

UNIVERSIDAD DE LA LAGUNA
ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y TECNOLOGIA

**EVALUACIÓN DE SOLUCIONES DE
ARQUITECTURAS PROPULSIVAS PARA
EL TRANSPORTE INTERURBANO EN LA
ISLA DE TENERIFE**

TRABAJO PRESENTADO PARA OPTAR AL APROBADO DEL

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

POR

YASEL LECUONA GONZÁLEZ

La Laguna, JULIO DE 2023

TRABAJO FIN DE GRADO

Autor:

YASEL LECUONA GONZÁLEZ

Director o Directores:

Dr. ÓSCAR GARCÍA AFONSO

ÍNDICE GENERAL

MEMORIA	1
ANEXO I: CREACIÓN DE MODELOS EN FASTSIM	102
ANEXO II: CREACIÓN DE SIMULACIONES ECONÓMICAS	108
ANEXO III: RESULTADOS DETALLADOS DE SIMULACIONES ECONÓMICAS	113

ÍNDICE DE MEMORIA

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS.....	4
NOMENCLATURAS	6
GLOSARIO DE TÉRMINOS	7
UNIDADES.....	9
1 INTRODUCCIÓN	10
1.1 Resumen.....	10
1.2 Objetivos	11
1.3 Abstract.....	12
1.4 Antecedentes	13
2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	14
2.1 Arquitecturas propulsivas en servicio de transporte de pasajeros	14
2.2 Combustibles alternativos	18
2.3 Integración de vehículos alternativos.....	20
2.3.1 Autobús eléctricos de batería (BEB)	20
2.3.2 Autobús eléctrico alimentado por pila de combustible (FCEB)	22
2.4 Parámetros económicos.....	23
3 METODOLOGÍA.....	25
3.1 Software de simulación energética de vehículos: FASTSim	25
3.1.1 Parámetros requeridos por FASTSim (<i>inputs</i>).....	26
3.1.2 Valores resultado (<i>outputs</i>).....	32
3.1.3 Validación de arquitecturas propulsivas estudiadas	33
3.2 Desarrollo de herramienta para el análisis económico	34
3.2.1 Modelo matemático.....	35
3.2.2 Interfaz de usuario	48
4 CASOS DE ESTUDIO	57
4.1 Descripción y características de las rutas interurbanas seleccionadas	57
4.1.1 Línea 467.....	57
4.1.2 Línea 020.....	59
4.2 Vehículos modelizados.....	61
4.2.1 Modelos de 12 m	61
4.2.2 Modelos de 18 m	62
4.2.3 Modelos de 14 m	65
4.3 Análisis de capacidad de batería necesaria para arquitecturas eléctricas	67
4.3.1 Casos de carga en cochera (<i>depot charging</i>)	67
4.3.2 Casos de carga a final de línea - <i>End Of Line (EOL) charging</i>	71
4.4 Estudio de arquitecturas basadas en la pila de combustible en las rutas analizadas.....	75
4.5 Consideraciones para el análisis económico	77

4.6	Modelización económica	79
4.6.1	Flota línea 467	79
4.6.2	Flota línea 020	81
5	ANÁLISIS DE RESULTADOS	83
5.1	Línea 467	83
5.2	Línea 020	88
6	CONCLUSIONES	93
7	CONCLUSIONS	96
8	BIBLIOGRAFÍA	99
9	ANEXO I: CREACIÓN DE MODELOS EN FASTSIM	102
10	ANEXO II: CREACIÓN DE SIMULACIONES ECONÓMICAS	108
11	ANEXO III: RESULTADOS DETALLADOS DE SIMULACIONES ECONÓMICAS	113
11.1	Modelo diésel de 18 m	113
11.2	Modelo híbrido de 18 m	115
11.3	Modelo eléctrico de 18 m	117
11.4	Modelo de pila de combustible de 18 m	121
11.5	Modelo diésel de 14 m	123
11.6	Modelo híbrido de 14 m	125
11.7	Modelo eléctrico de 14 m	127
11.8	Modelo de pila de combustible de 14 m	131

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Ejemplo de arquitectura convencional. Fuente: [2]	15
Figura 2.2. Ejemplos de arquitectura híbrida (paralela y serie). Fuente: [2]	16
Figura 2.3. Ejemplo de arquitectura eléctrica. Fuente: [2].....	17
Figura 2.4. Ejemplo de arquitectura basada en pila de combustible (FCEB). Fuente: [2].....	18
Figura 2.5. Cargador tipo pantógrafo, Foothill Transit, California. Fuente: [5]	21
Figura 2.6. Cargador inductivo, Antelope Valley Transit Authority, Los Angeles. Fuente: [5]	22
Figura 3.1. Curva de motor. Fuente: [8].....	29
Figura 3.2. Submenú de parámetros generales. Fuente: realización propia.	49
Figura 3.3. Apartado de parámetros del vehículo. Fuente: realización propia.....	49
Figura 3.4. Apartado de datos de mantenimiento. Fuente: realización propia.....	50
Figura 3.5. Apartado de costes de consumibles. Fuente: realización propia.....	51
Figura 3.6. Apartado de consumos. Fuente: realización propia.	51
Figura 3.7. Herramienta de estimación de cargadores. Fuente: realización propia.	52
Figura 3.8. Submenú de infraestructura. Fuente: realización propia.....	52
Figura 3.9. Submenú de parámetros medioambientales. Fuente: realización propia... ..	53
Figura 3.10. Resultados finales, adicionales y gráficos. Fuente: realización propia... ..	55
Figura 3.11. Hoja “Comparativa”. Fuente: realización propia.....	56
Figura 4.1. Trazado de la línea 467. Fuente: realización propia.. ..	58
Figura 4.2. Perfil de velocidades y altitud de la línea 467. Fuente: realización propia con datos de TITSA... ..	58
Figura 4.3. Trazado de la línea 020. Fuente: realización propia.	60
Figura 4.4. Perfil de velocidades y altitud de la línea 020. Fuente: realización propia con datos de TITSA.....	60
Figura 4.5. Evolución del SOC (Carga en cochera, Línea 467). Fuente: realización propia.....	69
Figura 4.6. Evolución del SOC (Carga en cochera, Línea 020). Fuente: realización propia.....	70
Figura 4.7. Ubicación de pantógrafos (Carga EOL, Línea 467). Fuente: realización propia.....	72
Figura 4.8. Evolución del SOC (Carga EOL, Línea 467). Fuente: realización propia... ..	73
Figura 4.9. Ubicación de pantógrafos (Carga EOL, Línea 020). Fuente: realización propia.....	74
Figura 4.10. Evolución del SOC (Carga EOL, Línea 020). Fuente: realización propia... ..	74
Figura 5.1. Comparativa de lifecycle cost de los modelos de la línea 467. Fuente: realización propia.....	84
Figura 5.2. Comparativa porcentual del lifecycle cost de los modelos de la línea 467. Fuente: realización propia.....	84
Figura 5.3. Comparativa de costes totales de operación de los modelos de la línea 467. Fuente: realización propia.....	87
Figura 5.4. Comparativa de emisiones de CO ₂ de los modelos de la línea 467. Fuente: realización propia.... ..	87

Figura 5.5. Comparativa de lifecycle cost de los modelos de la línea 020. Fuente: realización propia.....	89
Figura 5.6. Comparativa porcentual del lifecycle cost de los modelos de la línea 020. Fuente: realización propia.....	90
Figura 5.7. Comparativa de costes totales de operación de los modelos de la línea 020. Fuente: realización propia.....	91
Figura 5.8. Comparativa de emisiones de CO ₂ de los modelos de la línea 020. Fuente: realización propia.....	92
Figura 9.1. Apartado “Vehicle”. Fuente: realización propia.	103
Figura 9.2. Apartados “Fuel storage” y “Fuel converter”. Fuente: realización propia.....	103
Figura 9.3. Apartados “Motor” y “Traction battery”. Fuente: realización propia.....	104
Figura 9.4. Apartados “Wheel” y “Misc”. Fuente: realización propia.....	104
Figura 9.5. Apartado “Additional drive cycles”. Fuente: realización propia.....	105
Figura 9.6. Hoja “Batch interface”. Fuente: realización propia.	106
Figura 10.1. Menú de selección de costes de consumible. Fuente: realización propia.....	108
Figura 10.2. Uso de la herramienta “Buscar objetivo” en conjunto con el modelo económico. Fuente: realización propia.....	109
Figura 10.3. Selección de estimación de costes sociales. Fuente: realización propia.....	111
Figura 10.4. Selección de resultados para su comparación. Fuente: realización propia.....	112
Figura 10.5. Colocación de resultados en comparativa. Fuente: realización propia.....	112
Figura 11.1. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota diésel de 18 m. Fuente: realización propia.....	114
Figura 11.2. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota diésel de 18 m. Fuente: realización propia.....	114
Figura 11.3. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota híbrida de 18 m. Fuente: realización propia.....	116
Figura 11.4. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota híbrida de 18 m. Fuente: realización propia.....	116
Figura 11.5. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m. Fuente: realización propia.....	118
Figura 11.6. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m. Fuente: realización propia.....	118
Figura 11.7. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota eléctrica (EOL) de 18 m. Fuente: realización propia.....	120
Figura 11.8. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (EOL) de 18 m. Fuente: realización propia.....	120
Figura 11.9. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota FCEB de 18 m. Fuente: realización propia.....	122
Figura 11.10. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota FCEB de 18 m. Fuente: realización propia.....	122
Figura 11.11. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota diésel de 14 m. Fuente: realización propia.....	124

Figura 11.12. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota diésel de 14 m. Fuente: realización propia.....	124
Figura 11.13. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota híbrida de 14 m. Fuente: realización propia.....	126
Figura 11.14. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota híbrida de 14 m. Fuente: realización propia.....	126
Figura 11.15. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m. Fuente: realización propia.....	128
Figura 11.16. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m. Fuente: realización propia.	128
Figura 11.17. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota eléctrica (EOL) de 14 m. Fuente: realización propia.....	130
Figura 11.18. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (EOL) de 14 m. Fuente: realización propia.....	130
Figura 11.19. Gráfico circular de porcentajes del lifecycle cost de la flota FCEB de 14 m. Fuente: realización propia.....	132
Figura 11.20. Gráfico de columnas apiladas de componentes del lifecycle cost de la flota FCEB de 14 m. Fuente: realización propia.....	132

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 3.1. Datos de consumo aportados por TITSA.....	33
Tabla 4.1. Tipo de servicio de la línea 467	57
Tabla 4.2. Tipo de servicio de la línea 020	59
Tabla 4.3. Parámetros de los modelos de 12 m.....	61
Tabla 4.4. Consumos de los modelos de 12 m.....	62
Tabla 4.5. Parámetros de los modelos de 18 m.....	62
Tabla 4.6. Consumos de los modelos de 18 m.....	63
Tabla 4.7. Errores de los modelos de 18 m	63
Tabla 4.8. Parámetros de los modelos de 14 m.....	65
Tabla 4.9. Consumos de los modelos de 14 m.....	65
Tabla 4.10. Errores de los modelos de 14 m	65
Tabla 4.11. Consumos del modelo eléctrico de 18 m en peor caso posible.....	68
Tabla 4.12. Consumos del modelo eléctrico de 14 m en peor caso posible.....	70
Tabla 4.13. Consumos del modelo eléctrico de 18 m (EOL).....	73
Tabla 4.14. Consumos del modelo eléctrico de 14 m (EOL).....	75
Tabla 4.15. Consumos del modelo de pila de combustible de 18 m en peor caso posible.....	75
Tabla 4.16. Consumos del modelo de pila de combustible de 14 m en peor caso posible.....	76
Tabla 4.17. Parámetros generales de simulación – Línea 467.....	79
Tabla 4.18. Resultados económicos de la flota de 18 m.....	79
Tabla 4.19. Porcentajes del lifecycle cost de la flota de 18 m	80
Tabla 4.20. Componentes del lifecycle cost de la flota de 18 m.....	80
Tabla 4.21. Parámetros generales de simulación – Línea 020	81
Tabla 4.22. Resultados económicos de la flota de 14 m.....	81
Tabla 4.23. Porcentajes del lifecycle cost de la flota diésel de 14 m.....	82
Tabla 4.24. Componentes del lifecycle cost de la flota de 14 m.....	82
Tabla 11.1. Resultados económicos de la flota diésel de 18 m.....	113
Tabla 11.2. Componentes del lifecycle cost de la flota diésel de 18 m	113
Tabla 11.3. Resultados económicos de la flota híbrida de 18 m	115
Tabla 11.4. Componentes del lifecycle cost de la flota híbrida de 18 m.....	115
Tabla 11.5. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m.....	117
Tabla 11.6. Componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m	117
Tabla 11.7. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga EOL) de 18 m	119
Tabla 11.8. Componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga EOL) de 18 m	119
Tabla 11.9. Resultados económicos de la flota FCEB de 18 m	121
Tabla 11.10. Componentes del lifecycle cost de la flota FCEB de 18 m	121

Tabla 11.11. Resultados económicos de la flota diésel de 14 m.....	123
Tabla 11.12. Componentes del lifecycle cost de la flota diésel de 14 m	123
Tabla 11.13. Resultados económicos de la flota híbrida de 14 m	125
Tabla 11.14. Componentes del lifecycle cost de la flota híbrida de 14 m.....	125
Tabla 11.15. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m	127
Tabla 11.16. Componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m	127
Tabla 11.17. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga EOL) de 14 m.....	129
Tabla 11.18. Componentes del lifecycle cost de la flota eléctrica (carga EOL) de 14 m	129
Tabla 11.19. Resultados económicos de la flota FCEB de 14 m	131
Tabla 11.20. Componentes del lifecycle cost de la flota FCEB de 14 m	131

NOMENCLATURAS

BEB: Battery-electric bus.

CAPEX: Capital Expenses.

CNG: Compressed Natural Gas.

Conv: Arquitectura propulsiva convencional (diésel).

EV: Electric Vehicle.

FASTSim: Future Automotive Systems Technology Simulator.

FCEB: Fuel Cell Electric Bus.

HEV: Hybrid-Electric Vehicle.

HVO: Hydrogenated Vegetable Oil.

Lifecycle cost: Coste del ciclo de vida.

LNG: Liquefied Natural Gas.

MOM: Masa en orden de marcha.

NiMH: Nickel-Metal Hydride/Níquel-Metal Hidruro

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

OPEX: Operating Expenses.

SOC: State Of Charge.

TCO: Total cost of ownership.

TITSA: Transportes Interurbanos de Tenerife, S.A.

TTW: Tank-to-wheels.

WTT: Well-to-tank.

GLOSARIO DE TÉRMINOS

- A Área frontal (m^2).
- a Porcentaje sobre el precio de adquisición del vehículo destinado al mantenimiento anual.
- b Factor divisor de costes en pantógrafos.
- C Coste (en general).
- $C_{1FC-maint}$ Coste unitario de reemplazo de pila de combustible (€).
- C_A Coste anual (€).
- C_D Drag coefficient (adimensional).
- $C_{FC-maint}$ Coste de mantenimiento de pilas de combustible (€).
- $C_{H_2-station}$ Coste unitario de hidrogenera (€).
- $CIPK$ Carbon Intensity Per Kilowatt-hour / Intensidad de carbono de la red (gCO_2/kWh).
- C_T Coste total (€).
- C_T Coste total (€).
- $C_{additional}$ Costes adicionales de infraestructura (€).
- $C_{batt-maint}$ Coste de mantenimiento de baterías (€).
- $C_{chargers}$ Coste de adquisición de infraestructura de carga (€).
- $C_{chargers-maint}$ Coste de mantenimiento de infraestructura de carga (€).
- $C_{depot-chargers}$ Coste de cargadores de cochera (€).
- C_{driver} Coste de conductor (€).
- C_{energy} Coste energético (€).
- $C_{gen-maint}$ Coste de mantenimiento general (€).
- $C_{pantograph}$ Coste unitario de pantógrafo (€).
- C_{social} Coste social (€).
- $C_{vehicle-pretax}$ Coste total del vehículo, sin impuestos (€).
- $C_{vehicles}$ Coste de adquisición de la flota (€).
- c Factor divisor de costes en hidrogeneras.
- $c_{CO_2-emissions}$ Coste específico de las emisiones de CO_2 (€/tm).
- c_{EM} Coste específico del motor eléctrico (€/kW).
- c_{FS} Coste específico de depósito de combustible (€/kWh).
- c_{ICE} Coste específico del motor de combustión interna (€/kW).
- c_{Power} Coste de potencia contratada mensual (€/kW).
- c_{batt} Coste específico de batería (€/kWh).
- $c_{chargers-maint}$ Coste específico de mantenimiento de cargadores (€/kWh).
- $c_{chassis}$ Coste específico de chasis (€/kg).
- $c_{electricity}$ Coste específico de electricidad (€/kWh).
- c_{fuel} Coste específico de combustible diésel (€/l).
- c_{maint} Coste específico de mantenimiento (€/km).
- c_{other} Otros costes (€/unidad).
- D_{annual} Distancia recorrida anualmente (km).
- DR Tasa de descuento (en porcentaje).
- d Porcentaje de valor del vehículo usado respecto al vehículo nuevo.
- E Energía (en general).
- e Porcentaje de valor de la batería usada respecto a la batería nueva.
- F_D Drag force (N).
- f_{H_2} Consumo de hidrógeno de las flotas FCEB ($kg H_2/km$).
- $f_{conv-HEV}$ Consumo de combustible de las flotas diésel e híbridas (l/km).
- $f_{electricity}$ Consumo de electricidad de las flotas eléctricas (kWh/km).
- g Porcentaje sobre el coste de adquisición de la infraestructura, destinado a su mantenimiento anual.
- I Inercia ($kg \cdot m^2$).

- i Año actual de simulación (variable del programa).
 i_C Vida útil de los cargadores de cochera (años).
 i_H Vida útil de las hidrogeneras (años).
 i_P Vida útil de los pantógrafos (años).
 i_f Año final de simulación.
 i_t Número total de años de la simulación.
 m Masa (kg).
 $n_{H_2-station}$ Número de hidrogeneras.
 $n_{pantograph}$ Número de pantógrafos.
 $n_{vehicles}$ Número de vehículos.
 P Potencia (en general).
 PCI Poder calorífico inferior (kJ/kg o kJ/l).
 r Radio (m).
 $Salary$ Sueldo mensual de conductor (€).
 SOC_{prev} State of charge previo al viaje analizado.
 Tax Impuesto sobre el valor del vehículo (en porcentaje).
 $V_{fuel-total}$ Volumen total de combustible empleado (l).
 v Velocidad (m/s).
 WR_{FC} Porcentaje de desgaste de la pila de combustible.
 $WR_{FC-crit}$ Porcentaje crítico de desgaste de la pila de combustible.
 WR_{batt} Porcentaje de desgaste de la batería.
 $WR_{batt-crit}$ Porcentaje crítico de desgaste de la batería.
- ρ Densidad (kg/m³).
 $\eta_{charger}$ Rendimiento del cargador.
 η_{grid} Rendimiento de la red eléctrica.

UNIDADES

DGE: Diesel gallon equivalent.

gCO₂/kWh: Gramos de CO₂ por kilovatio-hora consumido.

GGE: Gallon gasoline equivalent.

MPGGE: Miles per gallon of gasoline equivalent.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Resumen

Este Trabajo Fin de Grado se centra en el estudio tecno-económico de diferentes configuraciones propulsivas, en concreto tres arquitecturas principales: convencional, basada en motores diésel; híbrida paralela, con un motor diésel operando junto a un motor eléctrico; y eléctrica, con un motor eléctrico como fuente de propulsión. Además, se estudiará la configuración de vehículo eléctrico alimentado por pila de combustible, haciendo uso de hidrógeno como consumible.

