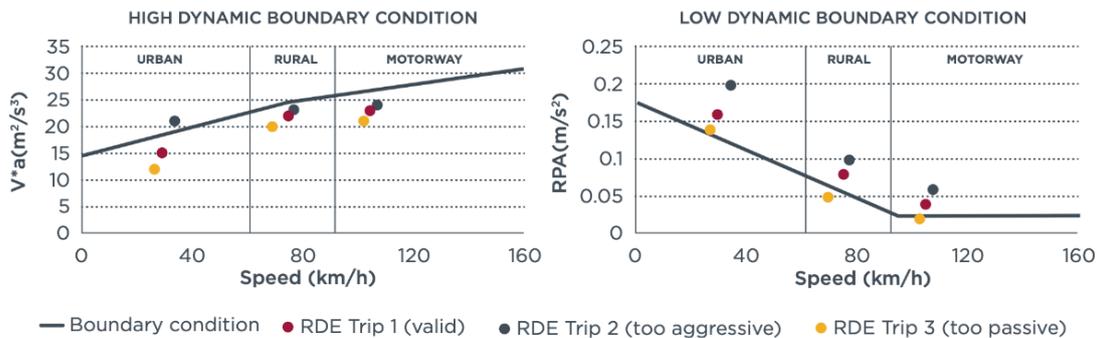


Figura 2.8 Condiciones para determinar la dinámica del ciclo

Fuente: <https://www.transportpolicy.net>

2 Verificación de la normalidad de las condiciones dinámicas

En caso de que el ciclo resulte válido según lo impuesto en el anterior apartado, el siguiente paso es la verificación de las condiciones dinámicas, para lo que se pueden emplear dos métodos explicados en el Reglamento (UE) 2016/427 de la Comisión del 10 de marzo de 2016: el método de ventana de promediado móvil o el método de intervalos de potencia.

Ambos métodos tienen el mismo objetivo, evaluar las emisiones de CO₂, y se pueden utilizar indistintamente, mientras que el método 1 es mucho más directo y rápido de ejecutar.

Este primer método es un tratamiento estadístico que permite conocer qué secciones del perfil de velocidades del ciclo (ventanas), son las adecuadas para ofrecer una visión general de las emisiones contaminantes en condiciones reales y evaluar el rendimiento del vehículo.

Esto se consigue comparando los puntos característicos de CO₂ del vehículo, con una curva de referencia. De esta manera, el trayecto será válido si cumple una serie de requisitos expresados en forma de tolerancias en torno a la curva de referencia, establecidas como:

- Banda de tolerancia 1: $\pm 25\%$
- Banda de tolerancia 2: $\pm 50\%$

Por tanto, el ensayo será válido cuando al menos el 50% de las ventanas en zona urbana, rural y autopista, se encuentren dentro de la banda de tolerancia primaria.

En la siguiente imagen se observa la curva de CO₂ de referencia, así como las bandas de tolerancia primaria y secundaria.

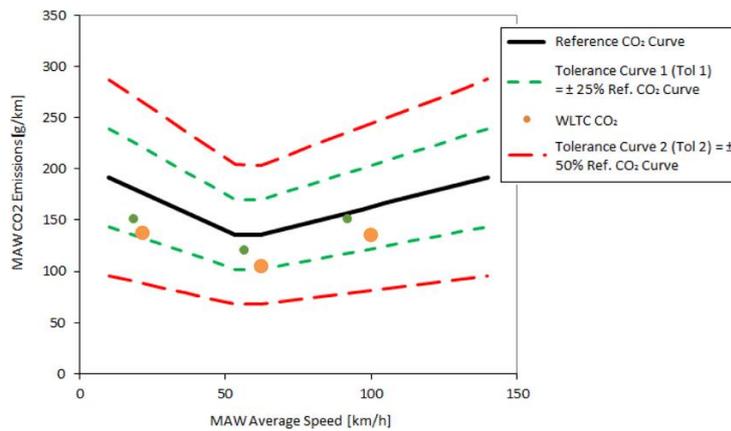


Figura 2.9 Ventana de promediado móvil

Fuente: <https://www.researchgate.net>

2.8 Ciclo FTP-75

El FTP-75 (Federal Test Procedure) es el ciclo de homologación utilizado en los Estados Unidos para la certificación de emisiones contaminantes y consumo de combustible de vehículos de transporte ligero.

Trata de una serie de pruebas definidas por la EPA (Environmental Protection Agency) y que, al igual que en Europa, han sido modificadas y/o complementadas a lo largo de los años.

Actualmente, el ciclo consta de las siguientes 4 fases llevadas a cabo en laboratorio mostradas en la Figura 2.10:

- Fase transitoria de arranque en frío. Duración: 505 segundos
- Fase para la estabilización. Duración: 866 segundos
- Periodo de parada en caliente. Duración: entre 540 y 660 segundos
- Fase transitoria de arranque en caliente. Duración: 505 segundos

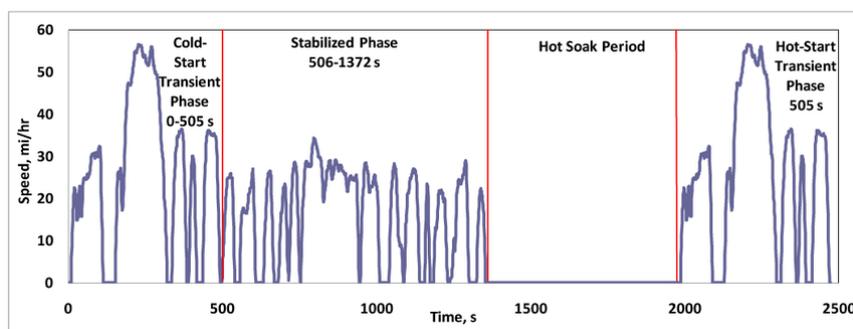


Figura 2.10 Perfil de velocidades ciclo FTP-75

Fuente: <https://www.researchgate.net>

En total, la distancia recorrida es de 17,77 km en un periodo de 1877 segundos, sin tener en cuenta la fase de estabilización, lo que resulta una velocidad media de 34,12 km/h, siendo la máxima de 91,25 km/h.

Además de esto, a partir de los modelos del año 2000, los vehículos deben ser sometidos a dos ciclos suplementarios conocidos como SFTP (Supplemental Federal Test Procedures), cuyo objetivo es reflejar de manera más precisa los valores de emisiones y consumo del combustible. Estos ciclos son el US06 y el SC03.

El primero de ellos aborda las deficiencias del FTP-75 para representar estilos de conducción agresivos, intensas variaciones de velocidad, arranque del motor y marcha inmediata, mientras que el segundo representa la influencia de una carga adicional como es el aire acondicionado y de los tiempos de parada.

De manera gráfica, a continuación, se muestran ambos ciclos donde se ve claramente el carácter agresivo del US06 y el aumento del tiempo a ralentí del SC03.

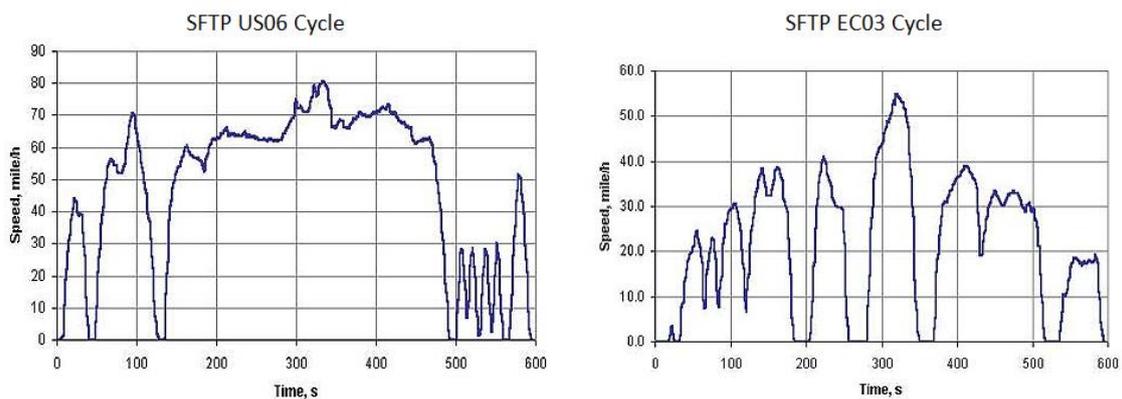


Figura 2.11 Perfil de velocidades ciclos complementarios US06 y EC03

Fuente: <https://www.researchgate.net>

3 TIPOS DE VEHÍCULOS

El sector de la automoción siempre ha estado en constante cambio debido a la evolución tecnológica. Sin embargo, en los últimos años, como respuesta a la implantación de normativas cada vez más estrictas en lo que a emisiones de contaminantes se refiere, dicha tendencia ha sido exponencial.

Por ello, actualmente existen numerosas arquitecturas de sistemas propulsivos que van desde los motores de combustión convencionales, hasta los vehículos de hidrógeno, pasando por los diferentes vehículos eléctricos e híbridos.

3.1 Vehículos convencionales

Engloba todos aquellos vehículos que utilizan un Motor de Combustión Interna Alternativo (MCIA) para propulsarse. A su vez, estos pueden dividirse atendiendo a los tipos de encendido en: motores de encendido provocado (MEP o de ciclo Otto) y los motores Diesel o de encendido por compresión (MEC).

Estos tipos de vehículos presentan la ventaja de tener una alta autonomía y una gran facilidad para modificar el grado de carga. Asimismo, al tratarse de la tecnología más extendida, su coste no es excesivamente elevado.

Sin embargo, producen contaminación tanto química (CO_2 , NO_x , partículas...) como acústica. Esto, junto al empleo de combustibles derivados del petróleo, cuya cantidad es limitada, son las principales desventajas de este tipo de vehículos.

3.2 Vehículos híbridos

Son todos aquellos vehículos que combinan un motor de combustión interna con uno o varios motores eléctricos. A su vez, estos se pueden dividir en diferentes tipos en función del grado de electrificación con respecto a la dependencia del MCIA.

3.2.1 Microhíbridos

Se trata de la arquitectura que constituyó el primer paso hacia la electrificación de los vehículos. Constan de un motor de combustión interna principal con una batería adicional de 12V, la cual se encarga de activar el sistema Start-Stop, una tecnología que apaga el motor cuando está en ralentí y lo reinicia cuando el conductor presiona el acelerador o el embrague.

Con el objetivo de llevar a cabo frecuentes paradas y arranques, las baterías utilizadas en este caso son capaces de cargarse y descargarse rápidamente, al contrario que las de plomo convencionales.

De esta manera, y en función del modelo de vehículo, la disminución en el consumo de combustible se sitúa entre un 8% y un 15%, mientras que el porcentaje de reducción de gases contaminantes es de hasta un 5% [9].

3.2.2 Híbridos suaves (MHEV)

Conocido por sus siglas en inglés MHEV (Mild Hybrid Electric Vehicle), los vehículos híbridos suaves constan igualmente de un motor de combustión interna, pero incorporan un nuevo componente conocido como BISG (Belt Integrated Starter Generator).

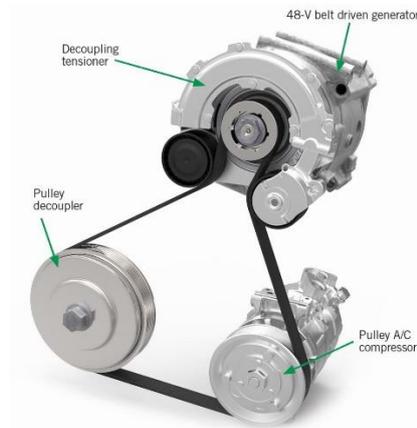


Figura 3.1 Belt Integrated Starter Generator (BISG)

Fuente: <https://link.springer.com>

Este sistema integrado de motor eléctrico conectado por correa, fusiona el motor de arranque y el alternador, actuando como generador durante las frenadas (sistema regenerativo) y como motor de arranque y motor eléctrico en las aceleraciones, proporcionando hasta 20kW de potencia eléctrica [10].

En este caso, la capacidad de la batería necesaria es de 48V, siendo la principal causa del aumento del precio de venta con respecto a los vehículos anteriormente comentados. No obstante, el uso de la hibridación suave permite obtener una reducción significativa de aproximadamente el 15% tanto en consumos como en emisiones contaminantes [9].

3.2.3 Híbrido no enchufable (HEV)

Se trata de vehículos cuya propulsión es mixta; a través de un motor de combustión convencional y un motor eléctrico alimentado por baterías. La recarga de estas se produce gracias a un generador acoplado al MCIA y al sistema de recuperación de energía cinética en las frenadas.

Esta última fuente de energía se consigue gracias al freno regenerativo o KERS (Kinetic Energy Recovery System), un dispositivo capaz reducir la velocidad del vehículo, transformando así la energía cinética en eléctrica.

Dicha energía almacenada es utilizada para alimentar el motor eléctrico, cuya función es la de complementar o sustituir al MCIA en instantes de baja eficiencia (durante el arranque, aceleraciones...).

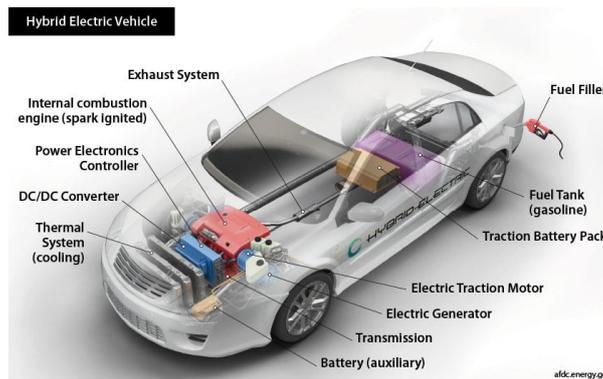


Figura 3.2 Híbrido no enchufable (HEV)

Fuente: <https://www.nrel.gov>

3.2.4 Híbrido enchufable (PHEV)

Los vehículos híbridos enchufable, del inglés Plug-In Hybrid Electric Vehicle (PHEV), al igual que los híbridos convencionales o no enchufables, combinan un motor de combustión interna junto a un motor eléctrico alimentado por baterías. Sin embargo, estos presentan la adición de una toma de corriente para la recarga externa de dichas baterías, motivo por el que el tamaño de estas aumenta considerablemente.

Por ello, este tipo de arquitectura permite funcionar en modo 100% eléctrico con una mayor autonomía, logrando una reducción de emisiones de CO₂ entre 18 y 22% con respecto a los vehículos convencionales. No obstante, el sobrecoste estimado es de en torno a 3000 euros por vehículo [9].

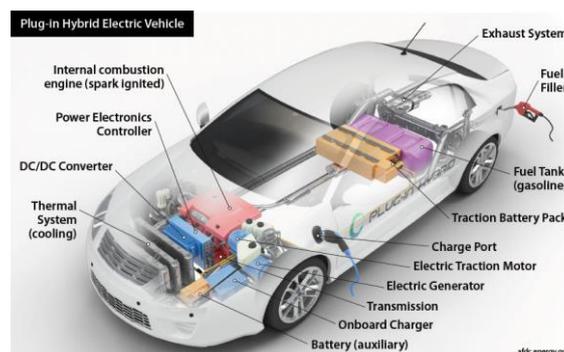


Figura 3.3 Híbrido enchufable (PHEV)

Fuente: <https://www.nrel.gov>

3.3 Vehículos eléctricos

Son todos aquellos vehículos cuya propulsión se realiza a través de uno o varios motores eléctricos. Asimismo, su clasificación vendrá dada por el tipo de fuente externa encargada de suministrar dicha energía eléctrica.

3.3.1 Vehículos eléctricos de batería (BEV)

Los vehículos eléctricos de batería o BEV (Battery Electric Vehicle), son coches propulsados íntegramente por uno o varios motores eléctricos alimentados por la energía almacenada en baterías de gran capacidad.

No poseen otro modo de propulsión, por lo que una vez agotada las baterías, es necesario recargarlas en un punto de carga eléctrica. No obstante, también están equipados con sistemas de frenada regenerativa.

La gran ventaja que presenta este tipo de arquitectura es la de no producir contaminación química ni acústica, además de tratarse de una tecnología que requiere menos mantenimiento que la convencional.

Sin embargo, también poseen desventajas, entre las que se pueden destacar: altos precios de venta, poca autonomía (aunque se ha mejorado bastante), escasos puntos de recarga, tiempos de recarga largos...

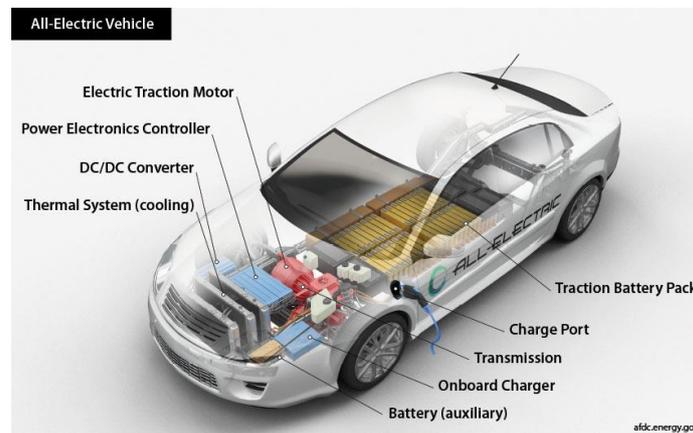


Figura 3.4 Vehículo eléctrico de batería (BEV)

Fuente: <https://www.nrel.gov>

3.3.2 Vehículos eléctricos de pila de combustible (FCEV)

Las siglas FCEV hacen referencia a Fuel Cell Electric Vehicle, es decir, vehículo eléctrico de pila de combustible. Esta arquitectura produce energía eléctrica a partir de la reacción electroquímica que se produce entre el hidrógeno y el oxígeno.

Sin embargo, a diferencia de un coche eléctrico BEV, en este tipo de vehículos se genera electricidad a medida que el vehículo la necesita, por lo que no se precisa de baterías tan grandes para el almacenamiento eléctrico.

La gran ventaja de este tipo de tecnología es su mayor autonomía y velocidad de recarga en comparación con los BEV. No obstante, la pila de combustible es costosa, pesada y su rendimiento se sitúa entre un 50-60% frente al 95% que pueden alcanzar los vehículos eléctricos de batería [11].

4 METODOLOGÍA

4.1 Instrumentación y softwares correspondientes

En este primer paso, se trató de obtener datos de ciclos reales de conducción en la isla de Tenerife, llevados a cabo por diferentes conductores y estructuras de vehículos con el objetivo de obtener un estudio lo más representativo posible. Para ello, fue necesario el empleo de diferentes instrumentos y softwares que se comentan a continuación.

4.1.1 Dispositivo ELM 327

Se trata de una interfaz de acceso universal para el diagnóstico y lectura de parámetros de los vehículos equipados con puertos OBDII (On Board Diagnosis).



Figura 4.1 Dispositivo ELM 327

Fuente: <http://www.elm327.com>

Actualmente, todos los vehículos comerciales deben incluir dicho puerto OBDII por normativa. Por su parte, la norma SAE J1939 es la encargada de establecer la ubicación del mismo, siendo de obligado cumplimiento que se encuentre en el habitáculo de ocupantes debajo del cuadro de instrumentos, cercano al asiento del conductor o hasta 300 milímetros más allá de la consola central del vehículo [12]. Además, debe ser de fácil acceso y estar situado fuera de la línea visual de los ocupantes, teniendo varias posibilidades como se muestra en la Figura 4.2.

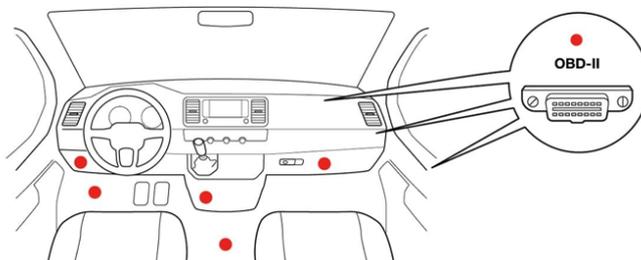


Figura 4.2 Posibles localizaciones puerto OBDII

Fuente: <https://www.verizonconnect.com>

De manera universal, el puerto OBDII incorpora 16 pines a través de los cuales se produce la comunicación con la ECU (Engine Control Unit). No todos los vehículos tienen el mismo protocolo de comunicación y esto dependerá esencialmente de los pines utilizados en el puerto.

Terminales del Conector OBDII



1 – Sin uso	9 – Sin uso
2 - J1850 Bus positivo	10 - J1850 Bus negativo
3 – Sin uso	11 – Sin uso
4 - Tierra del Vehículo	12 – Sin uso
5 – Tierra de la Señal	13 – Tierra de la señal
6 - CAN High	14 - CAN Low
7 - ISO 9141-2 - Línea K	15 - ISO 9141-2 - Línea L
8 – Sin uso	16 - Batería - positivo

Figura 4.3 Significado de los terminales del conector OBDII

Fuente: <https://www.ingenieriaymecanicaautomotriz.com>

A continuación, siguiendo la Figura 4.3, se presenta una tabla resumen con los posibles protocolos de comunicación en función de los pines conectados y las marcas de vehículos que suelen emplear cada uno de ellos.

Tabla 4.1 Protocolos de comunicación de los vehículos

Protocolo de comunicación	Terminales	Marcas de vehículos
ISO 9141-2/14230-4 KPW	4, 5, 7, y 16 Terminal 15 opcional	BMW, Mercedes Benz, Volkswagen, Porsche, Seat, Volvo, Renault, Peugeot, Daewoo, Opel...
SAE J1850 VPW	2, 4, 5 y 16	Ford, General Motors...
SAE J1850 PWM	2, 4, 5, 10 y 16	Ford y Mazda
ISO 15765-4 CAN BUS	4, 5, 6, 14 y 16	Saab, algunos modelos de Opel y Ford a partir de 2008

Fuente: Elaboración propia

Se observa que todos los protocolos de comunicación comparten los terminales 4, 5 y 16, siendo los correspondientes a la tierra del vehículo, la tierra de la señal y el positivo de la batería respectivamente.

4.1.2 ScanMaster-ELM

Es el software utilizado junto al dispositivo ELM327 para poder establecer la comunicación con la centralita del vehículo convencional y poder acceder a los datos. Se trata de un programa con muchas funciones entre las que se pueden

destacar: datos en tiempo real con medidores, en gráficos, en tablas, información del vehículo o la lectura y borrado de códigos de avería.

Para realizar el diagnóstico, primero se tiene que establecer la conexión entre el equipo informático y el dispositivo ELM327 mediante puerto USB, o de manera inalámbrica para versiones que incorporan Bluetooth o Wifi.

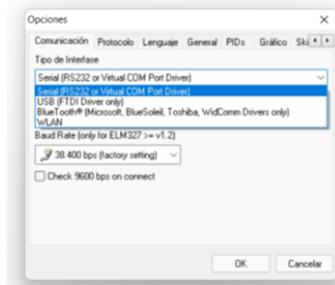


Figura 4.4 Conexión entre el ordenador y el dispositivo ELM327

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se debe indicar el protocolo de comunicación

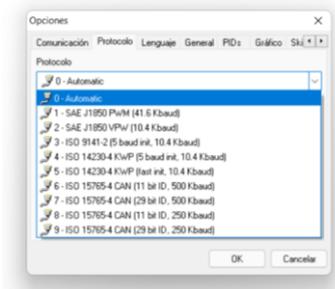


Figura 4.5 Establecimiento del protocolo de comunicación

Fuente: Elaboración propia

Una vez configurado, el programa se comunicará con el dispositivo ELM327 y éste, a su vez, con la ECU del vehículo.

Para los estudios llevados a cabo en este Trabajo Fin de Grado se ha utilizado el grabado de datos en tiempo real en gráficos, ya que posteriormente facilita el exportado a tablas en un archivo Excel.

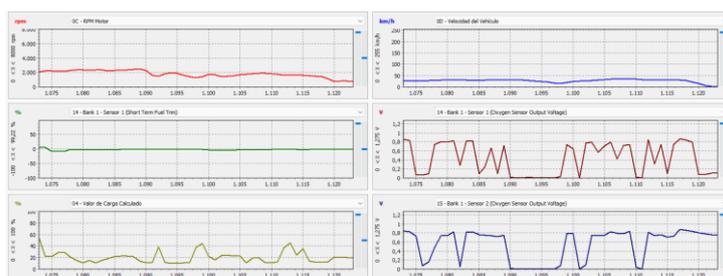


Figura 4.6 Grabado de datos en tiempo real en gráficos

Fuente: Elaboración propia

4.1.3 Car Scanner Pro

A pesar de que ScanMaster-ELM se trata de una herramienta capaz de aportar información sobre más de 100 parámetros, para tecnologías de vehículos híbridos y eléctricos, es bastante limitante. Además, no dispone de todos los protocolos de conexión posibles para estos tipos de sistemas propulsivos.

Por ello, para la obtención y monitoreo de los ciclos de conducción realizados con estos tipos de arquitecturas, se ha utilizado Car Scanner Pro junto al dispositivo ELM327 inalámbrico.

Se trata de una aplicación disponible para teléfonos móviles, tabletas o portátiles, compatible con sistemas operativos iOS o Android. Entre sus funciones se destaca: el diagnóstico de códigos de error, monitoreo en tiempo real en gráficas, test de emisiones o la grabación de datos, siendo esta última opción la usada para los estudios del presente trabajo.

Por su parte, el conexionado entre el ELM327 y el dispositivo inteligente se realiza de igual manera que para el ScanMaster-ELM, es decir, mediante Bluetooth o Wifi.

Sin embargo, no es necesario indicar el protocolo de comunicación, sino que simplemente hay que seleccionar la marca y modelo del vehículo a estudiar.

A continuación, en la Figura 4.7 se muestra algunos de los modelos de vehículos disponibles de tecnologías híbridos y eléctricos de la marca Hyundai.



Figura 4.7 Selección modelo de vehículo Car Scanner

Fuente: Elaboración propia

Por último, una vez conectado y configurado, se eligen las unidades de medida deseadas y se procede a hacer el ensayo, permitiendo exportar datos en archivos CSV o BRC (formato de almacenamiento de datos propio de la app).

4.1.4 Módulo receptor GNSS100L

Se trata de un GPS de alta precisión con conexión USB que incorpora módulos GNSS (Global Navigation Satellite System) de posicionamiento multiconstelacional. Esto quiere decir que, para recibir información, se puede apoyar en las constelaciones actuales con mayor número de satélites:

- GPS de los Estados Unidos de América
- GLONASS sistema de navegación ruso
- GALILEO sistema de navegación europeo.
- BeiDou: sistema de navegación chino
- QZSS: sistema de navegación japonés



Figura 4.8 Módulo receptor GNSS100L

Fuente: <https://www.topgnss.com>

4.1.5 U-Center

El GNSS100L se trata de un módulo receptor de bajo coste, por lo que no dispone de memoria para almacenar datos ni de ningún tipo de controlador. Por ello, estas funciones se llevan a cabo vía USB a través del software U-Center.

Se trata un programa de evaluación de sistemas globales de navegación por satélite (GNSS) desarrollado por U-Blox, un proveedor mundial de tecnologías de posicionamiento y comunicación.

Junto al módulo GNSS100L, permite modificar la configuración interna del este, además de grabar toda la información y parámetros que proporciona a la frecuencia deseada (1Hz).

Tras su conexión y posterior configuración, el receptor localiza los satélites más cercanos, a través de los cuáles se realiza la obtención de los datos. Toda esta información se puede observar en pestañas de la interfaz principal, además de poder ser grabada y exportada en diferentes formatos de archivo (.kmz, .kml, .csv, .gpx...)

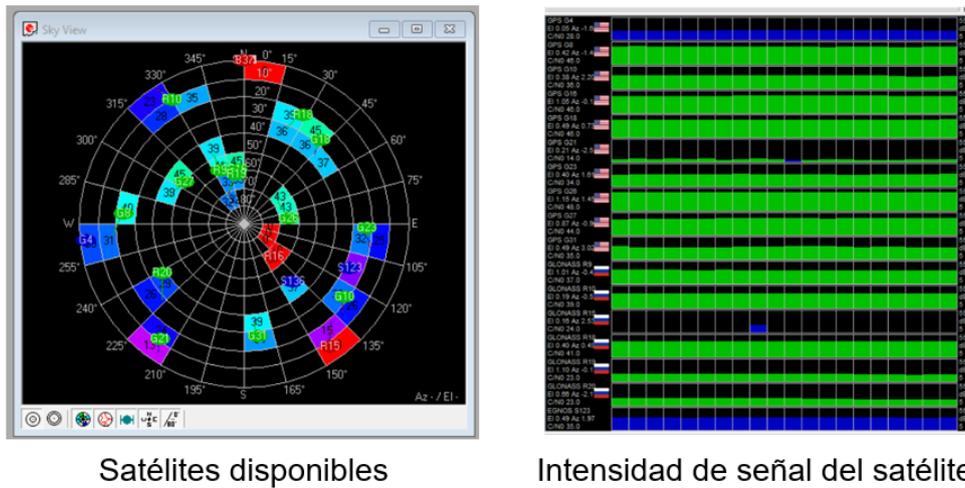


Figura 4.9 Información satelital tras el conexionado del módulo

Fuente: Elaboración propia

4.1.6 GPS Speed Pro

Es una aplicación GPS para móviles que permite grabar, a una frecuencia de 1 Hz, toda la estadística de una ruta: velocidad, tiempo, distancia, altura, latitud, longitud..., pudiendo exportar dichos datos en diferentes formatos.



Figura 4.10 GPS Speed Pro

Fuente: <https://www.androidlista.com>

4.1.7 GPX Scan

Se trata de una página web de libre acceso en la que, junto a aplicaciones móviles como el GPS Speed Pro, se puede obtener toda la estadística de las rutas grabadas de manera gráfica simplemente escaneando un código QR desde la app.



Figura 4.11 Escaneo GPX a través de código QR

Fuente: Elaboración propia

Además, proporciona la posibilidad de reproducir la ruta y de obtener un mapa o vista desde satélite indicando el trayecto realizado, tal y como se observa en la Figura 4.12.



Figura 4.12 GPX Scan

Fuente: Elaboración propia

4.2 Realización de los ensayos

Para la realización del estudio se ha dispuesto de tres diferentes arquitecturas de sistemas propulsivos:

- Vehículo convencional: OPEL Corsa D 1.2 del año 2011

- Vehículo eléctrico de batería (BEV): HYUNDAI Kona del año 2021
- Vehículo híbrido no enchufable (HEV): TOYOTA C-HR Hybrid Active del año 2016

Para cada una de estas tecnologías se han obtenido ciclos de conducción reales en la isla de Tenerife y más concretamente en la zona norte y metropolitana. Asimismo, han sido realizados durante días laborales y en horas cuya Intensidad Media Horaria de tráfico (IMH), según el informe del Cabildo Insular sobre intensidades de tráfico en las carreteras de la Isla de Tenerife, fue superior a 1000 durante el pasado año 2021 [13].

