



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

Trabajo Fin de Grado

ANÁLISIS ENERGÉTICO DE SOLUCIONES ALTERNATIVAS PARA TRANSPORTE PESADO DE PASAJEROS

Titulación: Grado en Ingeniería Mecánica

Curso académico: 2021-2022

Autor: Ibrahim Plasencia Castilla

Tutor: Óscar García Afonso

La Laguna, junio de 2022

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL	I
ÍNDICE DE FIGURAS	II
ÍNDICE DE TABLAS	VIII
NOMENCLATURAS	X
UNIDADES	XI
ÍNDICE DE MEMORIA	XII

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Reparto de la cuota de mercado de guaguas en la Unión Europea (2021). Fuente: ACEA	4
Figura 1.2 Cuota de emisiones de gases de efecto invernadero por sector en la Unión Europea. .	5
Figura 2.1 Esquema de componentes de las principales arquitecturas de guaguas presentes en el mercado (AUX=auxiliares, BAT=batería, FC=pila de combustible de hidrógeno, FD= Diferencial, GB= Caja de cambios, GC=Generador y controlador, MC=Motor eléctrico y controlador, TC=acoplador de torsión) [9].....	11
Figura 2.2 Esquema de componentes de una guagua de gas natural comprimido [11]......	13
Figura 2.3 Ensayo de una guagua sobre banco de rodillos [12].	17
Figura 2.4 Ciclo CBD. Fuente Propia	18
Figura 2.5 Ciclo Arterial. Fuente Propia.....	19
Figura 2.6 Ciclo Commuter. Fuente Propia	20
Figura 2.7 Ciclo Manhattan. Fuente Propia	22
Figura 2.8 Ciclo ETC. Fuente Propia.....	23
Figura 3.1 Entorno AMBER. Fuente: https://vms.es.anl.gov/tools/	26
Figura 3.2 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento a velocidad constante [16].	31
Figura 3.3 Cadena energética del pozo a la rueda (<i>Well-To-Wheels</i>) y subcadena del tanque a la rueda (<i>Tank-To-Wheels</i>). Fuente: www.carboncare.org	32
Figura 3.4 Guaguas cuyas especificaciones técnicas son tomadas como referencia	34
Figura 3.5 Guagua convencional (Diesel). Modelo de Autonomie	35
Figura 3.6 Guagua híbrida en paralelo (no enchufable). Modelo de Autonomie	36
Figura 3.7 Guagua híbrida en serie (enchufable). Modelo de Autonomie	37
Figura 3.8 Guagua 100% eléctrica. Modelo de Autonomie.....	38
Figura 3.9 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua convencional de Autonomie y la literatura. Fuente Propia.....	44
Figura 3.10 Comparación de consumos entre el modelo híbrido en paralelo y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.....	47
Figura 3.11 Comparación entre la operación del vehículo convencional y el híbrido en paralelo en ciudad. Par de salida del motor de combustión (línea azul) y par de salida del motor eléctrico (línea roja). Fuente Propia.	49
Figura 3.12 Posición del pedal del acelerador expresado como un porcentaje entre 0 (no pisado) y 100 (totalmente pisado) para el vehículo convencional y el híbrido en paralelo durante la aceleración. Vehículo convencional (línea azul) e híbrido en paralelo (línea roja). Fuente Propia.....	50
Figura 3.13 Comparación entre la operación del vehículo convencional y el híbrido en paralelo en autopista. Par de salida del motor de combustión (línea azul) y par de salida del motor eléctrico (línea roja). Fuente Propia.	51
Figura 3.14 Posición del pedal del acelerador expresado como un porcentaje entre 0 (no pisado) y 100 (totalmente pisado) para el vehículo convencional y el híbrido en paralelo. Vehículo convencional (línea azul) e híbrido en paralelo (línea roja). Fuente Propia.	52
Figura 3.15 Tren de potencia de la guagua New Flyer XDE40 (híbrida en serie). Fuente: [23].....	54

Figura 3.16 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua híbrida en serie de Autonomie y la literatura. Fuente Propia.....	55
Figura 3.17 Estrategia de encendido y apagado del motor de combustión del híbrido en serie enchufable simulado bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter para una batería de 30kWh. Se muestra el perfil de velocidad (línea roja), señal de arranque del MCIA (línea azul) y nivel de carga de la batería (línea amarilla). Fuente Propia	56
Figura 3.18 Balance energético en la batería del vehículo empleando la nomenclatura del programa. Fuente propia.....	58
Figura 3.19 Comparación de consumos entre el modelo híbrido en serie y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.....	61
Figura 3.20 Motor eléctrico y controlador modelo UQM PowerPhase HD 220 de la guagua Proterra Catalyst BE40 tomada como referencia [26].	63
Figura 3.21 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua 100% eléctrica de Autonomie y la literatura. Fuente Propia	64
Figura 3.22 Comparación de consumos entre el modelo 100% eléctrico y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.....	67
Figura 3.23 Comparación de pérdidas energéticas entre el vehículo convencional y el 100% eléctrico. Comparación con la literatura [29]. Fuente Propia.	68
Figura 3.24 Vista satélite de la Línea 253 Intercambiador de La Laguna - Guamasa – Garimba. Fuente Propia	70
Figura 3.25 Perfil de velocidad de la Línea 253 Intercambiador de La Laguna-Guamasa–Garimba. Fuente Propia	72
Figura 3.26 Vista satélite de la Línea 110 Intercambiador de Santa Cruz – San Isidro – Los Cristianos – Costa Adeje. Fuente Propia	73
Figura 3.27 Perfil de velocidad de la Línea 110 Intercambiador de Santa Cruz – San Isidro – Los Cristianos-Costa Adeje. Fuente Propia	75
Figura 3.28 Vista satélite de la Línea 015 Sentido Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna (ascendente). Fuente Propia.....	76
Figura 3.29 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (sentido ascendente). Fuente Propia	79
Figura 3.30 Vista satélite de la Línea 015 Sentido Intercambiador de La Laguna – Santa Cruz (descendente). Fuente Propia.....	81
Figura 3.31 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (sentido descendente). Fuente Propia	83
Figura 3.32 Vista satélite de la Línea 015 Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna. Sentido ascendente (línea roja) y descendente (línea verde). Fuente Propia.....	85
Figura 3.33 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia	86
Figura 4.1 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 253.....	90
Figura 4.2 Justificación en la reducción de consumo del híbrido en paralelo respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Curva de par MCIA (azul) y curva de par motor eléctrico (rojo). Fuente Propia	90

Figura 4.3 Justificación en la reducción de consumo del híbrido en serie respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Señal de encendido MCIA (azul) y perfil de velocidad (rojo). Fuente Propia	91
Figura 4.4 Justificación en la reducción de consumo del vehículo 100% eléctrico respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Curva de par motor (azul) y perfil de velocidad (rojo). Fuente Propia	91
Figura 4.5 Comparación de consumo energéticos equivalentes entre configuraciones para la Línea 253	92
Figura 4.6 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.	92
Figura 4.7 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.	94
Figura 4.8 Justificación de la autonomía alcanzada por el híbrido en serie en la Línea 253 LL-Garimba. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia.	95
Figura 4.9 Comparación de emisiones de CO ₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.....	97
Figura 4.10 Operación del vehículo híbrido en serie anterior en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia	98
Figura 4.11 Operación del vehículo 100% eléctrico anterior en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y perfil de velocidad de demanda (azul). Fuente Propia.....	99
Figura 4.12 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 110.....	102
Figura 4.13 Operación del vehículo híbrido en serie en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia	103
Figura 4.14 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 110	104
Figura 4.15 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en la Línea 253 y 110. Fuente Propia	105
Figura 4.16 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.....	106
Figura 4.17 Operación del vehículo 100% eléctrico en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandada (azul). Fuente Propia	107
Figura 4.18 Comparación de emisiones de CO ₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.	107
Figura 4.19 Resultado de simulación para las configuraciones base de cada arquitectura en el ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta). Perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandado (azul). Fuente Propia.	110
Figura 4.20 Resultado de simulación para las configuraciones modeladas en el ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta). Perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandado (azul). Fuente Propia. ...	113
Figura 4.21 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 015.....	114

Figura 4.22 Comparación de curvas de descarga de la batería del vehículo eléctrico (300kWh) en la dirección LL-SC de la Línea 015 cuando el SOC inicial es del 100% (curva azul) y del 90% (curva roja). Fuente Propia	115
Figura 4.23 Comparación de curvas de descarga de la batería del vehículo eléctrico (300kWh) en la dirección SC-LL de la Línea 015 cuando el SOC inicial es del 100% (curva azul) y del 90% (curva roja). Fuente Propia	116
Figura 4.24 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 015	116
Figura 4.25 Comparación de emisiones de CO ₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 015 SC-LL en ambos sentidos de la ruta. Fuente Propia.	117
Figura 4.26 Balance energético de la configuración 100% eléctrica en la dirección LL-SC de la Línea 015. Fuente Propia.	118
Figura 4.27 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 015.....	119
Figura 4.28 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 015	120
Figura 4.29 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en las Líneas 253, 110 y 015. Fuente Propia.	120
Figura 4.30 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 015 SC-LL. Fuente Propia.	122
Figura 4.31 Operación del vehículo híbrido en serie en la Línea 015 SC-LL. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia	123
Figura 4.32 Comparación de emisiones de CO ₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 015 SC-LL (ida y vuelta). Fuente Propia.	124
Figura 4.33 Comparación de consumo de combustible equivalente entre arquitecturas y líneas.	126
Figura 4.34 Comparación de consumo energético equivalente entre arquitecturas y líneas. Fuente Propia	128
Figura 4.35 Comparación de autonomía y horas equivalentes de operación entre arquitecturas y líneas Fuente Propia.....	128
Figura 4.36 Comparación de emisiones de CO ₂ equivalente entre arquitecturas y líneas. Fuente Propia.	130
Figura 5.1 Comparación de consumo, energía recuperada en frenada y nivel descargado de la batería para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 253. Fuente Propia.	133
Figura 5.2 Comparación de autonomía y emisiones de CO ₂ equivalentes para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 253. Fuente Propia.	134
Figura 5.3 Comparación de consumo, energía recuperada en frenada y nivel descargado de la batería para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia.	136
Figura 5.4 Comparación de autonomía y emisiones de CO ₂ equivalentes para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia.	136
Figura 5.5 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de la configuración 100% eléctrica con batería de 30kWh en la Línea 253 LL-Garimba Fuente Propia.....	138

Figura 5.6 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de la configuración 100% eléctrica con batería de 300kWh en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.	139
Figura 5.7 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de las configuraciones 100% eléctrica de la Línea 015 SC-LL. Fuente Propia.	140
Figura 5.8 Comparación entre perfiles de velocidad obtenidos para dos conductores con distinto estilo de conducción en la Línea 253 LL-Garimba. Conductor más agresivo (curva azul), conductor menos agresivo (curva roja). Fuente Propia.	143
Figura 5.9 Comparación en consumo de combustible equivalente entre el conductor más agresivo y el menos agresivo en la Línea 253 LL-Garimba para diferentes arquitecturas. Fuente Propia.	144
Figura 5.10 Comparación en autonomía alcanzada entre el conductor más agresivo y el menos agresivo en la Línea 253 LL-Garimba para la configuración eléctrica. Fuente Propia.	145
Figura 6.1 Comparación en consumo de combustible equivalente entre arquitecturas y configuraciones para cada línea analizada. Fuente Propia.	147
Figura 6.2 Comparación en autonomía y emisiones entre arquitecturas y configuraciones para cada línea analizada. Fuente Propia.	148
Figura 9.1 <i>Workflow</i> . Fuente Propia.	162
Figura 9.2 Selección de vehículos. Fuente Propia.	163
Figura 9.3 Representación esquemática de una arquitectura modelada (arriba) y el editor del modelo (abajo) en el programa Autonomie. Fuente Propia.	163
Figura 9.4 Representación general en el nivel más alto del modelo en Simulink. Fuente Propia.	165
Figura 9.5 Sistemas, subsistemas y controladores en niveles más bajos del modelo en Simulink. Fuente Propia.	166
Figura 9.6 Bloque de Stateflow. Lógica de control de cambio de marchas. Fuente Propia.	167
Figura 9.7 Archivo de inicialización del motor de la guagua eléctrica construido en MATLAB. Fuente Propia.	168
Figura 9.8 Ventana de selección de ficheros. Fuente Propia.	169
Figura 9.9 Ventana de modificación de parámetros del vehículo. Fuente Propia.	170
Figura 9.10 Ventana de selección de ciclo. Fuente Propia.	171
Figura 9.11 Ventana de definición del estudio paramétrico. Fuente Propia.	172
Figura 9.12 Ventana principal de resultados de la simulación. Fuente Propia.	173
Figura 9.13 Potencia de salida del motor, estado de carga de la batería y velocidad para la guagua eléctrica urbana en el ciclo Arterial con tres niveles de carga de pasajeros. 0 pasajeros (línea azul), 32 pasajeros (línea roja) y 67 pasajeros (línea amarilla). Fuente Propia.	174
Figura 9.14 Documento HTML de salida de resultados para guagua eléctrica en el ciclo Arterial con carga de 32 pasajeros. Fuente Propia.	175
Figura 9.15 Uso del marcador de datos en la ventana de gráficos. Fuente Propia.	176
Figura 9.16 Consumo energético desglosado por componentes para la simulación anterior. Fuente Propia.	176
Figura 9.17 Gráficos predefinidos de MATLAB. Ejemplo de mapa de eficiencia motor para una guagua eléctrica en el ciclo Arterial. Fuente Propia.	177
Figura 9.18 Impacto del gradiente de carretera sobre el consumo de combustible equivalente en la Línea 015 SC-LL. Comparación entre el consumo obtenido si no existiera gradiente de carretera	

(barras azules), y cuando se considera el ciclo original, con gradiente (barras naranjas). Fuente Propia. 179

Figura 9.19 Impacto del gradiente de carretera sobre las emisiones de CO₂ equivalente (WTW) en la Línea 015 SC-LL. Comparación entre las emisiones obtenidas si no existiera gradiente de carretera (barras azules), y cuando se considera el ciclo original, con gradiente (barras naranjas). Fuente Propia. 180

Figura 9.20 Comparación en consumo de combustible equivalente para distintos niveles de carga de pasajeros según arquitectura para las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC-Costa Adeje). Fuente Propia. 181

Figura 9.21 Comparación en consumo de combustible equivalente para distintos niveles de carga de accesorios según arquitectura para las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC-Costa Adeje). Influencia de la presencia de aire acondicionado (8kW). Fuente Propia. 182

Figura 9.22 Impacto de la agresividad en la conducción sobre las emisiones de CO₂ equivalente (WTW) y la autonomía del vehículo para las distintas arquitecturas analizadas en las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC- Costa Adeje). Fuente Propia. 183

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Contribución a las emisiones totales por sector (2019)	6
Tabla 2.1 Parámetros principales del ciclo CBD	19
Tabla 2.2 Parámetros principales del ciclo Arterial	20
Tabla 2.3 Parámetros principales del ciclo Commuter	21
Tabla 2.4 Parámetros principales del ciclo Manhattan	22
Tabla 2.5 Parámetros principales del ciclo ETC	24
Tabla 3.1 Parámetros generales.....	38
Tabla 3.2 Parámetros propios considerados como base para cada arquitectura	39
Tabla 3.3 Condiciones de verificación de los modelos.....	42
Tabla 3.4 Comparación de características: Guagua convencional Autonomie y New Flyer XD40	43
Tabla 3.5 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua convencional Autonomie y New Flyer XD40	44
Tabla 3.6 Resultados de consumo para la guagua convencional bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura	45
Tabla 3.7 Consumo de combustible de la guagua convencional bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter	46
Tabla 3.8 Reducción de consumo que representa el híbrido en paralelo respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter.....	47
Tabla 3.9 Comparación de características: Guagua híbrida en serie Autonomie y New Flyer XDE40	53
Tabla 3.10 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua híbrida en serie Autonomie y New Flyer XDE40.....	54
Tabla 3.11 Resultados de consumo para la guagua híbrida en serie bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura.....	60
Tabla 3.12 Energía recuperada en frenada por el híbrido en serie simulado en los tres ciclos.	61
Tabla 3.13 Reducción de consumo que representa el híbrido en serie respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter.....	62
Tabla 3.14 Comparación de características: Guagua eléctrica Autonomie y Proterra Catalyst BE40	63
Tabla 3.15 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua 100% eléctrica Autonomie y New Flyer XE40	64
Tabla 3.16 Resultados de consumo para la guagua 100% eléctrica bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura.....	66
Tabla 3.17 Reducción de consumo que representa el vehículo 100% eléctrico respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter.....	67
Tabla 3.18 Estadísticas de la Línea 253	70
Tabla 3.19 Paradas realizadas en la Línea 253.....	71
Tabla 3.20 Parámetros principales del ciclo de la Línea 253	72
Tabla 3.21 Estadísticas de la Línea 110	74
Tabla 3.22 Paradas realizadas en la Línea 110.....	74

Tabla 3.23 Parámetros principales del ciclo de la Línea 110	75
Tabla 3.24 Estadísticas de la Línea 015 Sentido ascendente	77
Tabla 3.25 Paradas realizadas en la Línea 015 Sentido ascendente	77
Tabla 3.26 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (sentido ascendente)	80
Tabla 3.27 Estadísticas de la Línea 015 Sentido descendente	81
Tabla 3.28 Paradas realizadas en la Línea 015 Sentido descendente	82
Tabla 3.29 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (sentido descendente)	84
Tabla 3.30 Estadísticas de la Línea 015 (ida y vuelta)	85
Tabla 3.31 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta)	87
Tabla 4.1 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 30kWh en la Línea 253	89
Tabla 4.2 Comparación de valores de eficiencia media en la Línea 253	93
Tabla 4.3 Parámetros propios de cada configuración para la Línea 110	100
Tabla 4.4 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 286kWh en la Línea 110	101
Tabla 4.5 Comparación de valores de eficiencia media entre las Líneas 253 y 110	105
Tabla 4.6 Parámetros propios de cada configuración para la Línea 015	111
Tabla 4.7 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 50kWh en la Línea 015	113
Tabla 4.8 Comparación de valores de eficiencia media entre las Líneas 253, 110 y 015	121

NOMENCLATURAS

ACEA – European Automobile Manufacturer’s Association

AMBER – Advanced Model Based Engineering Resource

CBD – Central Business District

CNG – Compressed Natural Gas

EPA – Environmental Protection Agency

ESS – Energy Storage System

ETC – European Transient Cycle

EV- Electric Vehicle

FCEB – Fuel Cell Electric Bus

FCEV – Fuel Cell Electric Vehicle

GHG – Greenhouse Gas

GPS – Global Positioning System

IDAE – Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía

IEA – International Energy Agency

ISTAC – Instituto Canario de Estadística

MCIA – Motor de combustión interna alternativo

PCI – Poder Calorífico Inferior

%TTMB2mph – Percent Time Trace Missed by 2mph

PHEV – Plug-in Hybrid Electric Vehicle

SOC – State of Charge

TITSA – Transportes Interurbanos de Tenerife, S.A.

TTW – Tank-To-Wheels

VPA – Vehicle Propulsion Architecture

VPC – Vehicle Propulsion Controller

WTT – Well-To-Tank

WTW – Well-To-Wheels

UNIDADES

MPGe – Miles Per Gallon Gasoline equivalent

MPDGe – Miles Per Gallon Diesel equivalent

Btu – British Thermal Unit

gCO₂eq/km – Gramos de CO₂ equivalente por kilómetro

ÍNDICE DE MEMORIA

1	INTRODUCCIÓN	1
1.1	Resumen.....	1
1.2	Abstract.....	2
1.3	Antecedentes	3
1.4	Objetivos	9
1.5	Alcance	10
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	11
2.1	Introducción a las arquitecturas de guaguas presentes en el mercado	11
2.1.1	Vehículos convencionales (Diesel)	11
2.1.2	Vehículos de Gas Natural comprimido (CNG)	12
2.1.3	Vehículos híbridos en paralelo.....	13
2.1.4	Vehículos híbridos en serie.....	14
2.1.5	Vehículos eléctricos	15
2.1.6	Vehículos de pila de combustible de hidrógeno	16
2.2	Ciclos de homologación para vehículos pesados.....	17
2.2.1	Central Business District Cycle (CBD)	18
2.2.2	Arterial Cycle.....	19
2.2.3	Commuter Cycle	20
2.2.4	Manhattan Cycle	21
2.2.5	European Transient Cycle (ETC).....	23
3	METODOLOGÍA.....	26
3.1	Software de simulación: Autonomie.....	26
3.1.1	Cálculo del par necesario para seguir el perfil de velocidad de un ciclo	28
3.1.3	Procedimiento de cálculo del consumo energético en Autonomie	29
3.2	Toma de datos de especificaciones técnicas reales de guaguas.....	33
3.3	Arquitecturas y configuraciones modeladas en Autonomie. Parámetros fundamentales.....	34
3.4	Métricas para la comparación de consumos energéticos.....	40
3.5	Verificación de los modelos	41
3.6	Líneas de transporte público analizadas en la isla de Tenerife	70

4	ANÁLISIS FUNDAMENTAL DE RESULTADOS.....	88
4.1	Línea 253 La Laguna – Guamasa - Garimba	88
4.1.1	Elección inicial de capacidad de batería de la guagua 100% eléctrica.....	88
4.1.2	Comparación de consumos, emisiones de CO ₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones	89
4.2	Línea 110 Santa Cruz – Costa Adeje	98
4.2.1	Configuraciones modeladas para la Línea 110. Elección inicial de la capacidad de batería para la guagua 100% eléctrica.....	98
4.2.2	Comparación de consumos, emisiones de CO ₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones	102
4.3	Línea 015 Santa Cruz – La Laguna.....	109
4.3.1	Dificultades de los vehículos para seguir la ruta. Creación de nuevos modelos.....	109
4.3.2	Comparación de consumos, emisiones de CO ₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones	114
4.3.2.1	Análisis de la ruta en dirección SC-LL y en dirección LL-SC.....	114
4.3.2.2	Análisis de la ruta considerando ambas direcciones de forma conjunta (viaje de ida y vuelta).....	119
4.4	Comparación entre las líneas analizadas.....	125
5	ESTUDIO ELÉCTRICO. CONSUMO, EMISIONES Y AUTONOMÍA.....	133
5.1	Estrategia de carga de oportunidad frente a la convencional.....	133
5.2	Impacto de SOC, carga de pasajeros y accesorios sobre el consumo y la autonomía	137
5.3	Impacto de la agresividad del conductor en el consumo y la autonomía .	142
6	ARQUITECTURA Y CONFIGURACIÓN MÁS IDÓNEA PARA CADA RUTA ANALIZADA.....	147
7	CONCLUSIONES	153
7.1	Conclusiones generales.....	153
7.2	Estudios futuros	155
7.3	Conclusion	156
8	REFERENCIAS	158
9	ANEXO DE RESULTADOS	162
9.1	Guía de uso básica para la definición y análisis de modelos en el programa Autonomie.....	162

9.1.1	Lenguajes de programación usados y edición de modelos en Autonomie	165
9.1.2	Selección de ciclos, estudios paramétricos y obtención de resultados en Autonomie	170
9.2	Resultados de simulación complementarios	179
9.2.1	Impacto del gradiente de carretera en el consumo y las emisiones para distintas arquitecturas en la Línea 015	179
9.2.2	Impacto de la carga de pasajeros y de accesorios en el consumo y las emisiones para distintas arquitecturas en las Líneas 253 y 110.	181
9.2.3	Impacto del estilo de conducción en las emisiones y la autonomía para distintas arquitecturas en las Líneas 253 y 110.....	183

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

Debido a las presiones legislativas que buscan prohibir la venta de vehículos de combustión interna para 2035 y alcanzar un objetivo de cero emisiones netas de CO₂ para 2050, han surgido diferentes sistemas de propulsión principalmente basados en las tecnologías híbridas y eléctricas; y más recientemente en aquellas basadas en el uso de pilas de combustible de hidrógeno que tienen el objetivo de minimizar o eliminar dichas emisiones.

Sin embargo, la incorporación de estas tecnologías al sector del transporte pesado supone un mayor reto debido al elevado peso (o inercia) y volumen que necesitan desplazar, así como debido a las mayores horas de servicio y exigencias de autonomía, especialmente cuando no es posible realizar recargas de oportunidad.

En el presente Trabajo Fin de Grado se desarrollan herramientas y metodologías para el análisis energético de vehículos de transporte pesado de pasajeros por carretera. Para ello, se analizarán distintos tipos de arquitecturas (convencionales, híbridas y eléctricas) mediante el software Autonomie. Este software permite la simulación de modelos de vehículos y ciclos de conducción tanto proporcionados por el programa como creados por el usuario, permitiendo a su vez obtener una gran multitud de parámetros de consumo y rendimiento. Además, es posible realizar estudios paramétricos con el fin de evaluar el impacto sobre el consumo de distintos parámetros como pueden ser la carga de pasajeros, el sistema de climatización o el tamaño de la batería en configuraciones híbridas y eléctricas entre otros parámetros.

En general, el estudio se centrará en el sector de las guaguas de transporte público de la Isla de Tenerife, donde la introducción de estas nuevas tecnologías supone una dificultad añadida debido a la orografía de la isla (caracterizada por un perfil montañoso con gradientes de carretera muy variables) y por distintos tipos de rutas, desde urbanas hasta predominantemente de autopista, lo que da lugar a consumos muy dispares entre sí. Como resultado del trabajo, será posible valorar la situación actual del transporte público en la isla y la posibilidad de introducir estas nuevas tecnologías a corto, medio y largo plazo.

1.2 Abstract

Due to increasingly legislative pressures seeking to ban the sale of internal combustion vehicles by 2035 and reach the goal of zero net carbon dioxide emissions by 2050, it has been developed several propulsion systems mainly based on hybrid and electric technologies, and more recently on hydrogen fuel cell electric technology which are able to reduce or eliminate these emissions.

However, its introduction in the heavy-duty transport industry means a bigger challenge owing to the large weight (or inertia) and volume that these vehicles must transport, as well as due to the greater hours of service and autonomy requirements, especially when it is not possible an opportunity charging strategy.

In this Final Degree Project, tools and energy consumption analysis methodologies for heavy-duty road passenger transport vehicles are developed. For this aim, several vehicle architectures will be analysed (conventional, hybrid and electric ones) by using a software called Autonomie. This software allows simulations of vehicle models and driving cycles, both given by the program and user defined. A great amount of consumption and efficiency parameters can be obtained as a result, and it is also possible to determine the influence of passenger load, air-conditioning system, or battery size on vehicle consumption through parametric studies.

In general, the research will be focused on the analysis of transit buses in the public transport network of the Island of Tenerife where the introduction of these relatively new technologies represents a big issue due to the island topography (characterized by a mountainous profile with variable road grades) and the different types of routes, from urban to highway, leading to a very different consumption level. As a result of this project, it will be possible to evaluate the current situation of the public transport in the island and the possibility of introducing these technologies in the short, medium, and long term.

1.3 Antecedentes

Situación del mercado mundial

A finales de 2021 el stock de vehículos ligeros eléctricos en todo el mundo era de unos 16 millones de vehículos. En dicho año se vendieron 6.6 millones de unidades incluyendo vehículos de pasajeros, camionetas y vehículos comerciales, lo que representa más del doble de ventas respecto al 2020 (tras la reducción de restricciones y la mejora de la situación respecto al Covid-19) y cubriendo cerca del 9% del volumen total de vehículos ligeros vendidos en todo el mundo ese año la IEA (International Energy Agency) [1].

Si se comparan los datos con los correspondientes al mercado de vehículos eléctricos pesados se pueden identificar rápidamente las diferencias. Los últimos datos de los que dispone la IEA a nivel global son del 2020. En este año, el stock de guaguas eléctricas era de 600 mil unidades, y en lo referente a camiones, de 31 mil unidades [2]. En ese año se vendieron unas 82 mil guaguas eléctricas en todo el mundo, de las cuales el 98% fueron vendidas en China (claro dominante del sector), aunque en Europa, India y Latinoamérica se está incrementando el número de ventas. En cambio, en el sector de los camiones, se registraron 7400 unidades eléctricas, igualmente la mayoría en China, con una progresiva expansión en Europa y los Estados Unidos.

Según los datos disponibles, en el 2020 la cuota de mercado de las guaguas eléctricas era del 3%, siendo la correspondiente a los camiones eléctricos prácticamente nula, lo que da idea de las dificultades que está encontrando la electrificación para abrirse paso entre los vehículos pesados. El principal motivo se encuentra en las exigencias de potencia/par y autonomía de estos vehículos, especialmente debido a sus dimensiones, carga y elevado número de kilómetros diarios que necesitan recorrer. No obstante, la tecnología y la infraestructura de carga se espera que mejore a cada año, por lo que es un mercado que se espera que crezca progresivamente.

En este escenario de logro de cero emisiones netas de CO₂, el 55% de las guaguas y el 25% de los camiones vendidos a nivel mundial serán eléctricos en 2030 [3], lo que supone que el ritmo de crecimiento de ventas y establecimiento de infraestructuras adecuadas deben acelerarse. El objetivo es que las emisiones asociadas al transporte (aérea, marítimo y terrestre) se reduzcan en un 20% hasta los 5.7Gt de CO₂ en 2030 (para el año 2020 fueron 7.2Gt).

Situación en Europa

En lo que respecta al continente europeo, los datos revelan que en 2021 fueron vendidas 3064 guaguas eléctricas, con Francia al frente de ventas (622 unidades), seguida de Alemania (613) y Dinamarca (224), mientras que los Países Bajos ocupa la mayor parte del mercado de guaguas eléctricas con cerca del 60% del total según la Asociación Europea de Fabricantes de Automóviles [4]. Aproximadamente,

existían unas 8500 guaguas eléctricas registradas en el continente hasta ese momento, lo que supone un 10.6% del mercado de guaguas total en Europa. En cuanto a la tecnología híbrida, fueron vendidas 2926 guaguas con una cuota de mercado del 10.1%.

Cabe destacar que las ventas de guaguas impulsadas por combustibles alternativos, especialmente gas natural (CNG), han experimentado un notable crecimiento en el continente desde el 2016, experimentando una caída a partir de 2020 del 2.3%. Aun así, 3033 guaguas de gas natural fueron vendidas en 2021, casi tantas como eléctricas, representando hasta ese momento un 10.5% de la cuota del mercado. Además, en los últimos años, las guaguas impulsadas por pilas de combustible de hidrógeno están comenzando a ganar presencia en el mercado a pesar de ser una tecnología poco desarrollada logrando registrar 158 nuevas guaguas de este tipo en 2021 frente a las 47 vendidas el año anterior.

En la Figura 1.1 se muestra la cuota de mercado que representa cada tecnología en Europa

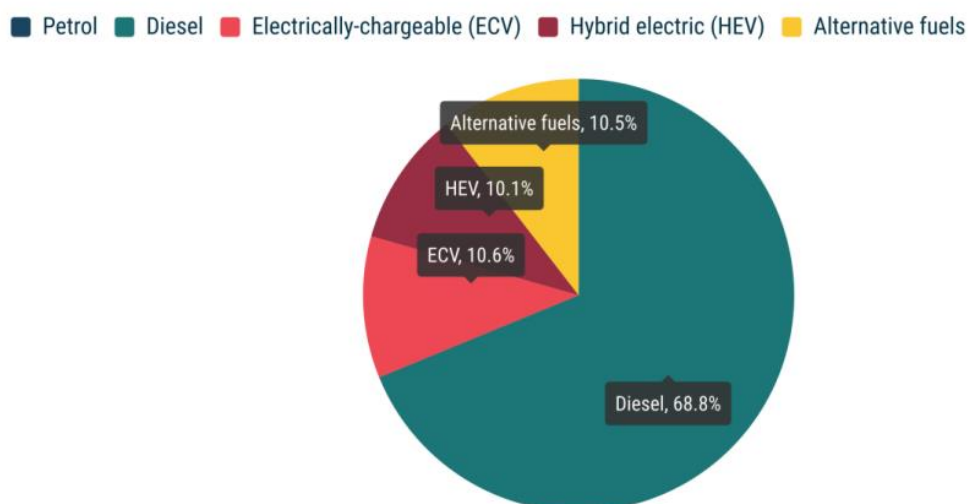


Figura 1.1 Reparto de la cuota de mercado de guaguas en la Unión Europea (2021). Fuente: ACEA

Atendiendo a las emisiones de gases de efecto invernadero (GHG) en el continente, más del 21% son debidas al transporte por carretera, de los cuales, los vehículos de pasajeros contribuyen con aproximadamente un 13% mientras que el transporte pesado lo hace con alrededor del 6%, siendo el resto correspondiente a furgonetas y motocicletas (datos de 2019). En la Figura 1.2 se puede apreciar la contribución a las emisiones de GHG en Europa por sector de actividad.

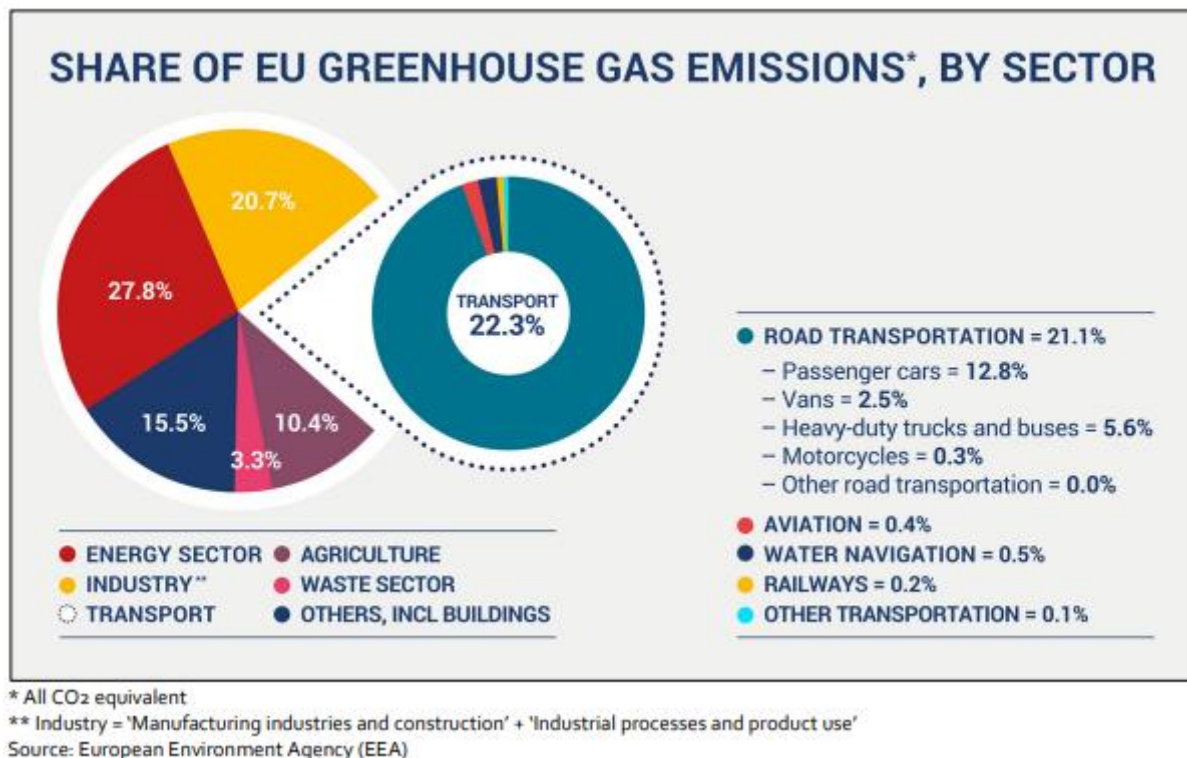


Figura 1.2 Cuota de emisiones de gases de efecto invernadero por sector en la Unión Europea.

En 2020, las emisiones cayeron de manera importante como consecuencia de las restricciones ocasionadas por la pandemia. Poniendo como ejemplo Europa, la media de reducción en emisiones de 2019 a 2020 fue del 10%, mientras que el año anterior (de 2018 a 2019) fue del 3.7% debido a las restricciones en la movilidad que sufrió el planeta [5]. Por este motivo, los datos de 2019 son más representativos de la situación real de emisiones que el 2020 y, por ello, se toman las emisiones de dicho año como referencia, ya que para el año 2021 no se dispone de datos y aún existían ciertas restricciones en muchos países. Por tanto, se tiene que el transporte pesado por carretera representa aproximadamente un 6% de las emisiones en Europa, casi la mitad de las emisiones asociadas a los vehículos ligeros, por lo que su contribución a las emisiones totales es destacable. Por este motivo, es necesario el análisis de soluciones alternativas en vehículos pesados para contribuir al logro de cero emisiones netas de CO₂ para 2050.

Situación en España

En España, las matriculaciones de guaguas eléctricas crecen más cada año, lo que resulta positivo para el sector y el medioambiente. En 2021, fueron matriculadas en el país 148 guaguas eléctricas y 449 híbridas. En cuanto a guaguas impulsadas por combustibles alternativos (gas natural mayoritariamente), se registraron 301 nuevas unidades. De acuerdo con esto, las guaguas eléctricas representan el 7.9% de la

cuota de mercado de guaguas en España, en cambio las híbridas lo hacen con un 23.9% y las de gas natural con un 16%, lo que significa que un 52.2% de las unidades siguen siendo alimentadas exclusivamente por un motor Diesel. En cuanto a las guaguas de gas natural, cabe mencionar que España está comenzando a abandonar su compra ya que respecto al año anterior el número de unidades registradas cayó en un 42.6%, otorgándole un mayor impulso a las tecnologías híbridas y eléctricas.

En lo referente a emisiones, según datos del 2019 del Parlamento Europeo, España representa el 9% de las emisiones de gases de efecto invernadero en Europa. Entre 2005 y 2019 el país redujo las emisiones un 27% superando la media europea y, casualmente, en 2019 se obtuvo que el 27% de las emisiones (la mayoría) eran generadas por el sector del transporte (aéreo, marítimo y terrestre) tal y como se muestra en la Tabla 1.1.

Tabla 1.1 Contribución a las emisiones totales por sector (2019)

Sector	Cuota de emisiones totales [%]
Industrias energéticas	16
Industria manufacturera y construcción	14
Industria de procesos y uso de productos	8
Agricultura	12
Transporte	27
Gestión de residuos	4
Otras emisiones	19

Fuente: European Parliament

No se dispone de datos clasificados por tipo de vehículo en España, pero a la vista de los datos se puede observar que este país contribuye con un peso notable a las emisiones totales en Europa y que el principal sector emisor es el sector transporte. Por este motivo, uno de los puntos en los que trabaja el país es en la sustitución paulatina de los modelos de guaguas convencionales por tecnologías eléctricas e híbridas, o empleando combustibles alternativos como el gas natural, que, aunque sus ventas han caído, contribuyen a reducir las emisiones y alcanzar los objetivos fijados por la Unión Europea.

Situación en la isla de Tenerife, Islas Canarias

A nivel insular, la introducción de guaguas eléctricas e híbridas en la flota de la isla es mucho más lenta que en otras provincias del territorio español debido principalmente la orografía y las características del sistema eléctrico canario. Además, se debe tener en cuenta la falta de una infraestructura de carga con suficiente capacidad como para permitir la recarga de varios vehículos pesados de forma simultánea con la demanda de potencia que ello requiere.

En cuanto a la red de infraestructuras eléctricas de la isla, está débilmente mallada, lo que provoca que los sistemas sean menos estables y seguros frente los picos de

demanda que podrían producirse o ante determinadas situaciones de falta de generación, como por ejemplo la falta de viento en los momentos para los que se produce energía eólica o fallos e indisponibilidades de elementos en la red [6]; todo lo contrario, a lo que sucedería en sistemas interconectados más grandes como los que pueden existir en la Península. Existe, por tanto, un elevado riesgo de que la red se dañe o se produzcan apagones de luz frecuentes debido a la sobrecarga de la red como consecuencia de la alta demanda que sería necesaria cubrir.

Por otro lado, debe considerarse que aproximadamente el 80% de la producción de electricidad en Canarias se basa en la quema de fueloil pesado y diésel, de forma que solo una pequeña parte procede de las energías renovables. Esto supone unas emisiones de CO₂ equivalentes del Pozo a las Ruedas (*Well-To-Wheels*) mucho mayores que en aquellos casos donde la producción de electricidad tiene un mayor apoyo en las energías renovables o se emplean combustibles más limpios como el gas natural (muy usado en el territorio peninsular pero del que no se dispone en Canarias) y que daría lugar a una reducción en la intensidad de CO₂ de la red. De manera comparativa, la intensidad de CO₂ en la red de Tenerife para el año 2020 era de 620 tCO₂eq/kWh según datos del Anuario Energético de Canarias [7], frente a las 160 tCO₂eq/kWh arrojadas por el sistema eléctrico peninsular en el mismo año (dato de Red Eléctrica de España).

Esto supondrá que en el actual *mix* energético de la isla, no se consigue una ventaja tan notable como en la península en la reducción de emisiones indirectas de vehículos eléctricos, especialmente en escenarios donde la recuperación de energía en frenada es muy escasa como puede ser en conducción por autopista.

Finalmente hay que añadir las dificultades que introduce la topografía de Tenerife. Al tratarse de una isla relativamente pequeña con un perfil montañoso, las carreteras presentan cambios de altitud que pueden dificultar la operación de los vehículos eléctricos en aquellas rutas donde el gradiente de carretera adquiere cierta importancia. Estos gradientes podrían hacer que la autonomía del vehículo se vea notablemente reducida a menos que, por ejemplo, se incremente el tamaño de las baterías. Esto, en una guagua (o vehículo pesado en general), se traduce en un mayor peso, una mayor exigencia de potencia o par, y que aumente el coste tanto de adquisición del vehículo, debido a las prestaciones requeridas, como de explotación del mismo, pues los consumos podrían hacer necesarias varias recargas al día. Como consecuencia, el coste eléctrico aumenta. Además, podría existir la posibilidad de que una ruta, que originalmente se realizara con una sola guagua, ahora requiriera de otras adicionales en la modalidad 100% eléctrica debido a la menor autonomía asociada a estos vehículos.

Flota de guaguas en la Isla

En Tenerife, existen numerosas empresas privadas de guaguas dedicadas principalmente al transporte escolar y al turismo. No obstante, el servicio más usado en la isla es el ofrecido por la empresa TITSA (Transportes Interurbanos de

Tenerife), perteneciente al sector público y dedicada al transporte diario de pasajeros en toda la isla.

De media, transporta 35 millones de pasajeros al año con una flota de guaguas de 574 unidades operando en 180 líneas en toda la isla y realizando unas 3700 paradas al día.

Principalmente la flota está formada por vehículos convencionales propulsados por un motor Diesel, pero también cuenta con algunos modelos híbridos. En concreto, existen 4 guaguas híbridas en serie operando en la Línea 910 (Intercambiador de Santa Cruz - Las Teresitas), de modo que en las zonas urbanas de Santa Cruz y San Andrés trabaja en modo 100% eléctrico y en el tramo que las une se arranca un generador Diesel para la carga de las baterías del modelo. Además, cuenta con 3 guaguas híbridas en paralelo operando en las líneas de Candelaria.

Actualmente, las guaguas híbridas en serie no se pueden enchufar dado que no existe la potencia contratada necesaria para poder cargarlas en el pantógrafo que se encuentra ya instalado en el Intercambiador de Santa Cruz de Tenerife. La potencia contratada en el intercambiador es de 300kW, principalmente destinada a alimentar los servicios de la estación (baños, iluminaria, cafetería, oficinas...), por lo que se encuentran solicitados 450kW adicionales para la carga de guaguas en la Línea 910, lo que permitiría prescindir del generador Diesel utilizado hasta ahora. Por otro lado, se encuentran solicitados 1.5MW más para realizar carga nocturna de las guaguas que la empresa desea comprar en los meses posteriores a la redacción de este TFG.

Además, recientemente la compañía ha puesto en circulación una guagua 100% eléctrica de 10.7m de longitud y otra de 12m que no se encuentran asignadas a una ruta específica, sino que van cambiando de ruta a modo de prueba, lo que permite a la empresa obtener datos de consumo de forma experimental, y que tras los estudios realizados en este TFG podrá comprobarse que es posible estimar dichos datos mediante la creación y simulación de modelos.

Por otro lado, está acordada la compra de 13 vehículos eléctricos de 9.5m de longitud para trabajar en líneas urbanas de la isla, así como 150 guaguas híbridas en paralelo, con lo que la compañía busca comenzar a expandir la gama eléctrica en el transporte público de la isla.

Extraordinariamente, se espera que la empresa compre un vehículo alimentado por una pila de combustible de hidrógeno, ya que es una tecnología que podría trabajar bien en aquellas rutas de mayor distancia o consumo donde el vehículo eléctrico presenta grandes problemas de autonomía y que actualmente dejan a los vehículos híbridos como la mejor opción [8].

1.4 Objetivos

El objetivo principal de este TFG es desarrollar modelos y metodologías que permitan el análisis energético de vehículos de transporte pesado de pasajeros por carretera. Así, se construirán distintos modelos para cada arquitectura (convencional, híbrida y eléctrica) y se simularán bajo distintos ciclos de conducción, tanto aquellos utilizados en centros de homologación para la verificación de los modelos, como creados por el usuario para la reproducción de rutas reales representativas de conducción en la isla de Tenerife. Esto permitirá comparar las distintas tecnologías y configuraciones entre sí, y analizar las fortalezas y debilidades de cada una de ellas según las características de la ruta, así como su idoneidad para las mismas.

Adicionalmente, se definen los siguientes objetivos específicos para alcanzar el objetivo principal:

- Recoger especificaciones técnicas reales de guaguas convencionales, híbridas y eléctricas en el mercado (dimensiones, coeficientes de arrastre aerodinámico y de rodadura, motorización, capacidad de depósito o baterías, carga asociada a los auxiliares del vehículo...).
- Recoger estudios energéticos que hayan sido realizados por otros autores en el sector de las guaguas de transporte público. Especialmente aquellos que analizan las tecnologías híbridas y eléctricas, comparándolas con las tecnologías convencionales. Esto permitirá verificar los modelos creados.
- Crear ciclos de conducción personalizados que sean representativos de líneas cubiertas por el transporte público de la isla. En concreto, las realizadas por la empresa TITSA.
- Crear vehículos en el software de simulación Autonomie en base a los datos conseguidos de fichas técnicas y estudios de la literatura.
- Verificar los modelos creados para las distintas arquitecturas.
- Llevar a cabo un análisis energético de los vehículos estudiados. Comparar los resultados para cada ruta, arquitectura y configuración.
- Estudiar el impacto de distintos factores en el consumo y las emisiones, como pueden ser la carga de pasajeros o de accesorios, la consideración de reservas de energía o degradación de las baterías, o incluso la agresividad del conductor sobre el consumo (o autonomía).

1.5 Alcance

El siguiente TFG presenta la metodología y los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas para los distintos modelos que han sido previamente verificados con datos de literatura correspondientes a estudios realizados en distintos países de todo el mundo (China, India, Estados Unidos, Inglaterra o Finlandia) debido a la indisponibilidad de datos experimentales referentes a las guaguas que operan en las líneas de la isla.

No obstante, la empresa TITSA dispone de esta información, y se ha conseguido firmar un convenio entre la Universidad de La Laguna y dicha empresa a raíz del proyecto de investigación realizado en la beca de colaboración que envuelve a este trabajo, de modo que posterior a la redacción de este TFG se dispondrá de datos suficientes para realizar una validación de modelos en lugar de una verificación, que es lo que se hará en este trabajo.

Por tanto, se parte de la premisa que los modelos se encontrarán verificados en lugar de validados, lo que significa que los valores suministrados por los modelos al menos son capaces de devolver valores de consumos y emisiones dentro de rangos habituales conforme a lo observado en la literatura.

Del mismo modo, para este TFG tampoco se dispone de los perfiles de conducción reales de las líneas analizadas, por lo que se ha tomado como base para la construcción de las rutas en la isla, ciclos de homologación de emisiones para vehículos pesados como el ETC (*European Transient Cycle*) que se describe posteriormente, y de cuya modificación surgen los ciclos representativos de conducción en la isla correspondientes a las líneas de TITSA estudiadas.

En definitiva, se obtendrán resultados dentro de un rango de valores esperado para las características de la ruta creada, pero podrán diferir ligeramente al tomar el perfil de conducción real y asignar las características técnicas reales de las guaguas de la flota de TITSA. A pesar de ello, dado que el modelo base está creado y verificado, y los ciclos son representativos en cuanto a velocidades, duración, paradas, etc., los resultados no deberían variar excesivamente.

La asignación de características reales a los modelos y ciclos, así como su análisis y comparación con los resultados obtenidos del estudio, quedan fuera del alcance de este TFG.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 Introducción a las arquitecturas de guaguas presentes en el mercado

Conforme ha avanzado la tecnología y las medidas contra el vehículo de combustión interna se han vuelto más severas, han ido surgiendo distintas tecnologías con el objetivo común de reducir las emisiones de CO₂. En la Figura 2.1 se presentan algunas de las principales tecnologías presentes en el mercado y que se describen a continuación.

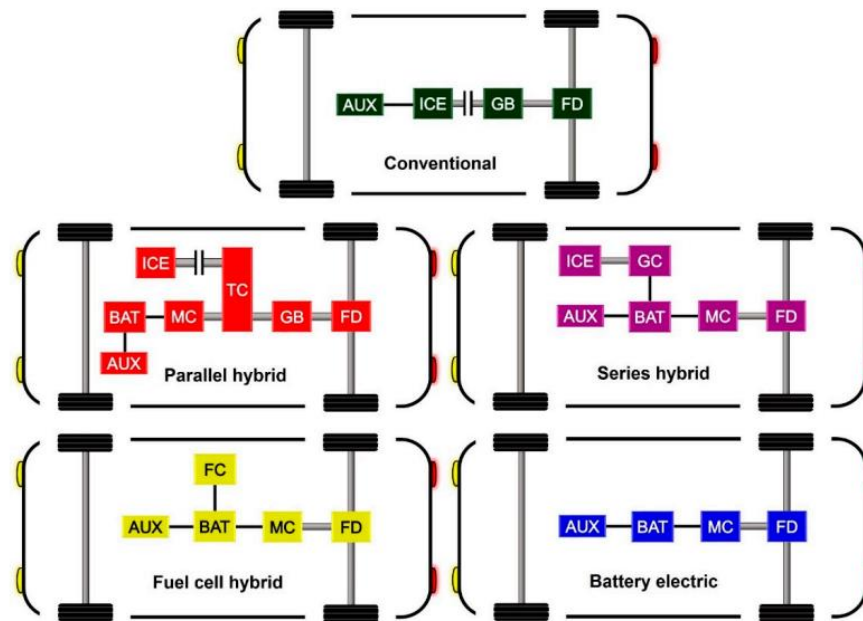


Figura 2.1 Esquema de componentes de las principales arquitecturas de guaguas presentes en el mercado (AUX=auxiliares, BAT=batería, FC=pila de combustible de hidrógeno, FD= Diferencial, GB= Caja de cambios, GC=Generador y controlador, MC=Motor eléctrico y controlador, TC=acoplador de torsión) [9]

2.1.1 Vehículos convencionales (Diesel)

La arquitectura convencional con la que cuenta la mayor parte de vehículos pesados por carretera consiste en un motor de combustión interna que usa Diesel como combustible. La potencia mecánica procedente de la reacción química entre el combustible y el aire en el interior de cámaras de combustión se traduce en un par en las ruedas que impulsa el vehículo.

Las guaguas normalmente presentan una configuración de motor trasero con tracción trasera, dado que estas suelen tener un elevado peso y resulta más sencillo mover el vehículo de esta forma. Además, permite prescindir de un eje de transmisión y reducir la altura del vehículo, lo que facilita la entrada y salida de pasajeros.

Los motores Diesel trabajan con una eficiencia superior a los motores de gasolina y trabajan a un menor número de revoluciones, lo que en general provoca que estos

motores emitan una menor cantidad de CO₂. No obstante, en los motores Diesel las relaciones de compresión alcanzadas son mayores que en los de gasolina, por lo que las temperaturas alcanzadas en el interior de la cámara de combustión son mayores, traduciéndose en un aumento de las emisiones de óxidos de nitrógeno, favorecidos por mezclas ricas en oxígeno (como sucede en un motor Diesel) y altas temperaturas. Además, como consecuencia de su naturaleza de funcionamiento, existe un mayor riesgo de que se originen dosados locales elevados, lo que supone una mayor generación de hollín o partículas que son nocivas para las personas y el medioambiente.

Por tanto, el problema principal en un vehículo pesado son las emisiones de NO_x y las partículas, siendo sus emisiones de CO₂ inferiores a los del motor gasolina, pero como se ha visto previamente, su contribución en emisiones de CO₂ al sector del transporte representa un peso importante, por ello, además de actuar sobre las emisiones de NO_x y partículas, se debe actuar sobre la reducción de emisiones de CO₂ para el alcance de los objetivos europeos.

2.1.2 Vehículos de Gas Natural comprimido (CNG)

Las guaguas impulsadas por gas natural comprimido (CNG) surgieron como una alternativa más limpia que los motores Diesel, dado que el gas natural es capaz de reducir las emisiones de NO_x en un 85%, y eliminar el 96% de las emisiones de partículas sólidas. Además, no se emiten óxidos de azufre (también presentes entre los contaminantes emitidos en vehículos convencionales), y reduce las emisiones de CO y CO₂ hasta en un 25% [10].

El principio de funcionamiento se basa en almacenar gas natural en tanques a alta presión (unos 250bar o 3600psi). El gas así comprimido, es enviado a través de líneas a alta presión hasta llegar a un regulador, donde la presión se reduce hasta coincidir con la cantidad que necesita el sistema de inyección de combustible del motor. Una vez el gas alcanza la presión requerida, una válvula permite que el gas se mueva hacia el sistema de inyección y desde allí al interior de la cámara de combustión, que al igual que la gasolina, se enciende mediante una bujía; es entonces cuando ocurre la combustión que permitiría impulsar el vehículo. En la Figura 2.2 se muestra los componentes que forman un vehículo de este tipo.

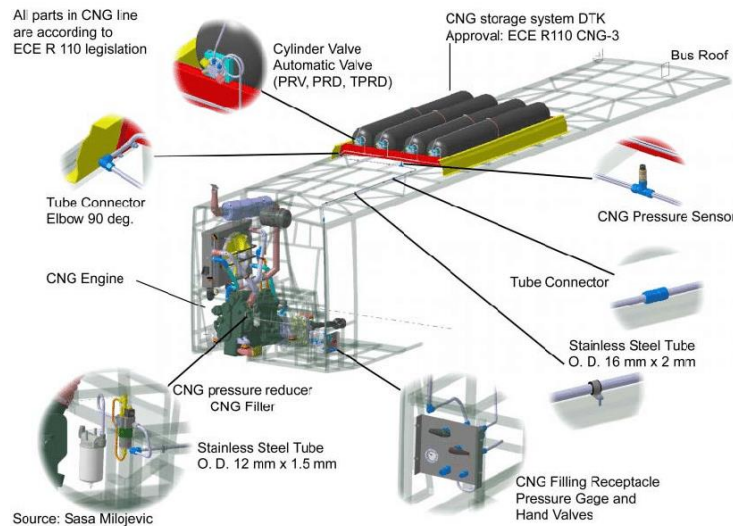


Figura 2.2 Esquema de componentes de una guagua de gas natural comprimido [11].

El principal problema con estos vehículos está relacionado con la disponibilidad de estaciones de recarga de gas natural y su mayor coste respecto a las guaguas Diesel, aunque son más baratas que las guaguas híbridas.

En el caso de Canarias, dado que actualmente no existe gas natural, la compra de estas guaguas no resulta adecuada a la fecha de redacción de este TFG.

2.1.3 Vehículos híbridos en paralelo

Las arquitecturas híbridas son aquellas que combinan dos o más motores que se encuentran alimentados por distintos tipos de energía. En vehículos pesados híbridos se emplea un motor de combustión (Diesel en el caso de vehículos pesados) combinado con al menos un motor eléctrico. De este modo, se combina la autonomía y robustez de un motor de combustión con la alta eficiencia que caracteriza a los motores eléctricos. Según sea la disposición y la transmisión de par a las ruedas existen principalmente dos tipos de arquitecturas híbridas; en paralelo o en serie.

En cuanto a los modelos híbridos en paralelo (*Parallel Hybrid* en inglés), serán aquellos en los que el motor de combustión y el eléctrico pueden funcionar de forma independiente o a la vez, de modo que cualquiera de los dos puede transmitir potencia directamente a las ruedas. La estrategia de funcionamiento se basa en utilizar el motor eléctrico como asistencia al motor de combustión cuando este opera en puntos de operación de peor eficiencia, como por ejemplo en aceleraciones o en perfiles de conducción más urbanos donde un vehículo convencional pasa mucho al ralentí. En este caso, un vehículo híbrido apagaría el motor de combustión e iniciaría la marcha en modo 100% eléctrico hasta que alcanzada una determinada velocidad entrara en funcionamiento el motor de combustión, lo que permitiría reducir en gran medida las emisiones contaminantes.

Por otro lado, el motor de combustión podría ser utilizado como generador para la recarga de la batería que alimenta el motor eléctrico (convirtiéndolo en un híbrido

serie-paralelo), que a su vez puede recibir energía procedente de aquella recuperada en frenada, siendo esta una de las principales características de los vehículos híbridos, pues supone una energía gratuita que en otras situaciones se perdería. Esto implica que el motor eléctrico también puede funcionar como generador, transformando la energía cinética procedente de la frenada en energía eléctrica que es almacenada en la batería. No obstante, no es posible recuperar el 100% de la energía disponible, ya que existen pérdidas por fricción. Igualmente, en aquellas configuraciones híbridas en paralelo que son enchufables, es posible la recarga de la batería mediante una toma de corriente cuando el vehículo está estacionado, convirtiéndose entonces en un modelo híbrido enchufable, conocido en inglés como *Plug-in Hybrid Electric Vehicle (PHEV)*

En cuanto a las principales ventajas de este tipo de vehículos híbridos es que el motor de combustión interna presenta un menor tamaño que el correspondiente al vehículo convencional, ya que una parte de la potencia es suministrada por el motor eléctrico. Además, no se requiere de una batería muy grande, dado que el motor eléctrico no tiene que impulsar el vehículo por sí solo, de modo que el peso del vehículo y el coste se reduce con respecto al vehículo híbrido en serie descrito en el siguiente subapartado.

2.1.4 Vehículos híbridos en serie

Un vehículo híbrido en serie (*Series Hybrid* en inglés) igualmente combina un motor de combustión con al menos uno eléctrico, pero en este caso, solo el motor eléctrico proporciona tracción a las ruedas. El motor de combustión se utilizará exclusivamente para mover el eje de un generador que suministra electricidad a la batería de la que el motor eléctrico extrae la energía necesaria para mover el vehículo. Al igual que en el caso del híbrido paralelo, también es posible aprovechar la energía obtenida de las frenadas.

Por otro lado, este tipo de vehículos se suele caracterizar por presentar una batería de gran capacidad, lo que da lugar a una mayor autonomía y les permite recorrer varios kilómetros sin necesidad de arrancar el motor de combustión interna, especialmente en ciudad, donde las condiciones para esta tecnología son más favorables (mucho tiempo detenido consecuencia del tráfico, aceleraciones y frenadas constantes y velocidades medias de conducción bajas). Esto provoca que el nivel de reducción de emisiones sea (en principio) mayor que en un híbrido en paralelo, pero también supone un aumento del coste debido al mayor número de componentes del vehículo y la necesidad de disponer de un motor eléctrico de mayor potencia, dado que deberá ser capaz de satisfacer la demanda por sí solo.

En cuanto a sus ventajas respecto al modelo híbrido en paralelo, permite simplificar la transmisión al ser el motor eléctrico el único que la conduce, y que normalmente suele ser una transmisión única (*fixed gear*).

Por otro lado, en un vehículo híbrido en serie el motor de combustión puede ser más pequeño y trabajar en un régimen más o menos estacionario donde opera con buena eficiencia, lo que contribuye a reducir aún más las emisiones.

A pesar de ello, los modelos híbridos en serie cuentan con baterías más grandes y complicadas y motores eléctricos más potentes que, junto al generador, lo convierten en una opción más cara que el modelo híbrido en paralelo. Además, los híbridos en serie no suelen ser tan eficientes en tramos de conducción por autopista debido a que el motor de combustión no está conectado a las ruedas.

2.1.5 Vehículos eléctricos

En cuanto a los vehículos eléctricos (*Electric Vehicles, EVs*), serán aquellos impulsados exclusivamente por uno o más motores eléctricos que transmiten el par a las ruedas. Su fuente de energía procede de baterías que solo pueden ser recargadas durante los tiempos de frenado o mediante conexión a la red eléctrica externa, habitualmente en puntos de consumo privados o públicos.

En este caso, las emisiones contaminantes directas (del Tanque a las Ruedas o *Tank-To-Wheels* en inglés) son nulas, dado que no interviene ningún motor de combustión en la operación del vehículo. A pesar de ello, si existen emisiones contaminantes en el proceso de producción de la electricidad que recarga las baterías del vehículo, entonces existirán unas emisiones indirectas (del Pozo a las Ruedas o *Well-To-Wheels* en inglés) que se deberán de computar para determinar el nivel de reducción de emisiones respecto a otras tecnologías en el lugar donde se produzca la electricidad y se recargue el vehículo.

Entre sus ventajas, además de no producir emisiones directas, se encuentra su alta eficiencia y operación silenciosa al eliminar las vibraciones y el ruido característicos de un motor de combustión interna, lo que los convierte en una opción idónea para una conducción urbana. No obstante, la inversión inicial es elevada, sobre todo cuando se trata de vehículos pesados. También hay que añadir la limitada autonomía que ofrecen las baterías y la recarga lenta de las mismas, lo que puede hacer que no exista suficiente tiempo de recarga entre servicios de una guagua de transporte para continuar con su operación.

A raíz de este problema, surgen dos estrategias de carga diferentes para este tipo de vehículos:

Carga convencional

En este tipo de estrategia el vehículo cuenta con una batería de gran capacidad que le permite operar durante la jornada de trabajo completa sin necesidad de recargar entre servicios. En este caso, la carga del vehículo se suele realizar durante la noche dado que las guaguas se encuentran fuera de servicio. En el caso de una flota grande de vehículos, como es el caso de TITSA, puede suponer una demanda de energía muy alta a la red si se debe realizar la carga nocturna para muchas guaguas al mismo tiempo.

Carga de oportunidad

En este caso el vehículo necesita recargar la batería entre servicios de operación, con la suposición de que se cuenta con el tiempo suficiente para alcanzar un nivel de batería necesario para completar al menos un nuevo viaje de ida y vuelta en la ruta.

2.1.6 Vehículos de pila de combustible de hidrógeno

Los vehículos de pila de combustible de hidrógeno (*Fuel Cell Electric Vehicles, FCEVs*) representan una tecnología emergente que aún se encuentra inmadura. Su principio de funcionamiento se basa en el uso de una pila de combustible de hidrógeno que se encuentra formada por varias celdas donde tiene lugar la reacción química entre el hidrógeno y el oxígeno obteniendo electricidad y vapor de agua. De este modo, la electricidad generada se almacena en baterías que posteriormente alimentan un motor eléctrico encargado de impulsar el vehículo, mientras que el vapor de agua se expulsa a través del tubo de escape sin consecuencias graves para el medio ambiente, dado que a pesar de que el vapor de agua es un gas de efecto invernadero, luego condensa y precipita en forma de agua por lo que no es nocivo.

Las FCEV pueden ser tanto enchufables como no enchufables, dependiendo de si se opta por una estrategia de batería dominante o por una estrategia de pila de combustible dominante, es decir, optar por una batería de gran capacidad y pila de combustible de menor tamaño, de modo que esta última trabaja como asistencia y el vehículo se puede enchufar para recargar la batería; o bien, optar por una pila de combustible grande y batería pequeña, de modo que sea la pila de combustible la que trabaje la mayor parte del tiempo pero no sea necesario enchufar el vehículo.

En cuanto al almacenamiento del hidrógeno, se emplean tanques que trabajan a una presión habitual de 350bar (5000psi) en el caso de vehículos pesados, o 700bar (10000psi) en el caso de vehículos ligeros, y con una carga de unos 35-40kg de hidrógeno en el primero, y 3-5kg en el segundo.

La principal ventaja de los vehículos de hidrógeno sobre los eléctricos es su mayor autonomía y rapidez en el repostaje. No obstante, se trata de una tecnología que todavía resulta muy cara, además de que instalar y mantener infraestructuras de repostaje de hidrógeno es un verdadero reto actualmente. También hay que añadir que las pilas de combustible presentan problemas de durabilidad y fiabilidad sin resolver.

A pesar de ello, la tecnología sigue evolucionando, aunque con cierta incertidumbre, y se espera que para 2030 las guaguas de hidrógeno alcancen un nivel de competitividad aceptable en cuanto a costes de ciclo de vida se refiere [9].

En definitiva, se puede observar que con los años han surgido una gran variedad de tecnologías en el sector del transporte con el objetivo de reducir las emisiones, es por esto importante analizar cada una de ellas y evaluar su rendimiento en la

persecución de dicho objetivo. Se analizará en este TFG la influencia en el consumo energético y emisiones que supone el uso de las diferentes tecnologías, así como su idoneidad según las características de las rutas analizadas una vez se hayan verificado los resultados mediante datos de estudios realizados en la literatura haciendo uso de algunos de los ciclos de homologación que se deben conocer y se presentan en el siguiente apartado.

2.2 Ciclos de homologación para vehículos pesados

Los ciclos de homologación consisten en pruebas realizadas por centros acreditados para la medición de consumos y emisiones del vehículo sobre banco de rodillos simulando las cargas que se encontrarían presentes en una situación real de conducción por carretera de una forma normalizada que permite realizar comparaciones entre vehículos en igualdad de condiciones. Para estas pruebas, las ruedas motrices del vehículo se sitúan sobre unos rodillos mientras el resto del vehículo permanece anclado como se puede observar en la Figura 2.3.



Figura 2.3 Ensayo de una guagua sobre banco de rodillos [12].

En cuanto a los ciclos de conducción empleados en un banco de rodillos, pueden ser creados de manera sintética o a partir de datos reales de carretera que hayan sido obtenidos previamente y, descargados más tarde en el dinamómetro, para introducir sobre el vehículo cargas equivalentes a las obtenidas en un ensayo real de carretera. En este caso, es necesaria, además, una compensación del gradiente, el viento, la temperatura y la altitud para no alterar los resultados.

Así, el objetivo es provocar que el vehículo acelere y desacelere tal y como lo haría en la carretera siguiendo un perfil de velocidad-tiempo determinado obteniendo como salida resultados de potencia, par, consumos, emisiones, etc.

A continuación, se presentan algunos de los ciclos más empleados o característicos para la homologación de vehículos pesados de transporte por carretera.

2.2.1 Central Business District Cycle (CBD)

El *Central Business District Cycle* es un ciclo para vehículos pesados que forma parte del *Advanced Bus Design Cycle* y que ha sido creado por el Departamento de Transporte de los Estados Unidos (*US Department of Transportation*) y la Asociación de Tránsito Urbano en Masa (*Urban Mass Transit Association*) para la evaluación del rendimiento de guaguas.

Este ciclo representa un patrón de conducción en forma de dientes de sierra que incluye 14 repeticiones de un ciclo más básico formado por una aceleración hasta la velocidad constante de 32.18km/h que se mantiene durante 20 segundos, una desaceleración posterior hasta detener el vehículo y un período al ralentí de 7 segundos. El perfil de velocidad frente al tiempo correspondiente a este ciclo se muestra en la Figura 2.4.

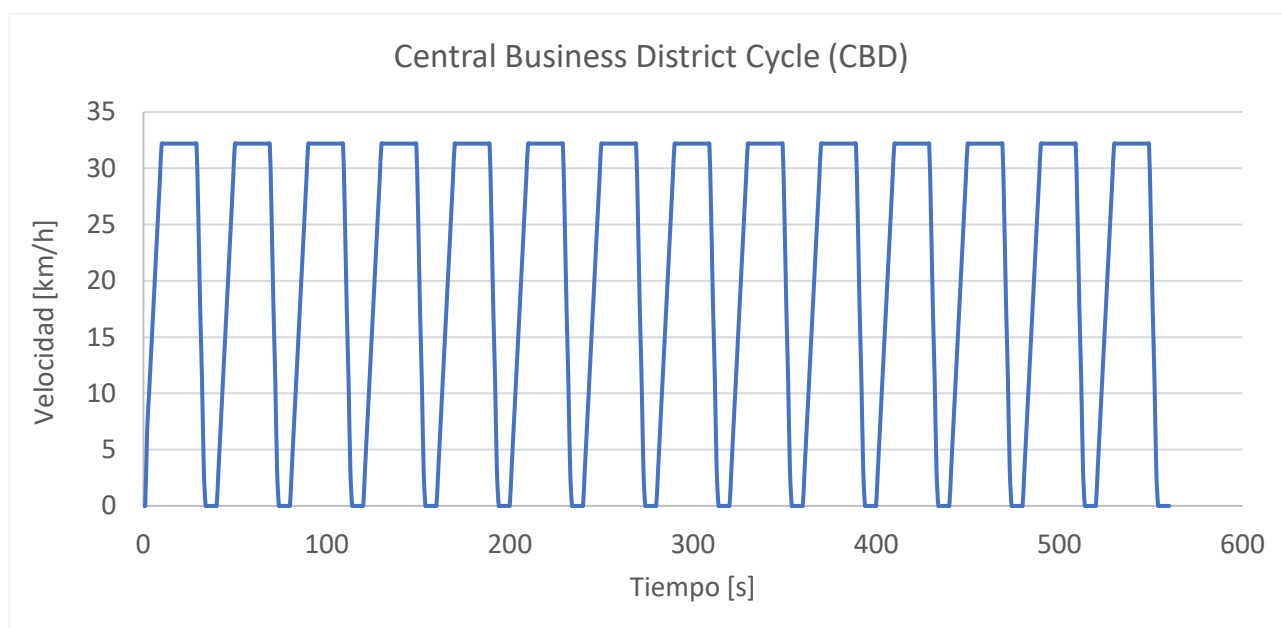


Figura 2.4 Ciclo CBD. Fuente Propia

Como se puede observar entonces, se trata de un ciclo sintético, característico de una conducción urbana de corta duración (560 segundos), sin gradiente de carretera y con frecuentes aceleraciones, desaceleraciones y paradas ocasionadas por el tráfico, los peatones, los semáforos o la recogida y salida de pasajeros, siendo la velocidad media del ciclo baja. Por esta razón, es un ciclo típico de conducción en ciudad. A continuación, la Tabla 2.1 muestra los principales parámetros del ciclo:

Tabla 2.1 Parámetros principales del ciclo CBD

Distancia recorrida [km]	3.29
Duración [s]	560
Velocidad máxima [km/h]	32.18
Velocidad media con paradas [km/h]	21.12
Aceleración máxima [m/s ²]	1.79
Aceleración media [m/s ²]	0.89
Desaceleración máxima [m/s ²]	-2.24

Fuente Propia

Como se observa en la tabla, es un ciclo que apenas tiene 3km de longitud con una duración de 9 minutos aproximadamente, por lo que es un ciclo lento. Además, tal y como se podrá comparar al analizar los ciclos Arterial y Commuter expuestos a continuación, la aceleración máxima del CBD es notablemente mayor, ocurre en menor distancia y de forma más frecuentada que en los próximos ciclos expuestos. Este ciclo urbano se puede considerar, por tanto, agresivo y es de esperar que un vehículo convencional se vea penalizado en cuanto a consumo frente a las tecnologías híbridas o eléctricas.

2.2.2 Arterial Cycle

El ciclo Arterial se corresponde con un ciclo sintético formado por la repetición de 4 ciclos más básicos formados por una aceleración (menos agresiva que en el ciclo CBD), un periodo a velocidad constante de 64.37km/h mantenida durante 22-23 segundos, una desaceleración hasta detener el vehículo y un período al ralentí de 8 segundos. El perfil correspondiente al ciclo se presenta en la Figura 2.5.

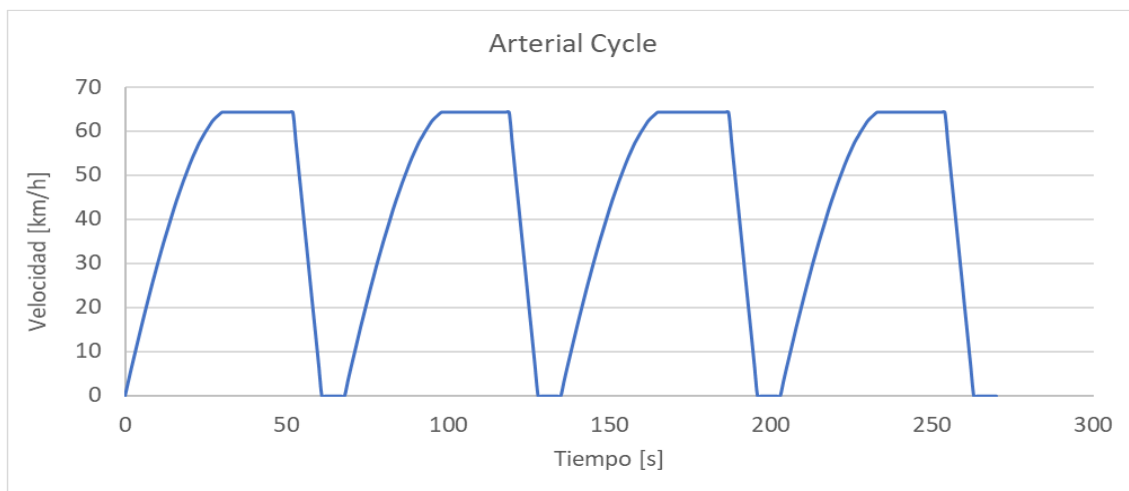


Figura 2.5 Ciclo Arterial. Fuente Propia

En este caso, se representa una situación en la que la guagua realiza pocas paradas en un tramo de carretera interurbano donde las velocidades medias que se alcanzan son superiores y donde los períodos a velocidad de crucero son más largos. Las principales características del ciclo se muestran en la Tabla 2.2.