Las configuraciones mencionadas cobran importancia en el ámbito de la descarbonización del sector del transporte público en la isla de Tenerife, la isla de mayor área y población en el Archipiélago Canario. Esto implica una gran variedad de situaciones a superar por el servicio de transporte público de la isla, basado en el uso de autobuses y gestionado por TITSA (Transportes Interurbanos de Tenerife, S.A.) como el servicio urbano e interurbano superando los considerables gradientes debidos a la orografía de la isla.

Se desarrollarán modelos de vehículos mediante el programa FASTSim, una herramienta del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL). Esta herramienta, de extendido uso en la implementación de vehículos con distintas configuraciones propulsivas, permite estudiar modelos desarrollados por el usuario en rutas también aportadas por este, u otros recorridos incluidos en el programa, obteniendo como resultados principales el consumo, ya sea de combustible o electricidad, del modelo creado en estos recorridos.

Estos modelos se emplearán como la base para realizar distintas simulaciones económicas basadas en el concepto del “coste del ciclo de vida” o *lifecycle cost*, que se realizarán en un programa desarrollado durante la realización de este Trabajo Fin de Grado, basado en el actual estado del arte de estos modelos. Los resultados de las distintas arquitecturas serán comparados, con el objetivo final de aportar soluciones de transporte público que equilibren costes y daños medioambientales para dos rutas representativas de las líneas que TITSA opera en Tenerife, en vistas a su posible implementación.

1.2 Objetivos

Para realizar el estudio tecno-económico propuesto, se plantean dos objetivos principales, que juntos darán respuesta a la problemática existente actualmente de la integración de nuevas arquitecturas propulsivas.

En primer lugar, el estudio de consumos energéticos de distintas configuraciones propulsivas; en concreto, de 4 tipos:

- Convencional (basada en un motor de combustión interna alternativo).
- Híbrido paralelo (donde un motor eléctrico trabaja junto a un motor de combustión interna, complementándose).
- Eléctrico (propulsión aportada por un motor eléctrico exclusivamente, siendo este alimentado por una batería).
- Eléctrico alimentado por pila de combustible (la electricidad necesaria para el motor eléctrico es aportada por una reacción química sostenida por hidrógeno, suministrado por tanques a alta presión).

Se estudian estas 4 configuraciones en simulaciones basadas en modelos reales de autobuses de longitudes aproximadas de 12, 14 y 18 m, que se adaptan como simulaciones en FASTSim y son puestas a prueba en cinco rutas representativas de las condiciones experimentadas por estos vehículos en operación.

En segundo lugar, se plantea el análisis de los costes de implantación mediante el estudio del coste del ciclo de vida de dos flotas, asociadas cada una a una ruta real de importancia en la isla de Tenerife, simulando los costes aproximados de operación de cada flota con distintas arquitecturas propulsivas, y observando además el impacto medioambiental de cada una, mediante un programa desarrollado específicamente para esta labor.

En concreto, se analizan los siguientes costes:

- Adquisición
- Infraestructura
- Operación (energéticos)
- Mantenimiento
- Reemplazos
- Costes medioambientales (estudiados separadamente)

Los resultados finales serán analizados y comentados para dar como resultado final una propuesta de flota factible para cada ruta, tanto en costes de ciclo de vida como en emisiones, especialmente de CO₂, que permita contribuir a la descarbonización del sector del transporte público por carretera en Tenerife.

1.3 Abstract

This thesis is centered on the study of different mobility solutions, specifically three main configurations: conventional, based on diesel engines; parallel hybrid, with a diesel engine and an electric one working together; and fully electric, using an electric motor as the sole means of propulsion. Along with these three, fuel-cell electric vehicles, fueled by hydrogen, will be studied as well.

These configurations are especially important in the field of decarbonization of the public transportation sector in the island of Tenerife, the largest of the Archipelago in both area and population. This implies a large variety of situations that the public transport service of the island, which is bus-based and controlled by TITSA (Transportes Insulares de Tenerife, S. A.) must face, like providing urban and intercity services in sites with large gradients, due to the rugged geography of the island.

The vehicles and routes will be modelled using FASTSim, a tool made by the National Renewable Energy Laboratory. This tool, widely used in the study of different propulsion methods for vehicles, allows the study of user-made vehicle models in routes given by the user or other built-in routes, obtaining as the main result either the fuel or electric consumption of the created model.

Once the models are configured and validated, they will form the foundation of a simulation based on the “*lifecycle cost*” paradigm, carried out in an in-house developed program, based on the state of the art of this field. The results of the different models will be compared in order to give public transportation solutions which balance costs and environmental damage for two lines of importance in Tenerife’s public transport service, aiming to its future implementation.

1.4 Antecedentes

La Ley del Clima Europea recoge en su articulado el compromiso de la Unión Europea de lograr la neutralidad climática en el año 2050, y en 2030, lograr una reducción neta de emisiones de un 55% mínimo [1], según la última revisión de 2023. Estas medidas persiguen dos objetivos claramente diferenciados:

- Lograr minimizar el daño medioambiental provocado por las emisiones de gases de efecto invernadero en la Unión Europea (UE) generadas por el uso de combustibles fósiles.
- Reducir la dependencia energética en países externos a la UE tales como Rusia, Irán, o Arabia Saudí.

El sector del transporte es el causante de un 20% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero en la UE, sumado a más de dos terceras parte de las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y cerca del 10% de otros contaminantes, lo que convierte a este sector en uno de los objetivos principales de los planes de descarbonización y transición ecológica planteados por la UE.

La propuesta de revisión sobre la regulación en emisiones de CO₂ sigue tres principios:

- **Reducir las emisiones de los vehículos pesados de manera efectiva en cuanto a costes.** Esto implica comenzar a realizar intervenciones inmediatas, ya que el reemplazo de las flotas de este tipo de vehículos es costoso y lento. Este punto es especialmente importante para este TFG, en el que se estudia el impacto tanto en costes como en el medio ambiente.
- **Proporcionar beneficios a los operadores y usuarios europeos de este tipo de transporte.** A la vez que los fabricantes de vehículos pesados implementan nuevas arquitecturas propulsivas más respetuosas con el planeta, el coste unitario de cada vehículo desciende, favoreciendo a los pequeños y medios operadores, que forman la mayor parte de estos operadores de transporte. Esto permitirá tanto reducir el coste de reemplazo de sus flotas como también permitir que pequeñas empresas disfruten de los costes de operación reducidos de estas nuevas configuraciones.
- **Potenciar el liderazgo de la UE en materia de vehículos de cero emisiones.** La industria automovilística conforma más del 7% del producto interior bruto (PIB) en la UE, proporcionando empleo a más de 14,6 millones de europeos [1]. Con esta medida, se busca capacitar a esta industria para mantener y mejorar la posición que presenta actualmente como heraldo de estas nuevas tecnologías.

Aunque los vehículos pesados no son una gran parte de esta industria, más orientada a turismos y vehículos multipropósito, su mayor valor añadido los hace también un objetivo clave para esta medida.

Estas medidas tienen como objetivo final incentivar la implantación de las nuevas arquitecturas propulsivas, en especial la eléctrica, contribuyendo a los objetivos de eficiencia energética. Esto se suma al hecho de que estos vehículos ofrecen una vía para el uso de energías renovables, apoyando también este objetivo europeo. Todo esto, en el marco del paquete de medidas “Objetivo 55”, la iniciativa “*Next Generation UE*”, y el plan “*REPowerEU*” contribuirá a lograr la transición energética que Europa necesita.

2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Arquitecturas propulsivas en servicio de transporte de pasajeros

En este trabajo se tratan cuatro arquitecturas propulsivas principales; convencional o diésel, híbrida paralela, eléctrica y de pila de combustible: a continuación, se describen las características más importantes de cada una de ellas.

- Convencional (Diésel)

Esta arquitectura, cuya configuración está ejemplificada en la Figura 2.1, consiste en un motor de combustión interna acoplado a una caja de cambios, generalmente por medio de un embrague, que alimenta un eje motriz, lo que logra que el vehículo se mueva. El motor es alimentado mediante combustibles fósiles, en particular diésel para vehículos pesados, que es almacenado en un depósito destinado a tal fin. Otros elementos adicionales (aire acondicionado, alternador, bombas de combustible y refrigerante) reciben la potencia del propio motor de combustión interna.

Esta configuración, la más popular actualmente, ofrece un desempeño bastante bueno en múltiples condiciones, además de tener una gran autonomía. Estas ventajas la convirtieron, a principios-mediados del siglo XX, en la arquitectura propulsiva más extendida a nivel global; sin embargo, su principal desventaja es la contaminación generada por el proceso de combustión, que sumado a su alto nivel de ruido (contaminación acústica) aconseja su reemplazo por otras tecnologías más respetuosas con el medio ambiente.

La normativa actual comienza a penalizar estas desventajas, forzando a esta arquitectura a adaptarse, mediante el uso de sistemas de postratamiento como el *AdBlue*, nuevos diseños de motores restringidos en emisiones por los estándares europeos, y el uso de biocombustibles u otros combustibles alternativos.

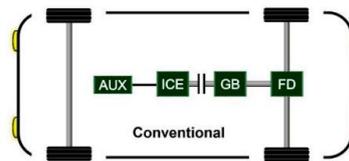


Figura 2.1. Ejemplo de arquitectura convencional.

- Híbrida

Para aprovechar la alta eficiencia de una arquitectura eléctrica, sumada a la gran autonomía y la robustez de una configuración convencional, se plantea una arquitectura híbrida, donde tanto el motor de combustión interna como el motor eléctrico trabajan de forma conjunta. La idea de combinar las ventajas de ambas arquitecturas no es nueva: se remonta a principios del siglo XX, con ejemplos como el vehículo Lohner-Porsche de 1900.

Esta arquitectura admite dos variantes, ambas visibles en la Figura 2.2:

- Híbrida en serie. Esta configuración emplea el motor de combustión interna para mover un generador eléctrico, que recarga una batería (normalmente de pequeño tamaño) que a su vez alimenta a un motor eléctrico conectado directamente al eje motriz. Esta configuración permite que el motor funcione en su polo económico, minimizando gastos y emisiones; pero debido a que se necesita un generador y un motor eléctrico de potencia considerable, también aumenta el peso del vehículo, perjudicando el rendimiento global.
- Híbrida paralela. En esta, el motor eléctrico está acoplado junto al motor de combustión interna, normalmente antes de la caja de cambios; esto permite que ambos se apoyen para adaptarse a las situaciones encontradas y permitir que el motor opere lo más cercano posible a su polo económico, con un menor peso que la híbrida en serie, ya que no hay generador y el motor eléctrico puede ser de menor potencia.

El motor eléctrico es abastecido por una pequeña batería destinada a tal fin, que se puede recargar mediante un enchufe externo, dando lugar al híbrido enchufable (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle* o PHEV), o empleando el propio motor como generador al frenar o descender.

La complejidad de esta configuración radica en el acoplamiento entre el motor eléctrico y el de combustión interna, requiriendo sistemas mecánicos complejos.

En este trabajo, siguiendo la experiencia práctica de TITSA con vehículos híbridos en serie, y juzgando que la configuración híbrida paralela ofrece, potencialmente, un

mejor desempeño, se ha optado por esta para el estudio. No se ha considerado ningún modelo híbrido enchufable.

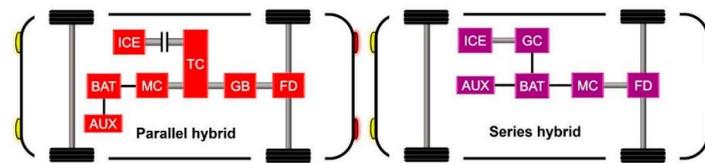


Figura 2.2. Ejemplos de arquitectura híbrida (paralela y serie).

Otras configuraciones híbridas (como las basadas en otras tecnologías distintas a la típica diésel-eléctrica con almacenamiento en baterías, por ejemplo, el uso de almacenaje energético de aire comprimido, o el uso de supercapacitores como reserva principal de energía) no son tampoco tratadas aquí, debido a la carencia de datos sobre estas.

En este trabajo, generalmente, “híbrida” se refiere a una configuración híbrida paralela. Para abreviar, se emplea HEV, del inglés *Hybrid-Electric Vehicle*.

- Eléctrica

Las ventajas de una motorización completamente eléctrica, entre ellas la entrega instantánea de par motor, la alta eficiencia y principalmente, la ausencia de emisiones directas, han convertido esta arquitectura propulsiva en la más popular para sustituir los vehículos diésel en el transporte pesado. Como en los casos anteriores, esta configuración no es un concepto completamente nuevo, ya que muchos diseñadores a principios del siglo XX optaron por esta para motorizar sus vehículos, siendo populares para establecer récords de velocidad, como el caso del primer vehículo en superar los 100 km/h en 1899, el “*La Jamais Contente*”.

Actualmente, las preocupaciones de la sociedad actual sobre el cambio climático y el agotamiento de los yacimientos de combustibles fósiles han propiciado la implementación de esta configuración, que tiene la ventaja adicional de poder utilizar una amplia selección de fuentes de energía, siempre y cuando estas puedan convertirse a energía eléctrica: hidroeléctrica, geotérmica, biomasa, solar, eólica...

Esta arquitectura propulsiva, como se ve en la Figura 2.3, se compone de un motor que alimenta directamente al eje motriz, normalmente sin una caja de cambios intermedia, que es alimentado por una batería. Otras demandas de potencia adicionales del vehículo son provistas también por la batería.

La simplicidad de esta configuración hace que esta tenga un coste de mantenimiento bajo, salvo en lo que respecta a la batería: si se plantea un vehículo con autonomía

comparable a la de uno convencional, del tipo denominado como carga en cochera o “*depot charging*” esta debe ser necesariamente muy grande, tendencia que aumenta en vehículos pesados. Una desventaja considerable de esta arquitectura es el peso adicional que este elemento añade, y el alto coste que supone su reemplazo, dado que la tecnología de baterías de ion-litio, las de mayor rendimiento y grado de implantación actualmente, aún no han descendido de precio lo suficiente para hacer la adquisición y mantenimiento de estos vehículos competitiva con los convencionales. Otra de sus principales desventajas es su recarga lenta, que suele demorarse varias horas con la tecnología actual, lo que limita su flexibilidad en comparación a los vehículos diésel o híbridos, que pueden repostar rápidamente si así lo necesitan.

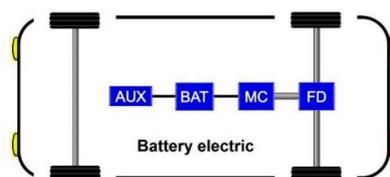


Figura 2.3. Ejemplo de arquitectura eléctrica.

- Pila de combustible

Como se ha visto en la descripción anterior, una de las principales limitaciones de los vehículos eléctricos es la batería necesaria si se desea una autonomía considerable. La propuesta de esta arquitectura, como se ve en la Figura 2.4, es sustituir esa batería por una más pequeña, que es recargada por una pila de combustible alimentada por hidrógeno, en una configuración muy similar a un híbrido en serie. El vehículo incorporaría tanques para almacenar este a alta presión.

Las pilas de combustible generan electricidad por medio de una reacción redox, en la que el hidrógeno y el oxígeno presente en el aire suministrado producen electricidad, con agua como subproducto. Esta reacción, y por tanto, la producción, puede prolongarse indefinidamente siempre que se aporten los reactivos necesarios. Esta tecnología, desarrollada a principios del siglo XX, fue aplicada por primera vez en las cápsulas Gemini de la NASA en la década de los 60, con el objetivo de poder suministrar electricidad durante un tiempo más prolongado que las baterías de la época. No se ha aplicado a vehículos de fabricación en serie hasta el Toyota Mirai de 2014.

Las principales ventajas de esta tecnología es un tiempo de recarga mucho más corto que en vehículos completamente eléctricos, ya que solo se requiere rellenar los tanques de hidrógeno, un proceso que suele tomar de 3 a 5 min [3] a grandes rasgos, comparable a los vehículos convencionales. Otra ventaja es su largo

alcance, dependiendo del tamaño de sus tanques de hidrógeno, presión de almacenaje y condiciones de ruta.

A pesar de estas ventajas, esta tecnología aún está en un estado embrionario, como se puede juzgar por la reciente entrada al mercado de este tipo de vehículos; los precios de las pilas de combustible apropiadas para este fin son aún bastante caras, y se desconoce su durabilidad a largo plazo. Además, la implantación y operación de las estaciones de repostaje de hidrógeno, denominadas “hidrogeneras” es excesivamente cara y compleja actualmente.

Otra desventaja de esta tecnología es la procedencia del hidrógeno: aunque puede ser producido de forma ecológica, mediante un proceso de electrólisis alimentado por electricidad generada por energía solar, eólica, hidroeléctrica u otro tipo de producción renovable, actualmente es más común producirlo por reformado de vapor (*steam reforming*), un proceso que emplea generalmente gas natural como reactivo y genera monóxido de carbono como subproducto, un gas extremadamente nocivo.

El estudio de esta tecnología en este trabajo, debido a la falta de información concreta sobre su implementación, es necesariamente limitada, especialmente en su aplicación a vehículos pesados. La aparición de la primera generación de este tipo de transportes es muy reciente, y aún se desconocen muchos factores sobre la operación y mantenimiento de estas, siendo un campo sumido en la incertidumbre.

En este trabajo se llamará a esta configuración “FCEB”, del inglés *Fuel Cell Electric Bus*.

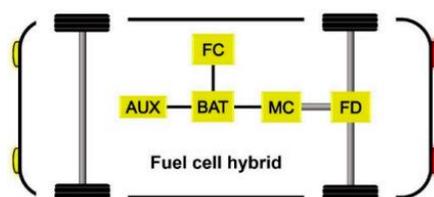


Figura 2.4. Ejemplo de arquitectura basada en pila de combustible (FCEB).

2.2 Combustibles alternativos

Otras alternativas a los vehículos diésel podrían ser los alimentados por gas natural comprimido (CNG). Estos funcionan con una arquitectura muy similar a la convencional, utilizando un motor de combustión interna alimentado por unos tanques a presión que almacenan el gas. Este motor de combustión interna, adaptado para su funcionamiento con este combustible, suministra potencia al eje motriz a través de una caja de cambios.

Debido a las pocas ventajas que ofrecen comparado con un vehículo convencional (principalmente emisiones reducidas y más controladas, a cambio de un peor desempeño) sumado a la inexistencia de infraestructuras de procesamiento y suministro de gas natural en Tenerife, desaconsejan la implementación de esta arquitectura. De la misma forma, también se desaconseja el uso de vehículos basados en el gas natural licuado (LNG) al no haber infraestructuras de suministro a gran escala.

El uso de biodiésel puede ser una alternativa al uso de petrodiesel en las arquitecturas convencional e híbrida. Este puede obtenerse a partir de distintos tipos de cultivos, desechos de la producción agrícola o aceites vegetales reciclados, que siguen varios procesos para obtener el combustible. Al ser consumido, emite gases de efecto invernadero considerados como “de ciclo cerrado” ya que se considera que estos serán absorbidos por los cultivos empleados para producir la siguiente remesa de combustible. El problema principal de este es su alto coste comparado con el petrodiesel convencional, además de la necesidad de destinar una parte de los cultivos que podrían emplearse en alimentación para la producción de este, el famoso debate “*Food vs. Fuel*”. Esta alternativa se debe descartar en el caso que nos concierne, dado que en Canarias no existen centros de producción de este, mucho menos con capacidad de producir el volumen de combustible necesario, más allá de algunas iniciativas en el seno de las Universidades locales.

Por último, los *e-fuels* (combustibles sintéticos, *electrofuels*, *powerfuels*) se perfilan como otra alternativa viable al uso de combustibles derivados del petróleo. Haciendo uso de hidrógeno generado de forma renovable sumado a carbono capturado de plantas industriales o directamente de la atmósfera, se sintetizan (también mediante energía renovable) combustibles líquidos y gaseosos, que pueden ser empleados sin adaptación alguna por cualquier motor térmico empleado en la actualidad. Esta tecnología, aún en sus primeras etapas de desarrollo, permitiría descarbonizar sectores como la aviación tanto comercial como militar, que actualmente no tiene otra alternativa respetuosa con el medio ambiente, sin necesidad de invertir en nuevas infraestructuras como cargadores o hidrogeneras. Sin embargo, su utilidad junto a una electrificación más clásica del mercado está en entredicho, teniendo actualmente costes elevados y una menor eficiencia energética global comparado con una electrificación directa [4].