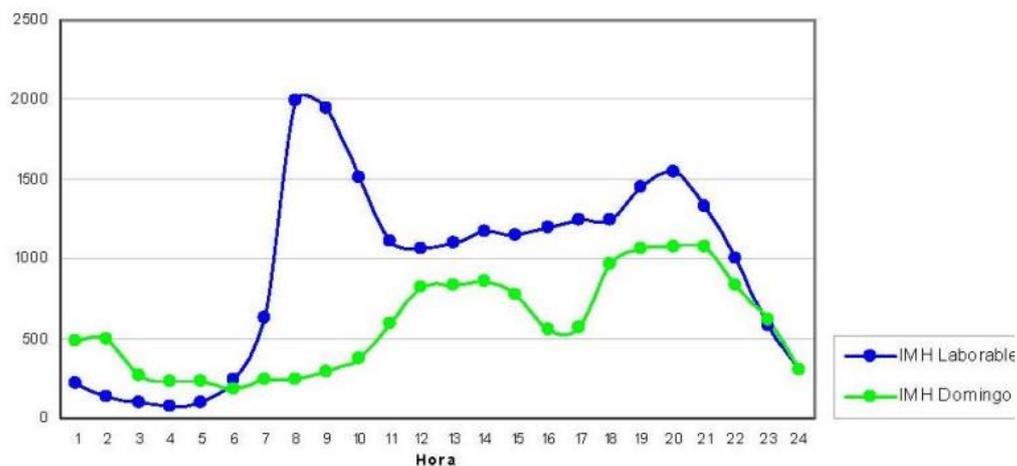


Figura 4.13 Intensidad media horaria en carreteras de Tenerife durante 2021

Fuente: <https://www.tenerife.es>

En el desarrollo de los ciclos, y a través de los diferentes sistemas de posicionamiento anteriormente comentados, se obtuvieron parámetros como la velocidad instantánea del vehículo, la distancia, la altitud o la latitud entre otros; todos a una frecuencia de 1 Hz.

Con ello, se calcula el gradiente en función del tiempo como:

$$\text{Gradiente (\%)} = \frac{\Delta H}{\Delta d} \cdot 100 \quad (4.1)$$

Donde:

ΔH \equiv diferencia de altitud en metros

Δd \equiv distancia recorrida en metros

Al mismo tiempo, por medio del ELM327 y su correspondiente software ScanMaster-ELM o Car Scanner Pro, se recogieron datos de interés que proporciona la centralita del vehículo y que permitieron caracterizar la ruta, así como calcular el consumo energético del vehículo en cuestión. Algunos de ellos son: régimen de giro del motor, sensor de posición del acelerador (TPS), sensores de oxígeno, valor de carga calculado, sensor de flujo de masa de aire (MAF) o ajustes de la mezcla entre otros.

Igualmente, otra de las variables a la que se puede acceder desde la diagnosis es la velocidad, siendo esta de gran importancia al ser el único parámetro que comparten en común los dos tipos de GPS usados y el sistema de diagnóstico a bordo.

Esto permite calibrar los dispositivos GPS, así como realizar una comparativa entre las tres herramientas y comprobar la exactitud de cada una de ellas, tomando como referencia la velocidad del coche indicada a través de su puerto OBDII, tal y como se muestra en la siguiente figura.

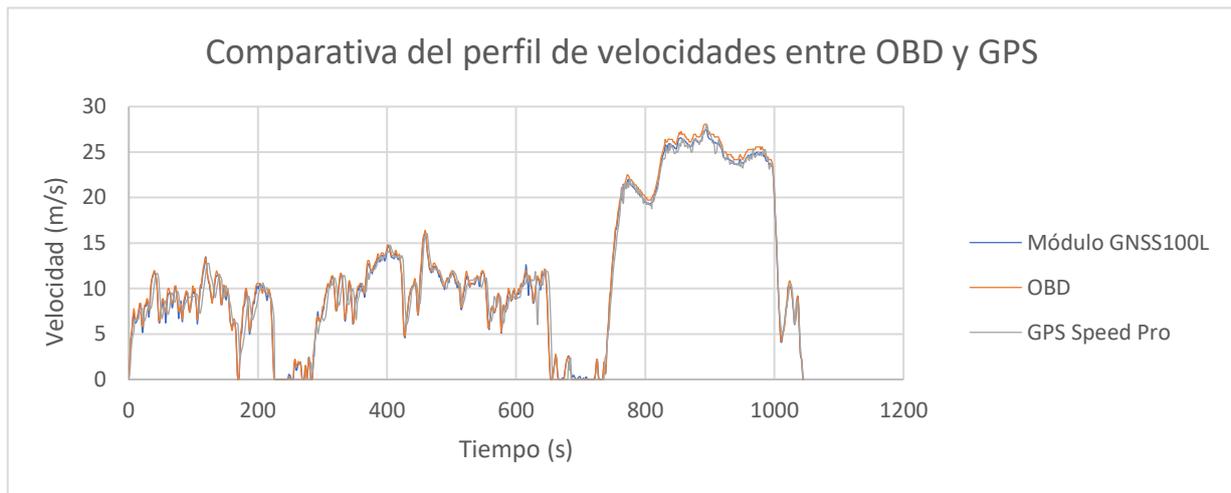


Figura 4.14 Comparativa del perfil de velocidades entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro

Fuente: Elaboración propia

Siguiendo como ejemplo el ciclo de conducción mostrado, se puede observar que aparentemente tanto el módulo receptor GNSS100L, como la aplicación móvil GPS Speed Pro siguen la tendencia del perfil de velocidades, si bien haciendo zoom en la gráfica se diferencian ciertas desviaciones, sobre todo del GPS Speed Pro a bajas y altas velocidades (Ver Figura 4.15 y 4.16).

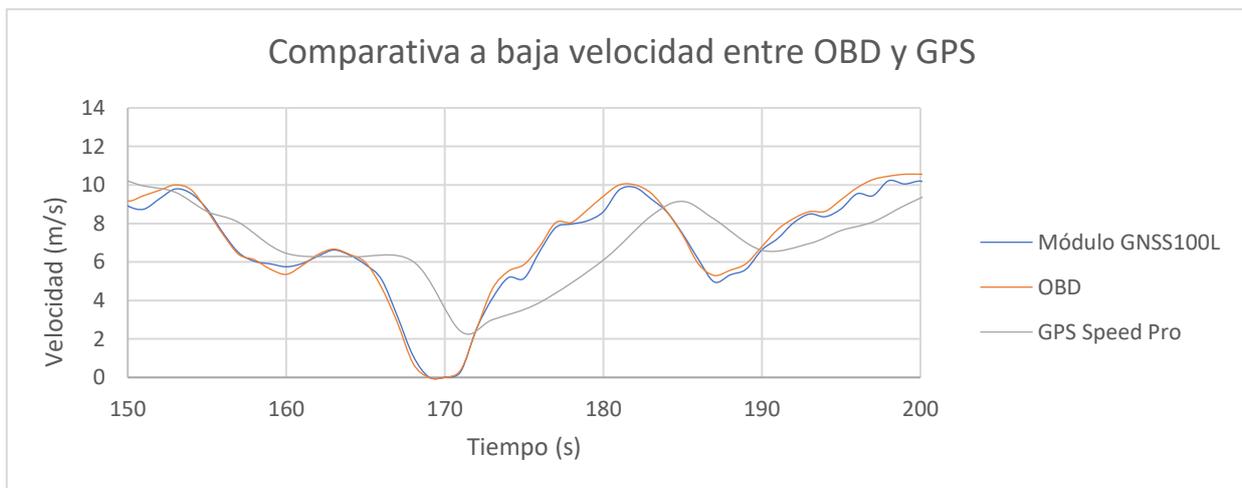


Figura 4.15 Comparativa a baja velocidad entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro

Fuente: Elaboración propia

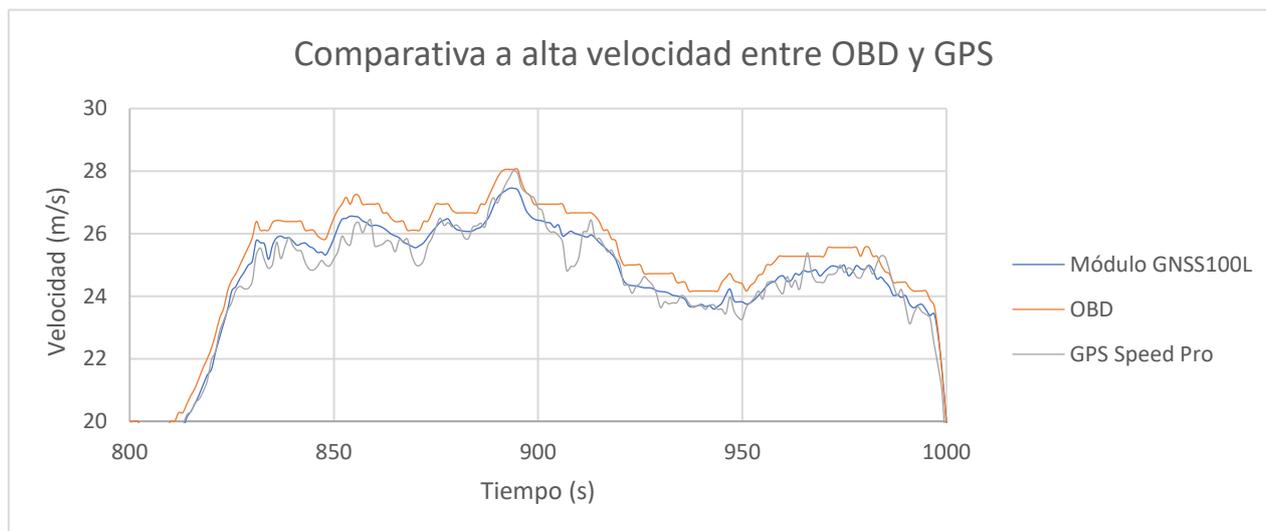


Figura 4.16 Comparativa a alta velocidad entre OBD, GNSS100L Y GPS Speed Pro

Fuente: Elaboración propia

Estas desviaciones de la velocidad se traducirán en variaciones de la distancia total recorrida en el ciclo (área bajo la curva del perfil de velocidades), resultando un porcentaje de error que indica la precisión de cada equipo.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se realiza una comparativa de la distancia recorrida en el ciclo expuesto según cada herramienta y el porcentaje de error con respecto a la referencia (OBDII).

Tabla 4.2 Comparativa de distancias recorridas entre OBDII, GNSS100L y GPS Speed Pro

	OBDII	Módulo GNSS100L	GPS Speed Pro
Distancia total recorrida (km)	12,289	12,128	11,974
% Error	-	1,31	2,56

Fuente: Elaboración propia

Como era de esperar observando las gráficas, el módulo receptor GNSS100L se trata de una herramienta mucho más precisa que la aplicación móvil.

Más concretamente, en el ciclo propuesto, cuya distancia total recorrida según la diagnosis es de 12,289 kilómetros, el módulo GNSS100L se desvía 161 metros, lo que significa un 1,31%. Asimismo, si se analiza la Figura 4.15 y 4.16 se observa claramente que esta pequeña anomalía se produce mayoritariamente en las zonas de alta velocidad.

Por su parte, la aplicación móvil se desvía en un 2,56%, es decir, 315 metros con respecto al total. Sin embargo, en este caso, la diferencia proviene tanto de las zonas

de baja como de alta velocidad, en las que la aplicación no reproduce con exactitud los cambios de velocidad.

Por este motivo, el dispositivo principal usado para la recopilación de toda la estadística de los ciclos de conducción ha sido el módulo receptor GNSS100L junto al software U-Center, relegando la aplicación móvil GPS Speed Pro simplemente para obtener el trazado sobre el mapa de la ruta y comprobar el buen funcionamiento de la primera herramienta.

4.3 Descripción de los ciclos realizados

En total, el estudio cuenta con 15 ciclos de conducción reales, cada uno de ellos caracterizados por un perfil de velocidades, gradiente y tiempos de parada condicionados por el tráfico real de las carreteras en el momento de ejecución de la prueba.

De esta manera, para cada una de las arquitecturas analizadas, se ha intentado obtener ciclos lo más heterogéneos posibles entre sí, con el fin de verificar la validez del modelo en circunstancias diferentes de conducción.

A continuación, se presentan las características de los ciclos de conducción realizados para cada tipo de sistema propulsivo.

4.3.1 Opel Corsa D 1.2

En primer lugar, para el análisis y desarrollo del modelo de un vehículo convencional, se ha elegido el Opel Corsa D 1.2, un turismo atmosférico de gasolina cuya cifra de ventas mundial se sitúa en torno a 2,9 millones de unidades [14].



Figura 4.17 Opel Corsa D 1.2

Fuente: <https://www.km77.com>

Las características y presentaciones principales de este vehículo según su ficha técnica son las siguientes:

Tabla 4.3 Características y presentaciones Opel Corsa D 1.2

OPEL CORSA D 1.2	
Velocidad máxima (km/h)	172
Aceleración 0-100 km/h (s)	13,6
Coefficiente drag	0,30
Longitud (mm)	3999
Anchura (mm)	1737
Altura (mm)	1488
Área frontal (m ²)	2,585
Batalla (mm)	2511
Peso (kg)	1180
Capacidad del depósito (L)	45
Potencia máxima (kW)	63
Par máximo (Nm)	115

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, las particularidades de cada uno de los ciclos de conducción llevados a cabo con esta tecnología propulsiva se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 4.4 Características de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2

	Distancia recorrida (km)	Gradiente medio (%)	Tiempo (s)
Ciclo de conducción 1	20,54	-1,03	1236
Ciclo de conducción 2	11,48	-0,51	985
Ciclo de conducción 3	12,03	-0,14	1045
Ciclo de conducción 4	1,34	0,66	267
Ciclo de conducción 5	6,36	1,70	351
Ciclo de conducción 6	1,86	3,10	228

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la Tabla 4.4, y con el objetivo de conocer el impacto que produce las distintas orografías de carretera sobre el consumo energético del vehículo, los ciclos realizados van desde valores de gradiente medio negativos hasta positivos.

En cuanto a los ciclos de conducción 1, 2 y 3, son los más largos, puesto que cuentan con parte urbana, interurbana y autopista en su trazado (ver Figura 4.18). Asimismo, se tratan de los ciclos representativos para valores de gradiente medio negativo.

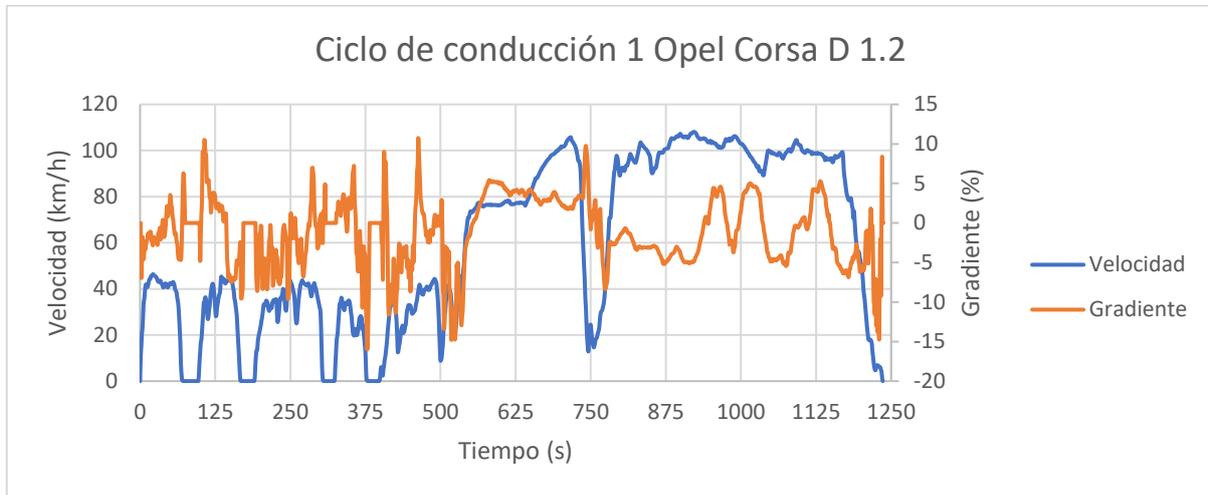


Figura 4.18 Perfil de velocidades ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, los ciclos 4, 5 y 6, son de distancia y tiempo reducido, debido a la imposibilidad de conseguir gradientes medios positivos elevados (como es el caso de los ciclos 5 y 6) realizando largas conducciones con todas las partes comentadas anteriormente.

Por este motivo, se han ejecutado en tramos de carretera urbana (ciclos 4 y 6) e interurbana (ciclo 5). Además, cabe comentar que estos tres últimos ciclos de conducción se tratan de pruebas aisladas, pero de gran importancia en la Isla de Tenerife debido a su peculiar relieve.



Figura 4.19 Perfil de velocidades ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Por último, a fin de determinar el exceso o la ausencia general de dinámica durante las pruebas de conducción, a continuación, se exponen las representaciones de los parámetros RPA (Relative Positive Acceleration) y $v \cdot a_{\text{pos}}$ (velocity times positive acceleration) comentadas anteriormente.

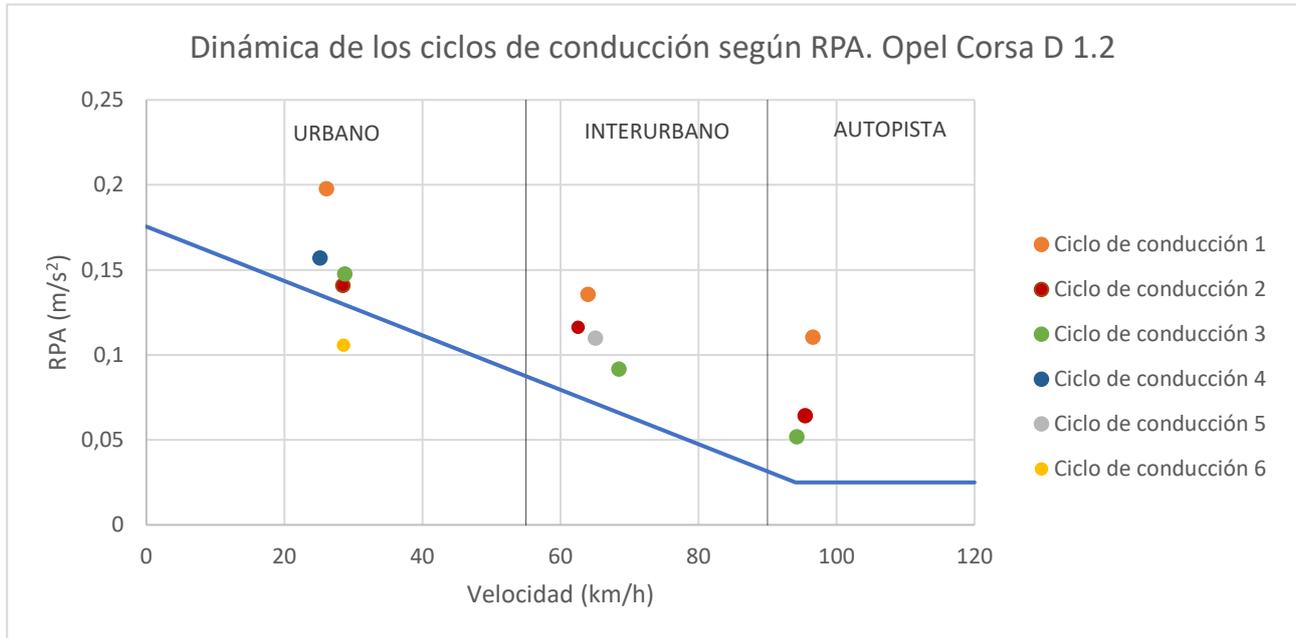


Figura 4.20 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

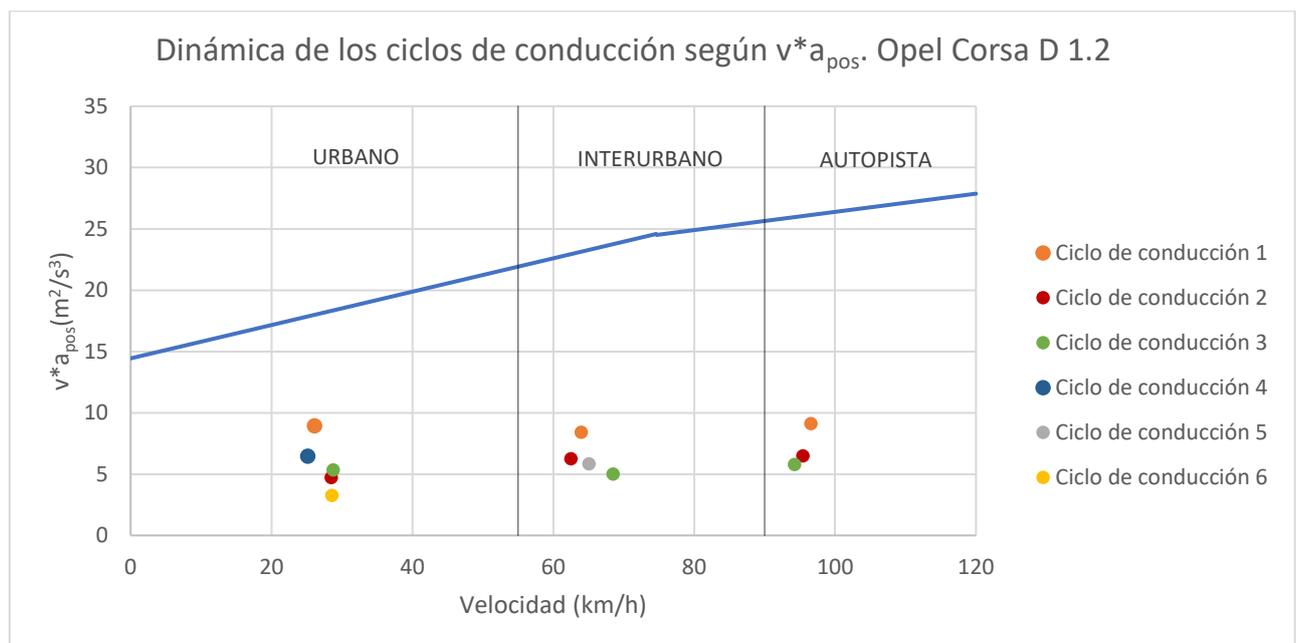


Figura 4.21 Dinámica general de los ciclos de conducción según $v \cdot a_{\text{pos}}$ Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, en la Figura 4.20 se observa que los ciclos de conducción 1, 2 y 3 se encuentran por encima de la línea límite en cada una de las partes del trayecto, lo que significa que no se tratan de ciclos demasiado pasivos.

Por su parte, los ciclos 4 y 5, también serían válidos, puesto que se encuentran por encima de la línea de referencia en su correspondiente trayecto.

Sin embargo, el valor RPA en función de la velocidad media del ciclo de conducción 6, es insuficiente para considerarlo un trayecto válido desde el punto de vista normativo. Esta pasividad es la consecuencia de la realización de un ciclo tan estricto en cuanto a gradiente de carretera y de las características técnicas del coche, lo cual resulta de utilidad para el estudio de este Trabajo Fin de Grado, pero no desde el enfoque reglamentario RDE.

Por otra parte, en la Figura 4.21, se comprueba a través del parámetro v^*a_{pos} que aquellos ciclos válidos según la gráfica RPA, no sean demasiado dinámicos.

Esta condición la cumplen todos los ciclos expuestos, observándose que se tratan de ciclos poco agresivos, aunque dentro de la pasividad permitida, a excepción del 6 por las razones comentadas.

4.3.2 Ciclos de conducción Hyundai Kona

El Hyundai Kona fue el vehículo eléctrico de batería (BEV) elegido para el desarrollo y posterior validación del modelo de este tipo de arquitectura. Se trata de un SUV (Sport Utility Vehicle) con una batería de 64 kWh y englobado en el top 10 de los vehículos eléctricos más vendidos en España en el año 2021 [15].



Figura 4.22 Hyundai Kona eléctrico

Fuente: <https://www.motor.es>

En cuanto a todas sus características más relevantes, se encuentran recogidas en la siguiente tabla.

Tabla 4.5 Características y presentaciones Hyundai Kona

HYUNDAI KONA	
Velocidad máxima (km/h)	167
Aceleración 0-100 km/h (s)	7,6
Coefficiente drag	0,29
Longitud (mm)	4180
Anchura (mm)	1800
Altura (mm)	1570
Área frontal (m ²)	2,261
Batalla (mm)	2600
Peso (kg)	1760
Potencia máxima (kW)	150
Par máximo (Nm)	395
Capacidad de la batería (kWh)	64

Fuente: Elaboración propia

Para su estudio, se recopilaron datos de 4 ensayos de conducción de diferente tipo, como se observa a continuación.

Tabla 4.6 Características de los ciclos de conducción Hyundai Kona

	Distancia recorrida (km)	Gradiente medio (%)	Tiempo (s)
Ciclo de conducción 1	14,61	-0,98	603
Ciclo de conducción 2	15,42	-0,58	809
Ciclo de conducción 3	31,15	1,01	2010
Ciclo de conducción 4	28,87	1,31	1695

Fuente: Elaboración propia

En este caso, se ha optado por la obtención de ciclos de larga distancia y duración, con el fin de verificar el comportamiento modelado de la batería, así como la autonomía y el consumo energético del vehículo.

De la misma manera, y en función de la velocidad media, cada uno de los ciclos se divide a su vez en tramos urbanos, interurbanos o extraurbanos (autopista). Por ejemplo, el ciclo de conducción 3, siendo el más largo de los ensayos, se divide en dichas tres zonas tal y como se puede deducir del mapa y corroborar a través del perfil de velocidades mostrado a continuación.

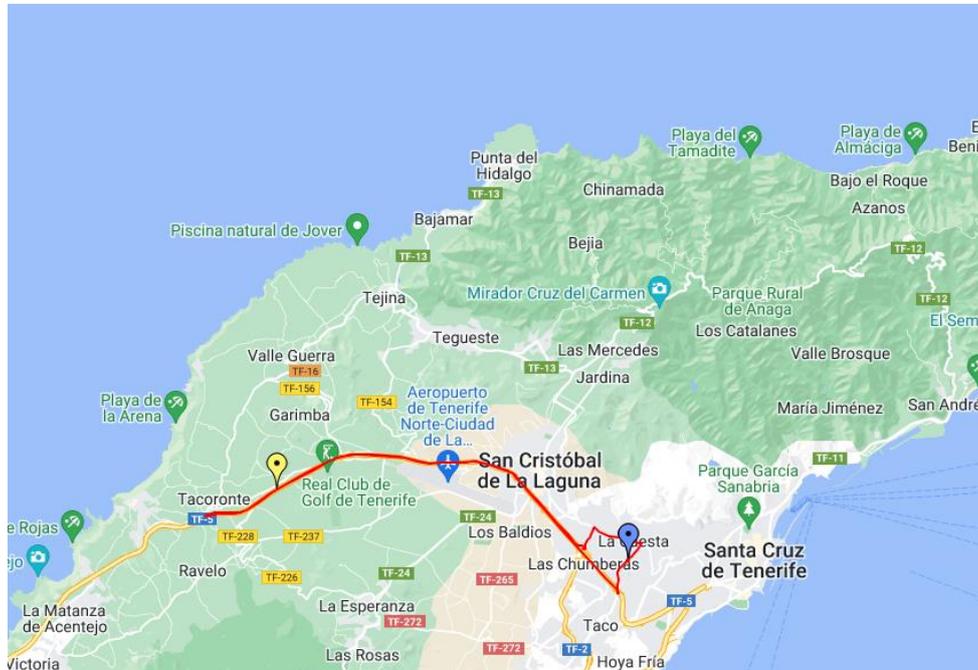


Figura 4.23 Mapa ciclo de conducción 3 Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia



Figura 4.24 Perfil de velocidades ciclo de conducción 3 Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, de la comprobación de la dinámica de los ciclos se obtienen las dos siguientes representaciones gráficas.