Tabla 2.2 Parámetros principales del ciclo Arterial

Distancia recorrida [km]	3.16
Duración [s]	270
Velocidad máxima [km/h]	64.37
Velocidad media con paradas [km/h]	41.92
Aceleración máxima [m/s ²]	0.89
Aceleración media [m/s ²]	0.60
Desaceleración máxima [m/s ²]	-2.01

Fuente Propia

Si se comparan las características del ciclo Arterial y las del ciclo CBD, se puede notar que la longitud del ciclo es prácticamente la misma, unos 3km, pero el tiempo de conducción se reduce prácticamente a la mitad debido a la mayor velocidad media. Además, este último es un ciclo más suave tanto en aceleración como en desaceleración respecto al anterior (especialmente en aceleración), lo que ayudaría a reducir los consumos.

2.2.3 Commuter Cycle

El ciclo Commuter, al igual que los anteriores se emplea para el análisis del consumo y emisiones de vehículos pesados, pero en este caso, representa una situación de conducción en autovía o autopista, con lo que con este ciclo se completarían los tres tipos de conducción más habituales (urbano, interurbano y autovía o autopista) correspondientes a los ciclos CBD, Arterial y Commuter respectivamente. En la Figura 2.6 se muestra el perfil del ciclo Commuter.

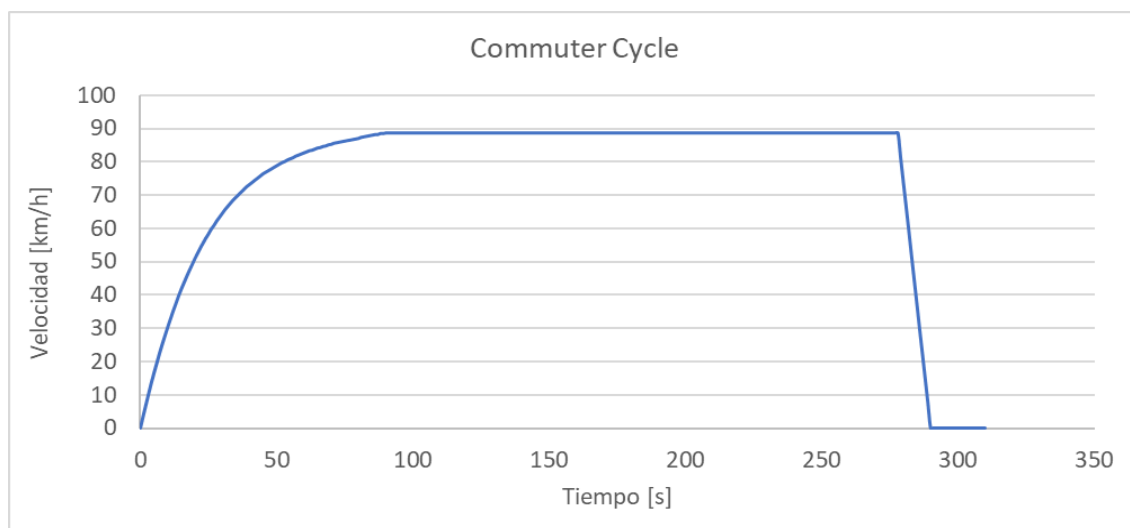


Figura 2.6 Ciclo Commuter. Fuente Propia

Como se puede ver, el ciclo constante de un único ciclo básico, formado por una etapa de aceleración muy lenta hasta alcanzar una velocidad constante cercana a los 90km/h, un régimen estacionario a dicha velocidad que se mantiene durante unos

3 minutos, y una posterior desaceleración hasta detener el vehículo donde se mantiene al ralenti durante 21 segundos antes de finalizar el ciclo.

Esta situación podría representar una situación en la que la guagua se incorpora a la autopista, realiza un recorrido corto sin paradas y luego abandona la misma o se detiene en una de las paradas presentes en dicha autopista.

En la Tabla 2.3 se presentan los datos correspondientes a este ciclo:

Tabla 2.3 Parámetros principales del ciclo Commuter

Distancia recorrida [km]	6.43
Duración [s]	310
Velocidad máxima [km/h]	88.51
Velocidad media con paradas [km/h]	74.48
Aceleración máxima [m/s ²]	0.98
Aceleración media [m/s ²]	0.28
Desaceleración máxima [m/s ²]	-2.06

Fuente Propia

Cabe destacar que, en este ciclo, de apenas 5 minutos de duración, el 29.0% del recorrido se corresponde con la aceleración inicial, por lo que resulta muy lenta y progresiva. Este es el motivo por el que la aceleración media es de tan solo 0.28m/s², muy inferior a la aceleración media en los ciclos anteriores. A pesar de ello, la aceleración máxima resulta de 0.98m/s², valor muy parecido al del Ciclo Arterial, al igual que la desaceleración máxima.

En cuanto al tramo a velocidad constante, ocupa el 60.6% del tiempo total del ciclo, mientras la desaceleración se corresponde con un 10.4%, por lo que se trata de un ciclo mayoritariamente estacionario con una aceleración suave y desaceleración relativamente larga, pues dura unos 30 segundos, condiciones muy favorables para un vehículo convencional.

2.2.4 Manhattan Cycle

El ciclo Manhattan es un ciclo urbano para guaguas que ha sido construido basándose en patrones de conducción reales observados en las guaguas que operan en el núcleo de Manhattan (Nueva York). Tal y como se puede apreciar en la Figura 2.7, el ciclo viene caracterizado por un perfil de conducción más realista que los anteriores, con frecuentes cambios de velocidad ocasionados por situaciones de tráfico, semáforos o paradas de recogida y salida de pasajeros dentro de ciudad.

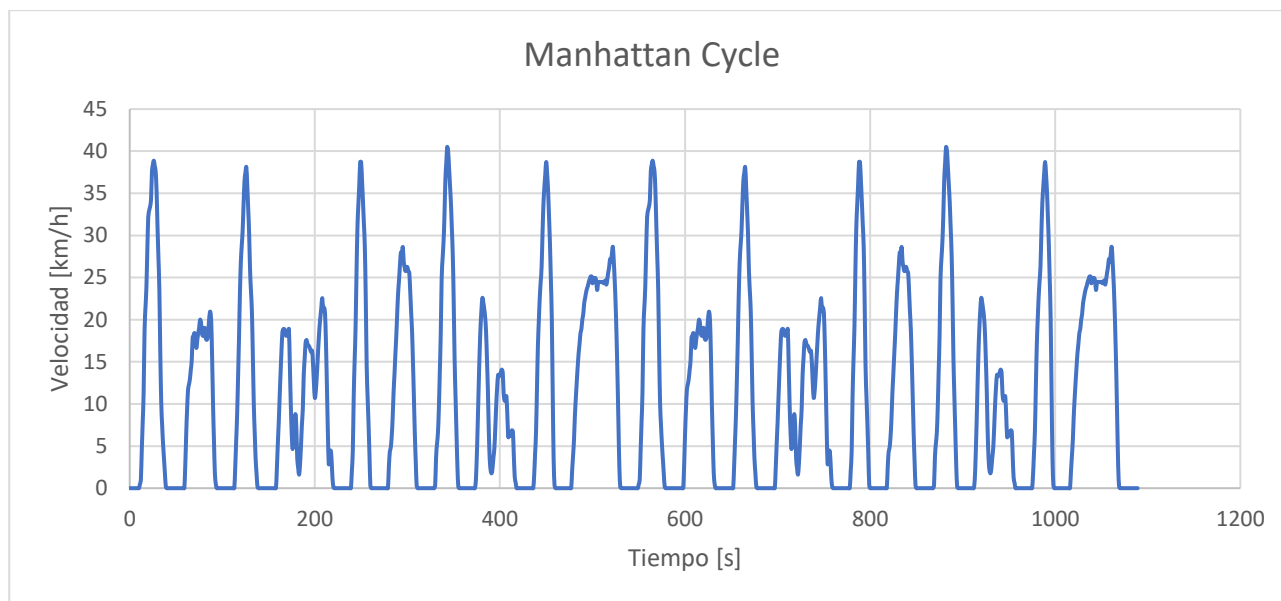


Figura 2.7 Ciclo Manhattan. Fuente Propia

Igualmente se puede observar que este ciclo está caracterizado por velocidades bajas que apenas alcanzan los 38-40km/h de pico con unas aceleraciones y desaceleraciones muy agresivas. En la Tabla 2.4 se presentan los parámetros principales de este ciclo.

Tabla 2.4 Parámetros principales del ciclo Manhattan

Distancia recorrida [km]	3.31
Duración [s]	1089
Velocidad máxima [km/h]	40.48
Velocidad media con paradas [km/h]	10.92
Aceleración máxima [m/s²]	2.04
Aceleración media [m/s²]	0.54
Desaceleración máxima [m/s²]	-2.49

Fuente Propia

Se puede comprobar que la velocidad media del ciclo es de tan solo 10.92km/h, por lo que recorrer una distancia de 3.31km en este ciclo supone unos 18 minutos (1089 segundos). El tiempo que el vehículo pasa al ralentí suma 391 segundos, lo que supone un 35.9% del tiempo total del ciclo.

Esta situación de velocidades medias bajas y mucho tiempo al ralentí representa una situación muy desfavorable en cuanto a emisiones en vehículos convencionales y es por ello por lo que un vehículo híbrido o eléctrico presenta tantas ventajas en centros urbanos tan congestionados como Manhattan, pues en estos vehículos no hay ralentí (ya que el motor eléctrico y el de combustión si fuera híbrido, se podrían apagar).

Por otro lado, el ciclo Manhattan viene caracterizado por cambios de velocidad rápidos, alcanzando 2.04m/s^2 en aceleración y -2.49m/s^2 en desaceleración; las mayores de entre los ciclos analizados anteriormente. En este sentido, el consumo y emisiones de vehículo convencional sería significativamente mayores que las asociadas a las tecnologías híbridas o eléctricas por su arranque en modo 100% eléctrico y mayor eficiencia.

Este ciclo no se empleará en el análisis posterior de este TFG, aun así, resulta interesante conocer su existencia debido a que es un perfil que representa una conducción urbana muy agresiva, donde las nuevas tecnologías están en clara ventaja respecto a las convencionales por su modo de funcionamiento.

2.2.5 European Transient Cycle (ETC)

El ciclo conocido como *European Transient Cycle*, o por sus siglas *ETC* en inglés, es un ciclo que ha sido empleado en la certificación de emisiones de vehículos Diesel pesados en Europa desde el año 2000. Este ciclo fue desarrollado por el *FIGE Institute* en Aachen, Alemania, basándose en datos reales tomados de vehículos pesados en conducción por carretera [13].

Tal y como se observa en la Figura 2.8, el ciclo se compone de tres partes claramente diferenciadas, incluyendo una parte urbana, otra rural y una última de conducción en autopista. Cada parte dura aproximadamente 600 segundos, de modo que la duración total del ciclo es de 1800 segundos.

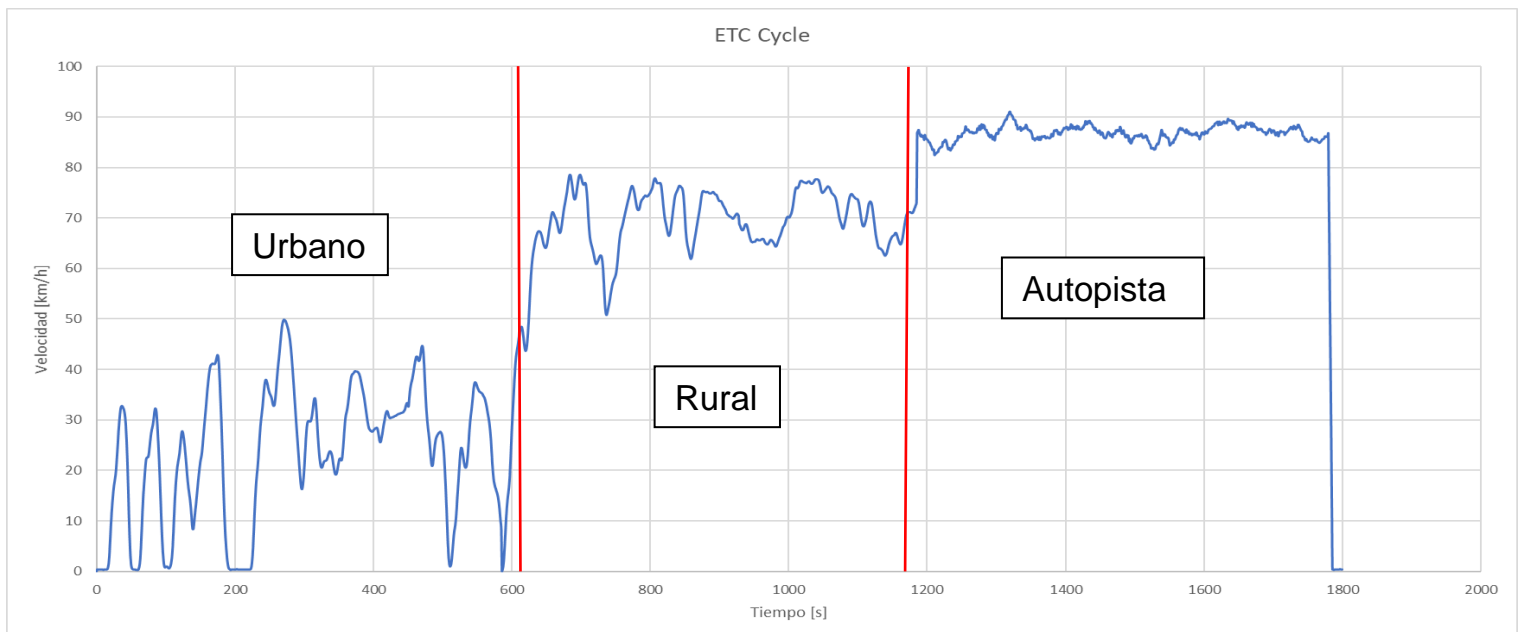


Figura 2.8 Ciclo ETC. Fuente Propia

La parte urbana se realiza en ciudad, con una velocidad máxima de 50km/h , frecuentes cambios de velocidad y tiempos al ralenti. A los 600 segundos del

comienzo del ciclo, se produce una parada a la que le sigue una aceleración fuerte con la que el vehículo pesado se incorpora a una zona rural donde la velocidad oscila en torno a los 70km/h durante otros 600 segundos. Posteriormente, una nueva aceleración al final de la zona rural representa la transición entre la zona rural y la salida a autopista, donde la velocidad media es de 84km/h y a la que pertenecen los 600 segundos finales del ciclo. Una pronunciada desaceleración desde dicha velocidad hasta cero supone el final del ciclo.

En Tabla 2.5 se presentan los principales parámetros diferenciados por zona de conducción:

Tabla 2.5 Parámetros principales del ciclo ETC

	Zona Urbana	Zona Rural	Autopista
Distancia recorrida [km]	3.87	11.03	14.59
Porcentaje de distancia [%]	13.1	37.4	49.5
Duración [s]	600	600	600
Velocidad máxima [km/h]	49.90	78.60	91.10
Velocidad media con paradas [km/h]	23.20	68.79	84.24
Aceleración máxima [m/s²]	0.92	0.78	3.83
Aceleración media [m/s²]	0.30	0.17	0.10
Desaceleración máxima [m/s²]	-2.28	-0.75	-4.03
Tiempo total [s]	1800		
Distancia total [km]	29.49		

Fuente Propia

A la vista de los datos tabulados, se aprecia claramente la diferencia en las velocidades medias de cada zona; bajas para la zona urbana, intermedias para la zona rural, y altas para la zona de autopista. Esto tiene un reflejo directo en la distancia recorrida, que será claramente menor en el tramo correspondiente a ciudad (3.87km), debido también a que el avance del vehículo se ve ralentizado por las paradas realizadas y el mayor tráfico existente. En la zona rural se recorren 11.03km y en autopista 14.59km (el más largo), de modo que la distancia total recorrida es de 29.49km. Por tanto, en ciudad se recorre un 13.1% de la distancia total, en la zona rural un 37.4%, y en la autopista un 49.5% (casi la mitad de la distancia se recorrería entonces en autopista).

En cuanto a las aceleraciones, estas son suaves dentro de la zona urbana, ya que, comparando con los datos de los ciclos anteriormente descritos, se puede observar que los valores de aceleración media y máxima son muy cercanos a los del ciclo Commuter, donde se podía ver con claridad la suavidad de su pendiente. En este caso, debido a la mayor duración del ciclo y cantidad de datos, visualmente, las aceleraciones parecen más agresivas, pero según los datos obtenidos en la Tabla 2.5 se confirma que esto no es así. Seguidamente, dado que en la zona rural la variación en la velocidad es menor y no se parte del reposo, se obtienen aceleraciones menores que en la zona urbana y, por tanto, menos exigentes para el vehículo. Finalmente, la zona de autopista muestra una aceleración media similar a

la zona rural, pero una aceleración máxima elevada de 3.83m/s^2 , correspondiente a la aceleración que se observa en la zona de transición entre la zona rural y la de autopista, pero representa una situación muy puntual.

En lo que se refiere a desaceleraciones, en la zona urbana son muy parecidas a las presentes en el ciclo CBD (también urbano), mientras que en las zonas rural y de autopista resultan menores, con la salvedad de la desaceleración máxima de 4.03m/s^2 alcanzada en el tramo de autopista correspondiente a la desaceleración final que se realiza para cerrar el ciclo.

Finalmente, cabe destacar que tanto en este ciclo como en los anteriores no se considera ningún gradiente de carretera, es decir, que no se tienen en cuenta posibles cambios de altitud en el recorrido, lo que podría desempeñar un papel fundamental en el consumo final obtenido.

3 METODOLOGÍA

3.1 Software de simulación: Autonomie

Para la creación y configuración de los modelos correspondientes a cada una de las arquitecturas de vehículos pesados, así como para la simulación de los mismos bajo los distintos ciclos empleados para el análisis, se ha usado el software Autonomie.

Este software pertenece a un paquete más amplio de programas creados por Argonne National Laboratory. Este es un centro de investigación en ingeniería que forma parte del Departamento de Energía de los Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*), donde investigadores de distintas partes del mundo trabajan conjuntamente para tratar de dar solución a los grandes problemas de la sociedad [14].

El paquete creado por este centro se conoce como AMBER (*Advanced Model Based Engineering Resource*), o lo que es lo mismo, “Recurso de Ingeniería Avanzada Basada en Modelos”, empleado para el análisis de vehículos (principalmente por carretera) y el estudio de la movilidad. El objetivo de AMBER es permitir a los ingenieros crear, personalizar y desplegar flujos de trabajo que se adapten a sus funciones, de tal modo que cada flujo de trabajo se componga únicamente de las herramientas y funcionalidades que sean relevantes para resolver un desafío de movilidad único.

Entre los programas informáticos creados por Argonne National Laboratory se encuentran: Autonomie, POLARIS, SVTrip, RoadRunner o BEAN. También hace uso de softwares de terceros como Tableau, GTPower, AMESim, AimSun o VISSIM, que pueden ser integrados en un marco común aprovechando los puntos fuertes de cada uno de ellos [15].

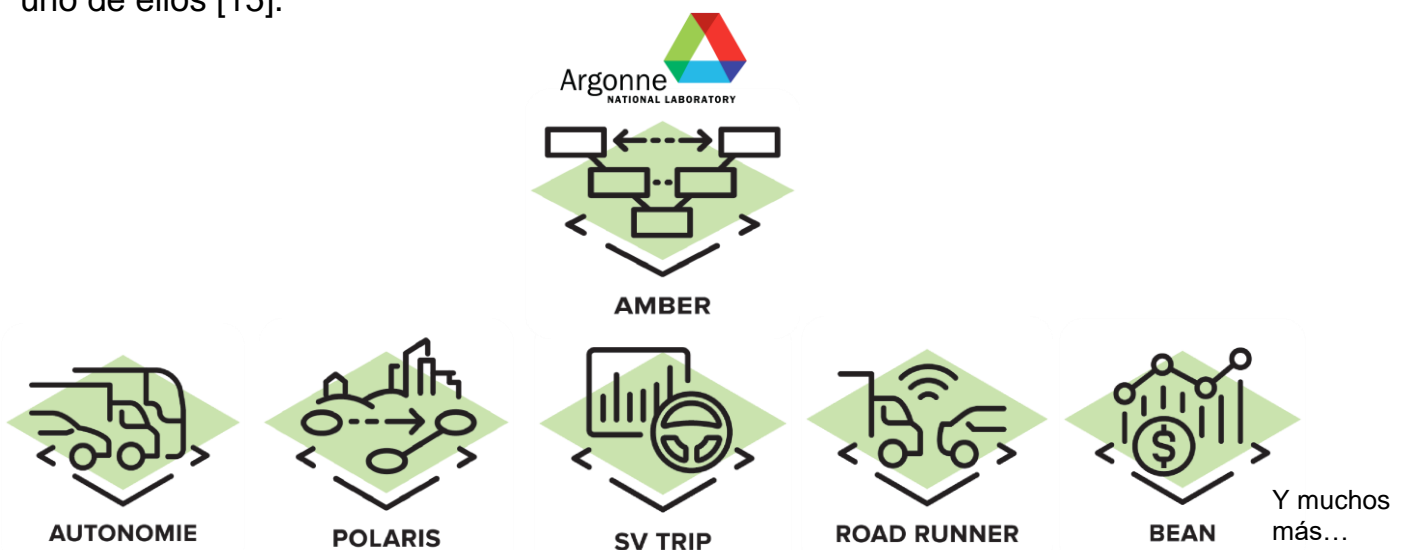


Figura 3.1 Entorno AMBER. Fuente: <https://vms.es.anl.gov/tools/>

En concreto, el programa utilizado en este TFG es Autonomie. Se trata de una herramienta de última tecnología que permite evaluar el consumo energético, la eficiencia y el coste de vehículos tanto ligeros como pesados y con distintas tecnologías de propulsión (vehículos convencionales, híbridos enchufables y no enchufables, eléctricos e incluso de hidrógeno), permitiendo a su vez una gran flexibilidad en la configuración y conexión entre componentes y estrategias de control.

Autonomie incluye algoritmos de control de vehículos obtenidos a partir de pruebas sobre banco de rodillos para multitud de configuraciones de transmisión. Una de las características que hace tan flexible al programa es que proporciona total acceso a los modelos de los componentes y algoritmos de control, permitiendo al usuario crear o actualizar vehículos, componentes y controladores. Del mismo modo, permite crear y personalizar los ciclos de conducción que se quieran analizar, además de tener total a disposición a librerías con ciclos de homologación reales.

El programa ha sido diseñado para el usuario siguiendo una estrategia *plug-and-play* (conectar y usar), en la que cada componente del vehículo representa el equivalente a una pieza de puzle que se une a otras para dar lugar a los distintos sistemas del vehículo. El usuario dispone entonces de varias piezas que contienen información para distintos componentes (motor, batería, transmisión, ruedas, etc.) y que el usuario puede intercambiar por otras para personalizar el modelo a su gusto. Además, la información que contiene cada una de estas piezas puede ser modificada directamente sobre el fichero o mediante factores de escalado.

Los factores de escalado se definen cuando no existe un componente con las prestaciones deseadas pero que son necesarias para el vehículo que se quiere modelar. Si por ejemplo se dispone de un motor de 220kW de potencia máxima y fuera necesario uno de 260kW pero que no se encuentra entre los modelos disponibles, se recurre al escalado. Simplemente se debe de introducir el valor de 260kW en una casilla y el programa calcula un factor. En este caso, resultaría un factor de escalado de 1.18, que el programa también emplea para escalar otros parámetros a los que afecta el cambio de potencia máxima, como son las propias curvas de par y de potencia del motor, los pesos del motor y del controlador, etc. De modo que todos los parámetros están en concordancia con la modificación realizada. En este TFG, se recurrirá al escalado en varias ocasiones para poder cumplir con las exigencias de los ciclos definidos, especialmente relacionadas con aumentos de potencia máxima y relaciones de transmisión.

Por otro lado, también es posible importar ficheros nuevos con datos de ensayos experimentales. No existe ningún tipo de restricción para la integración de los modelos, arquitecturas o procesos creados por el usuario para las tecnologías de propulsión disponibles.

Aunque Autonomie cuenta con un gran número de vehículos preconfigurados en su librería, también es posible editar los ficheros de vehículos ya existentes y guardarlos luego como vehículos nuevos. Igualmente, se pueden crear vehículos nuevos a partir de resultados en ensayos sobre bancos de rodillos.

En el caso en que se desee conocer más sobre los lenguajes de programación que emplea el programa, el proceso de creación y configuración de modelos, la introducción de ciclos, o la obtención de resultados, se detalla toda la información que debe de conocer el usuario en el capítulo 9 *Anexo de Resultados* (apartado 9.1).

3.1.1 Cálculo del par necesario para seguir el perfil de velocidad de un ciclo

Con el fin de modelar una conducción lo más real posible, Autonomie sigue una estrategia basada en un control de la posición del acelerador y del pedal del freno en función de una demanda de par calculada.

Como entradas al modelo de cálculo, se recibe información de la velocidad, la distancia y el gradiente de carretera. A partir de ello, el modelo puede obtener la demanda de par del vehículo que debe satisfacer el conductor. Además, el modelo es capaz de estimar el par adicional requerido para seguir el perfil de velocidad de referencia, que define al ciclo, en los siguientes segundos con el fin de proporcionar un modelo más realista. De acuerdo con ello, el programa calcula el par demandado según la siguiente expresión:

$$T_{\Delta t}(t) = m \cdot \frac{r(t+\Delta t) - \omega(t)}{\Delta t} + m \cdot \dot{r}(t + \Delta t) + L(r(t + \Delta t)) \quad (3.1)$$

↑ ↑ ↑ ↑

Par
demandado

Par adicional
necesario para
alcanzar $r(t + \Delta t)$

Aceleración Fuerzas que actúan sobre el vehículo
(se exponen posteriormente)

Necesario para seguir el ciclo en un instante $(t + \Delta t)$

Donde:

- $m \equiv$ Masa total del vehículo (incluyendo carga de pasajeros)
- $r \equiv$ Velocidad de referencia de rueda
- $\omega \equiv$ Velocidad real de rueda
- $t \equiv$ Tiempo

Un controlador se encarga de solicitar un mayor o menor par al vehículo según lo calculado mediante la ecuación 3.1, que se traduce en una señal enviada al pedal de acelerador o del freno para corregir la desviación respecto a la velocidad de referencia marcada por el ciclo. En caso de grandes desviaciones, debe esperarse que el modelo no esté bien configurado o se le esté exigiendo al vehículo realizar un ciclo de conducción que con las prestaciones definidas no es capaz de satisfacer. Cabe destacar que para la estrategia de control el programa puede realizar un

cálculo según la distancia o según el tiempo del ciclo. En el primer caso, se fuerza al conductor a cumplir con el número de kilómetros de la ruta, aun cuando le lleve más o menos tiempo; mientras que, en el segundo caso, una vez se complete el tiempo que está estipulado para el ciclo, la simulación finaliza a pesar de no haber completado la distancia requerida. En cualquier caso, si el modelo es capaz de seguir el ciclo de manera aceptable, se deberían de poder cumplir ambas condiciones.

Como resultado, Autonomie obtiene el perfil de velocidad real que sigue el vehículo en un ciclo determinado. Dicho perfil es comparado con el teórico, de tal forma que el programa devuelve un porcentaje de desviación que denomina *Percent Time Trace Missed By 2mph (%TTMB2mph)*. Este porcentaje representa el tiempo durante el cual la desviación es superior a 2mph ó 3.2km/h, siendo representativo de la capacidad del vehículo para seguir el ciclo de conducción definido.

3.1.3 Procedimiento de cálculo del consumo energético en Autonomie

En cuanto a los cálculos realizados por el programa, es imprescindible conocer cómo Autonomie obtiene los valores de consumo para distintos tipos de arquitecturas, configuraciones y ciclos. Dicho cálculo se encuentra basado en que el vehículo consume una determinada cantidad de energía para superar las fuerzas que se oponen al movimiento del mismo, de tal manera, que la fuerza de tracción (F_{tot}) debe ser mayor o igual que la suma de cuatro fuerzas resistivas. Estas fuerzas son:

Fuerza de inercia, F_i

Es la fuerza necesaria para acelerar el vehículo, de modo que solo contribuye al total cuando se produce un cambio de velocidad. Además, si la guagua cuenta con un sistema de regeneración en frenada, la energía resultante de esta fuerza puede ser parcialmente recuperada a la batería durante dichas frenadas, lo que permite reducir el consumo energético global del vehículo. La fuerza de inercia se expresa como:

$$F_i = m_v \cdot a_v \quad (3.2)$$

Resistencia al gradiente de carretera, F_s

Es la fuerza asociada a la componente horizontal del peso del vehículo incluyendo la carga de pasajeros. Depende principalmente de la carga, así como del gradiente de carretera. Esta fuerza se expresa según la ecuación:

$$F_s = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha_s) \quad (3.3)$$

Donde α_s representa el ángulo de inclinación de la carretera en un instante determinado, "t". Si se proporciona un perfil de gradiente de carretera en el programa, es imprescindible que los valores de α_s estén expresados en radianes.

Resistencia de arrastre aerodinámico, F_a

Se corresponde con la fuerza necesaria para superar la fricción del aire. Su magnitud está relacionada con la densidad del aire (ρ_{aire}), el diseño de las superficies en contacto con el aire (reflejado en un coeficiente de arrastre aerodinámico, C_d), la superficie frontal del vehículo (f_a), y especialmente la velocidad lineal a la que se desplaza (v_v). La expresión empleada en el modelo es la siguiente:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_d \cdot f_a \cdot v_v^2 \cdot señal(v_v) \quad (3.4)$$

Como se puede observar, la ecuación mostrada es la estándar para el cálculo del arrastre aerodinámico, pero además, el programa multiplica el valor obtenido por la función "señal". Esta función se emplea para asegurar que el arrastre aerodinámico se opone al movimiento del vehículo. No obstante, se presupone que el vehículo no va a circular marcha atrás en ningún momento del ciclo, por lo que no sería necesario su uso. En caso de que ello sucediera, lo haría a una velocidad muy baja, por lo que el impacto de la resistencia asociada al arrastre aerodinámico sería prácticamente despreciable.

Resistencia a la rodadura, F_r

Esta fuerza resulta de la fricción entre las ruedas y la carretera. Su magnitud está relacionada, principalmente, con el coeficiente de rodadura (C_{rr}) y la masa del vehículo. Dicho coeficiente de rodadura depende del diseño del neumático, la superficie sobre la que se conduce el vehículo o las dimensiones de las ruedas entre otros parámetros. Su valor puede ser tomado como un valor constante, que para vehículos pesados suele tomarse entre 0.006 y 0.01, o como una función polinómica dependiente de la velocidad lineal del vehículo. En este caso, el programa lo expresa como una función polinómica de cuarto grado, donde cada uno de los coeficientes que la forman (C_1, C_2, C_3, C_4) deben ser definidos por el usuario en el archivo de inicialización del modelo de las ruedas (*Wheels*). La expresión empleada en el programa para definir esta fuerza es la siguiente:

$$F_r = (C_1 + C_2 \cdot v_v + C_3 \cdot v_v^2 + C_4 \cdot v_v^3) \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha_s) \quad (3.5)$$

De acuerdo con esto, la suma de todas las fuerzas anteriores daría lugar a la fuerza de tracción que como mínimo debería de desarrollar el tren de potencia.

$$F_{tot} = F_i + F_s + F_a + F_r \quad (3.6)$$

Dado que se conoce la velocidad lineal del vehículo en cada instante (v_v) es posible calcular la potencia asociada a dicha fuerza (P_{tot}):

$$P_{tot} = F_{tot} \cdot v_v \quad (3.7)$$

El valor de esta potencia es instantáneo (para cada instante de tiempo, "t"), por tanto, si se integra la potencia total en el tiempo que dura el ciclo seleccionado, se obtiene la energía total consumida por el vehículo en el ciclo (E_{tot}):

$$E_{tot} = \int P_{tot} \cdot dt \quad (3.8)$$

El valor así obtenido se encuentra expresado en kWh. Cabe destacar que Autonomie realiza un cálculo por separado de la energía consumida en aceleración y en desaceleración, que luego se suman.

Posteriormente, dividiendo el valor energético obtenido por la distancia recorrida por el vehículo en el ciclo, el programa es capaz de obtener el valor expresado en kWh/km, que es el empleado para la verificación y análisis de resultados.

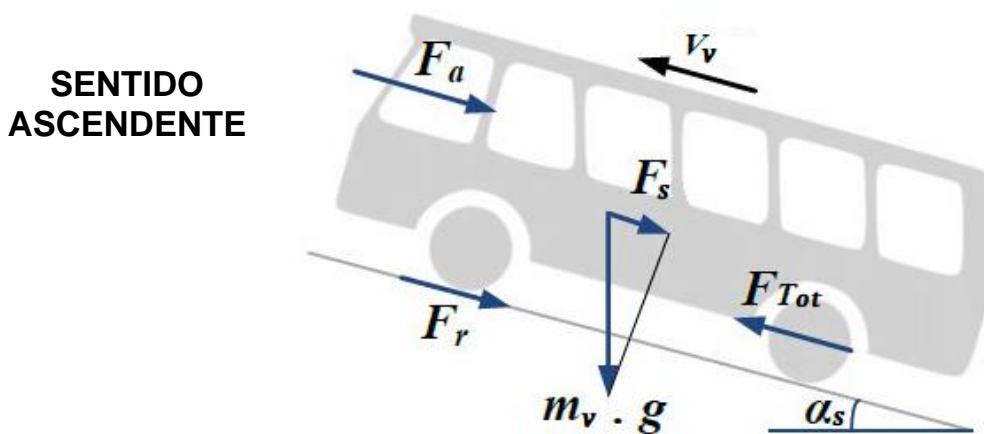


Figura 3.2 Fuerzas que actúan sobre un vehículo en movimiento a velocidad constante [16].

Como se puede observar en la Figura 3.2, no se representa la fuerza de inercia, F_i , dado que aquí se representa una situación en la que la guagua se desplaza a velocidad constante y, por tanto, la aceleración es nula y la fuerza de inercia también.

Cabe destacar que el cálculo que realiza el programa del consumo es desde el tanque hacia las ruedas, lo que en inglés se conoce como *Tank-To-Wheels*, *TTW*. Este término describe la energía consumida en el rango comprendido entre el depósito de combustible (o batería del vehículo si es eléctrico) hasta las ruedas. Este rango pertenece a una cadena energética mayor que se extiende desde el punto en el que se obtiene o extrae la materia prima que emplea el vehículo como fuente de energía, incluyendo su posterior tratamiento y transporte hasta su utilización por el vehículo. Al análisis del consumo teniendo en cuenta la cadena energética completa

se le conoce como análisis del pozo a las ruedas (*Well-To-Wheels*, *WTW* en inglés). En cambio, si solo se considera la cadena comprendida entre el punto de extracción de la materia prima y las estaciones de recarga de los vehículos, se le conocerá como del pozo al tanque, *Well-To-Tank*, *WTT*. En la siguiente figura se representa de forma esquemática la cadena energética:

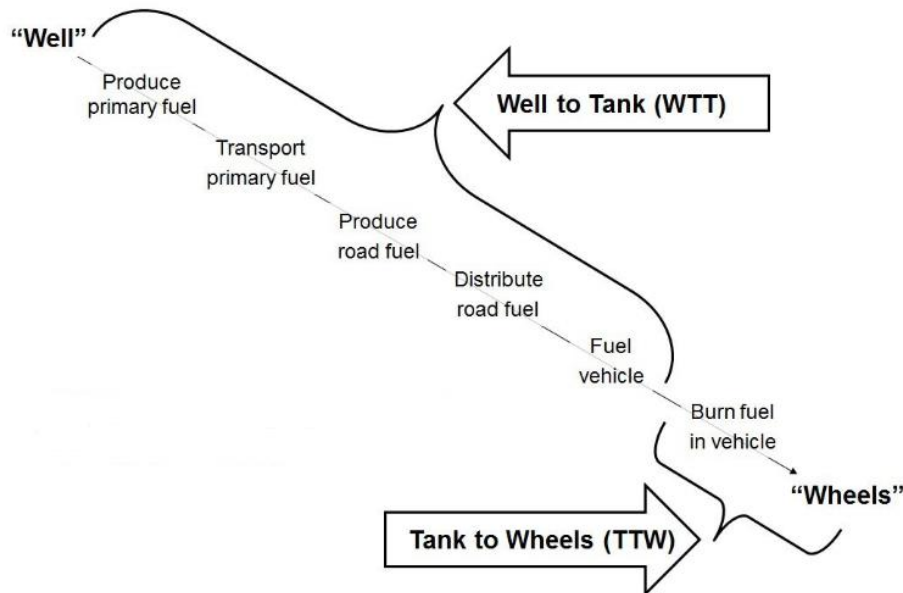


Figura 3.3 Cadena energética del pozo a la rueda (*Well-To-Wheels*) y subcadena del tanque a la rueda (*Tank-To-Wheels*). Fuente: www.carboncare.org

Obsérvese que en el caso de los vehículos enchufables como pueden ser los eléctricos o los *PHEV*, las emisiones que se obtienen del tanque a las ruedas son nulas o muy reducidas debido a que en su funcionamiento consumen electricidad que evidentemente no contribuye a las emisiones de CO_2 . No obstante, debe tenerse en cuenta que en el proceso de obtención de dicha electricidad pueden haberse quemado combustibles fósiles para ello si la energía no se ha generado de manera 100% renovable.

Esto supone que para este tipo de vehículos deben de considerarse además las emisiones del pozo a las ruedas. Si se considerara solo del tanque a las ruedas la comparación con otras arquitecturas que consumen directamente un combustible fósil no sería justa; ya que se estaría considerando que los vehículos que consumen directamente electricidad no contribuyen a las emisiones de CO_2 . En ese caso, se deben de considerar las emisiones del pozo a las ruedas (*Well-To-Wheels*) y comparar así entre las distintas arquitecturas. Para ello, se debe de tener en cuenta la intensidad de CO_2 de la red eléctrica de la que se obtiene la electricidad y la eficiencia con la que se realiza la carga del vehículo (se considerará una eficiencia del 90% en la recarga).

3.2 Toma de datos de especificaciones técnicas reales de guaguas

Una vez se conoce Autonomie y la forma en la que se realiza el cálculo del consumo energético, se cuenta con los conocimientos básicos para comenzar a construir cada uno de los modelos de guaguas con distintas arquitecturas de trenes de potencia. Para este TFG se modelarán guaguas con arquitectura convencional, híbrida en paralelo, en serie y eléctrica. En el caso de las guaguas de hidrógeno e impulsadas por combustibles alternativos quedarán fuera de esta memoria con el fin de limitar su extensión y los inconvenientes relacionados con estas tecnologías que han sido expuestos en capítulos anteriores y que las hace menos frecuentes en el mercado actual. No obstante, en el marco de la beca de colaboración realizada y el convenio a firmar con la empresa TITSA, estas arquitecturas son construidas y/o analizadas.

Como punto de partida se ha decidido modelar guaguas destinadas al transporte de pasajeros para operar en rutas caracterizadas por una conducción urbana, interurbana o en autopista, y que además, fueran de pequeña longitud para poder acceder a las zonas más estrechas cuando circulan por ciudad. Así, se ha comenzado a recoger especificaciones técnicas de guaguas fabricadas por constructores habituales en el mercado como MAN, Volvo o Mercedes-Benz, quienes ponen a disposición de los clientes las fichas técnicas de sus vehículos en sus respectivas páginas oficiales. De este modo, es posible tener referencias de distintas fuentes acerca de las especificaciones con las que suele contar una guagua para este tipo de operación.

Se han tomado todos los datos posibles de los modelos encontrados en la web para los distintos tipos de arquitecturas que se desean analizar. Como referencia para la construcción de los modelos de guaguas convencionales (Diesel) en Autonomie, se han tomado los modelos *MAN Lion's City LE* o *Citaro K* de Mercedes-Benz. Por otra parte, como modelo híbrido en paralelo se ha tomado el *Volvo B5RLE Hybrid* y como híbrido en serie, se han escogido el modelo *Volvo 7900 S-Charge*. En cuanto a la referencia de los vehículos eléctricos, se han podido encontrar datos de los modelos *MAN Lion's City 12 E* y *eCitaro* de Mercedes-Benz. Adicionalmente, en la búsqueda de literatura sobre estudios energéticos realizados en otros lugares del mundo, se han podido conseguir datos adicionales necesarios (en especial lo referido a coeficientes y cargas asociadas a los auxiliares del vehículo).

**MAN Lion's City LE**Fuente: www.flickr.com**Citro K**Fuente: <https://www.mercedes-benz-bus.com>**Volvo B5RLE Hybrid**Fuente: <https://www.flickriver.com>**Volvo 7900 S-Charge**Fuente: <https://www.volvobuses.com>**MAN Lion's City 12 E**Fuente: <https://www.man.eu>**eCitro**Fuente: <https://www.motor.es>**Figura 3.4** Guaguas cuyas especificaciones técnicas son tomadas como referencia

Se han podido obtener distintos datos técnicos de los modelos empleados como referencia. Entre ellos se encuentran las dimensiones del vehículo (longitud, área frontal, distancia entre ejes, radio de las ruedas); peso en vacío y masa máxima autorizada, coeficientes de arrastre aerodinámico y de rodadura, especificaciones de los motores (cilindrada, datos de potencia y par, tensión y corriente de trabajo de motores eléctricos), capacidad de los tanques de combustible, capacidad de las baterías, carga asociada a los auxiliares del vehículo, número de asientos y capacidad máxima de pasajeros (de pie y sentados), y cualquier dato en general que pudiera resultar de ayuda para completar los modelos en Autonomie.

Cabe destacar que, dado que se buscan guaguas relativamente pequeñas (en este caso se han tomado de 10.6m de longitud), se ha intentado que las especificaciones técnicas fueran acordes a las dimensiones de la guagua, ya que no será lo mismo un motor Diesel de 6.9L y 290HP montado en una guagua de 12m de longitud que en una de 10.6m pues la relación potencia-peso es diferente. Algunas de las guaguas mostradas en la figura anterior tienen una longitud superior a 10.6m, por lo que los datos se han escalado cuando no se tenía información para este tamaño en concreto. De esta forma, los datos resultan más coherentes.

3.3 Arquitecturas y configuraciones modeladas en Autonomie. Parámetros fundamentales

Recopilada toda la información posible, se ha procedido a la configuración de los modelos en Autonomie. Para ello, se ha tomado como base las configuraciones para

cada tipo de arquitectura con las que ya contaba el programa en sus librerías. Así, por ejemplo, para construir el modelo de guagua convencional (Diesel), se ha comenzado cargando el modelo predeterminado de Autonomie y luego se ha configurado, sustituyendo o editando los archivos de los que se compone su estructura según los datos recogidos o calculados a partir de las especificaciones técnicas de las guaguas usadas como referencia. El proceso se repite para cada una de las arquitecturas.

Para comprobar que las características de las guaguas son adecuadas para las aplicaciones a la que están destinadas, se deben de simular bajo ciclos específicos. En este sentido, se han tomado los ciclos CBD, Arterial y Commuter expuestos en el apartado 2.2, que representan un tipo de conducción en ciudad, interurbano y en autopista respectivamente, cubriendo así los tres tipos de rutas que las guaguas deberían ser capaces de seguir y completar de manera aceptable.

El objetivo se encuentra en que, al simular los vehículos sobre los ciclos, la desviación obtenida respecto al perfil teórico de velocidad sea lo más baja posible y siempre inferior al 10%. En este caso, se considera que el modelo configurado es, al menos, capaz de completar el ciclo adecuadamente, es decir, que las prestaciones del vehículo son suficientes para la aplicación a la que es destinado.

En cuanto a los modelos de guaguas construidos, hay que resaltar que se les ha asignado a todos el mismo chasis, es decir, que todas las guaguas construidas tienen las mismas características geométricas y, por tanto, tienen los mismos archivos para los componentes designados en el programa como *Chassis* y *Wheels* (chasis y ruedas), pues en otro caso, la comparación entre modelos no sería equilibrada.

A continuación, se presentan de forma esquemática y ordenadas de menor a mayor nivel de electrificación cada una de las arquitecturas modeladas para este TFG en Autonomie, las denominadas como “VPA”:

Guagua convencional (Diesel)

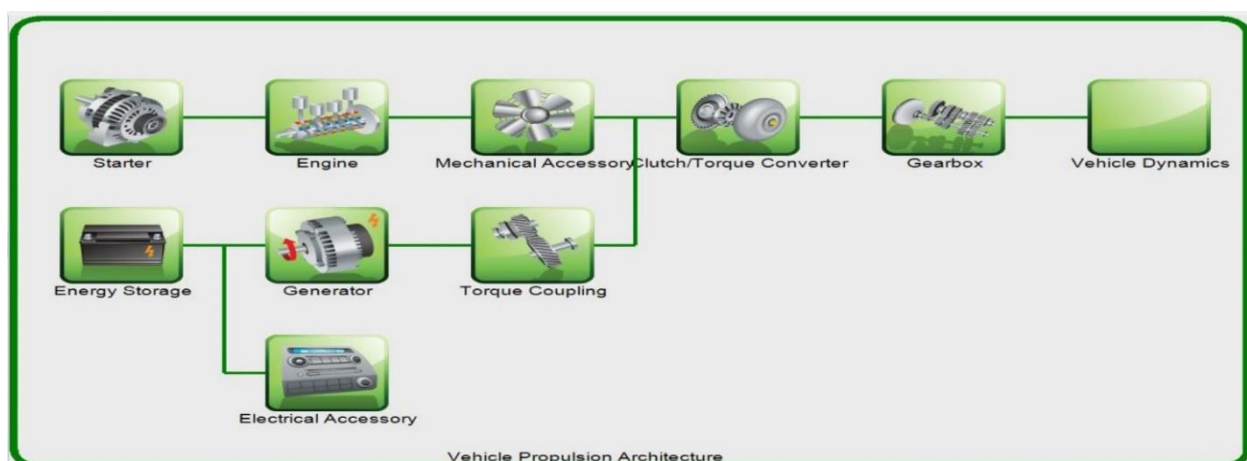


Figura 3.5 Guagua convencional (Diesel). Modelo de Autonomie

Como se puede apreciar en la Figura 3.5, la conexión entre componentes es el habitual en un vehículo convencional. En primer lugar, se cuenta con un “*Starter*”, que no es más que un motor de arranque para iniciar la marcha del motor de combustión (*Engine*) que, en este caso, es un motor Diesel de 6.7L y 280CV. La potencia se transmite a un cigüeñal y por medio de la correa de auxiliares se alimentan los accesorios mecánicos del vehículo como puede ser el compresor del aire acondicionado o el turbocompresor si su accionamiento es mecánico. El acoplamiento de la transmisión con el motor se hace por medio de un embrague (*clutch*). La caja de cambios (*gearbox*) es automática y permite seleccionar la velocidad de salida del árbol. Este árbol transmitirá la potencia a las ruedas pasando primero por el diferencial e impulsando así el vehículo. Dentro del denominado *vehicle dynamics* se ubican los archivos correspondientes a la configuración de las ruedas (*wheels*), el chasis (*chassis*) y el diferencial (*final drive*).

En cuanto a los accesorios eléctricos del vehículo, como puede ser la iluminación o los dispositivos electrónicos del vehículo, serán alimentados por medio de un generador que carga una batería de 24V. De acuerdo con el esquema, los accesorios también pueden ser alimentados directamente por dicho generador.

Guagua híbrida en paralelo (no enchufable)

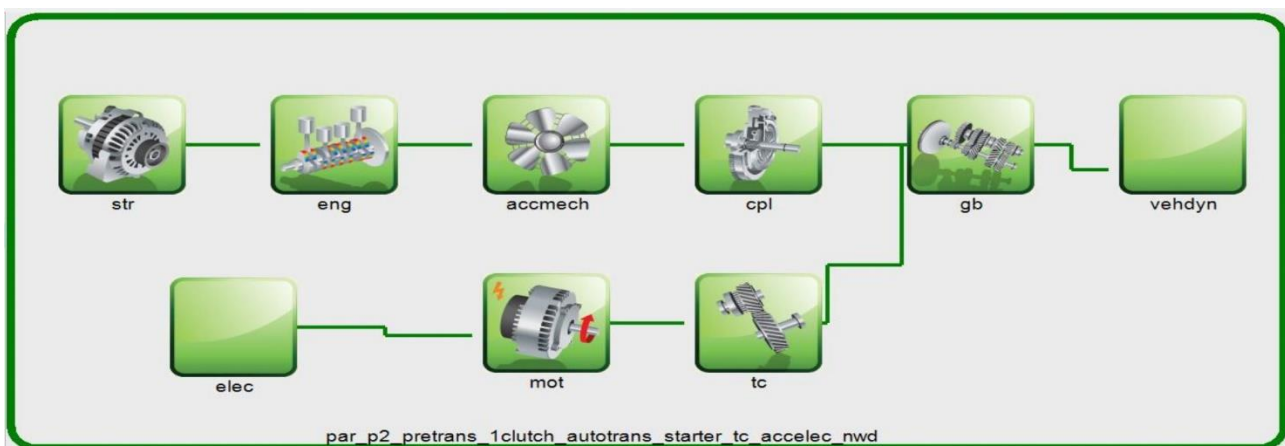


Figura 3.6 Guagua híbrida en paralelo (no enchufable). Modelo de Autonomie

En este caso, la línea superior del esquema correspondiente a la transmisión de potencia desde el motor de combustión interna a las ruedas es exactamente igual que en el caso del vehículo convencional, donde “cpl” hace alusión al embrague. La diferencia con respecto al modelo anterior se encuentra en el acoplamiento de un motor eléctrico paralelo al de combustión. Este motor eléctrico toma su energía de una batería principal que puede ser recargada en frenadas o mediante el motor de combustión interna. Además, este modelo cuenta con una batería secundaria pequeña, de 24V, para alimentar los accesorios eléctricos del vehículo. Todo ello se incluye dentro del sistema denominado “elec” en el esquema superior del modelo. En cuanto a la potencia desarrollada por el motor eléctrico, es transmitida a una caja de cambios de doble embrague por medio de una pareja de engranajes que

constituyen una relación de transmisión única y que se representan en el esquema como “tc”.

El motor de combustión y el eléctrico pueden operar simultáneamente o por separado según se explicó en el apartado 2.1.3.

Guagua híbrida en serie (enchufable)

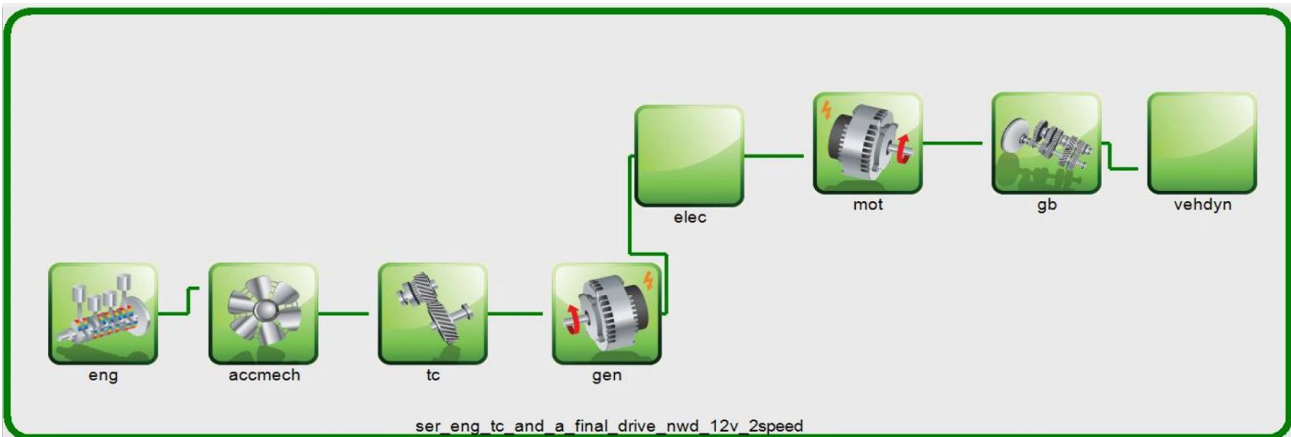
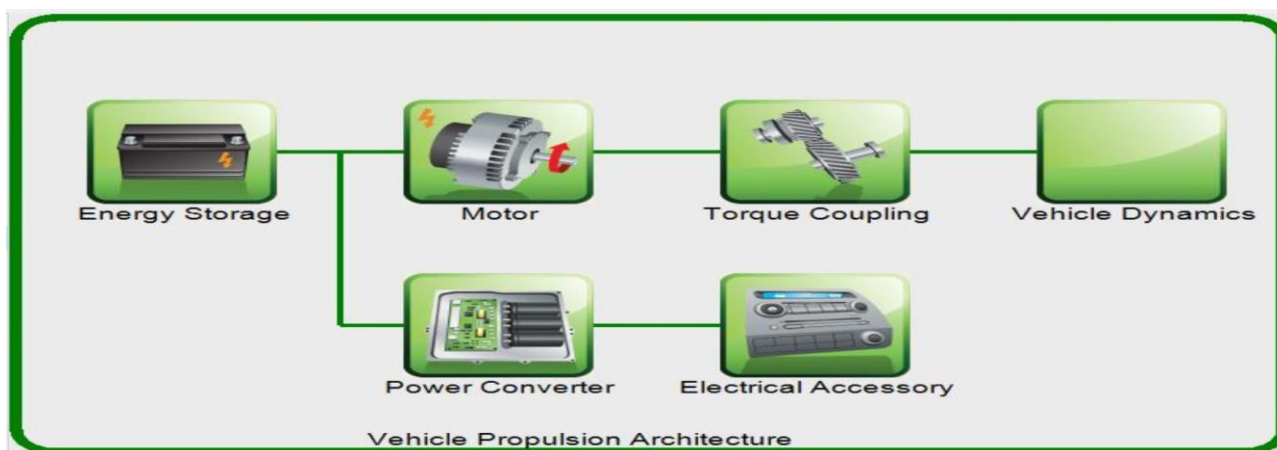


Figura 3.7 Guagua híbrida en serie (enchufable). Modelo de Autonomie

El esquema de funcionamiento del modelo híbrido en serie es relativamente sencillo. Se compone de un motor de combustión interna que además de alimentar los accesorios mecánicos del vehículo, se acopla por medio de una pareja de engranajes (“tc”) a un generador eléctrico que se encarga de transformar la energía mecánica que recibe del motor de combustión en electricidad empleada para alimentar los accesorios eléctricos y la batería principal del vehículo, donde se almacena la energía que emplea un motor eléctrico para impulsar el vehículo. En este caso, la transmisión de potencia desde el motor a las ruedas se realiza por medio de una caja de cambios manual de 2 velocidades.

El objetivo de este vehículo es que el motor de combustión interna opere de manera eficiente a un determinado nivel estacionario para cargar la batería que alimenta al motor eléctrico, siendo este el único encargado de impulsar el vehículo. Además, cuenta con la opción enchufable, lo que significa que la batería también puede ser recargada a partir de la red eléctrica externa.

Guagua 100% eléctrica**Figura 3.8** Guagua 100% eléctrica. Modelo de Autonomie

Finalmente, en el caso de la guagua 100% eléctrica el modelo es más sencillo. Únicamente se dispone de un motor eléctrico alimentado por una batería que puede ser recargada en frenadas o mediante conexión a la red eléctrica externa y que además proporciona energía a todos los accesorios del vehículo. Al igual que en el caso del híbrido paralelo, el acoplamiento del motor a la transmisión se realiza por medio de una relación de transmisión única representada por el sistema “*torque coupling*” en el esquema. Cabe destacar que en vehículos donde el motor eléctrico es el único que impulsa al vehículo, se suele prescindir de la caja de cambios, por lo que el par a la salida del “*torque coupling*” se transmite directamente a las ruedas por medio del diferencial incluido dentro del sistema “*vehicle dynamics*” de la figura.

En la Tabla 3.1 se reúnen los parámetros comunes a las distintas arquitecturas, mientras que en la Tabla 3.2 se reúnen los parámetros característicos de cada arquitectura:

Tabla 3.1 Parámetros generales

Características comunes a TODAS las arquitecturas	
Longitud total [m]	10.6
Capacidad de pasajeros	37 sentados + 30 de pie (67 pasajeros)
Área frontal [m ²]	7.1
Distancia entre ejes [m]	4.45
Radio de las ruedas [m]	0.49
Coeficiente de arrastre, Cd	0.65
Coeficiente de rodadura, Cr	0.008
Peso del chasis [kg]	9577.3
Peso sobre el eje delantero [%]	50
Masa Máxima Autorizada, MMA [kg]	18000

Fuente Propia

Tabla 3.2 Parámetros propios considerados como base para cada arquitectura

Sistema	Parámetro	Vehículo			
		Convencional	Híbrido en Paralelo	Híbrido en Serie	Eléctrico
Dinámica vehicular	Peso en vacío [kg]	10806.1 ⁽¹⁾	11074.8 ⁽¹⁾	11172.0 ⁽¹⁾	10373.4 ⁽¹⁾
Motor de combustión interna (MCI)	N.º Cilindros	6	4	4	-
	Volumen desplazado [L]	6.7	5.1	5.1	-
	Potencia Máxima [kW]	208.8	179.0	179.0	-
	Par Máximo [Nm]	857	735	735	-
Motor eléctrico (E-motor)	Potencia Máxima [kW]	-	107	220 ⁽²⁾	220 ⁽²⁾
	Potencia Continua [kW]	-	53	128.1	128.1
	Par Máximo [Nm]	-	253	597.7	597.7
	Tiempo para el cual se obtiene Par Máximo [s]	-	60	60	60
Batería de Tracción	Tipo de Batería	-	Ion-litio	Ion-litio	Ion-litio
	Capacidad total de la batería [kWh]	-	10	30	30 ⁽³⁾
Accesorios	Carga accesorios mecánicos [kW]	5 ⁽⁴⁾	0	0	0
	Carga accesorios eléctricos [kW]	0	5 ⁽⁴⁾	5 ⁽⁴⁾	5 ⁽⁴⁾
Transmisión	Relación de engranajes de la transmisión	Automática: 3.49/1.86/1.41/1 /0.75/0.65	Automática: 3.49/1.86/1.41/1 /0.75/0.66	Manual: 1.86/1	Relación Trans. única: 2.5
Diferencial	Relación del eje trasero	3	5.13	11.763	4.704

Fuente Propia

(1) Peso estimado en función de los componentes.

(2) Potencia de motor escalada para satisfacer las exigencias del ciclo (factor escalado de 1.52).

(3) Batería pequeña. Estrategia de carga de oportunidad. Para estudios posteriores con ciclos de larga distancia se considerará una capacidad mayor de 286kWh.

(4) Se considera como una carga constante de 5kW. Si se considera que el aire acondicionado se encuentra encendido, se empleará, en su lugar, 8kW.

Los resultados de simular cada una de las arquitecturas bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter se presentan en el siguiente apartado, donde además se realiza una comparación con resultados suministrados por la literatura, de tal modo que se puede realizar una verificación de los modelos.

Lo más idóneo sería realizar una “validación” con datos experimentales de guaguas existentes en la isla. Estos datos serán suministrados por TITSA dentro del convenio, pero en su defecto, es posible realizar una *verificación* con resultados disponibles en la literatura, que consistiría en confirmar que los valores de consumo, emisiones y pérdidas energéticas son equivalentes a los allí encontrados para el tamaño de guagua con el que se trabaja. De esta manera, se puede tener la seguridad de que los modelos devuelven resultados dentro de rangos habituales para cada arquitectura.

3.4 Métricas para la comparación de consumos energéticos

Antes de proceder a la verificación de los modelos, se debe de conocer la forma en que Autonomie expresa los resultados de consumo y cómo realizar una correcta comparación con los datos encontrados en la literatura.

Uno de los parámetros que se comparará entre los modelos es el consumo de combustible equivalente, más conocido de su término en inglés como “*fuel economy*”. Dado que Autonomie es un software americano, expresa el resultado de consumo según las unidades empleadas por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA, por sus siglas en inglés) para comparar el consumo entre vehículos convencionales, de combustibles alternativos, híbridos, eléctricos o de hidrógeno. Estas unidades son las millas por galón de gasolina (ó Diesel) equivalente, abreviado como MPGe (en el caso de consumir gasolina) o MPDGe (en el caso de consumir Diesel).

Las millas por galón de combustible representan la distancia media que puede recorrer el vehículo consumiendo, precisamente, un galón de combustible. Sin embargo, no es frecuente que en vehículos eléctricos, de gas natural o de hidrógeno, la fuente de energía que los alimenta se comercialice por “galones”, lo que dificulta su comparación directa en cuanto a consumo con otras tecnologías, es por ello que se define un valor de “consumo equivalente”, que representaría la cantidad de energía que tendrían que consumir estos vehículos alternativos para igualar la energía contenida en un galón de gasolina ó Diesel.

Autonomie expresa los resultados de consumo de las simulaciones en MPGe. En nuestro caso, las guaguas convencionales empleadas operan con Diesel, por lo que es necesario establecer una equivalencia entre la energía contenida en un galón de gasolina y en uno de Diesel.

En este sentido, se sabe que 1 galón de gasolina equivale a 114300Btu (ó 33.5kWh), mientras que 1 galón de Diesel equivale a 128700Btu (ó 37.95kWh) según datos del Departamento de Energía de los Estados Unidos (*U.S. Department of Energy*) [17].

De acuerdo con esto, los resultados de “*fuel economy*” en MPGe que proporciona Autonomie deben ser multiplicados por el cociente entre 128700Btu y 114300Btu, es decir, 1.126. Así, el valor queda expresado en MPDGe (millas por galón de Diesel equivalente).

Si posteriormente se deseara obtener el “consumo energético” (que es la medida habitual para vehículos eléctricos) expresado en kWh/km bastaría con transformar los galones de Diesel equivalente en kWh según la equivalencia mostrada y convertir las millas en kilómetros. Así, la ecuación empleada para realizar dicha conversión sería la siguiente, donde se debe sustituir la incógnita “X” por el valor expresado en MPDGe:

$$\text{Consumo energético (kWh/km)} = \frac{1}{X \text{ mpgde} \cdot \frac{1,609\text{km}}{1\text{mile}} \cdot \frac{1\text{gallon}}{37,95\text{kWh}}} \quad (3.9)$$

Por otro lado, a la hora de comparar con los datos de consumo encontrados en la literatura, se observará que las guaguas allí encontradas no presentan las mismas dimensiones y pesos que las guaguas modeladas. Debido a ello, al verificar los resultados de consumo, estos no tendrán por qué ser iguales o parecidos. Como consecuencia, la verificación debe realizarse tomando valores de “consumo específico” expresados en kWh/km/ton, donde se dividirá el valor obtenido mediante la ecuación anterior, entre la masa del vehículo incluyendo la carga.

$$\text{Consumo específico(kWh/km/ton)} = \frac{\text{Valor en kWh/km}}{\text{Masa del vehículo+carga}} \quad (3.10)$$

Este nuevo valor elimina la influencia del peso del vehículo, ya que se está expresando el consumo que se encuentra asignado a una tonelada de peso, lo que en principio debería ser similar entre modelos del mismo tipo y que realizan el mismo ciclo.

En cuanto al consumo de combustible, cabe mencionar que otra medida común de consumo son los litros a los 100km (L/100km), empleado en muchos países no americanos y que representa el número de litros de combustible que necesita consumir el vehículo para cubrir una distancia de 100km. Este resultado, puede ser obtenido directamente de Autonomie, y dado que es una medida habitual para expresar el consumo en vehículos convencionales en Europa, será igualmente mostrada junto con los resultados.

3.5 Verificación de los modelos

Para llevar a cabo la verificación de los modelos, se han simulados las arquitecturas (convencional, híbrida en paralelo y eléctrica) bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. A continuación, se ha comparado los resultados con datos encontrados en la literatura para los mismos tipos de arquitecturas y ciclos, de modo que puede realizarse una verificación de los modelos. Además, se ha verificado que las reducciones en consumo que se consiguen con las tecnologías híbrida y eléctrica con respecto al modelo convencional se encuentran dentro de los rangos obtenidos en la literatura. Igualmente, se ha comprobado que la contribución de los distintos componentes del vehículo a las pérdidas energéticas totales es similar a la mostrada en dicha literatura con el fin de confirmar que el modelo es capaz de predecir correctamente dichas pérdidas y las diferencias entre arquitecturas.

La verificación de modelos se ha realizado asumiendo que el aire acondicionado se encuentra apagado, lo que significa que de acuerdo con la Tabla 3.2, se ha considerado una carga de accesorios constante de 5kW. En cuanto a la carga de pasajeros, se ha fijado al 50%, lo que significa que las guaguas transportarán una carga constante de 34 pasajeros en cada ruta. Por otro lado, se ha tomado un coeficiente de arrastre (*drag coefficient*) de 0.60 en lugar de 0.65 como figuraba en la Tabla 3.1, ya que la literatura empleada para la verificación usa dicho valor. Así, se compara en igualdad de condiciones. No obstante, cabe destacar que, según la información consultada, un valor más habitual para el coeficiente de arrastre en guaguas sigue siendo de 0.65 por lo que será el empleado en análisis posteriores a la verificación.

Tabla 3.3 Condiciones de verificación de los modelos

Carga de accesorios [kW]	5
Carga de pasajeros	34 pasajeros (2312kg) ⁽¹⁾
Coeficiente de arrastre, Cd	0.6

(1) Se considera que cada pasajero representa una carga constante de 68kg

Fuente Propia

A continuación, se presentan las gráficas que muestran la comparación en consumo energético de cada uno de los modelos respecto a los datos de la literatura para los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Los valores de consumo allí representados se presentan como valores específicos, para realizar la comparación entre vehículos con distinto peso o tamaño tal y como se ha comentado en el apartado anterior. Para que la verificación sea correcta, la diferencia en valores de consumo específico entre el modelo y la referencia deben de ser cercanos.

Verificación de la guagua convencional (Diesel)

Para la verificación del modelo convencional construido en Autonomie, se ha comparado los valores obtenidos con los datos de la literatura. En concreto, los datos han sido obtenidos del informe realizado por la empresa M.J. Bradley & Associates (MJB&A) bajo el título "*Comparison of Modern CNG, Diesel and Diesel Hybrid-Electric Transit Buses: Efficiency & Environmental Performance*" [18]. En el informe, se obtienen resultados para distintas guaguas de gas natural, Diesel e híbridas en serie. En este caso, la guagua convencional del fabricante "New Flyer of America", modelo "XD40", analizada en el informe, es la que presenta características más próximas a la modelada en Autonomie.

Tabla 3.4 Comparación de características: Guagua convencional Autonomie y New Flyer XD40

Parámetro	Modelo de guagua convencional	
	Modelo Autonomie	New Flyer XD40 ⁽¹⁾
Año del modelo	-	2011
Longitud total [m]	10.6	12
Capacidad de pasajeros	37 sentados +30 de pie (67 pasajeros)	36 sentados + 45 de pie (81 pasajeros)
Distancia entre ejes [m]	4.45	7.19
Radio de las ruedas [m]	0.49	0.51
Peso en vacío [kg]	10806.1	12578.1
Motor de combustión interna (MCIA)		
N.º Cilindros	6	6
Volumen desplazado [L]	6.7	9.0
Potencia máxima [kW]	208.8	208.8
Par máximo [Nm]	857	1220
Transmisión (automática de 6 velocidades)		
Relación de engranajes de la transmisión	3.49/1.86/1.41/1/0.75/0.65	3.51/1.91/1.43/1/0.74/0.64

(1) Datos del modelo New Flyer XD40 obtenidos de [19]

Fuente Propia

Como se puede apreciar en la Tabla 3.4, el modelo New Flyer XD40 presenta mayores dimensiones, por lo que tiene un peso en vacío mayor (en este caso unas 3 toneladas más) y una mayor capacidad de pasajeros. No obstante, el motor y la transmisión son similares, a pesar de que dicho modelo presenta una mayor cilindrada y proporciona un par máximo mayor. Destaca el hecho de que ambos modelos proporcionan la misma potencia a pesar de tener distinta cilindrada. Debe tenerse en cuenta que el modelo convencional alcanzará la potencia máxima con un par menor que en el caso de la literatura debido a su menor cilindrada. Como consecuencia, la diferencia se puede encontrar en que el modelo construido en Autonomie, alcanzará la potencia máxima a un régimen de giro mayor que en el caso de la literatura, de tal modo que el producto del par por la velocidad angular en ese punto sea el mismo en ambos casos.

Debido a las diferencias encontradas en ambos modelos, los resultados de consumo de combustible o "*fuel economy*" se debe esperar que sean distintos, por lo que tal y como se ha comentado, se calculan valores de consumo específico. En cuanto a la masa considerada para ello, se ha tomado la masa del vehículo incluyendo una carga correspondiente a 34 pasajeros (2312kg). En cambio, para el cálculo de la carga en la literatura, se debe seguir el criterio empleado en el Centro de Pruebas e Investigación de Guaguas de Altoona (*Altoona Bus Research and Testing Center*) ubicado en Pensilvania, Estados Unidos, ya que los datos que ha tomado dicha literatura proceden de los ensayos en banco de rodillos que se han realizado en este centro, el cual, considera una carga igual a la masa en vacío del vehículo más 150 libras adicionales (ó 68kg) por cada asiento de la guagua. De acuerdo con ello se obtiene la siguiente tabla que se muestra a continuación:

Tabla 3.5 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua convencional Autonomie y New Flyer XD40

Parámetro	Modelo de guagua convencional	
	Modelo Autonomie	New Flyer XD40
Peso en vacío [kg]	10806.1	12578.1
Carga de pasajeros [kg]	2312 (34 asientos)	2449.4 (36 asientos)
Carga total considerada [kg]	13118.1	15027.5

Fuente Propia

Esto implica que la guagua que se ha simulado en la literatura pesa unas 2 toneladas más. Por esta razón, el consumo en kWh/km debería ser mayor que para el modelo de Autonomie, mientras que los valores de consumo específico en kWh/km/ton (mostrados en la Figura 3.9), deberían de ser muy parecidos para que el modelo se considere aceptable.

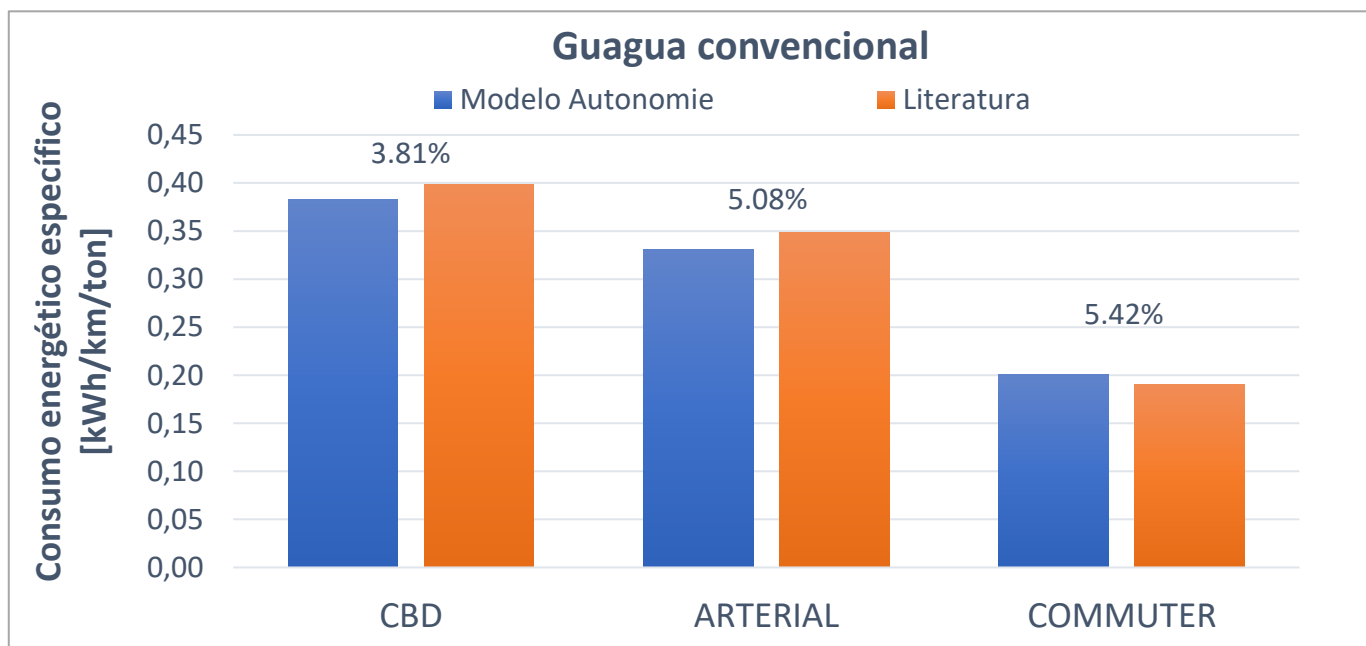


Figura 3.9 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua convencional de Autonomie y la literatura. Fuente Propia

Como se puede observar en la figura anterior, la diferencia en consumos energéticos específicos entre el modelo construido en Autonomie y el obtenido a partir de la literatura, es relativamente estrecha.

En el caso del ciclo CBD, la diferencia obtenida es del 3.81%, lo que representa un error relativamente bajo y una capacidad aceptable del modelo para predecir consumos en un perfil característico de ciudad como es el CBD.

En cuanto al ciclo Arterial, la diferencia obtenida es del 5.08%, mientras que el ciclo Commuter es del 5.42%. Estos errores siguen siendo bajos, pues apenas son del 5%, lo que significa que el modelo también tiene buena capacidad de predicción de consumos en situaciones de conducción interurbanas o en autopista.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de consumo absolutos para la guagua convencional sobre los tres ciclos analizados junto a los valores específicos que se mostraron en la gráfica anterior:

Tabla 3.6 Resultados de consumo para la guagua convencional bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura

CICLO CBD			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	4.72	5.00	0.38
Literatura	3.92	6.02	0.40
CICLO ARTERIAL			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	5.46	4.32	0.33
Literatura	4.48	5.27	0.35
CICLO COMMUTER			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	9.01	2.62	0.20
Literatura	8.20	2.88	0.19

Fuente Propia

Se comprueba que los consumos energéticos específicos entre el modelo de Autonomie simulado y los obtenidos en la literatura son prácticamente coincidentes, por lo que el modelo se verifica. Además, se observa que el programa es capaz de predecir la tendencia esperada en cuanto a consumo para un vehículo convencional cuando la velocidad media del ciclo aumenta y se reduce la frecuencia con la que se producen las paradas, las aceleraciones y las desaceleraciones. Se observa que un aumento en la velocidad media del ciclo se traduce en una reducción en el consumo, ya que el vehículo pasa a operar a regiones de operación donde su eficiencia media es mayor, lo que supone que una mayor cantidad de combustible entregado es mejor aprovechado en forma de par entregado a las ruedas. Por este motivo, en el ciclo CBD el consumo será el mayor obtenido, seguido del Arterial y, por último, del Commuter, donde el consumo es más bajo al reunirse las condiciones comentadas en un ciclo de autopista.