2.3 Integración de vehículos alternativos

A continuación, se muestran algunas estrategias empleadas para adaptar estas nuevas arquitecturas propulsivas a los distintos servicios que tienen que prestar.

2.3.1 Autobús eléctricos de batería (BEB)

A primera vista, parece que la arquitectura eléctrica no presenta modificaciones posibles, como en el caso híbrido, para ayudar a la integración de esta tecnología. Sin embargo, se pueden realizar ciertas variantes en términos de estrategia, relacionadas con el elemento más caro, la batería:

- Carga de oportunidad (*Opportunity charging*). Esta configuración reduce drásticamente el tamaño de la batería, reduciendo peso (mejorando ligeramente el consumo energético) y costes, hasta un punto en el cual solo tiene autonomía para recorrer una pequeña distancia. Para ello, se hace necesario que esta sea suficiente para cubrir (con ciertos márgenes de seguridad) el recorrido entre los cargadores establecidos a lo largo de una ruta. En el caso de un vehículo de transporte de pasajeros, los cargadores pueden estar instalados en las paradas, y mientras entran y salen personas, el vehículo puede recargarse para llegar a la siguiente estación. Esta modificación permite reducir aún más los costes de mantenimiento al solo necesitar baterías de reducido tamaño, pero presenta la desventaja de requerir mucha infraestructura de carga, incrementando los costes totales de adquisición.
- Carga al final de línea (*End-of-line charging/EOL*): esta modificación, derivada de la carga de oportunidad, busca equilibrar el tamaño de la batería y la instalación de infraestructura, colocando cargadores solamente en el principio y final de la línea. El vehículo solo recarga en estas terminales, lo que requiere una batería más grande (capaz de cubrir la línea completa con un margen de seguridad) a cambio de reducir drásticamente el número de cargadores necesarios.

Esta modificación incrementa el coste de adquisición y mantenimiento, al tener una batería mayor, pero sigue siendo notablemente inferior al de un vehículo eléctrico capaz de cubrir la ruta con la autonomía de uno convencional. En este trabajo, se referirá generalmente a esta estrategia como “EOL”.

Para este trabajo, se han estudiado vehículos de carga en cochera y a final de línea, dependiendo de las condiciones de la ruta. No se consideran cargas de oportunidad propiamente dichas por las siguientes razones:

- Se juzga que la red eléctrica en Canarias no está aún preparada para incorporar tantos puntos de alta potencia en las rutas.

- La carga de oportunidad brinda pocos beneficios en comparación con la carga a final de línea, especialmente en líneas directas o “Express”.
- Las infraestructuras para este tipo de carga están aún en una fase temprana de implementación y sus costes de adquisición y mantenimiento son aún conjeturas.
- El tiempo en cada parada es muy variable y en ocasiones no es suficiente para recargar de forma significativa. Además, se carecen de datos de estos tiempos.

Existen dos tipos de cargadores, actualmente, para implementar este tipo de estrategias.

- El más extendido, y el que se ha considerado para este estudio, es la carga conductiva: se instala un cargador con conexión para pantógrafo en las estaciones de recarga, que permita la carga rápida del vehículo. Cuando el vehículo se aproxime a la zona para recargar, este llevará incorporado un pantógrafo que se desplegará para establecer la conexión con el cargador. Una vez esté recargado, el pantógrafo se recoge y el vehículo sale a realizar el servicio. Este tipo de cargador se puede visualizar en la Figura 2.5. Podría darse también el caso de que el pantógrafo esté incorporado en el cargador, eliminando peso del vehículo, que solo debe tener la instalación de carga apropiada. Es el caso empleado en este trabajo. Esta tecnología se puede ver facilitada por ayudas a la conducción incorporadas en el vehículo, tales como la alineación y acoplamiento automáticos de este con respecto al cargador. Actualmente es la más extendida.

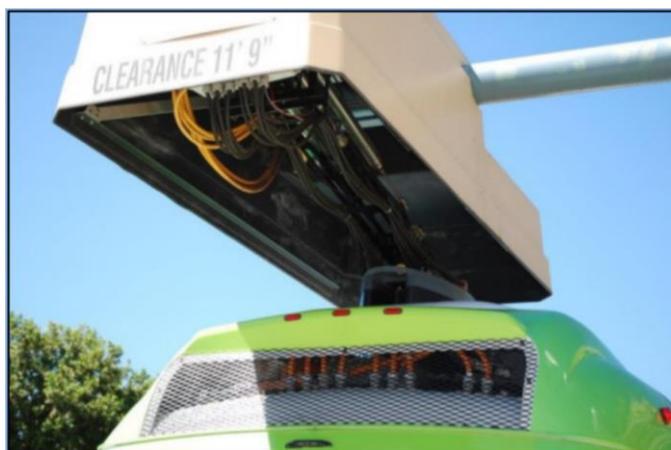


Figura 2.5. Cargador tipo pantógrafo, Foothill Transit, California.

- También se puede plantear la carga de oportunidad mediante cargadores inductivos, que recargan el vehículo de forma inalámbrica. Estos se pueden ver en la Figura 2.6: el vehículo se estaciona en la parada sobre una zona marcada en el suelo, y este se comunica con la unidad de control para comenzar la carga. Esta ocurre mediante un campo magnético formado entre dos bobinas (una en el cargador, otra en el vehículo). Su desventaja principal es el menor rendimiento, y una menor potencia, comparado con sus homólogos de carga conductiva [5] lo que, sumado a un mayor coste, tanto del propio cargador como de obra civil, lo desaconseja en este estudio.



Figura 2.6. Cargador inductivo, Antelope Valley Transit Authority, Los Angeles.

- Por último, se puede plantear una estrategia de reemplazo de baterías. Ya se han probado sistemas de este tipo en países como Corea del Sur con tiempos de reemplazo inferiores a 1 minuto [5], pero el carácter aún experimental de esta tecnología determina que no se considere en este trabajo.

2.3.2 Autobús eléctrico alimentado por pila de combustible (FCEB)

Existe poca información actualmente sobre vehículos eléctricos alimentados por una pila de combustible. No se conocen estrategias que permitan adaptar la arquitectura propulsiva a las características de la ruta, tales como la carga de oportunidad; pero un plan de operación podría ser el realizar un repostaje alrededor del mediodía, si los horarios de la ruta lo permiten, para comenzar el servicio de tarde con los tanques de combustible llenos.

2.4 Parámetros económicos

La segunda parte de este TFG implica un análisis económico del ciclo de vida de distintas flotas propuestas para una misma línea, en vistas de observar cuál sería más económica a largo plazo. De ahí que a continuación sea necesario exponer los conceptos económicos empleados en este trabajo.

Generalmente, al comprar un producto o servicio, siempre se paga un precio por este. Se podría pensar que este es el principal problema, y factor determinante, a la hora de adquirir una flota de vehículos de transporte, como es el caso que se expone en este trabajo. Esto podría ser válido si el producto no requiriera de mantenimiento alguno, ni consumiera energía, ni necesitase de recambios para piezas rotas o para su aplicación en otras funciones; es el caso de la adquisición de algunas herramientas manuales, decoraciones, y materiales básicos de construcción, por citar varios ejemplos, en los que no se debe mantener ni reparar estos. Este coste de adquisición es generalmente conocido como CAPEX (*CAPital EXpenses*).

Sin embargo, hay que tener en cuenta que, en muchas aplicaciones, los productos adquiridos tienen costes más allá del que hay que asumir en su compra, ya que un coste mayor a la hora de adquirir una flota puede verse recompensado por un menor gasto durante los años que se opere, el conocido como OPEX (*OPerating EXpenses*).

El tener en cuenta no solo los gastos de combustible, sino también los de mantenimiento y reemplazo de componentes, infraestructura, además del coste de adquisición inicial, es lo que forma el coste de ciclo de vida o "*Lifecycle cost*" [6]. En este trabajo, este parámetro se da como un valor único, en €/km.

Este valor puede incorporar el efecto de penalizaciones sobre las emisiones generadas por la flota. En este trabajo, se denominan como "costes sociales" ya que aún no existe un precio concreto (y que por ley deba abonarse) asociado a estas, con lo que solo se usa como un factor para equilibrar arquitecturas con un *lifecycle cost* más bajo pero más contaminantes, que otras con mayor *lifecycle cost* pero menores emisiones.

Otro factor a tener en cuenta es el valor residual. Generalmente, cuando una persona compra un vehículo, ya sea para su uso particular o para una empresa, suele usarlo hasta poder reemplazarlo, o este está demasiado viejo o deteriorado para cumplir su función. Una vez ocurre esto, el usuario se deshace de él sin obtener beneficio alguno (y muchas veces con un gasto adicional), pero, últimamente, el usuario u operador puede recuperar parte de la inversión realizada vendiendo partes del vehículo, como por ejemplo las baterías (para uso en almacenaje energético residencial) o el vehículo completo (para ser reutilizado en otros países con leyes medioambientales más laxas, o ser reciclado). Este beneficio adicional al final de la vida útil del vehículo es el valor residual.

En el caso de flotas de vehículos pesados destinados al transporte de pasajeros, su vida útil suele ser de 10-15 años, lo que aumenta su valor residual, ya que son vehículos considerablemente nuevos. A esto se añade la infraestructura remanente, si se ha optado por una arquitectura completamente eléctrica, ya sea de carga en cochera (sólo cargadores) o de carga de oportunidad/EOL (cargadores y/o pantógrafos u otros sistemas de carga rápida), o una arquitectura basada en pilas de combustible alimentadas por hidrógeno (hidrogeneras) que también tiene un valor considerable y puede ser empleada por la siguiente generación de la flota.

En definitiva, el parámetro "*Lifecycle cost*" permite al potencial operador juzgar los gastos en los que incurrirá durante toda la vida de su flota. Suele ocurrir, si se ha incorporado algún tipo de penalización por daños medioambientales, que la opción más económica (menor *lifecycle cost*) resulta en ahorros energéticos, de mantenimiento y reemplazos considerables, siendo globalmente la opción más respetuosa con el medio ambiente, una situación denominada como "*win-win*" tanto para el operador como para el planeta.

Esta definición de *lifecycle cost* no tiene en cuenta el efecto de la inflación; si se considera que el combustible se paga completamente en un período de tiempo corto tras la adquisición de los vehículos, el valor mostrado es una estimación correcta; sin embargo, en este trabajo se va a estudiar el coste de una flota durante varios años, en los que el efecto de la inflación va a ser notable, y el combustible, entre otros gastos, se pagará año a año.

Para tener en cuenta este factor a la hora de estudiar el coste total de la flota, se introduce el parámetro conocido como *Net Present Value* (NPV) [7]. Este parámetro permite ajustar los costes anuales según la evolución estimada de la inflación, a lo largo de la simulación, dando una cifra representativa, con el valor actual del Euro, del coste total de la flota.

El parámetro NPV se calcula en el modelo como se visualiza en la Ecuación 2.1.

$$NPV = (1 + DR)^{-i} \quad (2.1)$$

DR es la tasa de descuento, especificada por el usuario, mientras que i es el año de simulación actual, que depende de la longitud de esta. En este trabajo, se estudia el *lifecycle cost* de las flotas durante una vida útil estimada de 10 años, que determina la longitud de la simulación.

3 METODOLOGÍA

3.1 Software de simulación energética de vehículos: FASTSim

Para realizar las simulaciones de las distintas arquitecturas propulsivas sobre distintas rutas, se ha empleado el programa FASTSim (*Future Automotive Systems Technology Simulator*). Este programa ha sido desarrollado por el *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) organismo perteneciente al Departamento de Energía de Estados Unidos. Está disponible de forma gratuita y usa como base Microsoft Excel o el lenguaje de programación Python. Para este TFG, se ha decidido emplear FASTSim con base en Excel.

En concreto, FASTSim es una herramienta de simulación de vehículos de alto nivel de abstracción. No se consideran en detalle las características de cada uno de los elementos que conforman un vehículo (motor, transmisión, chasis...) lo que permite modelizar de forma rápida distintas configuraciones, logrando sin embargo un nivel de precisión aceptable, especialmente comparado a otros programas más complejos, fruto del extenso trabajo realizado por NREL sobre este simulador, que tiene sus bases en el programa ADVISOR desarrollado entre 1994 y 2004.

Una ventaja adicional de este programa es su transparencia, gracias a su licencia como software libre, lo que ha permitido introducirse en cómo funciona el programa en ciertos apartados tales como la estimación de costes, e incluso realizar réplicas funcionales de estos.

Esta facilidad de creación y estudio de modelos permite realizar múltiples análisis de manera sencilla y efectiva, lo que tomaría mucho más tiempo en programas más complejos: de ahí que su uso sea extendido tanto en departamentos de investigación académicos, como en estudios gubernamentales y en la propia industria [8] permitiendo estimar consumos energéticos y costes de operación de distintas arquitecturas propulsivas.

Por estas razones, FASTSim se perfila como un programa adecuado para el propósito principal de este TFG. Para ilustrar cómo se estudian los diferentes modelos, a continuación se mostrarán los distintos apartados que lo conforman.

3.1.1 Parámetros requeridos por FASTSim (*inputs*)

- *Drag coefficient*: expresado generalmente como C_D , es un parámetro adimensional que cuantifica la resistencia de un objeto a moverse en el seno de un fluido, en este caso el aire presente en la atmósfera. Este parámetro se suele encontrar alrededor de 0,65-0,7 para autobuses, lo que es de esperar siendo vehículos donde la aerodinámica es un factor subordinado a la capacidad de transporte de pasajeros. En este TFG se ha tomado como 0,65 para todos los modelos [9].
- *Frontal area (A)*: introducida en FASTSim como un valor en metros cuadrados, simplemente cuantifica el área del vehículo vista desde un plano perpendicular a la dirección del movimiento. En el caso particular de este trabajo, suelen resultar áreas de alrededor de 7 metros cuadrados.

Este parámetro, junto con *Drag coefficient*, permite calcular la resistencia aerodinámica del vehículo como una fuerza que se opone al movimiento por medio de la Ecuación 3.1:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot C_D \cdot A \quad (3.1)$$

Donde:

F_D es la fuerza que se resiste al movimiento del vehículo (*Drag force*).

ρ corresponde a la densidad del fluido por el cual se desplaza el vehículo.

v es la velocidad del vehículo sumergido en el fluido.

C_D es el *Drag coefficient*.

A corresponde al área frontal del vehículo.

- *Vehicle glider mass (kg)*: se trata de un parámetro de ajuste, ya que la suma de esta masa con las resultantes del motor, el depósito de combustible, el motor eléctrico, y la batería, además de la del conductor, debe resultar en la masa en orden de marcha especificada por el fabricante. Esta masa es definida como la del vehículo cargado con todos los fluidos necesarios para su operación, sumando a esta la masa del conductor, considerada de 75 kg. Es la que se esperaría medir en una tara empleada para la medición de este valor.

- *Vehicle center of gravity height (m)*: se refiere a la posición, en el eje perpendicular al plano formado por el suelo del vehículo, del centro de gravedad de este. Para vehículos de tracción trasera o total, debe indicarse con signo negativo, como es el caso de este trabajo, ya que es necesario para que FASTSim pueda hacer la distinción. Para estos casos, dado que se tratan de autobuses de suelo relativamente bajo en referencia a su altura, además de tener ubicados los elementos de masa considerable (motor, caja de cambios, baterías...) cerca del nivel del suelo, se toma un valor para este parámetro de 0,53 metros en todos los casos.
- *Drive axle weight fraction*: es un parámetro adimensional que cuantifica el reparto de la masa entre los ejes delantero y trasero del vehículo, con un valor entre 0 y 1, que aumenta a medida que el porcentaje de masa sobre el eje trasero asciende. Para los modelos desarrollados, se ha tomado un valor de 0,6, atendiendo a la distribución de un autobús convencional: conductor y sistemas de control del vehículo delante, pasajeros en el medio, y maquinaria de propulsión detrás.
- *Wheel base (m)*: este valor recoge la distancia entre ejes del vehículo en metros, y depende, en este caso, del modelo de autobús estudiado.

Esta solución para cuantificar la distancia entre ejes y la distribución de masas es válida para vehículos de 2 ejes, pero en autobuses de mayor tamaño (como es el caso de los de 14 y 18 metros de longitud) esta metodología no es inmediatamente aplicable, ya que suelen contar con 3 ejes o más. Para ello, se recurre al siguiente método:

1. Se toma la distancia entre el segundo y tercer eje, y se calcula la distancia media entre estas.
2. Esta distancia media se suma a la distancia entre el primer y segundo eje. El resultado de esta operación es un valor de longitud que mide la distancia desde el primer eje hasta un segundo eje hipotético, que es equivalente al segundo y tercer eje reales.
3. La distribución de masas se realiza normalmente, considerándola entre el primer eje y el supuesto segundo eje.

Este método permite extender el alcance del estudio, abarcando autobuses de mayor capacidad.

- *Cargo mass (kg)*: este parámetro agrega a la simulación los datos de masa de las personas que van en él; tanto el conductor como los pasajeros. Para este estudio, se ha tomado un valor de masa del conductor de 75 kg, según la definición de masa en orden de marcha, mientras que para los pasajeros se ha supuesto un valor medio de 68 kg, aportado por TITSA. En cuanto a su número, se han usado valores estadísticos de porcentaje de ocupación media, facilitados por TITSA, que multiplicados por la capacidad del autobús en

cuestión y redondeando al alza el resultado hasta obtener un número entero, resulta en la carga de pasajeros. Sumando esta a la masa del conductor, se obtiene el parámetro tratado aquí.

- *Fuel storage energy (kWh)*: recoge la energía total en el depósito, en kilovatios-hora, y es diferente para cada configuración:
 - Para vehículos convencionales, este valor se calcula como se muestra en la Ecuación 3.2, multiplicando la masa almacenada por el poder calorífico inferior del combustible empleado, en este caso diésel, que se toma como 42910 kJ/kg [10], y multiplicando por 1/3600 para pasar de segundos a horas, dejando el resultado en kWh.

$$\text{Fuel storage energy (kWh)} = m_{\text{Fuel}}(\text{kg}) \cdot \text{PCI (kJ/kg)} \cdot 1/3600 \quad (3.2)$$

- Para vehículos híbridos, se procede de la misma manera que para vehículos convencionales.
 - Para vehículos eléctricos, dado que carecen de un depósito de combustible al no estar propulsados por un motor de combustión interna, este factor es 0.
 - Para vehículos con pila de combustible, se multiplica la capacidad del depósito, en kg, por la energía que el hidrógeno es capaz de liberar en la pila: en este caso, se toma un valor de 33,6 kWh/kg H₂ [11].
- *Fuel converter power (kW)*: corresponde al valor de potencia máxima aportado por el motor de combustión interna, denominado en FASTSim como “*Fuel converter*” dado que transforma la energía química del combustible en energía mecánica. Este parámetro, introducido en kilovatios, se obtiene mediante la ficha técnica de cada modelo de vehículo, aportada por el fabricante.
 - *Fuel converter efficiency type*: es un indicador de la arquitectura propulsiva empleada. FASTSim recoge los siguientes tipos:
 - 1: denominada SI (*spark ignition*), se refiere a un motor de combustión interna alimentado por gasolina, que obedece al ciclo Otto.
 - 2: llamada *Atkinson*, se refiere a un motor de combustión interna que sigue el ciclo del mismo nombre, más eficiente que un ciclo Otto convencional.
 - 3: referida como *Diesel*, consiste en motor de combustión interna basado en este ciclo, alimentado por combustible diésel tanto derivado del petróleo como obtenido a partir de biomasa (biodiésel), o aceite vegetal hidrogenado (HVO).
 - 4: denominado *Fuel Cell*, se refiere a un vehículo eléctrico alimentado, de forma indirecta a través de una batería, por una pila de combustible que extrae la energía almacenada en el hidrógeno.
 - 5: llamado *Hybrid Diesel*, se refiere a un vehículo híbrido, que cuenta con un motor de combustión interna alternativo junto a un motor eléctrico, pudiendo propulsar al vehículo juntos o por separado (híbrido paralelo) o siendo el motor

eléctrico el que propulse al vehículo directamente, pero siendo alimentado, a través de una batería y un generador, por el motor de combustión interna.