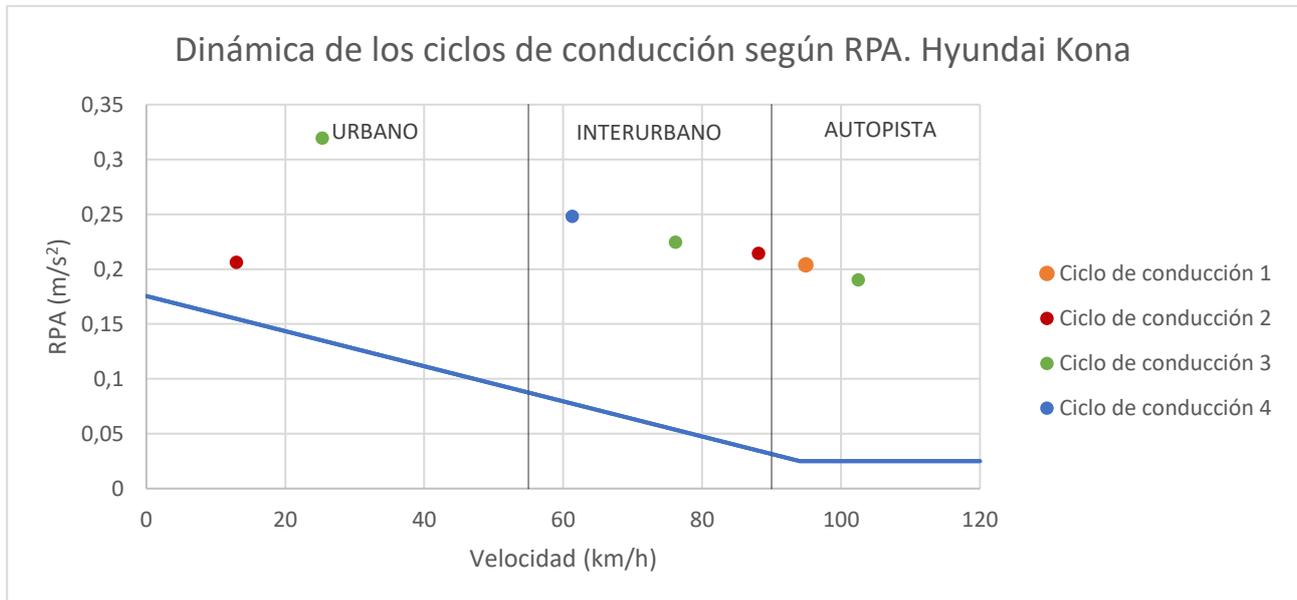


Figura 4.25 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

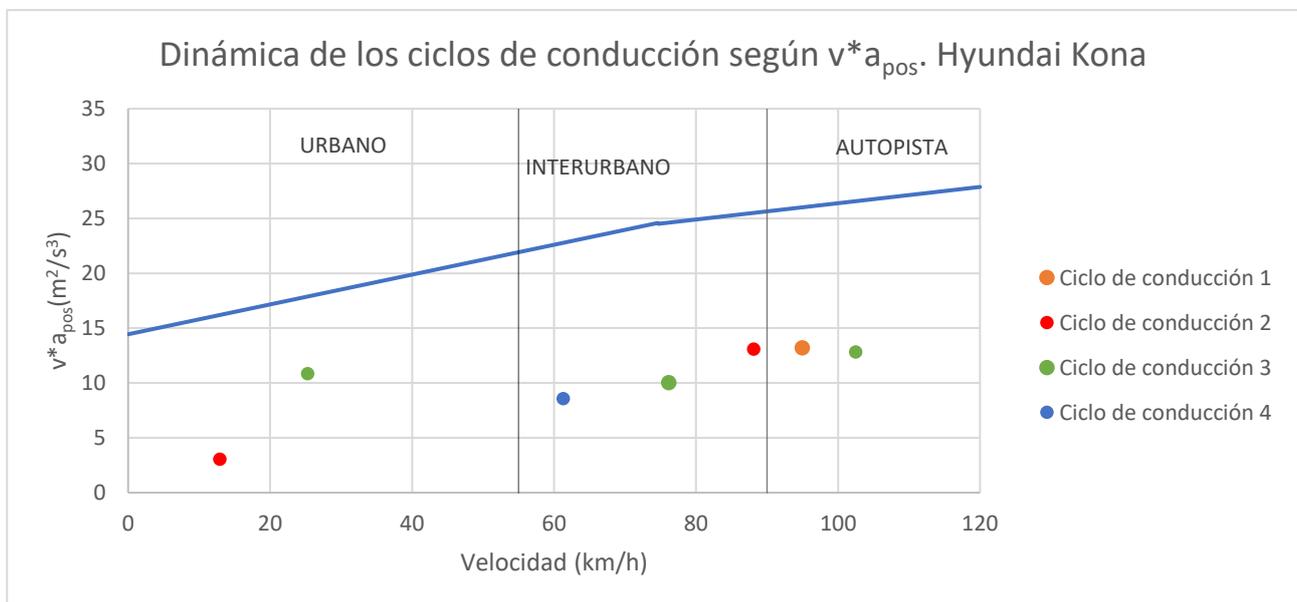


Figura 4.26 Dinámica general de los ciclos de conducción según v*a_pos Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Como se puede ver, todos los ciclos de conducción serían válidos según normativa RDE desde el punto de vista dinámico, pudiéndose apreciar la diferencia existente entre los ciclos realizados con el Opel Corsa D en cuanto a agresividad.

Esto se debe a estilos de conducción distintos, pero sobre todo a la diferencia de disponibilidad de la potencia y par máximos entre ambas arquitecturas, siendo la entrega de este último parámetro de manera instantánea para un coche eléctrico (ver Figura 4.27). Esto produce mayores aceleraciones, que se traducen en ciclos de conducción más dinámicos.

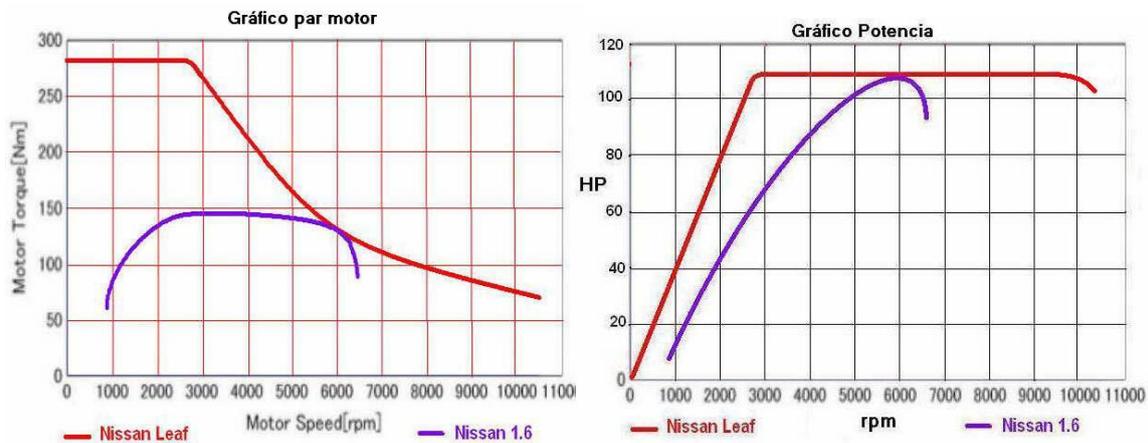


Figura 4.27 Comparativa de las curvas par-potencia entre un vehículo eléctrico y uno convencional

Fuente: <https://forococheselectricos.com>

4.3.3 Ciclos de conducción Toyota C-HR

Por su parte, el vehículo utilizado para el estudio de una tecnología híbrida fue el Toyota C-HR, un coche que a día de hoy sigue siendo una referencia del segmento crossover al ser el modelo más vendido en España en 2016 [16].



Figura 4.28 Toyota C-HR

Fuente: <https://www.worldautoevolution.com>

De su ficha técnica se pueden extraer los siguientes datos más significativos, tanto características generales como presentaciones.

Tabla 4.6 Características y presentaciones Toyota C-HR

TOYOTA C-HR	
Velocidad máxima (km/h)	170
Aceleración 0-100 km/h (s)	11
Coefficiente drag	0,32
Longitud (mm)	4360
Anchura (mm)	1795
Altura (mm)	1555
Área frontal (m ²)	2,233
Batalla (mm)	2640
Peso (kg)	1560
Potencia máxima MCIA (kW)	72
Par máximo MCIA (Nm)	142
Potencia máxima eléctrico (kW)	53
Par máximo eléctrico (Nm)	163
Capacidad de la batería (kWh)	1,31

Fuente: Elaboración propia

Se realizaron 5 ciclos de conducción, intentando en este caso obtener un estudio caracterizado por rutas de diferentes distancias, tiempos y gradientes con el objetivo de analizar tanto la tecnología eléctrica como la de combustión.

A continuación, se presentan las características de los mismos:

Tabla 4.5 Características de los ciclos de conducción Toyota C-HR HEV

	Distancia recorrida (km)	Gradiente medio (%)	Tiempo (s)
Ciclo de conducción 1	4,89	-2,55	525
Ciclo de conducción 2	15,85	-1,45	1128
Ciclo de conducción 3	11,32	0,12	687
Ciclo de conducción 4	18,02	1,42	1584
Ciclo de conducción 5	7,00	2,38	932

Fuente: Elaboración propia

De la tabla se observa que los ciclos de menor recorrido son aquellos cuyo gradiente es más estricto (ciclo 1 y 5), mientras que los ciclos más largos el gradiente medio obtenido es prácticamente nulo.

Por su parte, al comprobar la dinámica de cada uno de ellos se extraen las siguientes representaciones.

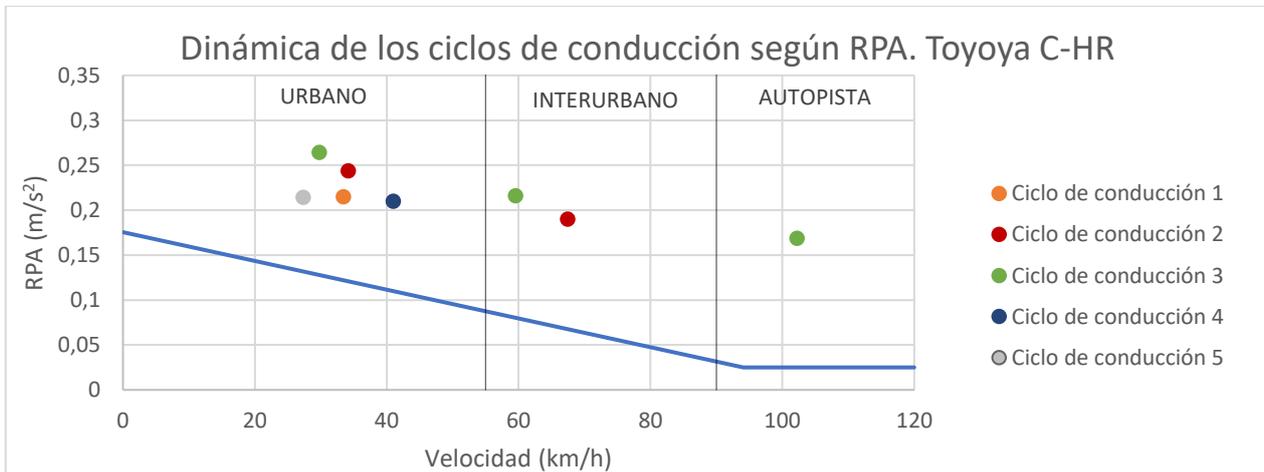


Figura 4.29 Dinámica general de los ciclos de conducción según RPA Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, verificando la dinámica de los ciclos a través del parámetro RPA, se observa que todos se encuentran por encima de la línea límite, lo que significa que ninguno de ellos es demasiado pasivo desde el punto de vista normativo.

Asimismo, se aprecia que el ciclo de conducción 3 es el ensayo más agresivo en cada una de las partes que lo componen. Sin embargo, la verificación del exceso de dinamicidad se realiza a través del parámetro “v*a+”, el cual se muestra a continuación.

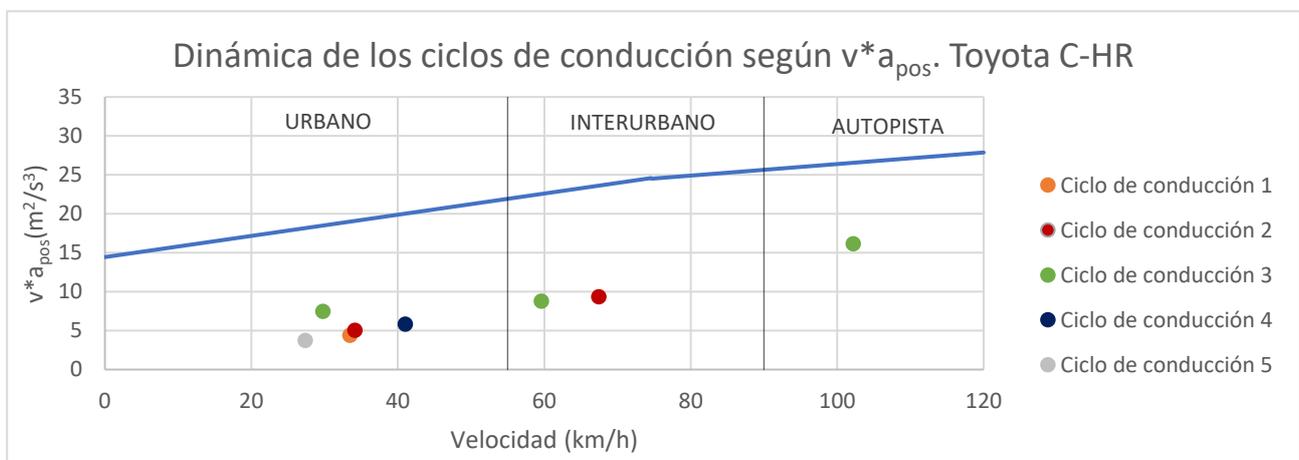


Figura 4.30 Dinámica general de los ciclos de conducción según v*a_{pos} Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

En la comprobación del exceso de agresividad de los ensayos, se comprueba que ninguno de ellos rebasa la línea límite, por lo que se concluye que todos serían válidos desde el punto de vista de los requisitos RDE.

4.4 Datos obtenidos a través del puerto OBDII y procesado

Al mismo tiempo que se recopilaban datos del trayecto a través del módulo receptor GNSS100L, también se grabaron todos los parámetros necesarios del vehículo a través de su puerto OBDII, por medio del dispositivo ELM327 y el correspondiente software.

En este caso, la frecuencia de adquisición de los datos no se puede elegir, puesto que los sensores de los vehículos no presentan oscilaciones estables. Estos varían su comportamiento en función de la centralita y obviamente del ciclo de conducción y de los requerimientos del motor.

Por ejemplo, para el caso del régimen de giro del vehículo convencional, como se observa en la Figura 4.31, la frecuencia con la que se reciben datos en el software varía desde 1,78 hasta 1,26 Hz.

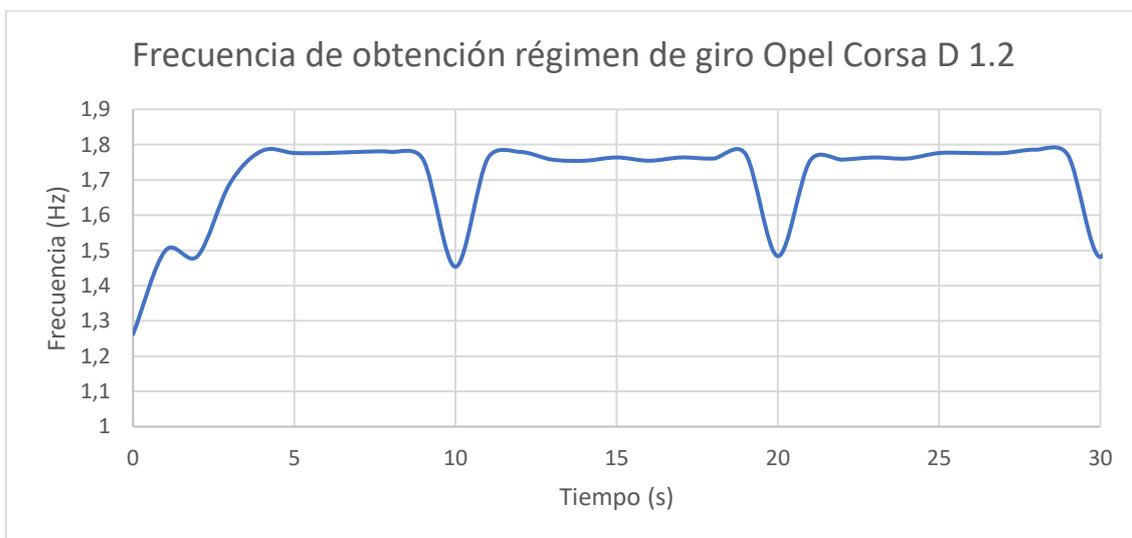


Figura 4.31 Frecuencia de muestreo rpm Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Por ello, toda la información proporcionada por el vehículo a través del puerto OBDII ha sido interpolada a una frecuencia de 1Hz, con el propósito de poder realizar comparativas con los valores GPS y los resultados del software de simulación.

Más concretamente, se ha llevado a cabo una interpolación de tipo lineal, lo cual reproduce el patrón real sin cometer errores notables (ver Figura 4.32).

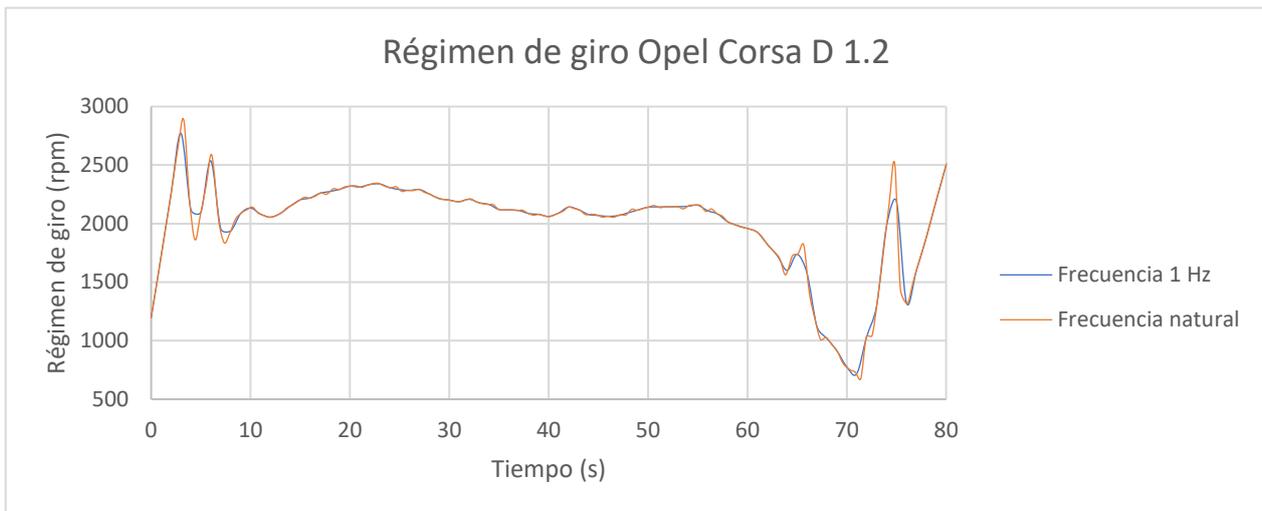


Figura 4.32 Comparativa entre rpm a frecuencia natural e interpolada a 1Hz

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, para cada una de las arquitecturas, los datos de sensores recogidos durante los ciclos de conducción son diferentes, mientras que existen algunos que comparten en común. Estos son:

- Sensor de velocidad VSS (Vehicle Speed Sensor)
- Sensor de régimen de giro
- Sensor de posición del acelerador TPS (Throttle Position Sensor)

A continuación, se presentan los parámetros más importantes que fueron grabados en función del tipo de vehículo y que permitieron calcular el consumo energético real.

4.4.1 Opel Corsa D 1.2

Todos los vehículos convencionales equipados con puerto OBDII usan sensores de flujo de aire MAF (Mass Air Flow) para proporcionar información y retroalimentación en tiempo real al sistema de gestión de combustible del motor. Este sistema pertenece a la unidad de control del vehículo (ECU), y se conoce como Powertrain Control Module (PCM).



Figura 4.33 Sensor de flujo de aire MAF

Fuente: <https://codigosdct.com>

A través de los valores proporcionados por este sensor, se puede calcular el consumo de combustible instantáneo de un vehículo en condiciones ideales según lo indicado en la ecuación (4.2), sabiendo que la proporción en masa de combustible y aire necesarios para lograr una combustión completa (relación estequiométrica), es de 1/14,6 para motores gasolina y 1/14,5 en motores diésel.

A dicha relación también se le conoce como dosado estequiométrico; habitualmente denotado como “ F_e ”, mientras que es de uso más común su inversa, es decir, la relación aire-combustible conocida como “A/F” (Air/Fuel Ratio)

$$FC = \frac{MAF}{AF_{ratio}} \quad (4.2)$$

Donde:

$FC \equiv$ consumo másico de combustible en g/s (Fuel Consumption)

$MAF \equiv$ consumo másico de aire en g/s indicado por el sensor MAF

Sin embargo, debido a que todos los motores de combustión requieren aumentos o disminuciones de combustible a medida que cambia la carga, el balance entre el aire y el combustible debe cambiar constantemente para adaptarse a las alteraciones en la demanda y conseguir que la mezcla se encuentre lo más cerca posible al punto estequiométrico.

Se trata de una estrategia en el suministro de combustible que el PCM gobierna a través de dos parámetros conocidos como ajustes de combustible.

- Short Term Fuel Trim (STFT): es la corrección instantánea o a corto plazo en el ajuste de la mezcla aire-combustible. Surge como respuesta a cambios bruscos en el acelerador y la carga.
- Long Term Fuel Trim (LTFT): ajuste de la mezcla debido al desgaste y envejecimiento estimado de los inyectores a largo plazo.

A su vez, el Fuel Trim está relacionado con otro parámetro llamado lambda, proporcionado por un sensor de oxígeno colocado habitualmente en el colector de escape del vehículo.



Figura 4.34 Sensor de oxígeno

Fuente: <https://www.motor.es>

Este sensor es capaz de monitorear la cantidad de oxígeno presente en los gases de escape producto de la combustión del motor. Lo hace generando una señal que oscila entre 0 y 1 Voltio, lo que indica al PCM si la relación A/F es rica o pobre.

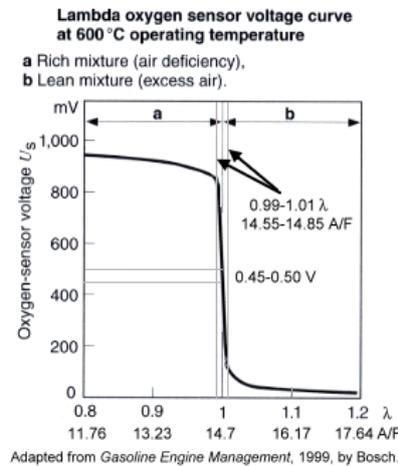


Figura 4.35 Sensor de oxígeno

Fuente: <https://www.motor.es>

Como se observa en la imagen, cuando la mezcla es pobre, el voltaje oscilará entre 0 y 200 mV, mientras que, si es rica, el voltaje generado es superior a 800 mV. Por su parte, para una combustión perfecta en motores gasolina, la relación A/F estequiométrica debe ser 14,7/1 tal y como se ha indicado, lo que se traduce en un voltaje entre 450 y 500 mV.

Por tanto, el objetivo del PMC es conseguir que la combustión sea lo más eficiente posible, lo que se consigue regulando dinámicamente la relación A/F en función de los valores lambda y a través de los parámetros de ajuste de combustible. Esto se puede ver claramente en el gráfico mostrado a continuación, en el que representa conjuntamente valores de STFT y lambda obtenidos experimentales.

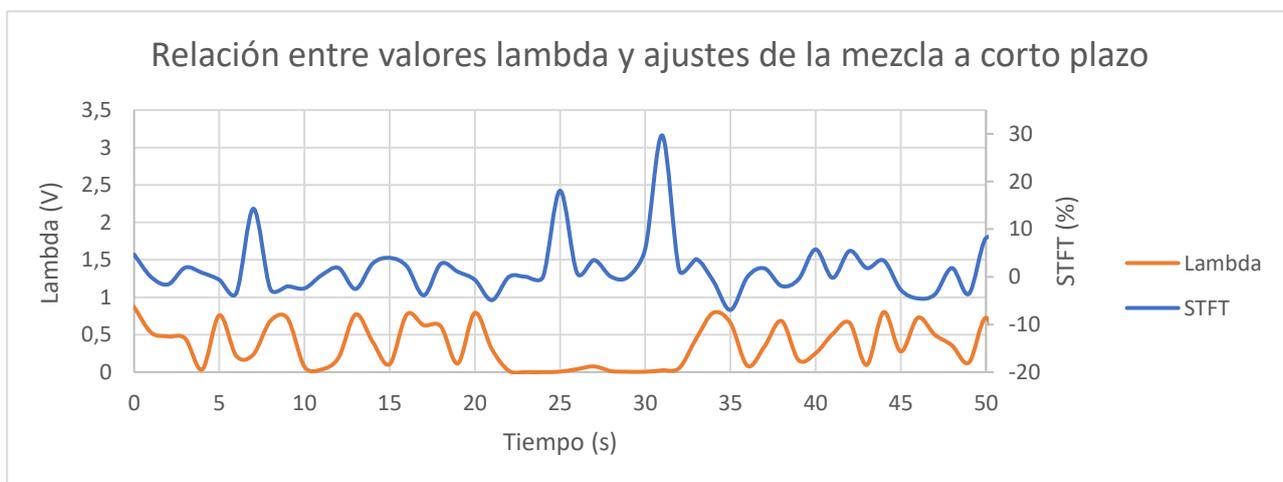


Figura 4.36 Relación entre valores lambda y ajustes de la mezcla a corto plazo

Fuente: Elaboración propia

Como se observa en la figura, los valores STFT calculados por el PCM y reportados a través del sistema OBDII, fluctúan por encima y por debajo de 0% en función del voltaje proporcionado por la sonda lambda, lo que se traduce en:

- Corrección STFT<0%: la mezcla es rica.
- Corrección STFT=0%: mezcla estequiométrica.
- Corrección STFT>0%: la mezcla es pobre.

Para conseguirlo, dentro de la centralita de cada vehículo existe un mapa de combustible que indica la relación A/F en función de la carga y el régimen de giro, a través del cual el PCM es capaz de leer continuamente la relación óptima y calcular el ajuste a corto plazo necesario.

Target AF "Fuel Map" for Open-Loop Control (1995 3000GT Spyder VR4)															
RPM	500	1000	1500	2000	2500	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000	6500	7000	7500
LOW	14.0	14.7	19.8	19.8	19.8	19.8	18.8	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1	18.1
	14.0	14.7	14.7	16.4	16.4	16.4	16.5	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8	16.8
	14.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	15.7	15.7	15.3	14.9	14.9	14.9	14.9	14.9
	14.0	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	13.9	13.3	13.3	13.3	13.3	13.3
	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.5	12.9	12.9	12.9	12.9	12.9
L O A D	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.3	13.3	12.6	12.1	11.8	11.8	11.8
	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	13.6	12.9	12.2	11.8	11.3	11.3	11.3
	13.6	13.6	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	14.7	13.3	12.5	11.9	11.4	10.9	10.9	10.9
	13.4	13.4	13.8	14.3	14.3	14.7	14.7	13.1	13.1	12.2	11.5	11.1	10.7	10.7	10.7
	13.4	13.4	13.4	13.4	13.4	13.6	13.6	12.1	12.1	11.6	11.2	10.8	10.5	10.5	10.5
HIGH	13.4	13.4	13.4	13.4	13.1	13.1	13.1	11.8	11.8	11.2	10.7	10.5	10.3	10.3	10.3
	13.4	13.4	13.4	13.4	12.9	12.9	12.5	11.6	11.3	10.5	10.4	10.3	10.2	10.2	10.2
	13.4	13.4	13.4	13.4	12.9	12.9	12.5	11.6	11.3	10.5	10.4	10.3	10.2	10.2	10.2
	13.4	13.4	13.4	13.4	12.9	12.9	12.5	11.6	11.3	10.5	10.4	10.3	10.2	10.2	10.2
	13.4	13.4	13.4	13.4	12.9	12.9	12.5	11.6	11.3	10.5	10.4	10.3	10.2	10.2	10.2

Figura 4.37 Mapa de combustible

Fuente: <https://petrolheadgarage.com>

Sabiendo que los ajustes de combustible representan una desviación con respecto a la mezcla estequiométrica, y a los cuales se tiene acceso desde el dispositivo ELM327, modificando la ecuación (4.2), se calcula el consumo instantáneo de combustible como:

$$FC [g/s] = \frac{MAF(t_i) \cdot STFT_i \cdot LTFT_i}{AF_{ratio}} \cdot \Delta t_i \quad (4.3)$$

Donde:

$STFT_i \equiv$ corrección a corto plazo con respecto a la unidad

$LTFT_i \equiv$ corrección a largo plazo con respecto a la unidad

$\Delta t_i \equiv$ diferencia de tiempo entre valores consecutivos MAF

En general, el número de valores de ajuste de combustible que puede admitir un vehículo equipado con sensor MAF, va desde 1 hasta 4 [17]. Por ello, habitualmente se considera la media de todos los valores.

$$FC [g/s] = \frac{MAF(t_i) \cdot \overline{STFT}_i \cdot \overline{LTFT}_i}{AF_{ratio}} \cdot \Delta t_i \quad (4.4)$$

4.4.2 Hyundai Kona

En este caso, el software usado junto al dispositivo ELM327 para la recopilación de los parámetros más importantes fue el Car Scanner Pro.

Igualmente, el vehículo eléctrico es capaz de proporcionar datos característicos de la ruta tales como la velocidad o el régimen de giro, además de toda la información acerca de la batería, entre la que se puede destacar:

- Estado de carga: conocido habitualmente por sus siglas en inglés SOC (State of Charge), representa la carga de la batería de manera porcentual. Se debe diferenciar entre State of Charge BMS (Battery Management System) y State of Charge display, siendo el primero de ellos el proporcionado por el sistema de gestión de la batería y el segundo el mostrado por pantalla.
- Estado de salud: parámetro denominado como SOH (State of Health), representa en tanto por ciento el nivel máximo de carga de la batería debido al desgaste progresivo de la misma.
- Potencia
- Voltaje
- Intensidad
- Temperatura de los módulos

A continuación, se muestra un ejemplo de obtención de parámetros pertenecientes a la batería del Hyundai Kona eléctrico a través de la aplicación Car Scanner Pro. Más concretamente, se representan: potencia, intensidad, estado de la carga dado por el BMS, y la temperatura máxima de la batería.

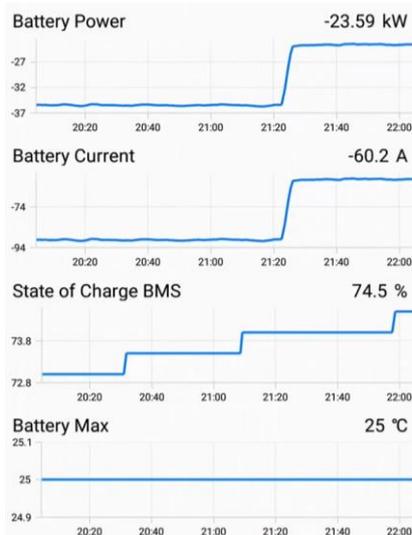


Figura 4.38 Obtención de parámetros del Hyundai Kona a través de la app Car Scanner Pro

Fuente: <https://www.youtube.com>

Todos estos parámetros permiten analizar el comportamiento de la batería, pero sobre todo, los valores de estado de la carga (SOC), son los que posibilitan el análisis energético real en los ciclos de conducción.

En concreto, el consumo energético en kWh por cada kilómetro (Fuel Economy), para este tipo de arquitecturas se puede calcular calcula como:

$$FE = \frac{\Delta SOC \cdot Cap}{d} \quad (4.5)$$

Donde:

$\Delta SOC \equiv$ diferencia del estado de la carga entre el inicio y fin de la ruta

$Cap \equiv$ capacidad total de la batería en kWh

$d \equiv$ distancia total recorrida

4.4.3 Toyota C-HR

Al tratarse de la tecnología híbrida, los parámetros necesarios para conocer el consumo energético del vehículo, son tanto del motor de combustión interna alternativo como del motor eléctrico y su batería.