En la siguiente tabla se muestra el consumo de combustible expresado en L/100km para el vehículo simulado.

Tabla 3.7 Consumo de combustible de la guagua convencional bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter

CICLO	Consumo de combustible [L/100km]
CBD	50.5
Arterial	43.6
Commuter	26.4

Fuente Propia

Se observa que, al pasar de un tipo de conducción en ciudad a uno característico de autopista, el consumo se reduce prácticamente a la mitad, lo que supone el doble de autonomía. En ciudad su consumo es elevado (de 50.5L/100km) por lo que es de esperar que sus emisiones también lo sean, lo que supone un problema debido a que en las ciudades se concentra un gran número de vehículos que contribuyen a dichas emisiones, y donde además se encuentran los principales centros de negocios y residencias. Esto ha llevado durante muchas décadas problemas relacionados con daños en la salud de las personas, en el patrimonio y en el medioambiente. Es por este motivo que sea en las ciudades donde las restricciones a estos vehículos sean tan importantes.

Verificación de la guagua híbrida en paralelo

Del modelo híbrido en paralelo no se ha podido encontrar datos de consumo en la literatura referidos a determinados modelos que hayan sido específicamente estudiados como ocurre en el caso anterior, ya que cuando se trata de modelos híbridos, la literatura considera principalmente los modelos híbridos en serie, posiblemente porque son los que mayor reducción de emisiones proporcionan de entre este tipo de vehículos.

No obstante, ha sido posible encontrar rangos de reducción en consumo que ofrecen los modelos híbridos en paralelo con respecto a los convencionales para los tres ciclos CBD, Arterial y Commuter, de modo que se puede tener una idea de las reducciones que se consiguen respecto al modelo convencional en un tipo de conducción por ciudad, en tramo interurbano y en autopista respectivamente.

En la Tabla 3.8 se presentan los valores obtenidos a partir de los resultados mostrados en un estudio realizado por los autores Ray Minjares, Tim Dallman, Samson Masebinu y Francisco Posada bajo el título "*South Africa flagship on green mobility: Johannesburg Metrobus*", en el que se trata de buscar alternativas a los vehículos de transporte público convencionales en la ciudad de Johannesburgo (Sudáfrica) para mejorar la calidad del aire y reducir las emisiones de dióxido de carbono [20]. En él se comparan las tecnologías convencionales, de gas natural comprimido, híbridas en paralelo y 100% eléctricas para distintos ciclos entre los que

se encuentra el CBD, el Arterial y el Commuter. En este estudio se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.8 Reducción de consumo que representa el híbrido en paralelo respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter

CICLO	Porcentaje de reducción en consumo según la literatura	Porcentaje de reducción medio
CBD	-10.6 a -34.4%	-22.5%
Arterial	-1.5 a -23.0%	-12.3%
Commuter	0 a -12.17%	-6.1%

Fuente Propia

En cambio, de las simulaciones en Autonomie se ha podido extraer la siguiente gráfica que permite comparar el consumo entre el vehículo convencional y el híbrido en paralelo, obteniendo así la diferencia entre ambos:

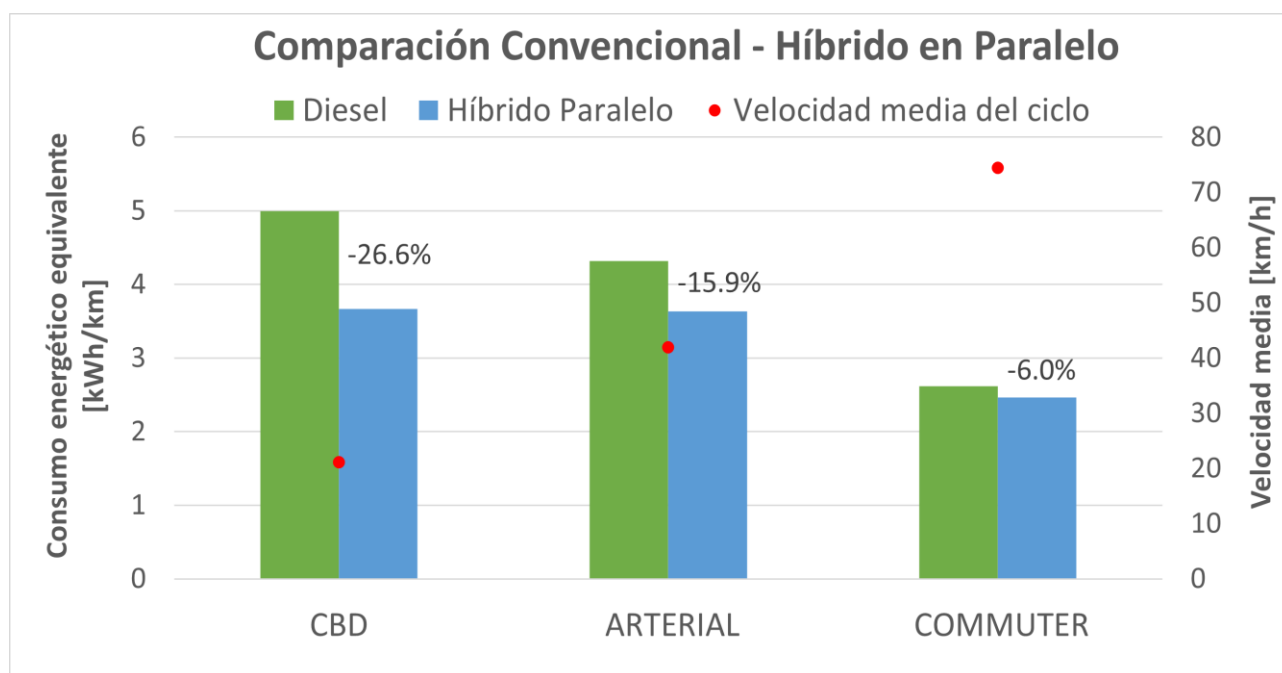


Figura 3.10 Comparación de consumos entre el modelo híbrido en paralelo y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.

De acuerdo con la Figura 3.10, la reducción en consumo que supone emplear un vehículo híbrido en paralelo en lugar de uno convencional en ciudad (ciclo CBD) es del 26.6%; mientras que en un ciclo de conducción interurbano (como el Arterial) es del 15.9%; y en un ciclo de autopista (como el Commuter) es del 6.0%. Como se puede confirmar, estos valores se encuentran dentro de los rangos definidos en la Tabla 3.8, incluso cercanos al valor medio de cada intervalo, por lo que se puede decir que el modelo híbrido en paralelo es capaz de predecir el consumo del vehículo dentro de valores esperables, quedando así verificado.

En la figura anterior también se ha representado la velocidad media de cada ciclo mediante un punto cuyo valor asociado puede leerse en el eje de la derecha. Se observa como a medida que aumenta la velocidad media del ciclo la reducción en consumo que supone el híbrido en paralelo respecto al modelo convencional Diesel, se reduce. Del mismo modo, puede observarse que el vehículo híbrido es menos sensible a los cambios en el tipo de ruta con respecto al vehículo convencional, ya que como se puede ver, la variación en su consumo de un ciclo a otro es menor si se compara con el convencional. Esto es un comportamiento habitual en los vehículos híbridos.

A la vista de los resultados, la mayor reducción en consumo se produce en conducción urbana, donde la mayor eficiencia de la arquitectura híbrida y las múltiples oportunidades para regenerar energía en frenada se ven maximizadas como consecuencia de las frecuentes desaceleraciones. Además, a pesar de que el vehículo pueda pasar mucho tiempo al ralentí como consecuencia de los atascos, semáforos, etc., el vehículo híbrido apaga sus dos motores durante el periodo al ralentí, de tal forma que la marcha se inicia en modo 100% eléctrico, encendiendo luego el motor de combustión para satisfacer la demanda de par en la aceleración, pero empleando también el motor eléctrico como asistencia. Estos dos aspectos suponen la mayor reducción en consumo conseguida, dado que son condiciones en las que un motor de combustión interna opera con muy mala eficiencia.

En la siguiente figura se puede observar la representación gráfica de las curvas de par entregado por el motor en el vehículo convencional y en el híbrido paralelo en los primeros 250 segundos del ciclo CBD, donde puede apreciarse el comportamiento comentado:

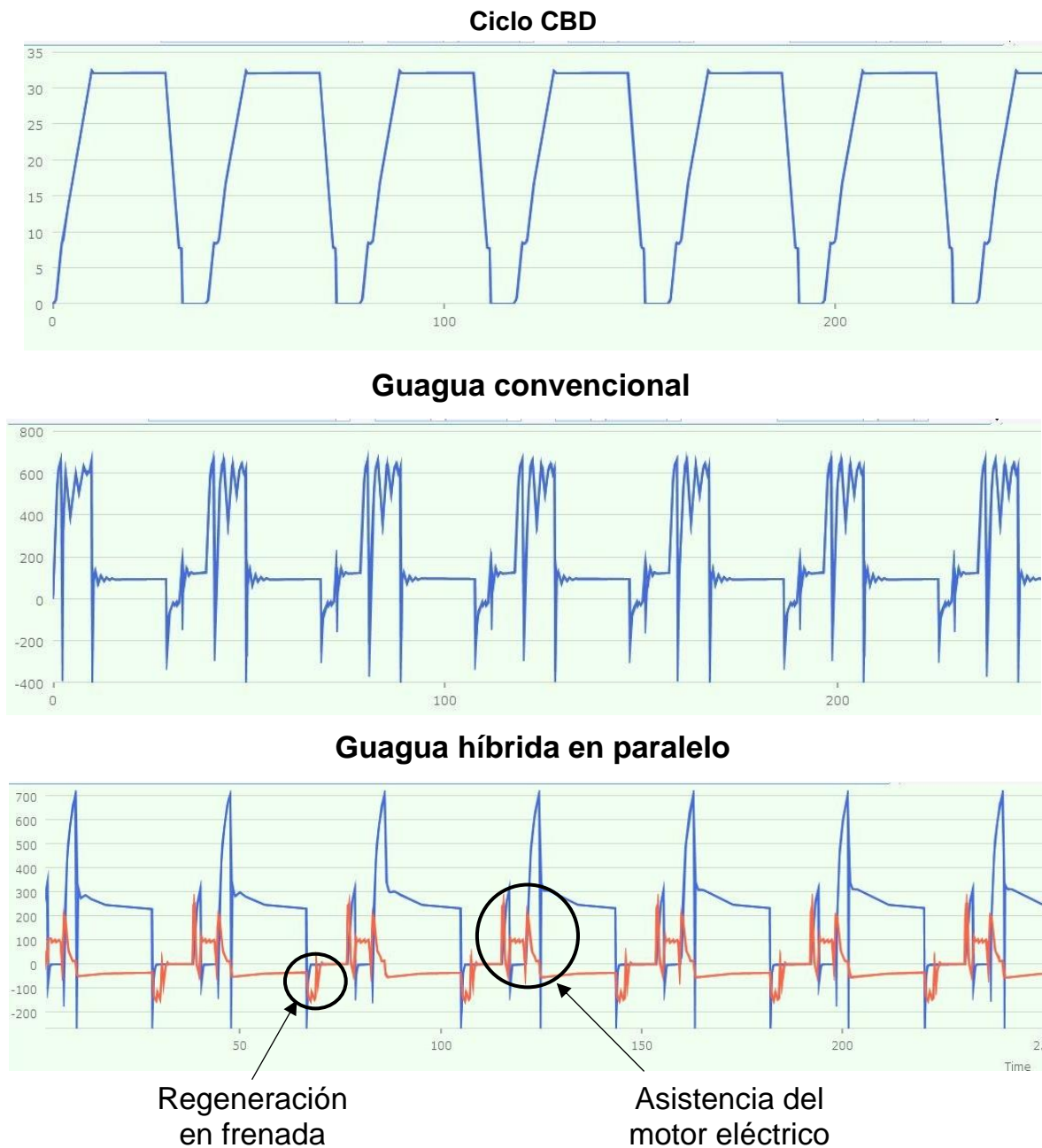


Figura 3.11 Comparación entre la operación del vehículo convencional y el híbrido en paralelo en ciudad. Par de salida del motor de combustión (línea azul) y par de salida del motor eléctrico (línea roja). Fuente Propia.

De acuerdo con la figura, en la guagua convencional es el motor de combustión interna (curva azul) el único que debe satisfacer la demanda de par del vehículo, mientras que, en el híbrido en paralelo, el motor eléctrico (curva roja) actúa de asistencia a la aceleración. De hecho, primero se arranca el motor eléctrico y luego entra en funcionamiento el de combustión, por lo que este último impulsa el vehículo cuando ya se encuentra en movimiento, lo que le resulta más sencillo y da lugar a menor consumo. Como consecuencia de dicha asistencia en el modelo híbrido, el conductor no necesita accionar al 100% el pedal del acelerador para hacer esta aceleración, mientras que en el vehículo de combustión es necesario. En la Figura

3.12 se representa la demanda de pedal del acelerador en una de las aceleraciones del ciclo CBD tanto para el vehículo convencional como para el híbrido en paralelo.

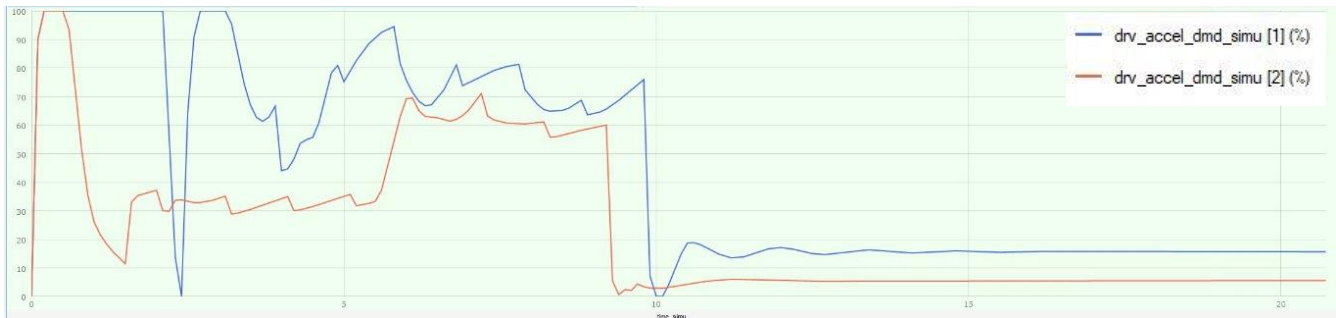


Figura 3.12 Posición del pedal del acelerador expresado como un porcentaje entre 0 (no pisado) y 100 (totalmente pisado) para el vehículo convencional y el híbrido en paralelo durante la aceleración. Vehículo convencional (línea azul) e híbrido en paralelo (línea roja). Fuente Propia

Se ve claramente que el vehículo convencional demanda el 100% de pedal para realizar la aceleración, mientras que, en el híbrido en paralelo, se alcanza al comienzo una demanda del 100% pero posteriormente se ve reducida a valores notablemente más bajos, lo que implica menores consumos.

En la Figura 3.11 también se observa que la arquitectura híbrida aprovecha las frenadas, incluso los tramos a velocidad constante, para recargar la batería. Esto se manifiesta en los momentos en que la curva de par del motor eléctrico toma valores negativos (inferiores a 0Nm), lo que supone “energía gratuita” que puede ser aprovechada más adelante por el vehículo como por ejemplo en la siguiente aceleración, lo que también permite reducir el consumo global.

Por último, a partir de las curvas de par mostradas, se puede apreciar que durante los tiempos en los que el vehículo convencional se encuentra parado, su motor se mantiene trabajando al ralentí como es habitual. En cambio, en el vehículo híbrido, tanto el motor de combustión interna como el eléctrico se apagan tal y como se ha comentado y se muestra en la Figura 3.11, lo que contribuyen en gran medida a la reducción de emisiones, pues el ralentí representa una situación de gran ineficiencia para un vehículo convencional. Esto igualmente contribuye a reducir el consumo y las emisiones.

Si se compara la reducción obtenida en consumo entre el ciclo urbano (CBD) y el de autopista (Commuter) con respecto al Diesel, se puede ver que en autopista la ventaja del híbrido en paralelo prácticamente desaparece. Esto se debe a las propias características de este tipo de conducción, caracterizado por largas distancias, altas velocidades, y escasas aceleraciones y desaceleraciones u oportunidades de regeneración en frenada. Además, en estas circunstancias, el mayor peso del vehículo híbrido supone una penalización.

Como consecuencia, el papel tan importante que desempeñaba el motor eléctrico dentro de ciudad desaparece. Este hecho, unido a que el motor de combustión trabaja con mucha mejor eficiencia bajo condiciones poco transitorias, da lugar a que la diferencia en consumos entre ambas arquitecturas se reduzca, lo que hace poco competitiva a la arquitectura híbrida en paralelo en lo que a rutas largas o de alta velocidad se refiere. En la siguiente figura se muestran las curvas de par de cada vehículo bajo el ciclo Commuter al igual que se hizo con el CBD.

Ciclo Commuter



Guagua convencional



Guagua híbrida en paralelo

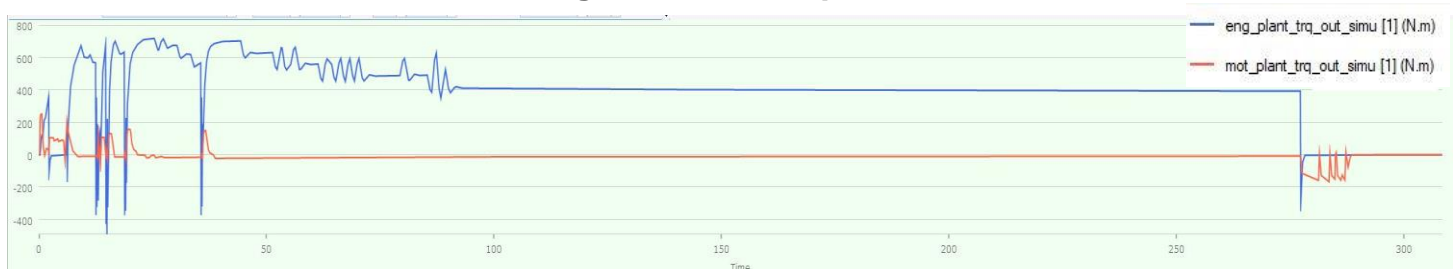


Figura 3.13 Comparación entre la operación del vehículo convencional y el híbrido en paralelo en autopista. Par de salida del motor de combustión (línea azul) y par de salida del motor eléctrico (línea roja). Fuente Propia.

Como se puede observar en la Figura 3.13, la curva de par correspondiente al motor de combustión en ambas arquitecturas (curvas azules) son muy parecidas, salvo por los picos de par negativo alcanzados en el híbrido en paralelo ocasionados por el controlador del vehículo, dado que en dichos puntos simplemente se producen cambios de marcha al igual que en el vehículo convencional.

Se observa que la poca reducción en consumo que se consigue con el vehículo híbrido se produce por la asistencia en la primera aceleración y la pequeña regeneración que se produce en la desaceleración al final del ciclo. Destaca el hecho de que, durante todo el tramo estacionario a velocidad constante, el motor eléctrico no opera, encargándose el motor de combustión de entregar todo el par a las ruedas, al igual que el vehículo convencional.

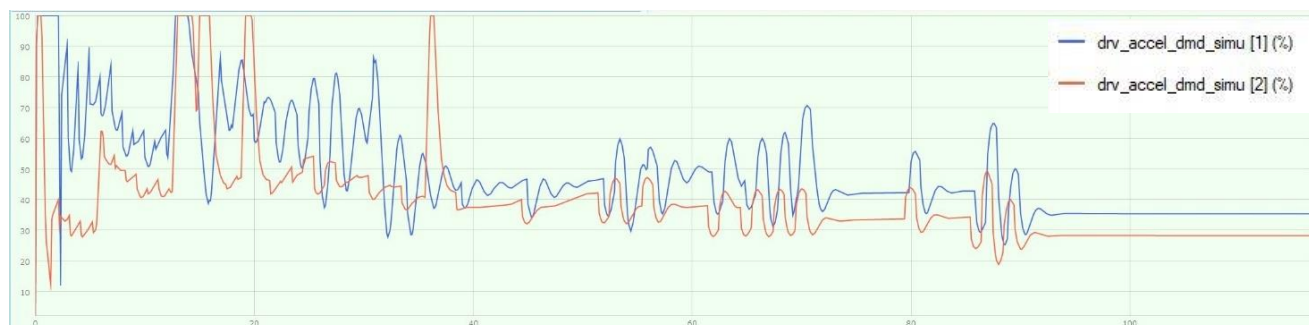


Figura 3.14 Posición del pedal del acelerador expresado como un porcentaje entre 0 (no pisado) y 100 (totalmente pisado) para el vehículo convencional y el híbrido en paralelo. Vehículo convencional (línea azul) e híbrido en paralelo (línea roja). Fuente Propia.

En la Figura 3.14 se representa la demanda de pedal del acelerador durante la aceleración del ciclo Commuter para el vehículo convencional y el híbrido en paralelo. Nuevamente, debido a la asistencia del motor eléctrico, esta demanda es menor que en el caso del vehículo convencional. No obstante, se observa como en varios puntos, se alcanzan valores del 100% de pedal. Estos puntos coinciden con los picos de par negativo que se comentaban anteriormente, por lo que no deben tenerse en cuenta.

Verificación de la guagua híbrida en serie (enchufable)

Para la verificación del modelo híbrido en serie se ha tomado como referencia la misma literatura empleada para verificar el modelo convencional [18], ya que, en dicho documento, se analiza el consumo del modelo New Flyer XDE40 que se encuentra diseñado bajo una arquitectura híbrida en serie, por lo que se puede tomar como referencia para la comparación de resultados. No obstante, debe tenerse en cuenta que dicho modelo es “no enchufable” por lo que a la hora de presentar los resultados se debe contabilizar el consumo de energía que se obtiene directamente de la batería y no ha sido generada a partir del motor de combustión interna, sino de la red eléctrica.

Se han obtenido resultados para los ciclos CBD, Arterial y Commuter al igual que en los casos anteriores comparando los resultados obtenidos con el modelo híbrido en serie de la literatura. En la siguiente tabla se presenta una comparativa de características entre ambos modelos:

Tabla 3.9 Comparación de características: Guagua híbrida en serie Autonomie y New Flyer XDE40

Parámetro	Modelo de guagua híbrida en serie	
	Modelo Autonomie	New Flyer XDE40 ⁽¹⁾
Año del modelo	-	2010
Longitud total [m]	10.6	12
Capacidad de pasajeros	37 sentados +30 de pie (67 pasajeros)	42 sentados + 34 de pie (76 pasajeros)
Distancia entre ejes [m]	4.45	7.20
Radio de las ruedas [m]	0.49	0.51
Peso en vacío [kg]	11142.0	12641.6
Motor de combustión interna (MCIA)		
N.º Cilindros	4	6
Volumen desplazado [L]	5.1	6.7
Potencia máxima [kW]	179.0	208.8
Par máximo [Nm]	735	1100
Motor eléctrico (E-motor)		
Potencia Máxima [kW]	220	200 ⁽²⁾
Potencia Continua [kW]	128.1	160 ⁽²⁾
Par Máximo [Nm]	597.7	5200 ⁽²⁾
Tiempo para el cual se obtiene Par Máximo [s]	60	-
Eficiencia máxima [%]	94%	-
Relación de engranajes de la transmisión	Manual: 1.86/1	Automática. Trans. Única
Batería de tracción		
Tipo de batería	Ion-litio	Ion-litio
Capacidad total [kWh]	1	1 ⁽³⁾

Fuente Propia

- (1) Datos del modelo New Flyer XDE40 obtenidos de [21]
- (2) Datos del motor eléctrico integrado en el sistema de transmisión BAE /HDS200 con el que cuenta el vehículo cuyas especificaciones técnicas se encuentran disponibles en [22]
- (3) Datos del sistema de almacenamiento de energía ESS 3G-1K del modelo disponibles en [23]

En la siguiente figura se muestra esquemáticamente el tren de potencia del modelo New Flyer XDE40 donde además se puede observar como el acoplamiento entre el motor de combustión y la transmisión BAE/ HDS200 de dicha guagua se realiza en serie:

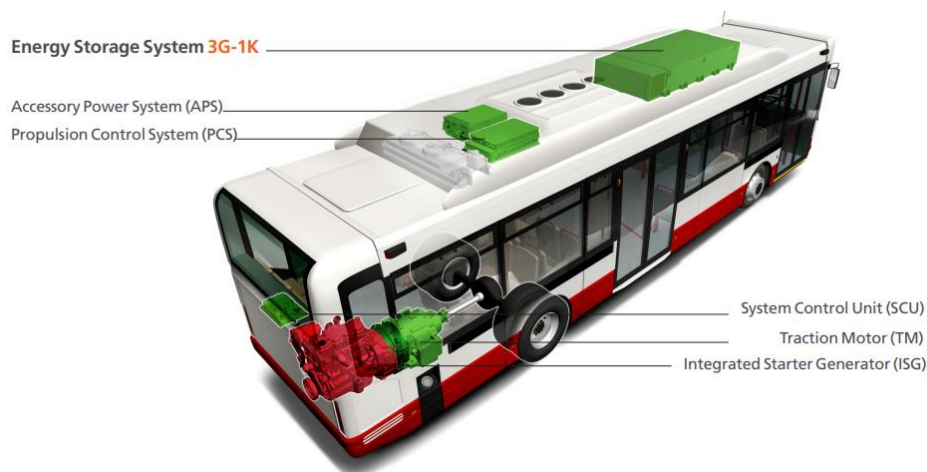


Figura 3.15 Tren de potencia de la guagua New Flyer XDE40 (híbrida en serie). Fuente: [23]

Comparando las características técnicas de la Tabla 3.9 entre la guagua modelada y la tomada como referencia, se aprecia claramente que la guagua de referencia es más grande y cuenta con un tren de potencia de mayores prestaciones con el fin de impulsar la carga, es por ello, que como punto de partida se debe esperar que el consumo de la guagua de referencia sea superior al de la guagua modelada. Destaca lo pequeña que es la batería tomada por la referencia (1kWh de capacidad total). Esto se debe a que el modelo fue diseñado para trabajar en modo 100% eléctrico únicamente para casos específicos como puede ser entrar y salir de las paradas de pasajeros y así no emitir CO₂ en estas situaciones. En un modelo híbrido en serie, el tamaño de la batería es fundamental, dado que una batería pequeña, dará lugar a que el motor de combustión tenga que arrancarse muchas veces para mantener un nivel de carga mínimo en la batería. En cambio, una batería muy grande, reducirá al mínimo el encendido de dicho motor, por lo que su capacidad tiene un impacto directo en el consumo total del vehículo. Para la verificación del modelo, se ha tomado también 1kWh de capacidad para que la comparación sea lo más equilibrada posible, aun cuando para los posteriores estudios se aumentará para poder cumplir con las exigencias de los ciclos.

En la siguiente tabla se muestran las masas que se han considerado para la obtención de los valores de consumo en cada guagua:

Tabla 3.10 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua híbrida en serie Autonomie y New Flyer XDE40

Parámetro	Modelo de guagua híbrida en serie	
	<i>Modelo Autonomie</i>	<i>New Flyer XDE40</i>
Peso en vacío [kg]	11172.0	12641.6
Carga de pasajeros [kg]	2312 (34 asientos)	2856 (42 asientos)
Carga total considerada [kg]	13484.0	15497.6

Fuente Propia

La diferencia en masa es de aproximadamente 2 toneladas, pero sus valores de consumo específico deberían ser muy parecidos. En la siguiente figura se realiza la comparación correspondiente:

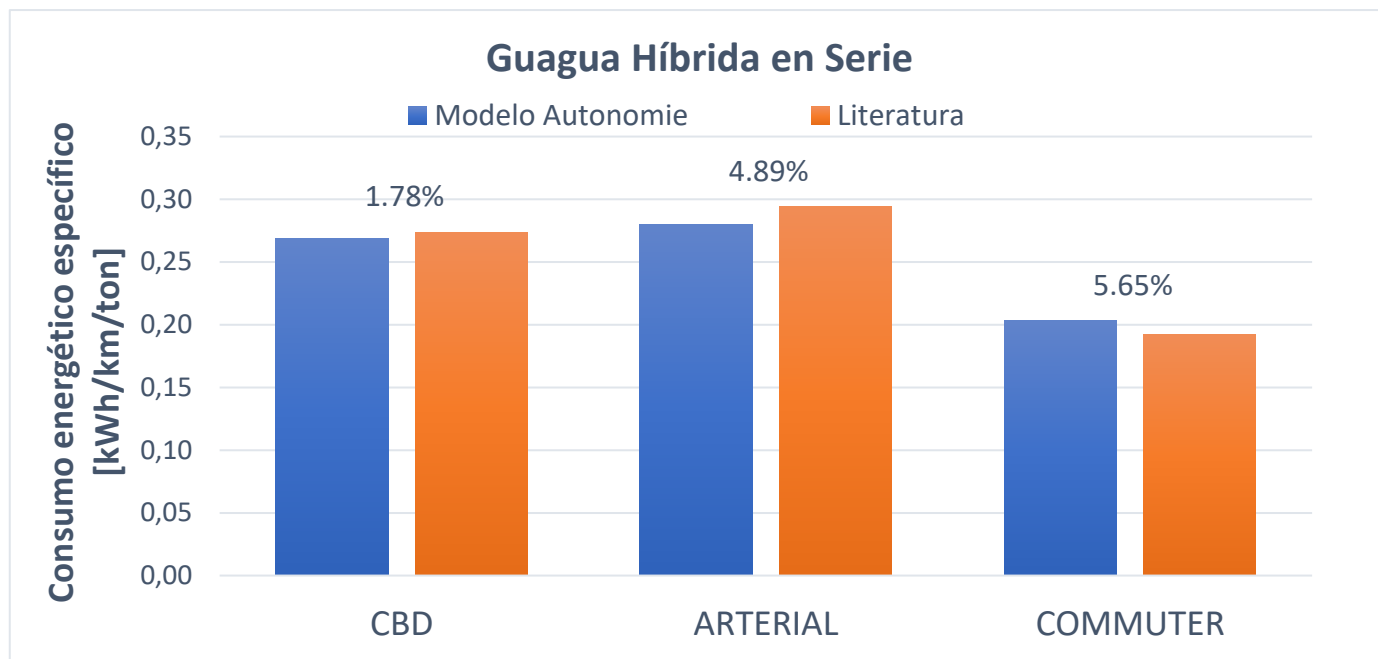


Figura 3.16 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua híbrida en serie de Autonomie y la literatura. Fuente Propia

Como se puede comprobar en la Figura 3.16, las diferencias obtenidas en consumo específico son pequeñas para los tres ciclos, por lo que el modelo construido es aceptable para el análisis energético de guaguas híbridas en serie sobre rutas de baja, media y alta velocidad. No obstante, cabe destacar que a medida que aumenta la velocidad media del ciclo, la capacidad de predicción del modelo cae ligeramente; aun así, sigue dentro de un rango aceptable.

Por otro lado, a pesar de que el modelo es capaz de capturar el consumo específico esperado en un ciclo de ciudad, como es el CBD, se podrá comprobar más adelante, que el modelo híbrido en serie no es una buena opción para operación urbana, ya que está configurado para no arrancar su motor de combustión dentro de la misma. Si esto es así, estaría operando de manera análoga a un vehículo eléctrico, el cual resultará más eficiente en este tipo de conducción, por lo que directamente se optaría por el modelo 100% eléctrico en este tipo de rutas.

El vehículo híbrido en serie comenzará a ser competitivo en aquellas rutas de gran demanda energética o larga distancia, que impliquen conducción tanto dentro como fuera de ciudad, lo que resulta muy común en rutas que conectan distintos núcleos urbanos entre sí. En estas condiciones, el modelo supone una solución idónea a medio plazo para cumplir con las limitaciones en emisiones que se pudieran imponer dentro de ciudad, ya que el vehículo podría ser configurado para trabajar en modo 100% eléctrico dentro de la misma y arrancar el motor de combustión solo cuando

sale de esta para recargar la batería. Así, solo se estaría emitiendo CO₂ fuera de los núcleos urbanos y al mismo tiempo se estaría aprovechando para recargar baterías. Gracias a estas ventanas de recarga durante la ruta, el vehículo podría operar durante todo el día sin necesidad de detenerse en una estación de recarga a mitad del servicio como podría suceder con el vehículo eléctrico. Por tanto, el híbrido en serie supondría una solución adecuada para ciclos como el Arterial o el Commuter, donde se cuenta con conducción extraurbana. En ellos, no existe una conducción en ciudad como tal, pero dado que el modelo reconoce los momentos en los que la velocidad se encuentra por debajo de 50km/h (límite de velocidad máxima en ciudad), apaga igualmente el motor cuando la velocidad cae por debajo de dicho valor. Esto también es beneficioso, dado que es posible que el vehículo entre y salga siempre de las paradas en modo 100% eléctrico, lo que supone un confort adicional para los pasajeros.

En la siguiente figura se muestra el perfil de velocidad del híbrido en serie junto con la señal de encendido del motor de combustión y la curva de descarga de la batería para los tres ciclos analizados si se empleara un tamaño de batería de 30kWh (más representativo de un tamaño pequeño común de batería). De este modo, se muestra cuando se arranca y apaga el motor de combustión para dicho caso:

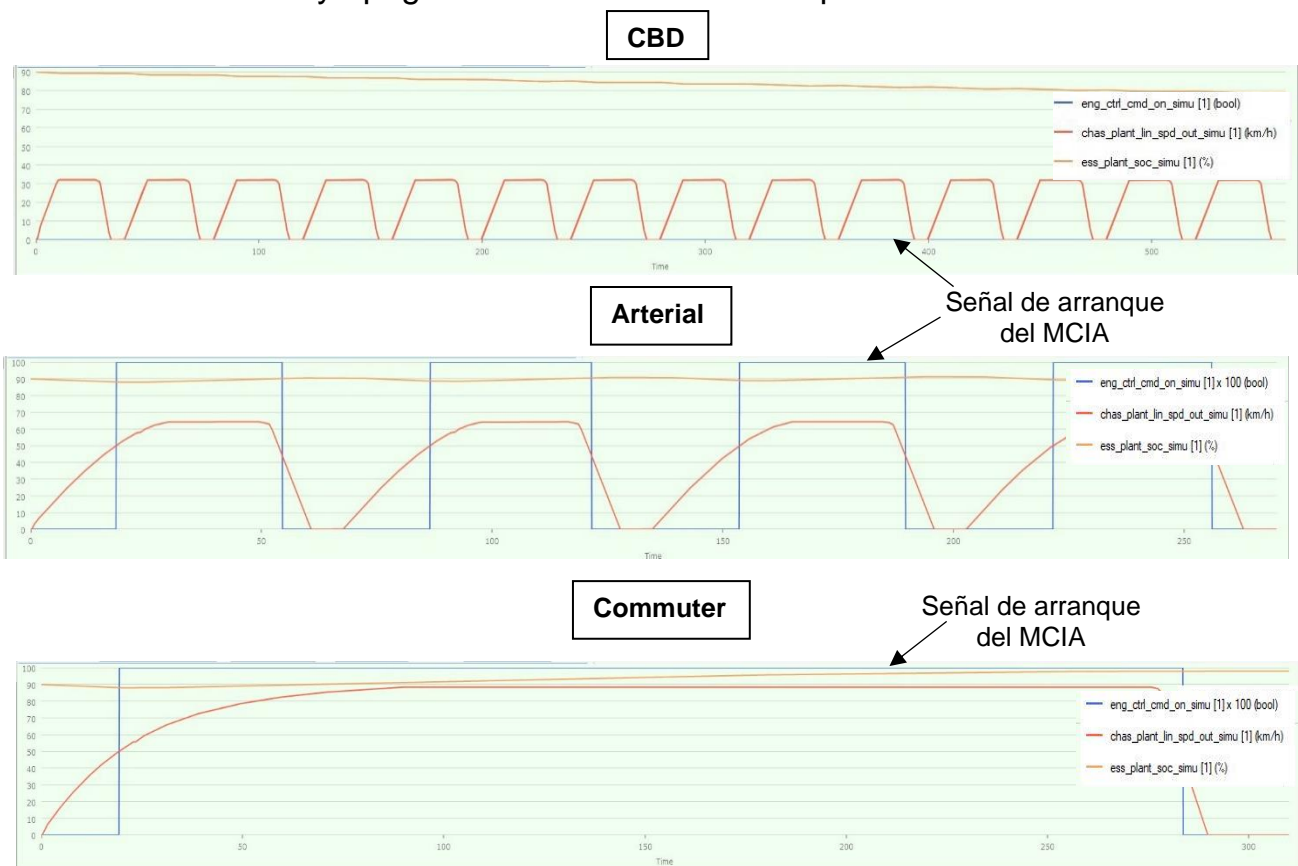


Figura 3.17 Estrategia de encendido y apagado del motor de combustión del híbrido en serie enchufable simulado bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter para una batería de 30kWh. Se muestra el perfil de velocidad (línea roja), señal de arranque del MCIA (línea azul) y nivel de carga de la batería (línea amarilla). Fuente Propia

Se observa claramente que al superar una velocidad de 50km/h, el motor de combustión interna se arranca para alimentar la batería del vehículo. En el ciclo CBD esto no sucede, por lo que el nivel de carga de la batería caerá a lo largo del día de forma progresiva. Si no se produce la recarga de la batería antes y se alcanza un valor del 10%, automáticamente el modelo envía una señal al MCIA para que se arranque y evite que el nivel de carga siga disminuyendo, lo que no evitaría en este caso que se arrancara dentro de ciudad, por ello, no resulta un vehículo competitivo si no puede operar fuera de ella.

La ventaja de esta operación se aprecia en el ciclo Arterial. Según la figura mostrada, en las aceleraciones posteriores a las paradas que realiza el vehículo, se produce una descarga de la batería, pero como consecuencia de que se presentan tramos a más de 50km/h, se arranca el motor de combustión y se recupera el nivel de carga perdido. La energía obtenida vuelve a ser aprovechada en la siguiente aceleración y así sucesivamente. De acuerdo con ello, resulta interesante que, si se adquiriera una guagua híbrida en serie para realizar esta ruta, con cargarla una sola vez en su vida útil podría realizar el ciclo Arterial de forma indefinida hasta que se agote el tanque de combustible que alimenta al motor de combustión, que como se encontrará operando en un punto de buena eficiencia y solo en determinados momentos del ciclo, dará lugar a una autonomía muy amplia.

En cuanto al ciclo Commuter, debido a que se desarrolla únicamente en autopista, el motor de combustión permanece arrancado prácticamente todo el tiempo recargando la batería. Como se muestra en la figura anterior, la curva de descarga de su batería asciende una vez finaliza la primera aceleración. Esto significa que la batería está ganando energía con este ciclo y ello implicaría que el motor de combustión está entregando más energía de la que es necesaria, por lo que no sería necesario que estuviera arrancado tanto tiempo. Si el vehículo se diseñara expresamente para realizar esta ruta, se debería de optimizar mejor la estrategia de arranque y parada del MCIA, para que en el caso límite, el ciclo empiece y acabe con el mismo nivel de carga.

A la hora de comparar los consumos obtenidos con los mostrados en la literatura, debe tenerse en cuenta que el vehículo analizado en la literatura es “no enchufable”. Esto implica que toda la energía que consume de su batería ha sido generada por un motor de combustión interna. En cambio, el vehículo modelado es “enchufable”, lo que supone que una parte de la energía que consume ha sido obtenida directamente de la red (durante las recargas), y otra parte ha sido obtenida del motor de combustión interna, aparte de la energía que pudieran recuperar los modelos en frenada.

Como consecuencia, para poder realizar una comparación equilibrada entre ambos, es necesario considerar la energía que consume el híbrido enchufable de la red como si hubiera sido producida por el motor de combustión. Para ello, al valor de consumo eléctrico obtenido se le aplica los valores de eficiencia media del MCIA y del generador eléctrico. De este modo, se considera que toda la energía procede de

un motor de combustión en ambos modelos (como si ambos fueran no enchufables) y entonces se pueden comparar entre sí.

No obstante, se distinguen distintas situaciones a la hora de realizar el cálculo del consumo y que se exponen a continuación.

En primer lugar, en el caso en que no se arrancara el motor de combustión en ningún momento del ciclo, toda la energía consumida sería eléctrica. Si la guagua hubiera sido no enchufable, la energía que hubiera tenido que consumir el motor de combustión se podría estimar como:

$$Total\ consumption = \frac{Forward\ input - Reverse\ input}{\eta_{gen} \cdot \eta_{eng}} \quad (3.11)$$

Donde “*Forward input*” hace referencia en el programa al flujo energético procedente de la red eléctrica que es enviado a la batería, y “*Reverse input*” se refiere a la energía obtenida de la regeneración y del motor de combustión. En este caso, la única contribución al “*reverse input*” sería la regeneración en frenada pues el motor de combustión permanecería apagado.

Los flujos energéticos en la batería se definen en el programa según el siguiente esquema:

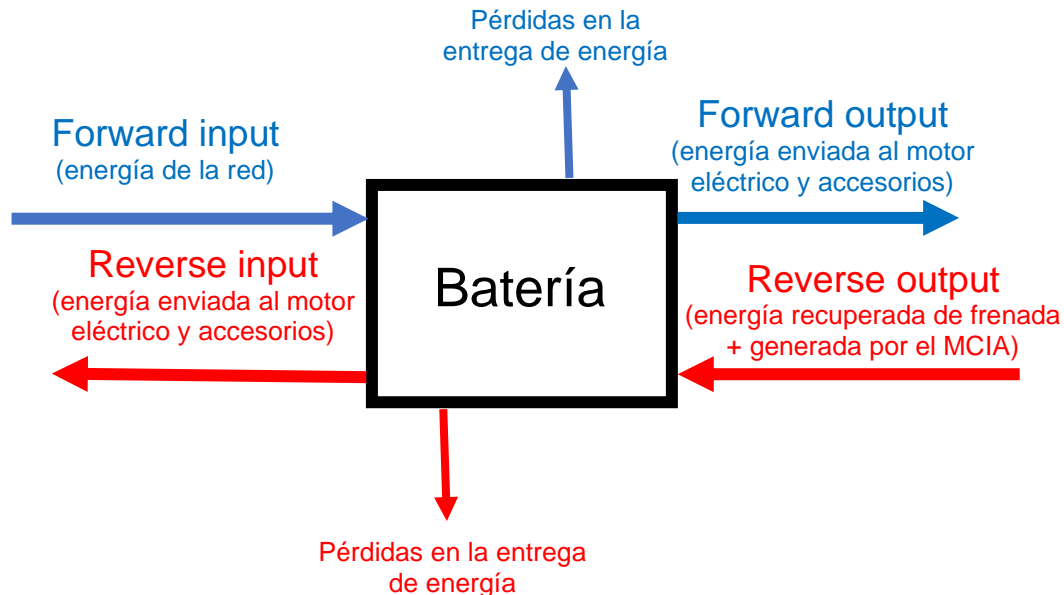


Figura 3.18 Balance energético en la batería del vehículo empleando la nomenclatura del programa. Fuente propia.

De acuerdo con el balance, el consumo eléctrico del vehículo sería:

$$Electrical\ consumption = Forward\ input - Reverse\ output \quad (3.12)$$

Esta variable es directamente ofrecida por el programa en los resultados generales. Por tanto, el consumo total del vehículo para este caso se computaría como:

$$Total\ consumption = \frac{Electrical\ Consumption}{\eta_{gen} \cdot \eta_{eng}} \quad (3.13)$$

Por otro lado, existe el caso en que sí se produjera el arranque del motor de combustión para cargar la batería en algún momento del ciclo. Se debería de computar la energía que produce. Para ello, se cuenta con el parámetro del consumo de combustible equivalente (*Fuel Economy Diesel Equivalent*) que considera tanto la energía consumida por el motor de combustión como la consumida a partir de la red eléctrica contabilizándola como si esta hubiera sido producida por el MCI. De acuerdo con ello, el consumo total del vehículo considerando que el vehículo fuera híbrido no enchufable, sería simplemente el valor del consumo de combustible equivalente.

$$Total\ consumption = Fuel\ Economy\ Diesel\ Equivalent \quad (3.14)$$

El programa proporciona el resultado de “*fuel economy*” como consumo de combustible de gasolina equivalente, por lo que será necesario aplicar el coeficiente de 1.126 anteriormente visto para expresarlo como consumo de Diesel equivalente.

Por otro lado, puede suceder que por la estrategia de arranque del motor de combustión y las características de la ruta, el nivel de SOC final del ciclo fuera superior al inicial, lo que significaría que el motor de combustión ha pasado más tiempo del necesario arrancado. En la literatura, se hace el cálculo de consumo para que el nivel de SOC inicial y final sea aproximadamente el mismo, por ello, se deberá de eliminar el excedente de energía que se ha consumido en las simulaciones.

Para eliminar el excedente de energía, se tomará el consumo energético total, obtenido a partir del dato de consumo de combustible del programa expresado en mpdgc, y se le restará el consumo eléctrico aplicando los valores de eficiencia del motor de combustión y el generador para computarlo como si hubiera sido producido por el motor de combustión. La expresión que se emplearía es la siguiente:

$$Total\ consumption = Fuel\ Economy\ Diesel\ Equivalent - \left| \frac{Electrical\ consumption}{\eta_{gen} \cdot \eta_{MCI}} \right| \quad (3.15)$$

El valor de “*Fuel Economy Diesel Equivalent*” representa tanto el consumo de combustible del motor de combustión como el consumo eléctrico si este hubiera sido producido por dicho motor de combustión. Su valor debería de ser equivalente al de un híbrido no enchufable, pero debido al excedente de energía consumida, es más elevado de lo esperado, por ello, se resta. El segundo término realmente es negativo, dado que, en el balance de la batería del modelo, se gana más energía eléctrica de

la que se pierde. Se introducirá en la ecuación en valor absoluto. Cabe nombrar que ambos términos deben ser expresados en kWh/km.

En la siguiente tabla se muestran la comparación de consumos entre el modelo híbrido en serie modelado con su batería de 1kWh y el modelo New Flyer XDE40 de la literatura. Para los resultados del modelo en el ciclo CBD, se empleará la ecuación 3.14, mientras que para los ciclos Arterial y Commuter, se empleará la ecuación 3.15. En esta verificación, la ecuación 3.13 no es de aplicación, ya que no se da el caso.

Tabla 3.11 Resultados de consumo para la guagua híbrida en serie bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura.

CICLO CBD			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	6.51	3.62	0.27
Literatura	5.47	4.31	0.27
CICLO ARTERIAL			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	6.26	3.77	0.28
Literatura	5.09	4.63	0.29
CICLO COMMUTER			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	8.60	2.74	0.20
Literatura	7.77	3.03	0.19

Fuente Propia

Se vuelve a verificar que el consumo específico entre ambos modelos es similar, lo que da lugar a la verificación del modelo. Además, se observa cómo el modelo simulado sigue la tendencia en cuanto a consumos del modelo de la literatura, es decir, se puede comprobar que ambos casos el ciclo de mayor consumo es el Arterial, seguido del CBD y por último el Commuter. El motivo se encuentra en que el ciclo CBD cuenta con frenadas más fuertes y frecuentes que en el ciclo Arterial, por lo que se recupera más energía que en este último y, por tanto, su consumo energético total es menor.

Tabla 3.12 Energía recuperada en frenada por el híbrido en serie simulado en los tres ciclos.

Ciclo	Energía recuperada en frenada [kWh]
CBD	1.25
Arterial	0.70

Fuente Propia

Se recuerda que en el caso del vehículo híbrido en paralelo se tenía un mayor consumo en el ciclo CBD que en el Arterial, es decir, justo al contrario. La razón estaba en que allí el motor eléctrico solo era una asistencia a la operación del motor de combustión, el cual operaba con mala eficiencia por tratarse de un ciclo de ciudad y, por tanto, hacía aumentar el consumo energético total. Ahora en el híbrido en serie, la tracción solo procede del motor eléctrico que opera con buena eficiencia reduciendo el consumo.

En cuanto al ciclo Commuter, sigue siendo el que menor consumo proporciona a pesar de no contar con tantas oportunidades de regeneración. El motivo se encuentra en que es un ciclo bastante estacionario donde los motores operan con buena eficiencia.

A continuación, se verifica la reducción en consumo que se suele conseguir empleando un vehículo híbrido en serie respecto a uno convencional al igual que se hizo con el híbrido en paralelo:

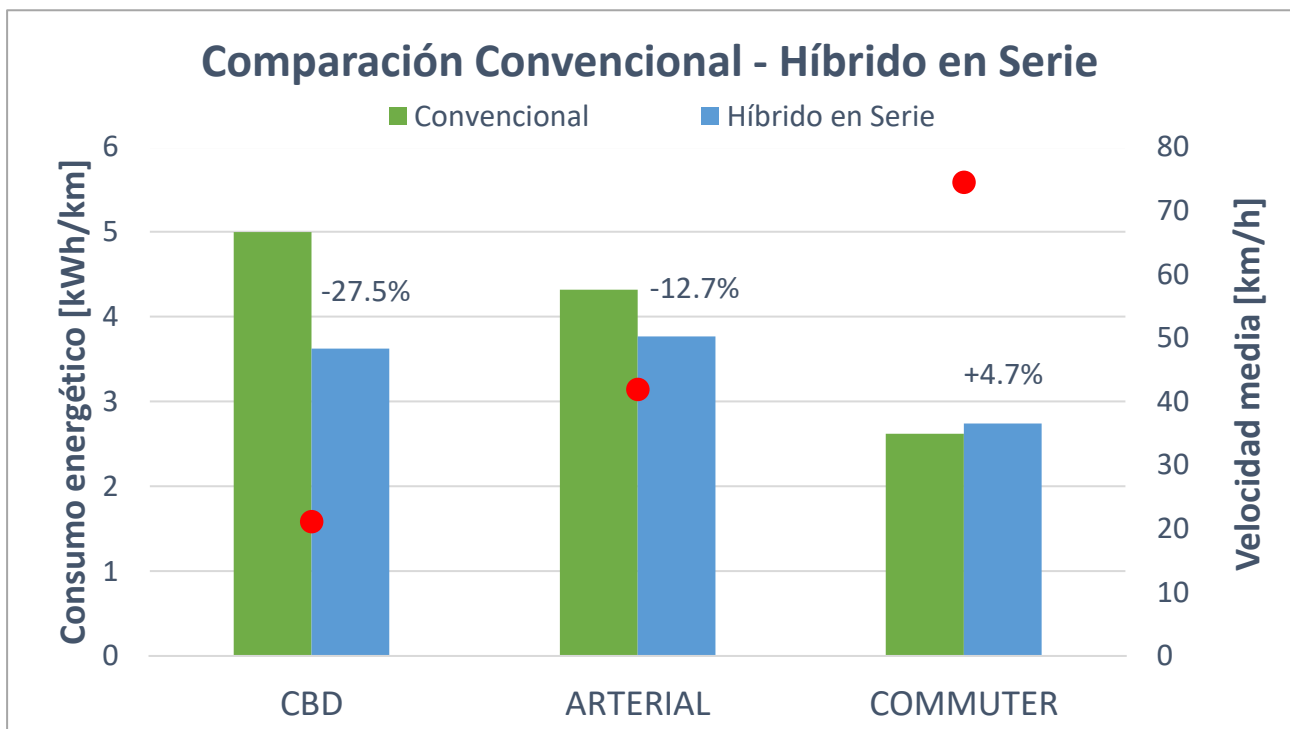


Figura 3.19 Comparación de consumos entre el modelo híbrido en serie y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.

De acuerdo con el programa, el híbrido en serie supondría una reducción del 27.5% en el consumo respecto al modelo convencional en el ciclo CBD; un 12.7% en el ciclo Arterial; y un 4.7% en el ciclo Commuter. Los datos obtenidos de la literatura empleada en cuanto a reducción de consumo por ciclo se recogen en la siguiente tabla:

Tabla 3.13 Reducción de consumo que representa el híbrido en serie respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter

CICLO	Porcentaje de reducción en consumo según la literatura
CBD	-27.5%
Arterial	-12.0%
Commuter	+5.4%

Fuente Propia

Si se comparan los datos de la tabla con los obtenidos en la figura, se puede confirmar que la reducción en consumo obtenida es muy similar a la obtenida en la literatura, por lo que el modelo es capaz de capturar con precisión la reducción en consumo conseguida con respecto al vehículo convencional. En el caso del ciclo CBD, los valores coinciden (-22.5%), mientras que en el caso del ciclo Arterial y el Commuter, los valores son muy parecidos (-12.7% y +4.7% frente a los valores de -12.0% y +5.4% conseguidos en la literatura respectivamente).

Destaca el hecho de que en el ciclo Commuter, se obtiene un aumento de consumo respecto al convencional; el motivo se encuentra asociado a la penalización que supone el peso adicional del vehículo híbrido (336kg adicionales), además de la pérdida energética que introduce el generador, la elevada carga del motor y las pocas oportunidades de regeneración en frenada.

Verificación de la guagua 100% eléctrica

Para la verificación del modelo de guagua eléctrica se ha tomado como referencia los resultados obtenidos del informe publicado por la organización americana de protección contra el cambio climático “*California Air Resources Board (CARB)*” bajo el título “*Battery Electric Truck and Bus Energy Efficiency Compared To Conventional Diesel Vehicles*” [24] en el que se compara el uso de energía de guaguas y camiones 100% eléctricos con el correspondiente a guaguas convencionales en los mismos ciclos de conducción. De entre los modelos convencionales y eléctricos estudiados, se encuentra el modelo “Proterra Catalyst BE40” que ha sido tomado como referencia y del que se disponen datos de consumo para los ciclos CBD, Arterial y Commuter. En la siguiente tabla se presentan una comparativa de características entre el modelo simulado y el de referencia:

Tabla 3.14 Comparación de características: Guagua eléctrica Autonomie y Proterra Catalyst BE40

Parámetro	Modelo de guagua eléctrica	
	Modelo Autonomie	Proterra Catalyst BE40 ⁽¹⁾
Año del modelo	-	2014
Longitud total [m]	10.6	12.8
Capacidad de pasajeros	37 sentados +30 de pie (67 pasajeros)	41 sentados + 38 de pie (79 pasajeros)
Distancia entre ejes [m]	4.45	7.53
Radio de las ruedas [m]	0.49	0.51
Peso en vacío [kg]	10298.4	12414.8
Motor eléctrico (E-motor)		
Potencia Máxima [kW]	220	220 ⁽²⁾
Potencia Continua [kW]	128.1	120 ⁽²⁾
Par Máximo [Nm]	597.7	700 ⁽²⁾
Tiempo para el cual se obtiene Par Máximo [s]	60	-
Eficiencia [%]	94	94
Relación de engranajes de la transmisión	Automática Trans. Única: 2.5	Manual 2 velocidades ⁽³⁾ : 3.529/1
Batería de Tracción		
Tipo	Ion-litio	Titanato de litio (LTO)
Capacidad total [kWh]	30	94 ⁽⁴⁾

Fuente Propia

- (1) Datos del modelo Proterra Catalyst BE40 obtenidos de [25]
- (2) Datos del motor eléctrico UQM PowerPhase HD 220 con el que cuenta el vehículo cuyas especificaciones técnicas se encuentran disponibles en [26]
- (3) Datos de la caja de cambios Eaton EEV-7202 del modelo de referencia obtenidos de [27]
- (4) Datos de la batería TerraVolt100a del modelo de referencia obtenidos de [28]

En la siguiente figura se muestra de manera adicional la apariencia del motor eléctrico y su controlador para la guagua tomada como referencia en la verificación del modelo eléctrico. Se aprecia cómo su construcción es totalmente distinta a la que el usuario suele estar más habituado a encontrarse en un vehículo convencional.



Figura 3.20 Motor eléctrico y controlador modelo UQM PowerPhase HD 220 de la guagua Proterra Catalyst BE40 tomada como referencia [26].

Al igual que sucede con los modelos anteriores, la referencia emplea una guagua de mayores dimensiones y peso, mientras que las prestaciones del motor son muy parecidas. En cuanto a la batería, tanto en el modelo simulado como en la referencia, se opta por una estrategia de carga de oportunidad aprovechando un menor tamaño de batería para reducir el peso y el coste del vehículo al mismo tiempo que se reduce el consumo.

Cabe destacar que la guagua Proterra Catalyst BE40 está destinada a su uso dentro de ciudad. Se alimenta a partir de una batería de titanato de litio, en lugar de emplear una batería de ion-litio más habitual. El motivo se encuentra en que el titanato de litio permite realizar cargas muy rápidas, con la desventaja de que cuenta con una densidad energética (Wh/kg) menor que el ion-litio, resultando idóneo para una estrategia de recarga de oportunidad.

A continuación, se presentan las masas consideradas para la obtención y comparación de consumos energéticos específicos entre modelos:

Tabla 3.15 Masa considerada para el cálculo de consumos específicos: Guagua 100% eléctrica Autonomie y New Flyer XE40

Parámetro	Modelo de guagua eléctrica	
	Modelo Autonomie	Proterra Catalyst BE40
Peso en vacío [kg]	10373.4	12414.8
Carga de pasajeros [kg]	2312 (34 asientos)	2788 (41 asientos)
Carga total considerada [kg]	12685.4	15202.8

Fuente Propia

La diferencia en masa entre modelos es de aproximadamente 2.5 toneladas. Igualmente, sus consumos específicos deberían ser aproximadamente iguales. En la siguiente figura se comparan sus valores:

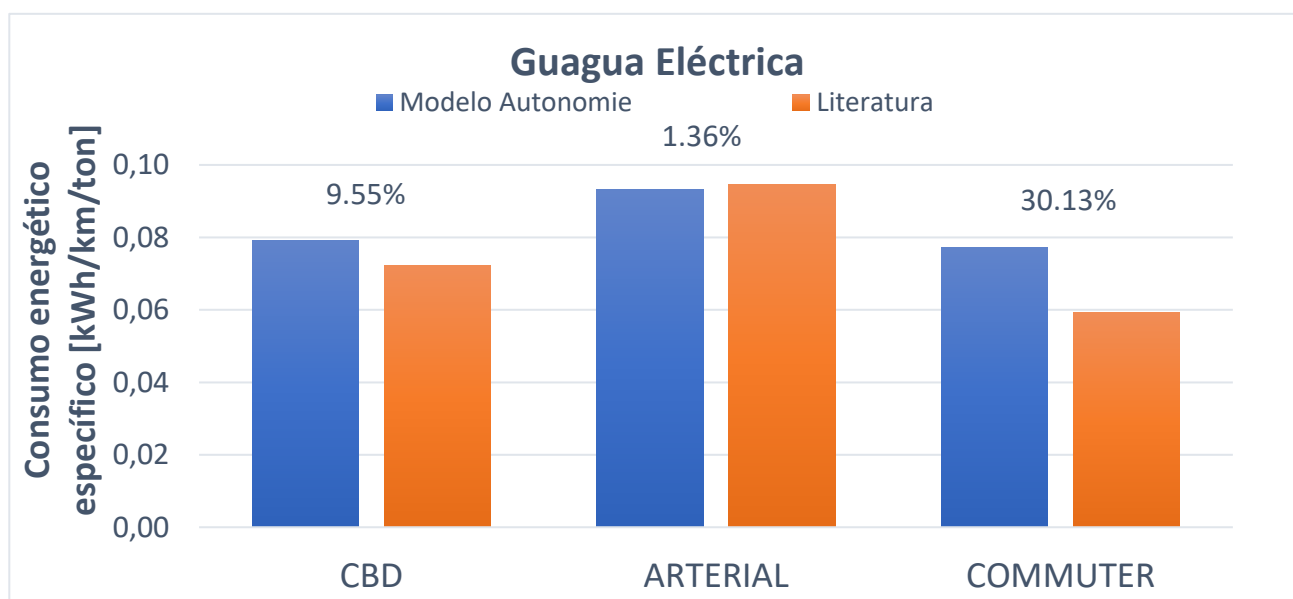


Figura 3.21 Comparación de consumo energético específico entre el modelo de guagua 100% eléctrica de Autonomie y la literatura. Fuente Propia

Se observa que el modelo es capaz de capturar con cierta precisión los consumos de la arquitectura eléctrica tomada como referencia, con un mayor grado de aproximación en ciclos de media velocidad como es el Arterial, donde la diferencia entre consumos del modelo de Autonomie y de la literatura es del 1.36%. A continuación, le sigue el ciclo CBD (baja velocidad), donde la diferencia es algo mayor, pero con un valor aceptable del 9.55%, y finalmente, el ciclo Commuter (alta velocidad) donde la diferencia es del 30.13%. De acuerdo con ello, el modelo tendrá una mejor capacidad de predicción en consumo en ciclos de baja-media velocidad, siendo mejorable para ciclos de alta velocidad. No obstante, como se expone en el capítulo 4, el vehículo eléctrico no representa una opción idónea para ciclos de alta velocidad, donde hay pocas oportunidades de regeneración en frenada, ya que su autonomía se ve considerablemente reducida y ello obliga a aumentar el tamaño de la batería, incrementando su coste, peso y emisiones del pozo a las ruedas para tratar de aumentar su autonomía a valores más aceptables. Así pues, no preocupa en gran medida que el modelo no sea capaz de seguir con mayor grado de aproximación el ciclo Commuter actualmente.

La principal ventaja del vehículo 100% eléctrico se encuentra en la operación dentro de ciudad, ya que las rutas urbanas maximizan los beneficios de esta arquitectura. En primer lugar, dado que se trata de rutas relativamente cortas, con muchos períodos en los que el vehículo se detiene a causa del tráfico, peatones, semáforos, etc., y existen múltiples frenadas, el vehículo puede llegar a tener un consumo bajo de su batería, lo que le da una mejor autonomía si se compara con ciclos de mayor velocidad y menor frecuencia de paradas como el Arterial o el Commuter. Por ello, es un tipo de ruta donde una estrategia de carga de oportunidad tiene cierto potencial, pues un tiempo de recarga de apenas unos minutos antes de comenzar, o al detenerse en las paradas de pasajeros, podría ser suficiente para cargar la batería lo suficiente como para completar al menos un nuevo viaje de ida y vuelta.

Para determinar el consumo en este tipo de arquitectura, puede tomarse directamente el valor del consumo eléctrico (*Electrical Consumption*) que ofrece el programa, pues en este caso, la energía únicamente puede proceder de la energía de la red que ha sido almacenada en la batería.

$$Total\ consumption = Electrical\ Consumption \quad (3.16)$$

Si se deseara obtener el valor del consumo de combustible equivalente en mpg, se sabe que 1 galón de Diesel representa 37.95kWh de energía, por lo que el cálculo sería:

$$Fuel\ economy\ Diesel\ Equivalent\ (mpg) = \frac{37.95kWh}{Electrical\ consumption\ (kWh/mile)} \quad (3.17)$$

En la siguiente tabla se muestran los consumos obtenidos para los ciclos CBD, Arterial y Commuter tanto en valor absoluto como específicos:

Tabla 3.16 Resultados de consumo para la guagua 100% eléctrica bajo los ciclos CBD, Arterial y Commuter. Comparación con la literatura.

CICLO CBD			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	23.46	1.00	0.08
Literatura	21.30	1.11	0.07
CICLO ARTERIAL			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	19.94	1.18	0.09
Literatura	16.30	1.45	0.10
CICLO COMMUTER			
Fuente	Consumo [mpdge]	Consumo energético [kWh/km]	Consumo energético específico [kWh/km/ton]
Simulación Autonomie	24.02	0.98	0.08
Literatura	26.00	0.91	0.06

Fuente Propia

Se aprecia que, debido al menor peso del modelo construido, los consumos energéticos resultan menores si se comparan con los de la literatura, por lo que el número de millas que es capaz de recorrer el vehículo por galón de Diesel equivalente (mpdge) es mayor. No obstante, en el ciclo Commuter, sucede lo contrario, lo que indica que la capacidad predictiva del modelo en ciclos de alta velocidad se reduce.

Las características técnicas y de operación de la arquitectura 100% eléctrica representan una mejora en el consumo si se compara con la tecnología convencional. A continuación, se muestra la comparación de los valores de consumo obtenidos en el programa para ambas arquitecturas.

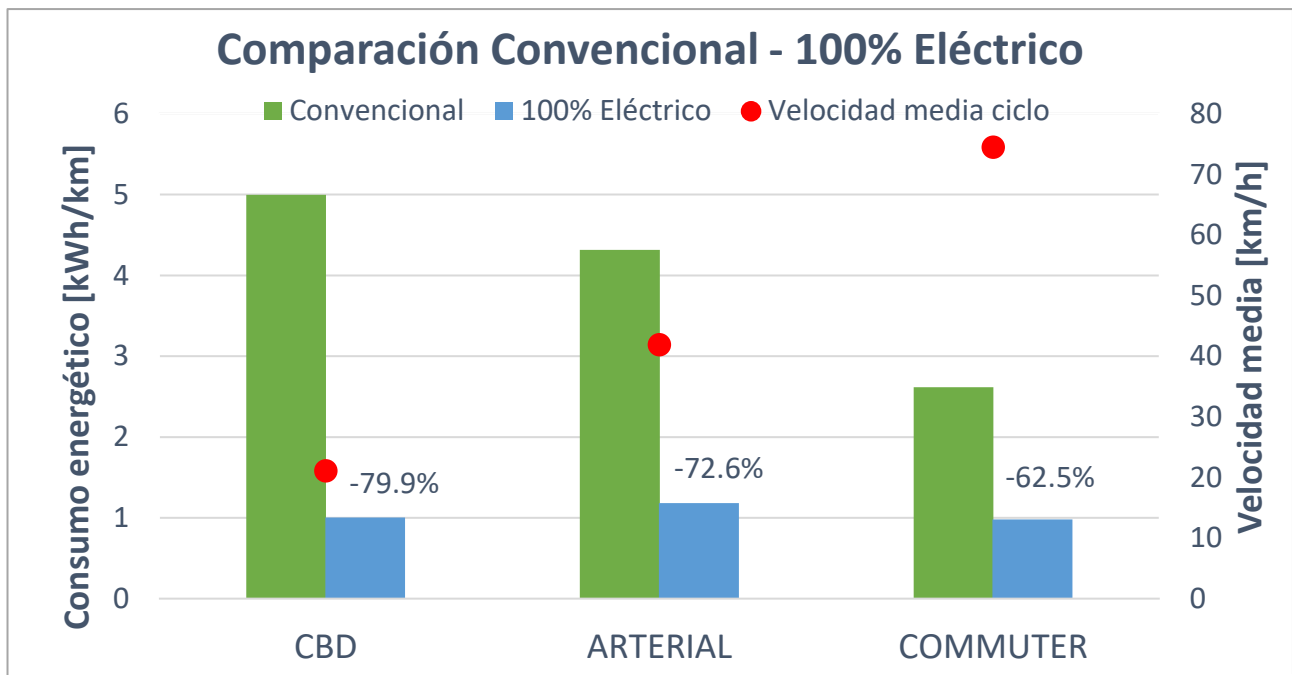


Figura 3.22 Comparación de consumos entre el modelo 100% eléctrico y el convencional simulados en Autonomie. Fuente Propia.

Como se muestra en la Figura 3.22, la guagua 100% eléctrica ofrece un beneficio notable en cuanto a eficiencia si se compara con la arquitectura convencional Diesel. De acuerdo con los resultados, la mayor reducción en consumo se consigue en el ciclo CBD, pues se presentan mayores oportunidades de regeneración en frenada, la velocidad media del ciclo es baja, se obtienen menores pérdidas, y cuenta con un motor y transmisión de mayor eficiencia. Ello permite lograr una reducción en consumo de aproximadamente el 80%. Le sigue el ciclo Arterial con una reducción de aproximadamente el 73%; algo menor debido a la menor presencia de frenadas, número de paradas y las mayores velocidades medias, al mismo tiempo que el vehículo convencional empieza a operar con mejores eficiencias. El mismo motivo, hace que en el ciclo Commuter (de autopista) la reducción sea incluso inferior; un 63%. No obstante, debido al mayor consumo predicho por el modelo respecto a la literatura en este último ciclo, debe esperarse que la reducción real sea algo mayor.

En la siguiente tabla se muestran los datos de mejora en consumo ofrecidos por la literatura:

Tabla 3.17 Reducción de consumo que representa el vehículo 100% eléctrico respecto al modelo convencional para los ciclos CBD, Arterial y Commuter

CICLO	Porcentaje de reducción en consumo según la literatura
CBD	-81.7%
Arterial	-74.2%
Commuter	-71.2%

Fuente Propia

Se comprueba que los valores obtenidos son muy parecidos a los obtenidos para los ciclos CBD y Arterial, por lo que el modelo es capaz de predecir la mejora en consumo respecto a la arquitectura convencional en ciclos de baja-media velocidad. En cuanto al ciclo Commuter, se esperaba una reducción de aproximadamente el 70% de acuerdo con la literatura; en su lugar, se ha obtenido un 63%, por lo que se confirma que el modelo reduce ligeramente su capacidad predictiva con ciclos de alta velocidad media. Aun así, es capaz de seguir la tendencia en cuanto a reducción de consumo de forma adecuada.

Por otro lado, se verifica que el modelo es capaz de capturar las pérdidas energéticas asociadas al vehículo. Dichas pérdidas tienen un impacto notable sobre el consumo del vehículo pudiendo ser fácilmente reducidas aplicando técnicas de conducción eficientes como puede ser realizar aceleraciones más suaves, frenar en una mayor distancia o aumentar el tiempo sin pedales aprovechando la inercia del vehículo, lo que en inglés se conoce como “*coasting*”.

En la Figura 3.23 se muestra la comparación en pérdidas energéticas por componente entre el modelo convencional y el eléctrico, comparando a su vez con los valores suministrados por la literatura. En este caso, la literatura empleada es un documento del Consejo Internacional de Transporte Limpio (“*International Council on Clean Transportation*”) bajo el título “*Strategies for deploying zero-emission bus fleets: Route-level energy consumption and driving range analysis*” en el que se evalúa el rendimiento de guaguas 100% eléctricas respecto a las convencionales mediante la comparación de simulaciones con datos reales de la flota de guaguas de la ciudad de Bengaluru (India) [29].

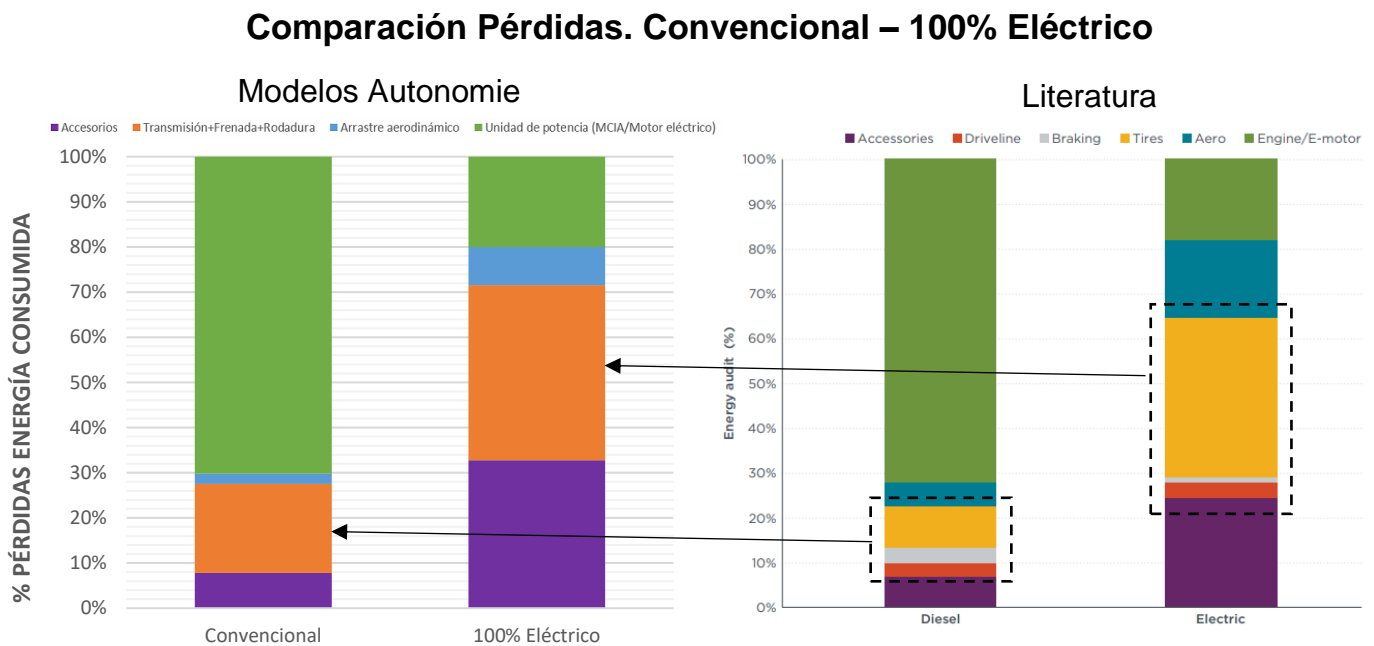


Figura 3.23 Comparación de pérdidas energéticas entre el vehículo convencional y el 100% eléctrico. Comparación con la literatura [29]. Fuente Propia.

Como se puede comprobar en la Figura 3.23, el modelo es capaz de predecir con relativa precisión las pérdidas energéticas del vehículo. En el modelo de Autonomie, se consideran las pérdidas asociadas a la transmisión, los frenos y la rodadura de forma conjunta, mientras que la literatura las separa. No obstante, se observa que su contribución a las pérdidas totales es prácticamente la misma.