Una vez se informa al programa de la arquitectura propulsiva estudiada, este establece una relación entre la potencia desarrollada por el motor y su rendimiento, basada en datos experimentales medidos en banco de ensayo, en los que se observa que las regiones de operación del motor entre cambios de marcha son muy limitadas, permitiendo estudiar el comportamiento del motor de forma simplificada. Los datos experimentales se aprecian en la Figura 3.1 como cruces azules, y la curva resultante empleada por FASTSim se muestra en negro.

Esta simplificación permite reducir el tiempo de cálculo necesario, obteniendo resultados aproximados para distintas configuraciones con potencias dispares [12].

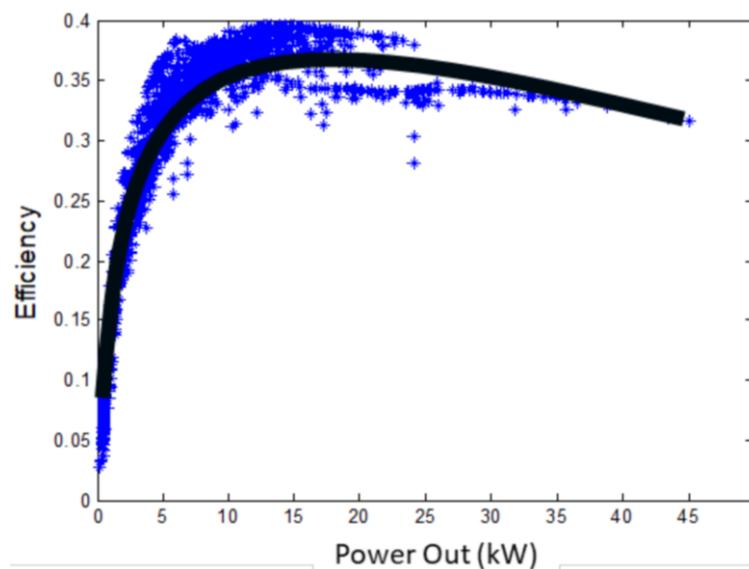


Figura 3.1. Curva de motor.

- *Efficiency improvement*: se trata de un parámetro de ajuste, expresado como porcentaje (%) que aumenta o reduce la eficiencia del motor de combustión interna en todos los puntos de operación. Esto se observa como un ascenso o descenso en la curva empleada por FASTSim para calcular el comportamiento del motor.
- *Motor power (kW)*: de forma análoga al caso del motor de combustión interna o *fuel converter*, este parámetro consiste en la potencia máxima entregada por el motor eléctrico, de importancia en vehículos eléctricos e híbridos. Este valor es aportado por el fabricante.

- *Motor peak efficiency*: registra la eficiencia energética del motor eléctrico, que suele ser elevada, por encima del 90% en todos los casos. Este parámetro se ha usado como factor de ajuste en los vehículos eléctricos y FCEB, variando desde un 92% a un 95% de acuerdo con la literatura pertinente.
- *Battery power (kW)*: expresa la potencia máxima, en kilovatios, que es capaz de aportar la batería de un vehículo eléctrico, híbrido o de célula de combustible. Debe ser capaz de proveer potencia a los equipos que se alimentan de ella.
- *Battery energy (kWh)*: da la energía almacenada en la batería en kilovatios-hora. Es otro valor que debe incorporarse a FASTSim según lo dado por el fabricante.
- *Battery mass (kg/kWh)*: relaciona la masa de la batería con la energía que es capaz de almacenar; expresado en kilogramos por kilovatio-hora, se toma el valor por defecto en FASTSim, que, según la tecnología de batería empleada, tiene un valor distinto. El valor es 8 kg/kWh para baterías de iones de litio (*Li-ion*), usadas para todos los modelos de este trabajo que requieran de baterías, o 44 kg/kWh para baterías de níquel-metal hidruro (NiMH) no estudiadas aquí, al tratarse de una tecnología inferior a la de iones de litio.
- *Battery round trip efficiency*: expresa la eficiencia de almacenamiento de la batería como un porcentaje. Este parámetro también se ha usado como un factor de ajuste, modificándolo desde 90% a 95% en la validación del modelo, mostrada más adelante.
- *Wheel inertia (one wheel) (kg·m²)*: corresponde a la inercia de una rueda, en kilogramos-metro cuadrado. Se calcula mediante la Ecuación 3.3, correspondiente a un cilindro macizo, que constituye la forma aproximada de la rueda.

$$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 \quad (3.3)$$

Para este caso, se considera un valor uniforme de 1 kg·m², aportado por TITSA, para todos los modelos. Esto sirve para cuantificar la resistencia de rodadura del vehículo.

- *Number of wheels*: consiste, sencillamente, en el número de ruedas del vehículo. En los casos estudiados se considera entre 4 y 6 ruedas, lo que corresponde a vehículos de 2 y 3 ejes, apropiados para modelar autobuses.
- *Rolling resistance coefficient*: es el coeficiente de resistencia a la rodadura, expresado como un parámetro adimensional. En todos los casos estudiados, se toma para este un valor de 0,008, aportado por TITSA.

- *Tire radius (m)*: expresa en metros el radio exterior del neumático, y por tanto, de la rueda, en metros. Para todos los casos estudiados, se toma un valor de 0,4655 m, suministrado por TITSA.
- *Wheel coefficient of friction*: expresa el coeficiente de rozamiento entre la rueda y la carretera. Se ha tomado un valor estándar de 0,7 para todos los casos, aportado por TITSA.
- *Auxiliary loads (kW)*: en este parámetro se cuantifica la potencia, en kilovatios, que es destinada a otros usos en el vehículo; por ejemplo, para el sistema de aire acondicionado, que es el mayor consumidor en este apartado. Para este parámetro, se toma un valor de 4 kW para todos los modelos estudiados, correspondiendo a una carga de climatización habitual para este tipo de vehículos.
- *Force auxiliary loads on fuel converter (true/false)*: este parámetro, especial dado que se da como un valor lógico (verdadero/falso) determina si la potencia requerida para sistemas auxiliares debe tomarse del motor o *fuel converter* (verdadero) o de la batería (falso). En todos los casos estudiados, se toma como falso, es decir, se toma de la batería, incluso en vehículos de propulsión convencional.
- *Transmission mass (kg)*: expresa la masa simulada de la transmisión. En estos modelos, se toma un valor de 114 kg: hay que tener en cuenta que este no es representativo del peso real del elemento, pero este queda cuantificado dentro del *glider mass* de todas maneras, al tener que ajustarse para que la masa en orden de marcha resultante esté acorde a las especificaciones.
- *Transmission efficiency*: expresado como un porcentaje, cuantifica la relación entre la energía aportada al sistema de transmisión y el realmente aportado a las ruedas; suele ser muy elevado al haber pocas y bien definidas pérdidas, en concreto el rozamiento de los elementos que la componen. Se toman los siguientes valores:
 - Un valor del 85 % para modelos de propulsión convencional, debido a su tecnología más simple (varias marchas en una transmisión automática).
 - Un valor del 95 % para modelos híbridos, atendiendo a su tecnología de transmisión de alta eficiencia.
 - Un valor del 98 % para modelos eléctricos y basados en pila de combustible alimentada por hidrógeno, debido a su transmisión simplificada (una sola marcha).

El resto de los parámetros se dejan con los valores aportados por defecto por FASTSim.

3.1.2 Valores resultado (*outputs*)

Una vez introducidos los parámetros relevantes para el modelo en cuestión, se ejecuta este, para lo cual hay dos modalidades:

- *Run*, donde simplemente se ejecuta el modelo en tres ciclos de conducción representativos de distintas situaciones, además de los que se quieran añadir, tales como el US06 de la Environmental Protection Agency (EPA) de Estados Unidos, además de permitir añadir ciclos personalizados.
- *Batch run*, que permite ejecutar varios ciclos personalizados de forma secuencial. Se ha optado por utilizar este ciclo para realizar la validación de los modelos, a través de datos aportados por TITSA.

En *Batch run*, las variables de salida más importantes para este trabajo son las siguientes:

- *Fuel economy (MPGGE)*: aporta el consumo del modelo en cada ruta analizada, en millas por galón equivalente de gasolina. Este valor es empleado para configuraciones convencional e híbrida; al tratarse de un valor referido al contenido energético de un galón de gasolina, debe pasarse a millas por galón equivalente de diésel, mediante un factor de conversión [13] para luego pasarlo a litros por kilómetro. Para vehículos de pila de combustible, su autonomía también se muestra en esta unidad. En ese caso, se emplea otro factor de conversión distinto [14]. Véase el Anexo I para más detalles sobre estas conversiones.
- *Electric consumption (kWh/mile)* y *Battery consumption (kWh/mile)* muestran el consumo del modelo en kilovatios-hora por milla recorrida, que debe convertirse a kilovatios-hora por kilómetro recorrido para su posterior uso. Ambos parámetros son idénticos para las arquitecturas propulsivas estudiadas en este trabajo.
- *Mass (kg)*: muestra la masa del vehículo analizado en operación, con el peso de pasajeros y otras cargas añadido. Es igual para todas las rutas.

3.1.3 Validación de arquitecturas propulsivas estudiadas

Los modelos han sido calibrados con datos aportados por TITSA a fin de obtener unos valores de precisión aceptables para el estudio realizado en este TFG. Se dispone de datos para vehículos de 12, 14 y 18 m, principalmente para modelos diésel, ya que estos son los más extendidos en las flotas de la compañía. Estos datos se obtienen durante un tiempo considerable de operación en cada línea estudiada.

Los datos de consumo aportados se pueden ver en la Tabla 3.1.

Tabla 3.1. Datos de consumo aportados por TITSA.

Modelo de vehículo	Línea	Consumo
2200 12,4 m (HEV)	122	0,35 l/km
Electric MAN 12,2 m (EV)	905	1,26 kWh/km
Electric MAN 12,2 m (EV)	232	1,32 kWh/km
2001 14,7 m (Diesel)	020	0,471 l/km
2310 18,7 m (Diesel)	467	0,617 l/km
Electric MAN 18 m (EV)	467	1,3 kWh/km

Estos valores se comparan con los resultados mediante el error relativo entre los consumos, tomando como referencia el medido experimentalmente, mediante la Ecuación 3.4:

$$Error\ relativo\ (\%) = \frac{|Consumo\ modelado - Consumo\ experimental|}{Consumo\ experimental} \cdot 100 \quad (3.4)$$

Se considera que el modelo es representativo del vehículo real si su error relativo de consumo es inferior al 10%. Generalmente esto no se da en el primer intento, por lo que se debe ajustar el modelo mediante los parámetros *Efficiency improvement*, *Motor peak efficiency* y *Battery round trip efficiency* (estos dos últimos en vehículos eléctricos) hasta lograr que el error relativo sea del 10% o inferior.

Para modelos híbridos de 14 y 18 m, además del modelo eléctrico de 14 m y todos los vehículos de pila de combustible, dado que se basan en modelos que TITSA no posee actualmente, o son modelos modificados a partir de otros existentes, se carece de datos de validación. Para comprobar que el modelo reproduce a grandes rasgos el comportamiento de estas arquitecturas, se recurre a datos mostrados por la bibliografía, que dan un rango de consumos aproximado. También se comparan consumos entre las arquitecturas ya validadas y las estudiadas que carezcan de datos de validación, para comprobar que siguen una tendencia lógica. En estos últimos casos, se considera que el modelo está *verificado*, no validado, y su precisión es inferior a la de estos.

3.2 Desarrollo de herramienta para el análisis económico

Para la segunda parte del TFG, orientada al estudio del *Lifecycle cost*, se necesitaba un código capaz de tomar los inputs económicos conocidos y traducirlos a una estimación de los costes a lo largo de un período de tiempo concreto. Se podría haber realizado a mano, pero hubiera sido un proceso lento, engorroso y con un resultado final probablemente lleno de errores.

Por ello, se decidió realizar este análisis mediante el uso de un ordenador, pero esta solución genera otro problema; existen en el mercado pocas aplicaciones capaces de realizar tal estudio, ya que los casos disponibles en la bibliografía emplean herramientas programadas específicamente para estudiar casos concretos de una ciudad, ruta o arquitectura propulsiva, y eran propiedad del investigador o de un equipo de trabajo. Es por esta razón que se optó por desarrollar, por cuenta propia, una herramienta de análisis económico orientada a la obtención del *lifecycle cost* de flotas de vehículos lo suficientemente flexible como para analizar las distintas arquitecturas propulsivas, rutas y tamaño de flotas.

Los objetivos iniciales planteados para el programa fueron los siguientes:

- Sencillez de uso. Para ello, se desarrolló la herramienta empleando como plataforma Microsoft Excel, un programa con una curva de aprendizaje inicial muy reducida, permitiendo a cualquier persona con un mínimo de conocimiento en el programa emplear el modelo. La interfaz principal del modelo económico permite introducir los parámetros requeridos y obtener los resultados sin tener que cambiar de hoja, permitiendo obtener resultados de forma sencilla y rápida.
- Empleo de un modelo económico realista. Esta herramienta se basa en las fórmulas mostradas en artículos especializados [7] con modificaciones surgidas de la necesidad de incorporar situaciones y circunstancias no contempladas en el artículo citado. El resultado es un modelo económico flexible y adaptable, capaz de estudiar cuatro tipos distintos de arquitecturas propulsivas y sus infraestructuras asociadas con sus costes de operación, mantenimiento y reemplazos hasta una duración de estudio de 40 años.
- Portabilidad y ligereza. La herramienta desarrollada, almacenada en su fichero correspondiente de Excel (.xlsx) tiene un tamaño inferior a 1 MB, permitiendo su fácil transporte en memorias USB, tarjetas de memoria o dispositivos móviles, además de tener la ventaja de poder ser ejecutado en programas compatibles con Microsoft Excel tales como Apple Numbers o LibreOffice Calc, esta última de código abierto (*open source*) lo que permite a su vez la ejecución del programa en sistemas operativos distintos de Windows, tales como Linux, en cualquiera de sus distribuciones más comunes (Ubuntu, Mint, Fedora, openSUSE, elementary)

Con estos objetivos en mente, se inició el desarrollo de la herramienta. A continuación, en los apartados 3.2.1 y 3.2.2, se desglosan las distintas partes del modelo económico, y se mostrará cómo funciona cada una de ellas y su interacción entre sí.

3.2.1 Modelo matemático

El modelo matemático, basado en el actual estado del arte [7] [15] tiene en cuenta los siguientes costes principales:

- Costes de adquisición de la flota ($C_{vehicles}$): consiste, sencillamente, en los gastos en los que debe incurrir la empresa de transporte para comprar los vehículos que desea.
- Costes energéticos C_{energy} : este parámetro recoge los gastos en combustible, electricidad e hidrógeno necesarios para la operación de la flota.
- Costes de personal (conductor) C_{driver} : es simplemente el salario del conductor, que se considera constante a lo largo de la simulación. Al no haber diferencia en cuanto a la formación de un conductor de un vehículo con una arquitectura propulsiva concreta de otro que conduzca una configuración diferente, este parámetro no se contempla en las simulaciones realizadas para este trabajo, aunque se incorpora por si algún usuario desea contemplarlo.
- Mantenimiento de baterías $C_{batt-maint}$: el gasto, durante la vida del vehículo, en baterías nuevas para reemplazar las deterioradas. El coste se añade al programa en el año en el que se necesita el cambio, especificado como un reemplazo programado: realizado cada cierto número de años, o alternativamente cada vez que se supera un porcentaje de desgaste crítico. Ambas opciones son válidas; la selección de una u otra depende del criterio del usuario o de los datos de los cuales pueda disponer.
- Mantenimiento general de la flota $C_{gen-maint}$: los costes en los que la empresa debe incurrir para mantener sus vehículos en buenas condiciones. Puede darse como un coste fijo en €/km o como un porcentaje sobre el coste de adquisición de cada vehículo.
- Mantenimiento de pilas de combustible $C_{FC-maint}$: al igual que el mantenimiento de baterías, este parámetro, solo empleado en vehículos basados en una pila de combustible alimentada por hidrógeno, recoge los gastos en nuevas pilas: el gasto se suma al total del año en el cual ocurre. El reemplazo se especifica como realizado cada cierto número de años o cuando

se supera un porcentaje de desgaste concreto, ambos introducidos por el usuario, según que opción prefiera este.

- Costes de adquisición de infraestructura de carga $C_{chargers}$: se pueden introducir tres tipos de infraestructura de carga; cargadores convencionales, apropiados para estrategias de carga en cochera o “*depot charging*”, cargadores de tipo pantógrafo, generalmente de alta potencia, orientados a la estrategia de carga a final de línea o “*EOL charging*”, y por último, hidrogeneras, aunque no sean un cargador en el sentido estricto de la palabra.
- Costes de mantenimiento de infraestructura de carga $C_{chargers-maint}$: incorpora al modelo el gasto en mantener los cargadores en buenas condiciones.

El coste anual se proyecta como se muestra en la Ecuación 3.5:

$$C_A = C_{energy} + C_{driver} + C_{batt-maint} + C_{gen-maint} + C_{FC-maint} + C_{chargers-maint} \quad (3.5)$$

El coste total se calcula como se puede ver en la Ecuación 3.6:

$$C_T = C_{vehicles} + C_{chargers} + \sum_{i=1}^n C_{A_i} \quad (3.6)$$

Siendo n el número de años de la simulación.

Cada coste se subdivide en distintos elementos que se muestran a continuación.

- $C_{vehicles}$: el modelo económico permite estudiar el coste del vehículo de dos maneras distintas. El usuario puede elegir entre dar un coste total del vehículo (sin impuestos, que el modelo aplica luego) o puede obtener un precio total para este como la suma de los precios de los distintos componentes que lo forman. Estos componentes son:
 - Coste de motor de combustión interna: especificado como €/kW, indica el valor de la motorización de una configuración convencional o híbrida en referencia a su potencia.
Este factor se multiplica por la potencia del motor de combustión interna, en kW, para obtener el coste de la motorización por cada vehículo.
 - Coste de motor eléctrico: también establecido como €/kW, recoge el precio de la motorización de una configuración híbrida, eléctrica o de pila de combustible alimentada por hidrógeno. Este factor también se multiplica en el modelo por la potencia del motor eléctrico montado en el vehículo, que debe introducirse en el modelo para el análisis de este tipo de configuraciones.

- Coste de pila de combustible; este parámetro, exclusivo para modelos propulsados por hidrógeno, recoge el coste de una unidad de pila de combustible para el vehículo en concreto, en €/kW. Este parámetro se multiplica por su potencia correspondiente para obtener el coste de la unidad incorporada en cada vehículo.
- Coste de batería y electrónica: recoge el coste de la batería y electrónica asociada, en vehículos híbridos, eléctricos y de pila de combustible, en €/kWh. Este parámetro se multiplica por la energía almacenable en la batería de cada vehículo, obteniéndose el precio de la batería por cada vehículo.
- Coste de depósito de combustible: por mantener un grado de similitud con FASTSim, se añade este coste, que a primera vista puede parecer trivial; multiplicado por la capacidad de almacenaje energético del tanque de combustible (especificada como kWh, al igual que FASTSim, lo que requiere un cálculo previo por medio del poder calorífico inferior del combustible empleado y su densidad por parte del usuario, ya que esta capacidad suele especificarse en litros) resulta en un coste de fabricación del tanque de combustible de cada vehículo.
En vehículos de hidrógeno, considerando la necesidad de depósitos capaces de soportar la gran presión necesaria, este precio se considera mucho mayor, lo que justifica el estudio de este parámetro concreto: en modelos económicos de estos vehículos, se modifica este valor, que se multiplica por la energía almacenable en estos para dar el coste por vehículo.
- Coste de chasis: especifica el coste de adquisición de la estructura del vehículo, en €/kg. Si se multiplica por la masa del chasis (tomada como el parámetro *Glider mass*) en kg, se obtiene el precio del chasis de cada vehículo.
- Otros costes (€/unidad): añadido como un factor de ajuste, suma la cantidad que el usuario especifique al coste total de cada vehículo antes de sumar los impuestos pertinentes; permite así ajustar los precios resultantes a los estimados si la suma de los costes previos no da un valor congruente con lo especificado, debido a diversas razones (extras adicionales, margen de beneficio, seguros y servicios adicionales contratados con la compra de cada vehículo). También sirve como una manera de incorporar flexibilidad al modelo, permitiendo al usuario añadir costes no contemplados en la estructura planteada.
- Impuestos aplicables sobre el precio de compra: como se especifica en la literatura disponible [16] se toma únicamente el IGIC (7,00%) como impuesto sobre el valor total del vehículo.