De esta manera, aplicando las ecuaciones (4.4) y (4.5) se puede conocer el consumo real de ambas tecnologías y validarlo con el modelo creado.

Más concretamente, este modelo de vehículo, se enmarca dentro de la configuración híbrido serie-paralelo, lo que significa que tanto el motor térmico, como el eléctrico proporcionan tracción de forma separada, además de poder cargar las baterías a través del primero de ellos.

El predecir cuándo va a entrar en operación cada tipo de tecnología es una tarea complicada, puesto que ello dependerá de las configuraciones del hardware sobre las estrategias de control del tren motriz.

No obstante, la operación básica de este tipo de configuración en condiciones normales de conducción suele asemejarse al siguiente diagrama.

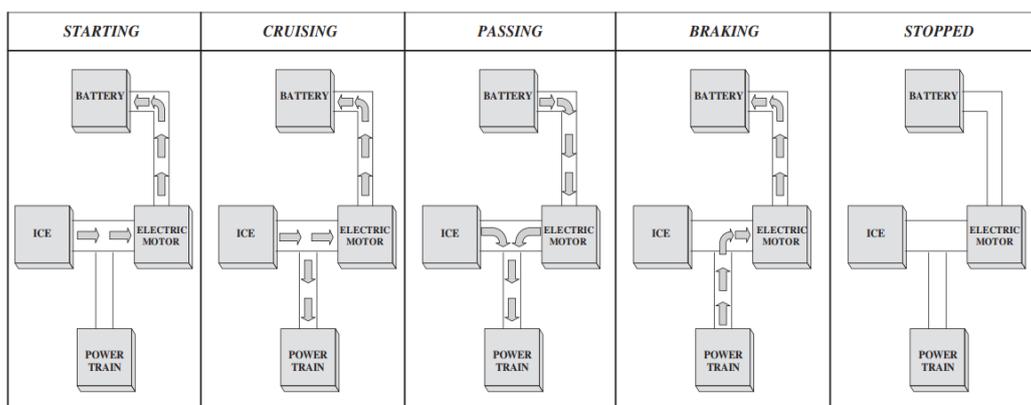


Figura 4.39 Operación básica de un HEV serie-paralelo

Fuente: <https://pdf.sciencedirectassets.com>

Por tanto, siguiendo la figura anterior y conociendo los datos recogidos en los ciclos de conducción, se puede determinar en qué momentos está operando cada uno de los motores y de qué manera.

- Modo arranque: habrá un consumo másico de aire (y por tanto de combustible), además de un aumento del SOC.
- Modo crucero: tiene lugar cuando hay consumo másico de aire, un aumento del SOC y, además, el vehículo se encuentra en movimiento.
- Modo adelantamiento: provocará consumo másico de aire y un descenso del SOC.
- Modo frenado: solamente se obtiene un aumento del SOC con el vehículo en movimiento.
- Modo estacionado: el vehículo se encuentra apagado.

4.5 FastSim

Para llevar a cabo la simulación de los ciclos de conducción reales y su posterior comparación y validación, se ha utilizado el software de simulación FastSim cuyas siglas en inglés significan Future Automotive Systems Technology Simulator.

Este software es de libre acceso y desde 2011 se ha implementado en Microsoft Excel como entorno de trabajo, pudiéndose descargar en la página web del organismo gubernamental National Renewable Energy Laboratory de los Estados Unidos.

Más concretamente, FastSim es una herramienta avanzada en el análisis de diferentes estructuras de vehículos y sistemas de propulsión (powertrain), el cual trabaja a través de modelos físico-matemáticos consiguiendo proporcionar un enfoque rápido con el fin de comparar motores, eficiencias, costos e incluso estimar los impactos de mejoras tecnológicas. Además, todo ello teniendo en cuenta y modelando cada uno de los componentes del vehículo al nivel más alto posible, pero sin dejar de ser una herramienta precisa, fácil e intuitiva.

Para dicho modelado, es necesario introducir en el software diversos parámetros que definen las características del vehículo (el motor, el almacenamiento de combustible, las ruedas...).

4.5.1 Parámetros de entrada

En primer lugar, los parámetros necesarios para el modelado del vehículo son:

- Coeficiente drag o de resistencia aerodinámica al avance (C_D): se trata de un valor adimensional que cuantifica la resistencia que presenta un objeto a moverse por un fluido, por lo que dependerá de la fuerza de resistencia (F_D), de la densidad del fluido (ρ), así como de la velocidad del objeto relativa al fluido (v) y el área frontal (A_f). En automóviles modernos suele situarse entre 0,25 y 0,40.

$$C_D = \frac{F_D}{A_f \frac{\rho v^2}{2}} \quad (4.1)$$

- Área frontal (m²): calculada a través de la siguiente expresión.

$$A_{frontal} = 0,8 \cdot H101 \cdot W103 \quad (4.2)$$

Siendo 0,8 un factor de corrección establecido por la norma SAE J1263 de febrero de 1996 y cuyo objetivo es tener en cuenta el área frontal vacía de la parte inferior del vehículo. Por su parte, H101 y W103 son las medidas de alto y ancho del vehículo de acuerdo con la norma SAE J1100 de junio de 1984.

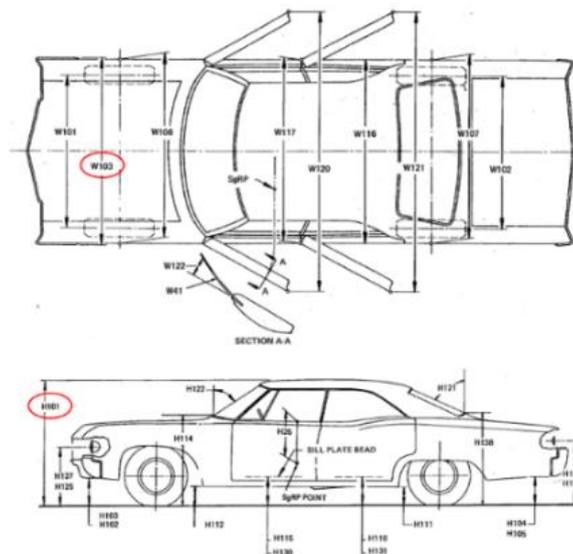


Figura 4.40 Medidas vehículo

Fuente: <https://law.resource.org>

- Peso en vacío (kg): medida que incluye el peso total del vehículo contando con todo el equipo que normalmente se usa cuando está funcionando, pero excluyendo el peso del conductor y pasajeros.
- Peso de carga (kg): tiene en cuenta lo excluido en el peso en vacío
- Altura del centro de gravedad (m)
- Fracción de distribución de peso sobre el eje motriz sin movimiento
- Distancia entre ejes o batalla del vehículo (m).

En cuanto a los primeros cuatro parámetros expuestos, juegan un papel importante en las ecuaciones de carga en carretera y son usados para estimar la potencia necesaria para llevar a cabo el ciclo. Por su parte, el resto de parámetros reflejan las limitaciones de tracción en el ciclo de conducción, así como en la prueba de aceleración.

En segundo lugar, los parámetros necesarios para modelar el depósito de combustible son:

- Potencia de almacenamiento de combustible (kW)
- Tiempo de almacenamiento a plena potencia (s)
- Energía de almacenamiento de combustible (kWh)
- Coeficiente de masa (kWh/kg): energía específica del combustible

Con esto cuatro parámetros se consigue estimar las limitaciones en cuanto a autonomía, potencia y la implicación de la masa del depósito en función del tipo de combustible utilizado (líquido o gas).

En tercer lugar, para el modelado del motor térmico es necesario la determinación de cuatro parámetros, así como la curva de eficiencia que variará según el tipo de vehículo estudiado.

- Potencia (kW)
- Tiempo a plena potencia (s)
- Peso base del motor (kg)
- Potencia específica (kW/kg)

La potencia y el tiempo necesario hasta alcanzar la máxima potencia limitan el rendimiento del motor, mientras que el peso base y la potencia específica son utilizados para evaluar la masa del mismo en función de la potencia.

En este punto, FastSim estima la eficiencia del motor de combustión mediante su característica curva de eficiencia frente a potencia. Para ello, es necesario diferenciar entre cinco posibles tipos, pues cada uno de ellos dispondrá de su curva.

- Encendido por chispa
- Atkinson: motor de encendido por chispa que usa un ciclo Atkinson
- Diesel
- Pila de combustible
- Diesel híbrido

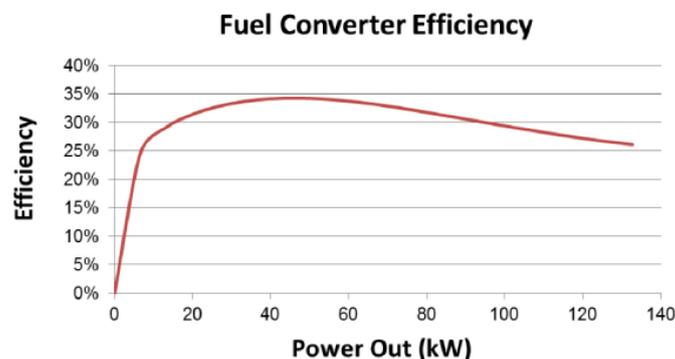


Figura 4.41 Curva de eficiencia frente a potencia de un motor térmico en FastSim

Fuente: <https://www.nrel.gov>

FastSim posee una sola curva de eficiencia para cada tipo de motor, la cual escala para diferentes potencias. Con ello se consigue representar la mayoría de los vehículos con motor de combustión interna con un margen de error, según el propio software, del 5%.

En la siguiente figura se muestra una comparativa entre las curvas de eficiencia para motores de combustión interna de diferentes potencias (100 y 125 kW), lo cual demuestra el buen escalado y ajuste para ambos casos.

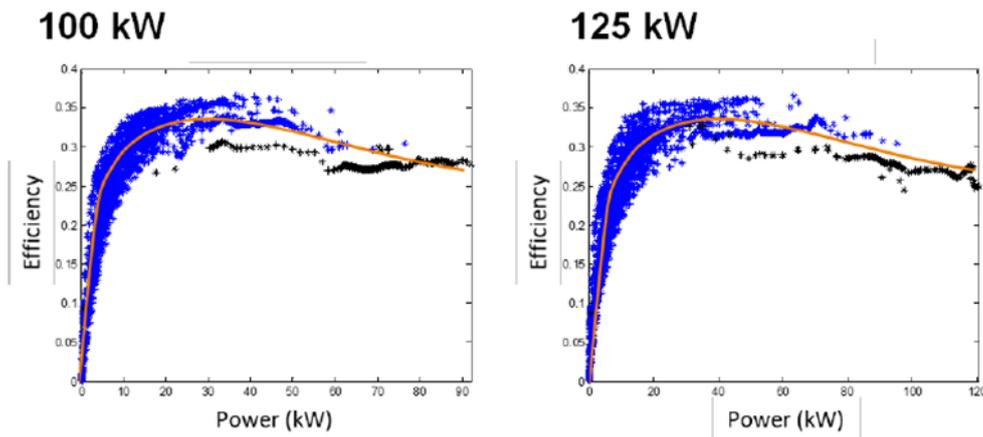


Figura 4.42 Curvas de eficiencia frente a potencia para dos motores diferentes

Fuente: <https://www.nrel.gov>

Además, se puede comprobar la exactitud de las curvas desarrolladas por FastSim a través de los datos experimentales de un mapa motor, en el que se representan par frente a velocidad además de líneas de isot potencia e isoeficiencia.

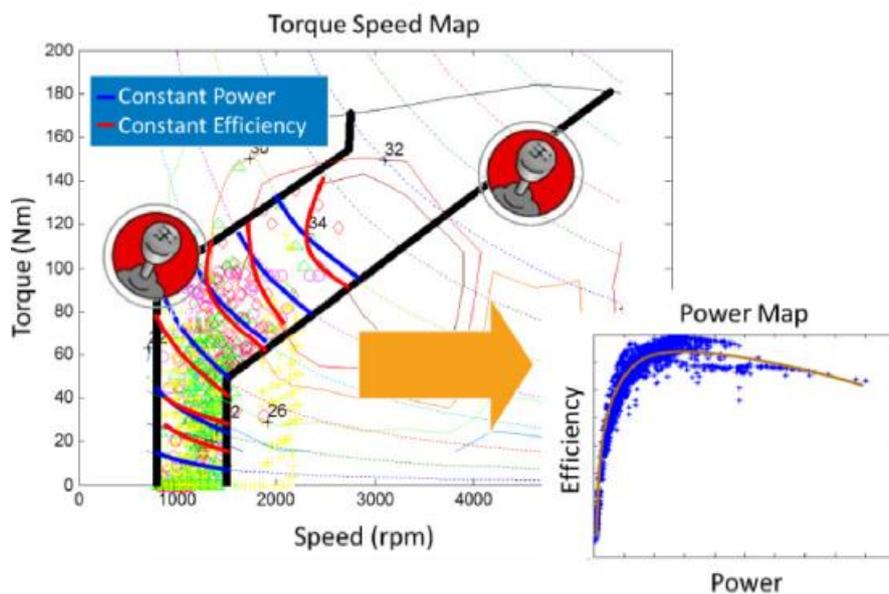


Figura 4.43 Obtención de la curva eficiencia-potencia a través de un mapa motor

Fuente: <https://www.nrel.gov>

En cuanto a los vehículos eléctricos, su motor se modela a través de los mismos cuatro parámetros y su curva de eficiencia. Igualmente, el enfoque basado en la curva de eficiencia-potencia demuestran que el modelo simplificado supone un buen ajuste con los datos experimentales de un mapa motor.

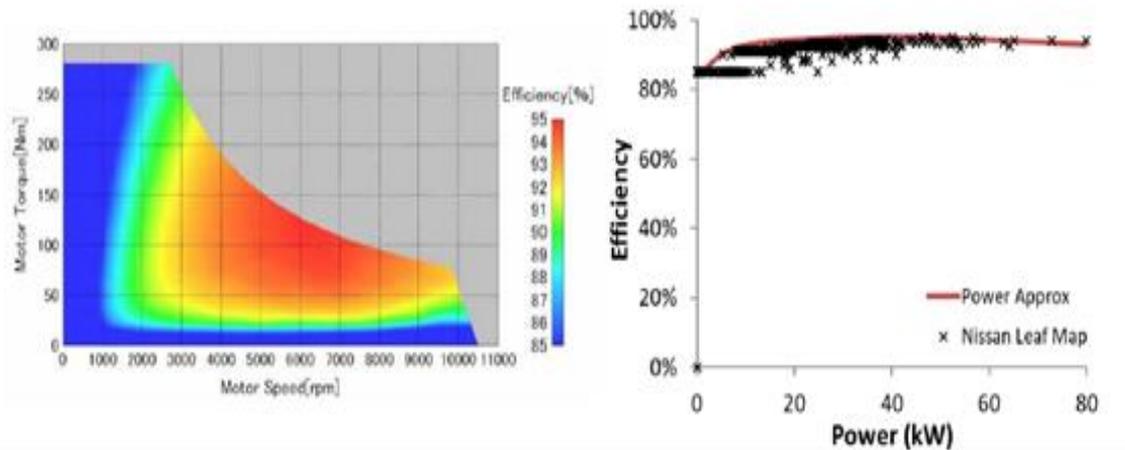


Figura 4.44 Obtención de la curva eficiencia-potencia vehículo eléctrico a través de un mapa motor

Fuente: <https://www.nrel.gov>

Por su parte, la batería de un BEV, HEV o PHEV, FastSim es capaz de modelarla a través de:

- Potencia (kW)
- Energía (kWh)
- Peso (kg)
- Energía específica (kWh/kg): para baterías de ion litio suele ser en torno a 8 mientras que para baterías de níquel metalhidruro (NiMH) suele rondar 44
- Eficiencia de ida y vuelta
- Dos coeficientes de vida de la batería (A y B)

Además de esto, el software supone una eficiencia constante, pues parte de la premisa que, en baterías nuevas, no se producen caídas de tensión significativas sobre el estado de carga.

Otra parte importante del modelado son las ruedas, las cuales son caracterizadas por los siguientes parámetros utilizados en las ecuaciones de las pruebas de carga en carretera además de los cálculos de límites de tracción.

- Inercia ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$)
- Número de ruedas
- Coeficiente de resistencia a la rodadura
- Coeficiente de rozamiento
- Radio: este parámetro es calculado en función de la medida del neumático que tenga el vehículo como:

$$Radio (m) = \left(\frac{D}{2} \cdot 0,0254\right) + \left(\frac{A \cdot B}{1 \cdot 10^5}\right) \quad (4.3)$$

Donde:

A ≡ ancho del neumático en milímetros

B ≡ ancho del neumático en milímetros

$C + D$ ≡ diámetro de la llanta en pulgadas

E ≡ índice de carga

F ≡ índice de velocidad



Figura 4.45 Significado de la nomenclatura de neumáticos

Fuente: <https://www.nrel.gov>

La estrategia de gestión de la energía es otro aspecto que tiene en cuenta FastSim y es indispensable para el control tanto de la batería como del motor eléctrico. Sus parámetros son:

- Carga mínima de la batería
- Carga máxima de la batería
- Porcentaje de descarga del almacenamiento de energía (ESS) destinado a mejorar la eficiencia del motor térmico
- Porcentaje de carga del almacenamiento de energía (ESS) destinado a mejorar la eficiencia del motor térmico
- Velocidad a partir de la cual la carga de la batería reservada para contribuir en las aceleraciones es cero
- Porcentaje de carga de la batería destinado a contribuir en las aceleraciones
- Porcentaje de carga de la batería destinado a cargas accesorios altas durante ciclos con tiempos de inactividad altos
- Velocidad a partir de la cual el motor térmico arranca (mph)
- Potencia a partir de la cual el motor térmico arranca (kW)

En último lugar, con el objetivo de obtener un modelo fiel, se determinan otros parámetros complementarios como son:

- Eficiencia del alternador (solo para convencionales)
- Eficiencia del cargador
- Cargas auxiliares (kW)

- Peso de la transmisión (kg)
- Eficiencia de la transmisión
- Multiplicador del peso de componentes: factor de seguridad habitualmente establecido entre 1,4-1,5
- Máxima regeneración en el frenado: de manera genérica se cumple el comportamiento mostrado en la siguiente gráfica

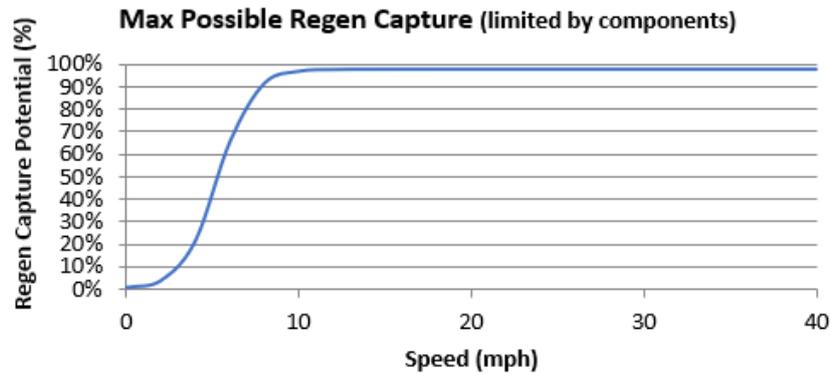


Figura 4.46 Eficiencia de la regeneración en frenada frente a la velocidad

Fuente: <https://www.nrel.gov>

Todos estos parámetros de entrada se especifican a través de la interfaz gráfica de usuario (GUI) que recorre cada uno de los componentes comentados y cuyo proceso se explica en el Anexo I.

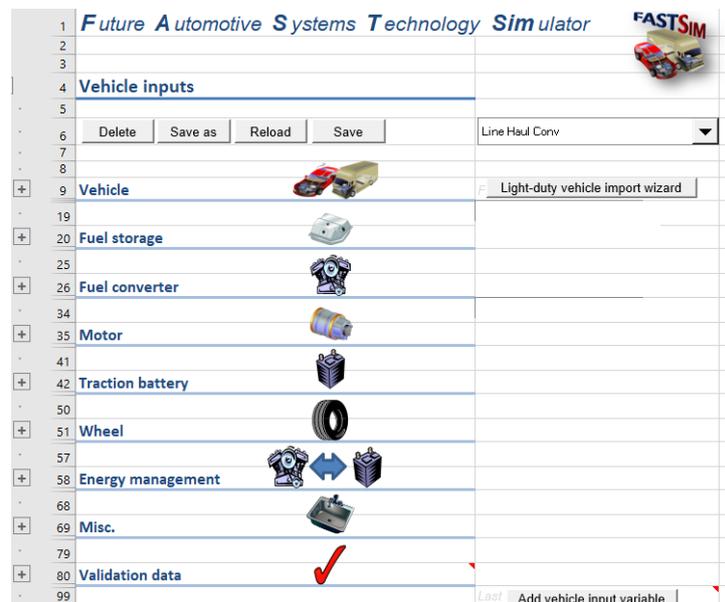


Figura 4.47 Interfaz gráfica para establecer los parámetros de entrada

Fuente: Elaboración propia

5 RESULTADOS DE LA VALIDACIÓN

Una vez configurado los modelos según lo expuesto en el Anexo I, en este apartado se procede a la validación de los mismos a través de los datos obtenidos experimentalmente.

De la misma manera, se comprueba qué tendencias reproduce mejor el modelo creado y las diferencias con respecto a los consumos medios homologados por el fabricante.

5.1 Opel Corsa D 1.2

El vehículo convencional a estudiar se trata de un modelo fabricado en el año 2011, por lo que el ciclo de homologación del mismo fue el NEDC.

Por ello, para conocer la fidelidad del modelo creado, la primera validación que se realizó fue la simulación de dicho ciclo, obteniéndose valores de consumos urbano, extraurbano y medio.

En la siguiente tabla se recogen los resultados extraídos de la simulación (incluido el tiempo necesario para realizar un 0-100 km/h), así como los valores oficiales homologados por el fabricante.

Tabla 5.1 Validación del modelo a través del ciclo NEDC Opel Corsa D 1.2

	Consumo urbano (L/100km)	Consumo extraurbano (L/100km)	Consumo medio (L/100km)	Tiempo 0-100 km/h (s)
NEDC modelado	6,70	4,72	5,58	14,8
NEDC homologado	6,40	4,30	5,10	13,6
Error (%)	4,69	9,77	9,41	8,82

Fuente: Elaboración propia

Se observa que, a pesar de tratarse de valores muy cercanos, los resultados obtenidos mediante el modelo se encuentran por encima de los homologados en todos los casos, lo que refleja los datos tan optimistas de consumos proporcionados por el fabricante; un aspecto de difícil obtención, incluso con el modelo.

Esto se puede ver claramente en la siguiente imagen, en la que se representa conjuntamente valores homologados y modelados.

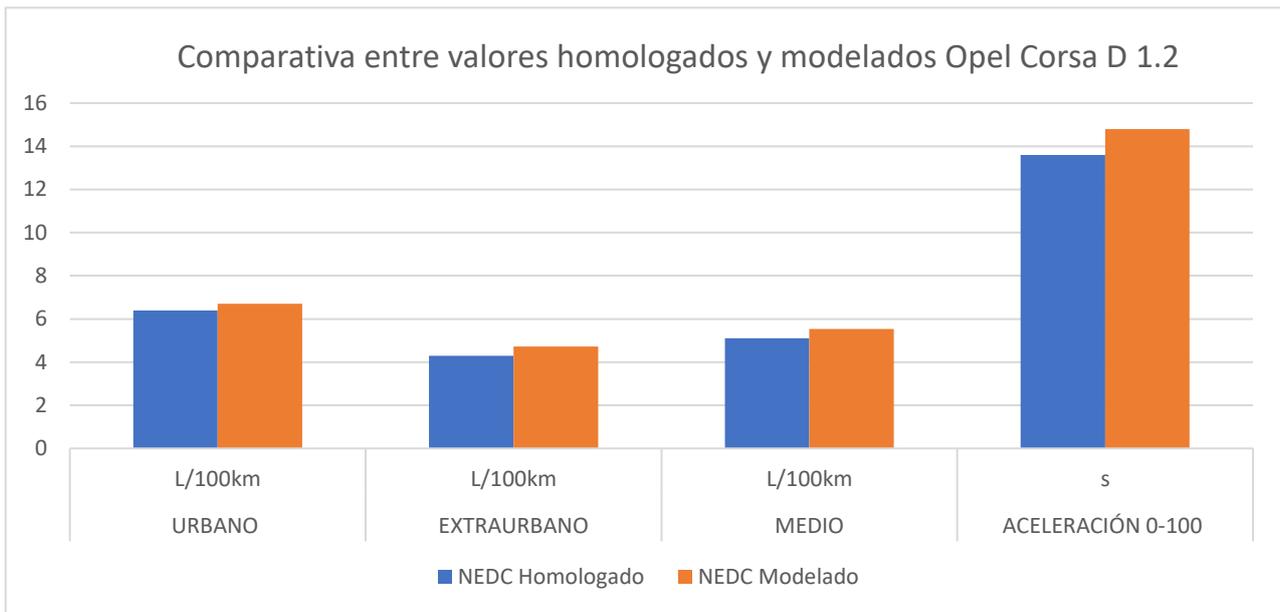


Figura 5.1 Comparativa entre valores homologados y modelados Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Debido a ello, y considerando aceptable un margen de error de hasta un $\pm 10\%$, se puede concluir que el modelo creado es válido para el estudio.

Asimismo, en la siguiente representación se muestran los valores tanto homologados como modelados, además de una barra de error de $\pm 10\%$ sobre los datos oficiales. De esta manera, al igual que en la Tabla 5.1, se puede observar que ninguno de los resultados del modelo excede dicho porcentaje de error.

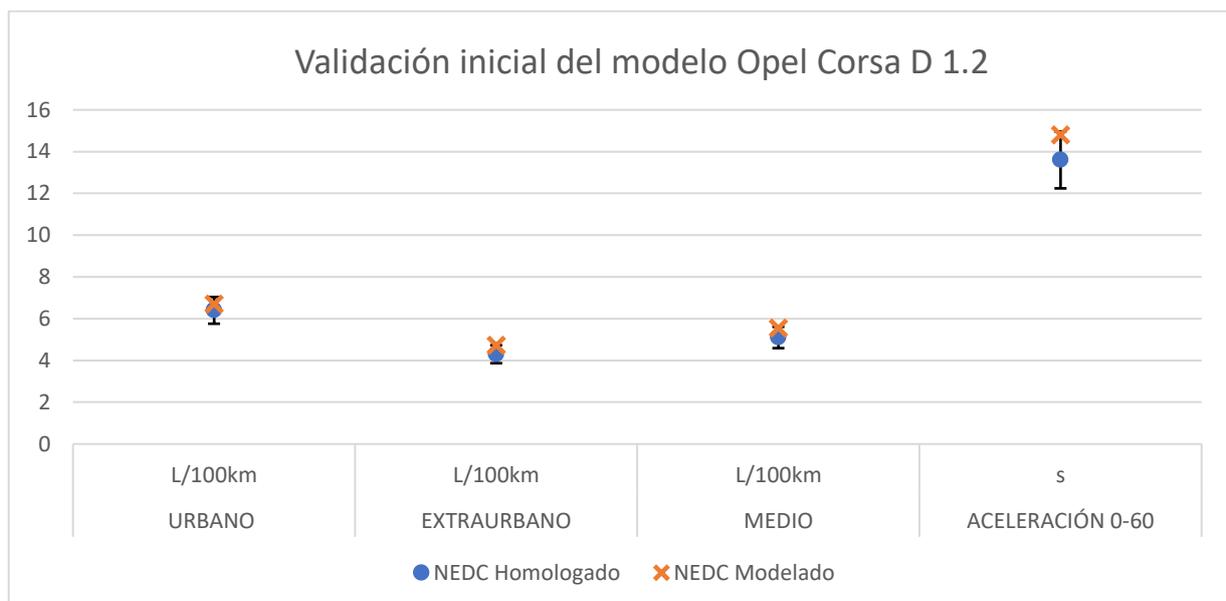


Figura 5.2 Validación inicial Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, tras la validación inicial del modelo, el cálculo del consumo instantáneo se llevó a cabo mediante la ecuación (4.4), obteniendo para cada ciclo de conducción un perfil de consumos y, por tanto, un consumo medio.

Igualmente, por medio del modelado en FastSim se adquieren los mismos valores, lo que permite realizar la comparativa expuesta en la Tabla 5.2 de a continuación.

Tabla 5.2 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2

	Consumo medio medido (L/100km)	Consumo medio modelado (L/100km)	Error (%)
Ciclo de conducción 1	5,97	5,75	3,72
Ciclo de conducción 2	6,33	6,16	2,71
Ciclo de conducción 3	7,27	7,49	3,03
Ciclo de conducción 4	9,98	10,27	2,94
Ciclo de conducción 5	9,78	9,90	2,99
Ciclo de conducción 6	10,22	11,21	9,61

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, los valores obtenidos mediante el modelado se aproximan bastante a los calculados a través de datos experimentales, suponiendo errores en torno al 3%, a excepción del ciclo de conducción 6, el cual se sitúa en un 9,61%.

Representando los consumos medios modelados frente a los medidos, junto a una línea de 0% error, se puede distinguir para qué ciclos de conducción el modelo sobrestima, o en su defecto, subestima el consumo real medido.

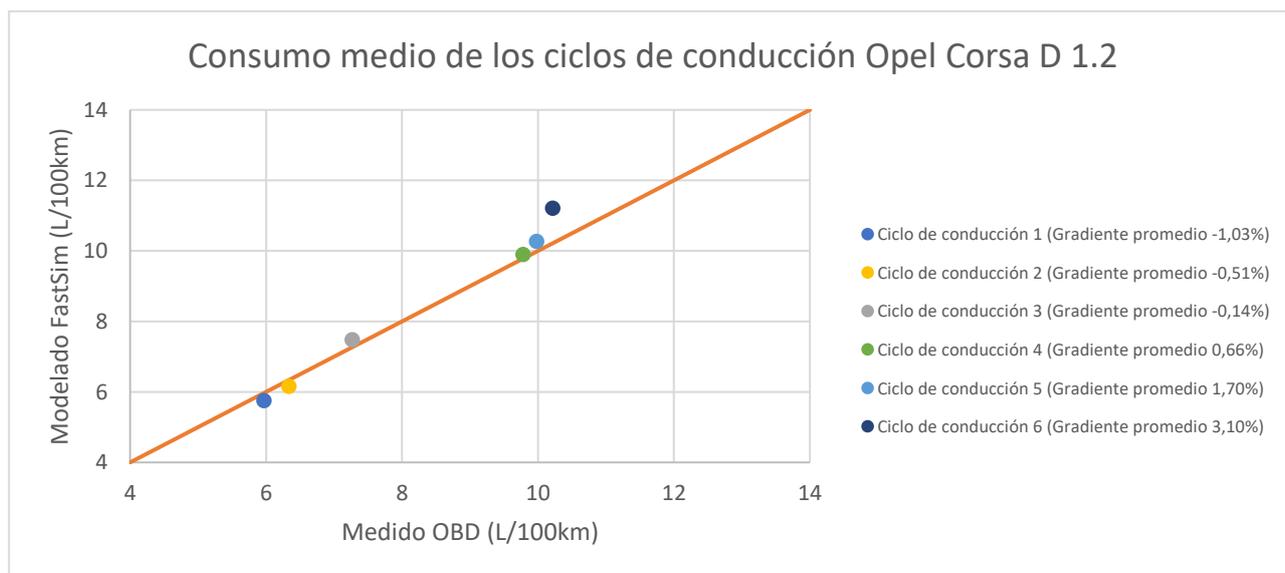


Figura 5.3 Consumo medio de los ciclos de conducción Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

De la representación se extrae que para los ciclos de conducción 1 y 2, el modelo estima un consumo medio inferior al medido, lo cual coincide con ciclos de gradiente medio negativo.