En cuanto al vehículo convencional, las mayores pérdidas se encuentran asociadas al motor de combustión y a la rodadura. En ese caso, emplear motores más eficientes y neumáticos de baja resistencia a la rodadura ayudaría a reducir el consumo del vehículo notablemente. En cuanto al vehículo eléctrico, las mayores pérdidas se encuentran asociadas a los accesorios y la rodadura, por lo que igualmente, emplear neumáticos de baja resistencia a la rodadura sería muy útil, del mismo modo que emplear accesorios de mayor eficiencia, lo que incluye la unidad de aire acondicionado. En general, reducir el peso del vehículo reduciría el consumo energético de ambas tecnologías.

De este modo, se concluye la verificación de los modelos para todas las arquitecturas consideradas en este TFG ante distintos modos de operación. Así, se dispone de una herramienta fiable para el estudio de consumos en los casos particulares de la isla que se proceden a exponer en el siguiente apartado.

3.6 Líneas de transporte público analizadas en la isla de Tenerife

Concluida la verificación de los modelos, se procede a describir las rutas de transporte público de la isla que han sido seleccionadas como representación de distintos casos de conducción. De este modo, es posible evaluar el desempeño de cada una de las arquitecturas y su idoneidad para cada una de ellas. Para ello, se han tomado líneas reales realizadas por TITSA.

1ª Línea analizada: Línea 253 Intercambiador de La Laguna-Guamasa-Garimba



Figura 3.24 Vista satélite de la Línea 253 Intercambiador de La Laguna - Guamasa – Garimba. Fuente Propia

Esta ruta representa una conducción urbana y extraurbana de corta distancia (unos 8km) y duración (20 minutos). Por otro lado, la ruta se caracteriza por presentar un gradiente de carretera prácticamente nulo, ya que no existen cambios de altitud importantes, y velocidades bajas. Además, cuenta con frecuentes paradas como debe de esperarse de una línea urbana.

Tabla 3.18 Estadísticas de la Línea 253

Zona	Distancia recorrida [km]	Porcentaje de la Distancia Total [%]
Urbana (La Laguna)	2.1	25.9
Extraurbano (TF-152)	3.2	39.5
Urbana (Guamasa-Garimba)	2.8	34.5
Distancia Total [km]	8.1	100%
Duración Total [min]	21.4	

Fuente Propia

Tabla 3.19 Paradas realizadas en la Línea 253

Zona	Nº Parada	Identificación de la parada	km	Distancia a la parada anterior [km]
Urbana	1	Intercambiador Laguna (T) (2625)	0.0	0.0
	2	Leocadio Machado (2549)	0.5	0.5
	3	Avenida La Candelaria (1723)	1.3	0.7
	4	Carretera San Lázaro (1183)	1.7	0.4
Extraurbana	5	El Gofio (1184)	2.1	0.4
	6	Eclipse de Sol (1185)	2.8	0.7
	7	El Púlpito (T) (1186)	3.5	0.7
	8	El Portezuelo (T) (1187)	3.8	0.3
	9	Molino Viejo (1188)	4.1	0.3
	10	La Cruz Chica (T) (1189)	4.8	0.7
Urbana	11	Guamasa (1190)	5.3	0.5
	12	El Candil (1191)	5.7	0.4
	13	La Cochera (2793)	6.7	1.0
	14	El Pajar (1681)	7.0	0.3
	15	El Hoyo (1682)	7.3	0.3
	16	Garimba 48 (1683)	7.6	0.3
	17	Cruz Caridad (1684)	7.9	0.3
	18	Garimba (1685)	8.1	0.2

Fuente Propia

En la Tabla 3.18 se observa que el 60% de la ruta se realiza dentro de ciudad, mientras que el resto, un 40% se corresponde con un tramo extraurbano. De acuerdo con la Tabla 3.19 existe una gran cantidad de paradas a pesar de la brevedad de la ruta. De forma global, se cuenta con 12 paradas dentro de ciudad y 6 fuera de ella. Así, la parte urbana recuerda al ciclo CBD, mientras que la parte extraurbana se asemeja al ciclo Arterial, por la cantidad de paradas en cada uno de ellos.

A falta de datos experimentales, el perfil de conducción de la ruta se ha creado de manera artificial intentando lograr el mayor grado de aproximación posible a lo que sería un perfil de conducción real. Por ello, se ha tomado como base el ciclo ETC descrito en el apartado 2.2.5, pues a diferencia de los ciclos CBD, Arterial y Commuter, este se encuentra basado en datos reales de carretera, resultando más próximo a la realidad. En concreto, se han tomado valores de la zona “urbana” y “rural” de dicho ciclo, escalando los valores de velocidad y modificando las distancias, así como la duración total del ciclo para ajustarlo a la línea analizada. Además, se ha tenido en cuenta los puntos del ciclo en los que se encontrarían las paradas de pasajeros reales y como resultado se ha obtenido el perfil mostrado en la Figura 3.25.

Evidentemente, la guagua no se detendrá en todas las paradas durante la ruta, dado que no siempre hay pasajeros que deseen subirse o bajarse en ellas. Por esta razón, se ha considerado que se realizan 14 de las 18 paradas, lo que sigue siendo un número elevado y, por tanto, representativo.

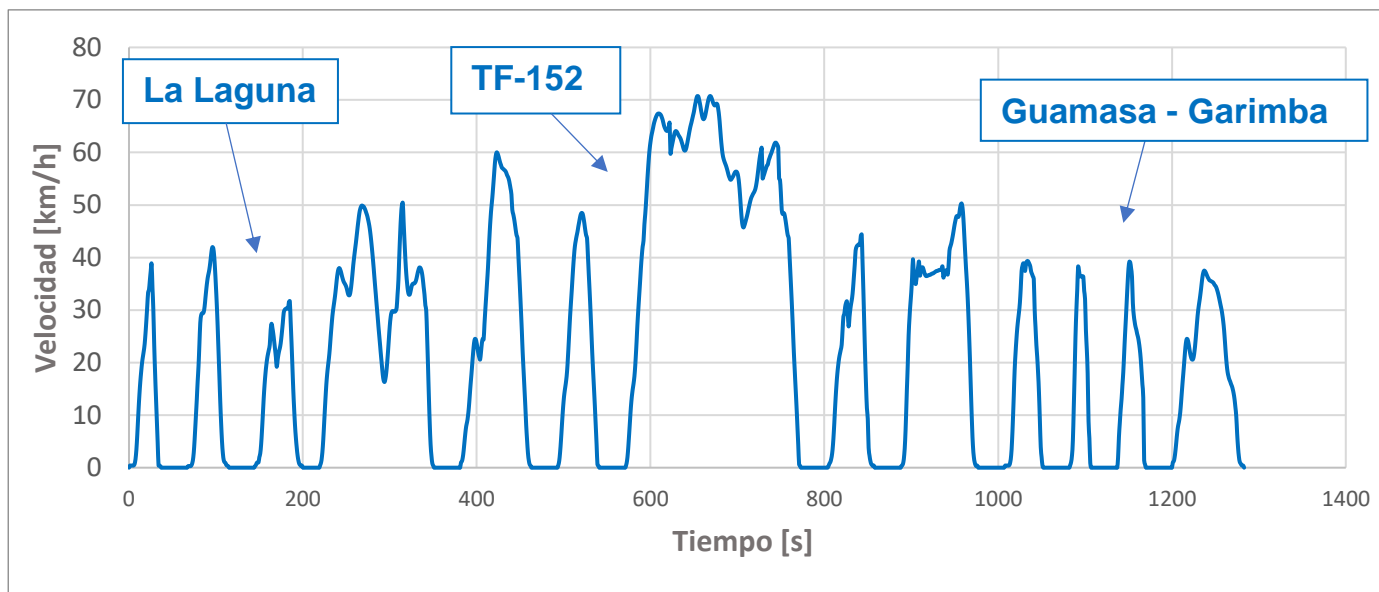


Figura 3.25 Perfil de velocidad de la Línea 253 Intercambiador de La Laguna-Guamasa-Garimba. Fuente Propia

Los parámetros principales del ciclo se recogen en la Tabla 3.20:

Tabla 3.20 Parámetros principales del ciclo de la Línea 253

Distancia [km]	8.09
Duración [s]	1283
Velocidad máxima [km/h]	70.74
Velocidad media con paradas [km/h]	22.69
Aceleración máxima [m/s^2]	1.98
Aceleración media [m/s^2]	0.40
Desaceleración máxima [m/s^2]	-3.30
Frecuencia de paradas [paradas/km]	1.48

Fuente Propia

Analizando las características del ciclo, se observa que tanto la distancia recorrida (8km) como su duración (1283 segundos, equivalente a 21.4 minutos) son prácticamente coincidentes a los tiempos reales de la línea, por lo que el ciclo modelado es fiel a la realidad. En cuanto a su velocidad máxima, es de unos 70km/h, que se correspondería con la velocidad alcanzada en el tramo extraurbano en la TF-152. No obstante, la velocidad media del ciclo se encuentra en unos 23km/h, pues predominan las zonas urbanas con velocidades bajas ocasionadas por el tráfico, los semáforos, los peatones o las paradas realizadas, siendo comparable a la del ciclo CBD, donde la velocidad media era de unos 21km/h. En lo que respecta a las paradas de pasajeros, se ha considerado una detención del vehículo de 30 segundos de duración en cada una de ellas, lo que se ha considerado aceptable.

Por otro lado, los valores de aceleración se asemejan bastante a los obtenidos en el ciclo Manhattan, donde se tenía 2.04m/s^2 de aceleración máxima y 0.54m/s^2 de aceleración media. Se trata entonces de un ciclo de conducción con aceleraciones de moderadas a agresivas, pues se aprecia que la aceleración media sigue siendo inferior a ciclos como el Arterial, que es más suave que el CBD. Por su parte, las desaceleraciones sí resultan más agresivas.

2ª Línea analizada: Línea 110 Intercambiador de Santa Cruz - San Isidro - Los Cristianos- Costa Adeje



Figura 3.26 Vista satélite de la Línea 110 Intercambiador de Santa Cruz – San Isidro – Los Cristianos – Costa Adeje.
Fuente Propia

Esta ruta se caracteriza por una conducción mayoritariamente extraurbana de larga distancia (unos 80km) y duración (aprox. 1h). A diferencia, de la línea anterior, en esta predominan las velocidades medias-altas y las paradas realizadas son reducidas. En cuanto al gradiente de carretera, se considera igualmente nulo a pesar de contar con zonas muy puntuales donde se producen cambios de nivel apreciables. No obstante, representan poco tiempo en comparación con la longitud total del ciclo y no se tendrá en cuenta.

Tabla 3.21 Estadísticas de la Línea 110

Zona	Distancia recorrida [km]	Porcentaje de la Distancia Total [%]
Urbana (Santa Cruz)	2	2.5
Extrurbano (Autovía Sur TF-1)	71.5	89.5
Urbana (Los Cristianos-Costa Adeje)	6.4	8.0
Distancia Total [km]	79.9	100%
Duración Total [h]	1.1	

Fuente Propia

Tabla 3.22 Paradas realizadas en la Línea 110

Zona	Nº Parada	Identificación de la parada	km	Distancia a la parada anterior [km]
Urbana	1	Intercambiador de Sta. Cruz (9181)	0.0	0.0
Extrurbana	2	San Isidro (7134)	57.5	57.5
Urbana	3	Los Cristianos (T) (8184)	75.2	17.7
	4	Magma (7944)	79.5	4.3
	5	Estación Costa Adeje (T) (7142)	79.9	0.4

Fuente Propia

De acuerdo con la Tabla 3.21, se comprueba que, aproximadamente, el 90% de la ruta se realiza en zona extrurbana, concretamente en la Autopista Sur TF-1, que en adelante se nombrará simplemente como “autopista”. El resto del ciclo se reparte en un 2.5% dentro de Santa Cruz, y un 8% en el municipio de Adeje, confirmando así el mayor predominio de conducción extrurbana.

Por otro lado, conforme a la Tabla 3.22, el número de paradas es reducido; tan solo 5 paradas que se concentran prácticamente en los últimos 5 kilómetros de los casi 80 totales sin contar la parada de San Isidro, que será la primera que se realice después de salir del intercambiador de Santa Cruz pasados unos 58km. Es de esperar, entonces, que la velocidad media del ciclo sea elevada.

Al igual que el ciclo de la Línea 253, se ha hecho uso del ciclo ETC como base para construir el perfil de la ruta a falta de datos experimentales. En este caso, se ha hecho uso de los datos correspondientes a las zonas “urbana” y “autopista” de dicho ciclo, adaptándolo igualmente a las velocidades máximas reales esperadas, así como a las distancias totales y puntos de parada de pasajeros. En cuanto a ello, se han considerado que se realizan las 5 paradas, ya que son pocas y suelen ser demandadas por los pasajeros. En la siguiente figura se muestra el perfil del ciclo que ha sido construido:

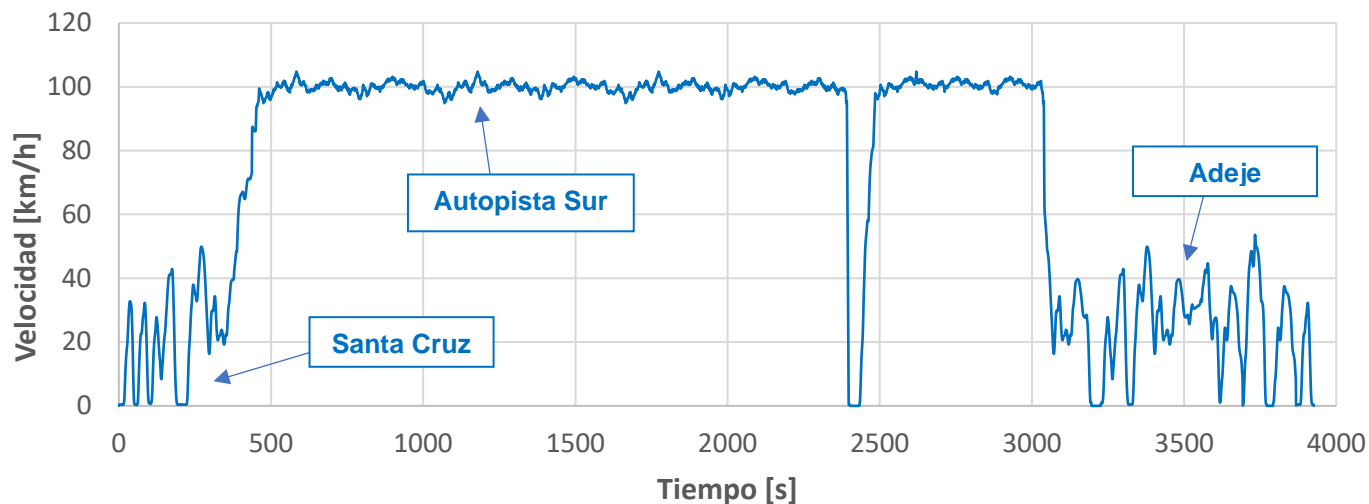


Figura 3.27 Perfil de velocidad de la Línea 110 Intercambiador de Santa Cruz – San Isidro – Los Cristianos-Costa Adeje. Fuente Propia

Los parámetros principales del ciclo se presentan en la Tabla 3.23:

Tabla 3.23 Parámetros principales del ciclo de la Línea 110

Distancia [km]	79.9
Duración [s]	3926
Velocidad máxima [km/h]	104.80
Velocidad media con paradas [km/h]	73.25
Aceleración máxima [m/s^2]	3.83
Aceleración media [m/s^2]	0.19
Desaceleración máxima [m/s^2]	-4.43
Frecuencia de paradas [paradas/km]	0.04

Fuente Propia

Observando las características del ciclo se comprueba que satisface las exigencias de distancia (unos 80km) y duración (3926s, que equivale a 1.1h aproximadamente). Además, se considera una velocidad máxima de unos 105km/h asociado a algún pico de velocidad en el tramo de autopista, ligeramente superior a la velocidad máxima permitida para este tipo de vehículos en autopista de 100km/h pero que podría haberse rebasado puntualmente.

En cuanto a la velocidad media, cae a unos 73km/h como consecuencia de la presencia de los tramos urbanos en Santa Cruz y Adeje. Aun así, sigue representando un ciclo de alta velocidad. Igualmente, se obtiene una aceleración máxima elevada ($3.83m/s^2$), al igual que la desaceleración ($-4.43m/s^2$); ambos valores coinciden con los correspondientes al tramo de autopista del ciclo ETC, ya que se han tomado sus valores directamente. No obstante, la aceleración media de $0.19m/s^2$ representa un valor bajo, especialmente debido a que el tramo de autopista representa un 90% del ciclo y la variación de la velocidad en ella es pequeña y suave.

En las zonas urbanas, se espera unos valores de aceleración cercanos a los de la Línea 253.

3ª Línea analizada: Línea 015 Intercambiador de Santa Cruz- La Laguna (Express)

A diferencia de las líneas anteriores, esta será analizada en ambos sentidos (desde el Intercambiador de Santa Cruz hasta La Laguna y desde La Laguna hasta el Intercambiador de Santa Cruz). El motivo se encuentra en que esta línea viene caracterizada por un gradiente de carretera muy importante (cambios de altitud considerables), de modo que uno de los sentidos es prácticamente ascendente y el otro descendente, lo que supondrá que en cada sentido se obtengan consumos muy diferentes.

Debido a ello, a la hora de comparar los resultados que se obtengan para cada ciclo, se debe de considerar la Línea 015 como un viaje de ida y vuelta en su conjunto, para que la comparación sea equilibrada.

A continuación, se muestran las características de la Línea 015 en ambos sentidos, obteniendo para cada uno de ellos, su perfil de velocidad y de gradiente de carretera.

- **Línea 015 Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna (SENTIDO ASCENDENTE)**

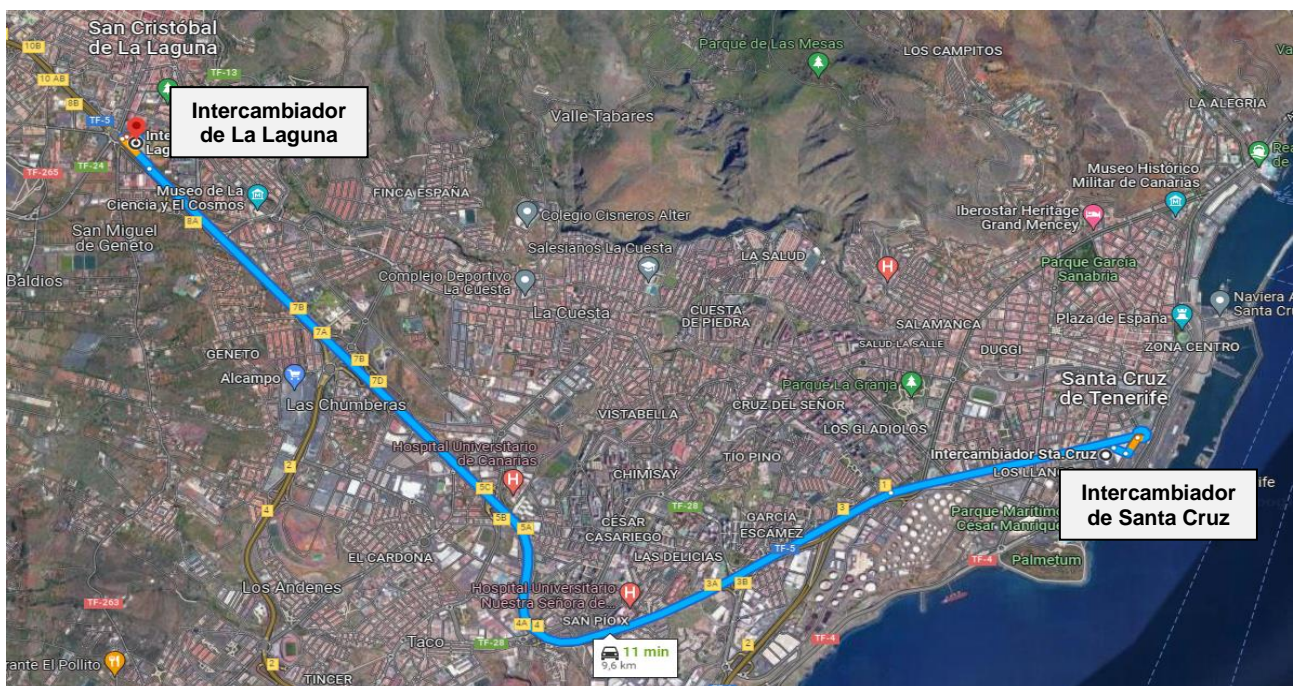


Figura 3.28 Vista satelital de la Línea 015 Sentido Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna (ascendente). Fuente Propia

Esta ruta se caracteriza por una conducción mayoritariamente extraurbana de corta distancia (9.4km) y duración (16.4 minutos) que conecta las ciudades de Santa Cruz y La Laguna. En cuanto a la velocidad, se puede considerar baja-media a pesar de desarrollarse principalmente en autopista. El principal motivo se encuentra en el elevado gradiente de carretera, que sitúa su valor medio en torno al 5% y que impide que el vehículo sea capaz de alcanzar velocidades mayores, pues como se verá, ya se le está exigiendo el 100% de su capacidad.

Como podrá comprobarse entonces en el siguiente capítulo, las guaguas que operan en esta ruta exigen elevadas prestaciones de potencia y par y, aun así, siguen trabajando a plena carga, por lo que se puede considerar que esta ruta representa uno de los casos más desfavorables de conducción en la isla.

En cuanto al número de paradas, se puede considerar intermedio entre los dos anteriores.

Tabla 3.24 Estadísticas de la Línea 015 Sentido ascendente

Zona	Distancia recorrida [km]	Porcentaje de la Distancia Total [%]
Urbana (Sta.Cruz)	1.7	18.7
Extraurbana (Autopista del Norte TF-5)	7.3	80.2
Urbana (La Laguna)	0.1	1.1%
Distancia Total [km]	9.1	100%
Duración Total [min]	17	

Fuente Propia

Tabla 3.25 Paradas realizadas en la Línea 015 Sentido ascendente

Zona	Nº Parada	Identificación de la parada	km	Distancia a la parada anterior [km]
Urbana	1	Intercambiador de Sta. Cruz (9181)	0.0	0.0
	2	El Corte Inglés (9385)	0.5	0.5
	3	Tres de Mayo (9386)	0.8	0.3
	4	Parque de bomberos (9387)	1.1	0.3
Extraurbana	5	Pancho Camurria (2670)	2.1	1.0
	6	Chamberí (1279)	2.7	0.6
	7	Hospital La Candelaria (1280)	3.7	1.0
	8	Nuevo Obrero (1281)	4.5	0.7
	9	Hospital Universitario (1282)	5.6	1.1
	10	Campus de Guajara (2533)	7.1	1.5
Urbana	11	Intercambiador Laguna (T)	9.1	2.0

Fuente Propia

De acuerdo con las estadísticas de la ruta, el 80% del recorrido se realiza en autopista, mientras que el resto, un 20% tiene lugar en ciudad. Prácticamente todo el recorrido urbano se realiza en Santa Cruz, ya que la última parada correspondiente al Intercambiador de La Laguna se sitúa justo al final del tramo extraurbano.

Como se puede comprobar en la Tabla 3.25, la ruta se compone de 11 paradas, de las cuales 5 se realizan en zona urbana y 6 en autopista. Para el análisis posterior, se supone que la guagua se detiene en 7 de las 11 paradas totales.

El perfil de velocidad del sentido ascendente de la ruta ha sido obtenido tomando como base la zona “urbana” y de “autopista” del ciclo ETC la igual que se hizo para la Línea 110. Además, ha sido necesario definir un perfil de gradiente de carretera que represente la pendiente existente en cada punto del ciclo. De esta manera, Autonomie puede tener en cuenta su impacto en el consumo.

Para obtener dicho gradiente, se ha hecho uso de “*Google Earth*”, donde se ha definido la ruta deseada. La herramienta online “*GPS Visualizer*” ha permitido encontrar luego, para cada punto de coordenadas de la ruta definida, el valor de la altitud sobre el nivel del mar y la pendiente. Los valores obtenidos han sido exportados a Excel, de tal modo que allí se ha terminado de realizar el postprocesado necesario para obtener la pareja de valores pendiente-tiempo que requiere Autonomie para construir el perfil de gradiente de carretera.

En la siguiente figura, se muestra el perfil de velocidad del ciclo, así como los perfiles de altitud y gradiente.

SENTIDO ASCENDENTE

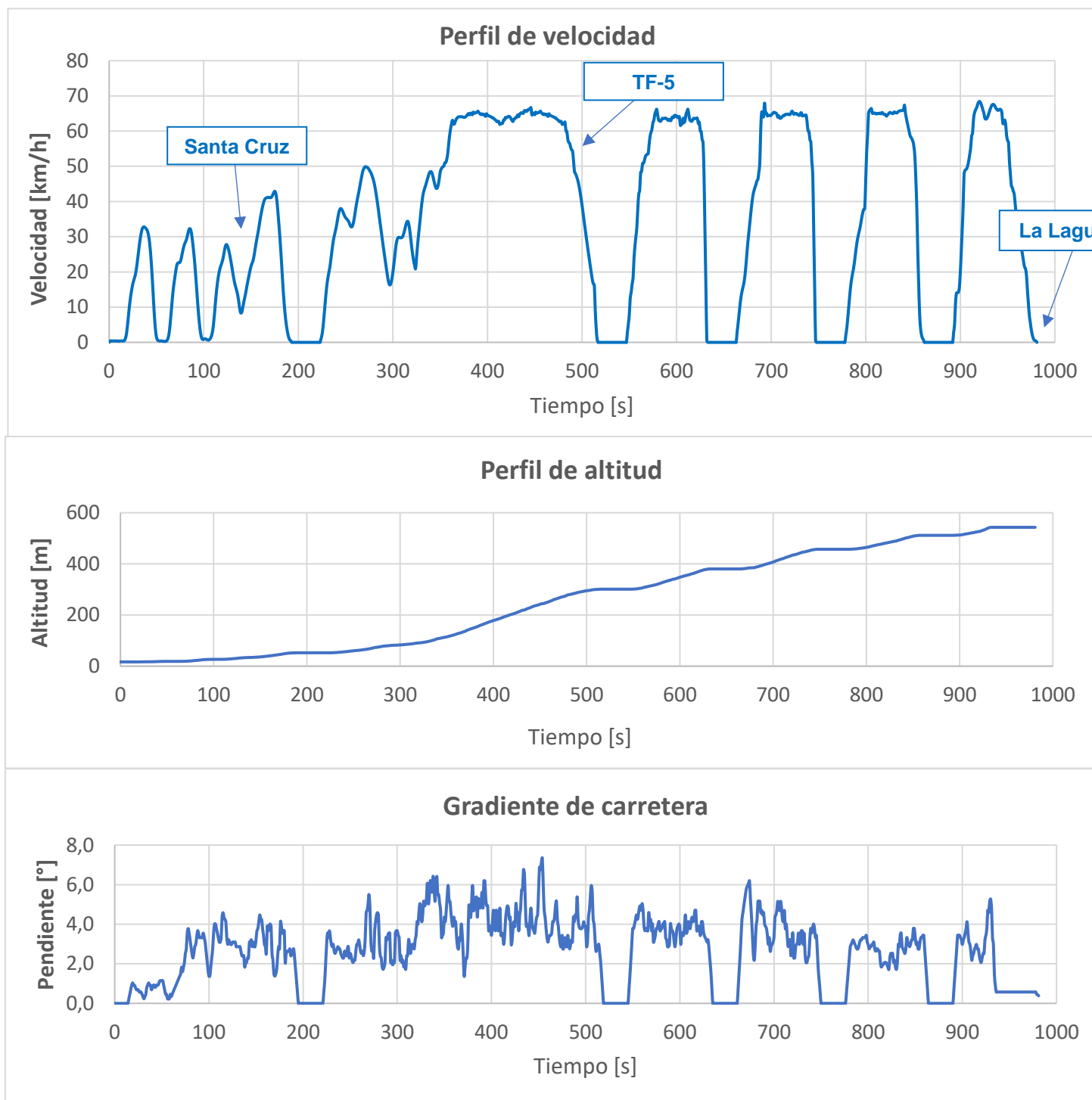


Figura 3.29 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (sentido ascendente). Fuente Propia

En cuanto al perfil de velocidad, se ha fijado como velocidad máxima en autopista unos 68km/h. Dicho límite se ha fijado basándose en la realidad, ya que se puede comprobar que las características de los vehículos y el gradiente de carretera dificultan el alcance de mayores velocidades, pues la demanda de pedal ya se encuentra saturada al 100%.

A partir del perfil de altitud, se observa que la ruta parte de una altitud cercana al nivel del mar (Santa Cruz) y finaliza a 543m de altitud (La Laguna). Teniendo en cuenta que el ciclo solo representa 9km de distancia, es de esperar que la pendiente sea apreciable. En la figura anterior se muestra el gradiente de carretera, cuyo perfil muestra numerosos picos debido a factores como las irregularidades del asfalto o errores en la toma de medidas. Cabe destacar que en cada una de las paradas realizadas se ha considerado un gradiente nulo, para limpiar posibles picos en dichos periodos, aunque ello no tendrá un impacto importante en los resultados.

En la Tabla 3.26 se presentan las características de la ruta en este sentido de circulación:

Tabla 3.26 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (sentido ascendente)

Distancia [km]	9.4
Duración [s]	982
Velocidad máxima [km/h]	68.38
Velocidad media con paradas [km/h]	34.53
Aceleración máxima [m/s ²]	2.72
Aceleración media [m/s ²]	0.37
Desaceleración máxima [m/s ²]	-4.43
Gradiente medio [%]	5.0
Frecuencia de paradas [paradas/km]	0.55

Fuente Propia

Se observa que la velocidad media del ciclo (unos 35km/h) se encuentra entre los ciclos de la Línea 253 y 110, con velocidades medias de 23 y 73km/h respectivamente pues cuenta con características de uno y otro. En cuanto a la aceleración máxima, es algo superior a la de la Línea 253 pero su aceleración media es prácticamente la misma, por ello, se pueden considerar igual de agresivos con la diferencia de que, en este caso, el vehículo debe salvar un gradiente medio del 5% que hasta ahora había sido nulo. Por otro lado, se obtiene una frecuencia de paradas inferior al de la Línea 253 pero mayor que el de la Línea 110, de modo que se cuenta con tres casos completamente distintos.

A continuación, se presentan las características de la Línea 015 pero en sentido descendente (Intercambiador de La Laguna – Santa Cruz). Como podrá comprobarse, presenta notables diferencias.

- **Línea 015 Intercambiador de La Laguna – Santa Cruz**
(SENTIDO DESCENDENTE)

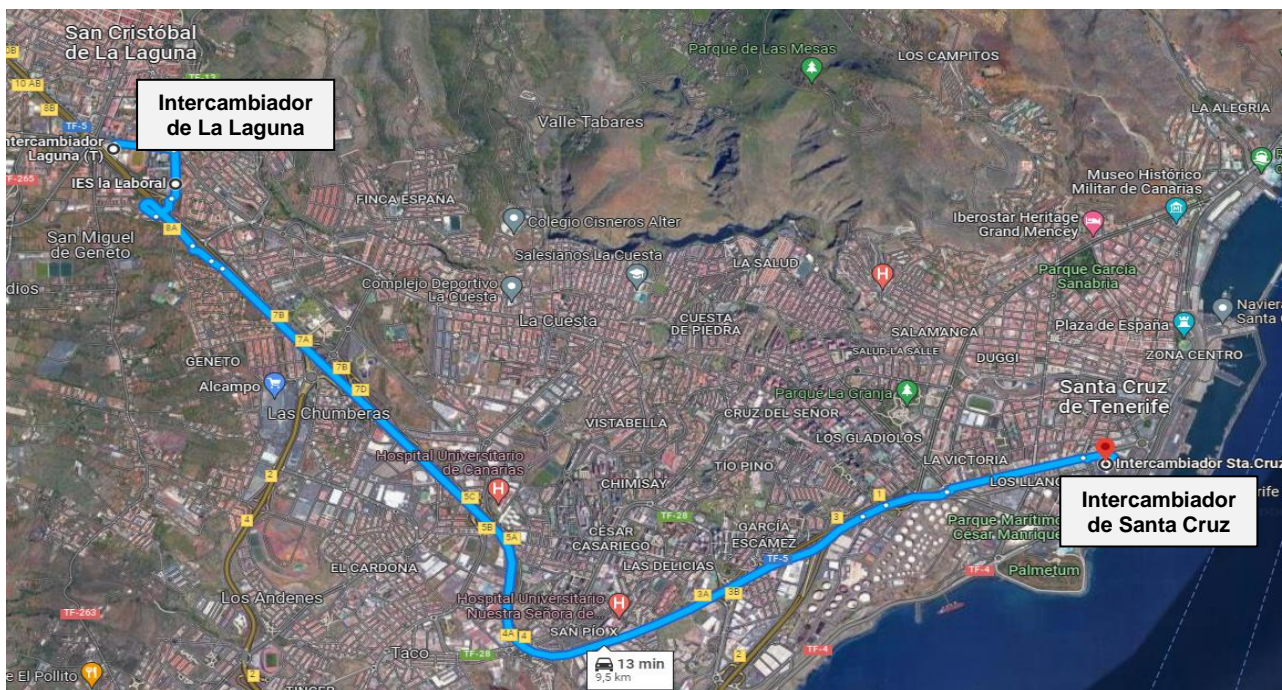


Figura 3.30 Vista satelital de la Línea 015 Sentido Intercambiador de La Laguna – Santa Cruz (descendente). Fuente Propia

La principal diferencia con la ruta en sentido ascendente es que la distancia es algo mayor (9.7km) y la duración media algo más corta (15 minutos) debido a que la ruta cambia ligeramente en las zonas urbanas y ahora la pendiente es principalmente negativa, lo que permite alcanzar velocidades mayores y reducir el consumo.

Tabla 3.27 Estadísticas de la Línea 015 Sentido descendente

Zona	Distancia recorrida [km]	Porcentaje de la Distancia Total [%]
Urbana (La Laguna)	1.6	16.5
Extraurbana (Autopista del Norte TF-5)	6.6	68.0
Urbana (Santa Cruz)	1.5	15.5
Distancia Total [km]	9.7	100%
Duración Total [min]	15.0	

Fuente Propia

Como se puede apreciar, en el sentido descendente se produce un incremento de aproximadamente el 10% de la contribución urbana, mientras que en la extraurbana se reduce en la misma cantidad debido a que la incorporación a la autopista se produce más tarde al abandonar La Laguna.

Tabla 3.28 Paradas realizadas en la Línea 015 Sentido descendente

Zona	Nº Parada	Identificación de la parada	km	Distancia a la parada anterior [km]
Urbana	1	Intercambiador Laguna (T)	0.0	0.0
	2	IES La Laboral (1370)	0.9	0.9
Extraurbana	3	Campus de Guajara (T) (2393)	2.9	2.0
	4	Santiago Martín (1372)	4.2	1.3
	5	Hospital Universitario (1373)	4.7	0.5
	6	Nuevo Obrero (1374)	5.7	1.0
	7	Hospital La Candelaria (1375)	6.3	0.6
	8	Fray Luis de Granada (2521)	7.3	1.0
Urbana	9	Meridiano (9413)	9.2	1.9
	10	Intercambiador Sta. Cruz (9449)	9.7	0.5

Fuente Propia

Se comprueba que la distribución de paradas en los tramos urbanos y extraurbanos es parecida al del ciclo en sentido ascendente. En este caso, se cuenta con 4 paradas en zona urbana y 6 en extraurbana haciendo un total de 10 paradas. Para el estudio, se considera que la guagua se detiene en 7 de las 10 paradas totales.

En cuanto a la construcción del ciclo, se ha realizado del mismo modo que para el sentido ascendente escalando las distancias y velocidades a las deseadas. A continuación, se presentan el perfil de velocidad del ciclo, altitud y gradiente de carretera:

SENTIDO DESCENDENTE

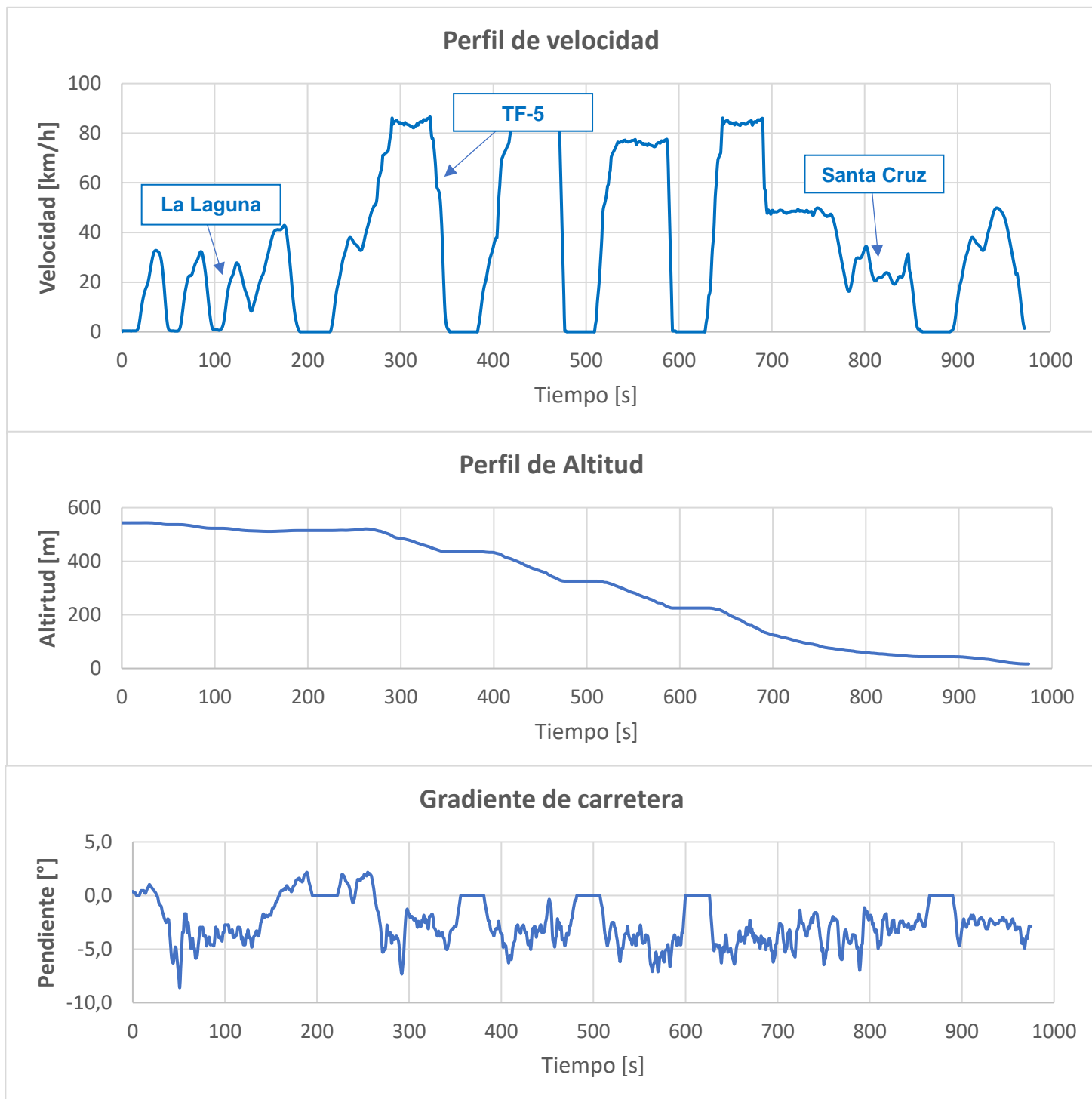


Figura 3.31 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (sentido descendente). Fuente Propia

El perfil de velocidad muestra claramente que las velocidades máximas alcanzadas aumentan, alcanzando en este caso unos 85km/h de pico. Dicha velocidad límite ha sido igualmente fijada según la experiencia, con el fin de buscar la mayor aproximación posible a la realidad.

El aumento de velocidad se encuentra motivado por la existencia de gradientes negativos de carretera pues se aprovecha la propia inercia del vehículo para impulsarlo, lo que también reduce las exigencias de par y potencia del vehículo.

En la Tabla 3.29 se muestran las características asociadas al sentido descendente del ciclo:

Tabla 3.29 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (sentido descendente)

Distancia [km]	9.7
Duración [s]	975
Velocidad máxima [km/h]	86.53
Velocidad media con paradas [km/h]	35.79
Aceleración máxima [m/s ²]	2.74
Aceleración media [m/s ²]	0.37
Desaceleración máxima [m/s ²]	-4.03
Gradiente medio [%]	-4.0
Frecuencia de paradas [paradas/km]	0.52

Fuente Propia

Como se observa en la tabla, la principal diferencia con el ciclo ascendente se encuentra en que la velocidad máxima se sitúa en unos 87km/h, frente a los 68km/h que se obtienen en el sentido ascendente. A pesar de ello, la velocidad media del ciclo es prácticamente la misma, ya que, a pesar de contar con tramos a mayor velocidad, se incrementa el tiempo dentro de ciudad. En sentido descendente se obtienen unos 36km/h de velocidad media frente a los 35km/h que se obtienen en sentido ascendente. Esto también es motivo de que la duración del ciclo apenas varíe de un sentido a otro.

En cuanto a las aceleraciones y desaceleraciones son muy parecidas, como también lo es la frecuencia de paradas. Finalmente, el gradiente medio del ciclo se sitúa en un valor del -4%, cercano al 5% que se obtiene en sentido ascendente, pero algo menor debido a que se recorre mayor tiempo en la ciudad de La Laguna con gradientes menos pronunciados.

Como se comentó, los resultados de simular las distintas arquitecturas bajo el ciclo de la Línea 015 se obtendrán considerando las rutas ascendente y descendente de manera conjunta (ida y vuelta), aunque luego se obtendrán también los valores por separado. Por ello, se presenta a continuación los datos referentes al ciclo completo:

- **Línea 015 Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna (IDA Y VUELTA)**



Figura 3.32 Vista satélite de la Línea 015 Intercambiador de Santa Cruz – La Laguna. Sentido ascendente (línea roja) y descendente (línea verde). Fuente Propia

Tabla 3.30 Estadísticas de la Línea 015 (ida y vuelta)

Zona	Distancia recorrida [km]	Porcentaje de la Distancia Total [%]
Urbana (Santa Cruz)	3.2	17.0
Extrurbana (Autopista del Norte TF-5)	13.9	74.0
Urbana (La Laguna)	1.7	9.0
Distancia Total [km]	18.8	100%
Duración Total [min]	33 ⁽¹⁾	

Fuente Propia

- (1) Se considera que antes de iniciar la ruta de vuelta el vehículo está detenido 1 minuto (que se añade al tiempo total del ciclo). El objetivo es que se perciba una separación entre las rutas sin que tenga influencia en el consumo.

Considerando un viaje de ida y vuelta en la Línea 015, se obtiene que la conducción extrurbana representa tres cuartas partes de la distancia total recorrida (18.8km), siendo el resto conducción urbana.

Seguidamente se muestran los perfiles de velocidad, altitud y gradiente que resultan de unir los ciclos en ambos sentidos.

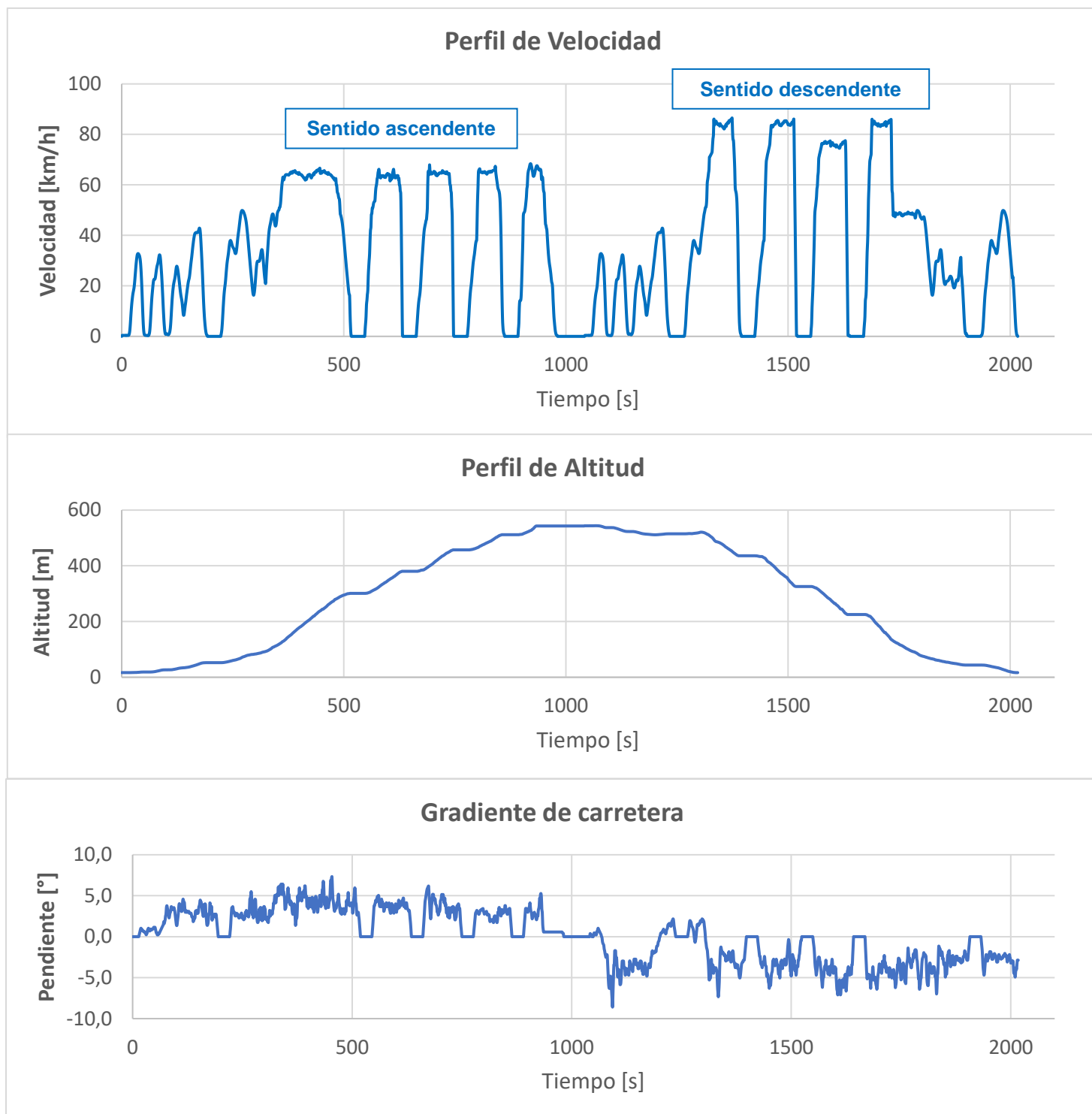


Figura 3.33 Perfil de velocidad, de altitud y gradiente de la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia

A raíz de los perfiles construidos, se extraen las características del ciclo completo que se emplearán en el análisis posterior de resultados.

Tabla 3.31 Parámetros principales del ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta)

Distancia [km]	19.1
Duración [s]	2017
Velocidad máxima [km/h]	86.53
Velocidad media con paradas [km/h]	35.16
Aceleración máxima [m/s ²]	2.74
Aceleración media [m/s ²]	0.37
Desaceleración máxima [m/s ²]	-4.43
Gradiente medio [%]	+5.0 (ida) / -4.0 (vuelta)
Frecuencia de paradas [paradas/km]	0.54

Fuente Propia

De este modo, quedan descritas tres rutas de conducción característica en la isla de Tenerife, lo que permite realizar un estudio básico de las distintas arquitecturas modeladas y su idoneidad para cada ruta. Los resultados de la comparación realizada entre ellas se muestran en el capítulo 4 *Análisis fundamental de resultados* expuesto a continuación.

4 ANÁLISIS FUNDAMENTAL DE RESULTADOS

4.1 Línea 253 La Laguna – Guamasa - Garimba

Las características de los modelos configurados para operar en líneas urbanas como la 253, se recogen en las Tablas 3.1 y 3.2 considerando una carga de pasajeros del 50% de la capacidad total del vehículo, es decir, 34 pasajeros (2312kg). Además, se considera como punto de partida que el aire acondicionado se encuentra apagado, suponiendo en este caso que el resto de los accesorios introducen una carga constante de 5kW. No obstante, también se realizarán estudios donde este se tome en cuenta considerando una carga estimada de 8kW siguiendo lo encontrado en la literatura.

Principalmente se expondrán los resultados de simular las cuatro arquitecturas y configuraciones propuestas bajo el ciclo de la Línea 253 comparando resultados de consumo (autonomía), eficiencia y emisiones de CO₂ equivalente.

4.1.1 Elección inicial de capacidad de batería de la guagua 100% eléctrica

Antes de analizar los resultados obtenidos, es necesario comprobar que el tamaño de batería inicial propuesto para el modelo de guagua 100% eléctrica, permite operar en la ruta empleando una estrategia de carga de oportunidad, que desde el punto de vista energético es lo más eficiente. El motivo de dicha comprobación se encuentra en que la única fuente de energía del modelo es su batería, por lo que existe el riesgo de que el tamaño de este almacenamiento energético sea insuficiente para que el vehículo complete al menos un viaje de ida y vuelta, permitiéndole volver al intercambiador de La Laguna (en este caso) y recargar allí la energía suficiente como para continuar el servicio.

Inicialmente, se propone una batería con capacidad de 30kWh como se muestra en la Tabla 3.2. Para comprobar si el tamaño de batería es suficiente, se ha ejecutado la simulación con 8kW de carga de accesorios (aire acondicionado encendido) y 100% de carga de pasajeros (67 pasajeros), ya que representa una situación muy desfavorable que debería ser capaz de superar.

Se fija una autonomía mínima objetivo de 16.2km con una reserva de batería de al menos el 20%. Dicha reserva en vehículos electrificados es imprescindible por motivos operacionales y de cuidado de la batería.

En la siguiente tabla se muestra la autonomía alcanzada en las condiciones descritas para el ciclo de la Línea 253:

Tabla 4.1 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 30kWh en la Línea 253

Condición	Estado inicial de carga de la batería [%]	Delta de SOC [%]	Nº Ciclos recorridos	Nivel de carga restante al final de cada ciclo [%]	Autonomía mínima objetivo [km]	Autonomía alcanzada [km]
100% pasajeros + AC encendido	100	-33.72	1	66.28	16.2	18.6
			2	32.56		
			3	No completa		

Fuente Propia

Como se puede comprobar en la Tabla 4.1, la batería de 30kWh proporciona una autonomía estimada de 18.6km, superior al objetivo de 16.2km en unas condiciones muy desfavorables que difícilmente se darán de forma simultánea en esta ruta, por lo que la autonomía habitual será algo mayor. Con esta autonomía, el vehículo puede completar perfectamente un viaje de ida y vuelta en la Línea 253, por lo que se concluye que la batería es adecuada para operar según una estrategia de carga de oportunidad.

En el siguiente apartado se presentan los resultados principales del ciclo para cada arquitectura y configuración.

4.1.2 Comparación de consumos, emisiones de CO₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones

La Figura 4.1 presenta la comparación en consumo de combustible equivalente entre las distintas configuraciones. Para los modelos convencional e híbrido en paralelo su valor es el proporcionado directamente por el programa en L/100km, dado que toda la energía que consumen procede de un motor de combustión (el híbrido en paralelo es no enchufable). En cambio, para los modelos híbrido en serie (enchufable) y 100% eléctrico, se debe de tener en cuenta que existe un consumo donde la energía se ha obtenido a partir de la red eléctrica. En ese caso, para el modelo híbrido en serie simplemente se debe de tomar el valor de “*Fuel Economy Diesel Equivalent*” en mpdge y expresarlo en L/100km, mientras que, para el modelo eléctrico, se debe de transformar el valor de consumo eléctrico en consumo de combustible equivalente, dado que no se dispone de otro valor para obtenerlo. Así, se obtiene la siguiente figura:

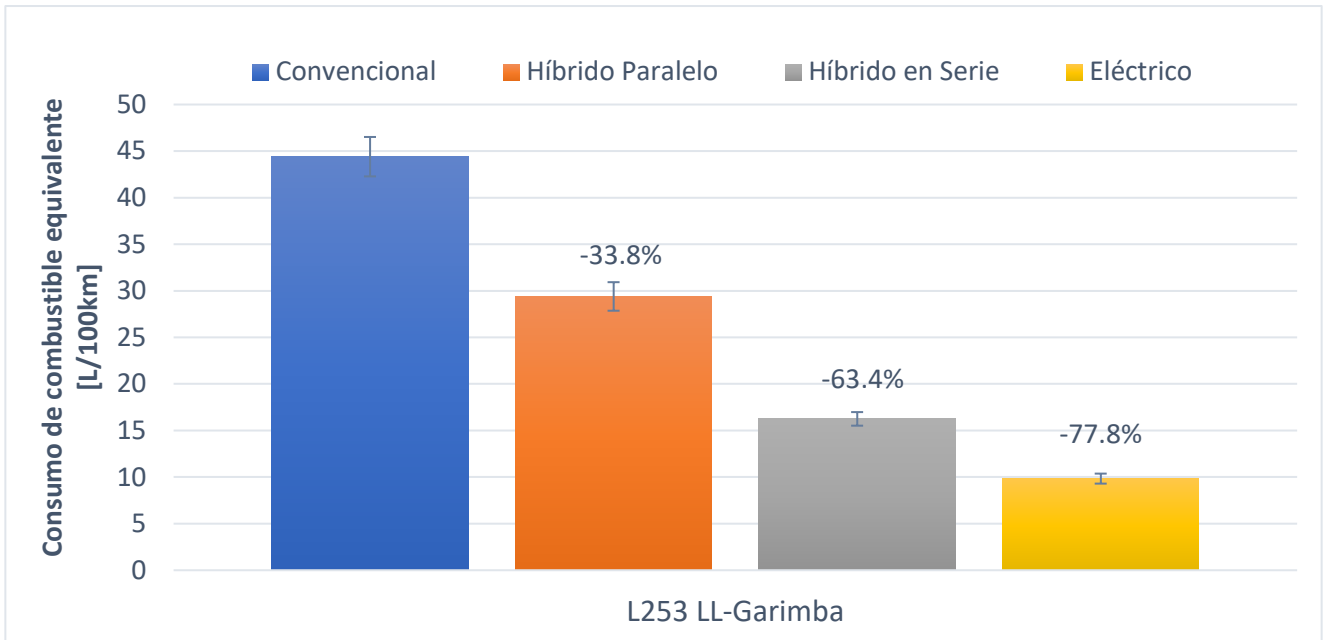


Figura 4.1 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia

A la vista de los resultados, la conducción altamente transitoria que caracteriza a la Línea 253 perjudica en mayor medida a la arquitectura convencional, que presentará el mayor consumo de combustible equivalente de entre todas las arquitecturas presentadas (44.4L/100km).

Le sigue la arquitectura híbrida en paralelo que supone una reducción del 33.8% en el consumo, beneficiada por la asistencia del motor eléctrico durante las aceleraciones y la regeneración en frenada, además de contar con una estrategia que le permite apagar el motor de combustión en todas las situaciones en las que el vehículo está detenido, tal y como se observa en la Figura 4.2.

Híbrido en paralelo

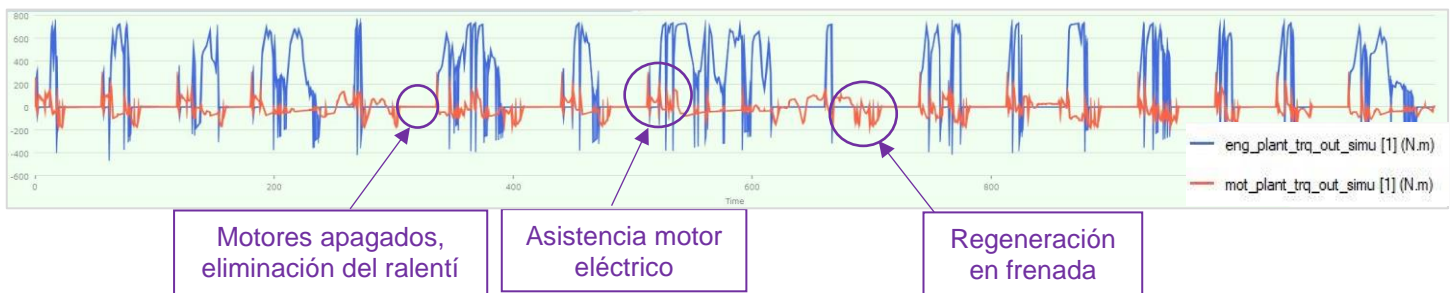


Figura 4.2 Justificación en la reducción de consumo del híbrido en paralelo respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Curva de par MCI (azul) y curva de par motor eléctrico (rojo). Fuente Propia

Posteriormente, se sitúa el vehículo híbrido en serie enchufable, que logra una destacable reducción del 63.4% en consumo respecto al vehículo convencional. El motivo principal se encuentra en la estrategia de encendido del motor de combustión según lo explicado en el apartado 3.5, de tal manera que solo se arranca fuera de

las poblaciones de La Laguna, Guamasa y Garimba, es decir, en la zona extraurbana como se muestra en la Figura 4.3. En esta situación, el motor de combustión carga la batería, de modo que en el resto del ciclo solo opera el motor eléctrico, con buena eficiencia y beneficiado de una conducción en ciudad proporcionando la notable reducción.



Figura 4.3 Justificación en la reducción de consumo del híbrido en serie respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Señal de encendido MCIA (azul) y perfil de velocidad (rojo). Fuente Propia

A pesar de todo, la mayor reducción en consumo es la conseguida por la guagua 100% eléctrica y que representa un 77.8% del consumo obtenido por el vehículo convencional. Las razones para ello son evidentes, se cuenta con un motor muy eficiente (valor máximo del 94%) que genera toda la tracción (al igual que el híbrido en serie) pero que cuenta con una capacidad para regenerar energía en frenada muy superior al resto. En la Figura 4.4 se puede observar los grandes picos negativos de par obtenidos como consecuencia de la energía regenerada en frenada por el vehículo. Además, es la arquitectura más ligera de todas (10298.4kg en vacío) debido a su menor número de componentes y pequeño tamaño de batería, lo que se traduce en una considerable reducción en consumo.



Figura 4.4 Justificación en la reducción de consumo del vehículo 100% eléctrico respecto a la arquitectura convencional en la Línea 253. Curva de par motor (azul) y perfil de velocidad (rojo). Fuente Propia

Es muy frecuente que en vehículos electrificados se expresen los consumos en kWh/km, por lo que a continuación se muestra la gráfica con los valores correspondientes a cada arquitectura:

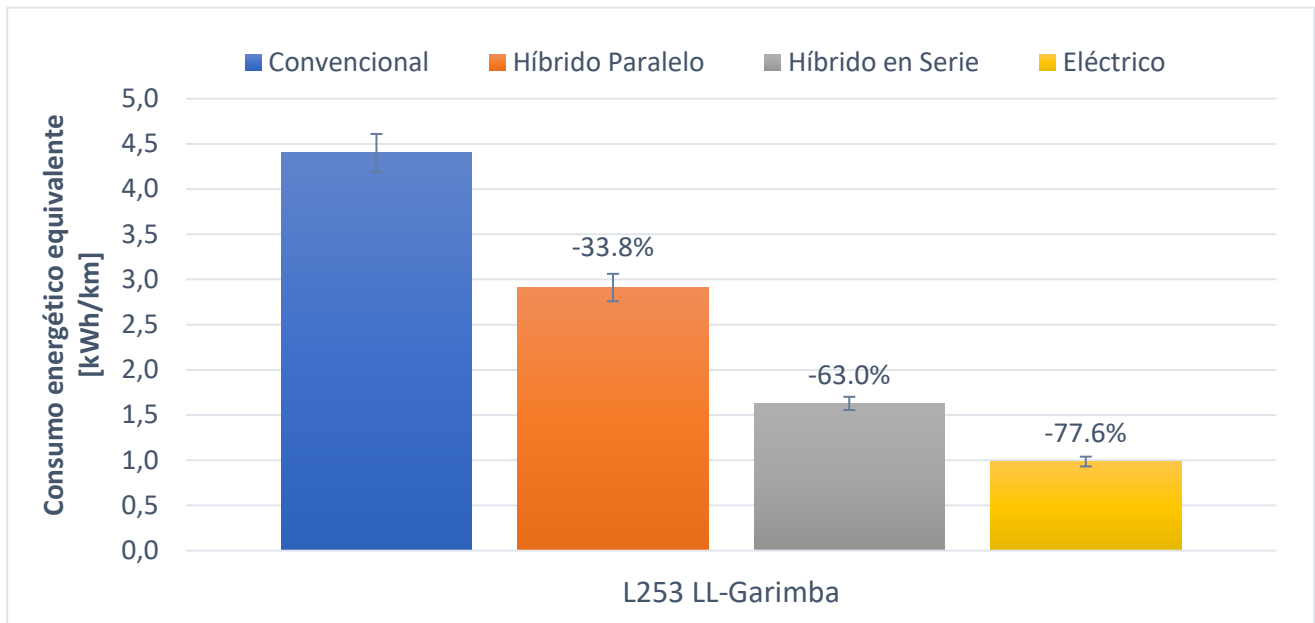


Figura 4.5 Comparación de consumo energéticos equivalentes entre configuraciones para la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia

Como se ha visto, uno de los motivos por los cuales las arquitecturas híbridas y eléctricas logran una reducción en consumo respecto al vehículo convencional, se encuentra en la oportunidad de regenerar energía en frenada. En la siguiente figura se muestra la energía que ha sido capturada en frenada por dichas arquitecturas.

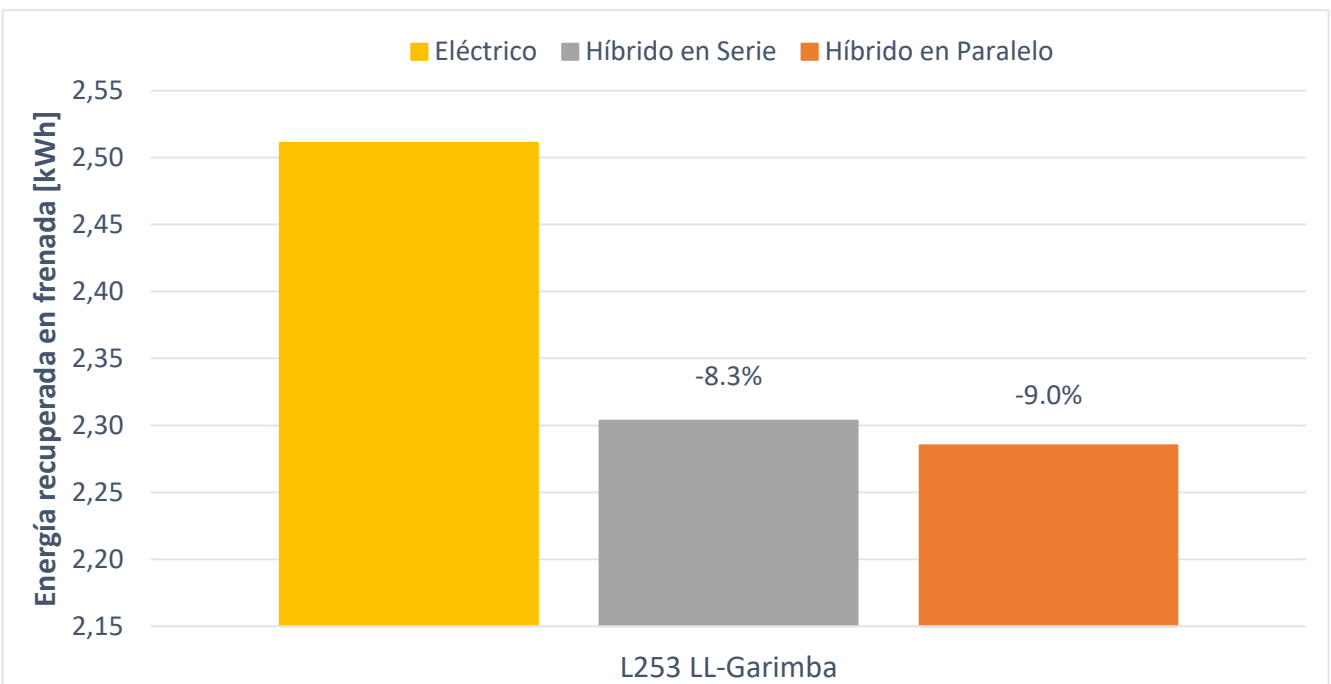


Figura 4.6 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.

Se comprueba que el vehículo 100% eléctrico es el que mayor energía regenera en frenada (2.51kWh) si se compara con las arquitecturas híbridas, lo que es coherente

con la mayor reducción en consumo total conseguida. La mayor cantidad de energía regenerada en frenada se debe, principalmente, a su mayor capacidad de hardware (motor y batería).

Por otro lado, si se comparan las arquitecturas híbridas entre sí, se observa que ambos modelos permiten regenerar una cantidad de energía similar, aunque es ligeramente superior en el caso del híbrido en serie lo que favorece su consumo.

De este modo, se concluye que, en cuanto a consumo, la guagua 100% eléctrica es la mejor opción en una operación típica de ciudad con velocidades bajas y frecuentes paradas, aceleraciones y desaceleraciones. Además, opera con niveles de eficiencia muy buenos. En la siguiente tabla se muestran los valores de eficiencia media con los que operan los motores de cada arquitectura en esta ruta:

Tabla 4.2 Comparación de valores de eficiencia media en la Línea 253

Arquitectura	Estado inicial de carga de la batería [%]	Eficiencia media [%]
Convencional	MCIA	28.9
Híbrido en Paralelo	MCIA	38.5
	Motor eléctrico	86.9
Híbrido en Serie	MCIA	39.3
	Motor eléctrico	85.4
Eléctrico	Motor eléctrico	85.0

Fuente Propia

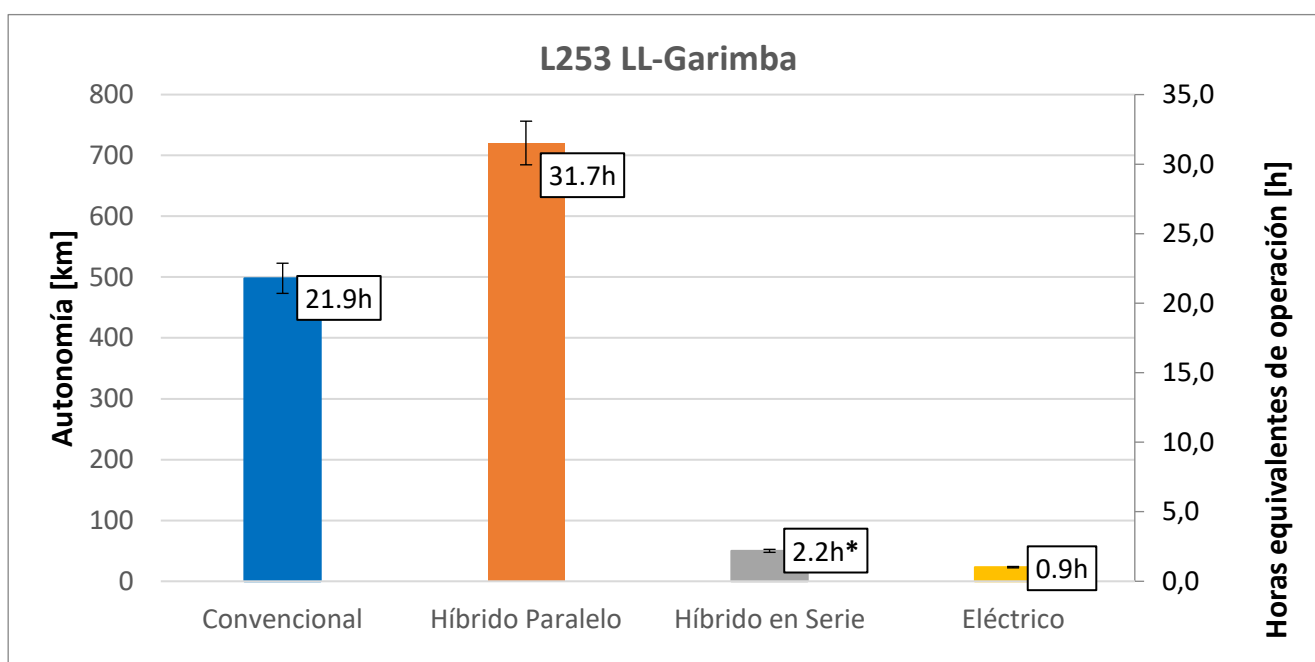
Destaca el impacto que tiene este tipo de conducción en ciudad sobre la eficiencia del motor de combustión interna. En el caso del vehículo convencional, no se dispone de la asistencia de un motor eléctrico como en un híbrido en paralelo, ello provoca que el motor de combustión trabaje más tiempo en puntos de mala eficiencia, lo que provoca que la eficiencia media caiga a un valor del 28.9%. Por otro lado, dado que el híbrido en paralelo cuenta con dicha asistencia, el motor eléctrico puede trabajar en los puntos donde el motor de combustión es más ineficiente, permitiéndole a este trabajar en los puntos donde es más eficiente. Como resultado, la eficiencia media del MCIA sube a un 38.5%, lo que prácticamente representa un +10% de eficiencia media respecto al motor del vehículo convencional.

Por encima de ellos, se encuentra el híbrido en serie en cuanto a mejora en eficiencia, ya que el motor de combustión no se emplea para generar empuje sino para recargar la batería. Por este motivo, el motor puede trabajar a un régimen relativamente estacionario a un régimen de giro y par en el que su eficiencia es muy buena. De este modo, se consigue que la eficiencia media pase del 38.5%, en el caso del híbrido en paralelo, a un 39.3% en el caso del híbrido en serie.

En cuanto al motor eléctrico, opera de manera eficiente en todos los casos, con un valor medio del 85-87%.

Tanto la eficiencia del vehículo como su configuración y exigencias operacionales tienen un impacto directo sobre su autonomía. Para la estimación de este valor, se ha considerado que en los vehículos convencional e híbrido en paralelo se cuenta con 235L de capacidad en el tanque de combustible, del cual se mantiene una reserva del 10%. En cuanto a las baterías, se toma la capacidad seleccionada considerando un 20% de reserva, algo mayor con el fin de aumentar la vida útil de la batería y debido al mayor riesgo de no poder contar con suficiente batería para alcanzar un punto de recarga próximo.

De acuerdo con ello, se obtiene la Figura 4.7, donde además se representa el número de horas equivalentes de servicio que sería capaz de completar la guagua teniendo en cuenta los aspectos anteriores.



*Autonomía para la cual no se produce el arranque del motor de combustión interna dentro de ciudad.

Figura 4.7 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.

Como se puede apreciar en la figura anterior, el vehículo que mayor autonomía proporciona es el híbrido en paralelo (720km) seguido del vehículo convencional (498km), el híbrido en serie (50km) y el eléctrico (23km).

La razón por la cual el híbrido en paralelo permite recorrer un mayor número de kilómetros se encuentra en que emplea el mismo tamaño de tanque de combustible que el vehículo convencional, pero gracias a la asistencia del motor eléctrico, hace

un menor uso de combustible y, además, aprovecha mejor la energía que contiene por su mayor eficiencia.

Por otro lado, el híbrido en serie tan solo proporciona una autonomía de 50km debido a que se ha considerado la distancia para la cual no se produce el arranque del motor de combustión dentro de ciudad, pues precisamente, la finalidad por la que se emplearía este vehículo es para que ello no ocurra, y si esto sucede es porque no se cuenta con suficientes eventos fuera de ciudad para arrancar el MCIA y recargar la batería.

Cabe destacar, que cuando el nivel de batería alcanza un valor límite inferior, el MCIA se arranca para evitar que continúe cayendo el nivel de batería. En la siguiente figura se representan 9 viajes en la Línea 253 en los que se muestra tanto la descarga de la batería a lo largo del ciclo, como los periodos de arranque del motor de combustión.

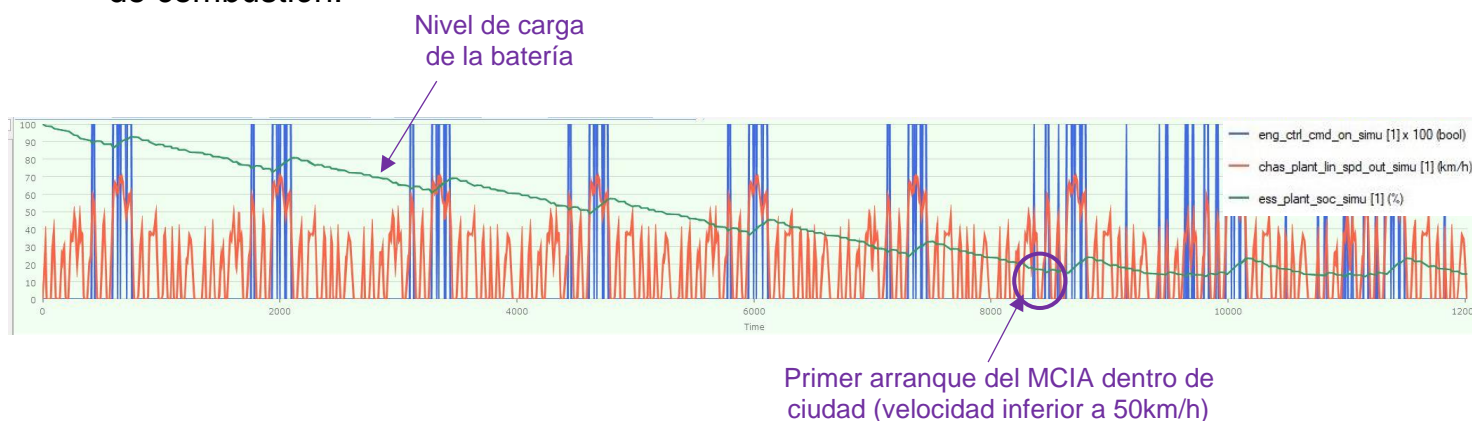


Figura 4.8 Justificación de la autonomía alcanzada por el híbrido en serie en la Línea 253 LL-Garimba. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia.