Este método de cálculo del coste del vehículo es más laborioso que la alternativa de dar directamente el precio del vehículo, requiriendo múltiples datos para dar un coste de este. La ventaja que tiene este camino es su utilidad a la hora de realizar estudios paramétricos, variando un factor (como la capacidad de batería) y observando su

efecto en el precio final del vehículo. Esto permite estudiar el *lifecycle cost* de configuraciones modificadas, como se mostrará más adelante en este TFG.

Si se opta por obtener el precio de un vehículo según sus componentes, el modelo calcula el coste de adquisición de estos como se ve en la Ecuación 3.7:

$$C_{vehicles} = (c_{ICE} \cdot P_{ICE} + c_{EM} \cdot P_{EM} + c_{FC} \cdot P_{FC} + c_{batt} \cdot E_{batt} + c_{FS} \cdot E_{FS} + c_{chassis} \cdot m_{chassis} + c_{other}) \cdot (1 + Tax) \cdot n_{vehicles} \quad (3.7)$$

Si, al contrario, se opta por dar un precio total del vehículo, el modelo calcula el coste de la adquisición de la flota como se muestra en la Ecuación 3.8:

$$C_{vehicles} = C_{vehicle-pretax} \cdot (1 + Tax) \cdot n_{vehicles} \quad (3.8)$$

- C_{energy} : recoge los costes de operación de la flota relacionados con la energía necesaria para la propulsión de los vehículos. Distingue tres fuentes de energía: combustibles fósiles, electricidad e hidrógeno. Dependiendo de las preferencias indicadas en la hoja principal, el modelo puede trabajar con distintas propuestas.
 - Costes combustible: se refiere al coste de adquisición de combustible fósil (en concreto para este análisis, diésel). El modelo provee distintas maneras de considerarlo: propone 3 casos con datos incorporados, basados en los datos disponibles recogidos en Tenerife [17]; peor caso estimado (precio máximo durante 2022) mejor caso estimado (precio el 16/09/2019) y precio representativo para 2023 (precio el 04/02/2023). Además, el usuario puede introducir el precio que desee, si selecciona “Precio personalizado” y lo introduce en el submenú correspondiente. Por último, si el modelo a realizar no tiene un motor de combustión interna, se selecciona “No considerado”.
 - Costes electricidad: recoge el gasto en euros por cada kilovatio-hora consumido. Como en el caso de combustibles fósiles, el modelo provee al usuario 3 situaciones de precio distintas, provenientes de los datos disponibles para Tenerife [18] subdivididas según criterio de carga (en cochera o “*depot*” frente a carga a final de línea (*EOL*) con la diferencia entre estas siendo que el precio de cochera se toma como el mínimo nocturno en cada fecha, mientras que el precio de carga *EOL* es el registrado a las 13:00 h de ese mismo día). Las opciones propuestas son las siguientes: peor caso estimado (precio máximo durante 2022), mejor caso estimado (precio el 16/09/2019) y precio representativo para 2023 (precio el 04/02/2023). Como en el caso anterior, el usuario puede introducir un precio personalizado, si así lo desea, o ignorar estos costes si el modelo así lo requiere.
Cobra especial atención la eficiencia del cargador, ya que una pequeña parte de la energía suministrada a nivel de contador es perdida en este y no es suministrada a los vehículos. Por lo tanto, y dado que se paga por el

consumo medido por el contador, se introduce la eficiencia del cargador $\eta_{charger}$ para obtener el consumo a nivel de contador.

Por último, hay que tener en cuenta que no solo se paga por el consumo de energía eléctrica, sino también por la potencia contratada: este factor aplica sobre los cargadores, que demandan una potencia según su tipología (carga lenta, carga rápida). Este coste por kW contratado, que se paga mensualmente, debe ser introducido por el usuario en el apartado “Costes consumibles personalizados”, al igual que la potencia de los cargadores que considere, en el apartado “Infraestructura” para que el modelo pueda tenerlos en cuenta.

- Costes hidrógeno: al igual que los casos anteriores, el modelo permite escoger 3 propuestas almacenadas en el modelo (mejor y peor caso, además de un precio representativo para 2023) sumado a un precio personalizado propuesto por el usuario y una opción para ignorar su cálculo si el modelo estudiado no lo dicta así.

Lamentablemente, se carece de datos sobre los costes de suministro de hidrógeno en la Comunidad Autónoma de Canarias, donde esta tecnología tiene aún que dar sus primeros pasos. De todas formas, en aras de una futura disponibilidad de datos, se ha integrado el cálculo del coste del hidrógeno de la misma forma que para los otros dos consumibles mostrados previamente.

Cada uno de estos parámetros se multiplica por el consumo correspondiente de cada configuración y por la distancia recorrida por cada vehículo, para obtener el coste energético de cada vehículo. Este coste anual se multiplica por el parámetro NPV para ajustar el precio al valor actual del Euro.

Matemáticamente, el modelo lo calcularía como se muestra en la Ecuación 3.9:

$$C_{energy} = (c_{fuel} \cdot f_{conv-HEV} + c_{electricity} \cdot \frac{f_{electricity}}{\eta_{charger}} + c_{H_2} \cdot f_{H_2}) \cdot D_{annual} \cdot n_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} + \left(12 \cdot c_{Power} \cdot \sum P_{chargers}\right) \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.9)$$

- C_{driver} : recoge los costes de los conductores encargados de pilotar cada vehículo. Generalmente, dado que no hay diferencia en cuanto a la formación de cada conductor según qué arquitectura propulsiva tenga su vehículo, salvo posibles cursos especializados de actuación en caso de accidente, este parámetro se ignora en la mayoría de los estudios consultados. Este modelo permite estudiarlo o no, a voluntad del usuario. Simplificando el estudio considerando que el salario se mantiene fijo durante la simulación económica, el coste de los conductores se cuantifica, para un año concreto, como se ve en la Ecuación 3.10:

$$C_{driver} = 12 \cdot Salary \cdot n_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.10)$$

El factor NPV se introduce aquí para ajustar el salario a la inflación a la vez que progresan los años durante la simulación.

- $C_{batt-maint}$: recoge los costes anuales de mantenimiento de baterías. Al contrario que otros casos tratados en este apartado, no es un coste añadido año tras año, sino que ocurre solamente cuando la condición especificada por el usuario para que el reemplazo de batería se cumple. El usuario tiene dos opciones principales:
 - Las baterías se reemplazan cada cierto número de años, especificado por el usuario. En este caso, una columna destinada a este fin actúa como *flag*, adquiriendo el valor 1 solamente cuando se llega al año en el cual la batería debe cambiarse. En ese año, se suma el coste de una nueva batería por cada vehículo, que puede costar más, lo mismo o igual que la adquirida al comprar este, ya que el precio de los reemplazos, en €/kWh, puede especificarse independientemente del introducido para la adquisición del vehículo.
 - El deterioro de la batería supera un porcentaje crítico. En ese caso, la batería se cambia una vez se pasa de un valor en tanto por ciento introducido por el usuario, que también debe introducir la vida útil de la batería en km; ese porcentaje se calcula año tras año para los vehículos estudiados como se ve en la Ecuación 3.11:

$$WR_{batt} (\%) = \frac{\text{Distancia recorrida acumulada (km)}}{\text{Vida útil (km)}} \cdot 100 \quad (3.11)$$

El porcentaje se compara con el introducido como crítico cada año, hasta que se cumple la condición mostrada en la fórmula 3.12:

$$WR_{batt} \geq WR_{batt-crit} \quad (3.12)$$

En el año en el que se cumple la condición, se introduce el gasto en baterías de reemplazo.

En definitiva, el gasto en baterías, independientemente del método empleado para determinar en que año debe realizarse, se calcula de la manera vista en la Ecuación 3.13, multiplicando por el parámetro NPV para ajustar el precio:

$$C_{batt-maint} = c_{batt-maint} \cdot E_{batt} \cdot n_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.13)$$

- $C_{gen-maint}$: este parámetro recoge el coste anual de mantenimiento general de cada vehículo. El modelo, al igual que en el mantenimiento de baterías, permite añadir este coste al estudio de dos maneras distintas:
 - Como un coste fijo en €/km recorrido por cada vehículo: el coste es introducido por el usuario y multiplicado por la distancia recorrida anualmente y el número de vehículos que conforman la flota, para obtener un coste anual de mantenimiento general. Como en casos previos, se introduce el factor NPV para tener en cuenta la inflación. Este procedimiento se muestra en la Ecuación 3.14.

$$C_{gen-maint} = c_{maint} \cdot D_{annual} \cdot n_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.14)$$

- Como un porcentaje (a) sobre el precio de adquisición total de cada vehículo, que debe ser especificado por el usuario, multiplicando también por el factor NPV. Este procedimiento se muestra en la Ecuación 3.15.

$$C_{gen-maint} = a \cdot C_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.15)$$

La selección entre uno u otro es realizada a través de la hoja principal del modelo económico, y dependerá de los datos disponibles para el usuario.

- $C_{FC-maint}$: es el coste del reemplazo de las pilas de combustible, que puede introducirse, de manera idéntica al reemplazo de baterías, de dos maneras distintas por parte del usuario. Al igual que este caso, el coste no es calculado todos los años, solo en algunos concretos, dependiendo de la longitud de la simulación.
 - La pila de combustible del vehículo se cambia cada cierto número de años, especificado por el usuario. Al igual que en el cálculo de costes de reemplazo de baterías, se introduce una columna que actúa como *flag*, determinando en qué año de la simulación se deben cambiar las pilas de combustible de la flota. Al adquirir el valor "1" se introduce el coste del reemplazo de cada pila de combustible, que debe introducirse como un valor fijo, en euros, en el submenú "Coste reemplazo pila de combustible" multiplicado por el número de vehículos y el factor NPV.
 - El deterioro de la pila de combustible supera un porcentaje crítico. En este caso, el usuario introduce un valor crítico, que se compara al calculado, de forma idéntica al desgaste de batería, como se muestra en la Ecuación 3.16:

$$WR_{FC} (\%) = \frac{\text{Distancia recorrida acumulada (km)}}{\text{Vida útil (km)}} \cdot 100 \quad (3.16)$$

La vida útil de la pila de combustible, en km, también debe ser aportada por el usuario para poder seguir este método. Si supera el porcentaje crítico, como se muestra en la fórmula 3.17:

$$WR_{FC} \geq WR_{FC-crit} \quad (3.17)$$

Se cumple la condición impuesta, y se añade el coste de reemplazo de las pilas de combustible en la flota, de igual forma que con el primer método: se introduce el coste unitario de cada pila de combustible multiplicado por el número de vehículos y el factor NPV, como se ve en la Ecuación 3.18.

$$C_{FC-maint} = C_{1FC-maint} \cdot n_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.18)$$

- $C_{chargers}$: recoge el coste de adquisición de los cargadores e hidrogenas considerados en el estudio. Se distingue entre tres tipos de infraestructura.
 - Cargadores de cochera o “depot”: para ellos, se da un coste total de adquisición.
 - Cargadores tipo pantógrafo: para estos, se da un valor unitario que luego se multiplica por el número de pantógrafos deseados, y se puede dividir por el factor denominado “Vehículos de otras rutas que comparten pantógrafo” (b) para permitir la reducción de coste total si otros vehículos también utilizan esta infraestructura; si se carece de información, se deja como 1.
 - Hidrogenas: se da un valor unitario de hidrogena, que se multiplica por el número de estas a implantar, y se divide entre el parámetro llamado “Vehículos de otras rutas que comparten hidrogena” (c) que, al igual que el caso anterior, permite reducir el coste total de la instalación al compartirlo entre más vehículos; si no se va a estudiar de esta forma, o se desconoce si se puede compartir la infraestructura, se deja como 1.

$C_{chargers}$ es la suma de estos tres costes, más los costes adicionales en los que se pudiera incurrir durante la instalación (conexión a red eléctrica, obra civil). El resultado no se multiplica por el factor NPV, al realizarse al inicio de la simulación, no cada año, de forma similar al coste de adquisición $C_{vehicles}$. El procedimiento de cálculo es visible en la Ecuación 3.19.

$$C_{chargers} = C_{depot-chargers} + \frac{C_{pantograph} \cdot n_{pantograph}}{b} + \frac{C_{H_2-station} \cdot n_{H_2-station}}{c} + C_{additional} \quad (3.19)$$

- $C_{chargers-maint}$: cuantifica el coste de mantenimiento de la infraestructura de carga; como en situaciones anteriores, el modelo puede trabajar con dos tipos de cuantificación económica.
- Coste fijo en €/kWh suministrado a los vehículos. El modelo da un valor de la energía suministrada anualmente en kilovatios-hora a la flota, y lo multiplica por el coste en €/kWh, que debe ser aportado por el usuario. Esto da el coste anual de mantenimiento, que como en casos anteriores es multiplicado por el factor NPV. El cálculo realizado se muestra en la Ecuación 3.20.

$$C_{chargers-maint} = c_{chargers-maint} \cdot f_{electricity} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.20)$$

- Coste como porcentaje sobre el coste de adquisición de la infraestructura de carga: el usuario provee un porcentaje sobre el precio de los cargadores de cochera, pantógrafos o hidrogenas estudiados, que es aportado anualmente como costes de mantenimiento. El coste adicional debido a la instalación ($C_{additional}$) no se considera para obtener este valor. Para el análisis posterior, se sigue este método; de igual forma, se requiere multiplicar el resultado por el factor NPV. Este método se puede visualizar en la Ecuación 3.21.

$$C_{chargers-maint} = g \cdot \left(C_{depot-chargers} + \frac{C_{pantograph} \cdot n_{pantograph}}{b} + \frac{C_{H_2-station} \cdot n_{H_2-station}}{c} \right) \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.21)$$

Para obtener los distintos parámetros económicos que el modelo aporta como resultado, se opera de la siguiente manera.

- Coste adquisición para 1 vehículo (sin impuestos) cuyo procedimiento de cálculo es apreciable en la Ecuación 3.22.

$$C_{vehicle-pretax} = (C_{ICE} \cdot P_{ICE} + c_{EM} \cdot P_{EM} + c_{FC} \cdot P_{FC} + c_{batt} \cdot E_{batt} + c_{FS} \cdot E_{FS} + c_{chassis} \cdot m_{chassis} + c_{other}) \quad (3.22)$$

Alternativamente, se da como un valor conocido.

- Coste adquisición para 1 vehículo (con impuestos) que se calcula como se ve en la Ecuación 3.23.

$$C_{vehicle} = C_{vehicle-pretax} \cdot (1 + Tax) \quad (3.23)$$

- Costes de adquisición, calculados como se ve en la Ecuación 3.24.

$$C_{acquisition} = C_{vehicles} + C_{chargers} \quad (3.24)$$

- Costes de operación, que se hallan según la Ecuación 3.25.

$$C_{operation} = \sum_{i=1}^n C_{energy} + C_{driver} + C_{batt-maint} + C_{gen-maint} + C_{FC-maint} + C_{chargers-maint} \quad (3.25)$$

- Costes totales, obtenidos mediante la Ecuación 3.26.

$$C_T = C_{vehicles} + C_{chargers} + \sum_{i=1}^n C_{A_i} \quad (3.26)$$

- Costes totales por vehículo, calculados según la Ecuación 3.27.

$$C_{T \text{ per vehicle}} = \frac{C_{vehicles} + C_{chargers} + \sum_{i=1}^n C_{A_i}}{n_{vehicles}} \quad (3.27)$$

- *Lifecycle cost*, calculado como se muestra en la Ecuación 3.28.

$$Lifecycle \text{ cost} = \frac{C_{vehicles} + C_{chargers} + \sum_{i=1}^n C_{A_i}}{n_{vehicles} \cdot D_{annual} \cdot i_t} \quad (3.28)$$

- Valor residual

Para vehículos, se calcula como se ve en la Ecuación 3.29.

$$C_{residual-vehicles} = d \cdot C_{vehicles} \cdot (1 + DR)^{-i_f} \quad (3.29)$$

(Nota: en este caso i_f toma el valor del año final de la simulación, pues es el año al final del cual se venden los vehículos)

Para baterías, se halla según la Ecuación 3.30:

$$C_{residual-batt} = e \cdot C_{batt-maint} \cdot (1 + DR)^{-i_f} + \sum e \cdot C_{batt-maint} \cdot (1 + DR)^{-i} \quad (3.30)$$

Al igual que en el caso anterior, i_f es el año final de simulación. Los precios de venta se calculan, durante la simulación, multiplicados no sólo por el porcentaje sobre el precio de adquisición introducido por el usuario (e) sino también por el valor del parámetro NPV en el año en el que se reemplaza la batería por una nueva. Al final del estudio, el modelo considera que la batería con la que contaba el vehículo en ese momento se vende por separado, de ahí el término fuera del sumatorio.

- *Lifecycle cost + valor residual*, calculado según la Ecuación 3.31.

$$Lifecycle\ cost +\ valor\ residual = Lifecycle\ cost - C_{residual-vehicles} - C_{residual-batt} \quad (3.31)$$

Hasta este punto, no se han empleado los resultados del análisis medioambiental. Para el último resultado económico (*Lifecycle cost + valor residual + costes sociales*) se necesita averiguar la penalización económica debida a las emisiones de CO₂.

- Análisis medioambiental

El modelo económico distingue entre dos tipos de emisiones: directas, causadas por las configuraciones convencional e híbrida, debida a sus motores de combustión interna; e indirectas, causadas por los métodos empleados para la generación de energía eléctrica en el lugar estudiado.

En el caso de las configuraciones con un motor de combustión interna, durante la simulación, el modelo obtiene el gasto de combustible de la flota estudiada durante todos los años de operación, siendo este un parámetro que da directamente como resultado adicional.

Este parámetro se multiplica por las emisiones WTT (“del pozo al tanque”, *well-to-tank*) y TTW (“del tanque a las ruedas”, *tank-to-wheels*) introducidas por el usuario, en las unidades adecuadas, para dar como resultado las emisiones de CO₂ del vehículo. Estas emisiones se dan como un resultado final adicional en toneladas métricas.

Para las configuraciones completamente eléctricas, se sigue un método similar. El modelo recopila todos los kilovatios-hora consumidos por toda la flota de vehículos a lo largo de la simulación. A continuación, divide estos entre los rendimientos de los cargadores y la red eléctrica para obtener los kWh generados en la central eléctrica. Una vez obtenidos, se multiplican por el valor de intensidad de carbono de la red, que debe ser aportado por el usuario, para obtener los gramos de CO₂ emitidos para generar esta energía. Estos gramos de CO₂ se pueden pasar a unidades más manejables (en concreto, toneladas

métricas) para mostrarlos como resultado final y emplearlos en el análisis de costes sociales.

Estos costes sociales se pueden calcular a través de un factor que relacione coste y emisiones; como en casos anteriores, el modelo permite dos formas de estudiarlo.