Por su parte, en los ciclos 3, 4, 5 y 6 ocurre lo contrario, es decir, el modelo sobrestima el consumo, siendo estos ciclos de conducción característicos de gradiente medio neutro (ciclo 3) o positivo.

Por tanto, se observa que el modelo es representativo en un amplio espectro de posibles gradientes medios. Además, en condiciones de conducción no cotidianas, como puede ser el ciclo 6, en el cual no se puede cumplir con la dinámica obligatoria en ciclos de homologación RDE debido a su exigencia, el modelo es capaz de predecir un gasto energético con un porcentaje de error inferior al 10% (1 litro a los 100 kilómetros) con respecto a la realidad.

Estudiando el perfil de consumo instantáneo dado por FastSim y comparándolo con el obtenido experimentalmente, se extrae que dichas desviaciones provienen principalmente de aquellas zonas en las que se produce un significativo cambio de gradiente de carretera (ver Figura 5.4).

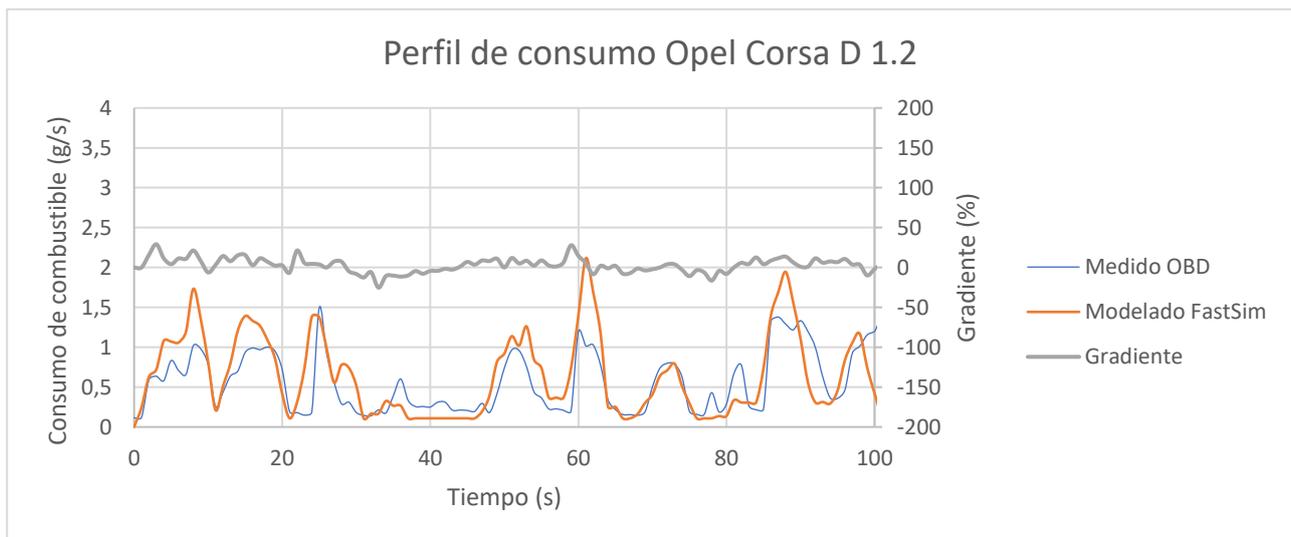


Figura 5.4 Perfil de consumo Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Por ello, para evitar obtener mayores alteraciones en el perfil de consumo, se ha llevado a cabo un promediado móvil del gradiente, pudiendo conseguir así una tendencia más suavizada y real.

Por otra parte, como era de esperar, a través de la Figura 5.3 se observa la tendencia creciente del consumo de combustible a medida que el gradiente medio de carretera aumenta. Más concretamente, comparando ciclos completamente distintos como son el 1 y el 6, se observa un aumento en la estimación del consumo de prácticamente el doble.

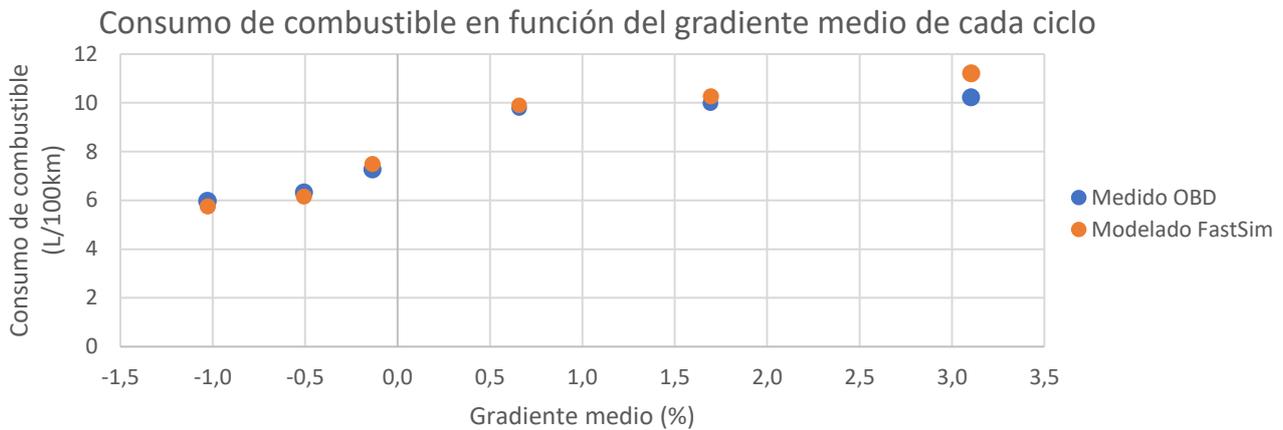


Figura 5.5 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, el gradiente de carretera es uno de los principales factores por los que el consumo energético del vehículo aumenta. Esto se debe a que en carreteras cuyo gradiente es positivo, la carga exigida al motor es mayor en comparación a carreteras más planas o de gradiente negativo. Igualmente, a mayores velocidades, el consumo es mayor, por lo que graficando dichas tres variables se obtiene la siguiente representación.

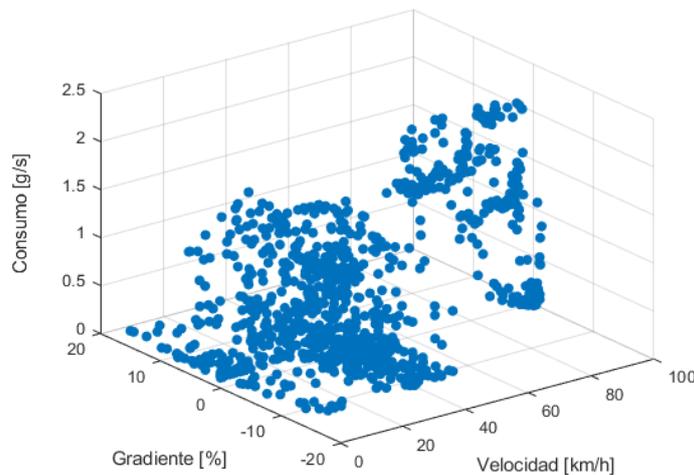


Figura 5.6 Consumo de combustible frente a gradiente ciclo Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Cabe destacar que el mayor consumo homologado según el NEDC es el correspondiente a una conducción urbana, siendo de 6,40 L/100km. Haciendo una comparación con los estudios realizados, este valor solamente sería representativo para los ciclos 1 y 2, mientras que se tratan de conducciones mayoritariamente en carreteras con desnivel negativo (muy poca carga) y con partes tanto urbana como extraurbana y autopista.

Siendo así, y conociendo la peculiar orografía de carreteras de la Isla de Tenerife, los consumos homologados por el fabricante y, por tanto, el ciclo de homologación NEDC, quedan en evidencia cuando se conocen estos valores.

Por último, tal y como se ha comentado, FastSim estima la operación del tren de potencia a través de su curva de eficiencia frente a potencia. En función de la tipología del mismo, el software es capaz de escalar la curva y reproducir un perfil de potencia y su vez, el perfil de consumo anteriormente visto.

En la Figura 5.7 se puede observar el perfil modelado de aporte de potencia instantáneo llevado a cabo en el ciclo de conducción 1, en el que los mayores valores de potencia coinciden con las aceleraciones más notables del ensayo.

Por su parte, en la Figura 5.8 se representa el mapa de eficiencia motor, en el que se observan mínimos de eficiencia en torno al 14% y máximos alrededor de 36%, lo cual es habitual en arquitecturas MEP como la estudiada.



Figura 5.7 Potencia desarrollada durante el ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

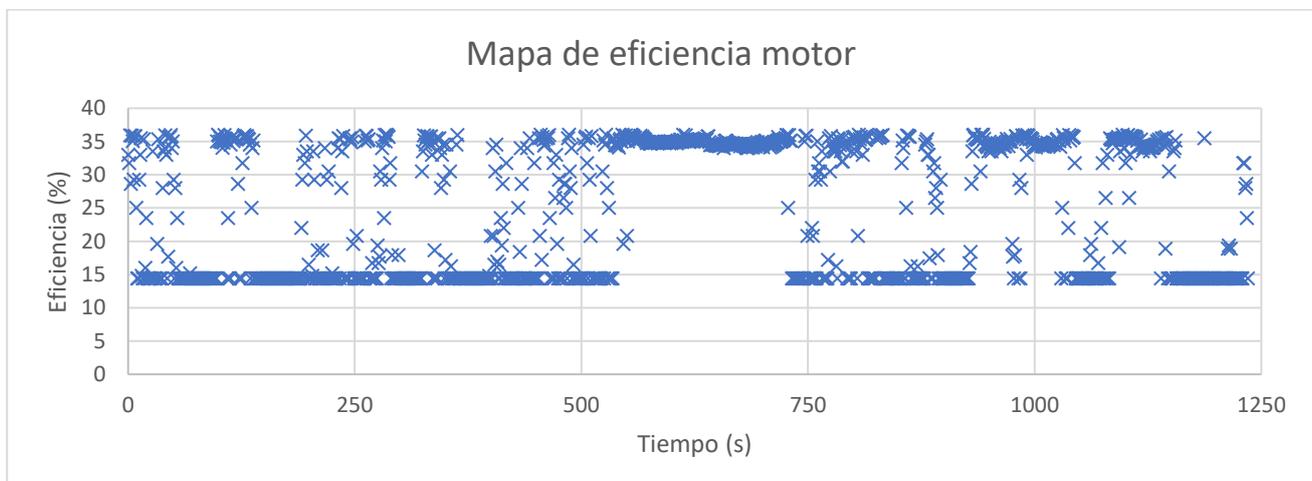


Figura 5.8 Mapa de eficiencia motor durante el ciclo de conducción 1 Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Se ve claramente que durante el periodo de tiempo de 500-750 segundos, el motor opera en valores de eficiencia alta, lo cual corresponde a potencias situadas en torno a 15-35kW.

Observando ahora la curva típica de par frente a potencia del Opel Corsa D 1.2 obtenida en un banco de rodillos, se puede distinguir que, para el rango de potencia descrito, si se produjera a plena carga, el par se situaría en 90-110Nm, y el régimen de giro de 2500-3500rpm.

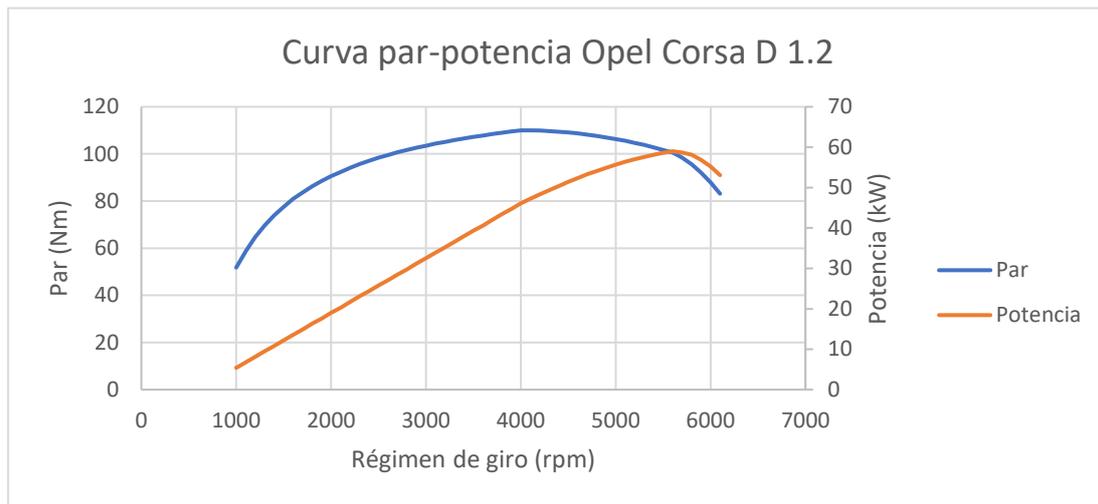


Figura 5.9 Curva par-potencia Opel Corsa D 1.2

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, a través de los datos grabados del puerto OBDII, se puede comprobar que el régimen de giro durante el intervalo de tiempo estudiado se sitúa entre 2500-3250 rpm (ver Figura 5.10).



Figura 5.10 Perfil de régimen de giro 500-700s ciclo de conducción 1

Fuente: Elaboración propia

Con todo ello, y sabiendo que las conducciones no se producen normalmente a plena carga, se puede estimar a través del mapa de eficiencia que el polo

económico, es decir, el punto de operación de menor consumo específico y por tanto de mayor eficiencia, se situará bajo la curva de par máximo, cercano a la línea de plena carga, entre el rango de régimen de giro comentado, lo cual suele ser habitual para motores de características similares.

Para regímenes menores, el llenado y el vaciado de los cilindros no resulta óptimo a causa de la escasez de inercia que poseen los gases producto de la combustión. Asimismo, para mayores revoluciones, aparecen numerosas dificultades como pueden ser: insuficiente llenado de aire de los cilindros, inadecuada evacuación de los gases de escape, mezcla aire-combustible incompleta, avance de inyección insuficiente entre otros, lo cual se traduce en puntos de eficiencia menores.

Por tanto, se concluye que el modelo reproduce con bastante precisión la realidad a través del escalado de la curva eficiencia-potencia, pudiendo obtener un perfil de consumos capaz de estimar el gasto medio energético del vehículo en diferentes dinámicas y situaciones de conducción.

Además, a través del mapa de eficiencia modelado y la curva de par-potencia experimental, así como el perfil de régimen de giro se ha verificado que el modelo predice perfectamente los momentos de máxima eficiencia, pudiendo localizar de manera aproximada el polo económico.

5.2 Hyundai Kona

El Hyundai Kona es un vehículo eléctrico de batería fabricado en el año 2021, por lo que el ciclo de homologación al que fue sometido es el WLTP.

En este caso, el consumo homologado viene expresado en kilovatios hora (kWh) a los 100 kilómetros, y a diferencia de los vehículos convencionales de combustión, el fabricante solo proporciona un dato de consumo combinado e iniciando la ruta con un 100% de SOC.

En la siguiente tabla se muestran los resultados extraídos de la simulación del ciclo WLTP y de aceleración 0-100km/h tras la configuración del modelo. Conjuntamente, también se indican los valores homologados por el fabricante, así como el porcentaje de error cometido por el modelo.

Tabla 5.3 Validación del modelo a través del ciclo WLTP Hyundai Kona

	Consumo combinado (kWh/100km)	Tiempo 0-100 km/h (s)
WLTP modelado	16,7	8,2
WLTP homologado	15,4	7,6
Error (%)	8,44	7,89

Fuente: Elaboración propia

Igualmente que los resultados recabados en el modelo anterior para el vehículo convencional, los consumos homologados del Hyundai Kona por el ciclo WLTP, son inferiores a los obtenidos a través del modelo.

A continuación, se muestra un gráfico de columnas donde se diferencia claramente las pequeñas desviaciones existentes entre los valores homologados y modelados.

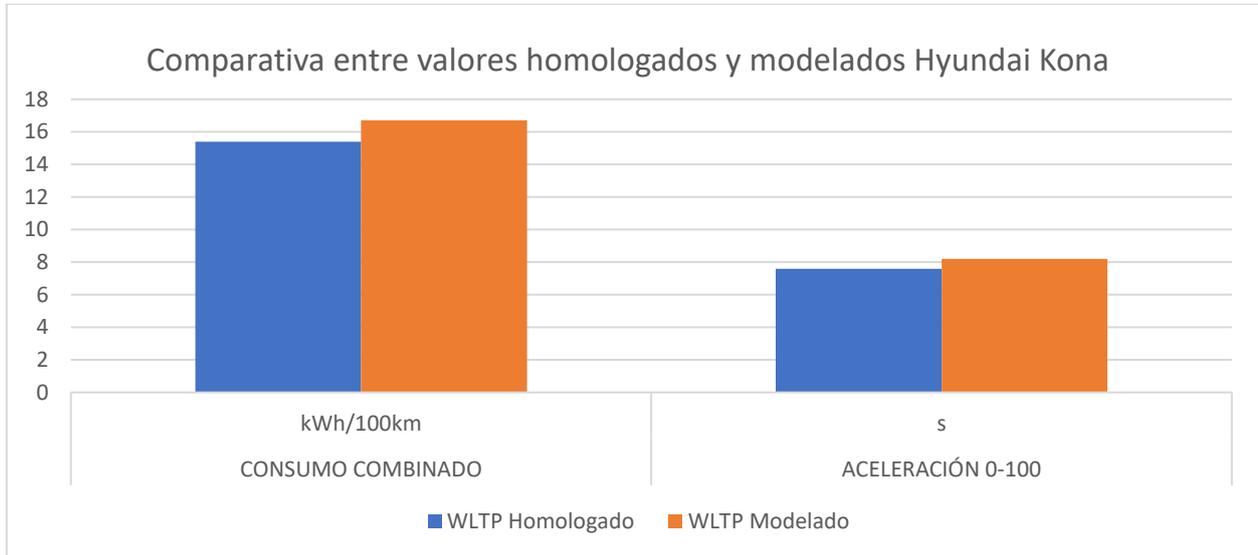


Figura 5.11 Comparativa entre valores homologados y modelados Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

No obstante, teniendo en cuenta un criterio de error aceptable de $\pm 10\%$, se puede considerar que el modelo creado a través de FastSim es útil para el estudio. Esto se puede comprobar a través de la Tabla 5.3 donde se indican numéricamente los valores de error, así como mediante la Figura 5.12, en la que de manera gráfica se puede apreciar que ningún valor modelado excede la barra de $\pm 10\%$ de error.

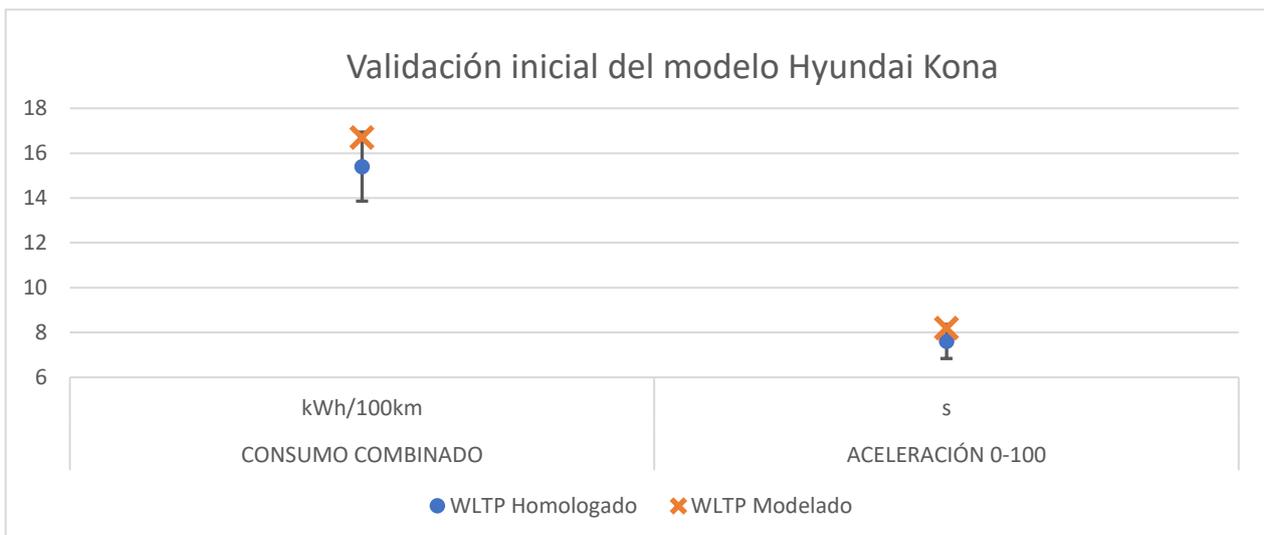


Figura 5.12 Validación inicial Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, el estudio de este tipo de arquitectura consta de 4 ciclos de conducción, a través de los cuales se han podido extraer los siguientes resultados.

Tabla 5.4 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Hyundai Kona

	Consumo medio medido (kWh/100km)	Consumo medio modelado (kWh/100km)	Error (%)
Ciclo de conducción 1	10,95	9,77	10,77
Ciclo de conducción 2	13,28	12,30	7,39
Ciclo de conducción 3	22,39	23,58	5,28
Ciclo de conducción 4	23,05	24,60	6,71

Fuente: Elaboración propia

En este caso, el consumo medio, tanto modelado como experimental, se ha podido calcular a través de la ecuación (4.5), en función del perfil del estado de la carga adquirido mediante el modelado o registrado en los ensayos respectivamente.

Por otra parte, tras analizar los resultados, se observa que para los ciclos 1 y 2 (ciclos de gradiente medio negativo), el modelo nuevamente subestima el consumo energético, mientras que para los ciclos de conducción 3 y 4 (ciclos de gradiente medio positivo), sucede lo contrario.

Esto se observa claramente en la siguiente imagen, donde se representan los consumos medios modelados frente a los medidos sobre una línea de error del 0% de error.

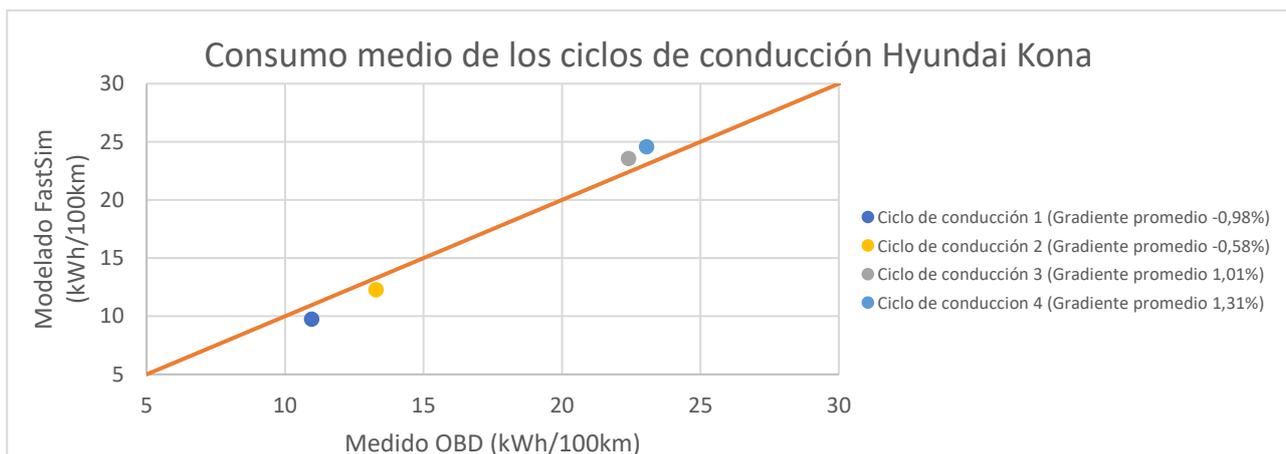


Figura 5.13 Consumo medio de los ciclos de conducción Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, en contraste con el vehículo convencional, se aprecia claramente a través de los porcentajes de error, que las mayores desviaciones se producen en aquellos ciclos de gradiente medio negativo.

Para analizar de dónde proviene dicha divergencia, a continuación, se muestra una comparativa entre el perfil del estado de carga modelado y medido a través del puerto OBDII, además del gradiente medio del ciclo cada 300 segundos.

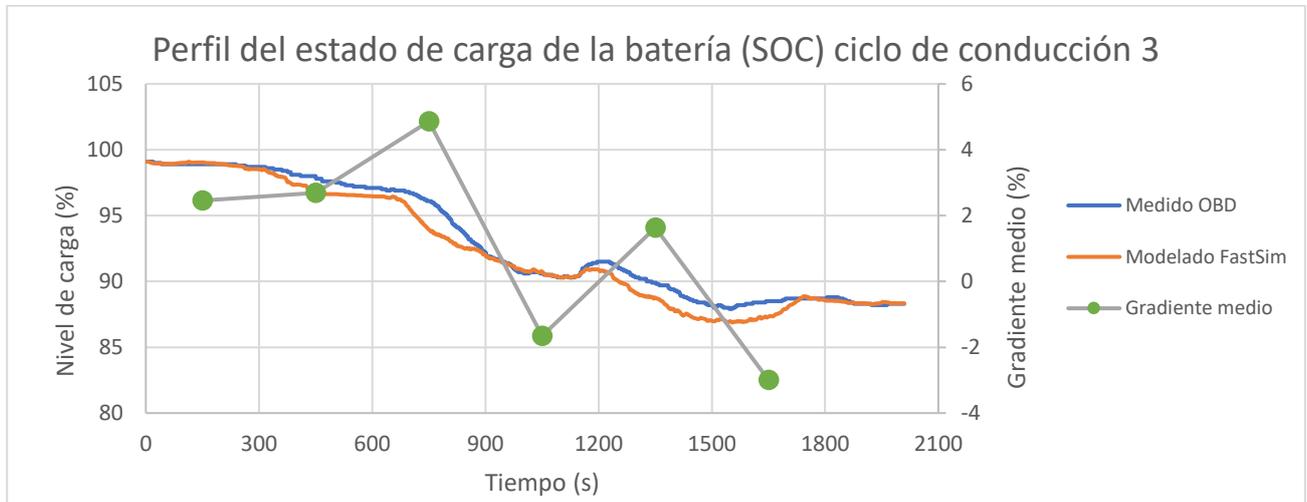


Figura 5.14 Perfil del estado de carga (SOC) ciclo de conducción 3

Fuente: Elaboración propia

Como se puede apreciar, el modelo reproduce con exactitud la tendencia del perfil del estado de carga de la batería del vehículo. Sin embargo, se observa que en los tramos donde se produce un cambio de gradiente medio desde valores positivos a negativos, las curvas tienden a separarse. Por consiguiente, esto ocurre en momentos en los que la batería aumenta su SOC por medio de las frenadas regenerativas.

En esta ocasión, las diferencias más notables las encontramos en el periodo de 600 a 900 y de aproximadamente 1100 a 1600 segundos, por lo que, para una mejor comprensión, en la Figura 5.15 se muestra el perfil de velocidad correspondiente.



Figura 5.15 Perfil de velocidad ciclo de conducción 3 Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

De la Figura 5.15 se desprende que, tanto el intervalo de tiempo de 600 a 900 como de 1100 a 1600 segundos, se corresponden con momentos mayoritariamente de frenada, lo cual se traduce en una posibilidad del aumento de SOC.

Sin embargo, en la Figura 5.14 se ve claramente que la recuperación de energía a partir de las desaceleraciones se produce de manera más eficiente en la realidad que en el modelado.

Esto se puede entender sabiendo que el vehículo estudiado posee un sistema predictivo de frenado regenerativo, a partir del cual se prioriza la inercia, pero siendo capaz de modificar la intensidad de frenada en función del entorno.

Se trata de un sistema controlado mediante un software, encargado de analizar las circunstancias de conducción para adaptar su respuesta y cuya premisa es la de elevar la autonomía del vehículo.

A ello se le suma la configuración de los niveles de frenado regenerativo que incorpora el vehículo; un sistema que ayuda a mantener el estado de salud de la batería (SOH) en buenas condiciones.

Este puede ser ajustado por el conductor accionando las levas situadas tras el volante (ver Figura 5.16) y pudiendo elegir desde el nivel 0 hasta el 3, incrementándose progresivamente la carga de la batería y, por tanto, el frenado del coche al liberar el pedal del freno.

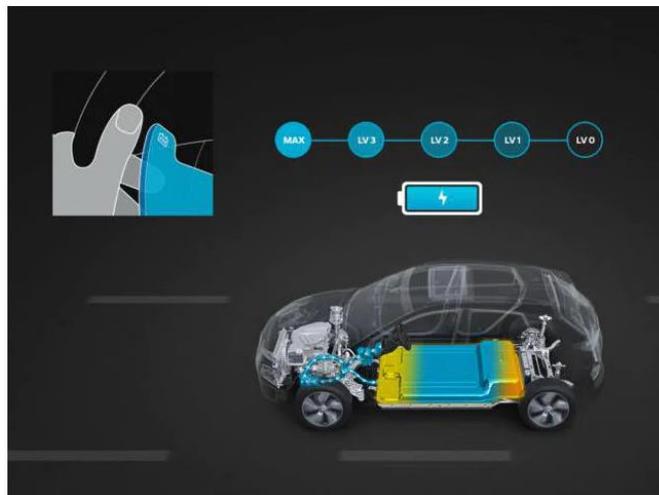


Figura 5.16 Frenado regenerativo ajustable Hyundai Kona

Fuente: <https://www.hyundai.com>

En cambio, tal y como se ha visto, FastSim modela la eficiencia de la regeneración en frenada simplemente a través de una curva en función de la velocidad (Figura 4.46), obteniendo así un mapa de eficiencia.