Esto manifiesta que el híbrido en serie para operación en ciudad solo resultaría idóneo si su batería fuera más grande (actualmente es de 30kWh), de modo que tenga energía suficiente para operar durante todo el día sin arrancar el MCIA dentro de ciudad; o realizar recargas de oportunidad entre servicios, o durante el servicio aprovechando los tiempos muertos en las paradas de pasajeros, que son estrategias usadas actualmente.

En cuanto al vehículo eléctrico, es el que menor autonomía proporciona a pesar de ser el que menor consumo presenta. La razón se encuentra en que su única fuente de energía es su batería, y como en este caso se ha optado por una estrategia de carga de oportunidad, su tamaño es pequeño (30kWh). Dado que se estima que la guagua dispone del tiempo necesario entre servicios para recargarse. Otra opción sería optar por una estrategia de carga convencional, estudio que se realizará en el capítulo 5 *Estudio eléctrico. Consumo, emisiones y autonomía*.

En lo que respecta a emisiones, se sabe que las tecnologías puramente eléctricas se consideran “limpias”, ya que sus emisiones del tanque a las ruedas (*Tank-To-Wheels*) son nulas. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que la energía eléctrica que lo alimenta puede proceder de una red donde una mayor o menor proporción de la electricidad generada se obtiene mediante la quema de un combustible fósil, como en el caso de Tenerife.

Tal y como se explicó en el capítulo introductorio, la intensidad de CO₂ de la red eléctrica en Tenerife según el Anuario energético de Canarias (2019-2020) es de 620gCO₂/kWh, de tal modo que por cada kWh consumido por un vehículo que ha sido enchufado a la red para su recarga, se van a emitir 620g de CO₂ de manera indirecta.

Por tanto, para realizar una comparación justa en cuanto a emisiones contaminantes, se realizará un análisis de emisiones del “Pozo a las Ruedas” (*Well-To-Wheels, WTW*), donde se deben contabilizar las emisiones que tienen lugar, no solo del “Tanque a las Ruedas”, sino también las emisiones obtenidas durante el refinado del combustible, su transporte o su quema en las plantas de generación eléctrica. Para tener en cuenta las emisiones obtenidas en el proceso de refinado y transporte del Diesel, se empleará una intensidad de carbono de la red de 710gCO₂/kWh para estimar las emisiones WTW, y un factor de 306kWh/kWh para tener en cuenta las emisiones del “Pozo a las Ruedas” del motor de combustión en las arquitecturas convencional e híbrida en paralelo [30]. Así, se obtienen unas emisiones de CO₂ “equivalente” para cada arquitectura, lo que permite compararlas entre sí y evaluar el nivel de reducción de emisiones de las arquitecturas alternativas frente a las convencionales.

Por otro lado, cabe destacar que, durante la recarga de los vehículos enchufables, se considera que la eficiencia no es del 100%, ya que la totalidad de la energía eléctrica que se consume de la red no acaba almacenada en la batería, lo que implica que el vehículo necesite consumir más energía de la que teóricamente necesitaría para así cubrir las pérdidas. Esto significa que, para los vehículos enchufables, se contabilizarán las emisiones WTW correspondientes a la energía eléctrica obtenida directamente de la red como:

$$Emisiones\ CO2eq\ (WTW)_{eléctrico} = \frac{710 \frac{gCO_2}{kWh} \cdot Electrical\ consumption}{0.90} \quad (4.1)$$

Como se observa, se puede considerar una eficiencia durante la recarga del 90%. Esta ecuación es válida para vehículos 100% eléctricos; si se tratase de vehículos híbridos enchufables, es necesario sumar, además, las emisiones WTW asociadas al motor de combustión y que se calcularán como:

$$Emisiones\ CO2eq\ (WTW)_{combustión} = \frac{306 \frac{gCO_2}{kWh} \cdot PCI_{Diesel} \cdot \rho_{Diesel} \cdot Fuel\ Consumption}{100} \quad (4.2)$$

Donde:

- $PCI_{Diesel} = 11.944 \frac{kWh}{kg Diesel}$ (según el IDAE)
- $\rho_{Diesel} = 0.85 \frac{kg}{L}$
- $Fuel\ consumption \equiv$ Consumo de combustible expresado en L/100km

En la siguiente figura, se muestra la comparación de emisiones de CO₂ equivalente (WTW) entre arquitecturas para la Línea 253:

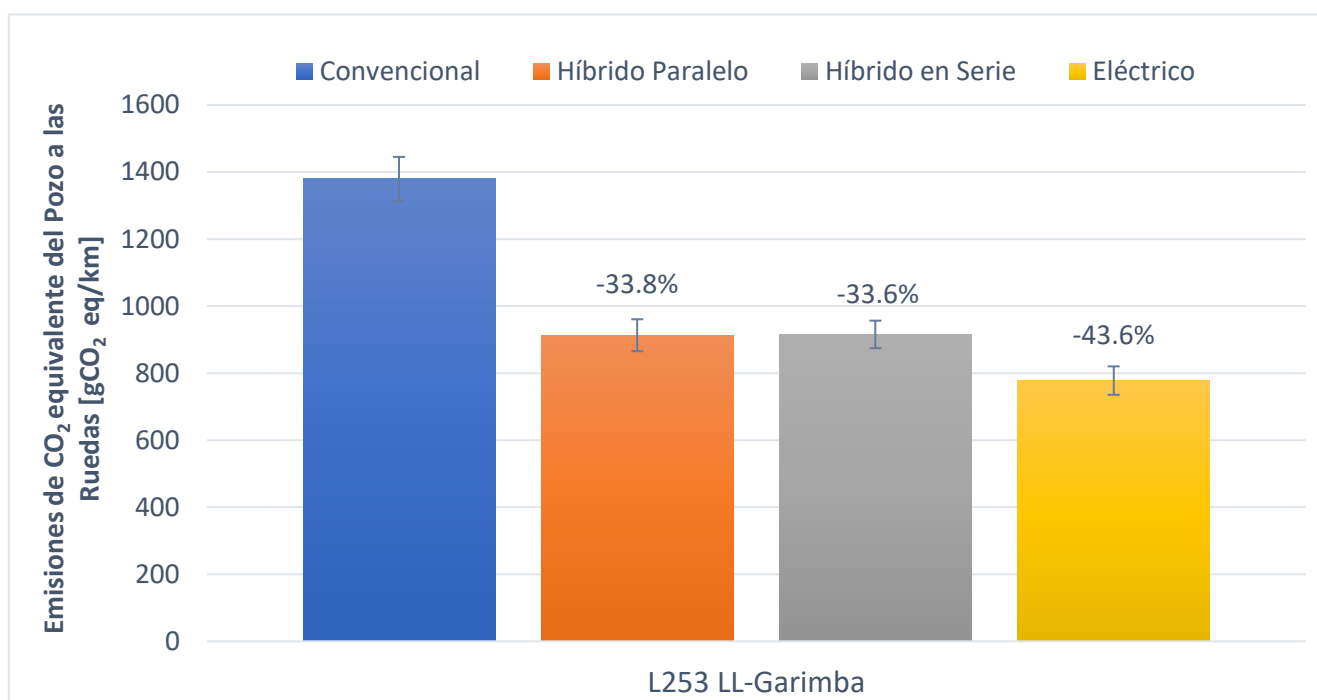


Figura 4.9 Comparación de emisiones de CO₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 253 LL-Garimba. Fuente Propia.

Las emisiones del “Pozo a las Ruedas” (WTW) del vehículo convencional para esta ruta se estiman en 1378gCO₂/km. Las arquitecturas híbridas y 100% eléctrica logran reducirlas en distintas magnitudes.

En cuanto al vehículo híbrido en paralelo se obtiene una reducción en emisiones del 33.8% como consecuencia de la asistencia del motor eléctrico en las aceleraciones y el apagado del motor durante los “periodos al ralentí”. La mejora resulta algo inferior en el caso del híbrido en serie (33.6%) a pesar de contar con un nivel de electrificación mayor. El motivo principal se encuentra en que a las emisiones de CO₂ directas del vehículo, se deben de sumar las emisiones WTW consecuencia de su consumo eléctrico de la red, que son elevadas debido al importante factor de CO₂ de la red.

A pesar de ello, la mayor reducción en consumo se consigue con el vehículo eléctrico, ya que elimina el motor de combustión y se beneficia de la conducción urbana. En este caso, la reducción obtenida es del 43.6%.

De este modo, se concluye que la configuración 100% eléctrica es la más adecuada para operar en ciudad, ya que reduce notablemente las emisiones y proporciona el menor consumo energético posible aprovechando la regeneración en frenada las velocidades medias bajas, contando con una autonomía suficiente para cubrir al menos un viaje de ida y vuelta en la línea contando con tiempo suficiente para realizar recargas de oportunidad, cuya justificación más detallada se encontrará en el capítulo 5 *Estudio eléctrico. Consumo, emisiones y autonomía*.

4.2 Línea 110 Santa Cruz – Costa Adeje

A continuación, se muestra el análisis de resultados para la Línea 110 Santa Cruz – Costa Adeje sobre los modelos diseñados para este tipo de ruta en base a las observaciones expuestas en el siguiente subapartado.

4.2.1 Configuraciones modeladas para la Línea 110. Elección inicial de la capacidad de batería para la guagua 100% eléctrica

La Línea 110 representa una conducción de larga distancia y con velocidades medias-altas, lo que ha hecho que el modelo 100% eléctrico diseñado no sea capaz de cumplir con las exigencias cuando se considera una situación desfavorable de 100% de carga de pasajeros y aire acondicionado encendido, lo que es bastante frecuente en esta ruta al cubrir la zona sur de la isla (más calurosa). Además, el modelo híbrido en serie necesitaría arrancarse dentro de ciudad en algún momento del servicio para mantener el nivel de batería. Esto indica que la batería de 30kWh, empleada en ambos modelos, resulta insuficiente para esta ruta.

En las Figuras 4.10 y 4.11 se muestra la operación del híbrido en serie y del vehículo 100% eléctrico durante 6 viajes en la Línea 110, de modo que se aprecian los problemas comentados.



Figura 4.10 Operación del vehículo híbrido en serie anterior en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCI (azul). Fuente Propia

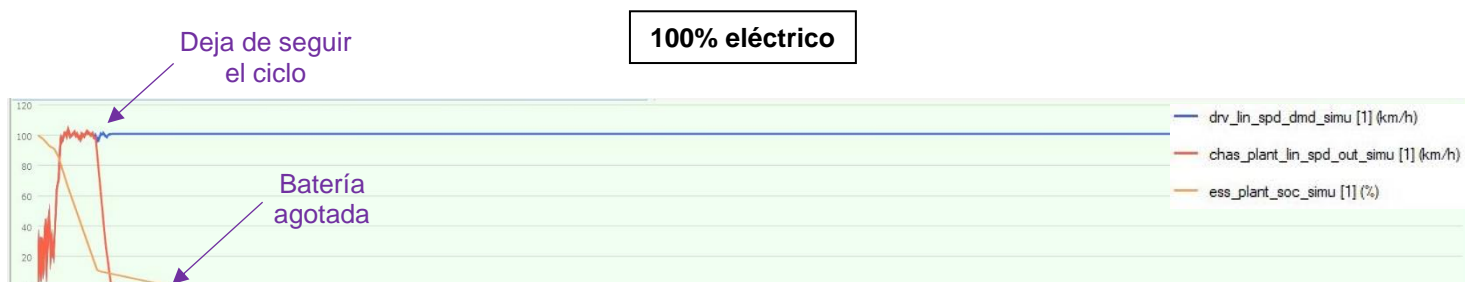


Figura 4.11 Operación del vehículo 100% eléctrico anterior en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y perfil de velocidad de demanda (azul). Fuente Propia.

Como se puede ver, el vehículo híbrido en serie cuenta con una batería demasiado pequeña, y unas prestaciones de motor que llevan a que la batería se descargue rápidamente, haciendo necesario que el MCI se arranque dentro de ciudad. Por esta razón, se ha aumentado la batería a 50kWh y las potencias máximas del MCI y motor eléctrico según se muestra en el resumen de características de los vehículos empleados para esta ruta (disponible en la Tabla 4.3) para que esto no ocurra.

Por otro lado, en la Figura 4.11 se observa claramente que la batería del vehículo eléctrico es insuficiente para completar el ciclo. Tras los estudios realizados se ha comprobado que una batería de 286kWh es necesaria para completar al menos un viaje de ida y vuelta en esta ruta, lo que ya supone emplear una batería de casi 300kWh; relativamente grande si se compara con el resto y se tiene en cuenta que es instalada en una guagua de pequeña longitud (10.6m). El incremento de peso que supone emplear esta batería (3.2 toneladas adicionales) también hace necesario aumentar la potencia máxima del motor en 60kW para que trabaje de forma adecuada.

Tabla 4.3 Parámetros propios de cada configuración para la Línea 110

Sistema	Parámetro	Vehículo			
		Convencional	Híbrido en Paralelo	Híbrido en Serie	Eléctrico
Dinámica vehicular	Peso en vacío [kg]	10806.1 ⁽¹⁾	11074.8 ⁽¹⁾	11230.1 ⁽¹⁾	13628.8 ⁽¹⁾
Motor de combustión interna (MCIA)	N.º Cilindros	6	4	4	-
	Volumen desplazado [L]	6.7	5.1	5.1	-
	Potencia Máxima [kW]	208.8	179	200	-
	Par Máximo [Nm]	857	735	821	-
Motor eléctrico (E-motor)	Potencia Máxima [kW]	-	107	230	280
	Potencia Continua [kW]	-	53	134	163
	Par Máximo [Nm]	-	252	624.8	760.7
	Tiempo para el cual se obtiene Par Máximo [s]	-	60	60	60
Batería de Tracción	Tipo de Batería	-	Ion-litio	Ion-litio	Ion-litio
	Capacidad total de la batería [kWh]	-	10	50	286 ⁽²⁾
Accesorios	Carga accesorios mecánicos [kW]	5 ⁽³⁾	0	0	0
	Carga accesorios eléctricos [kW]	0	5 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾
Transmisión	Relación de engranajes de la transmisión	Automática: 3.49/1.86/1.41/1 /0.75/0.65	Automática: 3.49/1.86/1.41/1 /0.75/0.66	Manual: 1.86/1	Relación Trans. Única: 2.5
Diferencial	Relación del eje trasero	3	5.13	11.763	4.704

Fuente Propia

(1) Peso estimado en función de los componentes.

(2) Capacidad de batería mínimo para completar un viaje de ida y vuelta con una reserva de SOC del 20%

(3) Se considera como una carga constante de 5kW. Si se considera que el aire acondicionado se encuentra encendido, se empleará en su lugar 8kW.

Si se comparan las características de las configuraciones modeladas para la Línea 110 con aquellas modeladas para la Línea 253, se puede observar que tanto el modelo convencional como el híbrido en paralelo son iguales en ambos casos, ya que se ha podido comprobar que son perfectamente capaces de seguir el ciclo en ambas líneas. En cambio, para las configuraciones híbrida en serie y 100% eléctrica, ha sido necesario realizar algunas modificaciones.

En cuanto al híbrido en serie, se ha incrementado el tamaño de batería desde los 30kWh hasta los 50kWh, lo que ha supuesto una optimización para evitar que el motor de combustión se arrancara dentro de ciudad al cabo de un cierto número de ciclos y opere exclusivamente fuera de ciudad. Además, se ha comprobado que tanto el motor de combustión como el eléctrico, trabajan la mayor parte del recorrido en tramo extraurbano a plena carga, es por ello que se ha decidido escalar la potencia máxima de ambos motores evitando que trabajen con elevadas exigencias.

La potencia máxima del MCIA se ha escalado desde los 179kW hasta los 200kW, mientras que la potencia máxima del eléctrico ha pasado de 220kW a 230kW.

Por otro lado, tal y como se explicó anteriormente, el vehículo eléctrico con batería de 30kWh no proporciona una autonomía suficiente para completar el ciclo. Como consecuencia se ha seleccionado una batería de 286kWh que permite completar un viaje de ida y vuelta sin necesidad de recargar, es decir, que permite cubrir al menos 160km con una reserva del 20% de carga. La siguiente tabla muestra la autonomía obtenida a partir de las simulaciones de este vehículo:

Tabla 4.4 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 286kWh en la Línea 110

Condición	Estado inicial de carga de la batería [%]	Delta de SOC [%]	Nº Ciclos recorridos	Nivel de carga restante al final de cada ciclo [%]	Autonomía mínima objetivo [km]	Autonomía alcanzada [km]
100% pasajeros + AC encendido	100	-34.24	1	65.76	160	183.7
			2	31.52		
			3	No completa		

Fuente Propia

Como se puede comprobar, la batería de 286kWh, supera claramente el objetivo, por lo que este ha sido el tamaño de batería seleccionado para el vehículo 100% eléctrico en la Línea 110.

El aumento de peso que introduce el empleo de esta batería implica la necesidad de aumentar la potencia máxima del motor eléctrico que impulsa el vehículo. En concreto, se ha aumentado desde los 220kW hasta los 280kW.

De este modo, quedan definidas las distintas configuraciones que se proceden a comparar en el siguiente apartado.

4.2.2 Comparación de consumos, emisiones de CO₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones

A continuación, se presenta la comparación en consumo, emisiones y eficiencia entre los distintos modelos analizados comenzando por la comparación en consumo de combustible equivalente mostrada en la siguiente figura:



Figura 4.12 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia

Como se puede apreciar en la Figura 4.12, el beneficio de las arquitecturas híbridas desaparece en perfiles de conducción dominados por conducción extraurbana como es el caso de la Línea 110. El motivo se encuentra en la penalización que supone el peso añadido de la hibridación en vehículos y las menores oportunidades de regeneración en frenada (periodos estacionarios muy largos con pocas frenadas). Además, el vehículo convencional opera con mucha mejor eficiencia en ciclos de conducción extraurbano como se muestra posteriormente, por lo que el nivel de reducción era de esperar que fuera pequeño. Incluso tal y como se muestra, la hibridación puede resultar hasta desfavorable en cuanto a consumo.

El peso adicional del vehículo híbrido en paralelo respecto al convencional es de 2.5%, mientras que en el híbrido en serie es del 3.9%, nada despreciable.

Comparando los resultados de consumo, se obtiene un valor de 27.7L/100km para el vehículo convencional. La configuración híbrida en paralelo arroja un consumo muy similar de 27.2L/100km, lo que solo supone una reducción solo el 2%, lo que implica que, en cuanto a consumo, su uso en este tipo de rutas se encuentra injustificado.

Por otro lado, destaca el aumento de consumo que supone el híbrido en serie; un 11.3% más que el vehículo convencional (30.9L/100km). La causa por la que la diferencia ha resultado tan notable se encuentra no solo asociado a las pérdidas de las condiciones en que se benefician este tipo de vehículos, sino también en el hecho de que el motor de combustión interna se encuentra arrancado prácticamente el 90% de la distancia total del ciclo, pues durante dicho tiempo la velocidad es superior a 50km/h. Esto supone cerca de 70km de recorrido en los que el motor de combustión puede alimentar la batería para realizar su recarga. A raíz de las simulaciones realizadas, se observa que no sería necesario que el motor de combustión estuviera operando tanto tiempo, pues si se considera una carga de accesorios de 5kW y 50% de carga de pasajeros, se obtiene una diferencia del 12% de nivel de carga entre el inicial y final del ciclo que se recupera fácilmente en el siguiente viaje del vehículo tal y como se puede apreciar en la Figura 4.13, donde se simulan 6 viajes en la Línea 110.

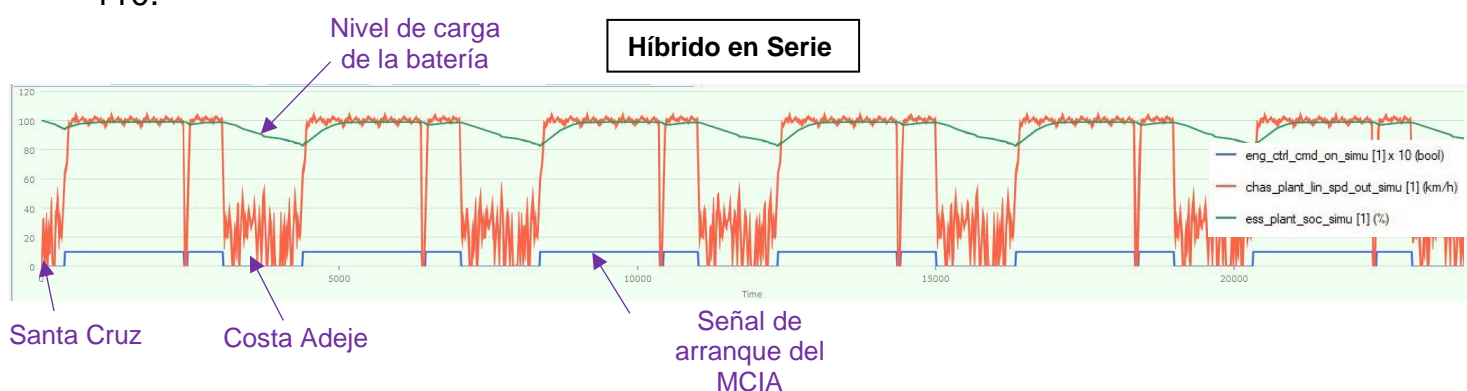


Figura 4.13 Operación del vehículo híbrido en serie en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia

Se observa que, en el primer tramo urbano dentro de Santa Cruz, la batería se descarga aproximadamente un 5%, que es rápidamente recuperado en el tramo extraurbano donde el motor de combustión mantiene el nivel de SOC en un 98% durante el tiempo posterior. La siguiente descarga de batería más notable, se produce en Costa Adeje; un 12%, pero sigue siendo fácil de recuperar por el modelo. Por lo tanto, se concluye que no es necesario que el motor de combustión permanezca tanto tiempo arrancado, al menos no durante los dos primeros viajes, aprovechando al máximo el mayor tiempo de conducción en modo 100% eléctrico y reduciendo el consumo y las emisiones en las primeras horas de servicio. Seguidamente, el vehículo debería de mantener un perfil de descarga periódico el resto del día.

En lo que respecta al vehículo 100% eléctrico, es el que logra una mayor reducción en consumo respecto al convencional (57.4%). La principal causa se encuentra en que la tracción es puramente eléctrica y prescinde de un motor de combustión. Además, su motor opera con una eficiencia mayor al del vehículo convencional (85% frente al 35%), lo que se traduce en una considerable reducción en consumo. No obstante, le penaliza la autonomía y las emisiones WTW tal y como se podrá comprobar posteriormente.

A continuación, se muestran los resultados de consumo expresados en términos energéticos (medida habitual en vehículos híbridos y eléctricos).

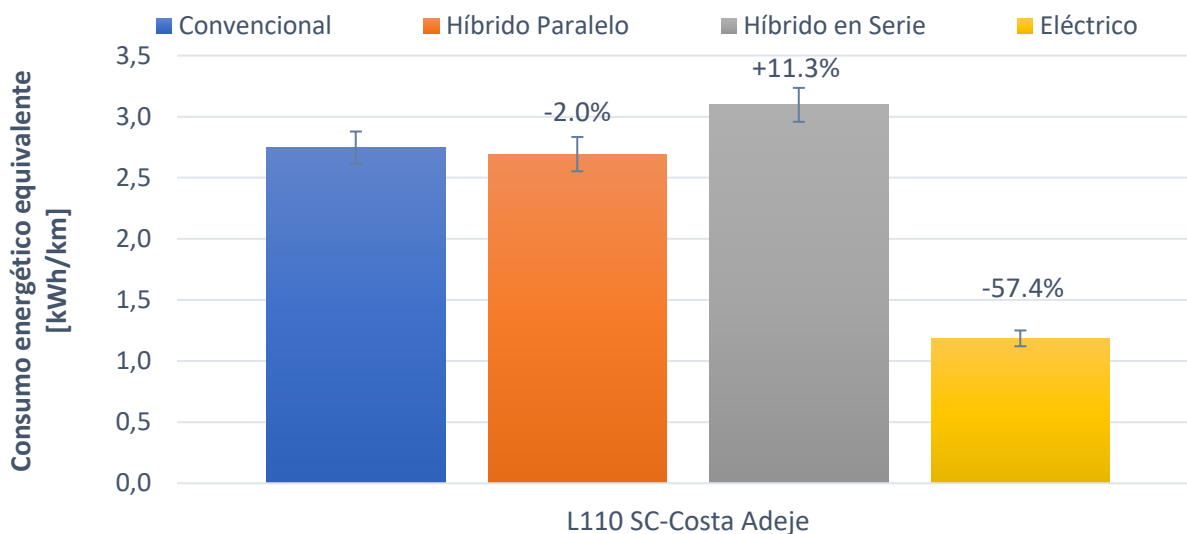


Figura 4.14 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia

Por otro lado, y como se comentó, en este tipo de ciclos desaparece la ventaja que introduce la regeneración en frenada respecto a un ciclo urbano como el de la Línea 253. En la Figura 4.15 mostrada debajo, se presenta la comparación en energía recuperada entre configuraciones y ciclos.

A la vista de los resultados, se observa que los vehículos 100% eléctrico e híbrido en paralelo son capaces de regenerar algo más de energía en el ciclo de la Línea 110 que en la Línea 253, en concreto 0.31kWh y 0.08kWh adicionales respectivamente. No obstante, esta diferencia no es muy grande si se aprecia que el ciclo de la Línea 110 es 10 veces más largo que el de la Línea 253. Al ser más largo, se esperaría una mayor regeneración en frenada, pero esto no es así. Las menores oportunidades existentes son el motivo de que ello no ocurra.

En cuanto al híbrido en serie, recupera bastante menos energía que en el ciclo de la Línea 253, unos 1.30kWh, acentuando además su diferencia con el vehículo 100% eléctrico y situándose por debajo del híbrido en paralelo respecto a capacidad de regeneración. Esto se debe a que el motor de combustión interna del híbrido en serie se encuentra arrancado la mayor parte del tiempo, y prácticamente por sí solo es capaz de ocasionar un delta de SOC mínimo entre el inicio y final del ciclo. Por tanto, buena parte de la energía que se podría recuperar en frenada es disipada.

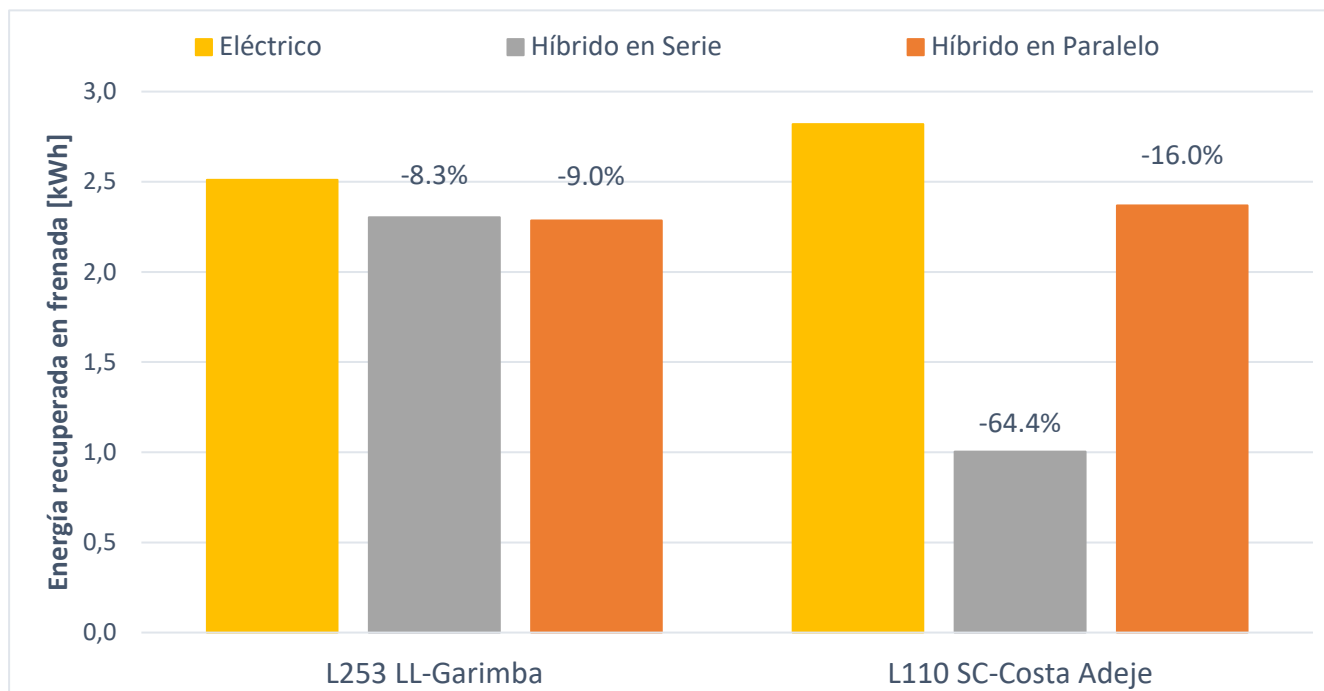


Figura 4.15 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en la Línea 253 y 110. Fuente Propia

Por otro lado, resulta interesante comparar las eficiencias medias con las que trabajan los motores de cada configuración para esta nueva ruta, ya que sus características son completamente distintas a las del ciclo anterior. En la Tabla 4.5 se muestra la comparativa entre ellos:

Tabla 4.5 Comparación de valores de eficiencia media entre las Líneas 253 y 110

Arquitectura	Estado inicial de carga de la batería [%]	Eficiencia media [%]	
		Línea 253	Línea 110
Convencional	MCIA	28.9	35.8
Híbrido en Paralelo	MCIA	38.5	40.3
	Motor eléctrico	86.9	84.5
Híbrido en Serie	MCIA	39.3	38.3
	Motor eléctrico	85.4	86.6
Eléctrico	Motor eléctrico	85.0	86.7

Fuente Propia

Como se puede observar en la Tabla 4.5, las características del ciclo tienen un mayor impacto sobre la eficiencia media del vehículo convencional. En su caso, se obtiene una mejora respecto a la Línea 253, desde el 28.9% al 35.8%, lo que implica que su consumo se reduzca y se estreche la diferencia con las configuraciones híbridas y

100% eléctrica, en las que la mejora no es tan notable, ya que están diseñadas para trabajar con motores en puntos de altas eficiencias.

La menor diferencia obtenida también se refleja en la autonomía u horas equivalentes de servicio que proporciona cada configuración. En la siguiente figura se muestra la comparación correspondiente al igual que se mostró para la Línea 253:

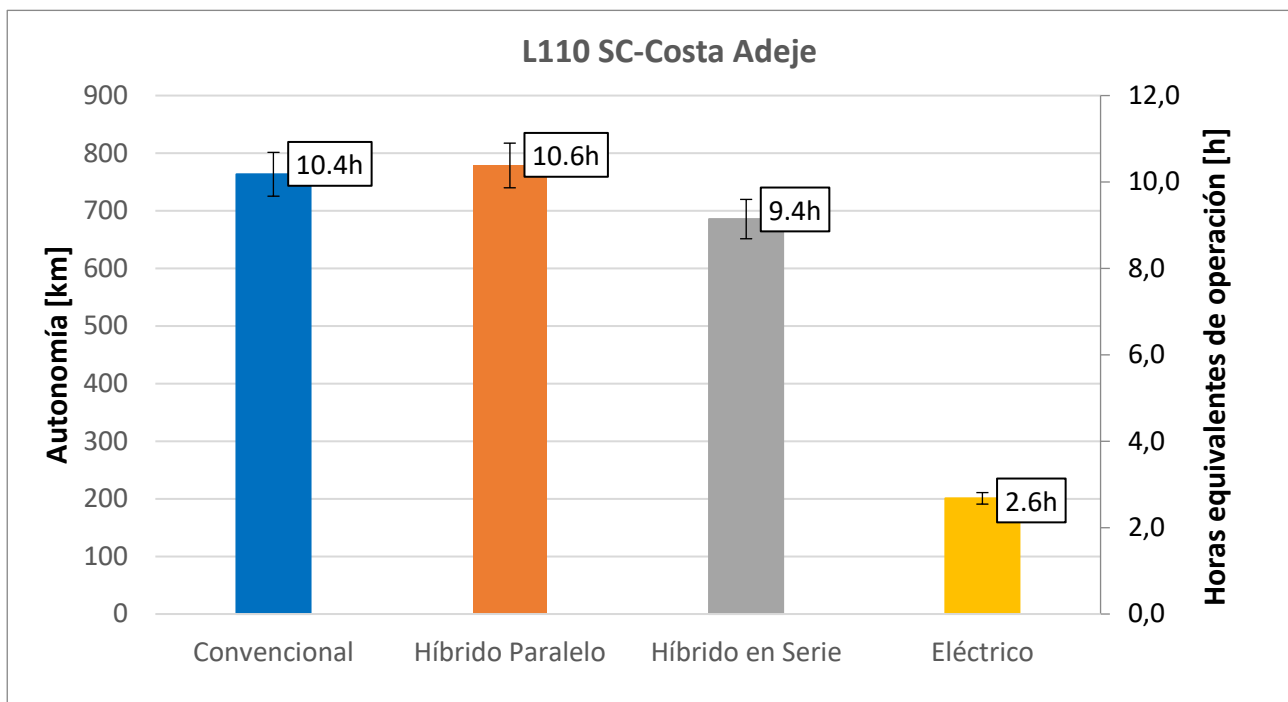


Figura 4.16 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.

Como se puede apreciar en la Figura 4.16, la diferencia en cuanto a autonomía es pequeña entre el modelo convencional y las configuraciones híbridas; en concreto, se obtienen 763km para el vehículo convencional, 779km para el híbrido en paralelo y 686km para el híbrido en serie. Por otro lado, la configuración 100% eléctrica apenas proporciona una autonomía de 163km, lo que solo supone unas 2h de servicio antes de que sea necesaria su recarga.

En el caso del vehículo 100% eléctrico, se ve seriamente perjudicado por la falta de oportunidades de regeneración en frenada y las largas distancias a alto grado de carga. De acuerdo con la comparación, sería el único vehículo que necesitaría recargar entre servicios empleando la estrategia de carga de oportunidad a pesar de que su batería es relativamente grande (cerca de 300kWh). Esto indica que una carga convencional no es viable en esta ruta, pues se requeriría un tamaño de batería inalcanzable en la actualidad, que tampoco se podría instalar debido a la falta de espacio.



Figura 4.17 Operación del vehículo 100% eléctrico en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Nivel de carga de la batería (amarillo), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandada (azul). Fuente Propia

Tal y como puede verse en la figura, el vehículo eléctrico no es capaz de regenerar energía suficiente como para evitar el continuo descenso del nivel de carga de la batería ciclo tras ciclo, lo que sugiere que no es un ciclo adecuado para este tipo de vehículo.

A continuación, se estudia el nivel de emisiones de cada configuración para esta línea con vistas a cuantificar el grado de reducción con respecto a la configuración convencional. La Figura 4.18 muestra los valores de emisiones WTW obtenidos:

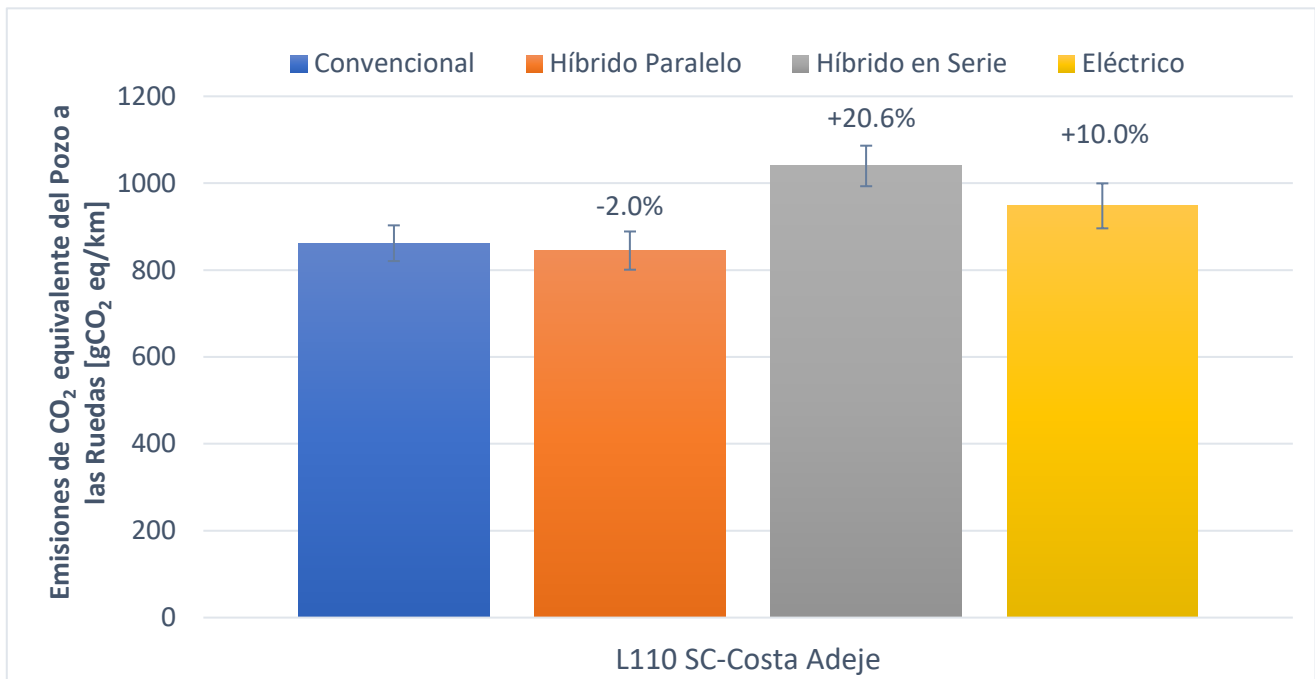


Figura 4.18 Comparación de emisiones de CO₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.

Como se puede apreciar en la figura anterior, con el actual *mix* energético en la isla de Tenerife, se obtienen mayores emisiones de CO₂ equivalentes con las configuraciones híbridas y eléctricas que con la convencional, lo que significa que el sistema de generación eléctrica en la isla hace muy difícil que se consiga reducir las emisiones en rutas de larga distancia y alta velocidad media.

En el caso del vehículo convencional, se estiman sus emisiones en 846gCO₂/km (“del Pozo a las Ruedas, WTW”). Al operar en puntos de buena eficiencia, resulta que las emisiones del híbrido en paralelo solamente se reducen en un 2.0%. En cambio, para los vehículos híbrido en serie y eléctrico se obtiene un aumento en el nivel de emisiones del 20.6%, y del 10.0% respectivamente.

El motivo principal por el que el vehículo eléctrico genera menos emisiones que el híbrido en serie, se debe a que este último contribuye en emisiones tanto con su motor de combustión como con la energía que obtiene de la red con un factor de emisiones WTW de 710gCO₂/km.

Por tanto, del estudio sobre la Línea 110, se concluye que la configuración híbrida en paralelo no proporciona ninguna mejora si se compara con el vehículo convencional, pues la mayor parte del tiempo el vehículo es propulsado, únicamente, por el motor de combustión que trabaja con eficiencia similar al del convencional y las oportunidades de regeneración en frenada son pequeñas, por lo que no resulta una arquitectura adecuada para este tipo de líneas. En cuanto al modelo híbrido en serie, penaliza notablemente en consumo y emisiones, ya que el motor de combustión está arrancado prácticamente todo el tiempo para recargar la batería. De hecho, considerando únicamente el consumo de su motor de combustión, resulta de 32.9L/100km mientras que el del convencional es de 27.7L/100km, a lo que se debe añadir el consumo eléctrico con procedencia de la red en el híbrido en serie, lo que contribuye notablemente a las emisiones. No obstante, es la única configuración que proporciona una autonomía similar al vehículo convencional, pero sin emisiones directas dentro de ciudad, por lo que resulta una opción a valorar a corto-medio plazo.

Por otro lado, el vehículo 100% eléctrico, a pesar de proporcionar una reducción en consumo considerable, el *mix* energético de la isla provoca que sus emisiones resulten superiores a las del vehículo convencional, y además, su autonomía es muy corta a pesar de contar con una batería de gran capacidad, lo que obligaría a realizar numerosas recargas de oportunidad al día, lo que probablemente suponga sobredimensionar la flota con un mayor número de guaguas asociadas a la ruta, entre otros inconvenientes. Su uso únicamente estaría justificado si se consigue disponer de puntos de recarga suficientes, con recargas rápidas, una red eléctrica estable y procedencia de la energía 100% renovable.

Así pues, de entre los modelos analizados, resulta que el híbrido en serie es en la actualidad el más adecuado como sustituto al convencional en rutas de larga distancia, por el hecho de no contaminar dentro de ciudad y proporcionar una autonomía suficiente para operar todo el día sin necesidad de recarga.

4.3 Línea 015 Santa Cruz – La Laguna

Seguidamente, se muestra el análisis de resultados para una de las líneas más singulares de la isla de Tenerife; la Línea 015 Santa Cruz – La Laguna. La presencia de un gradiente de carretera importante y la presencia de conducción extraurbana han hecho necesario definir nuevos modelos que se exponen en el siguiente subapartado.

4.3.1 Dificultades de los vehículos para seguir la ruta. Creación de nuevos modelos.

Basado en la experiencia y las simulaciones realizadas con los modelos base creados para cada arquitectura, se ha podido confirmar que para la Línea 015 se requieren de vehículos con prestaciones superiores a las exhibidas en líneas anteriores. El motivo se encuentra en que la ruta en el sentido ascendente de la Línea (dirección Santa Cruz – La Laguna) cuenta con un gradiente de carretera positivo y conducción en autopista, lo que representa una demanda elevada de par que, en principio, debería poder ser capaz de entregar incluso cuando la guagua se encuentra completamente llena de pasajeros, lo que es muy frecuente al tratarse de la línea principal que une dos de los núcleos urbanos más poblados de la isla (Santa Cruz y La Laguna). Como se ha podido comprobar, las guaguas convencionales que operan en esta línea suelen contar con potencias superiores a los 400CV y trabajan a plena carga la mayor parte del recorrido en autopista, lo que da una idea de lo exigente que llega a ser el ciclo. Es por ello por lo que la obtención de modelos y posterior análisis es tan importante para esta línea.

La siguiente figura muestra los resultados de simulación (perfil de velocidades demandados y alcanzados) para la Línea 015 (considerada como un viaje completo de ida y vuelta) para cada una de las configuraciones originales establecidas como base, cuyas características se mostraron en las Tablas 3.1 y 3.2.

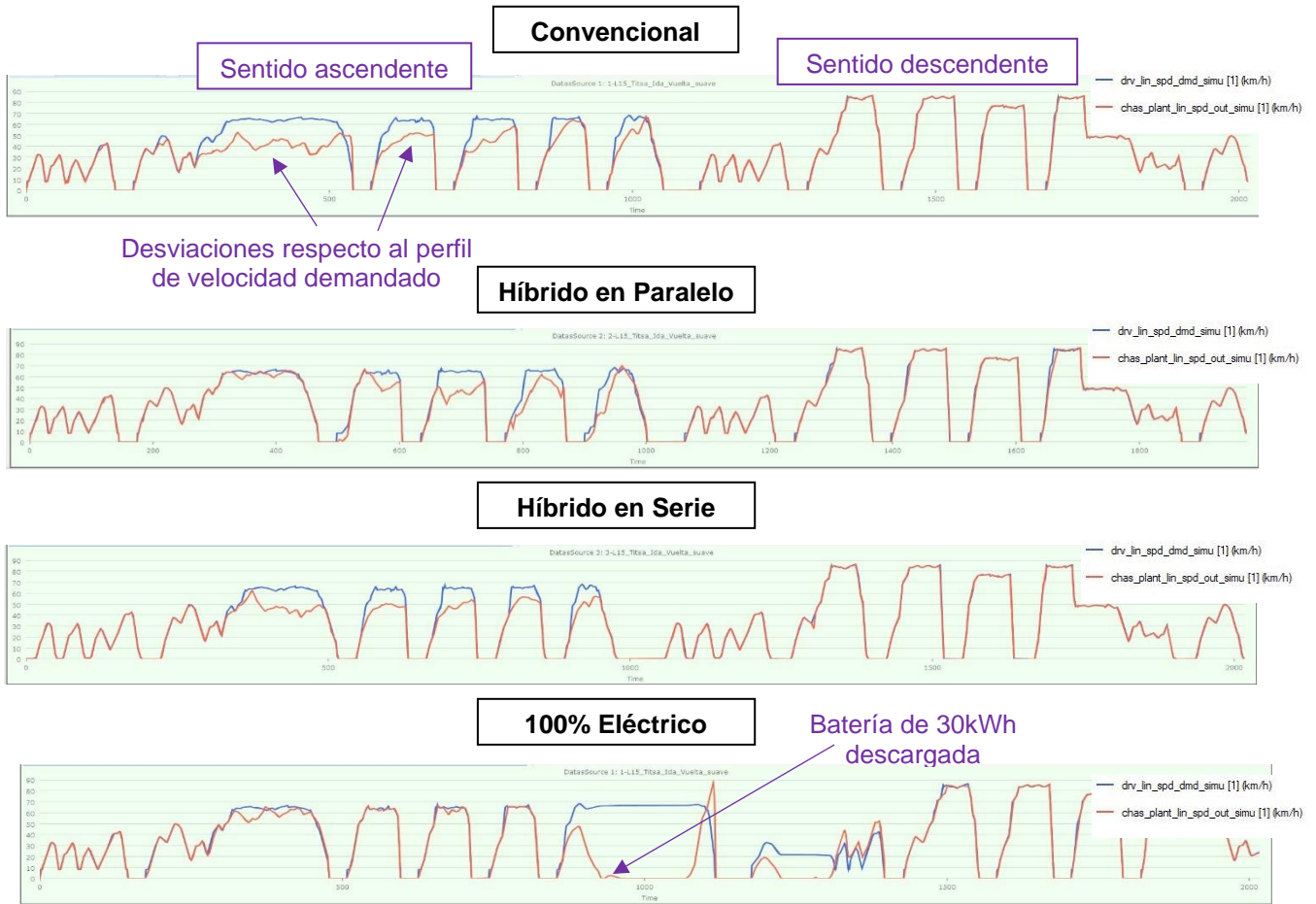


Figura 4.19 Resultado de simulación para las configuraciones base de cada arquitectura en el ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta). Perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandado (azul). Fuente Propia.

Al ejecutar las correspondientes simulaciones se comprueba que ninguno de ellos es capaz de seguir el perfil de velocidad que se demanda para la ruta (curva roja en la Figura 4.19). En el caso de los vehículos convencional, híbrido en paralelo e híbrido en serie el problema se encuentra principalmente asociado a una potencia escasa. Además, se ha observado que aumentar la relación de transmisión de cada una de las marchas de la caja de cambios, o acoplador de par (*torque coupler*) si la relación de transmisión es única, ayuda a alcanzar las aceleraciones demandadas y, por tanto, la velocidad objetivo en cada instante. Igualmente, modificar la relación de transmisión del diferencial tiene un impacto sobre la capacidad del modelo para seguir el ciclo.

En cuanto al modelo 100% eléctrico, parece que no presenta dificultades significativas para seguir el ciclo en el sentido ascendente (que es el de mayor demanda) hasta que alcanza los últimos metros de dicho viaje como consecuencia de que la batería de 30kWh alcanza el valor mínimo de carga que fija el programa por seguridad (un 10%). Se observa, de este modo, que en unos 8.5km de ruta en sentido ascendente, la guagua consume casi 30kWh de energía; un coche compacto con la misma capacidad de batería es capaz de proporcionar unos 200km de

autonomía, por lo que se observa que en el consumo de las guaguas en esta ruta es muy elevado. La solución pasa por aumentar el tamaño de batería, lo que también ha hecho necesario aumentar la potencia de su motor para compensar el aumento de peso del vehículo, en concreto, se ha optado por construir dos modelos, uno con una batería de 50kWh de capacidad total, y otro con una batería de casi 300kWh; el primero se corresponde con una estrategia de carga de oportunidad, mientras el segundo representa un tamaño de batería grande con las expectativas de no tener que recargar el vehículo en todo el día y realizar una carga convencional. Posteriormente se podrá comprobar que esto ni siquiera es posible con este tamaño de batería, que posiblemente sea de los más grandes que se pueda instalar en esta guagua de pequeña longitud (10.6m).

En la siguiente tabla se reúnen los parámetros característicos de los modelos diseñados para esta línea (al igual que en las líneas anteriores, los parámetros comunes a todos ellos se mantienen inalterados con el fin de realizar una comparación equilibrada entre rutas).

Tabla 4.6 Parámetros propios de cada configuración para la Línea 015

Sistema	Parámetro	Vehículo				
		Convencional	Híbrido en Paralelo	Híbrido en Serie	Eléctrico Batería 50kWh	Eléctrico Batería 300kWh
Dinámica vehicular	Peso en vacío [kg]	10951.1 ⁽¹⁾	11157.8 ⁽¹⁾	11830.7 ⁽¹⁾	10694 ⁽¹⁾	13690.6 ⁽¹⁾
Motor de combustión interna (MCIA)	N.º Cilindros	6	4	4	-	-
	Volumen desplazado [L]	6.7	5.1	5.1	-	-
	Potencia Máxima [kW]	320	260	300	-	-
	Par Máximo [Nm]	1290	1067	1231	-	-
Motor eléctrico (E-motor)	Potencia Máxima [kW]	-	107	310	280	330
	Potencia Continua [kW]	-	53	223	163	237
	Par Máximo [Nm]	-	252	1332	1203	1417.7
	Tiempo para el cual se obtiene Par Máximo [s]	-	60	60	60	60
Batería de Tracción	Tipo de Batería	-	Ion-litio	Ion-litio	Ion-litio	Ion-litio
	Capacidad total de la batería [kWh]	-	10	50	50 ⁽²⁾	286
Accesorios	Carga accesorios mecánicos [kW]	5 ⁽³⁾	0	0	0	0
	Carga accesorios eléctricos [kW]	0	5 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾	5 ⁽³⁾
Transmisión	Relación de engranajes de la transmisión	Automática: 7.72/4.42/2.66/1.79/1.28/1	Automática: 7.72/4.42/2.66/1.79/1.28/1	Manual: 1.86/1	Relación Trans. Única: 3.2	Relación Trans. Única: 3.2
Diferencial	Relación del eje trasero	5.362	5.362	11.763	3	3

Fuente Propia

(1) Peso estimado en función de los componentes.

(2) Capacidad de batería mínimo para completar un viaje de ida y vuelta con una reserva de SOC del 20%

(3) Se considera como una carga constante de 5kW. Si se considera que el aire acondicionado se encuentra encendido, se empleará en su lugar 8kW.

Analizando detenidamente la tabla anterior, se puede apreciar los cambios realizados respecto a los modelos base. En el caso de los vehículos convencional e híbrido en paralelo, se ha aumentado la potencia máxima del motor de combustión desde los 208.8kW a los 320kW en el caso del primero; y de 179kW a 260kW en el caso del segundo, lo que representa aproximadamente 1.5 veces mayor potencia en ambos casos. Además, se ha incrementado la relación de transmisión de cada marcha en la caja de cambios, así como el del eje trasero (diferencial).

Por otro lado, del híbrido en serie tan solo se ha incrementado la potencia máxima de sus dos motores. En el caso del motor de combustión, se ha pasado de una potencia máxima de 179kW a 300kW, mientras que en el motor eléctrico se ha incrementado desde 220kW hasta 310kW, lo que supone un incremento de 1.7 y 1.4 veces la potencia base respectivamente.

En cuanto a los vehículos eléctricos, se ha incrementado la potencia máxima desde 220kW a 280kW en el caso del eléctrico de carga de oportunidad, y a 330kW en el caso del vehículo de batería de gran capacidad, lo que representa un incremento de 1.3 y 1.5 veces la potencia base respectivamente. Además, se ha optimizado la relación de transmisión en su acoplador de par (*torque coupler*) y en el eje trasero hasta encontrar una pareja de valores que permitiese seguir el ciclo con las mayores garantías. Así, se ha incrementado la relación en el acoplador de par desde 2.5 a 3.2, y se ha reducido la relación en el eje trasero desde 4.704 a 3.

Como resultado, todas las arquitecturas son capaces de seguir el ciclo con una desviación pequeña con respecto al perfil de velocidad de referencia (el valor máximo se ha alcanzado en el vehículo convencional con un valor de 7.8% estando la guagua completamente llena, es decir, con unas 4.5 toneladas de cargo; y con un valor de 4.3% cuando la guagua viaja al 50% de carga), lo que significa que en el resto de vehículos es incluso menor, siendo aceptable y permitiendo obtener datos de consumo, eficiencia y emisiones que representan con buen grado de aproximación la operación de los vehículos en esta línea. En la siguiente figura se muestra cómo los cambios realizados han permitido que los vehículos se ajusten al perfil de velocidad teórico demandado de forma adecuada, solventando así los problemas mostrados en la Figura 4.19.

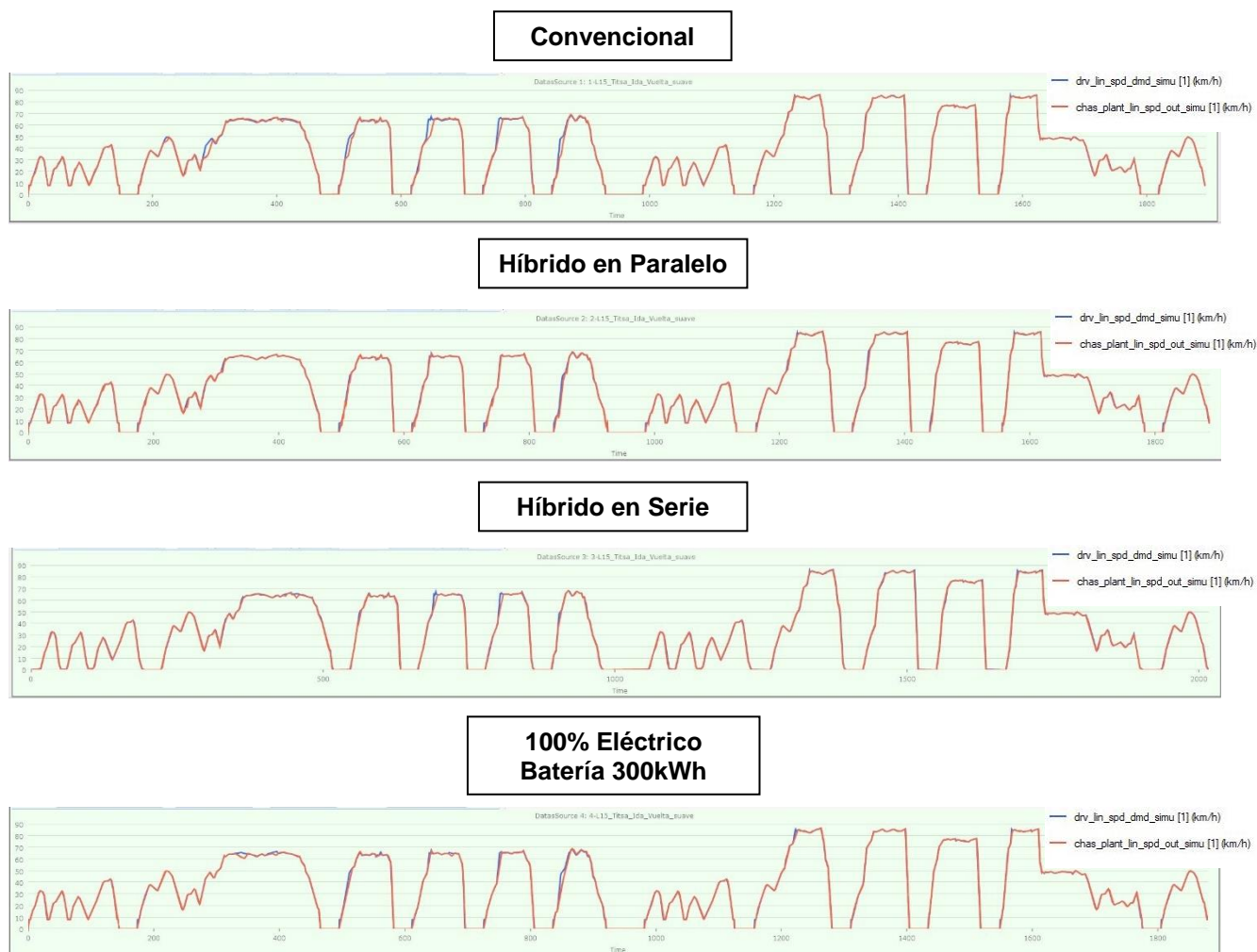


Figura 4.20 Resultado de simulación para las configuraciones modeladas en el ciclo de la Línea 015 (ida y vuelta). Perfil de velocidad del vehículo (rojo) y demandado (azul). Fuente Propia.

Se observa que, efectivamente, los problemas mostrados en la Figura 4.19 han sido solucionados. Cabe destacar que en adelante, se empleará el vehículo eléctrico con batería de, aproximadamente, 300kWh en lugar del eléctrico con batería de 50kWh, ya que como se muestra en la Tabla 4.7, tan solo proporciona autonomía para completar un viaje de ida y vuelta en una ruta que es relativamente corta y que exige de viajes rápidos entre Santa Cruz y La Laguna, que en ciertas horas del día se ve muy penalizada por el abundante tráfico, es por ello, que en esta ruta tan frecuentada no resulta viable una carga de oportunidad si no se sobredimensiona la flota.

Tabla 4.7 Autonomía alcanzada por el vehículo eléctrico con una batería de 50kWh en la Línea 015

Condición	Estado inicial de carga de la batería [%]	Delta de SOC [%]	Nº Ciclos recorridos	Nivel de carga restante al final de cada ciclo [%]	Autonomía mínima objetivo [km]	Autonomía alcanzada [km]
100% pasajeros + AC encendido	100	-55.74	1	44.26	18.8	21.9
			2	No completa		

Fuente Propia

Se comprueba que el vehículo eléctrico con batería de 50kWh solo puede completar un ciclo de ida y vuelta sin recargar, por lo que se descarta y se usa el vehículo con batería de 300kWh buscando maximizar la autonomía lo máximo posible.

4.3.2 Comparación de consumos, emisiones de CO₂ y eficiencia entre arquitecturas y configuraciones

A continuación, se muestra la comparación de resultados entre arquitecturas y configuraciones distinguiendo los resultados obtenidos en cada sentido de la ruta (ascendente y descendente), así como obteniendo resultados para el ciclo completo de ida y vuelta en su conjunto.

4.3.2.1 Análisis de la ruta en dirección SC-LL y en dirección LL-SC

Distinguiendo consumos en cada sentido de la línea se obtiene la siguiente figura, donde se comparan consumos de combustible equivalente:

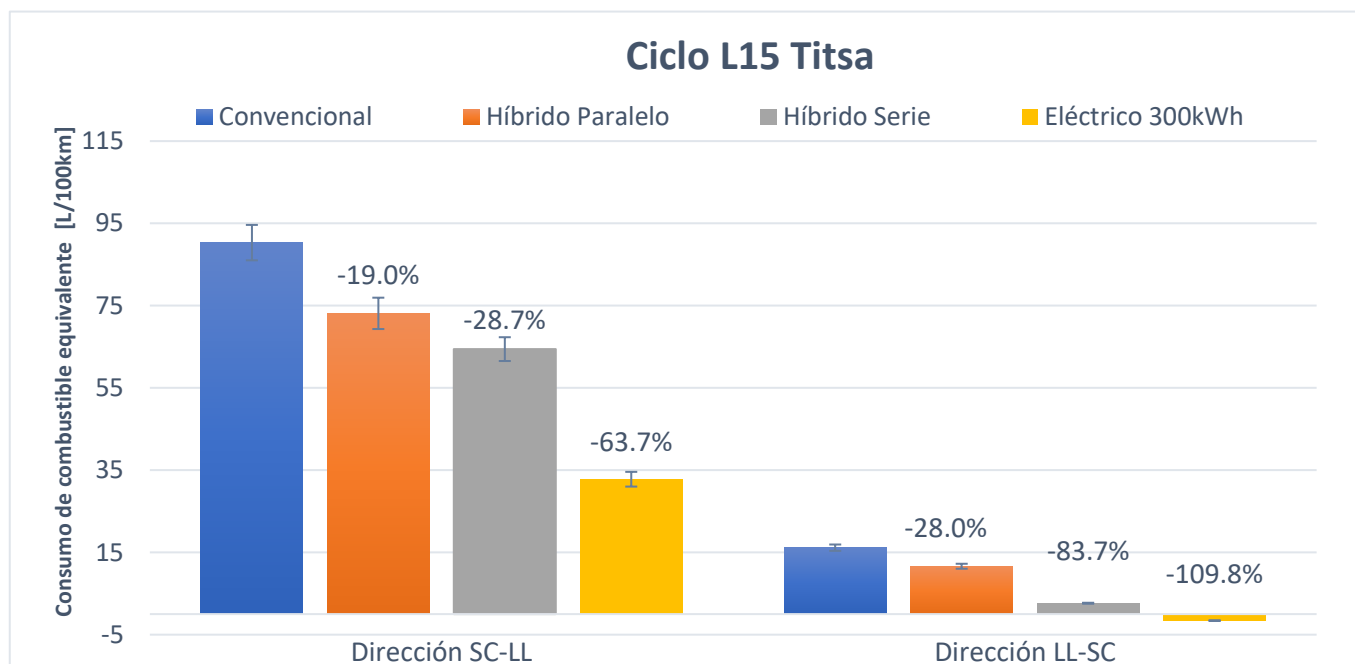


Figura 4.21 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 015 SC-LL en ambos sentidos de la ruta. Fuente Propia

Se aprecia que el programa es capaz de capturar el impacto del gradiente de carretera en el ciclo, pues se obtienen consumos de combustible mayores en el sentido ascendente (dirección SC-LL) que en el descendente (dirección LL-SC), lo que resulta lógico, pues en el primero, el peso del vehículo se opone a su movimiento, mientras que en el segundo, representa una ayuda al aprovechar la propia inercia del vehículo.

En cuanto a los resultados en el sentido ascendente, se observa una clara reducción en consumo a medida que aumenta el nivel de electrificación en las arquitecturas. En este caso, dado que la ruta presenta mayor número de aceleraciones, frenadas y paradas, y cuenta con velocidades medias-bajas, existe una mayor oportunidad para las arquitecturas híbridas y eléctricas de mejorar el consumo respecto al vehículo convencional si se compara con el ciclo anterior.

En este sentido de circulación, se estima el consumo de combustible de la arquitectura convencional en 90.3L/100km; consumo elevado que es debido al gradiente de carretera. Le sigue el vehículo híbrido en paralelo, con una reducción en consumo del 19.0% gracias a la asistencia del motor eléctrico en las aceleraciones, sobre todo, en aquellos tramos de mayor pendiente y debido a la energía regenerada en frenada. A continuación, se encuentra el híbrido en serie, que consigue una reducción del 28.7% debido a la circulación en modo 100% eléctrico dentro de Santa Cruz y La Laguna y a la operación eficiente. Finalmente, se encuentra el vehículo 100% eléctrico que proporciona la mayor reducción en consumo obtenida (63.7%). Esta reducción se encuentra asociada a la alta eficiencia de su motor eléctrico y su gran capacidad para regenerar energía en frenada, lo que también se ve favorecido por su elevado peso pues genera mayor momento y energía cinética.

En cuanto al sentido de circulación descendente, la tendencia en reducción de consumo es la misma. Destaca el hecho de que el vehículo 100% eléctrico permite conseguir una reducción del consumo de combustible por debajo de cero (-1.58L/100km), esto significa que la energía recuperada por el vehículo en frenada es superior a la energía consumida de la batería, lo que implica que el nivel de carga de la batería al final del ciclo, sea superior al inicial.

Sin embargo, debe de tenerse en cuenta que la simulación ha sido ejecutada considerando un 90% de carga inicial de la batería. Si en su lugar se hubiera tomado un 100% de carga, el beneficio que proporcionaría la regeneración en frenada desaparecería, pues la energía que se pudiera recuperar no cabría en la batería y sería necesario disiparla. En la siguiente figura se muestra la curva de descarga de la batería cuando el vehículo parte del 100% de carga y cuando lo hace con un 90%:

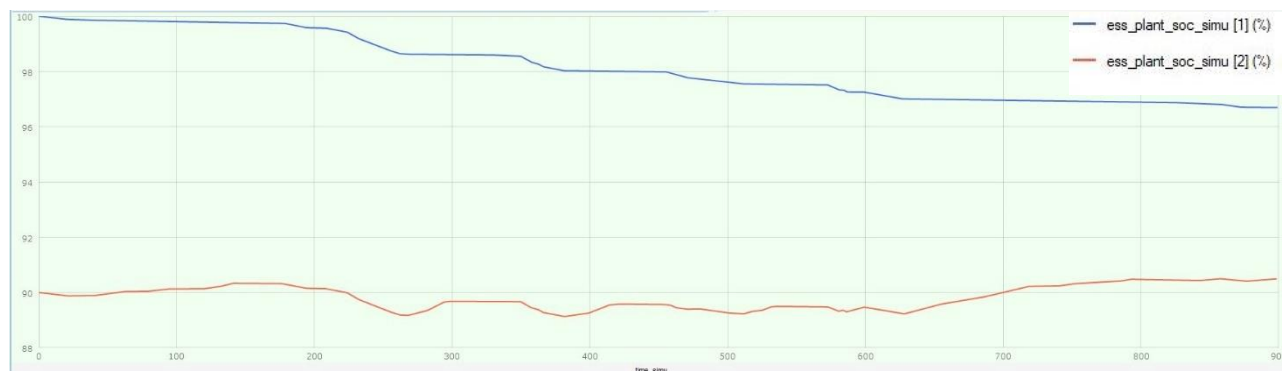


Figura 4.22 Comparación de curvas de descarga de la batería del vehículo eléctrico (300kWh) en la dirección LL-SC de la Línea 015 cuando el SOC inicial es del 100% (curva azul) y del 90% (curva roja).

Fuente Propia

Se observa claramente que para 100% de SOC inicial, la curva toma una tendencia descendente a lo largo del ciclo hasta alcanzar un nivel del 96.7%. En cambio, cuando se tiene un 90% de SOC inicial, se observa un cambio en el comportamiento, pues en lugar de producirse una descarga continua de la batería, se obtiene numerosos periodos en los que la carga aumenta, lo que significa que el vehículo está aprovechando mejor los eventos de regeneración de energía permitiéndole finalizar el ciclo con un nivel de carga incluso superior al valor inicial.

Esto significa que, si se espera que se realicen recargas en el Intercambiador de La Laguna, desde el punto de vista energético, resulta más eficiente detener la recarga al alcanzar el 90% que completar la carga hasta el 100%, ya que así, cuando realice su viaje hacia Santa Cruz, se aprovecharán los beneficios de la regeneración en frenada para reducir el consumo. En cambio, si la recarga se realiza en Santa Cruz, debido al gradiente positivo, dicho beneficio desaparece tal y como se comprueba en la Figura 4.23, por lo que resulta preferible realizar la recarga hasta el 100% e iniciar su viaje hacia La Laguna.

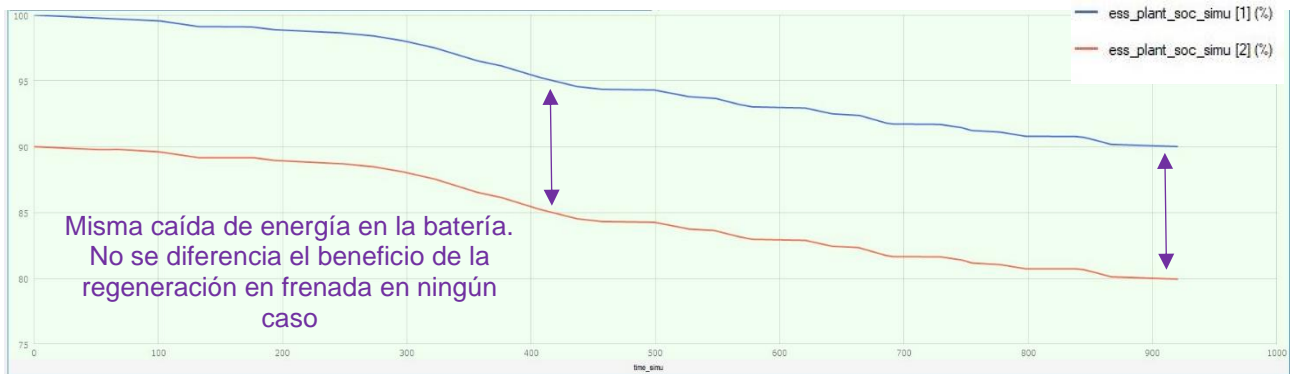


Figura 4.23 Comparación de curvas de descarga de la batería del vehículo eléctrico (300kWh) en la dirección SC-LL de la Línea 015 cuando el SOC inicial es del 100% (curva azul) y del 90% (curva roja). Fuente Propia

A continuación, se muestran los valores de consumo por arquitectura expresados en términos energéticos (kWh/km):

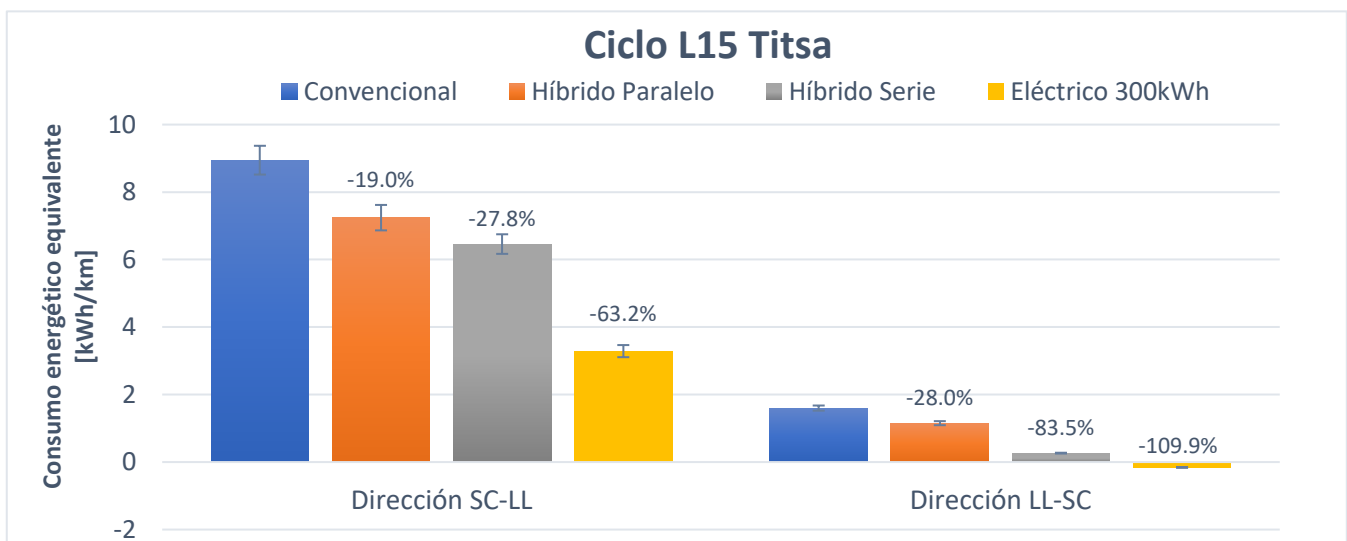


Figura 4.24 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 015 SC-LL en ambos sentidos de la ruta. Fuente Propia

Debido a la diferencia en consumo obtenida entre los dos sentidos de la línea, también se producirá distinto nivel de emisiones de CO₂ en cada uno. La siguiente figura compara las emisiones generadas por cada configuración y sentido.

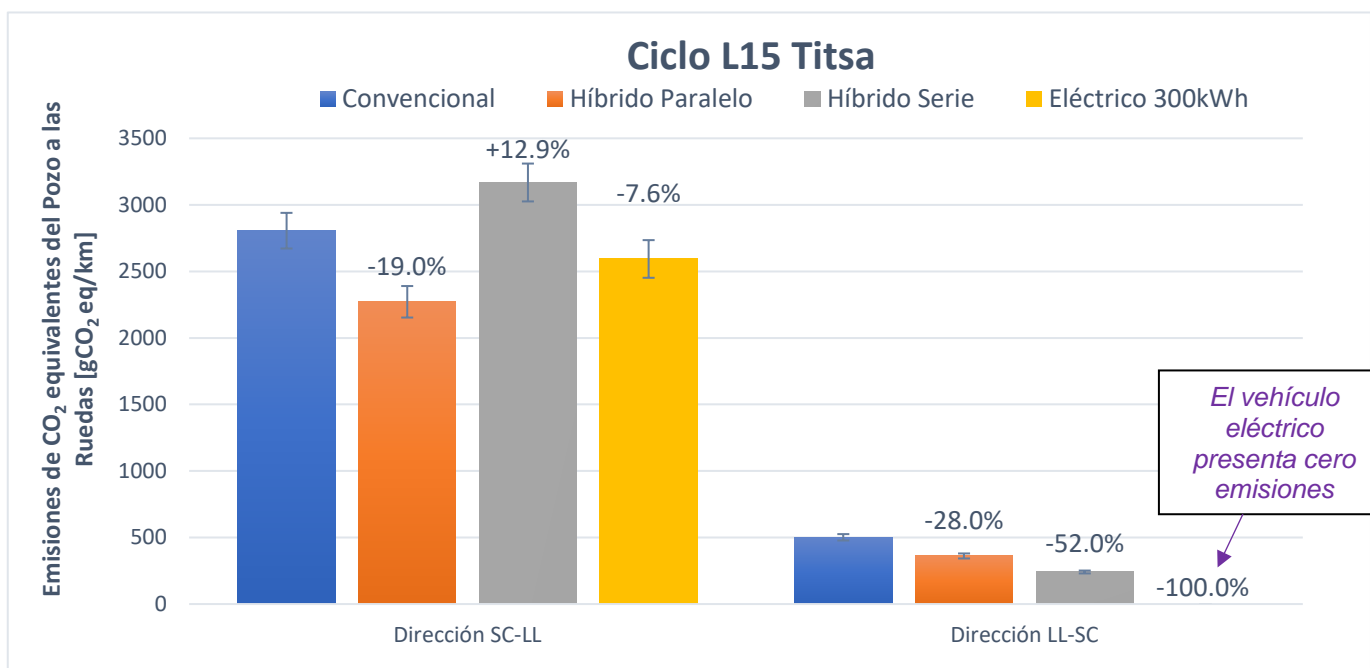


Figura 4.25 Comparación de emisiones de CO₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 015 SC-LL en ambos sentidos de la ruta. Fuente Propia.