- Propuestas incorporadas: el modelo permite realizar 3 estimaciones de costes sociales, basados en los datos de artículos especializados [19]; mínima, media y máxima. La estimación mínima da un coste de 7 € por cada tonelada de CO₂ emitida, la media, un coste de 25 € por tonelada; y la máxima, 45 € por tonelada.
- Propuesta personalizada: el usuario puede proponer un coste social (en €/tonelada métrica de CO₂ emitida) si desea que este factor tenga mayor o menor prominencia que en los casos supuestos, o no considerarlo en absoluto (dando un valor de 0€/tonelada)

Los costes sociales se calculan como se muestra en la Ecuación 3.32:

$$C_{social} = \left[\frac{V_{fuel-total}(l) \cdot \left(2,62 \frac{gCO_2}{l} (TTW) + 55,8 \frac{gCO_2}{MWh} \cdot \frac{35900 \frac{kJ}{l}}{3600 \cdot 1000} (WTT) \right)}{n_{vehicles} \cdot D_{annual} \cdot i_t} + \frac{\left(\frac{f_{electricity}}{\eta_{charger} \cdot \eta_{grid}} \right) \cdot CIPK}{n_{vehicles} \cdot D_{annual} \cdot i_t} \right] \cdot C_{CO_2-emissions} \quad (3.32)$$

Esto da un valor en €/km que se resta al *lifecycle cost* (incluyendo valor residual) obtenido previamente, si el usuario así lo dispone, para obtener el parámetro “*Lifecycle cost + valor residual + costes sociales*” siendo el último factor económico principal arrojado por el modelo.

El modelo económico recoge resultados extra necesarios para ciertas partes de la simulación, como el consumo y las emisiones de CO₂, y otros factores juzgados de interés para el usuario de este programa. La lista completa de estos parámetros, de los cuales algunos se han mencionado previamente, es la siguiente:

- Consumo de combustible diésel (l): recoge el gasto de combustible, en litros, de toda la flota durante todos los años de duración de la simulación. Es empleado por el análisis medioambiental para determinar las emisiones de CO₂.
- Consumo de electricidad (kWh): este parámetro es la suma del consumo energético de toda la flota estudiada a lo largo de la vida útil estudiada en la simulación. Como el factor mencionado previamente, que es imprescindible para hacer el análisis medioambiental de flotas convencionales e híbridas, este es necesario para realizar el análisis medioambiental de una flota completamente eléctrica.
- Consumo de hidrógeno (kg): al igual que los dos parámetros de consumo anteriores, este valor muestra los kilogramos de hidrógeno consumidos por la flota estudiada. Este factor no repercute en el resto del análisis medioambiental, dado que se desconoce el origen del hidrógeno consumido, pero permite al usuario hacerse una idea del suministro necesario para la operación de la flota simulada.
- Emisiones de CO₂ directas (tm): Mediante los parámetros de emisiones WTT y TTW, sumado al valor de consumo de combustible diésel obtenido y el poder calorífico inferior del combustible, se puede obtener la masa de CO₂ producida por la flota simulada durante todo el período estudiado, en toneladas métricas. Este parámetro es importante en las arquitecturas propulsivas convencional (diésel) e híbrida.
- Emisiones indirectas CO₂ - EV (tm): De la misma forma que en el caso de las emisiones directas, este parámetro recoge la producción de CO₂ causada por el consumo energético de la flota simulada, si esta cuenta con una arquitectura completamente eléctrica. Aunque esta arquitectura no genere emisiones “del tanque a las ruedas” (TTW) la energía eléctrica que consume debe ser producida por las centrales eléctricas que suministren la red a la cual se conecten los cargadores que esta flota usa. Estas centrales eléctricas generan unas emisiones determinadas según su forma de proveer esta energía (dependiendo de si son turbinas de gas, ciclos combinados, turbinas de vapor, qué combustible consumen, su rendimiento...) lo que redundará en un valor de gramos de CO₂ emitidos. Este valor se divide entre la energía total generada por las centrales eléctricas, incluyendo fuentes de energía renovables, para obtener la intensidad de carbono de la red (CIPK) lo que, multiplicado por la energía consumida contando pérdidas en cargadores y red, da las emisiones causadas indirectamente por la flota simulada en toneladas métricas de CO₂.
- Costes sociales (estimación mínima, media y máxima): sumando ambos parámetros de emisiones (tanto directas como indirectas) se obtiene un valor global de emisiones de CO₂ para la flota simulada.
- Emisiones por vehículo (gCO₂/km): el sumatorio de emisiones de CO₂ de la flota se divide entre el número de vehículos de esta, obteniendo este parámetro, que permite comparar distintas arquitecturas según su repercusión medioambiental atendiendo al impacto de cada vehículo.

- Valor residual de instalaciones: este parámetro refleja el precio de los cargadores, pantógrafos e hidrogeneras tras la simulación. Como estos no se venden, sino se emplean para la flota sucesora de la simulada, este precio no es ajustado por el parámetro NPV. Se calcula de la forma mostrada en la Ecuación 3.33:

$$\begin{aligned}
 C_{\text{residual-chargers}} &= \left(1 - \frac{i_f}{i_c}\right) \cdot C_{\text{depot-chargers}} + \left(1 - \frac{i_f}{i_p}\right) \cdot n_{\text{pantograph}} \cdot C_{\text{pantograph}} \\
 &+ \left(1 - \frac{i_f}{i_H}\right) \cdot n_{\text{H}_2\text{-station}} \cdot C_{\text{H}_2\text{-station}} \quad (3.33)
 \end{aligned}$$

Con i_c como la vida útil de los cargadores de cochera (*depot*), i_p como la vida útil de los pantógrafos, e i_H como la vida útil de las hidrogeneras, todos ellos en años.

3.2.2 Interfaz de usuario

El programa, alojado en Microsoft Excel, trabaja con dos hojas diferenciadas:

La hoja principal “Parámetros de simulación” contiene los datos de entrada o “inputs” que el usuario debe aportar al modelo, además de dar los resultados para el modelo estudiado en la misma hoja. Los inputs y las distintas configuraciones del modelo se subdividen en distintos apartados, que se muestran a continuación.

- *Parámetros generales*: en este apartado, visible en la Figura 3.2, se configura a grandes rasgos el modelo a estudiar, seleccionando:
 - Arquitectura propulsiva.
 - Costes de consumibles.
 - Si se desea hallar el precio del vehículo a partir de sus componentes, o, al contrario, se prefiere dar un valor total del vehículo.
 - Si se considera la venta de vehículos al final de su vida útil y baterías usadas y por cuánto se venden.
 - El año de inicio de la simulación y la duración de esta.
 - La distancia recorrida mensualmente por cada vehículo.
 - El número de vehículos (iguales) que conforma la flota a estudiar.
 - La adición del coste del conductor al estudio y el salario de este.

Parámetros generales	
Arquitectura propulsiva estudiada	EV - Eléctrica
Costes combustible	No considerado
Costes electricidad	Precio personalizado, carga de oportunidad
Costes hidrógeno	No considerado
Selección coste componentes-coste total	Coste componentes
Venta de baterías usadas (battery salvage)	Sí
Venta de vehículos (al final de la simulación)	Sí
% valor de batería usada respecto al valor de la batería nueva	20.00%
% valor de vehículo usado respecto al valor del vehículo nuevo	15.00%
Año de inicio de la simulación	2023
Longitud de simulación (años)	10
Distancia recorrida mensualmente	8,425 kilómetros
Evolución de distancia recorrida	Distancia constante
Reducción de distancia recorrida mensualmente	500 kilómetros
Número de vehículos	13
Incorporación del salario del conductor al estudio	No
Salario mensual conductor	1080.00 €

Figura 3.2. Submenú de parámetros generales.

- **Vehículo:** en esta parte, que se puede ver en la Figura 3.3, se recogen los datos particulares del modelo a estudiar. Se subdivide en tres partes:
 - La primera parte recoge los parámetros económicos, relacionando coste con la potencia, energía almacenable y masa del vehículo y sus componentes.
 - La segunda parte recoge los datos de potencia del vehículo, provistos por su motor de combustión interna, motor eléctrico o pila de combustible, según configuración.
 - La tercera parte recoge los parámetros restantes, tales como la energía almacenable en los tanques de combustible o batería, su vida útil, la masa del chasis, el coste total del vehículo si se desea dar directamente, los impuestos aplicables como porcentaje, y la tasa de descuento aplicable a lo largo de la simulación.

Vehículo	
Coste de motor de combustión interna (€/kW)	90.00
Coste de motor eléctrico (€/kW)	125.85
Coste de pila de combustible (€/kW)	159.80
Coste de batería y electrónica (€/kWh)	800
Coste de depósito de combustible (€/kWh)	0.07
Coste de chasis (€/kg)	19.30
Otros costes (€/unidad)	178020.00
Potencia del motor de combustión interna (kW)	0
Potencia del motor eléctrico (kW)	320
Potencia de la pila de combustible (kW)	0
Energía almacenable en el tanque de combustible (kWh)	0
Energía almacenable en la batería (kWh)	200
Vida útil de batería (km)	5000000
Vida útil de célula de combustible (km)	4555555
Masa del chasis (kg)	13560
Coste total por vehículo (€) (pre-impuestos)	
Impuestos aplicables sobre el precio de compra (%)	7.00%
Tasa de descuento (%)	5.00%

Figura 3.3. Apartado de parámetros del vehículo.

- Mantenimiento:** este submenú, visible en la Figura 3.4, recoge los datos económicos referidos a la reparación de vehículos a lo largo de su vida útil. Se distingue entre el mantenimiento general del vehículo y el mantenimiento de sus baterías y/o pilas de combustible, si la configuración estudiada cuenta con ellas.

 - Mantenimiento general (excluyendo baterías): aquí se estudia el coste de reparaciones de cada vehículo sin tener en cuenta el reemplazo de sus baterías de contar con ellas; este coste puede cuantificarse como un valor fijo en €/km recorrido por cada vehículo, o alternativamente puede darse como un porcentaje anual sobre el valor de adquisición del vehículo (sin contar impuestos) según desee el usuario.
 - Mantenimiento de baterías y pilas de combustible: en este apartado se recoge el coste de reemplazar estos dos elementos concretos, una vez se ha sobrepasado su vida útil y/o empiezan a ser menos eficientes en su trabajo de almacenaje y suministro energético. Como en el caso de mantenimiento general, el usuario puede cuantificar este coste de dos maneras distintas: como un mantenimiento programado que ocurre cada cierto número de años, o como un coste el año en el que la flota supere un porcentaje de desgaste en estos componentes especificado por el usuario.

Mantenimiento	
Tipo de cuantificación del mantenimiento (excluyendo baterías)	€/km
Costes de mantenimiento (% sobre el precio de adquisición total)	
Costes de mantenimiento (€/km)	0.11
Modo de simulación de mantenimiento de baterías	Mantenimiento programado
Modo de simulación de mantenimiento de células de combustible	Mantenimiento programado
Frecuencia de reemplazo de baterías - HEV	6 años
Frecuencia de reemplazo de baterías - EV	6 años
Frecuencia de reemplazo de baterías - FCEV	6 años
Porcentaje crítico - HEV	50.00%
Porcentaje crítico - EV	50.00%
Porcentaje crítico - FCEV	50.00%
Frecuencia de reemplazo de pilas de combustible - FCEV	6 años
Porcentaje crítico - FCEV	
Costes reemplazo batería - HEV (€/kWh)	500
Costes reemplazo batería - EV (€/kWh)	800
Costes reemplazo batería - FCEV (€/kWh)	800
Costes reemplazo pila de combustible	50,000.00 €

Figura 3.4. Apartado de datos de mantenimiento.

- Costes consumibles personalizados:** en este apartado, el usuario puede introducir los datos de costes de los cuales disponga, según haya escogido en el submenú de *Parámetros generales*: el modelo económico cuenta con costes de consumibles sugeridos según la situación, obtenidos de datos recogidos para la Comunidad Autónoma de Canarias, que el usuario puede emplear si así lo desea; de no querer emplear estos, puede emplear los que introduzca aquí en su simulación. Se recogen costes de combustible, electricidad (diferenciando carga en cochera y de oportunidad) el coste mensual de la potencia contratada para los cargadores, y el coste del hidrógeno.

<i>Costes consumibles personalizados</i>	
Diesel (€/l)	1.047
Electricidad - carga en garaje (€/kWh)	0.099
Electricidad - carga de oportunidad (€/kWh)	0.099
Coste mensual de potencia instalada (€/kW)	3.6
Hidrógeno (€/kg)	14

Figura 3.5. Apartado de costes de consumibles.

- **Consumos:** aquí se introduce cuánto y qué consume cada vehículo según su arquitectura propulsiva. Se deben aportar, según la configuración, consumos de combustible, electricidad o hidrógeno, resultado de simular las rutas estudiadas en modelos como FASTSim o basados en estudios con vehículos reales en las rutas planteadas. Este apartado se puede ver en la Figura 3.6. Según disponga el usuario, se pueden introducir estos consumos en unidades imperiales, por mantener cierto nivel de compatibilidad con FASTSim:
 - Consumo de combustible en millas por galón de gasolina equivalente (mpgge)
 - Consumo de electricidad en kilovatios-hora por milla (kWh/mile)
 - Consumo de hidrógeno en millas por galón de gasolina equivalente (mpgge)

O, alternativamente, se pueden introducir estos consumos en unidades del Sistema Internacional, identificado como “Métrico” en el menú desplegable inicial del apartado. Los consumos se introducen como:

- Consumo de combustible en litros por kilómetro (l/km)
- Consumo de electricidad en kilovatios-hora por kilómetro (kWh/km)
- Consumo de hidrógeno en kilogramos por kilómetro (kg/km)

<i>Consumos</i>	
Unidades de entrada	Métrico
Consumo de combustible (mpgge)	
Consumo de electricidad (kWh/mile)	
Consumo de hidrógeno (mpgge)	
Consumo de combustible (l/km)	
Consumo de electricidad (kWh/km)	1.14
Consumo de hidrógeno (kg/km)	

Figura 3.6. Apartado de consumos.

- **Estimación de cargadores necesarios:** este apartado, mostrado en la Figura 3.7, es una herramienta incorporada al modelo económico, que realiza un cálculo aproximado del número de cargadores necesarios para una configuración de carga en cochera o “depot”, teniendo en cuenta la profundidad de descarga admisible, la potencia y eficiencia del cargador, las horas de carga, el número de vehículos y su capacidad de almacenamiento

energético. El resultado aportado por esta herramienta no es vinculante, pudiendo modificarse si el usuario así lo desea, ya que no cumple otro propósito que orientar al usuario. Sólo la eficiencia del cargador es necesaria para la operación del modelo, y en concreto, para el análisis medioambiental, dado que las pérdidas en las que incurre este se deben añadir al cálculo de emisiones de CO₂.

<i>Estimación de cargadores necesarios</i>	
Profundidad de descarga	0.7
Potencia cargador (kW)	150
Horas disponibles	8
Eficiencia cargador (%)	90.00%
Número de cargadores	2

Figura 3.7. Herramienta de estimación de cargadores.

- **Infraestructura:** en este submenú, que se puede visualizar en la Figura 3.8, se recogen todos los datos referentes a cargadores e hidrogeneras. Se da un coste total de estos, además de indicar la potencia que estos demandan y que la empresa que los opera debe contratar y pagar. Se indica además la vida útil de los cargadores e hidrogeneras, y la eficiencia de la red eléctrica, también contando con un parámetro adicional, “Costes adicionales de instalación (€)” que permite sumar un coste inicial extra debido a conexiones de red, obras civiles u otros añadidos necesarios para iniciar la operación. Por último, se introducen los datos que permiten cuantificar el mantenimiento; como en casos anteriores, el usuario dispone de dos formas para hacerlo:
 - Como un coste fijo sobre los kilovatios-hora consumidos por la flota a la cual carga, dado en €/kWh.
 - Como un porcentaje anual sobre el coste de adquisición especificado por el usuario.

<i>Infraestructura</i>	
Coste cargadores (€)	30000
Coste pantógrafos (€)	350000
Vehículos de otras rutas que comparten pantógrafo	1
Número pantógrafos	4
Potencia contratada (kW)	2300
Vida útil cargador	25 años
Vida útil pantógrafo	25 años
Eficiencia de la red eléctrica (%)	92.00%
Costes adicionales de instalación (€)	0
Costes hidrogenera (€)	0
Vehículos de otras rutas que comparten hidrogenera	1
Nº de hidrogeneras	1
Vida útil hidrogenera	25 años
Tipo de cuantificación del mantenimiento	% sobre coste de adquisición
Mantenimiento infraestructura carga (% sobre coste de adquisición)	2.00%
Mantenimiento infraestructura carga (€/kWh)	0.14

Figura 3.8. Submenú de infraestructura.

- **Parámetros medioambientales:** si el usuario así lo desea, se puede realizar un análisis de la repercusión de la operación de la flota sobre el medio ambiente, orientado en concreto sobre las emisiones de CO₂ totales durante su vida útil. Para ello, en configuraciones convencionales e híbridas, se dan valores de emisiones WTT, que cuantifican las derivadas de la extracción, refinado y transporte del combustible hasta llegar al depósito del vehículo, en kgCO₂/MWh, y de emisiones TTW, que recogen las causadas directamente por el vehículo en su operación.

Para configuraciones eléctricas, el usuario debe dar un valor de la intensidad de carbono de la red, que, considerando las eficiencias de cargadores y red eléctrica, permite realizar una estimación de las emisiones indirectas de la flota.

Por último, el modelo económico permite introducir una penalización económica sobre las emisiones de CO₂, denominada como “costes sociales” y puede ser introducida como un valor personalizado por el usuario, en €/tonelada de CO₂, puede ser ignorado en la simulación, o puede estudiarse con uno de tres valores propuestos por el modelo [19]. Los valores resultantes de este análisis, mostrados más adelante en “Resultados adicionales” son los siguientes:

- Emisiones de CO₂ directas: son las toneladas de CO₂ emitidas por toda la flota durante el tiempo especificado para el estudio.
- Emisiones indirectas CO₂-EV: recoge las toneladas de CO₂ emitidas, de forma indirecta, por la flota de vehículos si estos son eléctricos.
- Costes sociales (estimación mínima, media y máxima): el modelo aporta 3 costes de las emisiones de CO₂, sumando directas e indirectas [19]: se dan las tres estimaciones a la vez, pero el usuario tiene control sobre cuál usar como penalización sobre el coste total de operación, según lo que considere.

Este apartado puede verse en la Figura 3.9.

<i>Parámetros medioambientales</i>	
Análisis medioambiental	Sí
Emisiones WTT (kgCO ₂ /MWh)	55.8
Emisiones TTW (kgCO ₂ /l)	2.62
Intensidad de carbono de la red (gCO ₂ /kWh)	520.9
Poder calorífico inferior (kJ/l)	35900
Adición de costes sociales	Sí
Costes sociales personalizados (€/tonelada)	263.47
Estimación de costes sociales	Estimación media

Figura 3.9. Submenú de parámetros medioambientales.

- **Resultados finales:** en este apartado, visible en la Figura 3.10, el usuario puede ver los datos obtenidos por el modelo económico para su configuración concreta, aportando distintos parámetros económicos.