A continuación, se muestra dicho mapa correspondiente a la simulación del ciclo de conducción 3, en el cual se puede apreciar que la nube de puntos de mayor eficiencia

se produce en los intervalos de tiempo de velocidades altas (de 600 a 1800 segundos).

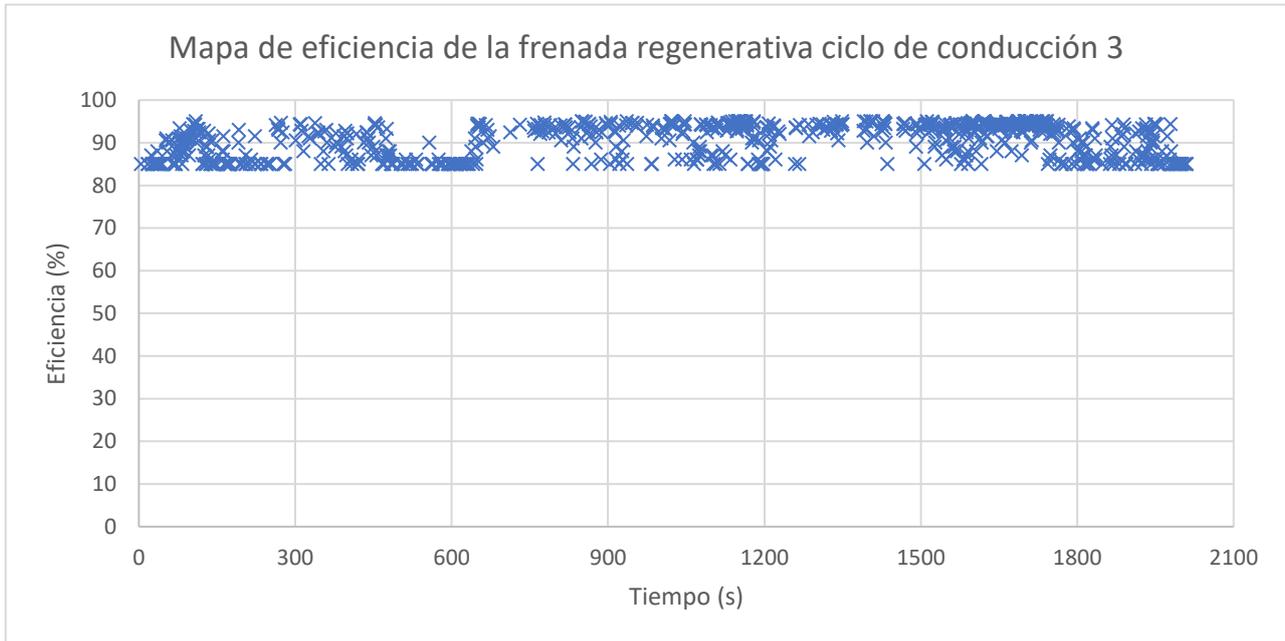


Figura 5.17 Mapa de eficiencia de la frenada regenerativa ciclo de conducción 3

Fuente: Elaboración propia

Por estos motivos, se puede entender que para aquellos ciclos cuyo gradiente medio es negativo y, por tanto, se producen más frenadas, el porcentaje de error cometido sobre el consumo medio calculado sea mayor en comparación a los ciclos de gradiente medio positivo (ver Figura 5.18)

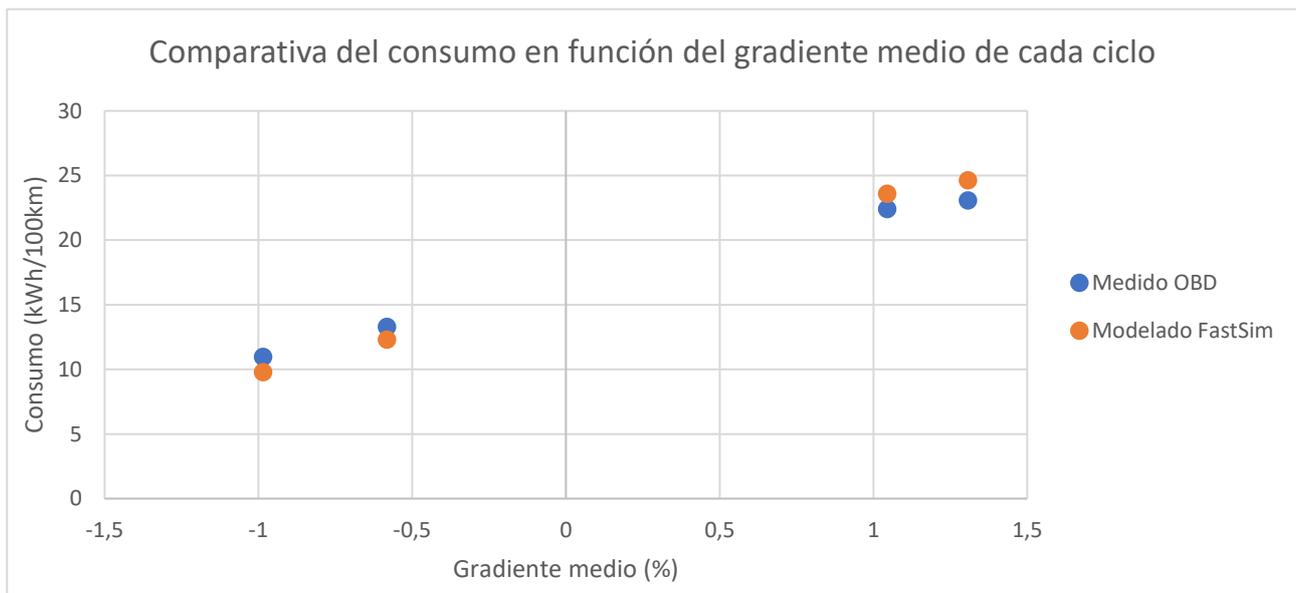


Figura 5.18 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, de la Figura 5.18 se puede extraer que los consumos obtenidos no son próximos al homologado oficialmente por el ciclo WLTP, puesto que, para los ciclos representativos de gradiente medio negativo, el consumo energético es menor y viceversa.

Por ello, nuevamente cabe resaltar la gran influencia del gradiente de carretera sobre el consumo energético del vehículo.

Esto es así ya que los cuatro ciclos de conducción realizados no representan la posibilidad del caso gradiente medio 0%, si bien observando la tendencia lineal del consumo modelado y medido, se puede estimar.

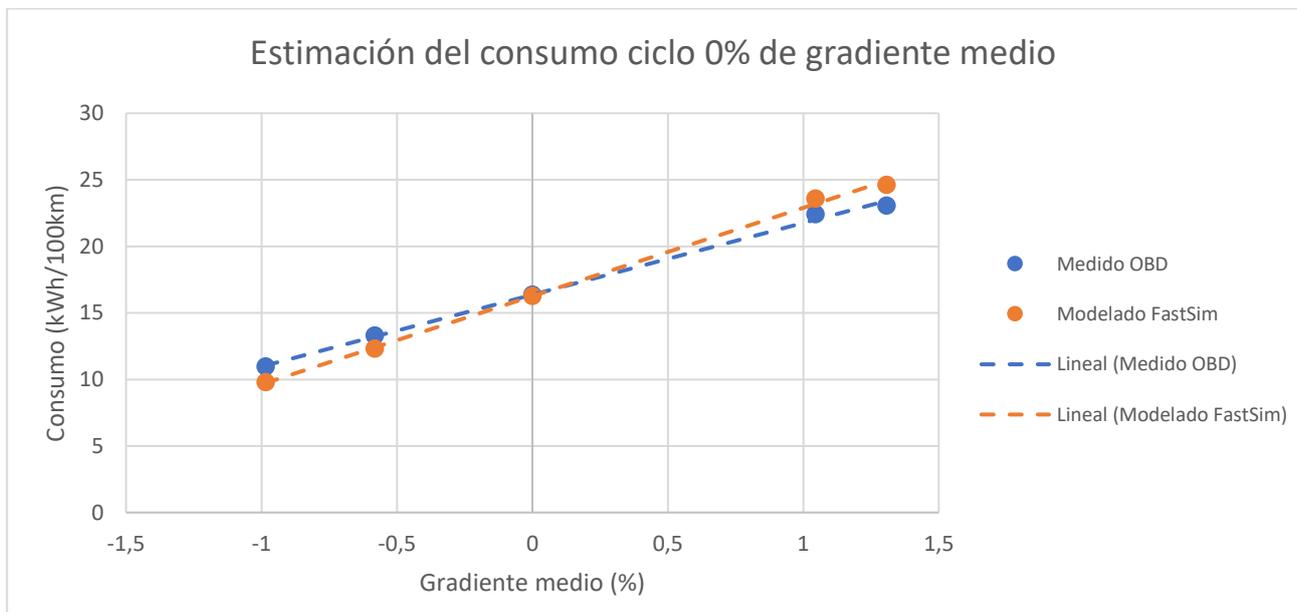


Figura 5.19 Estimación del consumo ciclo 0% gradiente medio Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Bajo condiciones de dinámica de conducción similares a los ciclos de conducción realizados, se puede extraer de la estimación los siguientes resultados:

Tabla 5.5 Resultados estimación del consumo ciclo 0% gradiente medio Hyundai Kona

	Consumo medio calculado (kWh/100km)	Consumo medio modelado (kWh/100km)	Error (%)
Estimación (Gradiente medio 0%)	16,36	16,26	0,78

Fuente: Elaboración propia

El consumo medio estimado para un ciclo cuyo gradiente medio sea del 0%, resultaría 16,36 kWh/100km de manera experimental y 16,26 kWh/100km mediante

el modelado, arrojando un porcentaje de error de apenas un 1% y situándose entre los ciclos de gradiente medio negativo y positivo como cabía esperar.

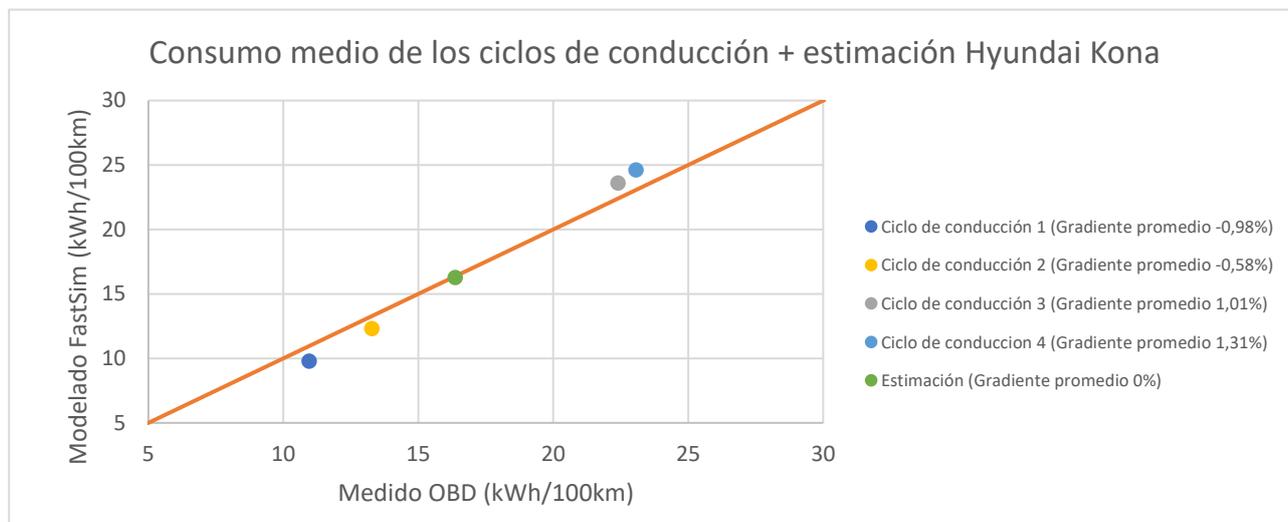


Figura 5.20 Consumo medio de los ciclos de conducción + estimación Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Siendo así, se convierte en un ciclo más representativo que se puede comparar con el consumo medio homologado bajo el WLTP, además del propio WLTP modelado con FastSim.

Tabla 5.6 Comparativa entre consumo WLTP homologado, modelado y estimación Hyundai Kona

	Consumo combinado (kWh/100km)	Error (%)
WLTP homologado	15,4	-
WLTP modelado	16,7	8,44
Estimación (Gradiente medio 0%)	16,26	5,60

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, nuevamente el consumo estimado para la hipotética ruta de gradiente medio 0% es superior al homologado bajo el ciclo WLTP, pero en menor medida que el propio WLTP modelado mediante FastSim.

Por tanto, se concluye que el modelo se ajusta bastante bien a la realidad, proporcionando consumos energéticos fiables del vehículo para rutas de larga distancia y duración, representativas de gradiente medio negativo y positivo, si bien existe una mayor desviación para el primer caso debido a la dificultad en el modelado del complejo sistema de regeneración en frenada.

Asimismo, se ha podido estimar el consumo de un ciclo de gradiente medio nulo, apoyando el estudio en la linealidad presente entre los ensayos de conducción

realizados, siendo esta estimación válida para comparar el consumo homologado por el fabricante.

De igual manera que para el vehículo convencional, FastSim estima el consumo del motor eléctrico a partir de su curva escalada de eficiencia frente a potencia.

En primer lugar, en la Figura 5.21 se puede observar el perfil modelado de potencia instantánea llevado a cabo en el ciclo de conducción 3. En este caso, va desde valores positivos, lo cual corresponde a potencia desarrollada por el motor en las aceleraciones, hasta negativos, los cuales indican la potencia recuperada a través de las frenadas.

Además, en la Figura 5.22 se muestra para la potencia desarrollada, la eficiencia con la que opera el motor eléctrico, obteniendo así la curva modelada por el software.

Y, por último, en la figura 5.23 se puede apreciar la clara diferencia con respecto al vehículo convencional, puesto que se obtiene un mapa de eficiencia motor con valores situados en torno al 85-95%, siendo la típica operación de este tipo de arquitectura.

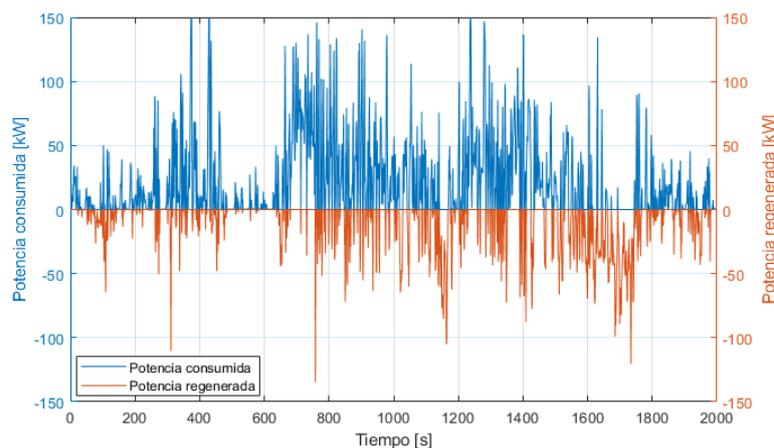


Figura 5.21 Potencia desarrollada y regenerada ciclo de conducción 3 Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

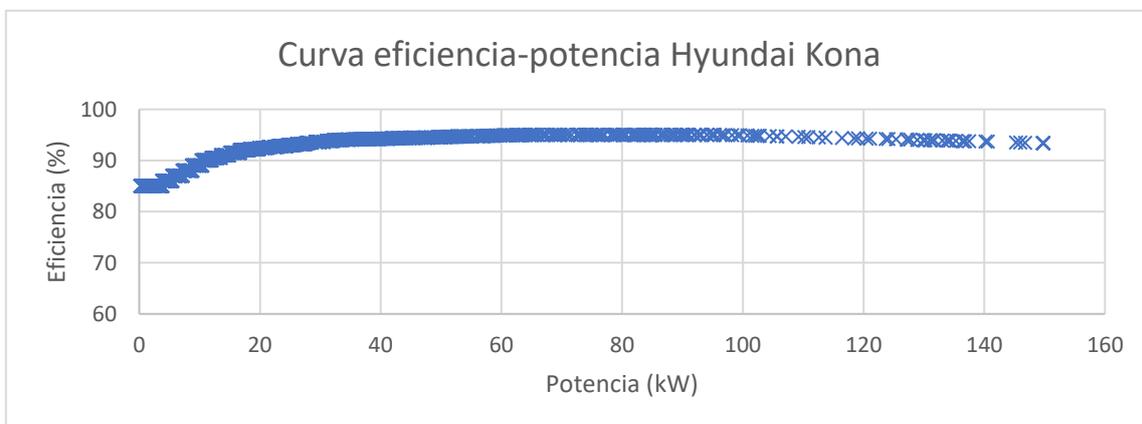


Figura 5.22 Curva eficiencia-potencia Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

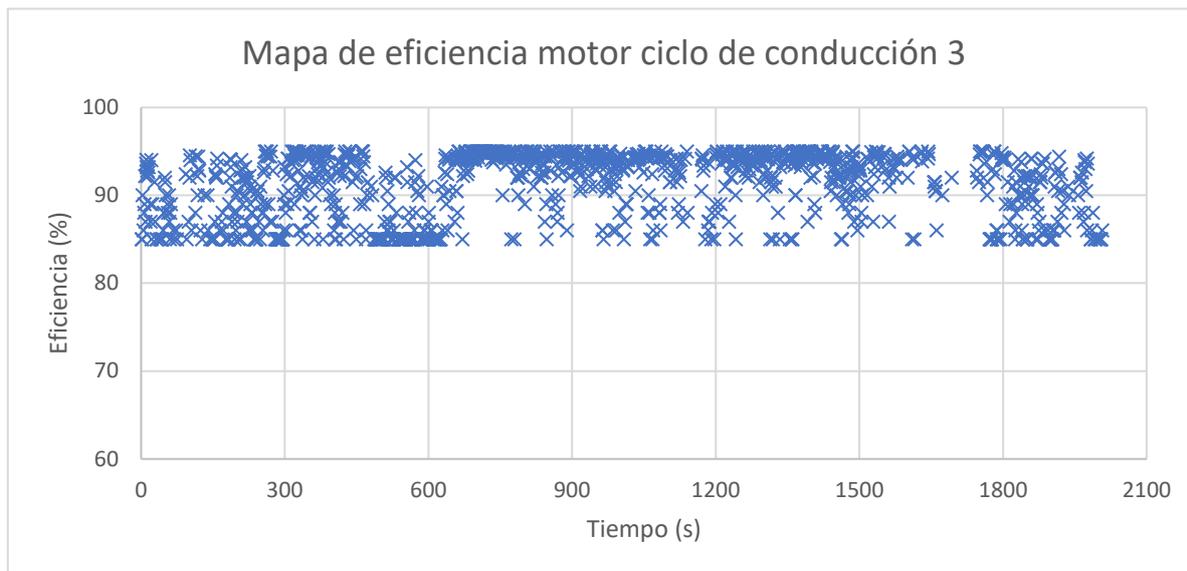


Figura 5.23 Mapa de eficiencia motor ciclo de conducción 3 Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

Disponiendo del perfil de potencia de cada ciclo de conducción, se puede calcular la energía total consumida en los mismos, así como la energía regenerada, la extraída realmente de la batería y el porcentaje de estas dos últimas con respecto a la consumida

La siguiente tabla recoge los resultados obtenidos del desglose energético de cada uno de los ciclos de conducción.

Tabla 5.7 Desglose energético de los ciclos de conducción Hyundai Kona

	Ciclo 1	Ciclo 2	Ciclo 3	Ciclo 4
Energía total consumida (kWh)	1,43	1,90	7,34	7,10
Energía regenerada (kWh)	0,65	0,81	2,57	2,34
Energía consumida de la batería (kWh)	0,78	1,09	4,77	4,76
Porcentaje energía regenerada (%)	45,27	42,77	34,98	33,0
Porcentaje de energía consumida de batería (%)	54,73	57,23	65,02	67,0

Fuente: Elaboración propia

Como se aprecia, debido al gradiente medio de carretera, el porcentaje de energía regenerada con respecto al total consumida desciende desde el ciclo 1 hasta el 4, mientras que con el porcentaje de energía consumida de batería ocurre lo contrario.

Por ejemplo, para el ciclo de conducción 1, el porcentaje de energía regenerada calculado es del 45,27% sobre la energía total consumida, siendo el porcentaje restante (54,73%) el aportado realmente por el almacenamiento de la batería. Por su parte, en el ciclo 4, el porcentaje de energía regenerada respecto a la consumida es del 33,0%, mientras que el 67,0% restante proviene de la batería.

Obviamente, la energía producida en las frenadas se almacena en la batería y nuevamente sale de esta. No obstante, por simple nomenclatura se considerará energía consumida de la batería solamente a aquella que no proviene de regeneraciones, si no del propio recurso existente en el equipo.

A modo resumen, en la Figura 5.24 se muestra, a través de un gráfico de columnas apiladas, los resultados expuestos en la Tabla 5.7, representando la energía regenerada en color naranja y la consumida de la batería en color azul, siendo la suma de ambas, la energía total consumida en cada ensayo.

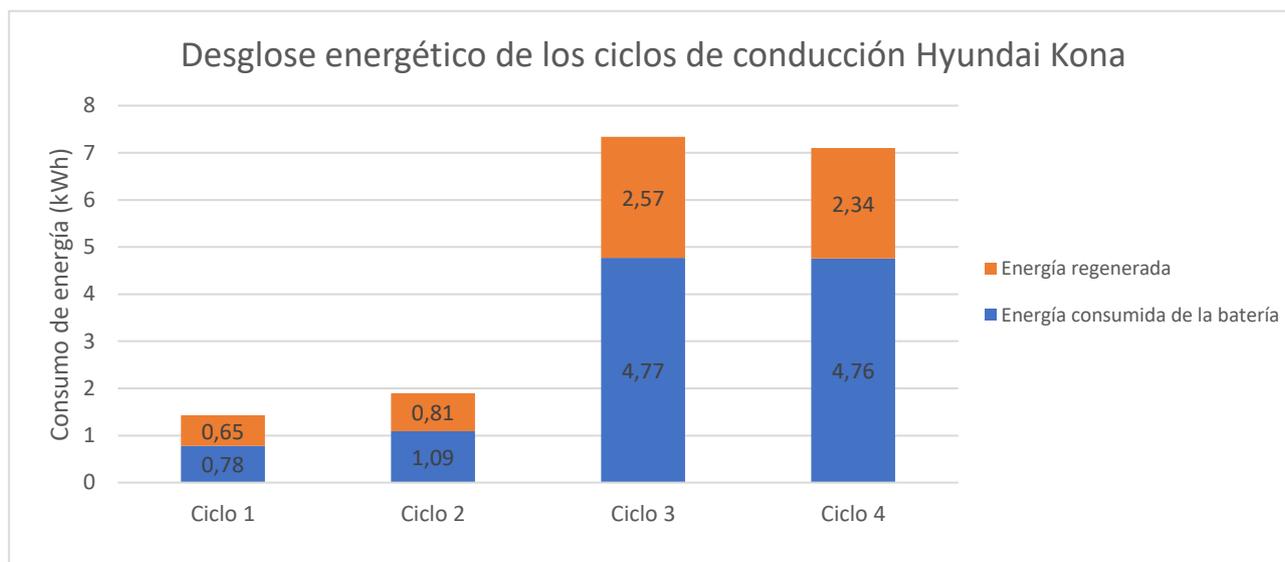


Figura 5.24 Desglose energético ciclos de conducción Hyundai Kona

Fuente: Elaboración propia

5.3 Toyota C-HR

En cuanto al híbrido no enchufable Toyota C-HR, se trata de un vehículo fabricado en 2016. Por su fecha de producción, el ciclo de homologación al que fue sometido, al igual que el convencional, es el NEDC. Por lo tanto, para la primera validación, se ha simulado mediante el FastSim dicho ciclo, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 5.8 Validación del modelo a través del ciclo NEDC Toyota C-HR

	Consumo medio (L/100km)	Tiempo 0-100 km/h (s)
NEDC modelado	4,13	10
NEDC homologado	3,80	11
Error (%)	8,59	9,10

Fuente: Elaboración propia

De nuevo se observa claramente que el valor de consumo medio obtenido por el modelo es superior al homologado bajo el ciclo NEDC. Esto no ocurre así en el tiempo necesario para llevar a cabo un 0-100 km/h, en el que el modelo estima 1 segundo menos que la homologación (ver Figura 5.25).

No obstante, a través de la Figura 5.26 se puede comprobar que los resultados modelados no exceden el margen de error aceptable del $\pm 10\%$ en ningún caso.

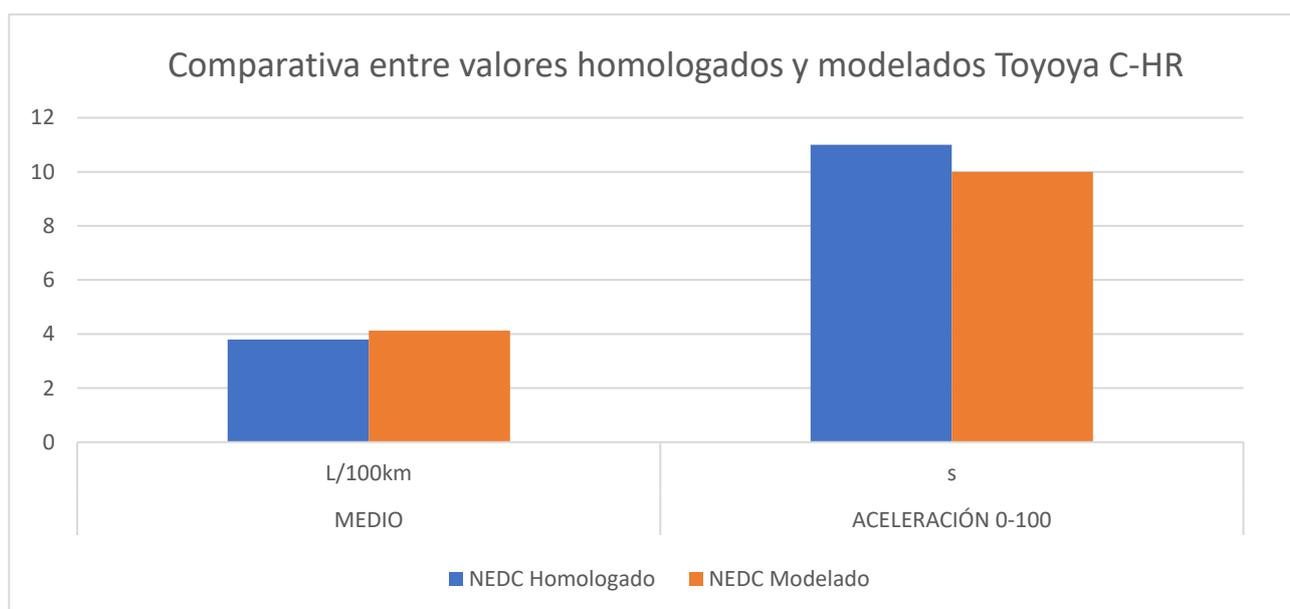


Figura 5.25 Comparativa entre valores homologados y modelados Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

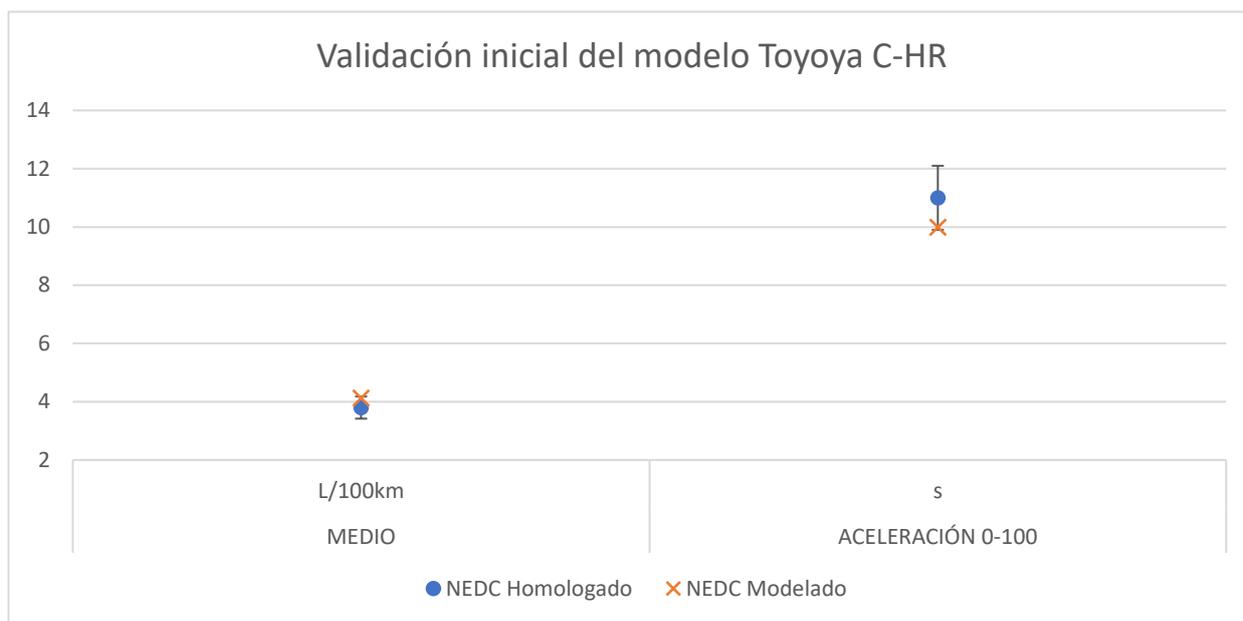


Figura 5.26 Validación inicial del modelo Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

Por su parte, los resultados extraídos de los 5 ciclos de conducción realizados para este tipo de arquitectura se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 5.9 Validación del modelo a través de los ciclos de conducción Toyota C-HR

	Consumo medio medido (L/100km)	Consumo medio modelado (L/100km)	Error (%)
Ciclo de conducción 1	5,01	5,34	6,47
Ciclo de conducción 2	6,24	5,46	12,38
Ciclo de conducción 3	6,81	5,71	16,28
Ciclo de conducción 4	7,58	6,88	9,19
Ciclo de conducción 5	8,69	8,80	1,23

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, y como era de esperar, se produce una tendencia creciente del consumo medio del vehículo desde el ciclo de conducción 1 al 5, debido al aumento gradual del gradiente medio de cada uno de ellos. Esto se puede ver claramente en la siguiente gráfica.