Comenzando por la ruta en dirección SC-LL (sentido ascendente), se vuelve a obtener que el híbrido en serie es el que representa el mayor nivel de emisiones de entre las configuraciones simuladas (3168gCO₂/km) como consecuencia de los motivos expuestos en el análisis de la Línea 110, y representando en este caso un aumento en las emisiones del 12.9% respecto al vehículo convencional.

En cuanto al vehículo 100% eléctrico, su mayor consumo respecto a ciclos anteriores y la mejor eficiencia con la que opera el vehículo convencional, provoca que su mejora en emisiones sea relativamente pequeña (7.6%). La mayor reducción en emisiones en el sentido ascendente se alcanzará con el híbrido en paralelo (19.0%) como consecuencia de que su motor de combustión opera con mejor eficiencia y no consume energía con procedencia de la red. Esto implica que no le afecta la alta intensidad de carbono de la red como sucede con las arquitecturas eléctrica e híbrida en serie enchufable. Sin embargo, no impide generar emisiones dentro de ciudad.

En lo que respecta a las emisiones obtenidas en dirección LL-SC (sentido descendente), debido a que el híbrido en serie y 100% eléctrico se benefician de la regeneración en frenada, consiguen compensar la energía que consumen de forma parcial (en el híbrido en serie) o total (en el eléctrico), lo que da lugar a que ambas arquitecturas sean capaces de reducir en mayor medida las emisiones que en el híbrido en paralelo, que al no ser enchufable debe de generar toda su energía a partir del MCIA.

De acuerdo con esto, se obtiene que el vehículo convencional emite unos 500gCO₂/km, seguido del híbrido en paralelo que las reduce en un 28.0%. A continuación, se sitúa el híbrido en serie, que las reduce prácticamente a la mitad (52.0%) y, por último, se sitúa el vehículo eléctrico que no genera emisiones en su operación (reducción del 100%), ya que de su balance energético resulta que la energía recuperada en frenada es superior a la consumida, lo que implica que no se está contribuyendo a la generación de emisiones en dirección LL-SC.

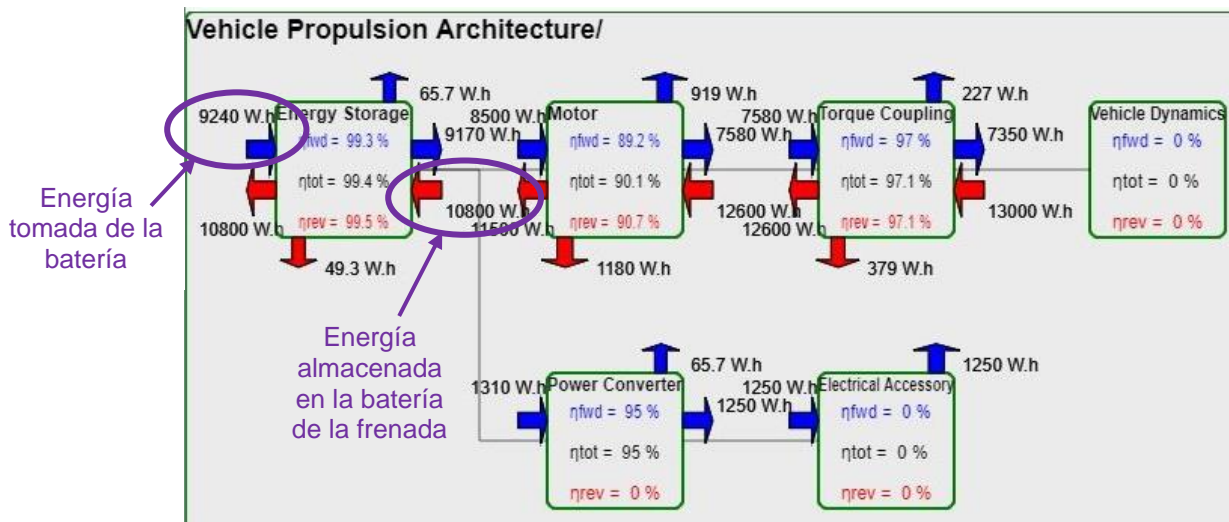


Figura 4.26 Balance energético de la configuración 100% eléctrica en la dirección LL-SC de la Línea 015. Fuente Propia.

En la Figura 4.26 se aprecia como la energía que toma el vehículo de la batería para alimentar el motor y los accesorios es menor (9240Wh) que la energía que se consigue almacenar en la batería procedente de la energía obtenida en la frenada (10800Wh), lo que resulta en un consumo eléctrico (*Electrical consumption*) negativo y, entonces, una ganancia de energía en el ciclo y cero emisiones netas generadas.

Con esto se demuestra que el gradiente de carretera puede llegar a desempeñar un papel muy significativo cuando se trata de consumo y emisiones. En el *Anexo de Resultados*, apartado 9.2.1, situado al final del trabajo, se recogen algunos resultados del aumento o reducción de consumo que supone que esta ruta tenga gradiente para las distintas arquitecturas y configuraciones simuladas, respecto al hipotético caso en que la Línea 015 tuviera gradiente de carretera nulo.

4.3.2.2 Análisis de la ruta considerando ambas direcciones de forma conjunta (viaje de ida y vuelta)

A continuación, se muestra el análisis considerando un viaje completo de ida y vuelta en la Línea 015. La siguiente figura muestra la comparación en consumo de combustible equivalente:

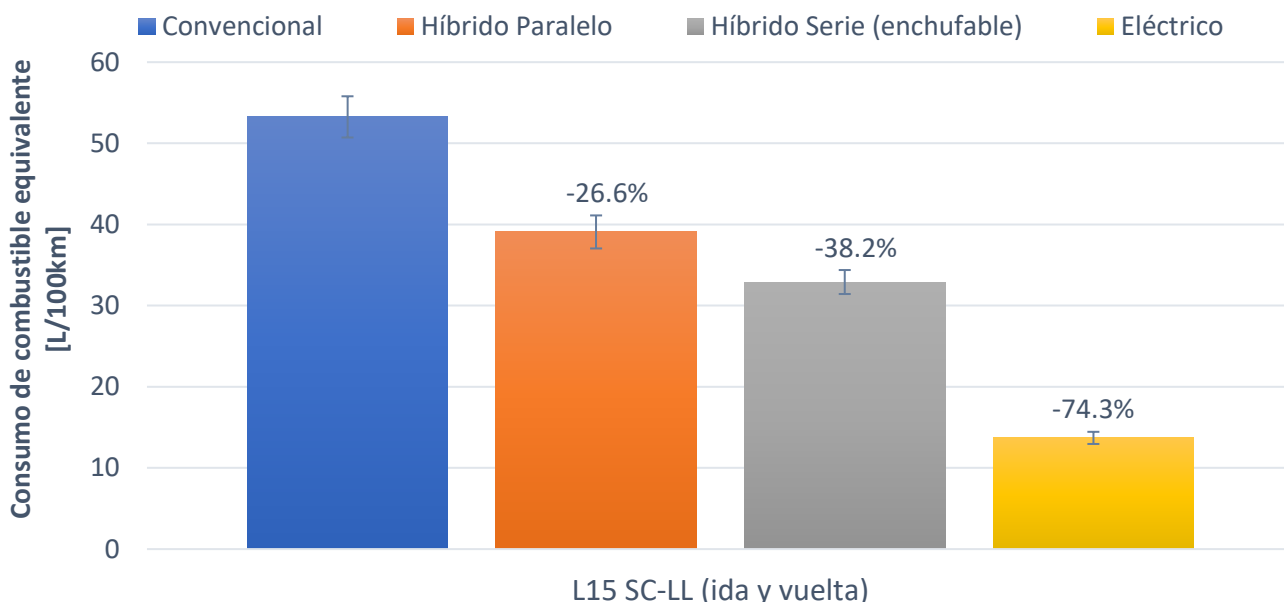


Figura 4.27 Comparación de consumo de combustible equivalente entre configuraciones para la Línea 015 SC-LL (ida y vuelta). Fuente Propia

Esta figura representa el consumo de combustible equivalente por arquitectura considerando que la guagua completa un viaje en dirección SC-LL y posteriormente regresa en dirección LL-SC. Este estudio es necesario para poder comparar los resultados de la línea con las anteriores analizadas, ya que como se ha podido comprobar, el gradiente de carretera da lugar a resultados distintos según el viaje sea en una dirección o en otra. No obstante, debido a que la distancia recorrida en ambos sentidos de la línea es prácticamente la misma, los resultados aquí mostrados son prácticamente una representación de los valores medios de consumo de entre los obtenidos en dirección SC-LL y en dirección LL-SC.

Así, en un viaje completo de ida y vuelta, para el vehículo convencional se obtiene un consumo de 53.3L/100km. Dicho consumo se reduce a medida que aumenta el nivel de electrificación del vehículo, así pues, el híbrido en paralelo reduce el consumo en un 26.6%; el híbrido en serie en un 38.2%; y el eléctrico en un 74.3%. Se observa entonces que el consumo nulo del vehículo eléctrico en dirección LL-SC (sentido descendente), no compensa el mayor consumo que se produce en dirección SC-LL (sentido ascendente), aunque sigue siendo el modelo que resulta más eficiente.

Seguidamente, se muestran los resultados de consumo expresados en términos energéticos:

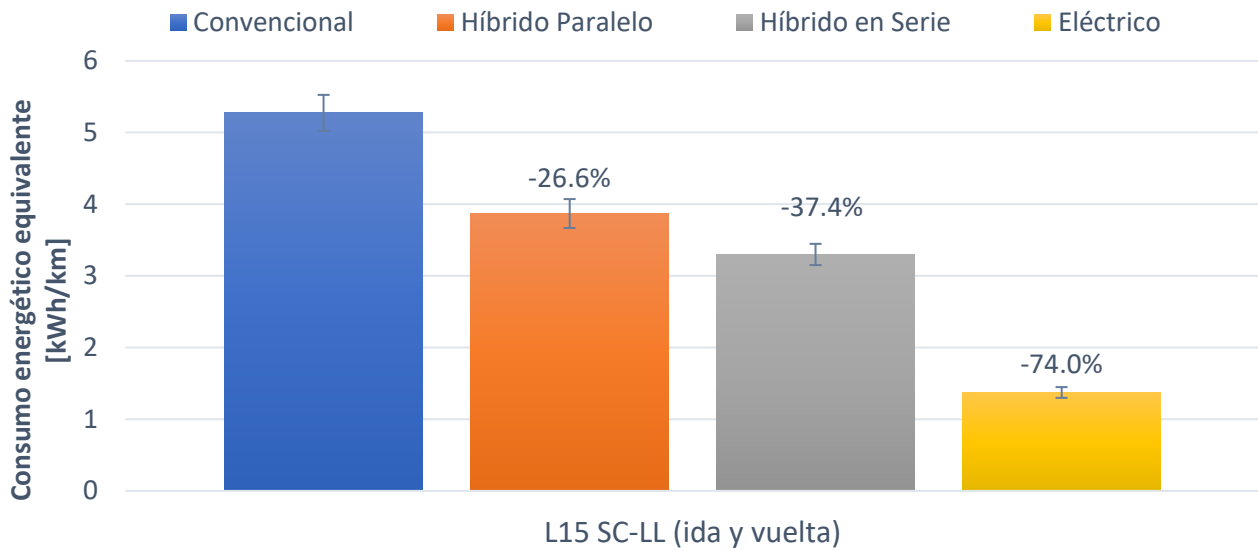


Figura 4.28 Comparación de consumo energético equivalente entre configuraciones para la Línea 015 SC-LL (ida y vuelta). Fuente Propia

Como se ha comentado, uno de los principales motivos por los que se consigue una mayor reducción en consumo con las configuraciones híbridas y eléctricas es la gran oportunidad de regeneración en frenada con la que se cuenta, que resulta muy notable en dirección LL-SC aprovechando el gradiente de carretera negativo. La siguiente figura muestra la mayor recuperación energética que se consigue en este ciclo en comparación con los anteriores:

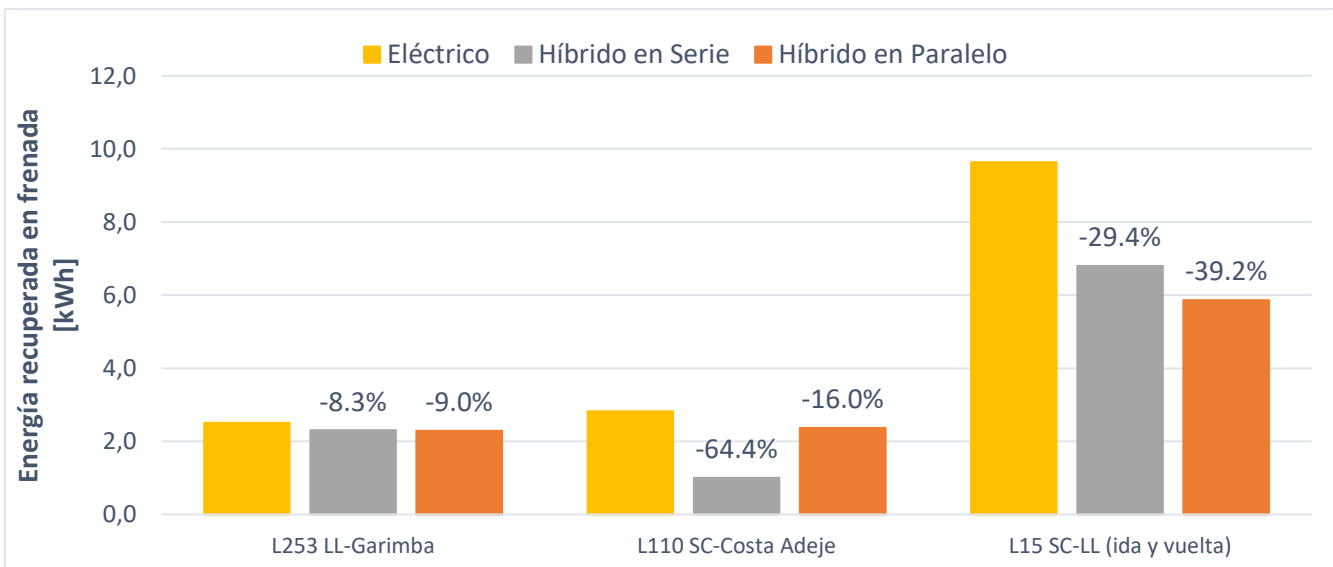


Figura 4.29 Comparación de energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en las Líneas 253, 110 y 015. Fuente Propia.

Se observa que la energía recuperada en frenada por las arquitecturas híbridas y eléctricas en la Línea 015 es muy superior a la obtenida en anteriores líneas sobre todo si se compara con la Línea 253, donde se dan condiciones muy favorables para que se produzca la regeneración, pero no cuenta con gradientes de carretera importantes.

Centrando el análisis en la Línea 015, se observa el comportamiento esperado, donde la arquitectura eléctrica recupera más energía que la híbrida en serie y en paralelo. En concreto, el vehículo eléctrico recupera 9.64kWh en los 19.1km de ruta que supone un viaje de ida y vuelta, es decir, que el vehículo recupera unos 0.50kWh/km en comparación con los 0.31kWh/km que se recuperan en la Línea 253 de mayor carácter urbano, lo que supone un incremento en la recuperación energética del 60%.

En cuanto a las arquitecturas híbridas, se obtiene una recuperación de 6.80kWh para el híbrido en serie; y 5.86kWh en el híbrido en paralelo, lo que representa un incremento respecto a la Línea 253 del 20% y del 8% respectivamente en lo que se refiere a kWh/km recuperados.

De esta forma se aprecia que el ciclo es muy favorable para el vehículo eléctrico en lo que respecta a reducción en consumo, también motivado por la buena eficiencia media que mantiene tal y como se muestra en la siguiente tabla comparativa entre líneas:

Tabla 4.8 Comparación de valores de eficiencia media entre las Líneas 253, 110 y 015

Arquitectura	Estado inicial de carga de la batería [%]	Eficiencia media [%]		
		Línea 253	Línea 110	Línea 015 (ida y vuelta)
Convencional	MCIA	28.9	35.8	30.2
Híbrido en Paralelo	MCIA	38.5	40.3	37.3
	Motor eléctrico	86.9	84.5	88.6
Híbrido en Serie	MCIA	39.3	38.3	39.6
	Motor eléctrico	85.4	86.6	86.6
Eléctrico	Motor eléctrico	85.0	86.7	86.4

Fuente Propia

A la vista de los resultados de eficiencia media se observa que la eficiencia del vehículo eléctrico sigue situándose en torno al 86% al igual que en la Línea 110. En el caso del híbrido en serie mejora ligeramente la eficiencia del motor de combustión mientras que en el híbrido en paralelo y el de combustión caen, principalmente debido a que dichos motores se encuentran conectados a la transmisión de salida a las ruedas, y que se hace más notable en el vehículo convencional al no contar con

la asistencia de un motor eléctrico como sucede en el híbrido paralelo. No obstante, la presencia de mayores tramos estacionarios a velocidades medias-altas da lugar a que su eficiencia media siga siendo superior a la obtenida en el ciclo de la Línea 253.

Del análisis de consumo, se concluye que el ciclo de la Línea 015 resulta muy favorable para el vehículo eléctrico si se compara con el resto, pero la ausencia de un motor de combustión que permita asistir en el suministro de par a las ruedas o en la recarga de la batería provoca que su autonomía resulte pobre tal y como se muestra en la Figura 4.30, donde se compara la autonomía y horas equivalentes de operación entre modelos en esta línea.

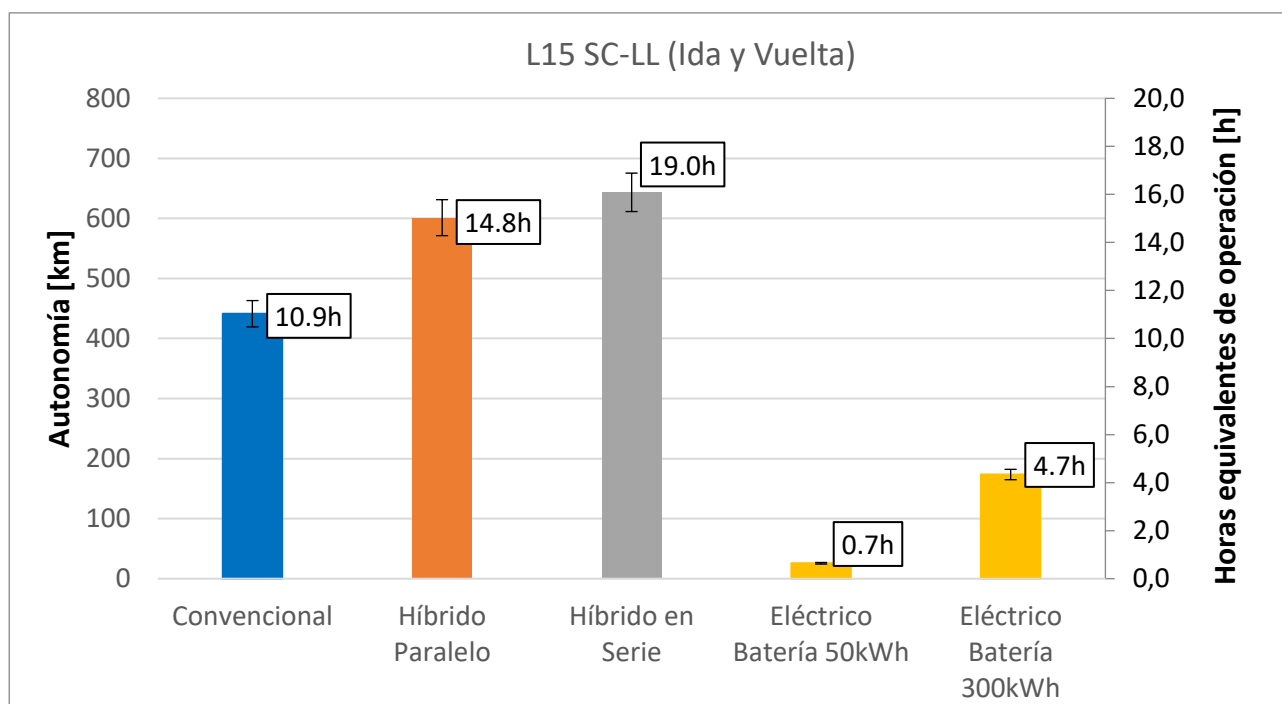


Figura 4.30 Autonomía y horas equivalentes de operación para cada arquitectura y configuración en la Línea 015 SC-LL. Fuente Propia.

Considerando un tanque de combustible de 235L y reserva del 10%, el vehículo convencional ofrece una autonomía de unos 440km. Debido a la asistencia del motor eléctrico en el híbrido en paralelo; y la propulsión únicamente eléctrica del híbrido en serie en el que el motor de combustión trabaja en puntos de eficiencia óptimos para recargar la batería fuera de ciudad, da lugar a que los modelos híbridos alcancen mayores autonomías que el convencional, pues su uso de combustible es menor. En el caso del híbrido en paralelo, se estiman unos 600km de autonomía, mientras que, para el híbrido en serie, se estima en 640km, lo que le permite operar unas 19h ininterrumpidas sin necesidad de repostar.

En el caso del híbrido en serie, es suficiente con enchufarlo por las noches si se desea, de modo que el vehículo inicie los primeros viajes del día minimizando el consumo de combustible y luego sea el MCIA quien mantenga el nivel de batería

durante todo el resto del día. La operación del híbrido en serie sería como se muestra en la siguiente figura:

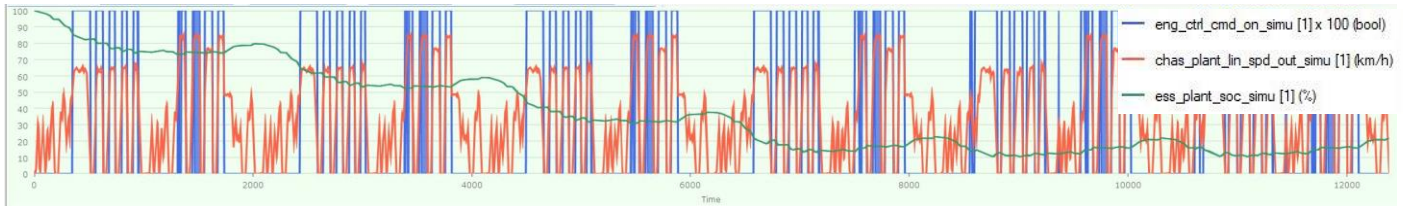


Figura 4.31 Operación del vehículo híbrido en serie en la Línea 015 SC-LL. Nivel de carga de la batería (verde), perfil de velocidad del vehículo (rojo) y señal de arranque del MCIA (azul). Fuente Propia

Esta figura representa los primeros seis viajes de ida y vuelta completados en la Línea 015 por la guagua híbrida en serie. A raíz de los resultados de simulación se observa que el motor de combustión únicamente se arranca fuera de ciudad tal y como indica la curva azul de señal de arranque del MCIA.

El vehículo inicia su viaje en Santa Cruz con un nivel de carga del 100% y se descarga progresivamente hasta alcanzar el cuarto viaje de ida y vuelta, en el que la curva de descarga toma un perfil periódico en el tiempo, encargándose el motor de combustión de mantener esta situación durante todo el día, lo que significa que no es necesario realizar cargas de oportunidad entre servicios y que la autonomía vendrá limitada por la capacidad del tanque de combustible del vehículo. De acuerdo con la Figura 4.30 la autonomía de este vehículo permite unas 19h de servicio sin necesidad de repostaje (la mayor autonomía de entre todos los modelos simulados), y que resulta suficiente para operar desde las 6:00 de la mañana (momento en el que las guaguas inician su servicio en esta ruta) hasta la 1:00 de la madrugada del día siguiente (hora de finalización del trabajo).

En lo que respecta a las configuraciones eléctricas, su autonomía es muy limitada. En el caso de disponer una batería de 50kWh de capacidad confiando en una estrategia de oportunidad, la autonomía no alcanza ni la hora de servicio, permitiéndole completar, únicamente, un viaje de ida y vuelta antes de necesitar enchufarse, lo que hace necesario de disponer de otra guagua adicional que realice el siguiente servicio mientras la anterior se recarga en el Intercambiador mediante un supercargador para completar el proceso lo más rápido posible. Esto implica un sobredimensionamiento y sobrecoste de la flota para poder cumplir con los horarios de la ruta.

La otra opción es disponer una batería de gran capacidad como la seleccionada de 300kWh intentando evitar las frecuentes recargas que se necesitan con la estrategia anterior. No obstante, como se muestra en la Figura 4.30, a pesar de este gran aumento de energía disponible, la guagua solo es capaz de operar unas 4.7h antes de necesitar enchufarse a la red, lo que apenas supone media jornada de un conductor, haciendo también haría necesario disponer de otra guagua de reemplazo

mientras la anterior se recarga, contribuyendo además a la generación de emisiones del Pozo a las Ruedas y reduciendo su potencialidad para reducirlas.

En la siguiente figura se muestra la comparación en emisiones entre modelos:

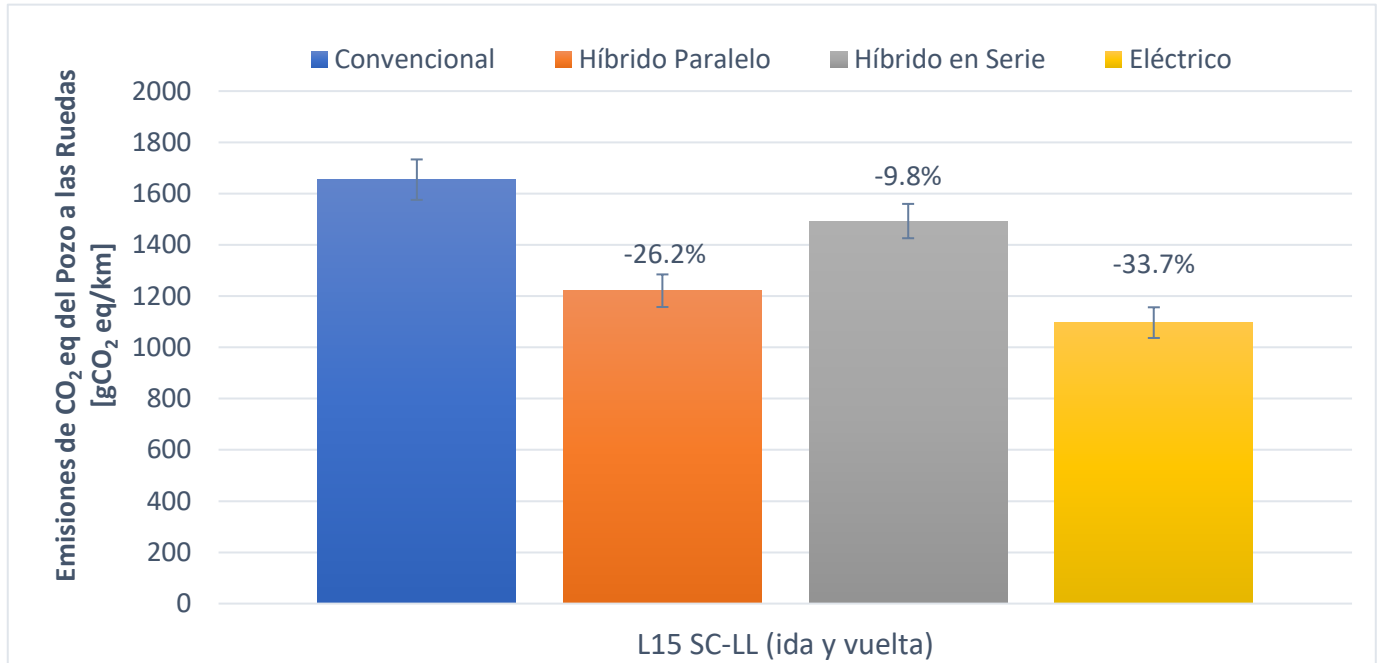


Figura 4.32 Comparación de emisiones de CO₂ equivalente entre arquitecturas en la Línea 015 SC-LL (ida y vuelta). Fuente Propia.

Considerando un viaje completo de ida y vuelta en la Línea 015, se obtiene que el vehículo convencional es el que mayores emisiones genera (1655gCO₂/km), lo que significa que las configuraciones híbridas y eléctricas estudiadas suponen una reducción en emisiones.

El híbrido en serie es el que posee menor capacidad para reducir emisiones debido a la elevada penalización que supone en dirección SC-LL por los motivos expuestos. A pesar de ello, la baja generación de emisiones en dirección LL-SC, sitúa las emisiones del híbrido en serie un 9.8% por debajo de las correspondientes al vehículo convencional. Le sigue el vehículo híbrido en paralelo con una reducción del 26.2% y, por último, el eléctrico con la mayor reducción obtenida de un 33.7% como consecuencia de su bajo consumo en dirección SC-LL y la ganancia de energía en dirección LL-SC.

De acuerdo con los resultados de consumo, eficiencia y emisiones obtenidos se pueden extraer algunas conclusiones. En primer lugar, la introducción de arquitecturas alternativas supone una mejora respecto al convencional para operar en la Línea 015.

El híbrido en paralelo consigue una reducción en consumo y emisiones de en torno al 26%, por lo que puede resultar una arquitectura adecuada para su uso a corto plazo mientras la ley no impida la generación de emisiones dentro de ciudad. Cuando ello no sea posible, la arquitectura híbrida en serie se posiciona en primer puesto, pues a pesar de que la reducción en emisiones respecto al convencional es menor (un 9.8%), permite operar dentro de ciudad en modo 100% eléctrico y cumplir con la ley de cero emisiones que se imponga en núcleos urbanos. Además, aunque no consigue una reducción tan grande en emisiones, consigue reducir el consumo global del vehículo y extender su autonomía.

En lo que respecta al vehículo eléctrico, presenta enormes ventajas en cuanto a reducción de consumo y emisiones, aunque podría ser incluso mejor si la energía eléctrica que consume tuviera procedencia 100% renovable. Sin embargo, su mayor inconveniente es la falta de autonomía. En este sentido, considerar configuraciones con tamaños de batería pequeños resulta inviable, pues la autonomía es muy limitada (menos de una hora), haciendo necesario que se disponga de guaguas de reemplazo suficientes para que la anterior tenga tiempo de recargarse y volver a completar un nuevo viaje de ida y vuelta. Estos eventos serían frecuentes a lo largo del día, y en muchos casos difíciles de realizar por la falta de tiempo o número de guaguas. Por tanto, debe de optarse por baterías grandes como la simulada de 300kWh de capacidad, ya que, aunque no es capaz de completar una jornada completa de trabajo, tiene autonomía para cerca de 5h, lo que puede suponer suficiente margen para recargarse mientras es sustituida por otra guagua que es capaz de proporcionar otras 5h de servicio.

4.4 Comparación entre las líneas analizadas

A continuación, se procede a comparar las tres líneas estudiadas en este TFG (Líneas 253, 110 y 015), lo que permitirá estudiar el comportamiento de cada arquitectura y configuración cuando cambian las características de la ruta (velocidad media, longitud, gradiente de carretera...). Aunque ya se han observado algunas diferencias en cuanto a energía recuperada en frenada y eficiencia media entre los distintos modelos, ahora se compararán los resultados principales de consumo, emisiones y autonomía alcanzada.

En la siguiente figura se muestra la comparación en consumo de combustible equivalente entre rutas:

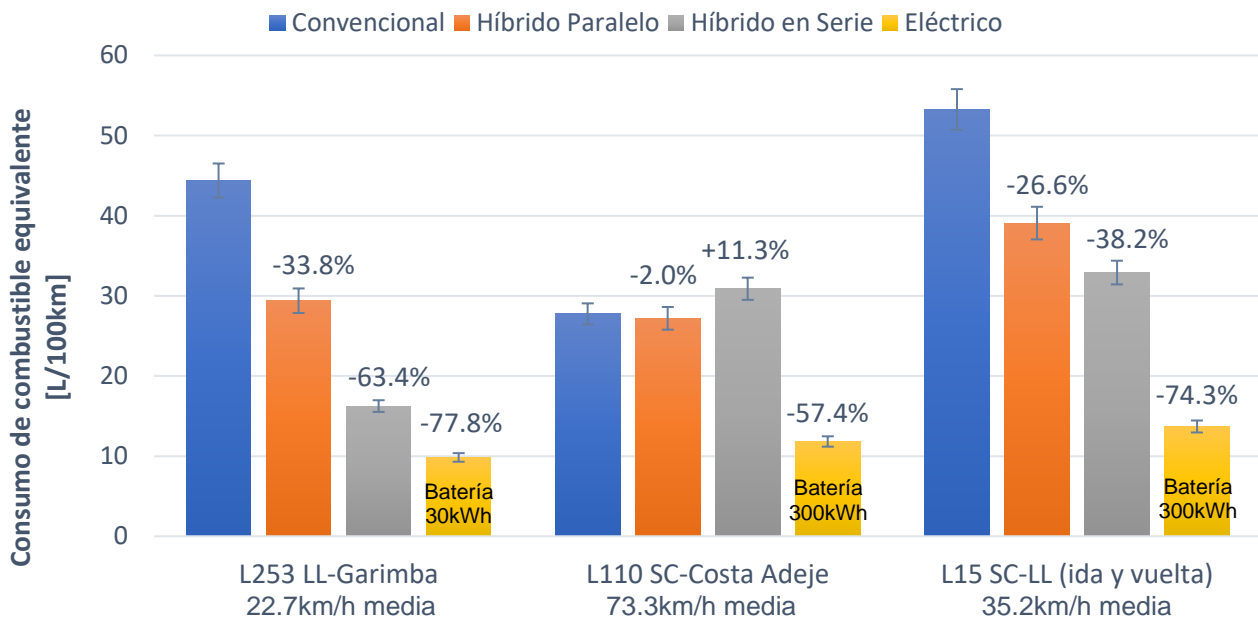


Figura 4.33 Comparación de consumo de combustible equivalente entre arquitecturas y líneas.
 Fuente Propia

Comenzando por el vehículo convencional, se observa una gran variación en consumo de una línea a otra. En la Línea 253 su consumo es superior si se compara con la Línea 110; esto se debe a que la Línea 253 se caracteriza por velocidades bajas con muchas condiciones transitorias mientras la Línea 110 es todo lo contrario (velocidades altas con condiciones bastante estacionarias la mayor parte del tiempo). Esto indica que el vehículo convencional se ve favorecido por situaciones de conducción donde existen pocos periodos al ralentí, aceleraciones y frenadas.

La reducción en consumo que se consigue para la arquitectura convencional en la Línea 110 respecto a la 253 es del 37.6%, lo que representa un salto notorio. A pesar de ello, cuando se compara con la Línea 015 el consumo se incrementa de forma notable debido a que la velocidad media disminuye y existe un gradiente de carretera muy importante, provocando que el motor tenga que desarrollar un par mayor para vencer las pérdidas e impulsar la carga que se traduce en un mayor consumo. En concreto, el aumento de consumo es del 16.7% respecto a la Línea 253 y del 48% respecto a la Línea 110.

En el caso de la arquitectura híbrida en paralelo, que responde de manera más estable a los cambios en las características de las rutas, y en todos los casos, logra una reducción en consumo respecto a la arquitectura convencional. El motivo principal por el que no existe una diferencia tan grande en consumo de una línea a otra es que sus motores (de combustión y eléctrico) operan siempre con buena eficiencia, de tal manera que los puntos en los que el motor de combustión trabaja con mala eficiencia son cubiertos por el motor eléctrico (arranques desde parado y aceleraciones), motor el cual, trabaja de manera general con una eficiencia alta en todo el rango de operación del vehículo. Aun así, se sigue observando la misma

tendencia en consumo de un ciclo a otro (mayor en la Línea 253 que en la 110, pero claramente superior en la Línea 015). La reducción en consumo en la Línea 110 respecto a la 253 es del 7.5%, mientras que el aumento de consumo en la Línea 015 es del 24.8% y del 30.4% respecto a las Líneas 253 y 110 respectivamente.

A continuación, le sigue la arquitectura híbrida en serie en la que se observa un cambio en la tendencia de consumo de un ciclo a otro. Igualmente se obtiene el menor consumo en la Línea 253 favorecido por la mayor conducción en ciudad y los pocos arranques del MCIA, en cambio, a diferencia de los vehículos anteriores, ahora se obtiene un aumento de consumo al comparar con la Línea 110, lo que se debe al mayor peso y la pérdida de las ventajas aprovechadas en ciudad. La aparición del gradiente de carretera provoca un aumento del consumo en la Línea 015.

De manera cuantitativa, se obtiene un incremento en el consumo del 47.6% al pasar de la Línea 253 a la Línea 110, mientras que en la Línea 015 el incremento es del 50.8% y 6.1% respecto a las anteriores. Esto confirma que las rutas de larga distancia o con presencia de gradiente de carretera penalizan enormemente al híbrido en serie, pero es el único vehículo analizado (aparte del vehículo 100% eléctrico) que puede operar en ciudad sin emisiones directas.

En lo que respecta al vehículo eléctrico, sigue la misma tendencia que el híbrido en serie, siendo su característica común que ambos son enchufables. Se observa que el eléctrico proporciona los consumos más bajos en todos los casos debido a su alta eficiencia y capacidad de regeneración en frenada, siendo muy estable frente a los cambios de velocidad media y dando lugar a consumos muy parecidos en las tres líneas analizadas.

El aumento de consumo en la Línea 110 respecto a la 253 es del 16.9%, mientras que en la Línea 015 se produce un aumento del 28.5% y 13.9% respecto a las Líneas 253 y 110 respectivamente, lo que sin duda representa las diferencias más pequeñas conseguidas por cualquier otra arquitectura. Por tanto, el vehículo eléctrico es el claro dominante en cuanto a reducción en consumo energético en cualquier ruta.

Del mismo modo, se pueden presentar los resultados de consumo expresados en términos energéticos (kWh/km), lo que resulta más familiar para vehículos híbridos y eléctricos:

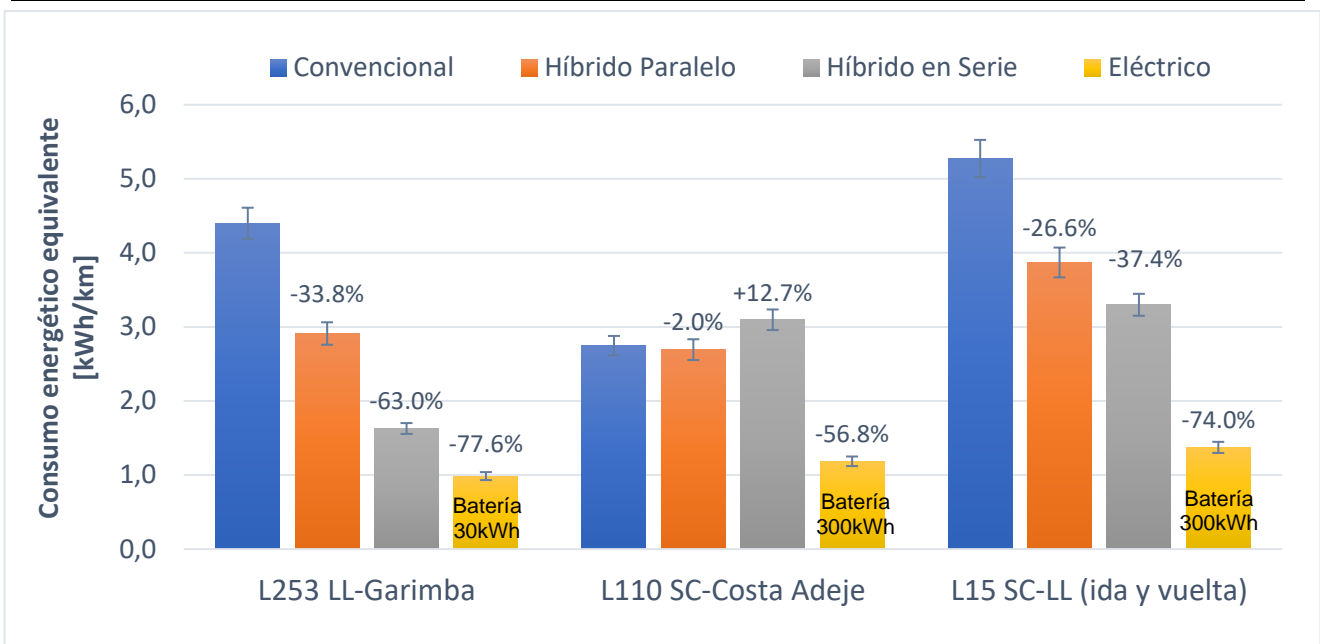


Figura 4.34 Comparación de consumo energético equivalente entre arquitecturas y líneas. Fuente Propia

Los consumos obtenidos para cada arquitectura están directamente relacionados con la autonomía que son capaces de ofrecer. En la siguiente figura se muestra la comparación en autonomía, donde se deben de destacar varios aspectos:

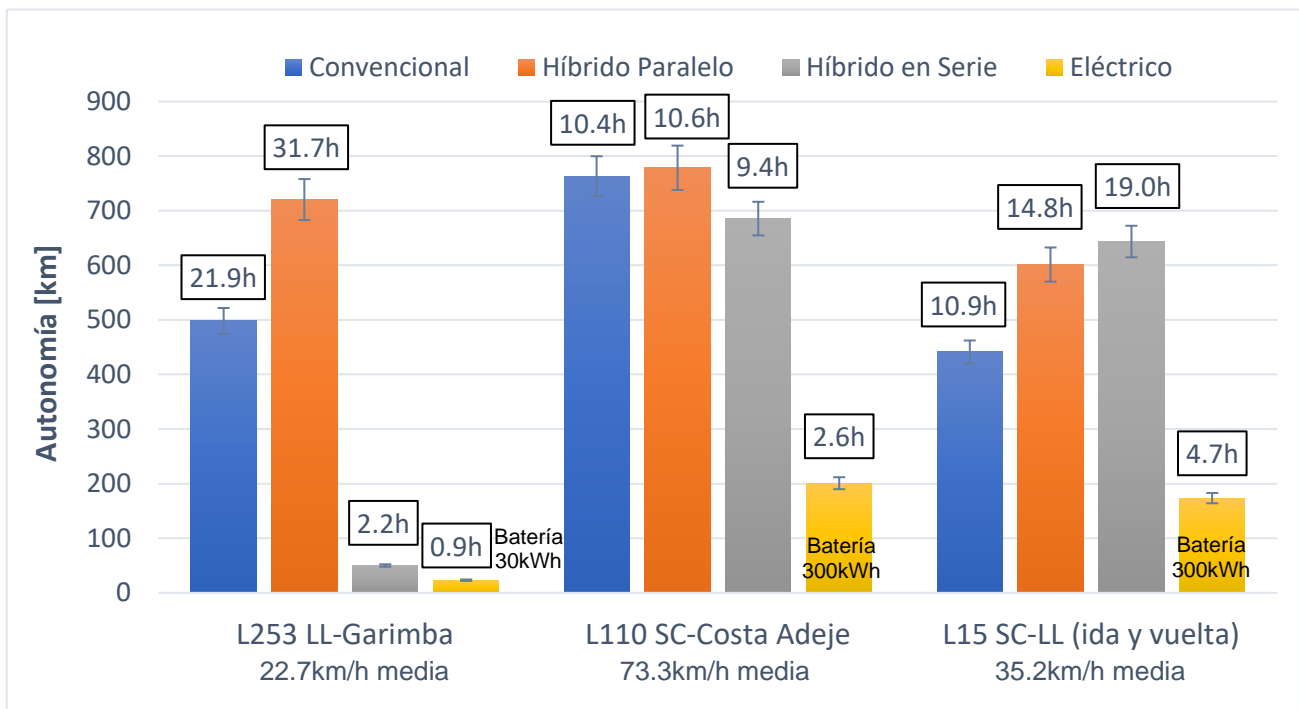


Figura 4.35 Comparación de autonomía y horas equivalentes de operación entre arquitecturas y líneas Fuente Propia.

Las guaguas que operan en la Línea 253 deben de ser capaces de cubrir, al menos, 6 horas de ruta para completar el día sin necesidad de repostaje o recarga (calculado según los horarios mostrados por TITSA para esta ruta en su web). En cambio, para

la Línea 110 serían unas 15 horas de servicio y para la Línea 015 unas 19 horas (estimado en base al máximo número de horas que podrían recorrer en un día teniendo en cuenta el tiempo que tardan en completar los viajes).

En la Línea 253, tanto la guagua convencional como la híbrida en paralelo cuentan con autonomía suficiente para no repostar en todo el día. En cambio, la guagua híbrida en serie tiene el problema de que no existen eventos suficientes fuera de ciudad para cargar la batería, por lo que se ve obligada a arrancar su motor de combustión pasadas unas 2h de servicio ó 50km, lo que haría necesario recargarla unas 3 veces en todo el día asumiendo que va a operar el día completo. Por otro lado, la guagua eléctrica tan solo proporciona autonomía para 1h si se apuesta por una estrategia de carga de oportunidad basada en el uso de una batería con capacidad para 30kWh. En ese caso, sería necesario recargar la guagua unas 6 veces entre servicios para completar el día.

Si se empleara un cargador de 150kW (carga rápida) y suponiendo que se conecta con un 20% de energía restante en la batería, sería necesario aportar 24kWh para recargar la batería, lo que le supondría unos 10 minutos de carga; tiempo suficiente debido a que una guagua tarda en recorrer la ruta ida y vuelta en unos 40 minutos, y la siguiente salida desde el intercambiador es como mínimo 20 minutos después en las primeras horas de la mañana; margen que posteriormente se amplía a más de hora reduciendo la frecuencia de viajes a lo largo del día.

En cuanto a la Línea 110, los menores consumos obtenidos (salvo en el híbrido en serie), implican un aumento en la autonomía alcanzada. Inicialmente, parece que ningún vehículo sería capaz de completar 15h de servicio en un día para completar el horario de la ruta. A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que se ha tomado un tanque de combustible con capacidad para 235L de combustible. La realidad es que los tanques de combustible que se suelen instalar en guaguas rondan los 400-500L de forma general, lo que prácticamente supone duplicar la capacidad actual empleada para los modelos convencional e híbridos.

En el caso de emplear tanques de 470L se duplicaría la autonomía del vehículo convencional, híbrido paralelo e híbrido en serie, siendo capaces de completar entre 18 y 20h de servicio, lo que es suficiente para finalizar la jornada. En cambio, a pesar del menor consumo del modelo eléctrico, su autonomía permite completar unas 2.6h de servicio, siendo complicado alcanzar una autonomía mucho mayor, pues la batería ya presenta una capacidad importante para el tamaño de guagua seleccionado (unos 300kWh). En el caso del vehículo eléctrico, si se considera un cargador de 150kW y cerca del 20% de energía reserva en la batería, sería necesario aportar 240kWh para recargar la batería, lo que llevaría aproximadamente 1.5-2h. Así, de acuerdo con el tipo de cargador y tiempo de carga se deberá de gestionar adecuadamente la flota para que se cumpla con los servicios, labor que se sale del alcance de este TFG.

Por último, en la Línea 015, debido al gradiente de carretera se observa cómo las autonomías se reducen. Para completar un día de servicio, las guaguas convencional e híbrido en paralelo deben contar con un tanque de combustible mayor. Si se empleasen igualmente 470L de tanque, sus autonomías se duplicarían, siendo capaces de completar 20 y 28h de servicio respectivamente, lo que es superior a lo necesario y podría ser mejor optimizado si así se desease. Destaca la autonomía que es capaz de alcanzar el híbrido en serie en esta ruta; unos 644km ó 19h de servicio, lo que ya es suficiente para operar todo el día sin arrancar el MCI dentro de ciudad ni repostar aun cuando su tanque de combustible solo tiene 235L y su batería es de 50kWh (pequeña) situándola, así, como una opción a corto-medio plazo muy idónea para esta ruta.

En cuanto al vehículo eléctrico, permite alcanzar una autonomía suficiente para 5h de servicio. Debido a que su capacidad de batería es de 300kWh, si se emplease el mismo tipo de cargador y condiciones de recarga que en el eléctrico de la Línea 110, el tiempo de recarga sería de unas 1.5-2h. En este caso, a pesar de que el tiempo de recarga es el mismo, la situación es más crítica, ya que la ruta de la Línea 015 es más corta y las guaguas abandonan el Intercambiador con mayor frecuencia. Esto significa que en el hipotético caso de que la línea solo operase con guaguas eléctricas, aproximadamente a las 5h, sería necesario poner a cargar todas las guaguas y tener preparadas otras de reemplazo para continuar el servicio mientras las anteriores se recargan; volviendo a realizar el cambio posteriormente. La estrategia supondría duplicar el número de guaguas asignadas a la línea y disponer de cargadores suficientes para poder cargar, al menos, la mitad de ellas mientras las guaguas de reemplazo operan, lo que parece un escenario poco probable actualmente.

A continuación, se compara la potencialidad de cada arquitectura y línea para reducir las emisiones WTW para lo que se recogen los resultados que se muestran en la Figura 4.36.

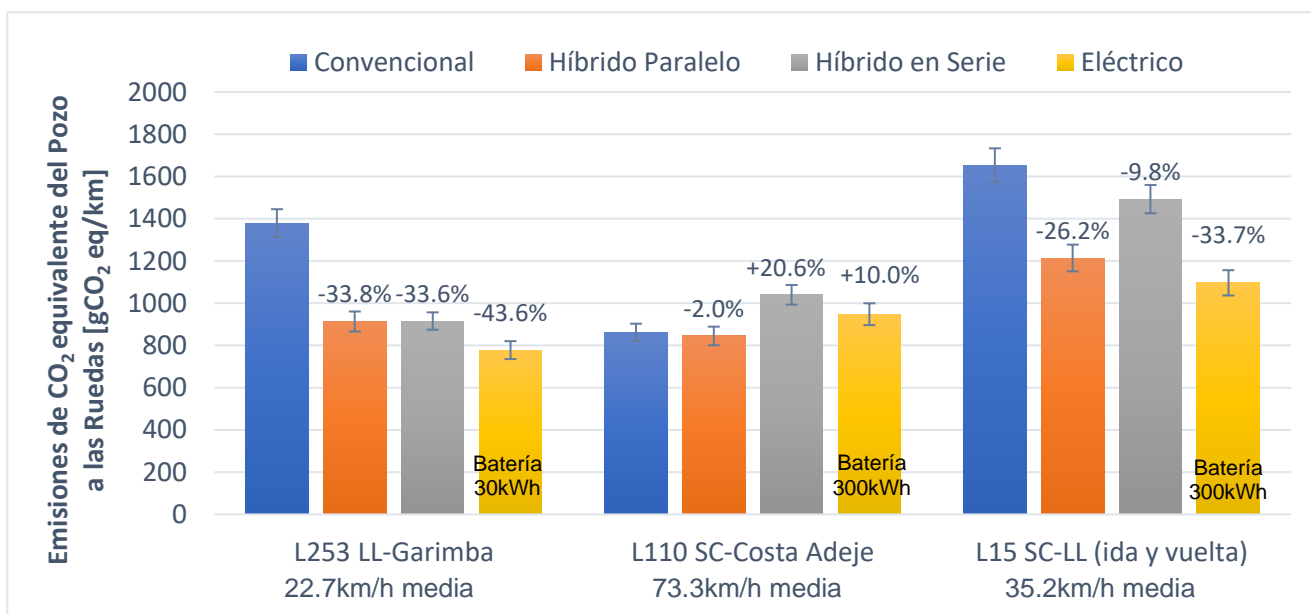


Figura 4.36 Comparación de emisiones de CO₂ equivalente entre arquitecturas y líneas. Fuente Propia.

A la vista de los resultados de emisiones WTW se comprueba que la elevada intensidad de CO₂ de la red de la isla supone que las arquitecturas híbridas en serie y eléctrica pierden ventajas en reducción de emisiones respecto a las arquitecturas convencional e híbrida en paralelo. Esto supone que en el ciclo de la Línea 253 la diferencia entre los dos tipos de híbridos sea muy estrecha y las emisiones del eléctrico se acerquen a las del híbrido en serie. En concreto, para el híbrido en serie se obtiene una reducción del 33.6%, mientras que para el eléctrico es del 43.6%.

Por otro lado, para la Línea 110 los niveles de emisiones de los vehículos convencional e híbrido en paralelo se reducen como consecuencia de la mejora en consumo, sin embargo, para las arquitecturas híbridas en serie y eléctrica se obtienen valores considerablemente superiores al nivel de emisiones del vehículo convencional. En concreto, el incremento es del 20.6% y 10.0% respectivamente. Destaca en este caso que el vehículo eléctrico, a pesar de ser el que menor consumo proporciona, haya sido capaz de superar las emisiones WTW del vehículo convencional, todo debido nuevamente al *mix* energético de la isla.

Lo mismo ocurre en la Línea 015, donde las emisiones del híbrido en serie superan a las del híbrido en paralelo aun cuando su consumo energético es menor; mientras el eléctrico se acerca bastante al nivel de emisiones del híbrido en paralelo. No obstante, a diferencia del ciclo anterior, en ningún momento se superan las emisiones ocasionadas por el vehículo convencional cuando se considera un viaje completo de ida y vuelta.

Así pues, mediante una comparación entre la energía consumida por los vehículos y su nivel de emisiones alcanzado, es posible darse cuenta de que la intensidad de CO₂ de la red tendrá una gran influencia sobre los vehículos enchufables, sobre todo cuando se trata de rutas de larga distancia o elevado consumo, lo que hace por ejemplo, que el vehículo eléctrico llegue a perder su ventaja en ciclos donde la arquitectura convencional opera con buenas eficiencias; o verse afectada en ciclos más urbanos donde la reducción en emisiones podría ser mucho mayor si la penetración de renovables en la red también lo fuera.

Al margen de ello, el eléctrico supone una reducción en emisiones dentro de ciudad que el vehículo convencional es incapaz de alcanzar. Si se considerase que no existen pérdidas en la carga del vehículo eléctrico (eficiencia en la carga del 100%) y se tomase una intensidad de carbono de la red de 710gCO₂/kWh (WTW), se obtendría que el motor de combustión interna del vehículo convencional (con factor de emisión de 306gCO₂/kWh) debería operar con una eficiencia cercana al 43% en ciudad para igualar el factor de emisiones del vehículo eléctrico, lo que representa una eficiencia difícil de alcanzar a menos que se rediseñe el funcionamiento de los motores de combustión, tal y como se conocen, para alcanzar eficiencias tan altas. No obstante, debido a la existencia de pérdidas durante la carga del vehículo eléctrico, el factor de emisiones asociado al vehículo eléctrico aumenta y, en su lugar, puede considerarse un valor de 788.9gCO₂/kWh (resultado de aplicar una eficiencia del 90% al valor de intensidad de carbono de la red de 710gCO₂/kWh).

Ello significa que la eficiencia con la que debería de trabajar el motor de combustión para igualar el factor de emisiones del eléctrico se reduce a un 39%, lo que sigue representando una eficiencia difícil de conseguir para un vehículo convencional en un ciclo de conducción de carácter urbano; pero no en un ciclo dominado por la conducción extraurbana, donde las condiciones estacionarias acercan la eficiencia del vehículo convencional a este valor, y es por ello que el eléctrico pierde ventajas en cuanto a reducción en emisiones en este tipo de ciclos.

De este modo, concluye el análisis de resultados para las distintas arquitecturas y configuraciones analizadas en tres ciclos de conducción representativa en Tenerife. En un capítulo posterior se recogerán los puntos que se han tenido en cuenta para seleccionar la arquitectura y configuración más idónea para cada ruta y que en este TFG se recomienda emplear para operar en la isla.

Previamente, se expondrán algunos estudios realizados en vehículos eléctricos: comparación entre las estrategias de carga de oportunidad y convencional; influencia de la carga de pasajeros, la carga de accesorios, la degradación de la batería o la agresividad del conductor en el consumo, etc.

5 ESTUDIO ELÉCTRICO. CONSUMO, EMISIONES Y AUTONOMÍA

5.1 Estrategia de carga de oportunidad frente a la convencional

En este apartado se analizará las dos principales estrategias de carga empleadas en vehículos eléctricos; la conocida como carga de oportunidad, basada en la recarga del vehículo aprovechando los tiempos muertos entre servicios; y la conocida como carga convencional, en la que se contaría con energía suficiente para completar el día y realizar, normalmente, una carga completa durante la noche.

Línea 253 LL-Garimba

En el caso de la Línea 253 LL-Garimba, se ha optado por una batería de 30kWh en el análisis de resultados previo, y como se ha podido comprobar es una solución viable teniendo en cuenta que se dispone de tiempo suficiente para realizar cargas de oportunidad a lo largo del día (pocos servicios y espaciados). No obstante, si se deseara realizar una carga convencional se debería de emplear una batería con capacidad para unos 250kWh.

El cambio de estrategia supone un aumento en el peso del vehículo de unas 2.8 toneladas adicionales, lo que se traduce en un aumento en el consumo, con la ventaja de que la autonomía del vehículo se ve incrementada. En la siguiente figura se muestra una comparación en consumo, energía recuperada en frenada y nivel descargado de la batería por ciclo.

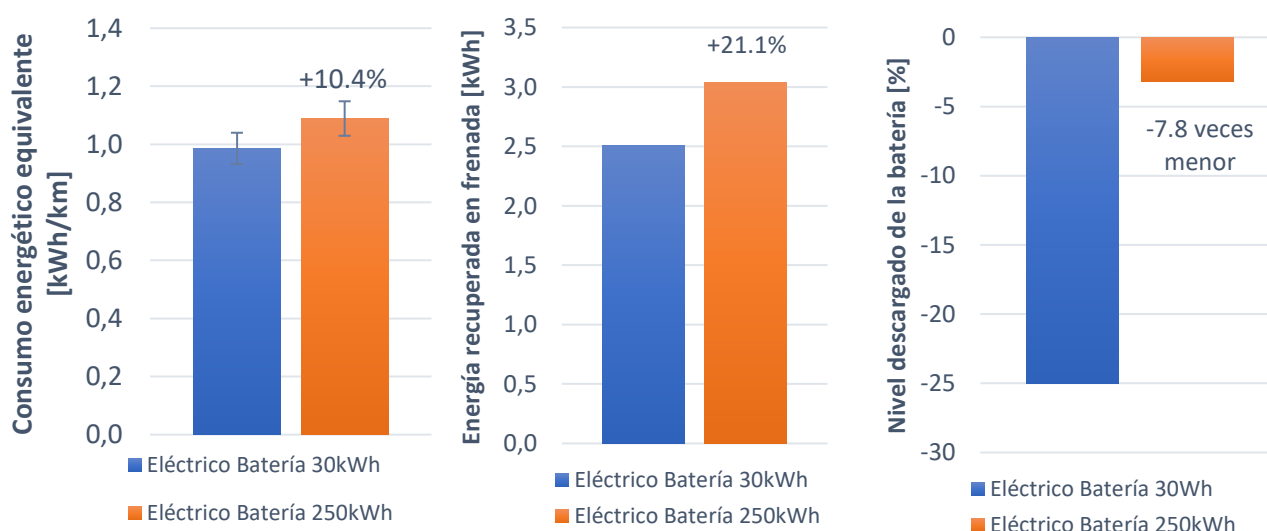


Figura 5.1 Comparación de consumo, energía recuperada en frenada y nivel descargado de la batería para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 253. Fuente Propia.

Como se puede observar en la Figura 5.1, pasar de una estrategia de carga de oportunidad (batería de 30kWh) a convencional (batería de 250kWh), supone un incremento en el consumo del 10.4%, lo que no es nada despreciable, aun cuando el vehículo de 250kWh de capacidad permite regenerar una mayor cantidad de energía en frenada (21.1% más) debido al mayor tamaño de batería.

El aumento de consumo no impide que el vehículo de mayor capacidad consiga reducir el ritmo de descarga de la batería con cada ciclo. En concreto, se obtiene una reducción de 7.8 veces respecto al eléctrico de 30kWh de capacidad, lo que permite extender la autonomía del vehículo, pero también a costa de obtener un aumento en el nivel de emisiones WTW:

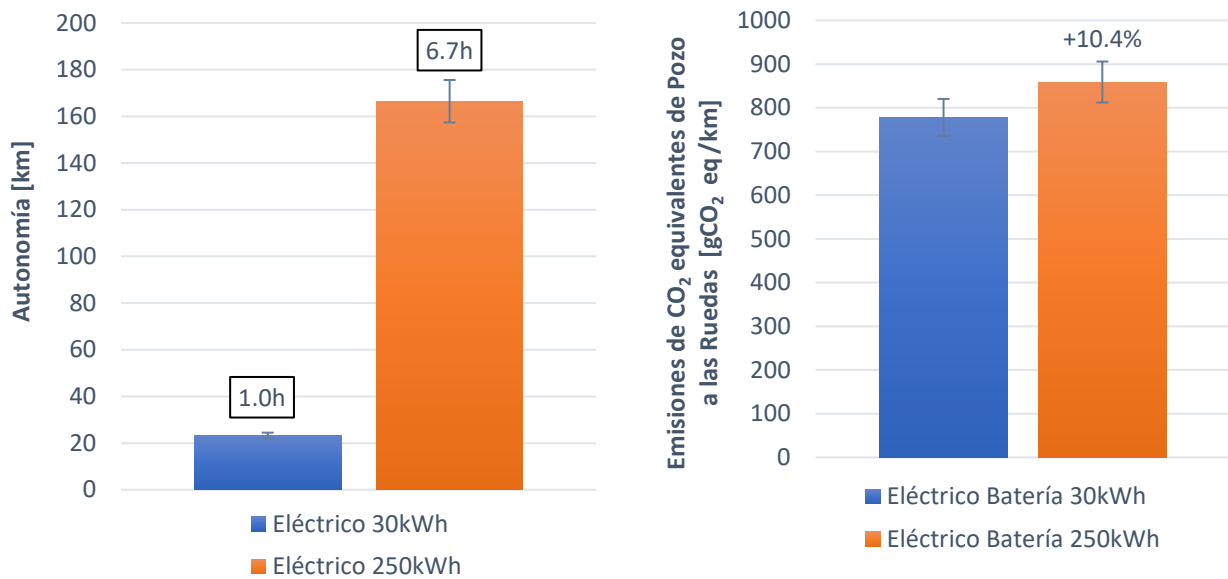


Figura 5.2 Comparación de autonomía y emisiones de CO₂ equivalentes para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 253. Fuente Propia.

Analizando la Figura 5.2, se comprueba que el eléctrico de 250kWh es capaz de proporcionar autonomía para todo el día sin necesidad de realizar recargas de oportunidad. En concreto, la autonomía alcanzada es de 6.7h, superior a las 6h que se exigen para completar el día frente a la autonomía de 1h que proporciona el vehículo con batería de 30kWh. No obstante, disponer de una batería mayor conlleva un incremento en el nivel de emisiones WTW en un mismo porcentaje que el incremento de consumo (10.4%).

De este modo, y teniendo en cuenta las características y horario de la ruta, una estrategia de carga de oportunidad parece más adecuada desde el punto de vista del ahorro energético y las emisiones, así como en el coste de compra y operación.

Línea 110 SC-Costa Adeje

En el caso de la Línea 110 SC-Costa Adeje, los pocos eventos de regeneración en frenada, las altas velocidades y las largas distancias hacen inviable emplear baterías

de pequeño tamaño, ya que la autonomía resulta insuficiente para poder completar, al menos, un viaje de ida y vuelta. La menor capacidad de batería que se debe emplear ronda los 300kWh, devolviendo los resultados expuestos en el capítulo anterior. Esta batería probablemente ocupe toda la superficie del techo de la guagua de 10.6m de longitud; disponer de una batería aún mayor resulta inviable y por ello no se estudiarán otros tamaños de batería para esta ruta.

Línea 015 SC-LL (ida y vuelta)

En el caso de la Línea 015 sería posible trabajar con distintos tamaños de batería en función de la estrategia que se quiera seguir. A raíz de las simulaciones se ha podido comprobar que una guagua eléctrica con batería de 50kWh permite completar un viaje completo de ida y vuelta en la Línea 015 antes de requerir de una recarga de oportunidad. En cambio, una batería de 300kWh aún no permite operar todo el día sin tener que recargar el vehículo, pero permite operar casi 5h antes de necesitar una recarga si se deja descargar la batería hasta alcanzar la reserva del 20%.

Si se opta por la primera opción, se entiende que se cuenta con el tiempo suficiente entre viajes para cargar la batería, lo que se ha comentado con la empresa TITSA, quienes ven improbable que se pueda disponer de dicho tiempo, pues los servicios en esta ruta son muy apretados y muchas veces las situaciones en carretera provocan retrasos que obliga a reducir los tiempos de parada en los intercambiadores.

En cambio, la segunda opción se adoptaría considerando, por ejemplo, una estrategia en la que la guagua eléctrica operase durante las casi 5 horas de autonomía que ofrece antes de ser enchufada y reemplazada por otra guagua que la cubra durante las siguientes 5 horas mientras la anterior alcanza un nivel de carga del 90% ó 100% según la carga se realice en La Laguna o Santa Cruz respectivamente por motivos de eficiencia.

Sin embargo, decantarse por una configuración u otra va a tener una influencia en el consumo (autonomía), emisiones y costes al igual que en el caso de la Línea 253. A continuación, se muestra una comparación entre el consumo energético, la energía recuperada en frenada y el nivel descargado de la batería que proporciona cada configuración:

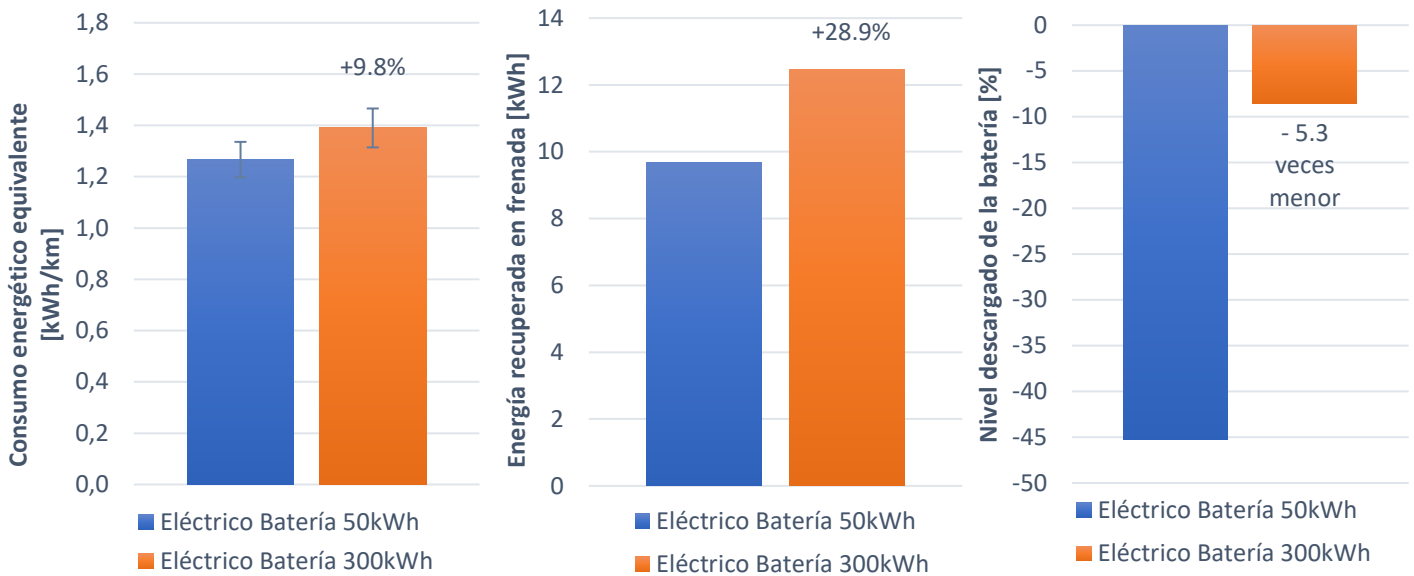


Figura 5.3 Comparación de consumo, energía recuperada en frenada y nivel descargado de la batería para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia.

Como se podía esperar, el vehículo con batería de 300kWh da lugar a un consumo energético mayor que el de 50kWh, en un valor similar al obtenido en el ciclo de la Línea 253, pues se obtiene un valor del 9.8% frente al 10.4% que se obtuvo anteriormente. En este caso, algo menor debido a que el aumento en el tamaño de batería aumenta la capacidad para regenerar energía en frenada, lo que se hace especialmente notable en dirección LL-SC, donde interesa maximizar dicho evento. En concreto, al tomar una batería de 300kWh el incremento en energía recuperada es del 28.9% sobre el vehículo con batería de 50kWh.

Evidentemente, el mayor consumo que se produce con la batería de 300kWh lleva asociado un incremento en el nivel de emisiones WTW, con la principal ventaja de que su autonomía es mucho mayor tal y como se observa en la Figura 5.4:

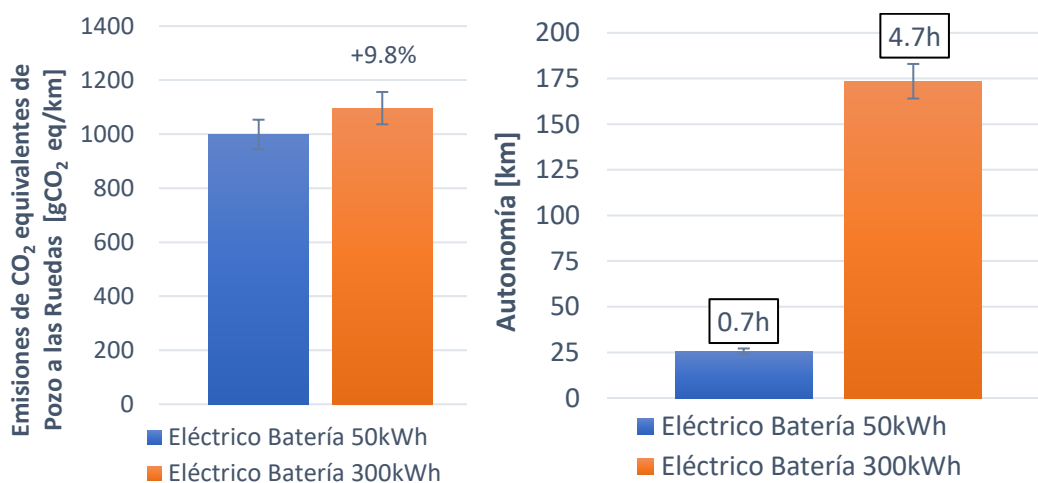


Figura 5.4 Comparación de autonomía y emisiones de CO2 equivalentes para la estrategia de carga de oportunidad y convencional en la Línea 015 (ida y vuelta). Fuente Propia.

En concreto, el aumento en el nivel de emisiones es del 9.8%, lo que resulta un aspecto desfavorable, pero se obtiene una mejora en la autonomía de unas 4h respecto al eléctrico con batería de 50kWh, facilitando la gestión de la flota para la realización de las recargas.

Por este motivo, se concluye que la opción con batería de 300kWh es la más adecuada para esta ruta, pues baterías más pequeñas implican un mayor número de cargas de oportunidad a lo largo del día y mayor sobredimensionamiento de la flota con el fin de disponer de suficientes guaguas de reserva para continuar el servicio.

En el siguiente apartado se muestran algunos estudios realizados para el vehículo eléctrico con el fin de evaluar la influencia de la carga de pasajeros, el encendido del aire acondicionado o la existencia de degradación en la batería como consecuencia de su uso y los continuos ciclos de carga y descarga que sufre a lo largo de su vida útil. Se comparará el impacto que tiene cada una de estas variables sobre distintas configuraciones de batería.

5.2 Impacto de SOC, carga de pasajeros y accesorios sobre el consumo y la autonomía

El consumo y la autonomía que se obtenga va a estar influenciado por las condiciones en las que se realicen el viaje, ya que no será lo mismo que el viaje se complete con la guagua prácticamente vacía a que se haga con la guagua llena y el aire acondicionado encendido; o que se haga con una guagua que ya tiene cierta antigüedad, pues el desgaste también tiene un impacto. A raíz de ello, se ha decidido realizar un estudio sobre configuraciones eléctricas teniendo en cuenta situaciones cada vez más desfavorables con el fin de evaluar su influencia en el consumo y la autonomía. Precisamente, en estas configuraciones la autonomía es especialmente pobre, por lo que debe tenerse en cuenta el impacto de estos factores externos (de ruido) para la elección de la configuración óptima en cada tipo de ruta, lo que además, supondrá una ayuda en la toma de decisiones a la hora de situar los puntos de recarga de oportunidad.