- Costes adquisición para 1 vehículo (sin y con impuestos): da el coste de un solo vehículo, antes y después de aplicar los impuestos pertinentes sobre este. Es un parámetro de especial importancia si el vehículo se simula a partir de sus componentes, ya que permite al usuario ver si el coste resultante es acorde a lo esperado.
- Costes de adquisición y operación: el modelo arroja los costes en los que la empresa debe incurrir para introducir la nueva flota, incluyendo no sólo los costes de compra de los vehículos, sino también de la infraestructura necesaria, lo que conforma el coste de adquisición. El coste de operación consiste en la suma de los costes de mantenimiento de vehículos e infraestructura, los costes energéticos de la flota y los reemplazos necesarios de baterías y/o pilas de combustible necesarios.
- Costes totales: consiste en la suma de los costes de adquisición y operación, y sirve como un valor orientativo del coste total de una flota en el rango de tiempo especificado para el análisis, sin tener en cuenta ventas u otros valores residuales.
- Costes totales por vehículo: toma el parámetro anterior (Costes totales) y lo divide entre el número de vehículos que conforman la flota. El valor resultante sirve para dar una idea de la inversión necesaria por cada vehículo.
- *Lifecycle cost*: dividiendo los costes totales entre el número de vehículos y la distancia que estos recorren actualmente, se obtiene este parámetro, que da una cifra en €/km, bastante manejable y apropiada para comparar distintas arquitecturas propulsivas, al igual que hacen múltiples modelos mostrados en artículos académicos.
- Valor residual: tomando la suma de las ganancias obtenidas al vender los vehículos al final de su vida útil y la venta de sus baterías usadas, y dividiéndola entre el número de vehículos por los kilómetros que estos recorren anualmente, se obtiene este parámetro, que permite ver la repercusión de la venta de la flota (suele ser de segundo orden).
- *Lifecycle cost + valor residual*: consiste en restar el valor residual al parámetro "*Lifecycle cost*" lo que resulta en el coste real de operación en €/km. De no considerar la venta de los vehículos ni de las baterías, este parámetro es idéntico a "*Lifecycle cost*".
- *Lifecycle cost + valor residual + costes sociales*: al parámetro obtenido en el apartado anterior ("*Lifecycle cost + valor residual*") se le suma el coste impuesto por las emisiones de CO₂, dando lugar a este parámetro. Como el *lifecycle cost* propiamente dicho, puede emplearse para

comparar diferentes arquitecturas, teniendo en cuenta los costes causados por la contaminación causada, ya sea directa o indirecta.

Por último, el modelo económico aporta dos gráficos basados en el *lifecycle cost* calculado: el primero, un gráfico circular que muestra los diferentes porcentajes que componen este parámetro, divididos en cinco categorías:

- Infraestructura: incorpora los costes de adquisición de cargadores e hidrogeneras.
- Costes de adquisición: recoge los costes de adquisición de los vehículos.
- Costes energéticos: suma los costes en combustibles, electricidad e hidrógeno a lo largo de toda su vida.
- Mantenimiento: recoge los gastos en reparaciones de vehículos, cargadores y/o hidrogeneras.
- Reemplazos: incorpora los gastos en la adquisición de baterías nuevas para el cambio de estas especificado previamente.

Junto a este gráfico circular el modelo da un gráfico de columnas apiladas, con los gastos cuantificados ya no en porcentajes, sino en €/km. Esto permite al usuario copiar ambos gráficos y adjuntarlos a su trabajo, o comparar las proporciones entre distintos costes y decidir dónde se pueden recortar gastos.

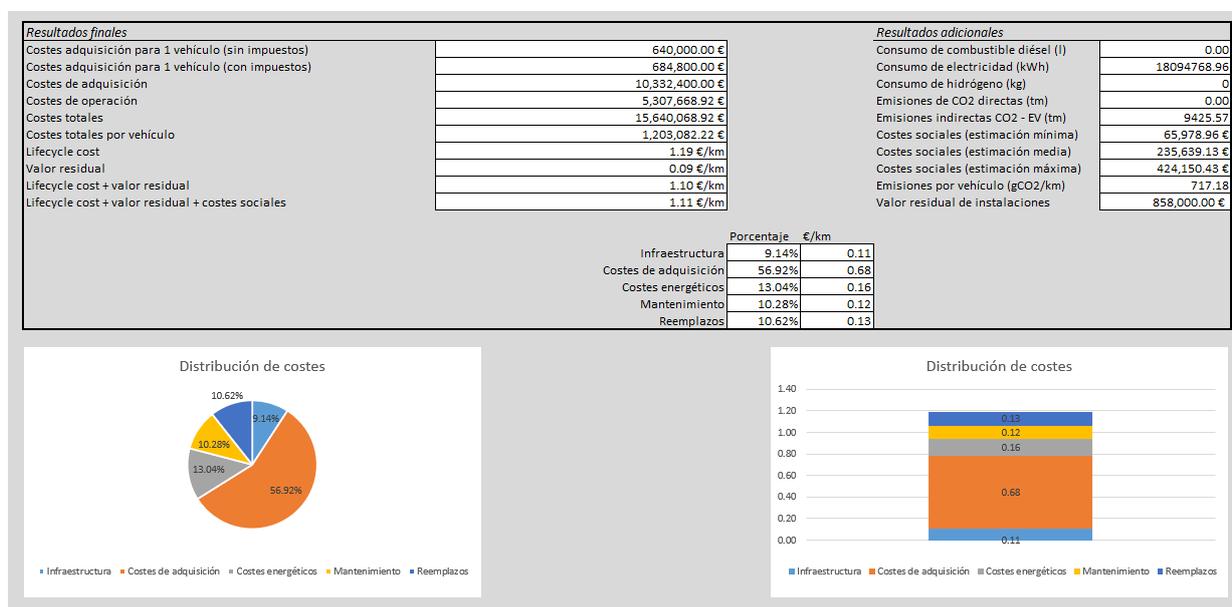


Figura 3.10. Resultados finales, adicionales y gráficos.

Aparte de esta hoja principal, el modelo incorpora una hoja secundaria, titulada “Comparativa”, mostrada en la Figura 3.11: esta hoja apoya a la simulación principal permitiendo que el usuario realice distintos análisis (comparativa entre arquitecturas propulsivas, estudios de sensibilidad...) de forma sencilla, tomando los resultados de la hoja principal e introduciéndolos en esta.

La hoja “Comparativa” dispone de 9 huecos para alojar los resultados aportados por el modelo, denominados “Configuraciones” de la 1 a la 9. Como en el modelo principal, dispone de casillas para denominar las distintas “Configuraciones” como desee el usuario; estos datos se grafican de manera automática en 4 gráficos comparativos.

- El primer gráfico compara el parámetro “*Lifecycle cost*” subdividido en sus cinco componentes mostrados en los gráficos, entre las distintas “Configuraciones” mediante un gráfico de columnas apiladas.
- El segundo gráfico, también de columnas apiladas, muestra los distintos componentes del “*Lifecycle cost*” de cada “Configuración” como un porcentaje, permitiendo comparar la contribución de cada categoría al coste total.
- El tercer gráfico compara los parámetros “*Lifecycle cost*”, “*Lifecycle cost + valor residual*”, “*Lifecycle cost + valor residual + costes sociales*” graficados como columnas agrupadas, y la contribución de la venta de vehículos y baterías a la reducción del *lifecycle cost*, como “Valor residual” y graficado como una línea.
- El cuarto gráfico, solo usable si se ha decidido realizar un análisis medioambiental sobre el modelo económico, muestra las emisiones de CO₂ de cada “Configuración” en toneladas métricas, usando para ello un gráfico de columnas convencional, distinguiendo entre emisiones directas e indirectas.

La hoja “Comparativa” también permite al usuario comparar otros parámetros de su interés y añadir gráficos adicionales a su discreción. Esta hoja, al igual que la principal, es fácilmente copiable, permitiendo su almacenamiento en libros de Excel destinados al almacenaje de datos para su posterior consulta. Si se hace esto, se recomienda pegar únicamente los datos, evitando enlaces entre el modelo y el libro que almacena sus datos.

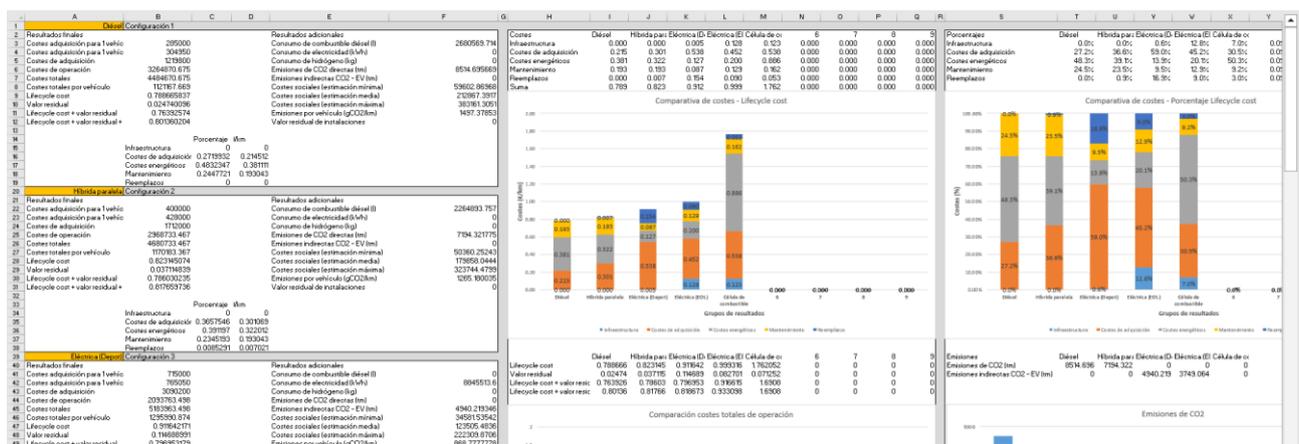


Figura 3.11. Hoja “Comparativa”.

4 CASOS DE ESTUDIO

4.1 Descripción y características de las rutas interurbanas seleccionadas

Para este Trabajo Fin de Grado, se ha optado por dos rutas juzgadas como representativas de los servicios presentes en la isla de Tenerife: una ruta predominantemente turística (la línea 467) y otra de servicio en el Área Metropolitana, orientada a las personas que necesiten viajar entre sus dos urbes y el Aeropuerto Norte, siendo este el caso de la línea 020.

4.1.1 Línea 467

La línea 467 de TITSA, visible en la Figura 4.1, une Costa del Silencio con la Caleta de Adeje. Ambas son localidades ubicadas en el sur de la isla de Tenerife.

Este es un ejemplo de una ruta predominantemente interurbana, con un alto porcentaje de conducción urbana al transitar a lo largo de una zona densamente habitada (la conurbación Adeje-Arona) con varios puntos de interés turístico (Costa Adeje, Playa de las Américas, Los Cristianos). Estas circunstancias determinan el alto número de paradas en esta ruta y el considerable tamaño de los vehículos empleados y/o proyectados, en aras de proveer un servicio adecuado a la población de esta zona.

Siendo una ruta que, en líneas generales, es trazada cercana a la costa (salvo en las zonas de autopista y al iniciar el tramo final en la zona de Guaza) el gradiente es generalmente bajo, tirando a medio en la segunda parte del trayecto hacia Costa del Silencio. En este caso, la limitación principal es el gran tamaño de los vehículos a emplear y el alto número de paradas en la línea, que determinan una baja velocidad media y una gran cantidad de ciclos aceleración-desaceleración, como se puede ver en la Figura 4.2.

Los datos del servicio se muestran en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Tipo de servicio de la línea 467.

Parámetro	Valor
Número de vehículos	13
Paradas	39
Distancia diaria por vehículo (km)	280,82
Número de recorridos (ida+vuelta) diarios por vehículo	5
Tipo de vehículo	~18 m de longitud, 3 ejes, articulado
Tiempo medio entre viajes	11:03 min
Velocidad media (km/h)	21,65
Tiempo medio en ralentí (min)	15:45

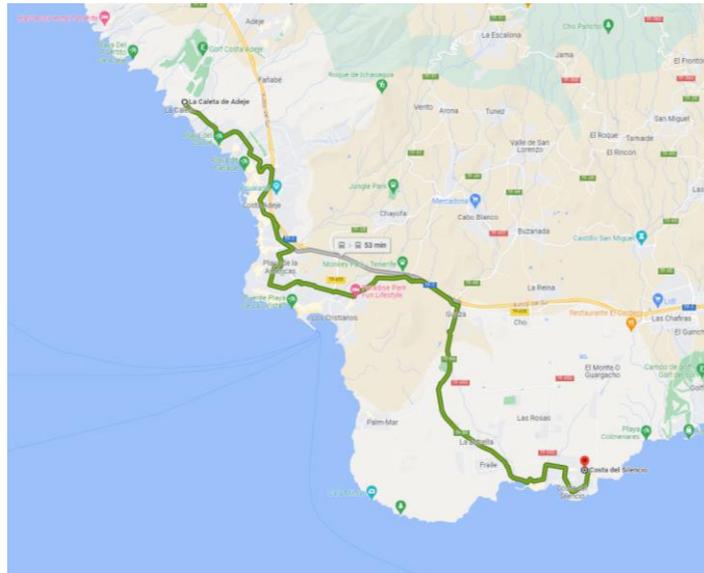


Figura 4.1. Trazado de la línea 467.

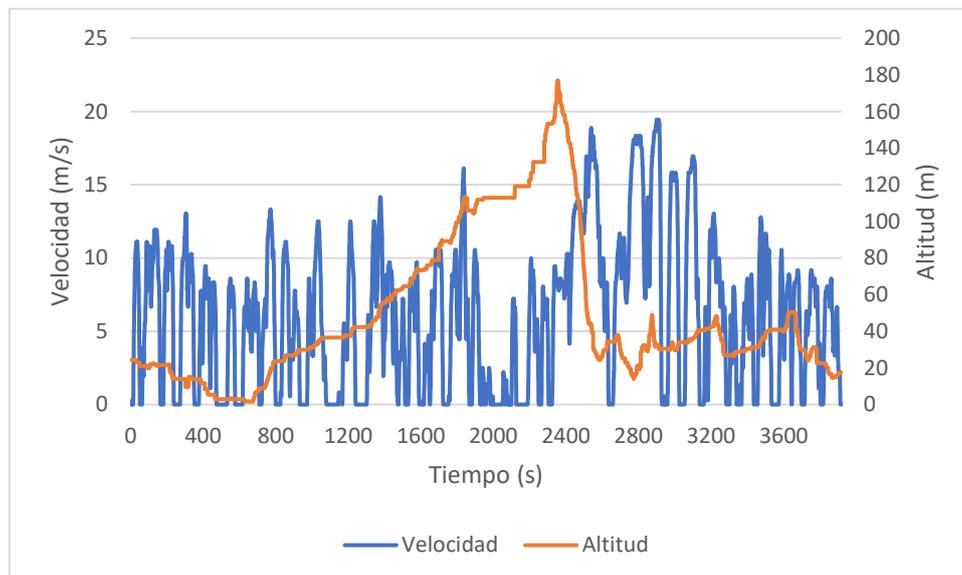


Figura 4.2. Perfil de velocidades y altitud de la línea 467.

4.1.2 Línea 020

La otra línea estudiada, la 020, visible en la Figura 4.3, enlaza los dos centros neurálgicos del Área Metropolitana de Tenerife (La Laguna y Santa Cruz) con el Aeropuerto de Tenerife Norte sin paradas intermedias, realizando el servicio bautizado por TITSA como "Aeroexpress". Esta ruta se hace con vehículos de aproximadamente 14 m, y presenta un bajo porcentaje de conducción en ciudad, siendo predominantemente una ruta que se desarrolla en condiciones de autopista, salvo en las entradas y salidas de las paradas, donde debe transitar por los núcleos urbanos de ambas ciudades.

El principal problema de esta ruta es el elevado gradiente en el ascenso desde Santa Cruz a La Laguna. Esta es especialmente problemática para vehículos de arquitectura eléctrica debido a su elevado peso y limitada autonomía, aunque es también problemática para las demás configuraciones debido al alto consumo energético en este tramo. Al llegar a la parada intermedia en La Laguna, el gradiente se reduce considerablemente hasta llegar al término de la ruta.

Otra particularidad de esta ruta es su viaje de retorno a Santa Cruz, en el que el gradiente, que a la ida fue el factor más importante a tener que superar por el vehículo, se convierte en una ventaja, ya que el vehículo puede aprovechar este para reducir su consumo al mínimo o incluso emplear sus sistemas de regeneración para recuperar parte de la energía invertida en la subida, lo que permite balancear el elevado consumo en la primera parte del trayecto.

Esta ruta comparte gran parte del recorrido con la línea 015, que enlaza Santa Cruz con La Laguna; una de las rutas más importantes de la empresa, permite a trabajadores y estudiantes trasladarse entre estos dos núcleos urbanos, por lo que el análisis de esta ruta reviste especial importancia.

Las características principales del servicio se muestran en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2. Tipo de servicio de la línea 020.

Parámetro	Valor
Número de vehículos	4
Paradas	3
Distancia diaria por vehículo (km)	394,89
Número de recorridos (ida+vuelta) diarios por vehículo	14
Tipo de vehículo	~14 m de longitud, 3 ejes, no articulado
Tiempo medio entre viajes	9:20 min
Velocidad media (km/h)	43,44
Tiempo medio en ralentí (min)	4:51

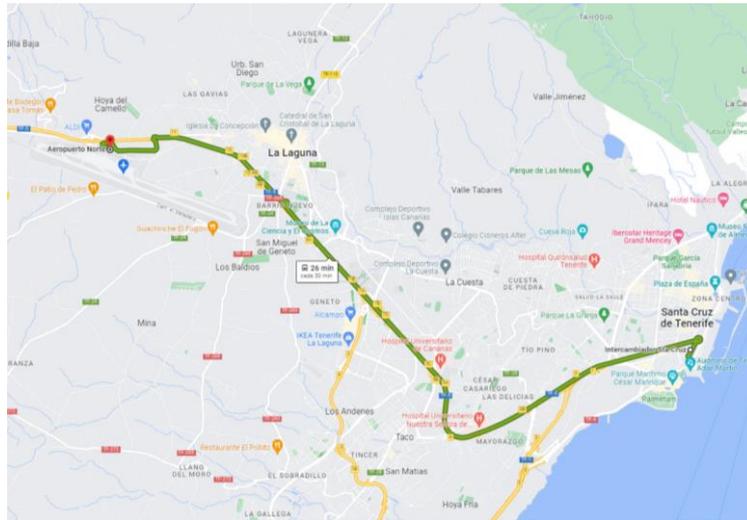


Figura 4.3. Trazado de la línea 020.

La Figura 4.4 muestra otra de las características principales de la línea, y es la alta velocidad que debe mantenerse en una pendiente considerable en el ascenso a La Laguna, durante un relativamente largo período de tiempo. Este perfil, con una alta demanda energética, es difícil de seguir con las soluciones comerciales actuales eléctricas y de hidrógeno, centradas en la conducción urbana, que se estudian en este trabajo.

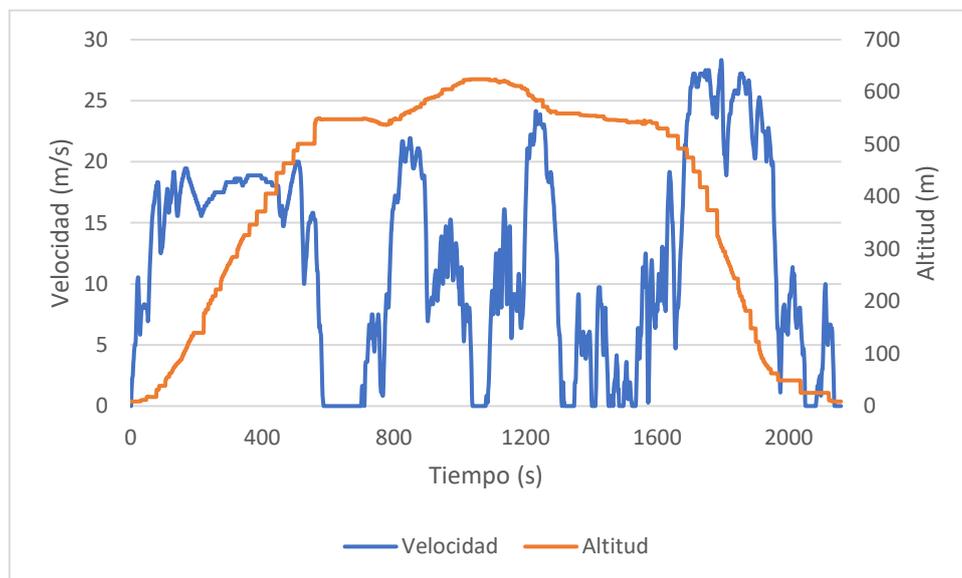


Figura 4.4. Perfil de velocidades y altitud de la línea 020.