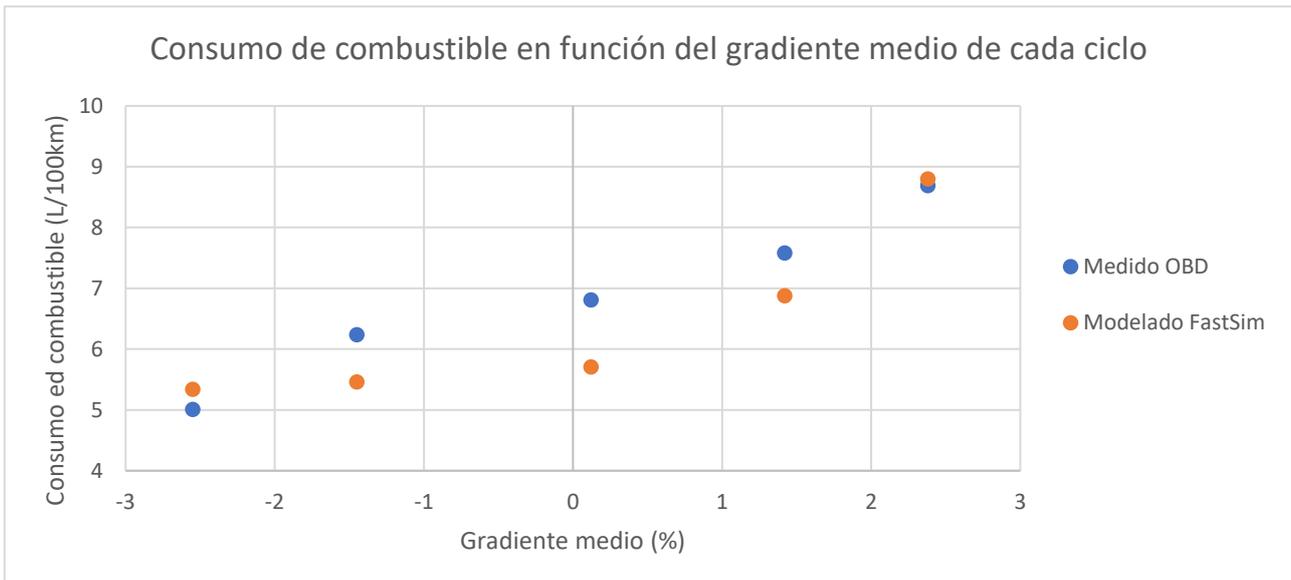


Figura 5.27 Consumo de combustible en función del gradiente medio de cada ciclo Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

Sin embargo, al contrario que en el vehículo convencional y el eléctrico de batería, el porcentaje de error cometido por el modelo con respecto a lo medido experimentalmente, es menor para aquellos ciclos de conducción con gradiente medio más extremo, tanto positivo como negativo. En concreto, se obtiene la máxima divergencia en el ciclo de conducción correspondiente a un gradiente medio de carretera neutro (ciclo de conducción 3) tal y como se ve en la siguiente figura.

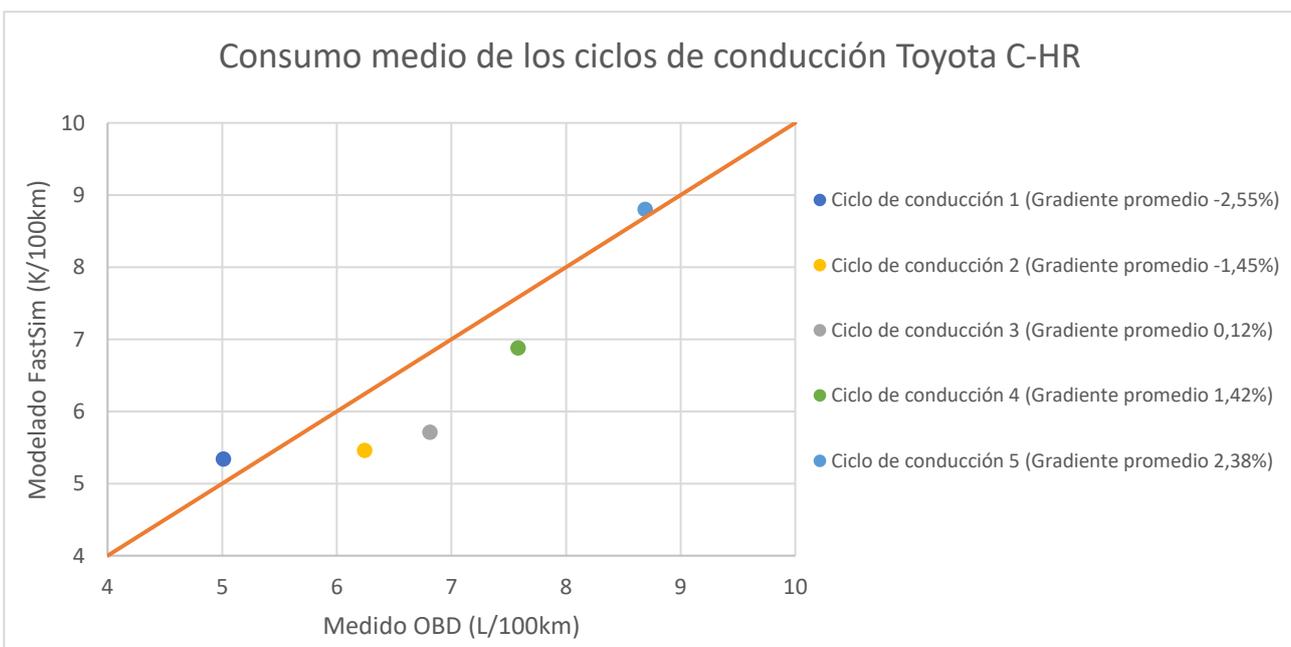


Figura 5.28 Consumo medio de los ciclos de conducción Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, como se estudió anteriormente, el ciclo de conducción 3 se trata del único ensayo compuesto por todas las fases posibles, es decir, parte urbana, interurbana y autopista, lo cual significa que posee el mayor rango de posibles velocidades (ver Figura 5.29).

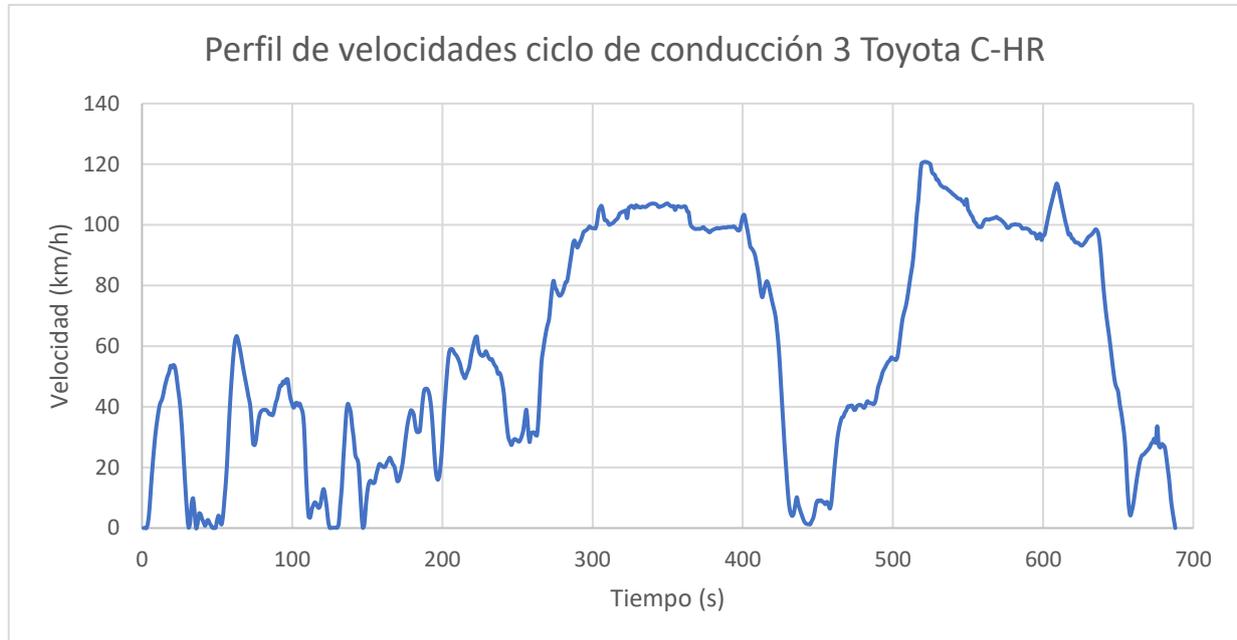


Figura 5.29 Perfil de velocidades ciclo de conducción 3 Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

Además de esto, al ser un vehículo híbrido no enchufable, cabe comentar que la capacidad de la batería eléctrica es pequeña; en concreto de 1,31kWh, siendo de utilidad en momentos de arranques y aceleraciones suaves.

Estos dos motivos hacen pensar que la razón para encontrar mayores porcentajes de error en la simulación de ensayos característicos de gradiente medio neutro y conformado por todas las partes posibles, sea la estrategia de control.

Esta se trata de un conjunto de normas e instrucciones, preprogramadas en la ECU del vehículo y que permiten realizar un control óptimo de las dos arquitecturas (MCIA y eléctrico) para la distribución de potencia.

Se trata de una operación de alta complejidad computacional para la implementación en el modelo, además de requerirse de softwares específicos y más avanzados al FastSim.

Por tanto, predecir cuándo entrará en operación cada tipo de arquitectura y de qué manera es decisión de la centralita del vehículo en función de la estrategia de control predefinida por el fabricante.

A continuación, en la Figura 5.30 se muestra el perfil de consumo tanto medido como modelado, donde se pueden analizar las desviaciones del ciclo de conducción 3.

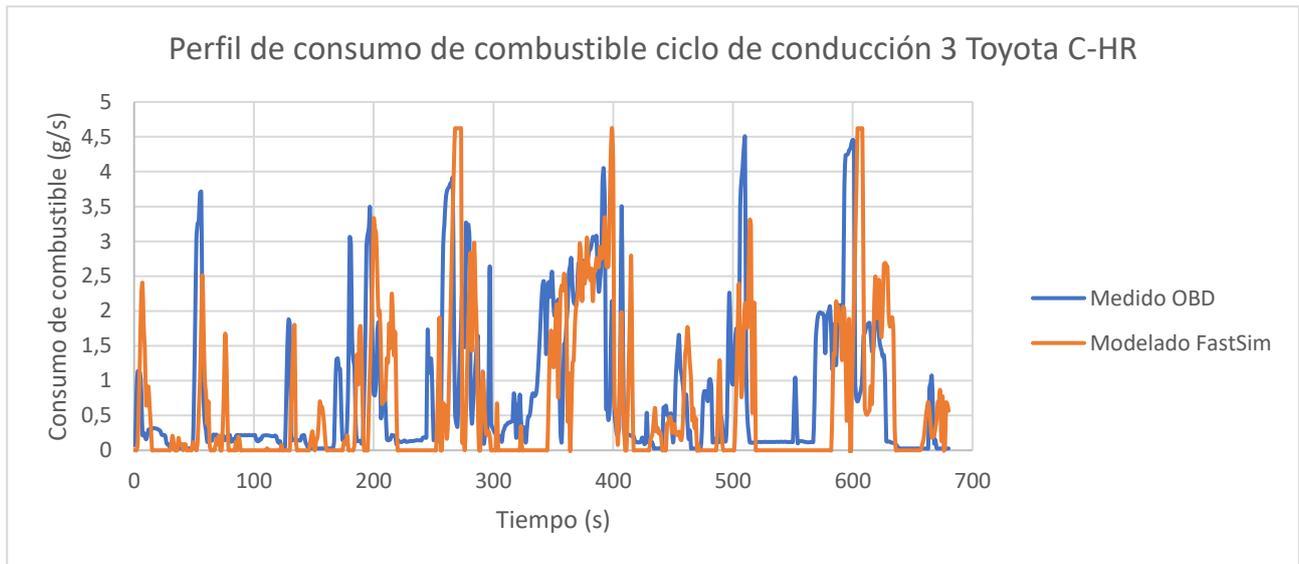


Figura 5.30 Perfil de consumo de combustible ciclo de conducción 3 Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

Lo primero que destaca observando la gráfica es para la medición obtenida, el motor de combustión no se apaga puesto que, en toda la duración del ensayo, existe un consumo másico de combustible, mientras que el modelo estima en qué momentos entra en operación el motor eléctrico, y apaga el de combustión. No obstante, cabe destacar la gran capacidad de FastSim para reproducir el comportamiento del vehículo.

Además, sabiendo que el ciclo se comenzó con un 49,9% de batería tal y como se observa en el perfil mostrado, se puede deducir que, entre toda la infinidad de posibles estrategias de control, la que más se asemeja a este comportamiento es la conocida como “Máximo grado de carga (SOC) de la batería”.



Figura 5.31 Perfil del estado de carga medido ciclo de conducción 3 Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

El objetivo principal de esta estrategia es alcanzar la potencia demandada por el conductor, además de lograr un aumento de SOC a través del MCIA. Esto se puede entender viendo la siguiente imagen, en la cual se representan dos posibles sucesos:

- Punto A: la potencia demandada por el conductor no es posible entregarla individualmente por cada uno de los motores, por lo que se precisa de ambas arquitecturas; el MCIA a plena carga y el eléctrico operando hasta completar la demanda.
- Punto B: para la potencia requerida por el conductor solamente se precisa el motor térmico. Sin embargo, al ser esta potencia inferior a la del propio MCIA en su punto de máximo rendimiento, la centralita ordena al motor a trabajar a otra carga parcial superior de mejor rendimiento, y el resto de potencia se emplea en aumentar el SOC de la batería.

De esta manera se consigue que el motor térmico opere en puntos de operación altos, al mismo tiempo que se aumenta el nivel de carga de la batería a través de este.

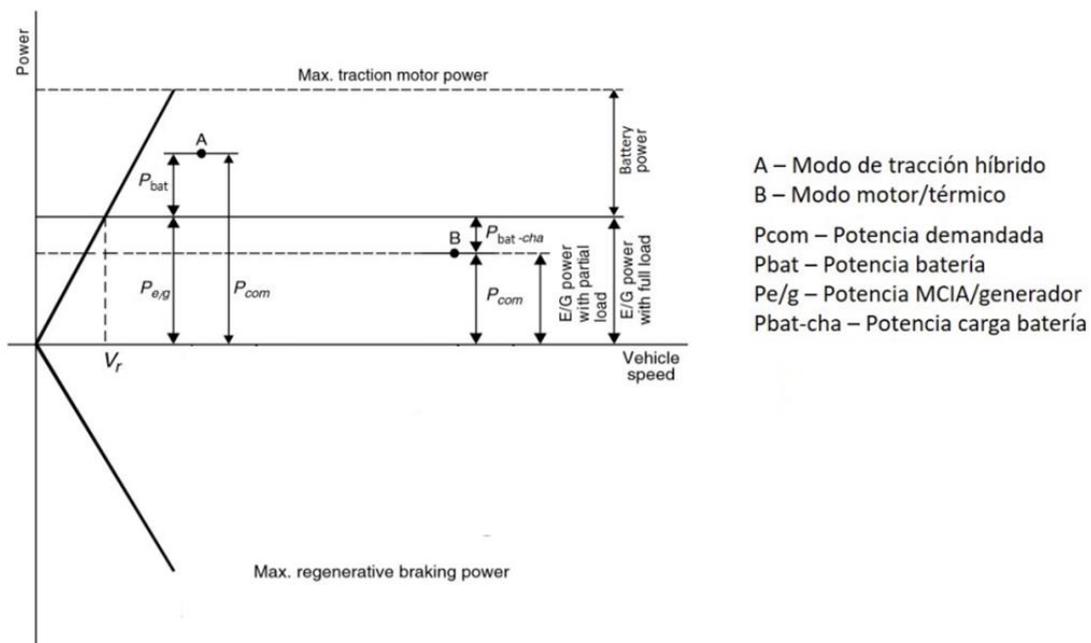


Figura 5.32 Estrategia de control de máximo SOC en HEV

Fuente: <https://eva.fing.edu.uy>

Esto se puede entender observando la curva de par-potencia de la Figura 5.33, así como las líneas de isoconsumo, en las que se establecen 3 curvas que obligan al motor térmico a proporcionar más potencia con el objetivo de situarse en líneas de consumo específico más próximas al polo económico y, por tanto, en puntos de operación de alta eficiencia energética.

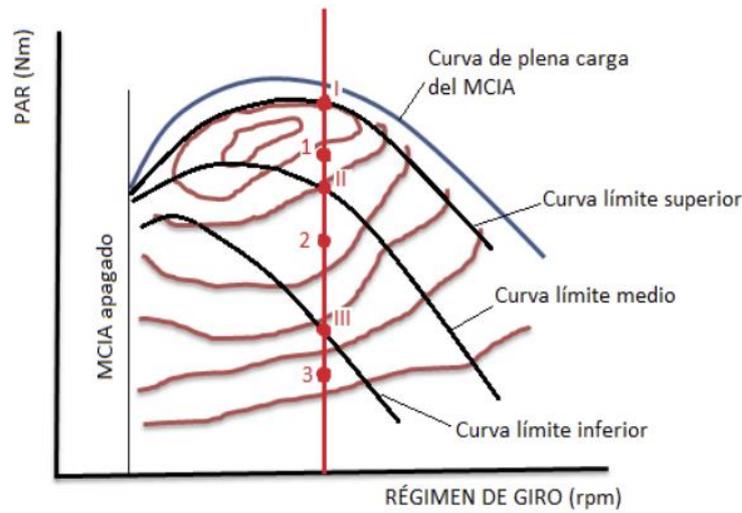


Figura 5.33 Estrategia de control de máximo SOC a través de las curvas de eficiencia

Fuente: <https://eva.fing.edu.uy>

Por otra parte, observando de nuevo la Figura 5.30 se puede ver claramente que la estrategia descrita no correspondería con la usada por el FastSim. De hecho, la estrategia de control usada por el software es la conocida como “Modo Termostato”, cuyo objetivo principal es mantener el SOC entre unos límites definidos por el usuario de máximo y mínimo.

Esta consiste en arrancar el motor de combustión en los momentos que el porcentaje de batería alcanza el mínimo valor estipulado y apagarlo cuando esta se encuentre completamente cargada. En el caso de no definir manualmente dichos valores máximos y mínimos, FastSim toma 20% y 80% respectivamente.

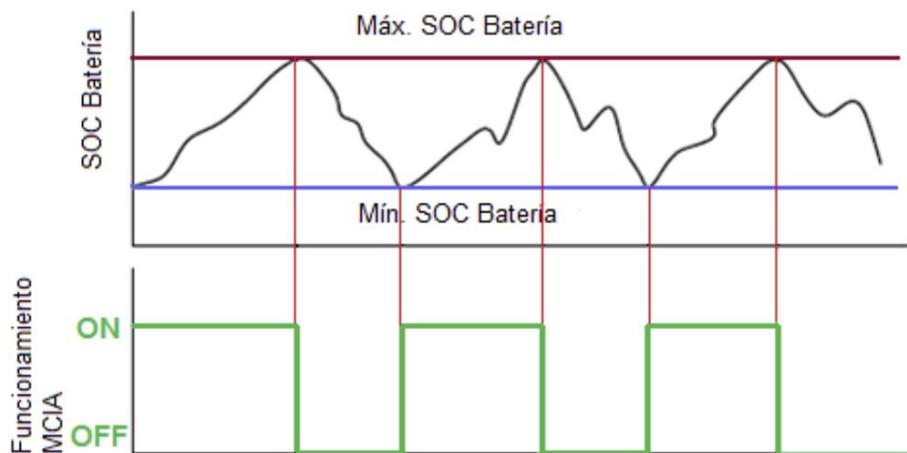


Figura 5.34 Estrategia de control Modo Termostato

Fuente: <https://eva.fing.edu.uy>

Para comprobar si la estrategia seguida por el programa es la descrita, tomando de ejemplo el ciclo de conducción 3, e imponiendo el valor inicial de SOC por encima del mínimo y seguidamente por debajo, se obtienen las siguientes representaciones.

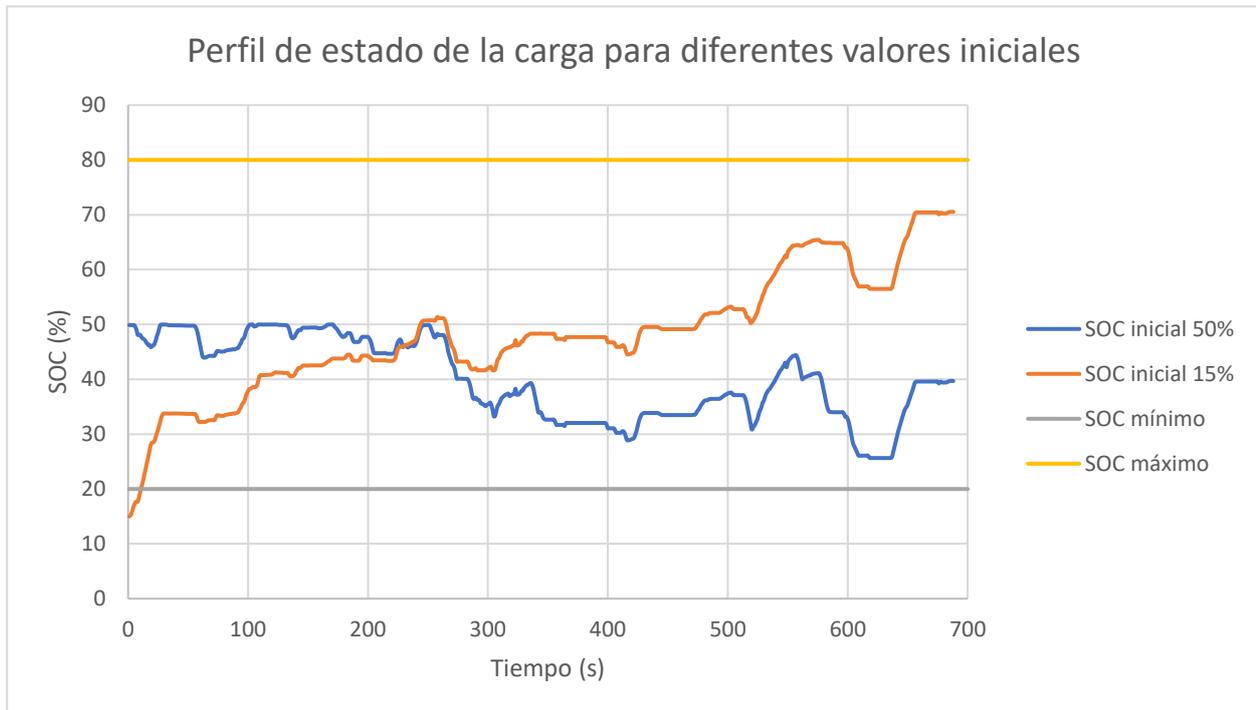


Figura 5.35 Perfil de estado de la carga para diferentes valores iniciales

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, a pesar de ser el mismo ciclo y modelo, se obtienen dos perfiles de estado de batería completamente diferentes. Además, como se comentaba, si se indica que el valor inicial de SOC es inferior al mínimo, el programa reproduce la posible tendencia de la estrategia de control Modo Termostato, aumentando el nivel de batería y, por tanto, teniendo un consumo de combustible extra por parte del MCI. Por el contrario, si el valor inicial es superior al mínimo, el perfil de SOC es decreciente y no habría consumo de combustible cuando el motor eléctrico opera, tal y como se ha visto en la Figura 5.30.

Por otra parte, igual que para las otras arquitecturas estudiadas, FastSim proporciona otros resultados. A continuación, se presentan los mapas de eficiencia motor, así como las curvas de eficiencia-potencia para ambos motores.

No obstante, cabe destacar que las siguientes gráficas corresponden al modelado, existiendo posiblemente discrepancias con la realidad sobre todo en el mapa de eficiencia del motor de combustión debido a las diferencias entre las estrategias de control comentadas.

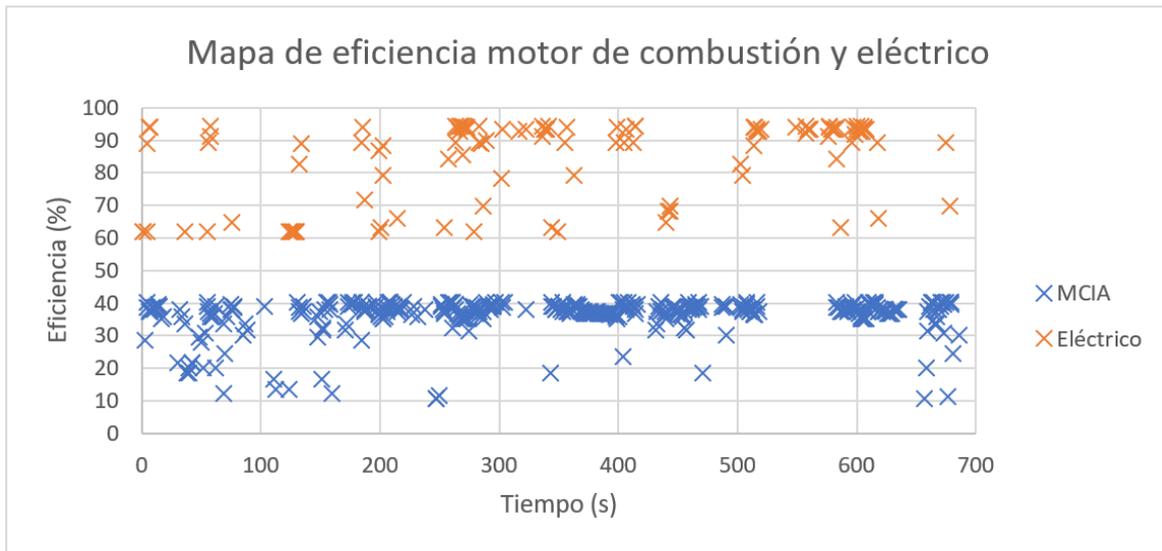


Figura 5.36 Mapas de eficiencia MCI y eléctrico ciclo de conducción 3 Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

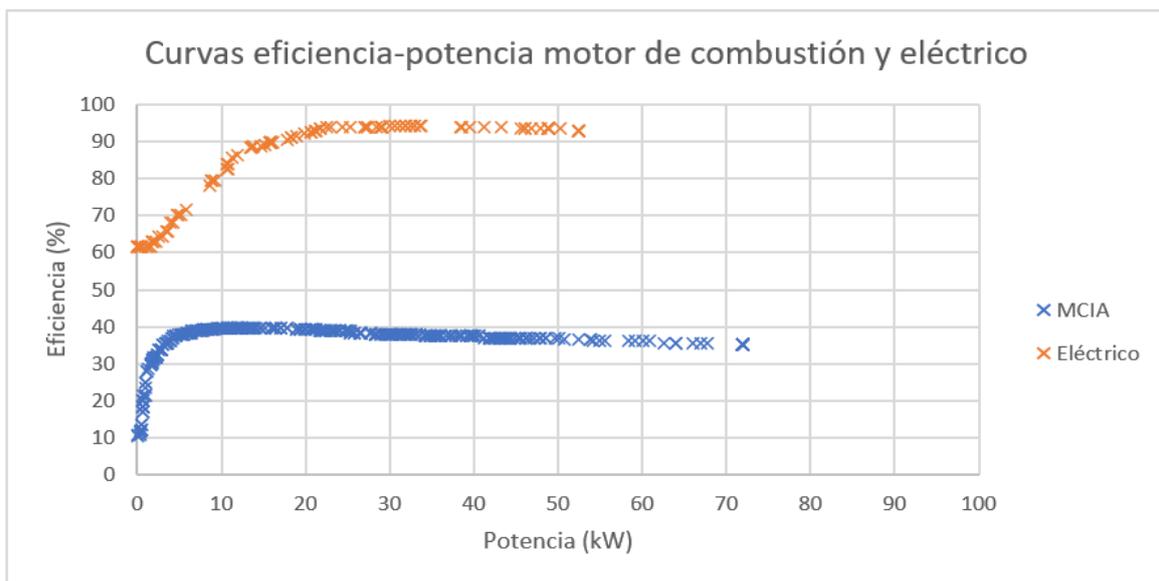


Figura 5.37 Curvas eficiencia-potencia MCI y eléctrico ciclo de conducción 3 Toyota C-HR

Fuente: Elaboración propia

5.4 Comparativa entre arquitecturas

En este apartado se busca realizar una comparativa entre el consumo promedio modelado y real de cada configuración.

Para ello, partiendo de los resultados expuestos anteriormente, así como de la distancia recorrida en cada ruta, se puede expresar el consumo energético como un valor promedio en kWh/km de todos los ciclos y para cada una de las arquitecturas estudiadas.

No obstante, con el objetivo de conseguir resultados que faciliten la comparación, se ha calculado el consumo específico promedio de los mismos, es decir, por unidad de masa.

Los resultados extraídos se recogen en la siguiente tabla.

Tabla 5.10 Consumos específicos promedio medidos y modelados

	Opel Corsa D 1.2	Hyundai Kona	Toyota C-HR
Consumo específico promedio medido (kWh/km/tonelada)	0,573	0,109	0,448
Consumo específico promedio modelado (kWh/km/tonelada)	0,571	0,112	0,408

Fuente: Elaboración propia

Representando los valores en un gráfico de columnas se obtiene la siguiente representación.