En la siguiente figura se muestra cómo varía la autonomía del vehículo eléctrico con batería de 30kWh en la Línea 253 LL-Garimba cuando se consideran distintas hipótesis:

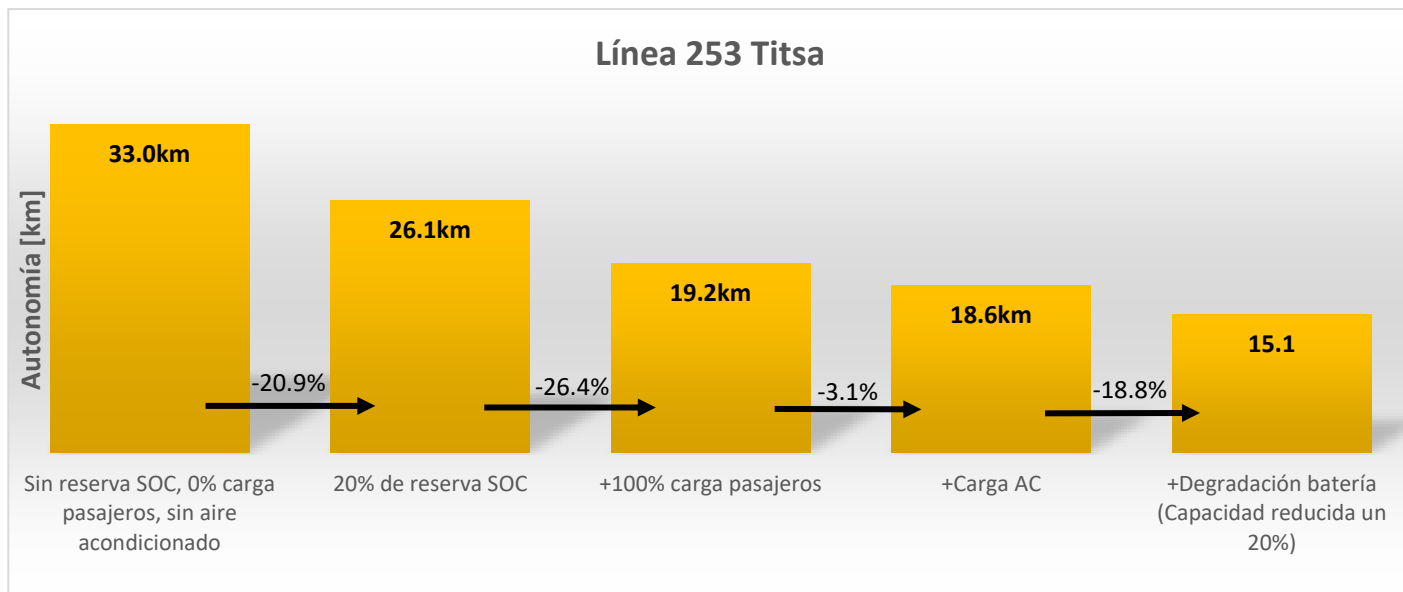


Figura 5.5 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de la configuración 100% eléctrica con batería de 30kWh en la Línea 253 LL-Garimba Fuente Propia.

Como punto de partida del estudio se ha considerado la situación ideal que proporcionaría la mayor autonomía posible en esta configuración, es decir, que se considere que se puede aprovechar completamente la capacidad de la batería (sin considerar ningún tipo de reserva por motivos de salud de la batería ni operacionales); que no haya pasajeros a bordo y que el aire acondicionado esté apagado en toda la ruta. En ese caso, la autonomía alcanzada asciende a los 33.0km, lo que le permitiría completar unos 2 viajes de ida y vuelta en la ruta sin necesidad de recargar, pero llegaría con la batería prácticamente a 0% de carga, lo que también supone un riesgo debido a que, ante cualquier imprevisto, podría suceder que la guagua no pudiera llegar al Intercambiador de La Laguna con suficiente batería y tuviera que recibir asistencia en carretera, lo que no es admisible. Por este motivo, se considera una reserva del 20% de energía en la batería, representando una reducción estimada en la autonomía del 20.9%, bastante significativo.

Por otro lado, se debe de considerar que la guagua no viajará sin pasajeros con carácter general, por lo que además se debe de contabilizar la existencia de una carga adicional de pasajeros. En este caso, si se considera que la guagua viaja completamente llena (pasajeros sentados y de pie) la penalización sería del 26.4% que se suma a la reducción anterior dejando la autonomía en 19.2km, lo que solo es suficiente para completar un único viaje de ida y vuelta.

Adicionalmente, es de esperar que en un día caluroso el aire acondicionado del vehículo se encuentre encendido para confort de los usuarios. Se estima que su impacto sea únicamente del 3.1% cuando la guagua viaja llena y con 20% de reserva de energía, por lo que no es un factor muy influyente.

Además, debe tenerse en cuenta que con los continuos ciclos de carga y descarga que sufre la batería a lo largo de su vida, se degradará paulatinamente a lo largo del tiempo. Se estima que una degradación del 20% en la capacidad total de la batería suponga una reducción del 18.8% en la autonomía del vehículo, dejando su valor en 15.1km, lo que ya resultaría insuficiente para completar un viaje de ida y vuelta si se dieran todas las circunstancias de forma simultánea. En caso de que ello sucediera, esta información permitiría anticiparse al problema ayudando en la toma de decisiones. Por ejemplo, se podría decidir que con una degradación en la batería del 20%, la guagua debe de reducir el número máximo de pasajeros que puede transportar para, al menos, poder completar un viaje de ida y vuelta.

Resulta interesante que los sucesivos factores tenidos en cuenta han sido capaces de reducir la autonomía en un 54.2% (desde 33.0km a 15.1km) lo que sugiere que deben ser cuidadosamente analizados, sobre todo cuando se trata de vehículos eléctricos en los que su única fuente de energía es la batería.

En la siguiente figura se muestra el impacto de los mismos factores en la configuración 100% eléctrica con batería de 300kWh empleada en la Línea 110 SC-Costa Adeje.

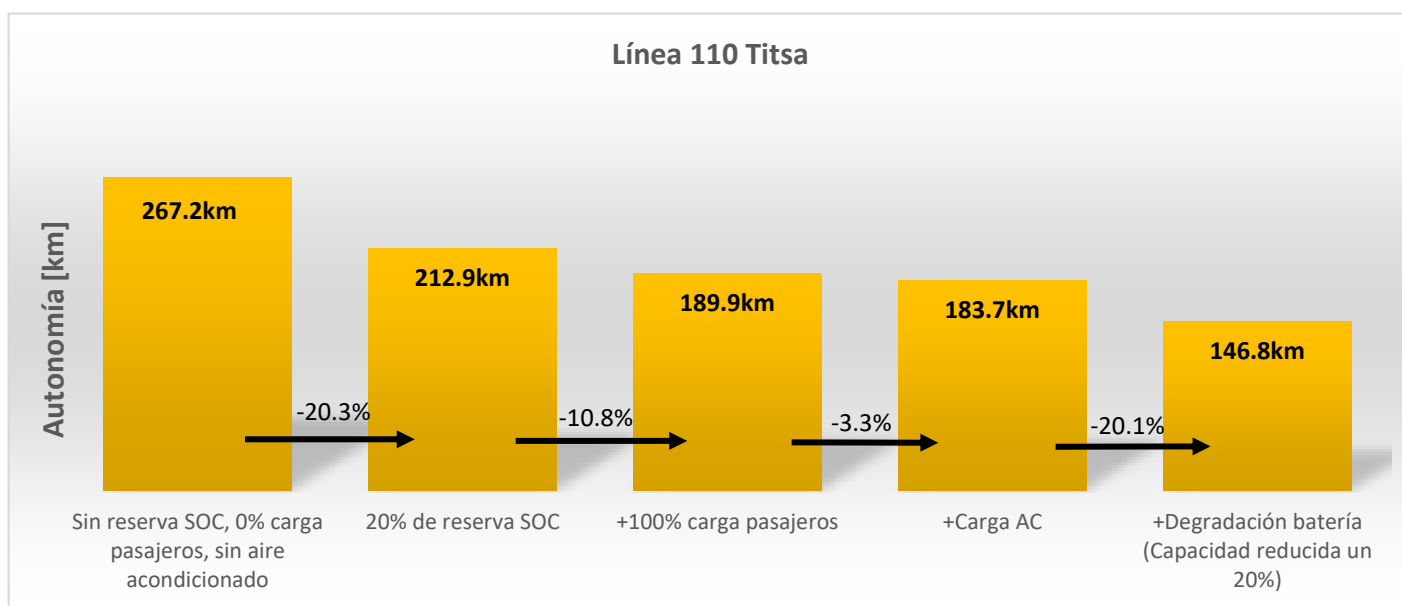


Figura 5.6 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de la configuración 100% eléctrica con batería de 300kWh en la Línea 110 SC-Costa Adeje. Fuente Propia.

Como se puede observar en la figura 5.6, la reducción en autonomía provocada por cada factor es muy parecida a las obtenidas en la Figura 5.5 para la configuración eléctrica en la Línea 253, salvo en el impacto que supone pasar de una situación en la que no viaja ningún pasajero a una en la que la guagua viaja completamente llena. En este caso, la reducción que se obtiene es del 10.8%, mientras que para la Línea 253 era del 26.4%. El motivo se encuentra en que la guagua empleada en la Línea 110 pesa unas tres toneladas más que la anterior, lo que supone que la percepción de un aumento de peso sea menor.

Por otro lado, se observa que en una situación ideal de cero pasajeros y sin considerar reservas de energía, la autonomía alcanzada es de 267.2km, mientras que en el caso en que va llena, con aire acondicionado y reserva del 20% de energía, la autonomía se reduce a 183.7km (unos 83.5km menos), lo que supone perder un viaje. Si además se tiene en cuenta una degradación en la batería del 20%, la autonomía se reduce en un 20.1%, limitando la autonomía a unos 147km resultando ya insuficiente para completar, al menos, un viaje de ida y vuelta. En este caso, una limitación de la capacidad de pasajeros no sería adecuada, pues prácticamente se necesitaría que la guagua fuera vacía para completar un viaje de ida y vuelta con esta degradación. En tal caso, solo parece razonable sustituir la batería por una nueva o plantear la posibilidad de realizar recargas de oportunidad tanto en el Intercambiador de Santa Cruz como en la Estación de Costa Adeje.

Del mismo modo, se han obtenido resultados para la Línea 015 SC-LL (considerando un viaje completo de ida y vuelta) tanto para la configuración eléctrica con batería de 50kWh como para la correspondiente a una batería de 300kWh. Adicionalmente, se ha estimado el número de horas equivalentes de operación que se obtienen en cada situación, ya que en esta línea el cumplimiento de los horarios es más complicado y resulta de ayuda conocer cuántas horas de servicio proporcionaría la guagua en unas condiciones determinadas. En la siguiente figura se muestran los resultados:

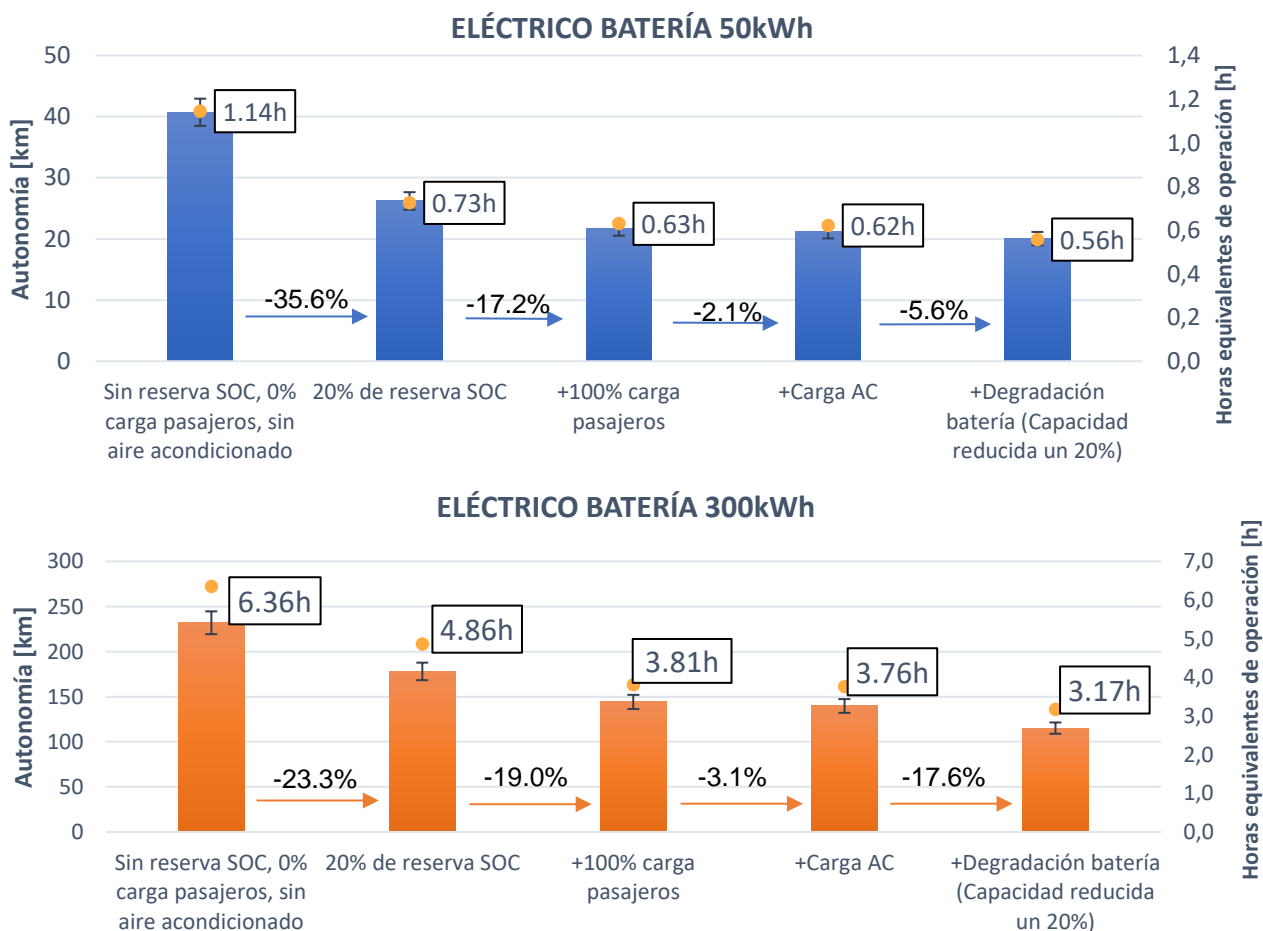


Figura 5.7 Impacto de los principales factores externos en la autonomía de las configuraciones 100% eléctrica de la Línea 015 SC-LL. Fuente Propia.

Comparando los resultados entre ambas configuraciones, de forma general se puede apreciar que los distintos factores tienen una mayor influencia sobre el vehículo eléctrico con batería de 300kWh; en concreto, la carga de pasajeros, el encendido del aire acondicionado y la degradación de la batería. No obstante, la penalización de la carga de pasajeros y del aire acondicionado es similar en ambos casos.

Anteriormente se comentó que el mayor peso del vehículo eléctrico supondría que el impacto asociado al aumento de la carga de pasajeros tuviera menor influencia, pero en este caso, el impacto es prácticamente el mismo para ambas configuraciones, incluso superior en el vehículo más pesado. La razón se encuentra en que la influencia de la carga de pasajeros se vuelve importante en ambos casos al contar con gradientes de carretera positivos, pues el peso añadido penaliza en las subidas.

Por otro lado, se vuelve a comprobar que cuando se da la circunstancia más desfavorable analizada (guagua llena con aire acondicionado encendido, reserva de energía del 20% y degradación del 20% en la batería), se obtiene prácticamente la mitad de autonomía con respecto a la situación ideal (guagua vacía y sin considerar reserva de energía), lo que resulta especialmente crítico en el caso de la guagua de 50kWh por su menor tamaño de batería, llegando incluso a permitir tan solo unos 20km (0.56h) de autonomía, haciendo necesarias constantes recargas de oportunidad a lo largo del día tal y que han llevado a su descarte para esta ruta.

En cambio, para el vehículo con batería de 300kWh se obtiene una autonomía de unos 115km (3.2h) en el peor caso analizado, que al menos permitiría reducir el número de recargas a lo largo del día, resultando entonces una estrategia más conveniente para esta ruta debido a la gestión de tiempos más compleja.

A pesar de ello, debe tenerse en cuenta que la autonomía mostrada para cada hipotético caso considera que se va a mantener la misma situación en todos los viajes, lo cierto es que a lo largo de la ruta y del día la carga de pasajeros es variable. Al igual que puede suceder que el aire acondicionado no se mantenga encendido todo el día, sobre todo a primeras horas de la mañana o por la noche. Un estudio más representativo consistiría en considerar un flujo variable de pasajeros en el ciclo y aleatorizar el número de pasajeros que se suben o bajan en las paradas según datos estadísticos de la línea. De este modo, se ejecutarían sucesivas simulaciones, cada una distinta a la anterior debido a las diferentes combinaciones de carga que se pudieran producir a lo largo de la ruta y realizando una media de consumo de todas ellas para obtener un valor representativo; incluso se podrían definir horas pico y valle de demanda de pasajeros para mejorar el estudio, ya que, en este TFG, simplemente se ha considerado que se mantiene la misma carga de pasajeros a lo largo de todo el ciclo y día. Este estudio de mayor precisión podría ser realizado en un futuro, pero se sale del alcance del trabajo.

A pesar de todo, se han obtenido resultados de consumo para distintas cargas de pasajeros y de accesorios tanto para las configuraciones eléctricas (donde resulta fundamental) como para el resto de las arquitecturas modeladas poniendo como ejemplo las líneas 253 y 110. Dichos resultados pueden ser consultados en el *Anexo de Resultados* (apartado 9.2.2)

5.3 Impacto de la agresividad del conductor en el consumo y la autonomía

Otro de los principales factores que tiene un impacto significativo sobre el consumo, las emisiones o el desgaste del vehículo es la agresividad del conductor en la conducción.

Con el fin de realizar una conducción más eficiente, se pueden aplicar algunas estrategias como evitar acelerar o frenar repentinamente, realizando en su lugar, aceleraciones más progresivas mediante el accionamiento del acelerador de manera más lenta y gradual; o alargando las frenadas mediante el aprovechamiento de la inercia del vehículo (técnica de tiempo sin pedales o “*coasting*” en inglés). Igualmente, apagar el motor de combustión en tiempos de ralentí muy largos, mantener una velocidad lo más estacionaria posible, y respetar los límites de velocidad, o evitar el uso del aire acondicionado siempre que sea posible mediante la apertura de las ventanas, permitirán reducir considerablemente el consumo y aumentar la autonomía [31].

Algunas empresas como Volvo, está incluyendo en su oferta, software específico para realizar un análisis en tiempo real de sus guaguas en operación, de modo que pueden saber en todo momento los consumos que se están obteniendo, si el conductor está realizando aceleraciones muy fuertes, o incluso si rebasa los límites de velocidad. Con el fin de controlarlo, Volvo hace uso de las telecomunicaciones para enviar una señal al conductor cuando se detectan aceleraciones o frenadas muy fuertes, de tal forma que este actúe en consonancia, o incluso limitar automáticamente la velocidad del vehículo cuando se sobrepasa un “perímetro virtual” que la compañía puede definir desde el software. De esta manera, se podría definir, por ejemplo, una zona dentro de ciudad donde se prohíba que el vehículo circule a más de 30km/h, o evitar que el vehículo se aproxime a más de 20km/h cuando entra en una parada, etc. Esta y otras herramientas emergentes fruto de la cuarta revolución industrial que está experimentando el planeta, surgen en busca de una conducción más eficiente y la mejora en la seguridad en la movilidad.

Las técnicas de conducción eficiente resultan especialmente cruciales en configuraciones eléctricas en las que la autonomía es muy limitada, por lo que en estos casos resulta muy recomendable que los conductores reciban formación e información sobre ello, recalcando su importancia e incentivando la aplicación de estas técnicas de forma económica según la reducción en consumo que cada conductor consiga.

Como se puede deducir, las técnicas de conducción eficiente tendrán un mayor impacto en ciclos predominantemente urbanos como el de la Línea 253 LL-Garimba, por ello, se ha escogido esta línea para evaluar el beneficio de estas técnicas sobre el consumo o autonomía. Para ello, se ha tomado el ciclo de la Línea 253 y se le ha aplicado un filtro en MATLAB para suavizar los cambios de velocidad y eliminar picos de velocidad que denotan un estilo de conducción de agresivo. De este modo, se compararán los consumos que se obtienen con el ciclo original (más agresivo) y con el suavizado (menos agresivo), que básicamente podría ser la comparación entre dos conductores completamente diferentes. En la siguiente figura se muestra la comparación entre los dos ciclos obtenidos.

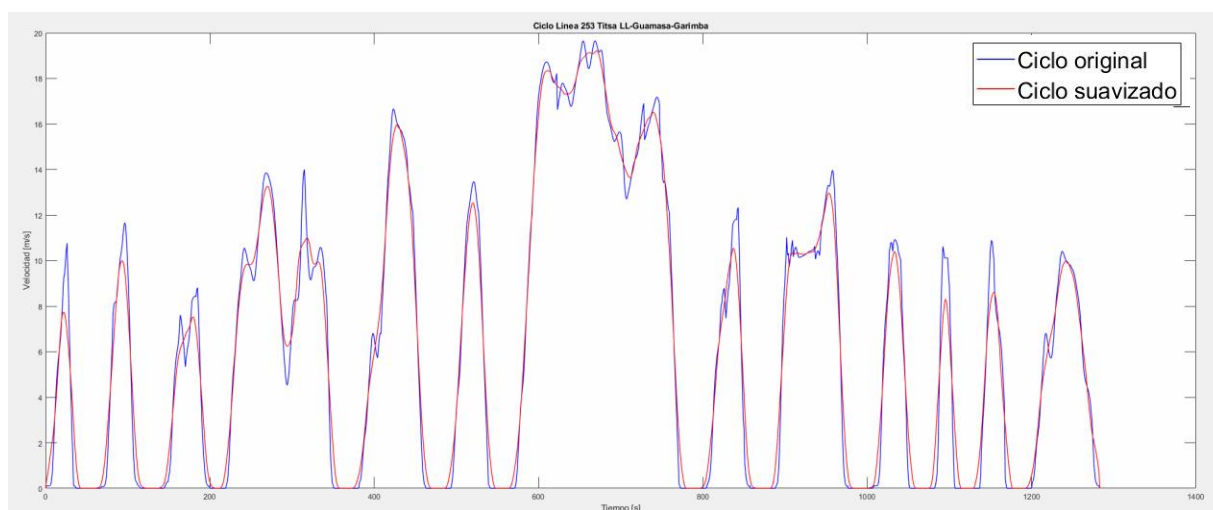


Figura 5.8 Comparación entre perfiles de velocidad obtenidos para dos conductores con distinto estilo de conducción en la Línea 253 LL-Garimba. Conductor más agresivo (curva azul), conductor menos agresivo (curva roja). Fuente Propia.

En la figura se muestran dos perfiles de velocidad para la Línea 253, un conductor agresivo podría devolver un perfil como el representado en color azul, mientras que el otro podría ser un conductor que conoce algunas de las técnicas mencionadas y devuelve un perfil más suave como el representado en color rojo. Comparativamente, se observa que el conductor más eficiente no provoca picos de velocidad tan altos como el conductor más agresivo. Del mismo modo, los cambios de velocidad los realiza de manera más progresiva eliminando las grandes oscilaciones que provoca el conductor más agresivo.

A continuación, se presentan la comparación en consumo de combustible equivalente para cada uno de los modelos analizados en la Línea 253:

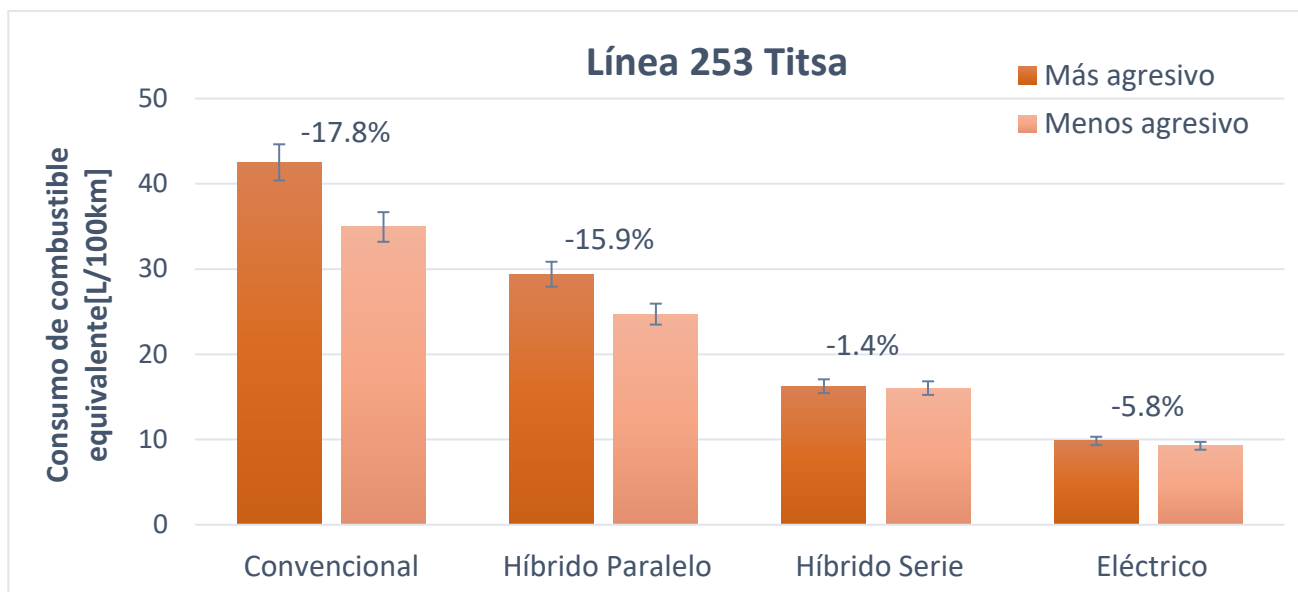


Figura 5.9 Comparación en consumo de combustible equivalente entre el conductor más agresivo y el menos agresivo en la Línea 253 LL-Garimba para diferentes arquitecturas. Fuente Propia.

Como se puede apreciar en la Figura 5.9, en todos los casos se obtiene una reducción en consumo cuando se aplican técnicas de conducción eficientes. La mayor mejora se consigue en el vehículo convencional con un 17.8%, debido a que se trata de un ciclo con muchas aceleraciones y desaceleraciones a bajas velocidades que conducen a una mala eficiencia del vehículo convencional tal y como se ha demostrado en capítulos anteriores.

Le sigue el vehículo híbrido en paralelo con una reducción del 15.9% como consecuencia que en este vehículo la tracción la proporciona principalmente el motor de combustión. Al conducir en puntos de mayor eficiencia, se reduce igualmente el consumo.

A continuación, se encuentra el vehículo eléctrico con una reducción del 5.8%, motivada por la eliminación de los picos de velocidad locales y una transición más suave en los cambios de velocidad, lo que permite reducir las aceleraciones o desaceleraciones innecesarias y reducir el consumo eléctrico para la misma energía regenerada en frenada.

Por último, se encuentra el híbrido en serie con una reducción de tan solo el 1.4% debido a que es el vehículo de mayor peso y sus dos motores trabajan con buena eficiencia con carácter general. Por esta razón, la reducción en consumo alcanzada no es importante.

A pesar de todo, la configuración que proporciona en esta ruta mayores ventajas desde el punto de vista energético es la configuración eléctrica, ya que da lugar a los menores consumos y emisiones, y su autonomía, resulta suficiente para realizar eventos de recarga de oportunidad. No obstante, a la vista de los resultados es

posible reducir el número de eventos necesarios si se aplican técnicas de conducción eficiente, pues se produce un incremento en la autonomía del vehículo tal y como se observa en la siguiente figura:

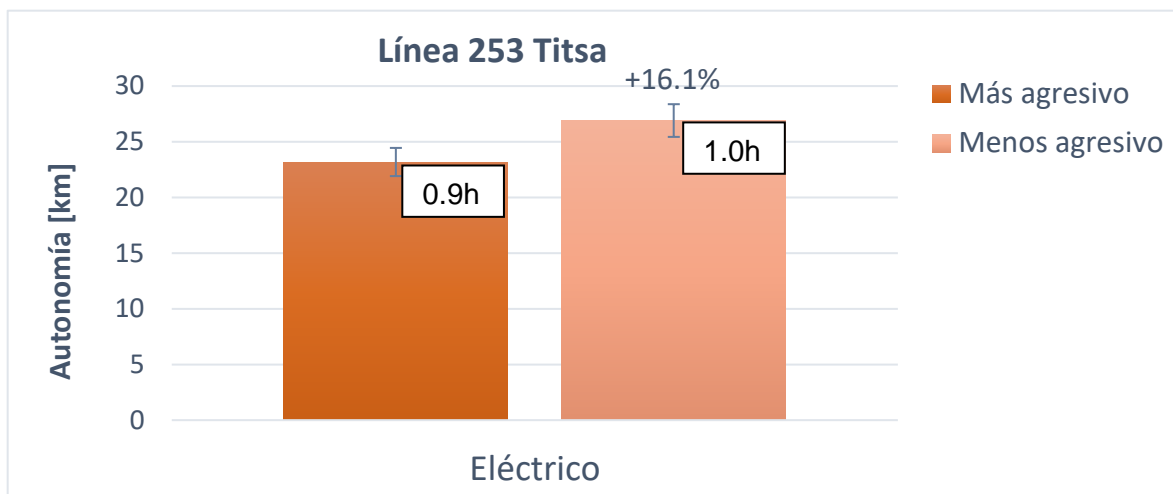


Figura 5.10 Comparación en autonomía alcanzada entre el conductor más agresivo y el menos agresivo en la Línea 253 LL-Garimba para la configuración eléctrica. Fuente Propia.

Se confirma así que una conducción eficiente supone un aumento en la autonomía alcanzada. Para el caso de la configuración eléctrica, la extensión obtenida es de unos 3.7km adicionales o unos 6-7 minutos más de operación, lo que es significativo teniendo en cuenta lo corta que es la ruta (8km, 20 minutos). Esto supone que para rutas más largas en las que la autonomía es crítica, la aplicación de técnicas de conducción eficientes es fundamental, debiendo trabajarse con los conductores para contribuir a la eficiencia energética de la flota.

Del mismo modo, una reducción en consumo supone una reducción en las emisiones de CO₂ equivalente. La comparación en reducción de emisiones para la Línea 253 así como la mejora en autonomía alcanzada por el resto de las arquitecturas se puede encontrar en el *Anexo de resultados* (apartado 9.2.3) con el fin de limitar la extensión de esta memoria.

Con esto finaliza el estudio eléctrico, obteniendo algunas conclusiones importantes para la toma de decisiones en la gestión de la flota. Por un lado, se ha justificado la aplicación de la estrategia de carga de oportunidad en la Línea 253 LL-Garimba mediante el empleo de un vehículo eléctrico con batería de 30kWh debido a que la autonomía alcanzada y el espaciamiento entre servicios lo hace viable. Por otro lado, se llega a la conclusión de que en líneas de larga distancia como la Línea 110 SC-Costa Adeje, no es posible el uso de baterías de pequeño tamaño, pues la ausencia de eventos de regeneración en frenada y las altas velocidades contribuyen a una descarga rápida de la batería. En este caso, si se deseara emplear una configuración eléctrica para esta ruta, se debería disponer una batería de gran capacidad como la propuesta de unos 300kWh, que en este caso es la única que permite completar, al menos, un viaje de ida y vuelta en la ruta. Finalmente, en otras rutas más cortas, pero de elevado consumo y demanda de pasajeros, como la correspondiente a la

Línea 015 SC-LL, se optaría del mismo modo por baterías de gran capacidad que permitiesen extender la autonomía lo máximo posible, ya que el uso de baterías pequeñas conduciría a un elevado número de eventos de recarga de oportunidad que en líneas de elevada frecuencia de viajes al día supondría sobredimensionar la flota en exceso para cumplir todos los servicios a tiempo.

En cualquier caso, la aplicación de técnicas de conducción eficiente podría permitir la reducción de los eventos de recarga en configuraciones eléctricas, sobre todo en la Línea 015 donde resulta más complicada la gestión del tiempo, ya que habitualmente, cada 5, 10 ó 15 minutos suele iniciarse un nuevo viaje desde cada intercambiador.

En el siguiente capítulo, se recogerá de manera resumida las arquitecturas y configuraciones que, en general, se consideran más idóneas para cada ruta analizada en base a la mejora obtenida en consumo, emisiones y autonomía, incluso cuando no se obtenga una mejora sustancial pero sea la solución más adecuada para cumplir con la ley vigente en ese momento.

6 ARQUITECTURA Y CONFIGURACIÓN MÁS IDÓNEA PARA CADA RUTA ANALIZADA

Una vez analizadas las distintas arquitecturas y configuraciones en cada ruta, se muestra a modo de resumen los resultados de consumo, emisiones y autonomía obtenidos a lo largo de este TFG. De esta manera, se recoge en un breve capítulo los aspectos que han hecho más adecuadas a unas arquitecturas respecto a otras para cada tipo de línea estudiada.

En las Figuras 6.1 y 6.2 se recoge la comparación en consumo, emisiones y autonomía para las arquitecturas y configuraciones seleccionadas:

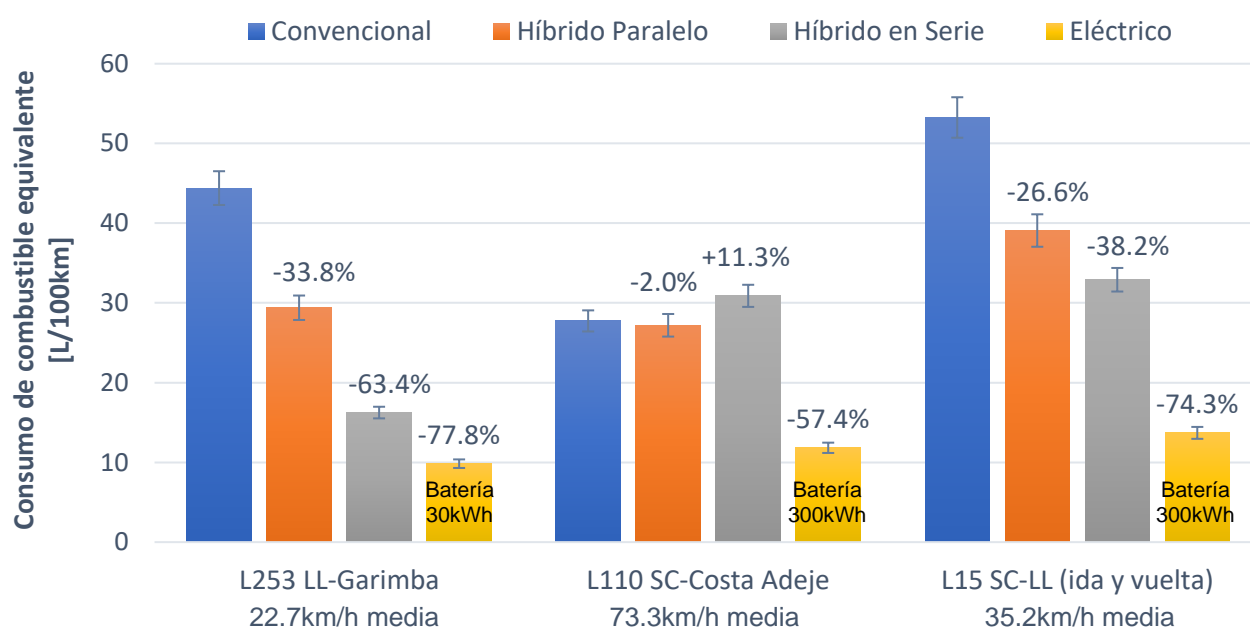


Figura 6.1 Comparación en consumo de combustible equivalente entre arquitecturas y configuraciones para cada línea analizada. Fuente Propia.

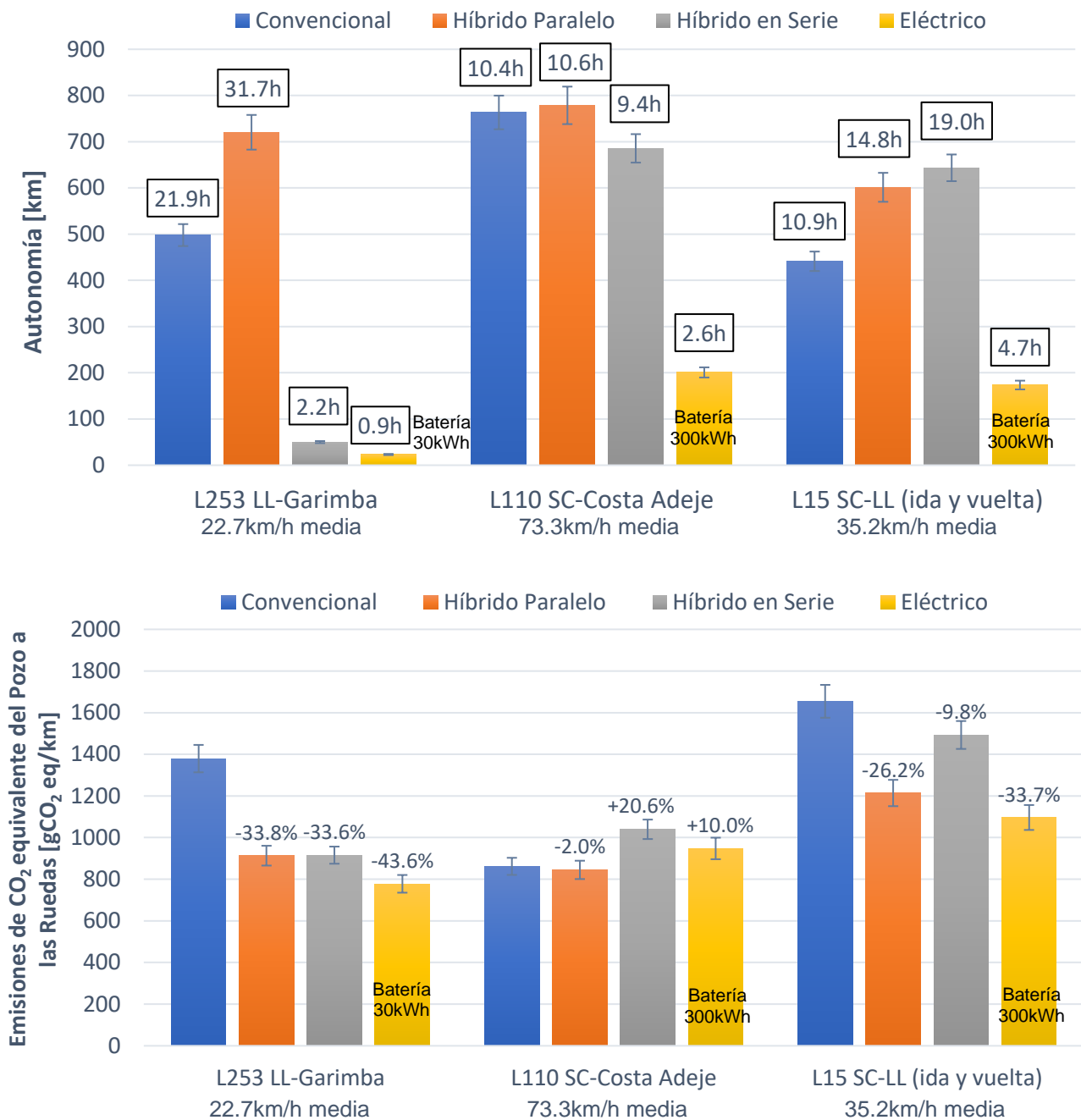


Figura 6.2 Comparación en autonomía y emisiones entre arquitecturas y configuraciones para cada línea analizada. Fuente Propia.

En cuanto a Línea 253, la electrificación supone una mejora en todos los casos respecto a la arquitectura convencional. La configuración 100% eléctrica es la que proporciona la mayor mejora en consumo y emisiones a pesar de que su autonomía es escasa como consecuencia de haber optado por una estrategia de carga de oportunidad.

La arquitectura híbrida en paralelo proporciona una autonomía mayor que le permite operar todo el día sin necesidad de repostar, pero da lugar a consumo y emisiones

mayores, sin evitar que se contamine dentro de ciudad, por lo que no representa una opción adecuada para esta ruta.

Por su parte la arquitectura híbrida en serie permite reducir el consumo y las emisiones respecto al híbrido en paralelo, evitando además que dichas emisiones se produzcan dentro de ciudad, pero su autonomía es pequeña. En su caso, permitiría reducir el número de eventos de recarga de oportunidad que exige el vehículo eléctrico, pero la mejora en consumo y emisiones que permite este último lo convierten en la arquitectura más adecuada para operar en esta línea.

En cuanto a la posibilidad de optar en esta ruta por una estrategia de carga convencional, daría lugar a un aumento del peso del vehículo que se traduciría en un mayor consumo y emisiones totalmente injustificado salvo que no existieran cargadores suficientes durante el día para que esta guagua pudiera realizar su recarga. Lo más adecuado sería que se contabilice el número de guaguas que van a optar por esta estrategia y asegurar que van a poder disponer de un cargador cuando sea necesario, por lo que en principio no se optaría por una carga convencional.

Por otro lado, en lo que respecta a la Línea 110 SC-Costa Adeje, la electrificación no resulta una clara ventaja respecto a la arquitectura convencional como consecuencia de que no se dan las condiciones más adecuadas para aprovechar las ventajas de la regeneración en frenada y debido a la operación más eficiente de la arquitectura convencional.

Como consecuencia, la arquitectura híbrida en paralelo da lugar a consumos, emisiones y nivel de autonomía muy similar al de la arquitectura convencional, mientras que en el caso de la arquitectura híbrida en serie se obtienen incluso consumos y emisiones mayores al convencional, con la única ventaja de que no da lugar a emisiones dentro de los núcleos urbanos de Santa Cruz, San Isidro y Costa Adeje manteniendo una autonomía aceptable.

En lo que respecta al vehículo eléctrico, logra una reducción en consumo y emisiones bastante significativa al prescindir de motor de combustión y operar con buena eficiencia, pero su autonomía resulta muy limitada, haciendo necesaria una recarga de oportunidad cada vez que se completa un viaje de ida y vuelta en esta línea. Esto supondría un consumo eléctrico de la red muy importante teniendo en cuenta el considerable tamaño de la batería (300kWh) y la frecuencia de recargas.

Actualmente la isla no está preparada para ello, por lo que la solución más adecuada a corto-medio plazo sería la solución híbrida en serie, pues a pesar de presentar un consumo y emisiones WTW mayores, permite operar dentro de ciudad en modo 100% eléctrico y cumplir en el futuro próximo con la legislación sobre emisiones contaminantes que se imponga en las ciudades. A medida que incrementa la

penetración de renovables en la red, el consumo y emisiones asociadas al vehículo se reducirán notablemente haciendo a esta arquitectura más competitiva.

A largo plazo, la solución más idónea para rutas de larga distancia como la 110, sería el vehículo de hidrógeno (FCEB) que no ha sido analizado en este TFG. Esta arquitectura permite alcanzar autonomías elevadas (próximas a los vehículos convencionales) y con cero emisiones TTW a pesar de su peor eficiencia respecto a la arquitectura eléctrica. Por ello, para resultar ventajosa, es importante que el hidrógeno se obtenga a partir de energías renovables, dando lugar al conocido como hidrógeno verde, pues su obtención a partir de la red eléctrica con la intensidad de CO₂ actual, tendría asociada una eficiencia del 65%, lo que supone unas emisiones WTW muy elevadas. Si en el futuro no fuera posible el uso del hidrógeno en la isla, se tendría que apostar por los vehículos eléctricos y realizar las mencionadas cargas de oportunidad suponiendo que para entonces la red eléctrica es lo suficientemente robusta para satisfacer la demanda, se cuenta con generación eléctrica 100% renovable, el sistema de almacenamiento de energía es seguro, los costos de las baterías son aceptables, y los tiempos de recarga asumibles.

En lo que respecta a la Línea 015 SC-LL, la electrificación supone en cualquier caso una mejora cuando se compara con la arquitectura convencional. A mayor nivel de electrificación, menor consumo se obtiene, lo que significaría que se obtendrían emisiones cada vez menores, pero debido al *mix* energético de la isla esto no es así. La mayor reducción en consumo la proporciona la arquitectura eléctrica como era de esperar, pero la híbrida en serie da lugar al mayor aumento de emisiones de entre las alternativas a la convencional y, a pesar de ello, es la que mayor autonomía ofrece sin emisiones dentro de ciudad, por lo que se posiciona como la solución más adecuada a corto-medio plazo, resultando más competitiva conforme aumente la penetración de renovables en la red.

En cuanto a la arquitectura eléctrica, nuevamente presenta el problema de la escasa autonomía como consecuencia de que el ciclo se puede clasificar como “de elevado consumo” a causa del gradiente de carretera. Por este motivo, se ha encontrado que lo más adecuado sería optar, en su caso, por tamaños de batería grandes como la seleccionada de 300kWh, lo que al final vendrá limitado por la longitud total del vehículo.

En el largo plazo, los vehículos de hidrógeno serían una buena opción para la ruta debido a las mejoras comentadas que introduce esta arquitectura, y si ello no fuera posible, teniendo en cuenta el desarrollo que ya debería haber alcanzado la infraestructura de carga de la isla, se emplearían vehículos eléctricos de gran capacidad gestionando adecuadamente los servicios y la reserva de guaguas de la flota para sustituir a las guaguas que se mantengan recargando, ya que en esta ruta no es posible realizar cargas convencionales al carecer de autonomía suficiente.

En resumen, se optaría por la siguiente estrategia:

Línea 253 LL-Garimba

Uso de arquitecturas eléctricas, configuración de batería de pequeña capacidad (30kWh para guagua de 10.6m de longitud) destinada a la realización de una recarga de oportunidad por cada viaje de ida y vuelta desde el intercambiador de La Laguna. Cero emisiones TTW. Se requeriría disponer de la infraestructura de recarga adecuada en el intercambiador.

Línea 110 SC-Costa Adeje

La entrada de vehículos de cero emisiones TTW debe realizarse de manera progresiva en el tiempo debido a las limitaciones actuales de la red energética de la isla. Se distinguen dos periodos en el tiempo:

- Corto-medio plazo: Uso de arquitecturas híbridas en serie, configuración de batería de pequeño tamaño (50kWh de capacidad para guagua de 10.6m de longitud) y tanque de combustible de unos 400L Diesel para operación ininterrumpida en todo el día sin generar emisiones TTW dentro de ciudad, lo que permitiría cumplir con la normativa de emisiones que se prevé que se implante en las ciudades mientras se permita el uso de los motores de combustión.
- Largo plazo: Uso de arquitectura basada en el empleo del hidrógeno como combustible. Larga autonomía, tiempo de carga similar a las arquitecturas convencionales y cero emisiones TTW. En su defecto, uso de arquitecturas eléctricas, configuración de batería de gran capacidad (300kWh para guagua de 10.6m de longitud) para operación durante unas 2.6h sin necesidad de recarga. En este último caso, se requiere una correcta gestión de la flota para poder cubrir a las guaguas que necesiten recargarse o contar con supercargadores que permitan obtener tiempos de recarga de apenas unos minutos. Probablemente se requiera de una infraestructura de carga adecuada no solo en el Intercambiador de Santa Cruz sino, también, en la Estación de Costa Adeje.

Línea 015 SC-LL

La entrada de vehículos de cero emisiones TTW debe realizarse igualmente de manera progresiva en el tiempo debido a las limitaciones actuales de la red energética de la isla. Se distinguen dos periodos en el tiempo:

- Corto-medio plazo: misma solución que en la Línea 110 pero con la posibilidad de emplear un híbrido en serie con tanque de combustible menor. Tanques con 235L Diesel de capacidad serían suficientes para tener que repostar únicamente al finalizar el servicio por la noche o antes

de iniciar el servicio por la mañana. En su defecto, puede optarse por tanques mayores para mayor autonomía (dependerá de las opciones del fabricante y decisión final de TITSA).

- Largo plazo: misma solución que en la Línea 110, pero con la diferencia de que las configuraciones eléctricas seleccionadas con batería de 300kWh para una guagua de 10.6m permitirían operar sin necesidad de recarga durante una duración estimada de 4.7h. En este caso, la correcta gestión de los tiempos y el volumen de la reserva de guaguas es fundamental.

7 CONCLUSIONES

7.1 Conclusiones generales

En el presente Trabajo Fin de Grado, se ha llevado a cabo el análisis energético de soluciones alternativas para transporte pesado de pasajeros. Concretamente, se ha centrado la investigación en el sector de las guaguas de transporte público de la isla de Tenerife tomando como referencia para el análisis tres líneas representativas de conducción en la isla: la Línea 253 (La Laguna – Guamasa – Garimba), la Línea 110 (Santa Cruz – Costa Adeje) y la Línea 015 (Santa Cruz – La Laguna).

La línea 253 se caracteriza por ser una ruta de corta duración, mayoritariamente urbana con frecuentes aceleraciones, desaceleraciones y paradas (baja velocidad media) y gradiente de carretera despreciable. Por el contrario, en la Línea 110 predomina la conducción extraurbana en autopista con pocas aceleraciones, desaceleraciones y paradas (alta velocidad media) durante un tiempo de conducción relativamente largo (aproximadamente 1h) combinando también conducción en ciudad y con un gradiente de carretera despreciable. En cuanto a la Línea 015, viene definida como una ruta mayoritariamente extraurbana, pero con un elevado gradiente de carretera que se estima en un 5% de media, donde además, las aceleraciones, frenadas y paradas son numerosas, dando lugar a una ruta de elevado consumo y a la necesidad de vehículos con potencias máximas que pueden llegar a superar los 400CV operando a plena carga de motor durante la mayor parte de la ruta.

Las arquitecturas alternativas de tren de potencia que han sido consideradas para el análisis energético en estas rutas han sido la híbrida en paralelo, la híbrida en serie y la 100% eléctrica; cada una de las cuales con sus ventajas e inconvenientes dependiendo de las características de la línea.

Para llevar a cabo el análisis energético se ha construido, configurado y simulado cada arquitectura mediante el software americano Autonomie, propiedad de Argonne National Laboratory, y todos los modelos construidos han sido verificados con datos de la literatura. Por otro lado, cada una de las rutas mencionadas han sido construidas a partir del ciclo ETC, ciclo de homologación de emisiones para vehículos pesados ampliamente usado en Europa.

A partir de las más de 1000 simulaciones llevadas a cabo en Autonomie se ha podido llegar a las conclusiones expuestas a continuación:

En primer lugar, se concluye que, a mayor nivel de electrificación del vehículo, mayor beneficio en cuanto a consumo y emisiones en líneas dominadas por la conducción urbana como la 253, especialmente cuando se trata de vehículos 100% eléctricos basados en una estrategia de carga de oportunidad empleando baterías de pequeña

capacidad (unos 30kWh para una guagua de 10.6m de longitud). En este caso, se alcanzan reducciones de aproximadamente el 80% en consumo y del 43% en emisiones equivalentes de CO₂ del Pozo a las Ruedas (WTW) respecto al vehículo convencional, aunque con una autonomía muy inferior limitada por la capacidad de la batería. Debe tenerse en cuenta que factores como la carga de pasajeros y de auxiliares, la existencia de degradación en la batería, o incluso el estilo de conducción del conductor, pueden significar una reducción notable en la autonomía, que en el peor escenario evaluado han resultado cercanas al 50%.

Por otro lado, la elevada intensidad de carbono de la red eléctrica, estimada en unos 710gCO₂/kWh (incluyendo tratamiento y transporte del combustible, emisiones asociadas a la generación de electricidad y las pérdidas en la distribución), es la principal causa de que la reducción en emisiones WTW de los vehículos enchufables no sea mayor.

En lo que respecta a líneas de larga distancia como la Línea 110, la ventaja de los vehículos híbrido en paralelo e híbrido en serie para reducir el consumo y las emisiones desaparece. Este último incluso llega a incrementar las emisiones WTW por encima del convencional en un 25.6%. Por su parte, el vehículo eléctrico consigue una mejora cercana al 55% en consumo, pero sus emisiones WTW son superiores en un 15% al vehículo convencional, exigiendo además el uso de baterías de gran capacidad (unos 300kWh para una guagua de 10.6m de longitud) para proporcionar una autonomía que sigue siendo pobre (apenas le permite cubrir un viaje de ida y vuelta).

En cuanto a rutas de elevado consumo como el de la Línea 015, el mayor nivel de electrificación supone una mejora en el consumo; hasta un 74% en el caso del vehículo eléctrico analizado. Sin embargo, la reducción en emisiones WTW se hace menos notable como consecuencia del elevado gradiente de carretera y la carbonización de la red (la mayor mejora alcanzada es del 33% asociada al vehículo eléctrico) pero igualmente se ve perjudicado por la escasa autonomía; con una batería de 30kWh, la guagua analizada solo es capaz de completar un viaje de ida y vuelta antes de necesitar una recarga de oportunidad, y en el caso de usar una batería de 300kWh, la autonomía permite únicamente unas 5h de operación, lo que significa que no es posible operar ni en esta ruta ni en la anterior con un vehículo eléctrico empleando una estrategia de carga convencional (operación ininterrumpida a lo largo del día y recarga durante la noche). Por tanto, si se deseara apostar por la carga convencional, se reservará a rutas de bajo consumo.

Como solución a corto-medio plazo, la arquitectura híbrida en serie representa la más idónea en ciclos de larga distancia o elevado consumo, pues de entre las arquitecturas analizadas es la única que puede operar dentro de ciudad con cero emisiones del Tanque a las Ruedas (TTW) y proporcionar autonomía suficiente para completar al menos un día completo de servicios de forma ininterrumpida. A largo plazo, con una red más estable, una mayor penetración y aprovechamiento de las energías renovables, una infraestructura de carga extendida, y la posibilidad de

realizar cargas ultrarrápidas, el vehículo eléctrico podría resultar atractivo. El vehículo de hidrógeno también podría situarse como una alternativa competitiva debido a su autonomía cercana al vehículo convencional y recarga de apenas 3 minutos.

A modo de conclusión, en este trabajo se ha demostrado que las arquitecturas alternativas representan una solución real para lograr los objetivos marcados por las instituciones para la descarbonización del transporte y limitar el ascenso de la temperatura media del planeta a 1.5°C a final de siglo. Sin embargo, es necesaria la intervención adicional sobre otros grandes problemas como es la descarbonización de la red eléctrica de la isla o el despliegue de una infraestructura de carga adecuada al mismo tiempo que la tecnología continúa madurando.

7.2 Estudios futuros

Este Trabajo Fin de Grado representa el comienzo de un estudio más amplio que abarca un mayor número de resultados. Estos resultados no han sido mostrados con el fin de limitar la extensión de la memoria. Especialmente están relacionados con el análisis de la arquitectura basada en el uso de hidrógeno como fuente de energía y su comparación con el resto de las arquitecturas. Además, se espera que los modelos mejoren y los estudios continúen a partir del convenio a firmar con la empresa de transporte público de la isla TITSA. De esta colaboración y de otros estudios propios pueden surgir los siguientes trabajos:

- Validar los modelos con datos de rutas/consumos reales.
- Realizar estudios con distintas configuraciones de guaguas (pesos/tamaños) y número de rutas.
- Realizar estudios considerando cargas variables de pasajeros a lo largo de la ruta.
- Realizar estudios centrados en la degradación de la batería en vehículos enchufables.
- Optimizar el despliegue de infraestructura necesaria: puntos de recarga de oportunidad, etc.
- Construir y analizar arquitecturas basadas en el uso de combustible alternativos (CNG, e-fuels...).
- Evaluar el impacto del tráfico de carretera en el consumo y las emisiones. Optimización del trazado de rutas.
- Desarrollar herramientas y metodologías para una mejor gestión de flota.
- Realizar un análisis energético de las arquitecturas alternativas considerando distintos escenarios futuros según el grado de cumplimiento de los objetivos europeos y la implantación de las soluciones.

7.3 Conclusion

In this final degree project, the energy analysis of the alternative solutions for the heavy-duty passenger transport has been done. In particular, the research has been focused on the public bus transport sector of the island of Tenerife taking as reference for the analysis three representatives transport lines in the island: Line 253 (La Laguna – Guamasa - Garimba), Line 110 (Santa Cruz – Costa Adeje) and Line 015 (Santa Cruz – La Laguna).

Line 253 is a short route, mainly urban with frequent accelerations, braking and stops (low mean speed) and negligible road grade. On the other hand, in the Line 110, dominates the extraurban driving profile on the highway with few accelerations, decelerations and stops (high mean speed) during a relatively long driving time (approximately 1h) combining also, urban driving with a negligible road grade. Regarding the Line 015, is characterized by being a mostly urban route, but with a road grade which is estimated at 5% on average. In addition, accelerations, braking, and stops are numerous, leading to a high consumption route and the needed of vehicles with peak powers that can exceed 400CV working at full load during the most part of the route.

The alternatives powertrain architectures that have been considered for the energy analysis in the mentioned routes have been parallel hybrid, series hybrid and battery electric vehicle. Each one has its advantages and disadvantages depending on the route characteristics.

To carry out the energy analysis, it has been built, configured, and simulated each architecture by using the American software Autonomie, property of Argonne National Laboratory, and all models built have been verified with data from literature. Besides that, each mentioned route has been built from the ETC cycle, an emissions approval cycle for heavy-duty vehicles widely used in Europe.

From the more than 1000 simulations carried out in Autonomie, the following conclusions could be obtained:

First, it can be concluded that, the higher the level of electrification of the vehicle, the greater the benefit with respect to consumption and emissions on those lines mainly based on urban driving conditions like the Line 253, especially when it comes to battery electric vehicles following an opportunity charging strategy with low-capacity batteries (around 30kWh for a 10.6 long bus). In this case, 80% reductions in consumption and 43% reduction in equivalent Well-To-Wheels (WTW) CO₂ emissions respect to the conventional architectures are reached. Nevertheless, the autonomy is much lower, limited by the battery capacity. It must be known that factors like passenger load and accessories, the existence of battery degradation, or even the driving style, can mean a significant reduction in the autonomy, which can be reduced by up to 50% in the worst scenario evaluated in this final degree project.

On the other hand, the high carbon intensity of the electricity grid estimated around 710gCO₂/kWh (including fuel treatment and transport, emissions associated to electricity generation and distribution losses) is the main cause for not having greater WTW emission reductions in plug-in vehicles.

With regards to long distance routes like the Line 110, the benefits of parallel and series hybrid vehicles to reduce consumption and emissions disappear. The latter even causes an increase of 25.6% above the WTW emissions of conventional architectures. The electric vehicle achieves, at least, an improvement of around 55% in consumption, although its WTW emissions are 15% higher than conventional vehicles, also requiring the use of high-capacity batteries (around 300kWh for a 10.6m long bus) to get an autonomy which is still poor (just the enough to complete a round trip).

In terms of high consumption routes like Line 015, the higher level of electrification represents a consumption improvement; up to 74% in the analysed electric vehicle. However, the WTW emission reductions are less noticeable because of the high road grade and the carbonisation of the grid (the best improvement achieved is 33% associated to the battery electric vehicle) but equally, is handicapped by limited autonomy. With a 30kWh battery capacity, the analysed bus is just capable of completing a round trip before opportunity charge is needed, and in the case of using a 300kWh battery, autonomy only allows around 5h of service, what means that is not possible to run neither this route nor the previous one with a battery electric bus following a conventional charge strategy (non-stop operation during the day and overnight charging). Thus, if conventional charging is desired, it will only be possible in low consumption routes like urban ones.

As short-medium term solution, series hybrid architectures represent the most suitable in long distance or high consumption routes, as between the analysed architectures is the only one that can operate within the city with zero Tank-To-Wheels (TTW) emissions and provide enough autonomy for completing, at least, a whole working day without needing recharging. In the long term, with a more stable grid, increased penetration of renewable energies, expansion of charging infrastructure and the possibility of ultra-fast charging, the battery electric bus can be an attractive solution. The fuel cell vehicle could be also positioned as a competitive alternative due to its autonomy close to conventional vehicles and recharging time of about 10 minutes.

In conclusion, in this project, it has been demonstrated that alternative architectures represent a real solution for achieving the objectives set by the institutions for the decarbonisation of the transport and limiting the rise in the planet's average temperature to 1.5°C by the end of the century. Nonetheless, further intervention is needed on other major issues such as the decarbonisation of the island's electricity grid or the deployment of an adequate charging infrastructure at the same time as technology continues to mature.

8 REFERENCIAS

- [1] L. Paoli, T. Gül (2022). “Electric cars fend off supply challenges to more than double global sales”. Accedido: Mar. 1, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.iea.org/commentaries/electric-cars-fend-off-supply-challenges-to-more-than-double-global-sales>
- [2] IEA (2021). “Global EV Outlook 2021. Accelerating ambitions despite the pandemic”. Accedido: Mar. 1, 2022. [Online]. Disponible en: <https://iea.blob.core.windows.net/assets/ed5f4484-f556-4110-8c5c-4ede8bcba637/GlobalEVOutlook2021.pdf>
- [3] S. McBain, E. Bibra (2021). “Electric Vehicles”. Accedido: Mar. 1, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.iea.org/reports/electric-vehicles>
- [4] ACEA (2022). “Fuel types of new buses: electric 10.6%, alternative fuels 10.5%, hybrid 10.1%, diesel 68.8% share in 2021”. Accedido: Mar. 20, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.acea.auto/fuel-cv/fuel-types-of-new-buses-electric-10-6-alternative-fuels-10-5-hybrid-10-1-diesel-68-8-share-in-2021/>
- [5] Comisión Europea. “Progresos en la reducción de las emisiones”. Accedido: Mar. 20, 2022. [Online]. Disponible en: https://ec.europa.eu/clima/eu-action/climate-strategies-targets/progress-made-cutting-emissions_es
- [6] Red Eléctrica de España. “Singularidades del sistema canario”. Accedido: Mar. 20, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.ree.es/es/actividades/sistema-electrico-canario/singularidades-del-sistema>
- [7] ISTAC (2022). “Anuario Energético de Canarias 2020”. Accedido: Mar. 20, 2022 [Online]. Disponible en: https://www3.gobiernodecanarias.org/ceic/energia/oecan/files/Anuario_Energetico_de_Canarias_2020.pdf
- [8] J. Cereijo: “TITSA. Vehículos ECO”, Jornadas Técnicas Industriales, ESIT, Universidad de La Laguna, San Cristóbal de La Laguna, España, Feb. 15, 2022.
- [9] K. Kivekäs, A. Lajunen, J. Vepsäläinen, K. Tammi (2018). “City Bus Powertrain Comparison: Driving Cycle Variation and Passenger Load Sensitivity Analysis”. *Energies* 2018, 11, 1755. Accedido: Mar. 27, 2022 [Online]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/en11071755>

- [10] Gasnam. “Gas Natural”. Accedido: Mar. 31, 2022 [Online]. Disponible en: <https://gasnam.es/movilidad-sostenible/gas-natural/>
- [11] S. Milojević, R. Pesic (2014). “Benefit and restrictions related to the application of natural gas as engine fuel for city buses” - Scientific Figure on ResearchGate. Accedido: Mar. 31, 2022. [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/Sketch-of-the-CNG-fuel-line-equipment-installed-on-the-bus-Milojevic-and-Pesic-2010_fig1_323918641
- [12] AIP Automotive. “Emission Chassis Dyno for Commercial Vehicles”. Accedido: Abr. 2, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.aip-automotive.de/en/Products/Test-Stands/EMISSION-MEASUREMENT/Cars-%C3%98-48-Roller/Commercial-Vehicles-%C3%98-72>
- [13] DieselNet. “European Transient Cycle (ETC)”. Accedido: Abr. 5, 2022 [Online]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/etc.php>
- [14] Argonne National Laboratory. Web Oficial. Accedido: Abr. 7, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.anl.gov/>
- [15] Argonne National Laboratory. “AMBER”. Accedido: Abr. 7, 2022. [Online]. Disponible en: <https://vms.es.anl.gov/tools/AMBER/>
- [16] M. Mahedi, N. Avramis, M. Ranta, A. Saez-de-Ibarra, M. El Baghdadi, O. Hegazy (MPDI, 2022). “Multi-Objective Energy Management and Charging Strategy for Electric Bus Fleets in Cities Using Various ECO Strategies” - Scientific Figure on ResearchGate. Accedido: Abr. 16, 2022 [Online]. Disponible en: https://www.researchgate.net/figure/The-forces-acting-on-a-vehicle-in-motion_fig3_353264906
- [17] U.S. Department of Energy. “Fuel Properties Comparison”. Accedido: Abr. 17, 2022. [Online]. Disponible en: <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>
- [18] D. Lowell (M.J. Bradley & Associates, 2013). “Comparison of Modern CNG, Diesel Hybrid-Electric Transit Buses: Efficiency & Environmental Performance”. Accedido: Abr. 17, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.mjbradley.com/reports/comparison-modern-cng-diesel-and-diesel-hybrid-electric-transit-buses-efficiency>
- [19] Penn State Engineering: Bus Research and Testing Center. “Bus Testing Report”. Accedido: Abr. 23, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.altoonabustest.psu.edu/bus-details.aspx?BN=1211-P>

- [20] R. Minjares, T. Dallman, S. Masebinu, F. Posada (ICCT, 2021). "South Africa flagship on green mobility: Johannesburg Metrobus". Accedido: Abr. 24, 2022. [Online]. Disponible en: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/South-Africa-Metrobus-Part-1-nov21.pdf>
- [21] Penn State Engineering: Bus Research and Testing Center. "Bus Testing Report". Accedido: Abr. 23, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.altoonabustest.psu.edu/bus-details.aspx?BN=1015-P>
- [22] BAE Systems. "AC Traction Motor. ACTM-200/300". Accedido: Abr. 25, 2022. [Online]. Disponible en: https://gettozero.com/pdf/brochures/ACTM%20Motor%20Transit_US.pdf
- [23] BAE Systems. "ESS-3G-1K (Energy Storage System)". Accedido: Abr. 30, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.gettozero.com/pdf/bus/ESS-3G-1K.pdf>
- [24] California Air Resources Board (2018). "Battery Electric Truck and Bus Energy Efficiency Compared to Conventional Diesel Vehicles". Accedido: Abr. 24, 2022. [Online]. Disponible en: <https://ww2.arb.ca.gov/sites/default/files/2018-11/180124hdbvefficiency.pdf>
- [25] Penn State Engineering: Bus Research and Testing Center. "Bus Testing Report". Accedido: Abr. 25, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.altoonabustest.psu.edu/bus-details.aspx?BN=1406>
- [26] New Eagle. "Powerphase HD 220". Accedido: Abr. 25, 2022. [Online]. Disponible en: https://wiki.neweagle.net/ProductDocumentation/EV_Software_and_Hardware/Electric_Motors/UQM/PowerPhase%20HD%20220%20web.pdf
- [27] Eaton. "Service Manual: 2-Speed Transmission (EEV-7202)". Accedido: Abr. 25, 2022. [Online]. Disponible en: https://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@vehicle/documents/content/pct_1000162.pdf
- [28] Wikipedia. "Proterra Catalyst". Accedido: Abr. 25, 2022. [Online]. Disponible en: https://en.wikipedia.org/wiki/Proterra_Catalyst
- [29] T. Dallmann, O. Delgado, L. Jin, R. Minjares, R. Gadepalli, C. A. Cheriyan. (ICCT, 2021). "Strategies for deploying zero-emission bus fleets: Route-level energy consumption and driving range analysis". Accedido: Abr. 27, 2022. [Online]. Disponible en: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/12/Deploying-zero-emission-bus-fleets-jun2021.pdf>

[30] Ó. García, I. Santana, A. M. Delgado, B. González (ScienceDirect, 2021). “On the road to a sustainable transport mobility in isolated power systems: The role of light-duty powertrain electrification”. Journal of Cleaner Production, Volume 320, 2021. Accedido: May. 10, 2022. [Online]. Disponible en:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621028481>

[31] Geotab (2022). “8 Eco-driving tips to save fuel”. Accedido: May. 18, 2022. [Online]. Disponible en: <https://www.geotab.com/blog/eco-driving/>

[32] MathWorks. “Simulink”. Accedido: Abr. 11, 2022. [Online]. Disponible en:

<https://es.mathworks.com/products/simulink.html>

9 ANEXO DE RESULTADOS

En el presente *Anexo de Resultados* se mostrará información complementaria sobre el software *Autonomie* y varios resultados de simulación que, por facilitar la lectura de la memoria o limitar su extensión, se han extraído de la misma y situado en este capítulo.

En el apartado 9.1, se mostrará la interfaz del programa *Autonomie* y las pestañas básicas de las que se compone. La finalidad será la exposición del proceso de creación y configuración de modelos indicando los lenguajes de programación empleados. Igualmente, se muestra el proceso de selección y definición de ciclos, así como la obtención y visualización de resultados.

Posteriormente, en el apartado 9.2, se recogen varios resultados relacionados con la influencia del gradiente de carretera en la Línea 015 SC-LL, el impacto de la carga de pasajeros y accesorios en las Líneas 253 y 110, o la influencia del estilo de conducción para distintos modelos y rutas.

9.1 Guía de uso básica para la definición y análisis de modelos en el programa *Autonomie*

Cuando se arranca el programa, el usuario dispone de una pestaña identificada como “*Workflows*” en la parte superior de la ventana, donde puede escoger entre varias opciones para comenzar el estudio de uno o varios vehículos simultáneamente.

En la figura 9.1 se muestra la información contenida en dicha pestaña.

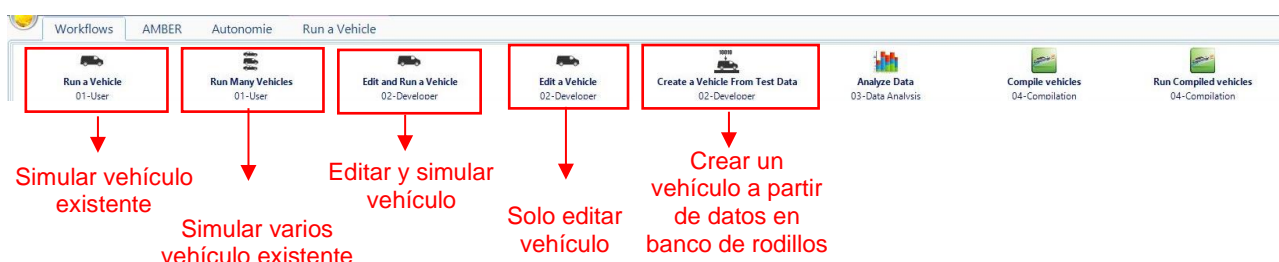


Figura 9.1 *Workflow*. Fuente Propia

De entre las opciones disponibles, para un estudio como el realizado en este TFG, solo son necesarias las tres primeras, ya que la opción “*Edit a Vehicle*” no resulta de gran utilidad al no permitir ejecutar una simulación después de hacer algún cambio en el modelo; y la opción “*Create a Vehicle From Test Data*” requiere disponer de un banco de rodillos y ensayar vehículos de forma física. Para crear modelos de guaguas a partir de vehículos ya existentes en el programa, se escogerá la opción “*Edit and Run a Vehicle*”.

Una vez seleccionado el tipo de estudio, en el lado izquierdo de la ventana principal del programa aparecerá un menú de edición de vehículos. En primer lugar, se debe clicar sobre “*Select Vehicle*” y entonces se pondrá a disposición del usuario todos los vehículos disponibles en la librería de Autonomie, tanto los creados por Argonne como los creados por el usuario, y que posteriormente podrá modificar y guardar.

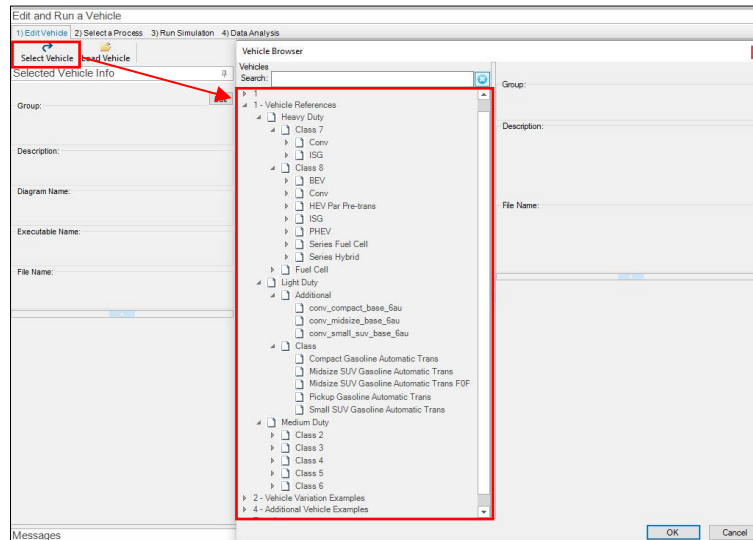


Figura 9.2 Selección de vehículos. Fuente Propia

Con el fin de explicar la forma en que se pueden editar vehículos en el programa, se seleccionará una de las guaguas eléctricas creadas para este trabajo, cuyo modelo y editor se muestran en la figura 9.3.

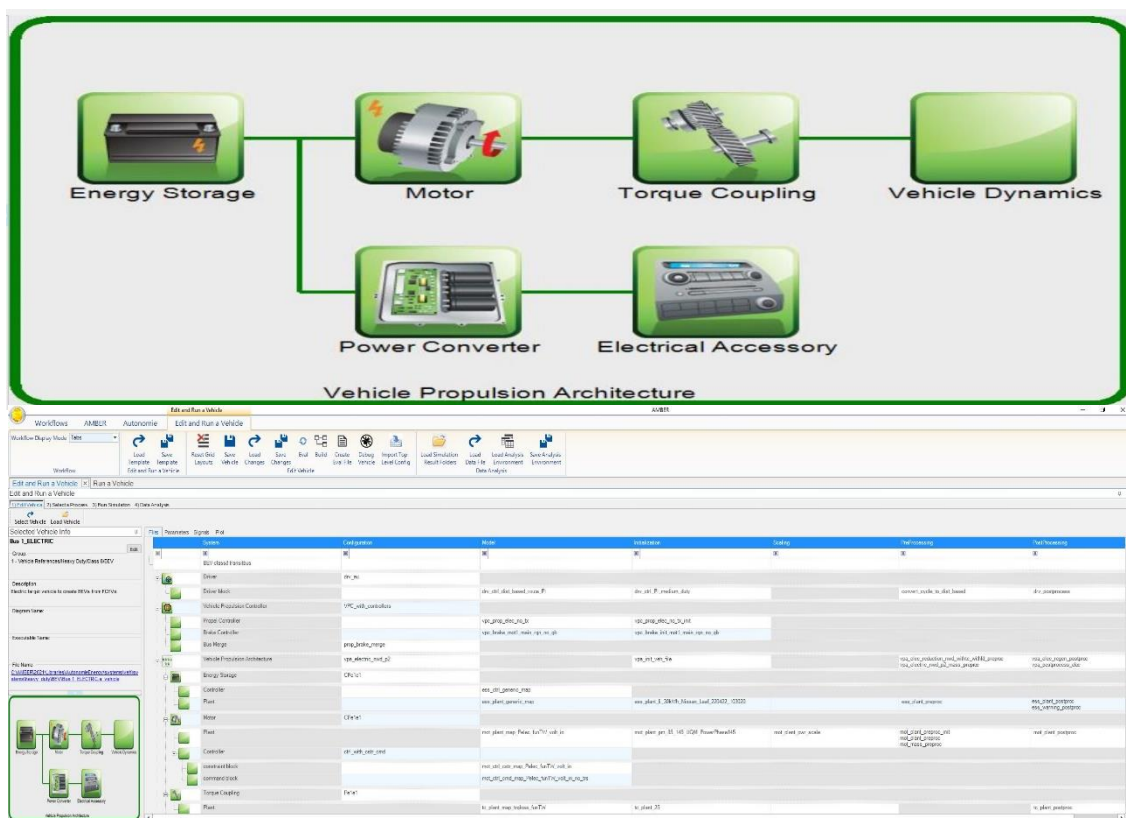


Figura 9.3 Representación esquemática de una arquitectura modelada (arriba) y el editor del modelo (abajo) en el programa Autonomie. Fuente Propia

Como se puede observar en la figura anterior, cada componente del vehículo se representa mediante bloques unidos entre sí con líneas de conexión que envían información de unos componentes a otros, de modo que existen una serie de entradas y salidas de datos que junto a los controladores de cada componente permiten gobernar la operación del vehículo.

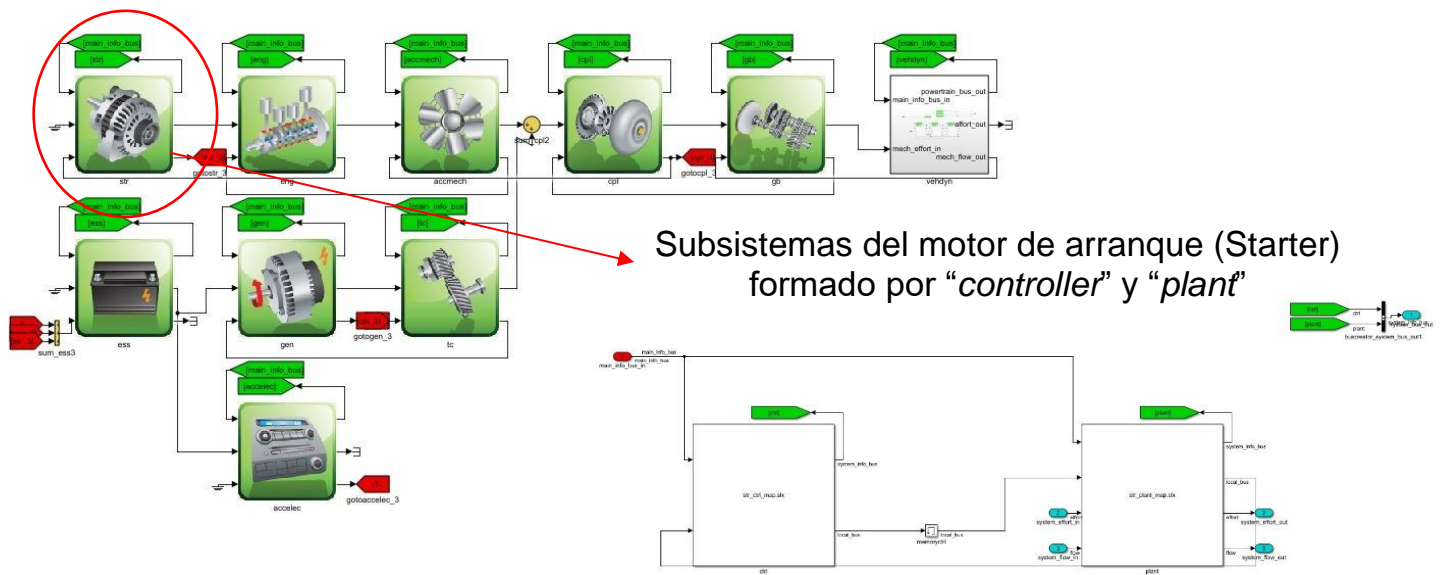
En la imagen inferior de la Figura 9.3 se puede observar cada uno de los ficheros que contiene el modelo. Estos se organizan en el programa según filas y columnas. Cada columna, alberga un tipo de fichero distinto. Se distinguen las siguientes columnas:

- Sistema (“*System*”): Muestra el nombre del componente empleado y que se va a configurar.
- Configuración (“*Configuration*”): Define cómo deben conectarse y posicionarse los componentes entre sí.
- Modelo (“*Model*”): Archivos y metadatos que contienen el modelo.
- Archivo de Inicialización (“*Initialization*”): Contiene la información necesaria para inicializar el modelo.
- Escalado (“*Scaling*”): Archivos y metadatos usados para escalar los datos de inicialización, como por ejemplo aumentar o disminuir la potencia del motor, el gasto másico de combustible, el número de celdas en serie y módulos en paralelo de una batería, etc.
- Preprocesado (“*Preprocessing*”): Archivos y metadatos usados para ejecutar los cálculos con los parámetros iniciales del modelo, como por ejemplo calcular el mapa de eficiencia de un motor, realizar cálculos de masas, etc.
- Postprocesado (“*Postprocessing*”): Archivo y metadatos usados para calcular resultados después de haber simulado el modelo para obtener, por ejemplo, la eficiencia del motor o la potencia desarrollada a lo largo del ciclo.

Por otro lado, se tiene un conjunto de filas por cada componente. En general, existe una fila identificada como “*plant*”, que contiene los archivos principales de cada columna y, además, existe uno o más archivos de control (“*controllers*”), cuyo objetivo es condicionar el funcionamiento del vehículo a una serie de sucesos que deberán de cumplirse para que se obtenga una salida determinada. De esta manera, es posible especificar la estrategia de control que se desea seguir para el modelo, y es la manera de controlar el momento en el que opera cada componente, el tiempo durante el cual lo hacen, rangos de potencia, tensión, etc. De esta manera, el software cuenta con la información necesaria del modelo para responder de forma adecuada cuando se ejecute un nuevo ciclo de conducción.

Sistemas y subsistemas (dentro del VPA)

Sistemas



Modelo del controlador (“controller”) del Starter

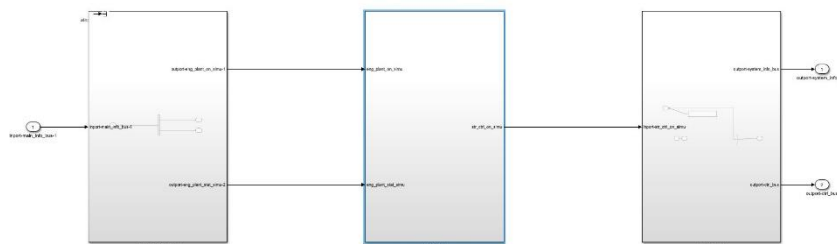


Figura 9.5 Sistemas, subsistemas y controladores en niveles más bajos del modelo en Simulink. Fuente Propia.

En cuanto a los controladores, el denominado “*Vehicle Propulsion Controller, (VPC)*” que se aprecia en la figura, se encarga de tomar las decisiones principales del funcionamiento del vehículo, como por ejemplo, demandar un cambio de marcha. Las decisiones tomadas, se envían al “*Vehicle Propulsion Architecture (VPA)*”, donde se encuentran controladores de menor nivel encargados de ejecutar las órdenes del VPC. Siguiendo el ejemplo anterior, una vez se demanda un cambio de marcha, el controlador correspondiente dentro del VPA se encargaría de dar los pasos necesarios para realizar un evento de cambio de marcha coordinado entre el motor y la caja de cambios, de forma que el conjunto de componentes del vehículo trabaje en armonía. No obstante, cabe mencionar que los vehículos convencionales no trabajan con controladores a alto nivel, es decir, que los modelos de vehículos convencionales como el mostrado en la Figura 9.4, cuentan con un archivo de configuración para el VPC, pero en su interior no hay controladores, lo que significa que todas las decisiones en el vehículo se toman a nivel de componente. Por el contrario, en vehículos híbridos, el VPC toma la mayoría de las decisiones,

incluyendo la estrategia de control de encendido y apagado del motor de combustión interna, demanda de potencia, etc.

Stateflow®

Dentro de los modelos de Simulink, también se hace uso de bloques que emplean el lenguaje gráfico Stateflow para definir la lógica de control necesaria para la operación del vehículo. Este lenguaje incluye diagramas y tablas de transición de estado, diagramas de flujo y tablas de verdad. Entre sus usos más habituales dentro de los modelos, se encuentra la definición de la lógica empleada en el cambio de marchas, para controlar el encendido y apagado del motor de combustión en un vehículo híbrido o para controlar el modo de funcionamiento del vehículo (ecológico o de rendimiento) en busca de optimizar el consumo energético en una ruta definida.

En la Figura 9.6 se muestra un ejemplo de bloque creado dentro del controlador de la caja de cambios de una guagua convencional usando Stateflow:

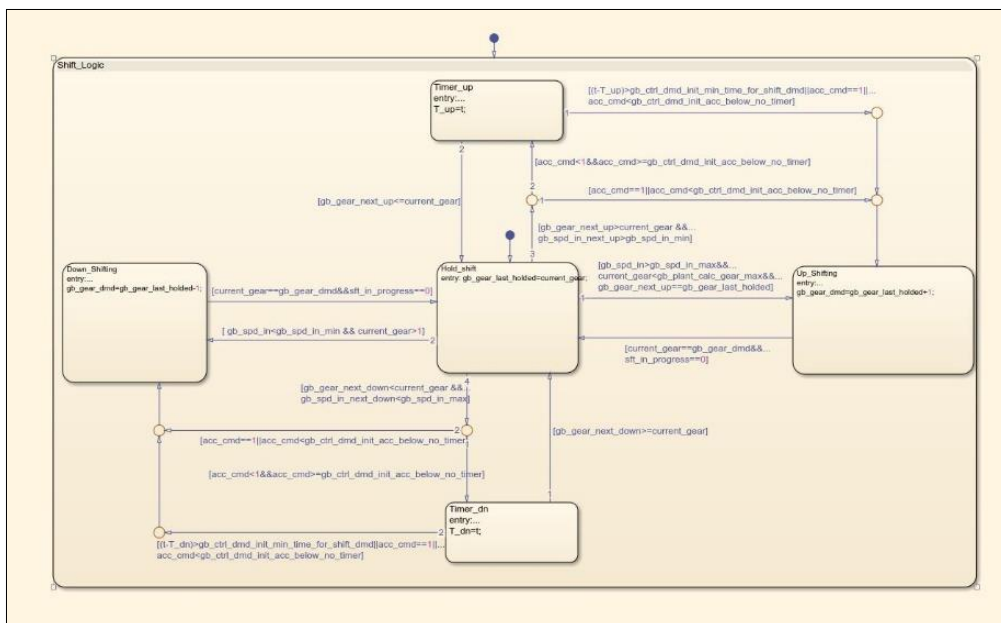


Figura 9.6 Bloque de Stateflow. Lógica de control de cambio de marchas. Fuente Propia.

MATLAB

Todo el algoritmo construido en Autonomie para la definición de los distintos parámetros de los vehículos, condiciones y ciclos de conducción, así como de las instrucciones y cálculos necesarios para la obtención de resultados, han sido programados mediante ficheros de MATLAB, de los que Simulink y Stateflow hacen uso para sus diagramas.

Dentro del editor de vehículos del modelo, las columnas de “Inicialización”, “Escalado”, “Preprocesado” y “Postprocesado” contienen ficheros que definen la información de cada una de estas familias en cada uno de los sistemas del vehículo.

En cambio, en las columnas de “Configuración” y “Modelo”, los ficheros han sido contruidos con un editor de texto y con Simulink respectivamente.

En la Figura 9.7 se muestra el editor de la guagua eléctrica y, como ejemplo, se muestra el fichero de MATLAB donde se almacena la información necesaria para la inicialización de su motor eléctrico.

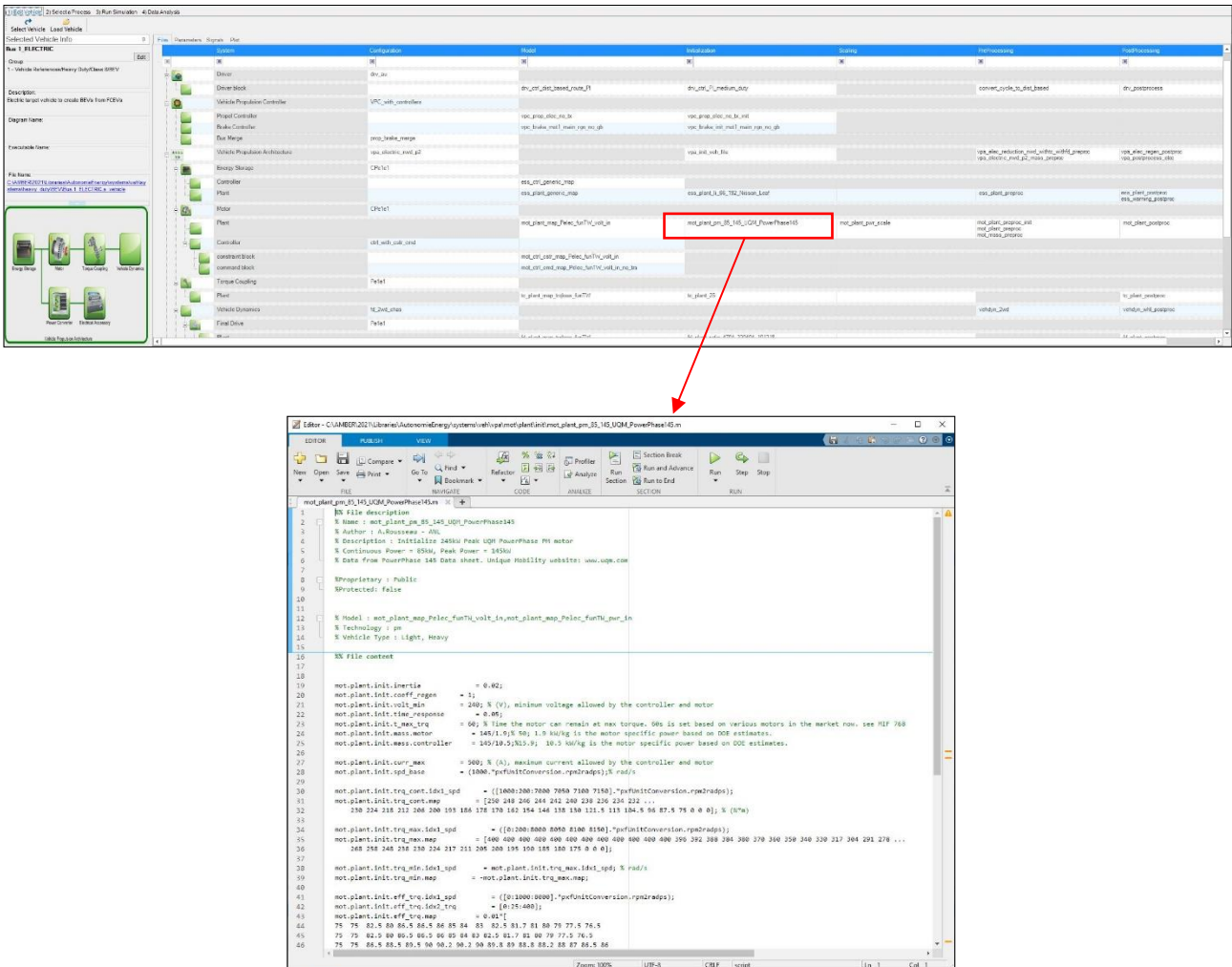


Figura 9.7 Archivo de inicialización del motor de la guagua eléctrica construido en MATLAB. Fuente Propia.

Los archivos que se almacenan en cada una de las posiciones resaltadas en blanco del editor de vehículos pueden ser intercambiados por otros archivos de la librería de Autonomie. Así, en el caso de la información necesaria para la inicialización del motor eléctrico, Autonomie ofrece varios archivos con motores de distintas características (mayor o menor potencia pico, con distintos mapas de eficiencia, distintas curvas de par y potencia, etc.). Para cambiar el tipo de archivo solo hay que clicar dos veces sobre la casilla correspondiente y seleccionar el motor con las características deseadas. Del mismo modo se puede elegir entre distintos ficheros para el resto de los componentes del sistema. En la ventana 9.8 se muestra una ventana de selección de ficheros habitual.

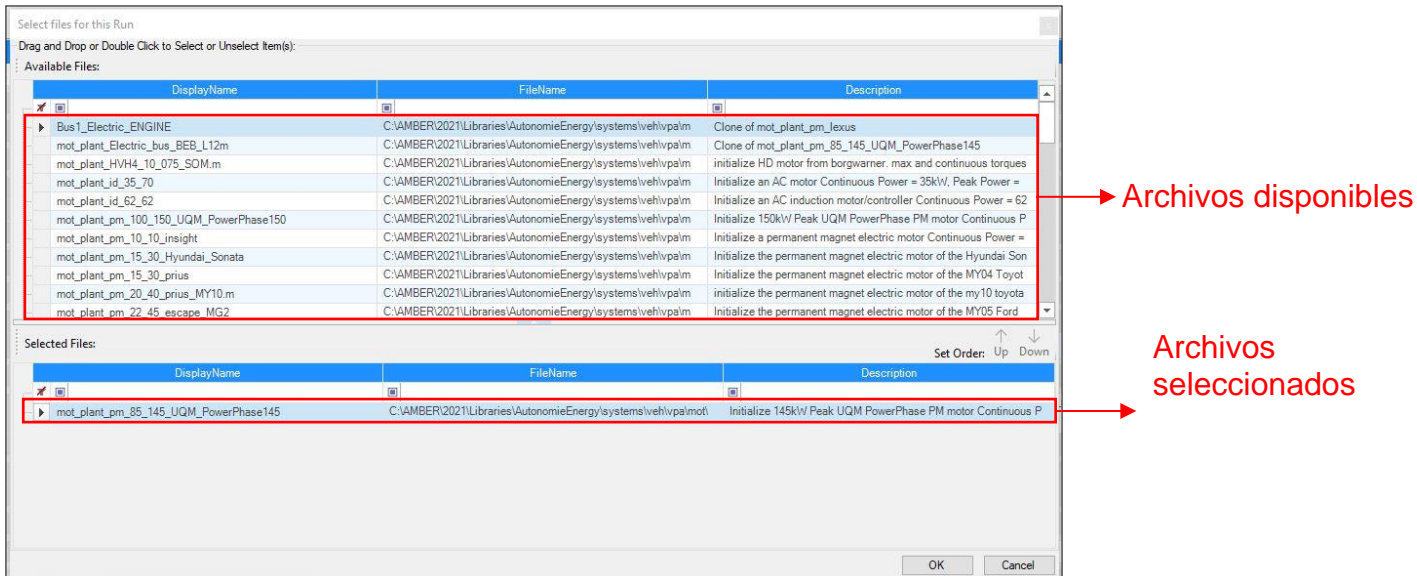


Figura 9.8 Ventana de selección de ficheros. Fuente Propia.

No obstante, cuando no se dispone de un fichero que contenga las características deseadas para el componente, existe la posibilidad de clonar los ficheros ya existentes, modificarlos y guardarlos como ficheros nuevos. Por ejemplo, la primera fila de la ventana anterior contiene un fichero que ha sido personalizado por el usuario (“*Bus1_Electric_ENGINE*”).

A pesar de esto, en el proceso de creación de los modelos puede suceder que con los ficheros que Autonomie pone a disposición del usuario no sea posible satisfacer unas condiciones de funcionamiento deseadas, ya sea porque el motor no tiene potencia suficiente, las relaciones de transmisión seleccionadas sean inadecuadas o el tamaño de la batería no permita completar un ciclo o tener la autonomía deseada cuando se trate de vehículos enchufables. En estos casos, se pueden ir modificando los ficheros uno por uno, clonándolos y modificándolos cada vez, o bien, se pueden escalar los datos en la pestaña de “*Parameters*” (Parámetros) contigua a la pestaña del editor de vehículos.

En esta pestaña se pueden modificar una gran cantidad de datos como los que se acaban de comentar. De este modo, a la hora de ejecutar los modelos, si se ha modificado un parámetro, el programa tomará este nuevo valor en lugar del original ubicado en el fichero de origen. El resto de los parámetros a los que afecta esta modificación son igualmente escalados, ya que, como se vio previamente, existe un archivo de escalado en el editor de vehículos que se encarga de realizar los cálculos necesarios para ello.

En la Figura 9.9 se muestran algunos parámetros modificables en la pestaña de Parámetros para el vehículo eléctrico.

System Path	Type	Change	Unit	Value	Default	Description
vehdrivctrl_bu	SystemParameter	driv ctrl init la	N	100	100	Electric target vehicle to create BEVs from FCEVs
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init kp	N/(m/s)	20000	20000	Proportional gain used in the drv-PI controller
vehprop	SystemParameter	vpc prop init stop_at_soc	bool	<input type="checkbox"/>	Transit	1 to force the simulation stop when soc below ess init_soc_min
vehprop	SystemParameter	vpa init veh_class_name	S	Transit	Transit	
vehprop	SystemParameter	vpa init veh_class_name	S	bus	bus	
vehprop	SystemParameter	vpa init veh_config_type	S	BEV	BEV	
vehprop	SystemParameter	vpa init veh_gdr	S	120000	120000	
vehprop	SystemParameter	vpa init driving_range	S	150	150	
vehpropmotpwr	SystemParameter	mot plant scale_pwr_max_des	kW	220	145	Desired maximum motor power
vehdrivctrl_bu	SystemParameter	driv ctrl init bool_reset_int_ctrls_spt	bool	<input type="checkbox"/>	100	If 1, integrator is reset each time delta speed (actual-dmd) crosses zero
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init driving_mudr	kg	100	100	The initialized mass of the driver used to calculate the overall mass of the chassis
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init mass_totall	kg	1000	1000	
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init min_crew_speed	km/h	0	0	
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init brake_blending_after_shift	s	0.5	0.5	Duration of torque demand blending after shift
vehdrivctrl_au	SystemParameter	driv ctrl init time_cst_1st_drv_trq	s	0.1	0.1	Time constant of the 1st order filter that is right after the spdt_dmd derivative
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int chas_decel_above_min	m/s ²	0.5	0.5	Vehicle deceleration above which no regen is possible (all braking is actuated by the driver's pedal)
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int chas_decel_below_min	m/s ²	0.5	0.5	Vehicle deceleration below which full regen is possible (all braking is actuated by the brake ECU)
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int chas_spt_above_full	km/h	0	0	Chassis speed above which full regen is allowed
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int chas_spt_below_min	km/h	0	0	Chassis speed below which no regen is allowed
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int ess_soc_above_regen	%	10	10	ESS SOC above which regen braking is forbidden
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int ess_soc_below_regen	%	10	10	ESS SOC below which regen braking is allowed
vehpropbrake	SystemParameter	vpc brake int time_cst_drv_trq_filter	s	0.1	0.1	Time constant of the 1st order filter used to smooth driver's torque demand

Figura 9.9 Ventana de modificación de parámetros del vehículo. Fuente Propia.

En este ejemplo, se ha escalado la potencia máxima que puede desarrollar el motor eléctrico desde el valor original de 145kW a 220kW, ya que tras los estudios realizados y la información consultada este es un valor más idóneo.

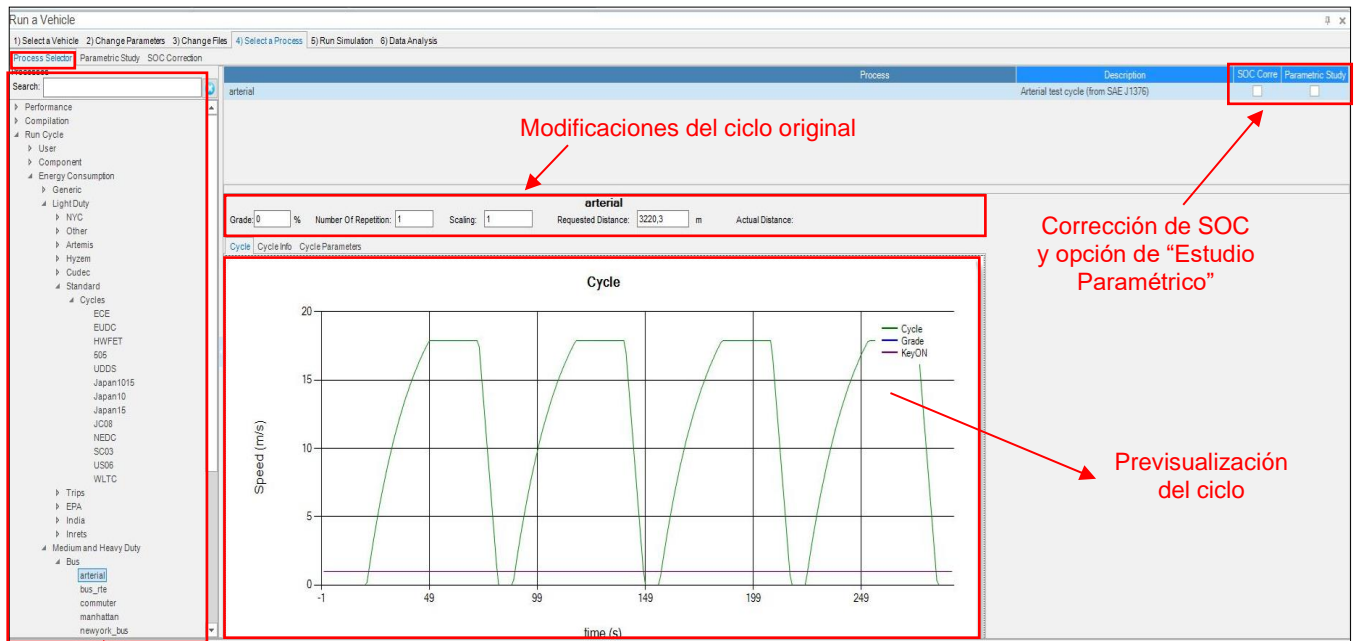
En esta situación, dado que la potencia máxima del motor ha aumentado, el programa se encarga de modificar las curvas de par y potencia de acuerdo con el factor de escalado obtenido de 1.52, así como los valores de tensión y corriente a los que trabaja el motor y el peso del motor y de su controlador.

9.1.2 Selección de ciclos, estudios paramétricos y obtención de resultados en Autonomie

Una vez los vehículos han sido modelados, Autonomie permite su simulación bajo ciclos de conducción como los descritos en el apartado 2.2 de la memoria con el fin de obtener resultados de consumo, eficiencia y coste y analizar su variación dependiendo de las características del ciclo seleccionado.

En este sentido, Autonomie cuenta con una librería propia con muchos de los ciclos empleados para la homologación de vehículos ligeros y pesados. Además, permite que el usuario importe ciclos que este haya creado a partir de datos experimentales o de forma sintética, pudiendo introducir incluso, perfiles de gradiente de carretera, dado que el programa es capaz de responder ante ello.

Para seleccionar un ciclo en Autonomie, se cuenta con una pestaña denominada "Select Process", donde aparece un menú con los distintos ciclos que han sido cargados en Autonomie. En la Figura 9.10 se muestra la ventana correspondiente.



Lista de ciclos disponibles

Figura 9.10 Ventana de selección de ciclo. Fuente Propia.

Dentro de esta ventana el programa ofrece varias opciones. Según la figura, una vez se selecciona el ciclo de entre los disponibles en el menú de la izquierda, es posible realizar nuevas modificaciones sobre los parámetros mostrados en la parte central de la ventana. En concreto, es posible asignar un valor constante de gradiente de carretera (“Grade”) expresado en porcentaje; repetir el ciclo un número determinado de veces (“Number Of Repetition”), lo que permitiría analizar cómo varía el comportamiento del vehículo o los consumos que se obtienen tras realizar el mismo ciclo varias veces seguidas; escalar el ciclo (“Scaling”), que provoca que la velocidad en cada punto se multiplique por un factor manteniendo la misma duración del ciclo; o modificar la distancia que debe completar el vehículo (“Requested Distance”). Los cambios realizados se reflejarán en la previsualización del ciclo mostrada justo debajo.

Además, en la parte superior derecha, se le debe indicar al programa si se debe corregir el nivel de carga de la batería a la hora de realizar la simulación. El nivel de carga se conoce como “SOC”, del inglés “State of Charge”, y su activación sólo es necesaria si la simulación se ejecutará sobre vehículos híbridos o de hidrógeno que no sean enchufables, ya que la finalidad de la corrección de SOC es que el vehículo comience y finalice el ciclo con prácticamente el mismo nivel de carga de la batería, en otras palabras, que el delta de SOC entre el comienzo y final del ciclo tome el valor más pequeño posible. De este modo, se evita falsear los datos de consumo al no tener en cuenta la energía que se consume de la batería sin haber sido producida por el motor de combustión o pila de combustible durante el ciclo.

Si no se activase la casilla de corrección de SOC, y la capacidad de la batería lo permitiese, el vehículo podría completar el ciclo consumiendo únicamente energía

de la batería, aunque finalice el ciclo con un nivel de carga bajo. Los resultados indicarían entonces que el consumo de combustible expresado en litros a los cien kilómetros es prácticamente nulo o ninguno, lo que significaría que no se está computando la verdadera energía consumida en el ciclo, pues dicha descarga de la batería equivale a un consumo de combustible en el motor de combustión (o pila de combustible de hidrógeno) de la que procede la energía primaria. En ese caso, activar la casilla de corrección de SOC permite que la energía descargada de la batería sea recuperada por el funcionamiento del motor o pila durante el ciclo.

Si el vehículo es enchufable esto no es necesario, dado que la batería no solo recibe energía del motor de combustión o pila, sino que también la puede recibir de la red eléctrica cuando se enchufa en las recargas.

Al lado de la casilla de corrección de SOC se encuentra otra denominada “*Parametric Study*” (estudio paramétrico), que como su nombre indica, deberá de encontrarse activada cuando se realice un estudio paramétrico, y es que Autonomie da la posibilidad de ejecutar varias simulaciones modificando uno o más parámetros de forma sucesiva según lo indicado por el usuario.

Los estudios paramétricos resultan de gran utilidad para contestar a preguntas como: ¿qué sucedería si se aumentara la potencia del motor o se redujera?, ¿qué sucedería si se modificara la relación de transmisión del diferencial?, ¿qué impacto tendría modificar la capacidad de la batería en un ciclo determinado?, ¿qué impacto tendría la carga de pasajeros o de aire acondicionado en el consumo? Estas y muchas otras preguntas pueden ser contestadas mediante estudios paramétricos y evitan que el usuario tenga que modificar uno por uno los ficheros que contienen dicha información en el editor del modelo o de “Parámetros”, y correr luego las simulaciones una por una con distintos valores para cada uno de los parámetros.

Para definir los valores que se desean parametrizar, se deberá de seleccionar la siguiente pestaña a la de selección del ciclo. Como se puede observar en la Figura 9.11, únicamente tiene que buscarse el parámetro dentro del menú ubicado en el lado izquierdo, arrastrarlo a la ventana contigua y definir los valores que debe tomar el parámetro en cada simulación.

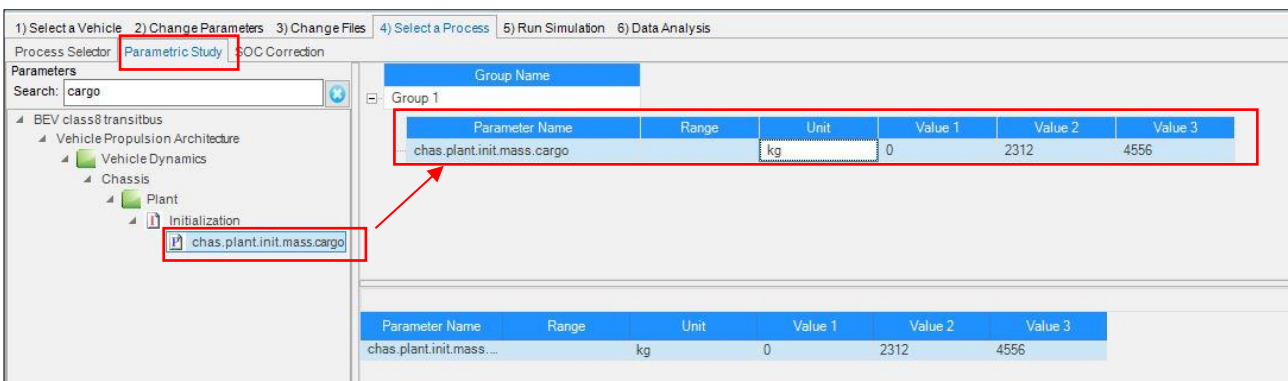


Figura 9.11 Ventana de definición del estudio paramétrico. Fuente Propia.

En la Figura 9.11 se muestra un estudio del impacto de la carga de pasajeros sobre el consumo del vehículo. Para el ejemplo mostrado y suponiendo que 1 pasajero representa una masa constante de 68kg, se tendría que para 0kg no habría ningún pasajero a bordo, y en el extremo opuesto, para 4556kg habría 67 pasajeros (que para esta guagua sería la capacidad máxima).

Una vez se ha editado el modelo, configurado el ciclo y especificado el estudio paramétrico (si lo hubiere), entonces el programa se encuentra en disposición de ejecutar la simulación, para lo que es necesario desplazarse a la siguiente pestaña denominada “*Run Simulation*” donde básicamente se debe indicar cuántas simulaciones se desean ejecutar en paralelo, es decir, el número de simulaciones que se ejecutarán al mismo tiempo. Por defecto, se ejecuta una única simulación cada vez y el número máximo de simulaciones que Autonomie puede ejecutar simultáneamente se encontrará limitado al número de procesadores con los que cuenta el ordenador. Posteriormente, se especificará el nombre con el que se desea guardar la simulación y se lanzará la simulación (botón “*Launch*”). Por defecto, se guardarán los archivos de simulación dentro de la ruta:

C:\AMBER\2021\Projects\Default\results.

Después de que se ejecuta la simulación, aparecerá una ventana de resultados como la que se muestra en la siguiente figura:

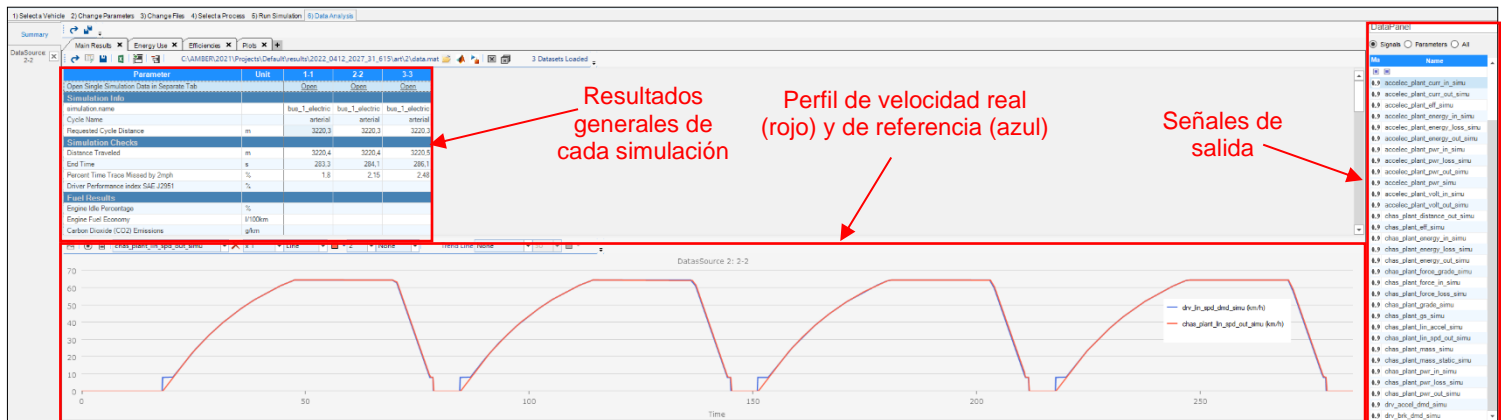


Figura 9.12 Ventana principal de resultados de la simulación. Fuente Propia.

En esta ventana se muestran los resultados generales en formato de tabla, donde se incluyen resultados de la propia simulación como el tiempo y distancia real completados y los de referencia; el porcentaje de tiempo en el que el perfil de velocidad del vehículo se aleja del perfil de referencia por más de 2mph (ó 3,2km/h); o el nivel de agresividad del conductor, ponderado según el estándar SAE J2951. Además, incluye resultados de consumo del motor de combustión (si lo tuviese) y consumos eléctricos; así como un apartado donde se reúnen algunos datos del vehículo como son la masa total del vehículo empleada para la simulación, datos referidos a la geometría y varios coeficientes.

En cuanto al porcentaje de tiempo durante el cual el perfil de velocidad del vehículo se aleja del perfil de velocidad de referencia por más de 2mph (denominado en el programa como “*Percent Time Trace Missed by 2mph (%TTMB2mph)*”), será un indicador de la capacidad del modelo para seguir el ciclo. De acuerdo con ello, cuanto más bajo sea dicho porcentaje, más representativos del ciclo serán los resultados de consumo, emisiones o eficiencia. Por tanto, un porcentaje muy alto no sería representativo y se debería de continuar trabajando sobre la configuración del modelo para reducir su valor.

Para las simulaciones ejecutadas, se considerará como aceptable un %TTMB2mph inferior al 10%. No obstante, en los posteriores apartados se podrá comprobar que con los modelos construidos este porcentaje es normalmente muy inferior a dicho límite.

Justo debajo de la tabla de resultados generales se representan por defecto el perfil de velocidad del vehículo y el de referencia, de modo que puede detectarse visualmente donde se está obteniendo el mayor %TTMB2mph, facilitando su corrección. Además, en el lado derecho de la ventana, se muestra una lista con las señales de salida del modelo (potencia, par, energía, estado de carga de la batería, eficiencia, señales de salida de los controladores, tensiones, corrientes, etc.). En definitiva, estas señales contienen toda la información necesaria para el análisis energético y su comparación con otros modelos, ya que en la misma ventana que se muestra en la figura, es posible cargar resultados de otros modelos distintos.

Muchas señales pueden ser representadas de forma gráfica acudiendo a la pestaña de resultados denominada “*Plots*”. En la Figura 9.13 se muestra a modo de ejemplo los resultados de potencia, nivel de carga de la batería y velocidad respecto al tiempo para tres simulaciones de la guagua eléctrica con carga de pasajeros distinta.

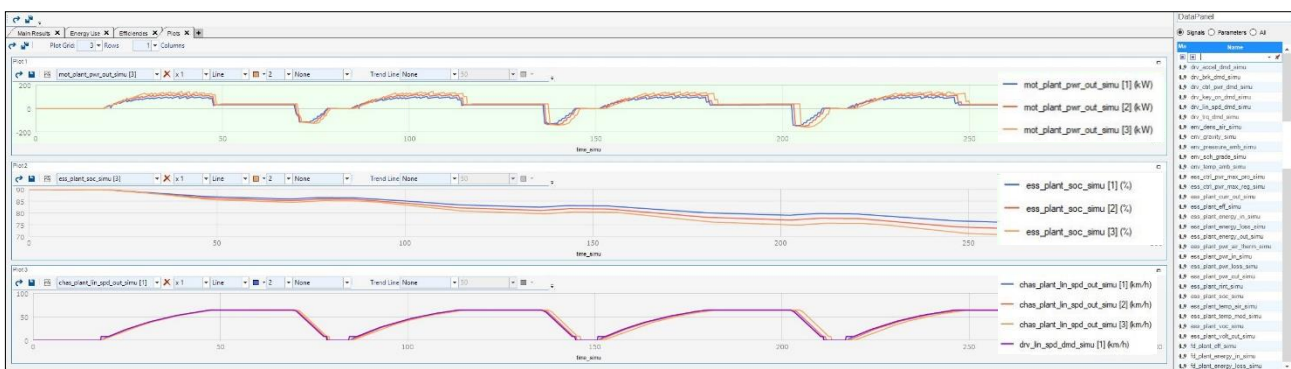


Figura 9.13 Potencia de salida del motor, estado de carga de la batería y velocidad para la guagua eléctrica urbana en el ciclo Arterial con tres niveles de carga de pasajeros. 0 pasajeros (línea azul), 32 pasajeros (línea roja) y 67 pasajeros (línea amarilla). Fuente Propia.

De este modo, es posible analizar el comportamiento de cada uno de los parámetros a lo largo del ciclo y realizar una comparación gráfica con resultados de otros modelos identificando así las diferencias en el modo de funcionamiento.

Por otro lado, además de los resultados generales que figuran en la ventana principal, el programa genera un documento en formato HTML donde se recoge un mayor número de resultados de manera detallada, así como los balances de energía para cada componente especificando los flujos de entrada y salida. Estos documentos son independientes para cada simulación ejecutada, es decir que, para el ejemplo propuesto, se generarían tres documentos HTML; uno correspondiente a los resultados para una carga de 0 pasajeros, otro para 32 pasajeros y un último para 67 pasajeros.

Para acceder a estos documentos se debe clicar sobre el botón “Open” de cada simulación ubicado en la primera fila de la tabla de resultados generales. De esta manera, se abrirá un nuevo grupo de pestañas asociados a cada simulación, donde el documento HTML será ubicado en la pestaña denominada “HTML Report”. En la Figura 9.14 se muestra como ejemplo el documento obtenido para una carga de 32 pasajeros:

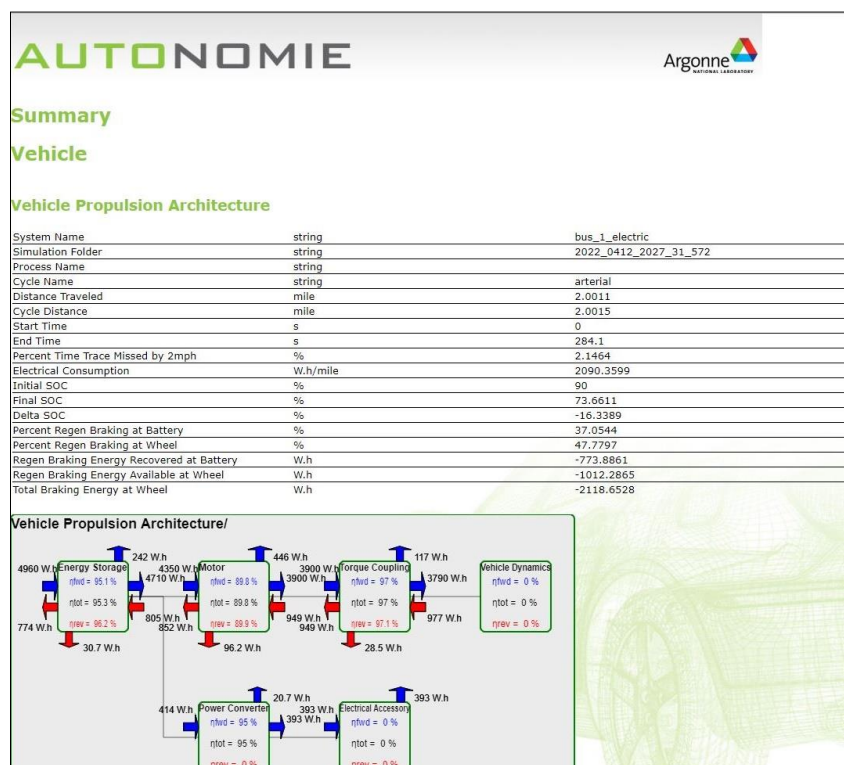


Figura 9.14 Documento HTML de salida de resultados para guagua eléctrica en el ciclo Arterial con carga de 32 pasajeros. Fuente Propia.

La información contenida en estos documentos puede ser personalizada por el usuario. Cabe mencionar que existe información que no se puede obtener directamente de manera gráfica, tabular o mediante los documentos por defecto. En ese caso, se deben cargar los resultados en MATLAB y realizar la búsqueda allí, ya que de este modo se tiene acceso a todos los resultados obtenidos por el programa.

A continuación, inmediatamente al lado de la pestaña “HTML Report”, se encuentra la pestaña “Plot Data”, donde se pueden graficar las distintas señales al igual que se

mostró previamente, pero en este caso, solo se mostrará información relativa a la simulación abierta de forma independiente. Graficar los resultados de esta manera habilita una función que no se encuentra disponible en la ventana de gráficos general, y es la posibilidad de contar con un marcador que muestra el valor del punto de la curva sobre el que se sitúa el puntero. Así, es posible determinar rápidamente el valor correspondiente a un punto concreto cuando se analizan las curvas.

En cualquier caso, los valores con los que se grafican dichas curvas se encuentran almacenados en las variables que representan y pueden ser consultados desde MATLAB.

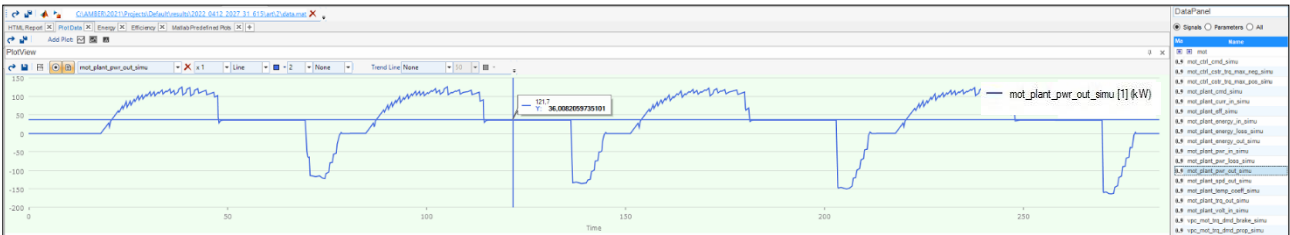


Figura 9.15 Uso del marcador de datos en la ventana de gráficos. Fuente Propia.

La siguiente pestaña que se pone a disposición del usuario es la denominada “Energy”, donde se especifica la energía consumida por cada uno de los componentes del sistema, tanto expresada en kWh como en kWh/km. Igualmente, es posible obtener información acerca de las pérdidas energéticas por componente, lo que resulta de gran utilidad a la hora de verificar los modelos, ya que se puede comprobar que las pérdidas asociadas a cada elemento se encuentran dentro de los valores habituales. La información se ofrece de manera tabulada o gráfica tal y como se muestra en la Figura 9.16.

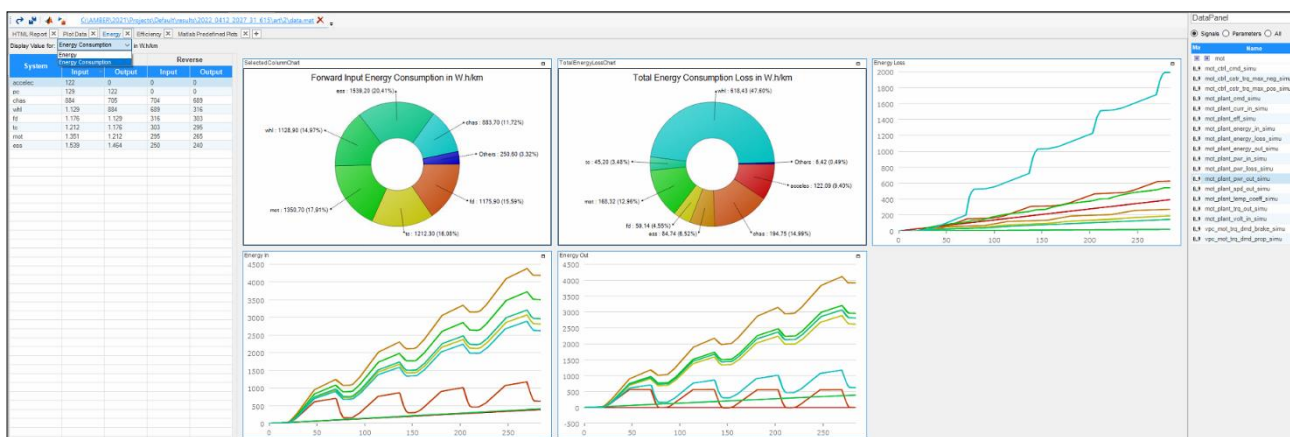


Figura 9.16 Consumo energético desglosado por componentes para la simulación anterior. Fuente Propia.

Por último, otra de las funcionalidades destacadas con las que cuenta el programa es la obtención de gráficos predefinidos mediante MATLAB. En su mayoría se trata de mapas de eficiencia donde se representan los puntos de operación (potencia-régimen de giro o par-régimen de giro) a los que trabaja el motor para cada momento del ciclo junto con curvas de eficiencia constante; o bien, en lugar de representar los

puntos de operación, se distinguen por colores áreas de potencia-velocidad o par-velocidad en las que el motor trabaja durante más tiempo o menos (densidad temporal) o consume más o menos energía (densidad energética). De esta manera, es posible que el usuario se haga una idea de cómo de solicitado se encuentra el motor durante la realización de un ciclo y en qué rango de eficiencias está trabajando, ya que esto tiene un impacto directo sobre el consumo del vehículo.

En la Figura 9.17 se muestra la lista de gráficos predefinidos del programa y un mapa de eficiencia motor para la guagua simulada en el ejemplo representando los puntos de trabajo y la densidad temporal.

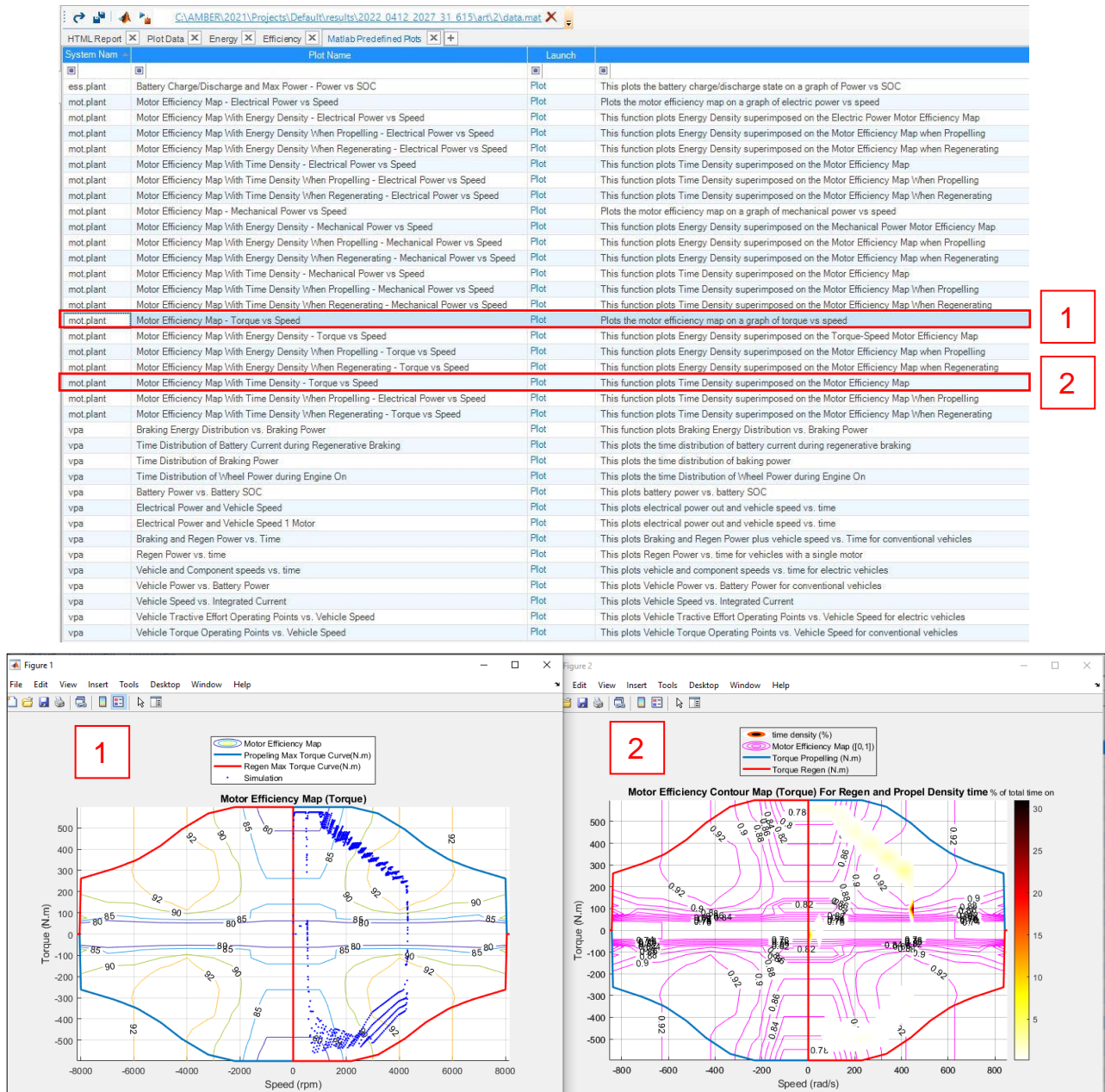


Figura 9.17 Gráficos predefinidos de MATLAB. Ejemplo de mapa de eficiencia motor para una guagua eléctrica en el ciclo Arterial. Fuente Propia.

En este caso, observando los mapas de eficiencia se comprueba que este motor en el ciclo Arterial trabaja con regímenes de giro de entre aproximadamente 1000 y 4300rpm y par de entre 200-575Nm tanto en modo propulsión (valores positivos de par) como regeneración (valores negativos de par), siendo el máximo valor de par que puede alcanzar el motor de 600Nm, por lo que no trabaja a plena carga. Además, opera con valores de eficiencia altos como caracteriza a los motores eléctricos (en este caso, la mayor parte del tiempo son superiores al 85%, llegando a alcanzar valores de en torno al 93%).

De este modo, finaliza la exposición de las funcionalidades y herramientas básicas con las que cuenta Autonomie para el análisis energético de vehículos y que han sido puestas en práctica para la obtención de los resultados mostrados en la memoria del trabajo. En caso de querer profundizar aún más en el conocimiento del programa para futuras labores de investigación, con la compra de la licencia del programa se dispone de una guía de ayuda con una gran cantidad de información acerca del programa, así como de un servicio de atención al usuario por parte del equipo de Argonne National Laboratory en caso de que surgiera cualquier duda.

9.2 Resultados de simulación complementarios

A continuación, se muestran algunos resultados que podrían resultar de interés al lector pero que no han sido añadidos a la memoria.

9.2.1 Impacto del gradiente de carretera en el consumo y las emisiones para distintas arquitecturas en la Línea 015

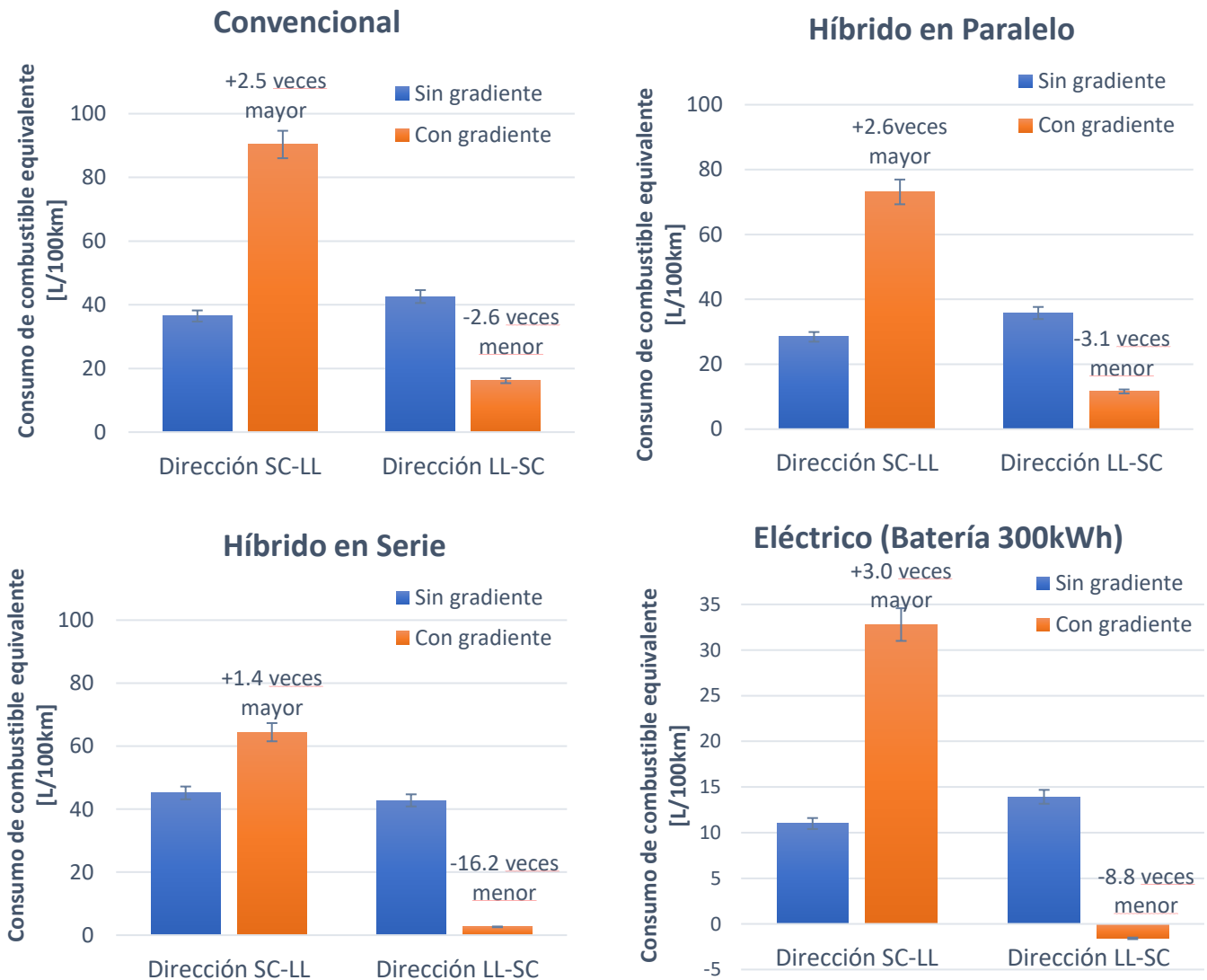


Figura 9.18 Impacto del gradiente de carretera sobre el consumo de combustible equivalente en la Línea 015 SC-LL. Comparación entre el consumo obtenido si no existiera gradiente de carretera (barras azules), y cuando se considera el ciclo original, con gradiente (barras naranjas). Fuente Propia.

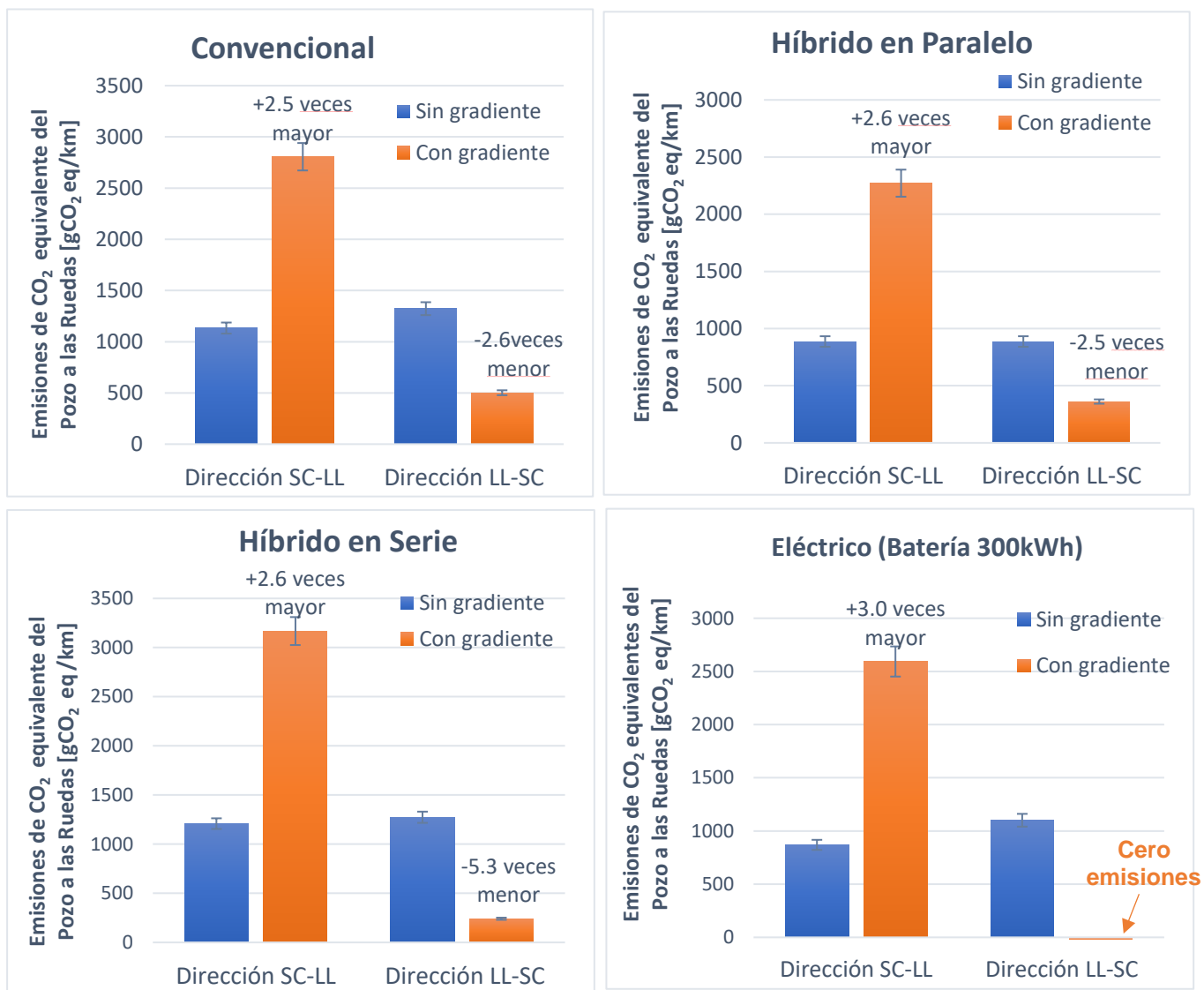


Figura 9.19 Impacto del gradiente de carretera sobre las emisiones de CO₂ equivalente (WTW) en la Línea 015 SC-LL. Comparación entre las emisiones obtenidas si no existiera gradiente de carretera (barras azules), y cuando se considera el ciclo original, con gradiente (barras naranjas). Fuente Propia.

9.2.2 Impacto de la carga de pasajeros y de accesorios en el consumo y las emisiones para distintas arquitecturas en las Líneas 253 y 110

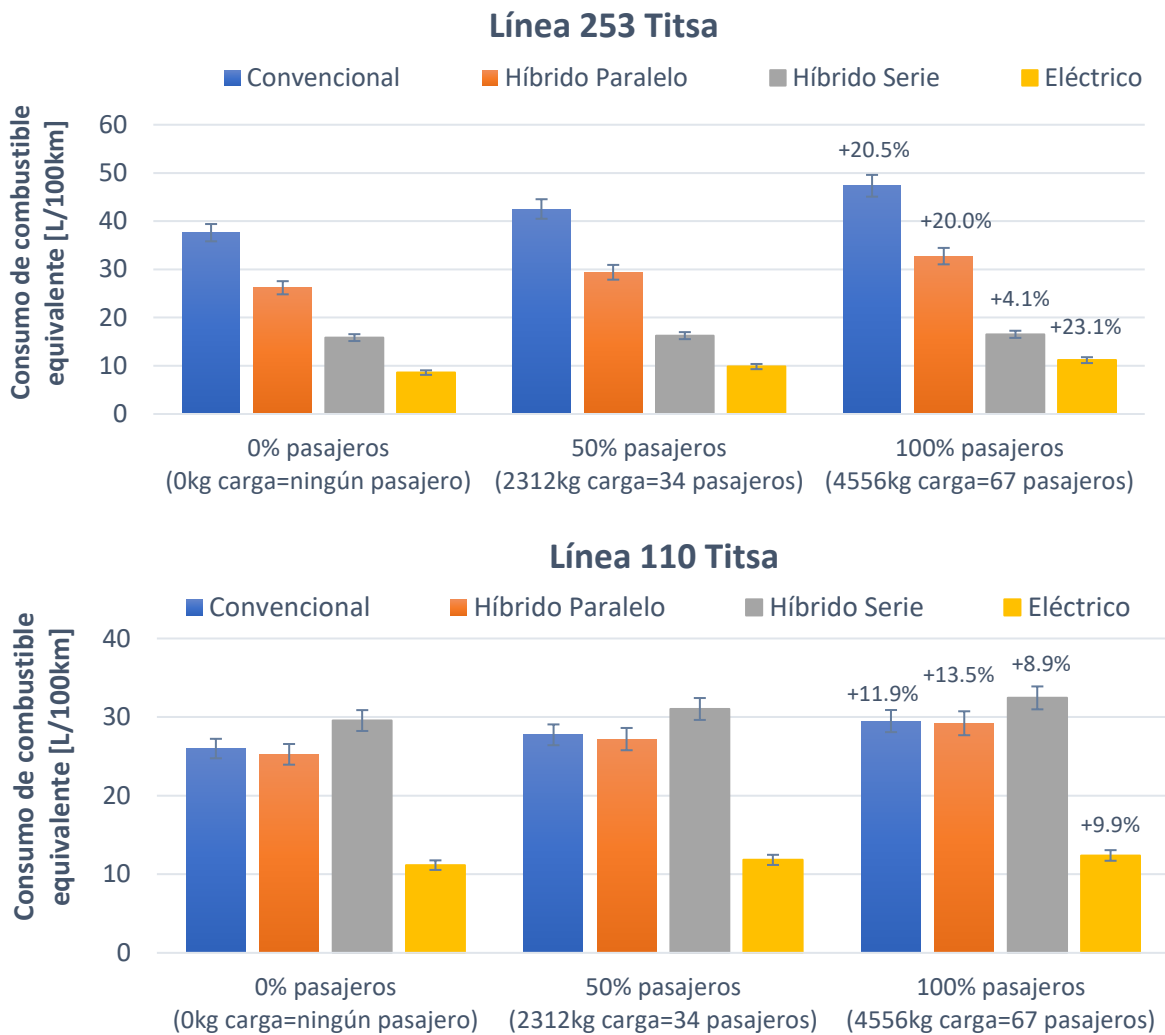


Figura 9.20 Comparación en consumo de combustible equivalente para distintos niveles de carga de pasajeros según arquitectura para las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC-Costa Adeje). Fuente Propia.

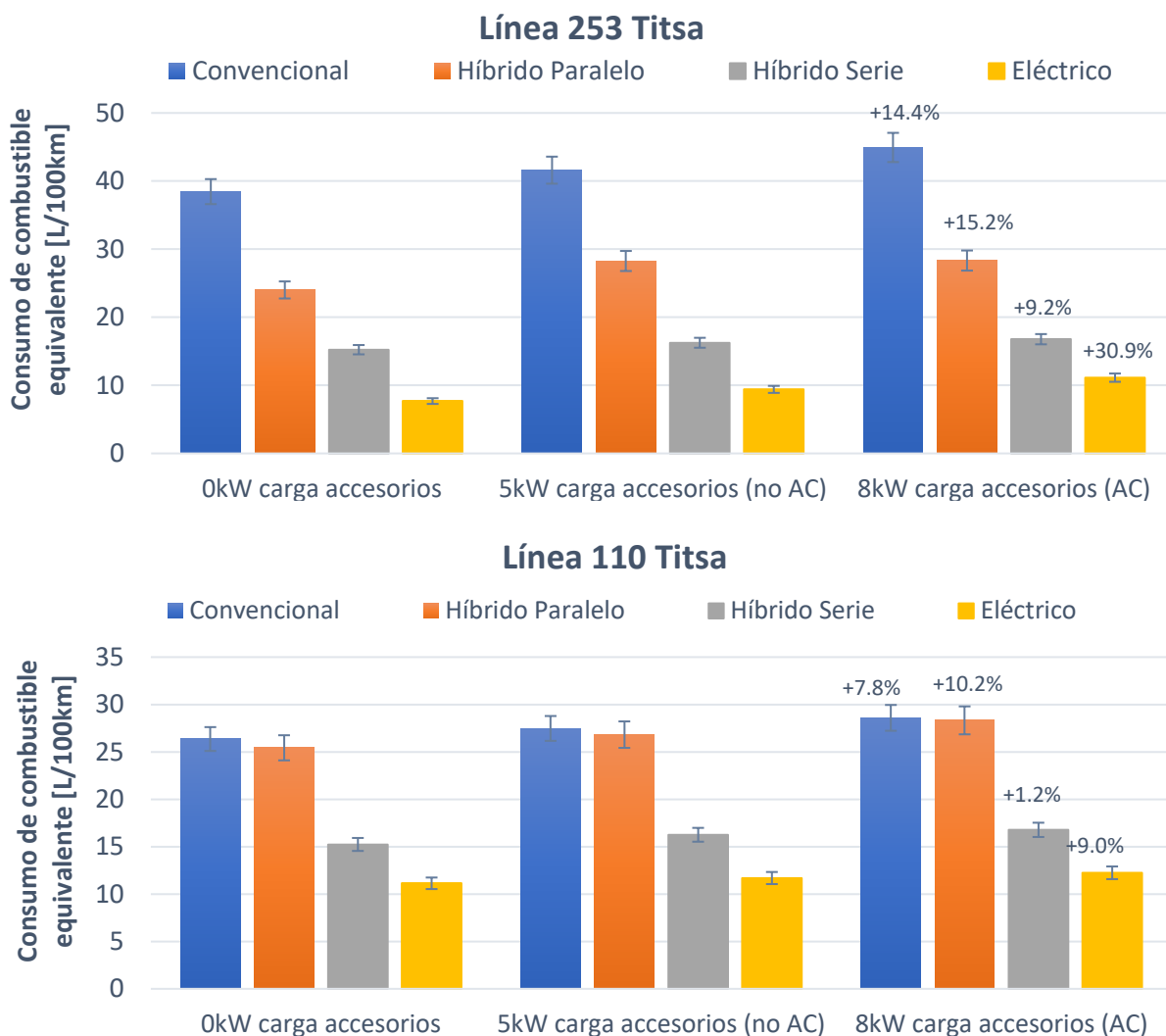


Figura 9.21 Comparación en consumo de combustible equivalente para distintos niveles de carga de accesorios según arquitectura para las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC-Costa Adeje). Influencia de la presencia de aire acondicionado (8kW). Fuente Propia.

9.2.3 Impacto del estilo de conducción en las emisiones y la autonomía para distintas arquitecturas en las Líneas 253 y 110

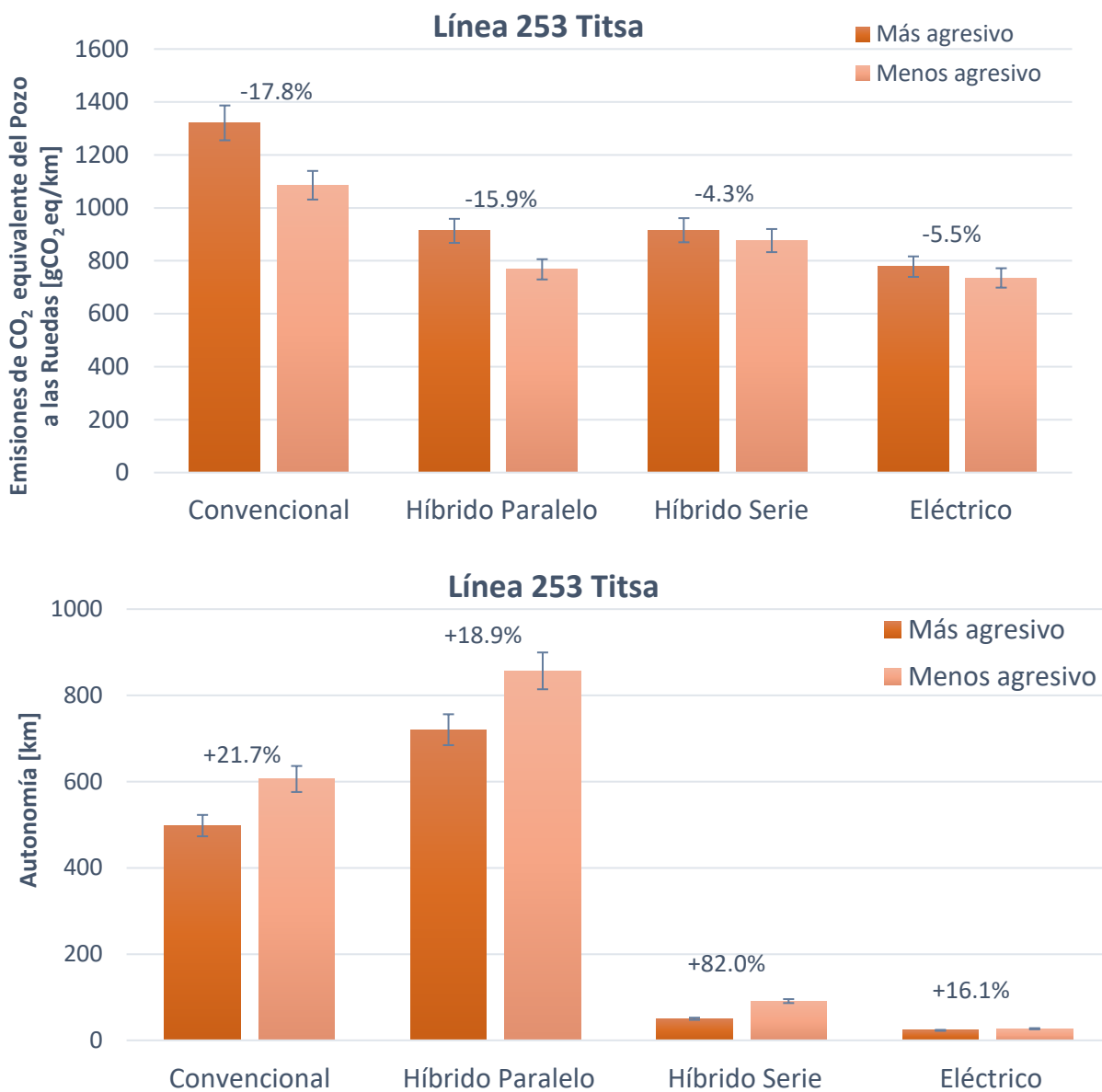


Figura 9.22 Impacto de la agresividad en la conducción sobre las emisiones de CO₂ equivalente (WTW) y la autonomía del vehículo para las distintas arquitecturas analizadas en las líneas 253 (LL-Garimba) y 110 (SC- Costa Adeje). Fuente Propia.