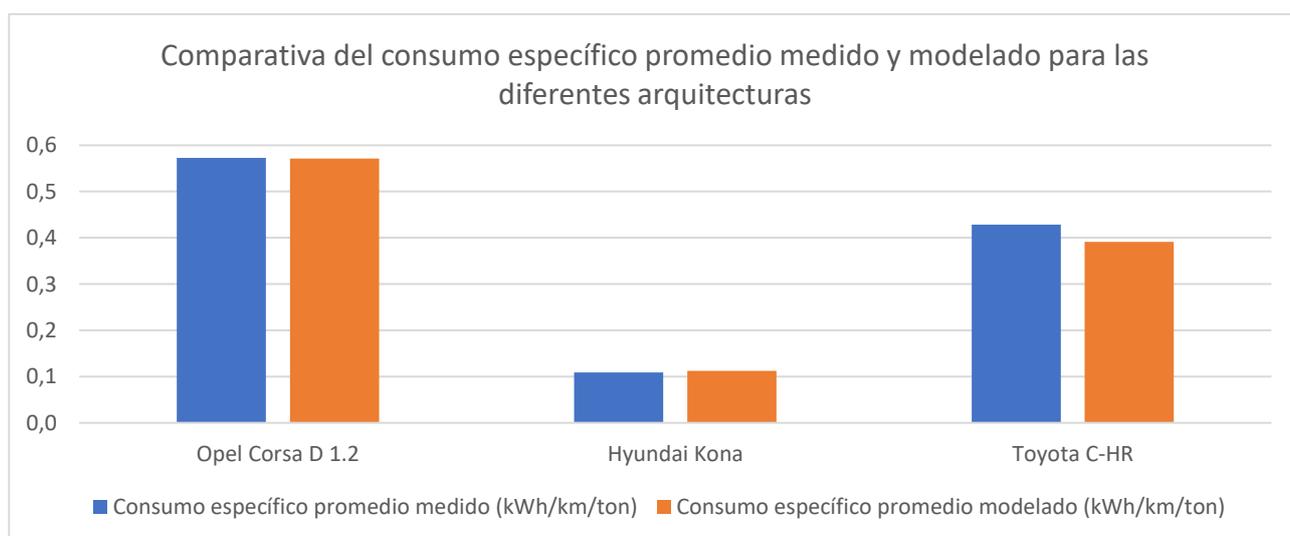


Figura 5.38 Comparativa del consumo específico promedio medido y modelado de diferentes arquitecturas

Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, se puede ver claramente la disminución del consumo específico promedio del Hyundai Kona con respecto al vehículo convencional y al híbrido no enchufable.

Más concretamente, dicha diferencia de consumo se sitúa en un 81% en comparación con el vehículo convencional y en torno a un 70% con respecto al HEV.

Por su parte, si se compara el Toyota C-HR con el Opel Corsa, se puede destacar que la tecnología híbrida no enchufable, con una batería de apenas 1,31kWh es capaz de reducir el consumo promedio en un 15%.

Sin embargo, habitualmente esta divergencia suele ser mayor, situándose en porcentajes de reducción entre 20-50% [18]. Esto se debe a la realización de ciclos de conducción mayoritariamente de gradiente medio positivo y partiendo con un estado de la carga del batería incompleto, tal y como se ha comentado anteriormente.

Por último, en el gráfico también se observa la capacidad de cada modelo para reproducir la realidad, viéndose claramente que el más preciso es el creado para el vehículo convencional, seguido del BEV y, por último, el HEV.

6 CONCLUSIONES

El propósito principal de este estudio ha sido el desarrollo de una metodología que permita la validación de consumos energéticos de modelos de diferentes arquitecturas de vehículos.

Para ello, el trabajo cuenta con toda la estadística GPS necesaria para caracterizar rutas de conducción cotidianas llevadas a cabo en la zona norte y metropolitana de la Isla de Tenerife, así como datos reales recogidos durante el ensayo sobre el comportamiento del vehículo en cuestión a través de su puerto OBDII.

El primer vehículo estudiado fue el Opel Corsa D 1.2, una arquitectura convencional de gasolina del año 2011 y mediante la cual se llevaron a cabo 5 ciclos de conducción reales con distintas posibilidades de dinámicas de conducción, así como diferentes gradientes de carretera y perfiles de velocidad.

A través del software FastSim se modeló el vehículo y se simularon los ciclos de conducción, obteniendo estimaciones de consumo de combustible bastante certeras, con errores en torno al 3% y concluyendo la relación directa entre gradiente medio de carretera y consumo.

En segundo lugar, el estudio cuenta con el análisis de un vehículo eléctrico de batería. Más concretamente, el moderno Hyundai Kona de 150kW de potencia y más de 400 km de autonomía, a través del cual se recopilaban 4 ciclos de conducción; cada uno de ellos con sus peculiaridades propias.

De igual manera, tras el análisis de resultados de esta tecnología propulsiva actualmente en auge, se concluye que el modelo generado es capaz de proporcionar consumos energéticos fiables del vehículo, ajustándose a las particularidades de cada ensayo, si bien se encuentran ciertas discrepancias en aquellos ciclos de gradiente medio negativo debido a la dificultad en el modelado del sistema de regeneración en frenada.

En tercer y último lugar, se estudió el híbrido no enchufable C-HR de la marca Toyota, con el que se efectuaron 5 nuevos ciclos de conducción en los que se pudieron recopilar todos los datos necesarios.

En este caso, se trata del modelo que arrojó mayores divergencias con respecto a los valores experimentales, principalmente a causa de la estrategia de control energética y de la limitación que presenta FastSim para el modelado de la misma.

No obstante, se trata de errores que superan la realidad en apenas 1 L/100km e incluso menos, y solamente en aquellas ocasiones que se produce un mayor cambio de entrega de potencia entre las dos motorizaciones.

Finalmente, a modo de conclusión, es preciso señalar la importancia de este trabajo, con el que a partir de herramientas básicas se ha conseguido monitorizar las señales más importantes del vehículo y de la ruta en conducciones cotidianas, desarrollar una metodología de cálculo y post-procesado de datos, además de generar un

modelo informático validado que estime el comportamiento real del vehículo y prediga un consumo energético fiel y aproximado.

Por tanto, gracias a la validación experimental, este Trabajo Fin de Grado se convierte en una herramienta de gran envergadura y utilidad, idónea para conocer consumos energéticos, estimar el comportamiento o viabilidad de flotas de vehículos según la dinámica de conducción y la orografía de carretera, entre muchas otras cosas, sin la necesidad de disponer de la arquitectura en cuestión.

7 BIBLIOGRAFÍA

7.1 Referencias

[1] European Automobile Manufacturers' Association ACEA, "Automobile Industry Pocket Guide 2021-2022". Disponible en: <https://www.acea.auto/publication/automobile-industry-pocket-guide-2021-2022/>

[2] Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de junio de 2007, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2007/171/L00001-00016.pdf>

[3] Reglamento (UE) 2017/1347 de la Comisión, de 13 de julio de 2017, que corrige la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo, el Reglamento (UE) nº 582/2011 de la Comisión y el Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión, que complementa el Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, sobre la homologación de tipo de los vehículos de motor por lo que se refiere a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (Euro 5 y Euro 6) y sobre el acceso a la información relativa a la reparación y el mantenimiento de los vehículos, modifica la Directiva 2007/46/CE del Parlamento Europeo y del Consejo y los Reglamentos (CE) nº 692/2008 y (UE) nº 1230/2012 de la Comisión y deroga el Reglamento (CE) nº 692/2008. Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2017/192/L00001-00022.pdf>

[4] Mathieu, L., MATHIEU, L., & de Meeûs, S. (2020). Transport & Environment.

[5] Van Gijlswijk, R., Ligterink, N., Bhorasar, A., & Smokers, R. (2022). Real-world fuel consumption and electricity consumption of passenger cars and light commercial vehicles-2021.

[6] Demuyck, J., Bosteels, D., De Paepe, M., Favre, C., May, J., & Verhelst, S. (2012). Recommendations for the new WLTP cycle based on an analysis of vehicle emission measurements on NEDC and CADC. Energy Policy, 49, 234-242.

[7] Reglamento nº51 de la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (CEPE). Disponible en: <https://www.boe.es/doue/2018/138/L00001-00069.pdf>

[8] Palomeque Cabrera, J. A., & Navas Hugo, P. E. (2017). Determinación del consumo de combustible de vehículos en base a los ciclos de conducción epa ftp75 y epa hwfet, en dinamómetro de chasis. Casos de estudio: Vehículos Hyundai Tucson 2.0 LT/A 2016 y Chevrolet Aveo 1.4 LT/M sedan 2010 (Bachelor's thesis, Universidad del Azuay).

- [9] Anhour-alex. (2017, julio 31). The Multiple levels of Vehicle Electrification. Paul Eichenberg. Disponible en: <https://www.pauleichenberg.com/blog/multi-level-electrification-explained/>
- [10] Hibridosyelectricos.com. (2018, abril 19). Las ventajas del híbrido suave de 48 voltios y sus seis niveles. Disponible en: <https://www.hibridosyelectricos.com/articulo/tecnologia/ventajas-hibrido-suave-48-voltios-niveles/20180419110048018881.html>
- [11] Renting Finders (2020, marzo 31). ¿Qué Es Un FCEV? Disponible en: <https://rentingfinders.com/glosario/fcev/>
- [12] Luis, G., Sánchez, V., & Martín, J. M. (2016). Revisión documental del protocolo CAN como herramienta de comunicación y aplicación en vehículos. Disponible en: <https://imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt474.pdf>
- [13] Servicio Técnico De Carreteras, Paisaje y Movilidad. Cabildo Insular de Tenerife (2022, enero). Intensidades Medias Diarias IMD de Tráfico en las carreteras de la Isla de Tenerife. Disponible en: <https://www.tenerife.es/portalcabtf/images/PDF/temas/carreteras/RESUMEN2021.pdf>
- [14] Murias, D. (2021, diciembre 21). Ya van 11 millones de Opel Corsa fabricados en Zaragoza desde 1982: del Opel Corsa A al Corsa-E eléctrico. Motor Pasión. Disponible en: <https://www.motorpasion.com/opel/van-11-millones-opel-corsa-fabricados-zaragoza-1982-opel-corsa-a-al-corsa-e-electrico>
- [15] Soler, A. (2022, mayo 7). Los 10 SUV eléctricos más vendidos en España. EIPeriodico. Disponible en: <https://www.elperiodico.com/es/economia/20220507/10-suv-electricos-vendidos-espana-13617489>
- [16] León, R. (2021, diciembre 16). Toyota C-HR Electric Hybrid 2022 estrena nuevo sistema multimedia y novedades de equipamiento. Automovilismo Canario. Disponible en: <https://automovilismocanario.com/toyota-c-hr-electric-hybrid-2022-estrena-nuevo-sistema-multimedia-y-novedades-de-equipamiento/>
- [17] Pepper, G. T. (2010). U.S. Patent No. 7,774,130. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [18] Huang, Y., Surawski, N. C., Organ, B., Zhou, J. L., Tang, O. H., & Chan, E. F. (2019). Fuel consumption and emissions performance under real driving: Comparison between hybrid and conventional vehicles. *Science of the Total Environment*, 659, 275-282.

7.2 Artículos

Soria, M. (2017). Evolución de la reglamentación europea sobre emisiones y homologación de los vehículos.

Rimpas, D., Papadakis, A., & Samarakou, M. (2020). OBD-II sensor diagnostics for monitoring vehicle operation and consumption. *Energy Reports*, 6, 55-63.

Abukhalil, T., AlMahafzah, H., Alksasbeh, M., & Alqaralleh, B. A. (2020). Fuel consumption using OBD-II and support vector machine model. *Journal of Robotics*, 2020.

Tietge, U., Zacharof, N., Mock, P., Franco, V., German, J., Bandivadekar, A., & Lambrecht, U. (2017). From laboratory to road. *Communications*, 49.

Simpson, A. (2006). *Cost-benefit analysis of plug-in hybrid electric vehicle technology* (No. NREL/CP-540-40485). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Gonder, J. D., Brooker, A. D., Wood, E. W., & Moniot, M. (2018). *Future Automotive Systems Technology Simulator (FASTSim) Validation Report* (No. NREL/TP-5400-71168). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Brooker, A., Gonder, J., Wang, L., Wood, E., Lopp, S., & Ramroth, L. (2015). *FASTSim: A model to estimate vehicle efficiency, cost and performance* (Vol. 1, No. NREL/CP-5400-63623). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Wood, E., Burton, E., Duran, A., & Gonder, J. (2014). *Contribution of road grade to the energy use of modern automobiles across large datasets of real-world drive cycles* (Vol. 1, No. NREL/CP-5400-61108). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Wood, E., Burton, E., Duran, A., & Gonder, J. (2014). Contribution of road grade to the energy use of modern automobiles across large datasets of real-world drive cycles (Vol. 1, No. NREL/CP-5400-61108). National Renewable Energy Lab.(NREL), Golden, CO (United States).

Luján, J. M., Dolz, V., Monsalve-Serrano, J., & López-Cascant, J. A. (2017). Nueva normativa anticontaminante en vehículos diésel Euro 6. *Técnica Industrial*, 318, 28-33.

Martínez Bertran, J. (2017). *Métodos de estimación del estado de carga de baterías electroquímicas* (Bachelor's thesis, Universitat Politècnica de Catalunya).

Iglesias Chaparro, S. (2019). *Análisis sobre el transporte en automóviles de propulsión alternativa* (Bachelor's thesis).

Navarrete Márquez, J. (2021). *CarAnalyzer: Aplicación móvil para el diagnóstico de vehículos a través de la interfaz OBDII* (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).



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

TRABAJO FIN DE GRADO

**DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE
MODELOS DE VEHÍCULOS PARA EL
ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SISTEMAS
PROPULSIVOS APLICADOS AL
TRANSPORTE LIGERO POR CARRETERA**

ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN FASTSIM

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Autor: César Pérez Domínguez

Tutor: Óscar García Afonso

San Cristóbal de La Laguna, junio de 2022

8 ANEXO I: CONFIGURACIÓN DEL MODELO EN FASTSIM

El presente anexo tiene por finalidad la explicación detallada de cómo configurar un modelo paso a paso en FastSim.

En primer lugar, se debe introducir las características principales del vehículo a través de la opción “Ligh-duty vehicle import wizard”, seleccionando un modelo semejante si no existiera el deseado en la base de datos del programa.

Por su parte, tal y como se observa en la Figura 8.1, las características que se deben indicar son: ancho y alto en pulgadas, la potencia del motor en kilowatios, así como la capacidad de la batería para los HEV, PHEV o BEV y un valor de fuel energy en Gasoline Gallon Equivalent, GGE (Equivalente de Galón por Gasolina), siendo 1 para modelos convencionales.

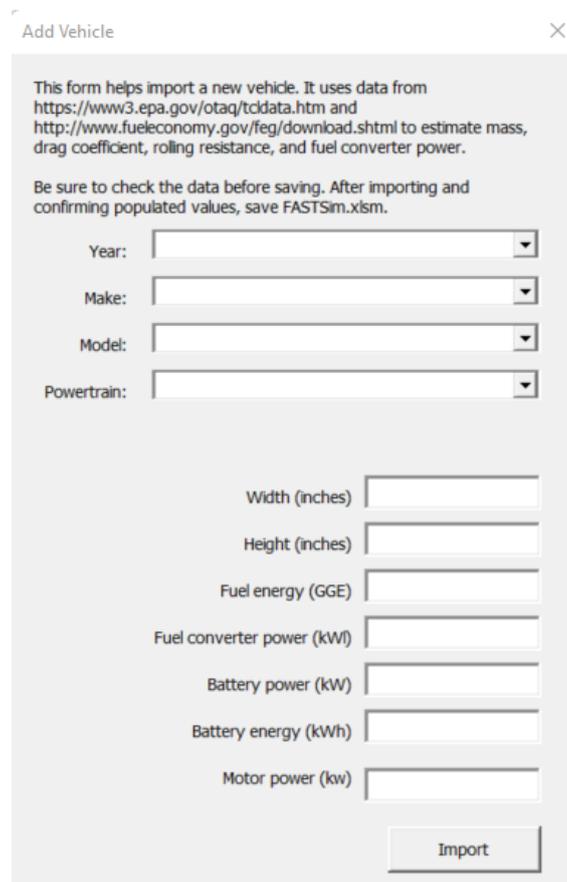


Figura 8.1 Ventana para importar el modelo de vehículo deseado en FastSim

Fuente: Elaboración propia

Una vez importado el vehículo, el software da la posibilidad al usuario de guardarlo con el nombre deseado, además de ordenarlo dentro de la base de datos para facilitar su posterior ubicación (ver Figura 8.2).

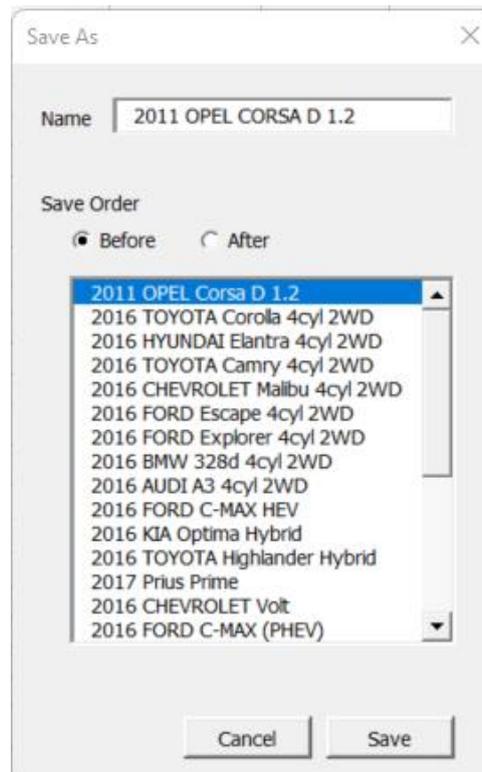


Figura 8.2 Renombrar y ordenar el modelo de vehículo en FastSim

Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso trata de la incorporación de todos los parámetros necesarios para el modelado, explicados en el apartado 4.5.1 del trabajo.

En el primer bloque de parámetros (ver Figura 8.3), cobra gran importancia el peso en vacío del vehículo (vehicle glider mass), indicándose en libras, y a través del cual el propio software estima el peso individual de diversos componentes (motor, chasis, carrocería...), mediante la herramienta mostrada en la Figura 8.4

Row	Parameter	Value
8		
9	Vehicle	Light-duty vehicle import wizard
10	Fuel economy test procedure	Conv 1
11	Drag coefficient	0,300
12	Frontal area (m ²)	2,585
13	Vehicle glider mass (kg)	1296
14	Vehicle center of gravity height (m)	0,53
15	Drive axle weight fraction	0,59
16	Wheel base (m)	1,9
17	Cargo mass (kg)	136
18	Vehicle override test mass (kg)	

Figura 8.3 Características del vehículo FastSim

Fuente: Elaboración propia

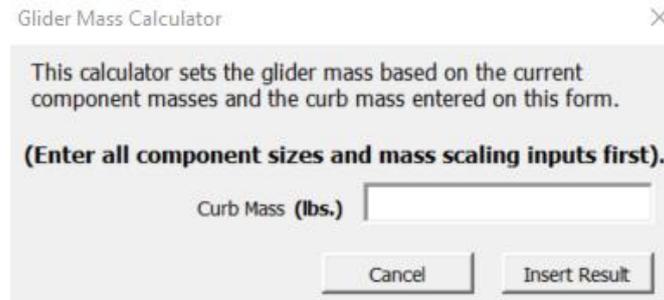


Figura 8.4 Incorporación del peso en vacío en FastSim

Fuente: Elaboración propia

Por otra parte, en el bloque del depósito de combustible (Figura 8.5), es importante indicar la capacidad de almacenamiento de este (fuel storage energy), pero desde el punto de vista energético, sabiendo las relaciones por unidad de volumen, en función del tipo de combustible utilizado.

19		
20	Fuel storage	
21	Fuel storage power (kW)	2000
22	Fuel storage time to full power (s)	1
23	Fuel storage energy (kWh)	33
24	Fuel and fuel storage mass (kWh/kg)	9,89

Figura 8.5 Características del depósito de combustible FastSim

Fuente: Elaboración propia

Dichas relaciones son las indicadas a continuación:

Tabla 8.1 Energía por unidad de volumen según combustible

	Capacidad energética de almacenamiento (kWh/L)
Gasolina	9,6
Diésel	10,7

Fuente: Elaboración propia

Por tanto, conociendo el volumen del depósito del vehículo, se puede calcular la capacidad energética del mismo.

En cuanto al tercer bloque de parámetros, trata de caracterizar el motor de combustión, por lo que se debe indicar el ciclo térmico correspondiente de vehículo estudiado.

25				
26	Fuel converter			
27	Fuel converter power (kW)			63
28	Fuel converter efficiency type	Show/hide chart	SI	1
29	Efficiency improvement		SI	0,0%
30	Fuel converter time to full power (s)		Atkinson	6
31	Fuel converter base mass (kg)		Diesel	61
32	Fuel converter specific power (kW/kg)		Fuel Cell	2,13
33	Minimum Engine-on Time (s)		Hybrid Diesel	30,00
34				

Figura 8.6 Características motor de combustión FastSim

Fuente: Elaboración propia

Los siguientes dos bloques pertenecen a la caracterización de los motores eléctricos y sus correspondientes baterías, por lo que solo estará habilitado para los vehículos HEV, PHEV y BEV.

34				
35	Motor			
36	Motor power (kW)			53
37	Motor peak efficiency	Show/hide chart		95%
38	Motor time to full power (s)			4
39	Motor controller mass (kg/kW)			0,833
40	Motor controller base mass (kg)			21,6
41				
42	Traction battery			
43	Battery power (kW)			53,0
44	Battery energy (kWh)			1,3
45	Battery mass (kg/kWh)			8,0
46	Battery base mass (kg)			75,0
47	Battery round trip efficiency			95,1%
48	Battery life coefficient A (product)			110
49	Battery life coefficient B (power)			-0,6811

Figura 8.7 Características motor eléctrico y batería FastSim

Fuente: Elaboración propia

A continuación, existe un sexto bloque cuyo objetivo es conseguir una buena representatividad sobre las características de las ruedas del vehículo (ver Figura 8.6).

Los parámetros comentados son simples de introducir mientras que, para el radio de la rueda, el software facilita una ventana de cálculo a través de la cual se pueden indicar las medidas de los neumáticos y lo calcula siguiendo la ecuación 4.3 (Figura 8.7).

50		
51	Wheel	
52	Wheel inertia (one wheel) (kg*m ²)	0,815
53	Number of wheels	4
54	Rolling resistance coefficient	0,008
55	Tire radius (m) <input type="text"/> Calculator	0,341
56	Wheel coefficient of friction	0,7

Figura 8.8 Características neumáticos FastSim

Fuente: Elaboración propia

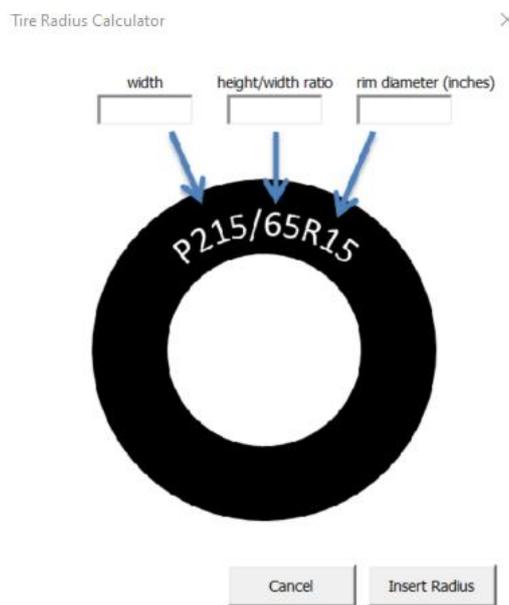


Figura 8.9 Herramienta para el cálculo del radio de la rueda en FastSim

Fuente: Elaboración propia

Por último, existen otros dos bloques referentes a la estrategia de la energía en híbridos tanto enchufables como no enchufables y a diferentes componentes como el alternador, transmisión, batería, freno regenerativo...

57		
58	Energy management	
59	Minimum state of charge	HEV defaults PHEV defaults
60	Maximum state of charge	Show/hide control charts
61	ESS discharge effort toward max FC efficiency (percent)	
62	ESS charge effort toward max FC efficiency (percent)	
63	Speed where the battery reserved for accelerating is zero	
64	Percent of usable battery energy reserved to help accelerate	
65	Percent SOC buffer for high accessory loads during cycles with long idle time	
66	Speed at which engine is commanded on (mph)	
67	Power demand at which engine is commanded on (kW)	

Figura 8.10 Estrategia de la energía en FastSim

Fuente: Elaboración propia

68		
69	Misc.	
70	Alternator efficiency (conv. veh only)	100%
71	Charger efficiency	86%
72	Auxiliary loads (kW)	0,5
73	Force auxiliary loads on fuel converter (true/false)	FALSO
74	Transmission mass (kg)	114
75	Transmission efficiency	95,0%
76	Component mass multiplier	1,40
77	Max battery to fuel energy error	0,50%
78	Max regen	90%

Figura 8.11 Otros componentes en FastSim

Fuente: Elaboración propia

Con los datos introducidos, el siguiente paso es la simulación. Para ello, de forma predeterminada, FastSim siempre simula algunos ciclos de conducción de servicio ligero en ciudad y carretera.

No obstante, además de esto, existe la posibilidad de simular ciclos de conducción personalizados como se puede ver en la imagen.

159			
160	Additional drive cycles		
161			
162	Options	Selections	
163	erTestCyc	PRUEBACOCHE1	12
164	OrgCnty		1
165	singleCycTest		
166	DRIVE		
167	Japan15Mode		
168	Japan10Mode		
169	LA92 Short		
170	Add	Delete	
171	Optimize battery for electric range & life		
172	Optimize battery depth of discharge for life		
173			
174			
175			
176	Run	Results need run update:	VERDADERO
177	<input checked="" type="checkbox"/> PHEV shortcut	Run time (seconds):	11,96
178			
179			

Figura 8.12 Simular ciclo personalizado

Fuente: Elaboración propia

Para incluir dicho ciclo es necesario proporcionarle al software datos de velocidad (eligiendo entre m/s, mph o km/h) y el gradiente (en tanto por uno); ambos parámetros con una frecuencia de 1 Hz.

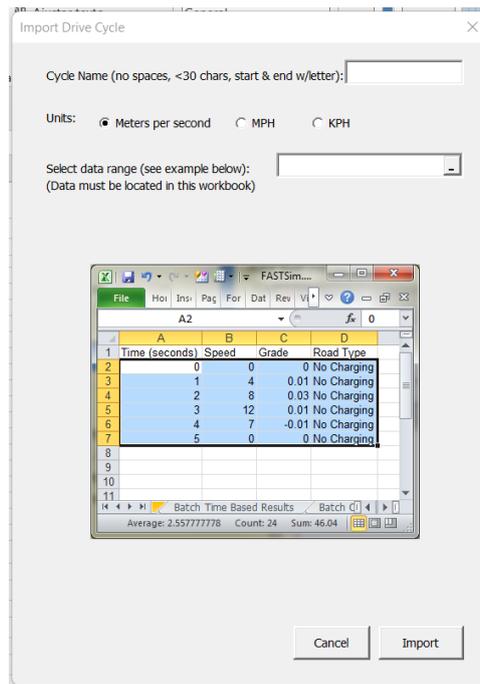


Figura 8.13 Incorporación de un ciclo personalizado a FastSim

Fuente: Elaboración propia

Por último, la interfaz principal muestra un apartado donde se recogen los resultados más relevantes. No obstante, también posee más funciones como comparaciones, estimación de costes, validaciones, estudios paramétricos etc.

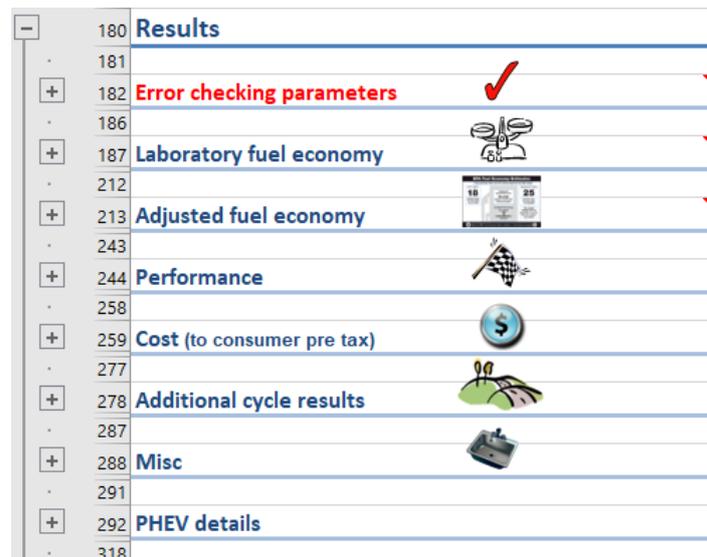


Figura 8.14 Resultados en FastSim

Fuente: Elaboración propia

Asimismo, tras la simulación, el propio software genera una hoja nueva con todos los resultados, tanto generales como segundo a segundo producto del modelado.

En esta hoja se pueden encontrar valores de consumo, eficiencias, pérdidas, potencia, estado de la carga de la batería...

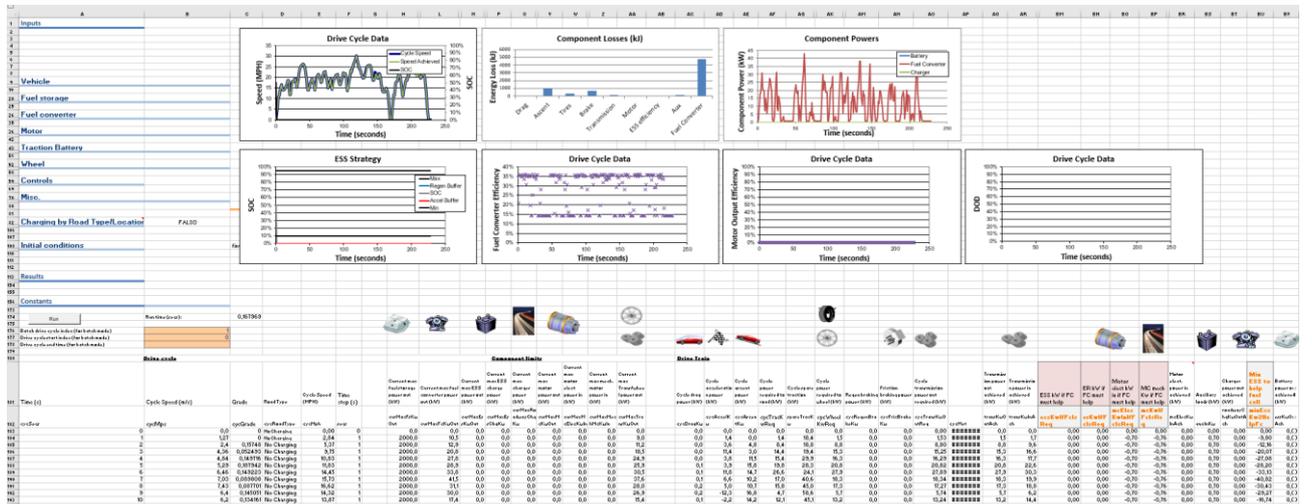


Figura 8.15 Resultados de un ciclo en FastSim

Fuente: Elaboración propia