4.2 Vehículos modelizados

Como se mencionó en el apartado introductorio de este TFG, se tratarían cuatro arquitecturas propulsivas: convencional, híbrida, eléctrica (de tipo carga en cochera o *depot charging*, además de las de carga a final de línea o *EOL charging*) y FCEB.

Siempre que se disponga de los datos de un vehículo real con la arquitectura propulsiva a estudiar en ese apartado, la calibración del modelo, tanto de consumo como económico y medioambiental, se basará en estos datos.

4.2.1 Modelos de 12 m

Estos modelos solo han sido validados (o solo verificados, en el caso del vehículo FCEB) para contar con estos como base para generar modelos de vehículos de 14 y 18 m, ya que, para estos, se cuenta con información de consumo real para las arquitecturas diésel, híbrida y eléctrica, un caso que no se da para las otras dos longitudes. Por otra parte, como estos modelos no realizan el servicio en las líneas 467 o 020, no entrarán a formar parte del análisis tecno-económico. Sus parámetros están recogidos en la Tabla 4.3.

Se han basado predominantemente en datos aportados por TITSA, salvo en el caso del vehículo FCEB, que se basa en el modelo H2.City Gold de CaetanoBus [20].

Tabla 4.3. Parámetros de los modelos de 12 m.

Parámetro	Diésel	HEV	BEB	FCEB
Distancia entre ejes equivalente (m)	5,875	6,24	6,005	5,86
Capacidad de pasajeros máxima	92	76	83	-
Nº pasajeros medio	31	26	28	-
Área frontal (m ²)	7,18	7,96	7,71	8,145
Potencia motor de combustión interna (kW)	265	235	-	-
Potencia motor eléctrico (kW)	-	130	320	-
Capacidad del tanque de combustible (kg)				24
Capacidad de la batería (kWh)	-	18,5	480	44
C _D	0,65	0,65	0,65	0,65
Glider mass (kg)	10976	12142	11157	13828
Vehicle center of gravity height	0,53	0,53	0,53	0,53
Drive axle weight fraction	0,6	0,6	0,6	0,6
Cargo mass (kg)	2183	1843	1979	1843
Fuel storage energy (kWh)	2789	3385	-	806,4
Motor peak efficiency	-	95%	93%	95%
Battery power (kW)	-	140	330	190
Battery round trip efficiency	-	97%	90%	90%
Auxiliary loads (kW)	4	4	4	4
Transmission efficiency	85%	95%	98%	98%

En la Tabla 4.4 se muestran los datos de consumo obtenidos por los modelos de 12 m.

Tabla 4.4. Consumos de los modelos de 12 m.

Consumo	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Diésel (l/km)	0,464	0,504	0,432	0,502	0,537
HEV (l/km)	0,322	0,401	0,298	0,315	0,372
BEB (kWh/km)	1,349	1,404	1,246	1,133	1,431
FCEB (kg H ₂ /km)	0,068	0,077	0,062	0,067	0,080

4.2.2 Modelos de 18 m

Las Tablas 4.5, 4.6 y 4.7 recogen los datos de las simulaciones de vehículos realizadas mediante FASTSim. A continuación, se discuten los ajustes e hipótesis necesarios para obtener estos modelos.

Tabla 4.5. Parámetros de los modelos de 18 m.

Parámetro	Diésel	HEV	BEB	FCEB
Distancia entre ejes equivalente (m)	9,22	9,22	8,54	8,9
Capacidad de pasajeros máxima	133	-	83	140
Nº pasajeros medio	34	34	34	34
Área frontal (m ²)	7,70	7,70	7,71	7,6
Potencia motor de combustión interna (kW)	265	235	-	250
Potencia motor eléctrico (kW)	-	130	320	240
Capacidad del tanque de combustible (kg)	309	309	-	51,2
Capacidad de la batería (kWh)	-	25	640	60
C _D	0,65	0,65	0,65	0,65
Glider mass (kg)	16935	18734,04	13560	15000
Vehicle center of gravity height	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53
Drive axle weight fraction	0,6	0,6	0,6	0,6
Cargo mass (kg)	2387	2387	2387	2387
Fuel storage energy (kWh)	3683	3683	-	1720,3
Motor peak efficiency	-	95%	95%	95%
Battery power (kW)	-	140	330	250
Battery round trip efficiency	-	90%	92%	90%
Auxiliary loads (kW)	4	4	4	4
Transmission efficiency	85%	95%	98%	98%

Tabla 4.6. Consumos de los modelos de 18 m.

Consumo	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Diésel (l/km)	0,634	0,672	0,610	0,693	0,755
HEV (l/km)	0,442	0,493	0,394	0,406	0,517
BEB (kWh/km)	1,489	1,529	1,368	1,193	1,550
FCEB (kg H ₂ /km)	0,081	0,096	0,079	0,090	0,103

Tabla 4.7. Errores de los modelos de 18 m.

Parámetro	Diésel	HEV	BEB	FCEB
Error relativo en línea 467	1,13 %	-	5,25%	-

- Modelo diésel de 18 m

Este vehículo, estudiado en la línea 467, se basa en el modelo 2310 de 18,7 m de la flota de TITSA, y sus parámetros de simulación son los mostrados en la Tabla 4.2.1.1. De este se conoce que su consumo en la línea 467 es de 0,617 l/km.

Con los parámetros de la Tabla 4.5, se obtiene un consumo de 0,610 l/km, que arroja el error relativo con respecto al modelo real visible en la Tabla 4.7.

- Modelo híbrido de 18 m

Este modelo tuvo que ser creado, con lo que toma como base el vehículo diésel 2310 de 18,7 m, cambiando ciertos parámetros en base a la relación entre un vehículo diésel de 12 m y su equivalente híbrido de la misma longitud.

Este no puede validarse, ya que no se tienen datos de consumo de vehículos híbridos en la línea 467. Se toman los datos de potencia, tanto del motor de combustión interna como del eléctrico, del modelo 2200 de 12,4 m de TITSA. La carga de pasajeros se mantiene igual a la del modelo diésel, y los datos del centro de gravedad y reparto de masas se dejan igual al ser una configuración de tamaño similar.

Para la estimación del tamaño de la batería, se establecen relaciones lineales entre las capacidades de los depósitos de combustible de los modelos diésel e híbrido de 12 m, y entre la capacidad del depósito de combustible y de la batería de este último modelo. Esta relación se muestra en la Ecuación 4.1.

$$\begin{aligned}
 Est. \text{ batería} &= 3683,11 \text{ kWh (depósito 18 m)} \cdot \frac{3385 \text{ kWh (depósito 12 m HEV)}}{2789 \text{ kWh (depósito 12 m diésel)}} \cdot \\
 &\frac{18,5 \text{ kWh (batería 12 m HEV)}}{3385 \text{ kWh (depósito 12 m HEV)}} = 24,4 \text{ kWh}
 \end{aligned} \tag{4.1}$$

Este valor se redondea a 25 kWh para el modelo desarrollado. La potencia de la batería se calcula sumando 10 kW a la potencia del motor, para dar un margen de seguridad, atendiendo al consumo de auxiliares y pérdidas en el cableado, como se ve en la Ecuación 4.2.

$$\text{Potencia batería} = \text{Potencia motor} + 10 \text{ kW} \quad (4.2)$$

Los parámetros de simulación se muestran en la Tabla 4.5. El modelo arroja un valor de consumo de 0,394 l/km para la línea 467, como se ve en la Tabla 4.6, una mejora considerable comparada al resultado para el vehículo diésel en la misma ruta. Esta mejora es respaldada por lo mostrado en la literatura especializada [21].

- Modelo eléctrico de 18 m

Este vehículo, se modeliza en base al modelo Electric MAN [22] de 18 m probado por TITSA. En este trabajo, este modelo está también destinado a cubrir la ruta 467, y presenta la mayor capacidad, tanto de carga como de batería, de los modelos estudiados en este trabajo.

De este se conoce un consumo de 1,3 kWh/km, para el modelo de carga en cochera (*depot charging*). La potencia que la batería es capaz de suministrar se calcula con la Ecuación 4.2, ya planteada.

Esto arroja un consumo de 1,368 kWh/km, para el que se calcula el error relativo, comparado con el dato de consumo real, recogido en la Tabla 4.7.

- Modelo de pila de combustible de 18 m

Este modelo se basa en el vehículo Solaris Urbino de 18 m de longitud [23], que solo está empezando a comercializarse ahora, por lo que se desconocen muchos de sus parámetros operativos. Esta es la razón por la cual no se incluye este en la Tabla 4.7, ya que no se puede validar.

Se plantea este vehículo para la ruta 467 como una ilustración de su posible implantación futura: muchos de los parámetros se ajustan para que el modelo dé un consumo similar al mostrado en artículos relacionados [24] en las líneas de mayor demanda energética, aunque se traten de rutas distintas. Estos consumos se pueden ver en la Tabla 4.6.

4.2.3 Modelos de 14 m

En las siguientes tablas se recogen los datos más importantes de los modelos de 14 m realizados en FASTSim. Como en el caso de 18 m, tras las tablas se explican los ajustes necesarios para obtener los modelos.

Tabla 4.8. Parámetros de los modelos de 14 m.

Parámetro	Diésel	HEV	BEB	FCEB
Distancia entre ejes equivalente (m)	7,73	7,73	7,73	7,73
Capacidad de pasajeros máxima	98	-	-	-
Nº pasajeros medio	13	13	13	13
Área frontal (m ²)	7,70	7,70	7,70	7,6
Potencia motor de combustión interna (kW)	265	235	-	250
Potencia motor eléctrico (kW)	-	130	320	240
Capacidad del tanque de combustible (kg)	309	309	-	40
Capacidad de la batería (kWh)	-	25	550	60
C _D	0,65	0,65	0,65	0,65
Glider mass (kg)	13890	15365,56	11074	12303
Vehicle center of gravity height	-0,53	-0,53	-0,53	-0,53
Drive axle weight fraction	0,6	0,6	0,6	0,6
Cargo mass (kg)	1089	1089	1089	1089
Fuel storage energy (kWh)	3683	3683	-	1344
Motor peak efficiency	95%	95%	95%	95%
Battery power (kW)	-	140	330	250
Battery round trip efficiency	-	90%	92%	90%
Auxiliary loads (kW)	4	4	4	4
Transmission efficiency	85%	95%	98%	98%

Tabla 4.9. Consumos de los modelos de 14 m.

Consumo	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Diésel (l/km)	0,432	0,471	0,405	0,462	0,500
HEV (l/km)	0,352	0,398	0,319	0,337	0,399
BEB (kWh/km)	1,242	1,288	1,146	1,019	1,308
FCEB (kg H ₂ /km)	0,068	0,082	0,065	0,074	0,084

Tabla 4.10. Errores de los modelos de 14 m.

Parámetro	Diésel	HEV	BEB	FCEB
Error relativo en línea 467	0,00 %	-	-	-

- Modelo diésel de 14 m

El modelo diésel, basado en el vehículo 2001 de 14,7 m, operado por TITSA, sirve actualmente en la ruta 020, punto de análisis de este trabajo. Este pudo validarse, dado que se disponía de un dato de consumo real de 0,471 l/km. Con los datos de

la Tabla 4.8, se obtiene un consumo de 0,471 l/km. El error relativo es visible en la Tabla 4.10.

- Modelo híbrido de 14 m

Este modelo, como en el caso del de 18 m, tuvo que ser creado en base a otros vehículos. Aunque no siga las características de un vehículo real, sirve para ilustrar el efecto de introducir una flota híbrida en esta ruta. La motorización es idéntica al caso de 18 m, con base en el modelo diésel de 14 m en cuanto a otros parámetros como la distancia entre ejes.

- Modelo eléctrico de 14 m

Para este caso, dado que se desconoce la capacidad máxima de batería que se puede incorporar en un vehículo de esta longitud, se hace una interpolación lineal entre los modelos de 12 y 18 m de longitud para estimar una capacidad orientativa. Este cálculo se muestra en la Ecuación 4.3:

$$\frac{14,7 \text{ m} - 12,2 \text{ m}}{18,1 \text{ m} - 12,2 \text{ m}} = \frac{x - 480 \text{ kWh}}{640 \text{ kWh} - 480 \text{ kWh}}$$

$$x = \frac{14,7 \text{ m} - 12,2 \text{ m}}{18,1 \text{ m} - 12,2 \text{ m}} \cdot (640 \text{ kWh} - 480 \text{ kWh}) + 480 \text{ kWh} = 547,80 \text{ kWh} \quad (4.3)$$

Se toma una capacidad de batería de 550 kWh.

Las especificaciones de propulsión se basaron en el modelo eléctrico de 18 m al no contar con datos de vehículos eléctricos de 14 m.

- Modelo de pila de combustible de 14 m

Para este caso, se creó un modelo en base a la Solaris Urbino tratada anteriormente [23], con la longitud deseada (aunque un modelo así es inexistente actualmente) en aras de ilustrar el comportamiento de estas configuraciones. Para determinar el glider mass aproximado, se estableció una relación con su homólogo diésel, como se ve en la Ecuación 4.4.

$$\text{Glider mass} = \frac{15000 \text{ kg (FCEV 18 m)}}{16935 \text{ kg (diésel 18 m)}} \cdot 13890 \text{ kg (diésel 14,7 m)} \cong 12303 \text{ kg} \quad (4.4)$$

El vehículo lleva la misma carga de pasajeros transportada en los otros modelos. En cuanto a la capacidad de almacenamiento de hidrógeno, esta se interpola con los datos de almacenamiento para el modelo de 18 m (51,2 kg) y con los datos del vehículo de 12,1 m mostrado en un artículo especializado [25], lo que se hace en la Ecuación 4.5.

$$\frac{14,7 \text{ m} - 12,1 \text{ m}}{18 \text{ m} - 12,1 \text{ m}} = \frac{x - 30}{51,2 - 30}$$

$$x = \frac{14,7 \text{ m} - 12,1 \text{ m}}{18 \text{ m} - 12,1 \text{ m}} \cdot (51,2 - 30) + 30 = 39,34 \text{ kg} \quad (4.5)$$

Se toma una capacidad de 40 kg de hidrógeno. Como en casos anteriores, este modelo se prueba en las cinco rutas analizadas. Los resultados se pueden ver en la Tabla 4.9; se ha tratado de conseguir consumos tipo de entre 0,06 y 0,09 kg H₂/km [25].

4.3 Análisis de capacidad de batería necesaria para arquitecturas eléctricas

En este apartado se muestran los procedimientos seguidos para calcular el tamaño de batería necesario. Se ha seguido un procedimiento estándar para todos los casos y como se podrá comprobar en el desarrollo, se obtienen estimaciones conservadoras, en aras de proveer cierta seguridad al potencial operador de la flota.

4.3.1 Casos de carga en cochera (*depot charging*)

- Modelo de 18 m

Se hace necesario averiguar si el vehículo es capaz de completar el servicio diario sin recargar. Para ello, se plantea un escenario llamado “Peor caso posible” con las siguientes condiciones:

- El vehículo lleva la carga máxima de pasajeros del vehículo; lo que, sumado al peso del conductor (75 kg por definición) supone $75 + 68 \frac{\text{kg}}{\text{pasajero}} \cdot 83 \text{ pasajeros} = 5719 \text{ kg}$ cargados.
- Se aumenta en 1 kW la potencia demandada por los elementos auxiliares, para reflejar el uso del aire acondicionado en días calurosos.

Añadiendo estas modificaciones, el consumo del vehículo asciende a 1,577 kWh/km, un 15,24% superior al consumo normal. Los consumos en este escenario por cada ruta son los mostrados en la Tabla 4.11.

Tabla 4.11. Consumos del modelo eléctrico de 18 m en peor caso posible.

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kWh/km)	1,692	1,670	1,577	1,397	1,791

Una vez se obtiene el dato de consumo, se puede comenzar a trabajar en la planificación de la ruta. Para ello, se emplean datos facilitados por TITSA, consistiendo en las distancias recorridas a diario por un vehículo en la línea 467. Sumando las distancias recorridas por cada servicio y otros desplazamientos, se obtiene que cada vehículo recorre 280,82 km diarios.

Es necesario indicar que los vehículos eléctricos no suelen dejar la cochera completamente cargados, pues esto es perjudicial para la batería a largo plazo e impide que el vehículo pueda aprovechar los posibles eventos de regeneración. Es por ello que los vehículos suelen abandonar la cochera ligeramente descargados. Para este trabajo, se considera que el vehículo abandona la cochera con un 90% de carga, denominada de ahora en adelante como *state of charge* o SOC [5].

Además, también se debe dejar un margen de seguridad previo a la completa descarga de la batería; esto permite superar percances inesperados en el servicio diario, reduce el desgaste de la batería y además asegura que la batería entrega voltaje de forma estable. En este trabajo, ese margen de seguridad se toma como un 20% del SOC de la batería tratada [5].

Ambos factores implican que el 70% de la batería debe ser capaz de cubrir la demanda energética del motor durante todo el servicio diario. Se comprueba la autonomía del vehículo con estas restricciones mediante el cálculo mostrado en la Ecuación 4.6:

$$Autonomía (peor caso) = \frac{0,7 \cdot 640 \text{ kWh}}{1,577 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}} = 284,08 \text{ km} \quad (4.6)$$

Se verifica así que el vehículo es capaz de cubrir el servicio diario con los márgenes establecidos. La evolución del SOC en un día, para este tipo de vehículo, en la línea 467 se muestra en la Figura 4.5. En días en los que no viajen tantos pasajeros o las condiciones climáticas sean más favorables, se puede esperar un menor consumo y por tanto, mayores márgenes.

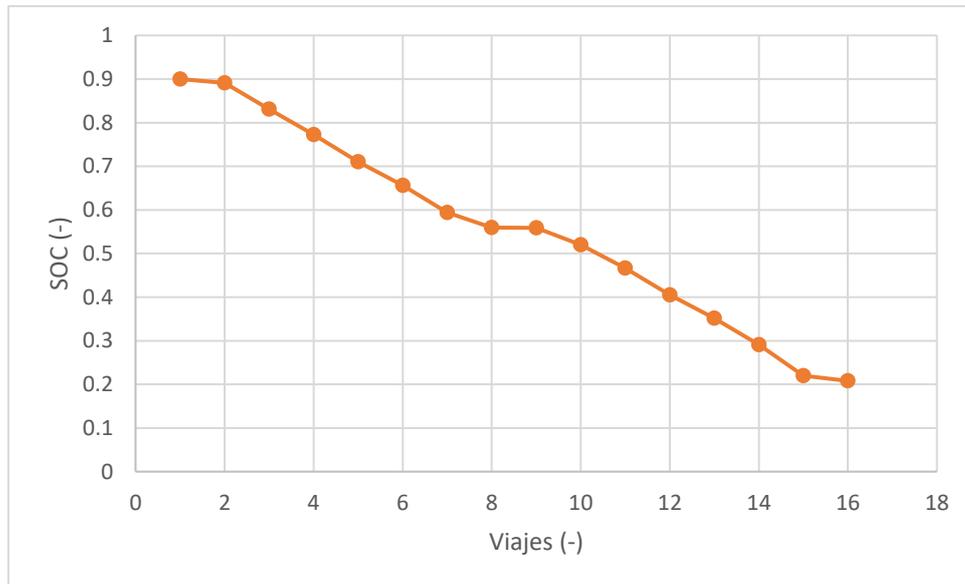


Figura 4.5. Evolución del SOC (Carga en cochera, Línea 467).

- Modelo de 14 m

Se plantea de nuevo el escenario “Peor caso posible” adaptado a la situación particular de esta ruta:

- El vehículo lleva su carga de pasajeros máxima; en este caso, se considera que se transporta el mismo número de pasajeros que en el vehículo de 18 m del que sí se conoce su capacidad, para estar del lado de la seguridad: $75 + 68 \frac{kg}{pasajero} \cdot 83 \text{ pasajeros} = 5719 \text{ kg}$ con el peso del conductor incorporado.
- A este peso se incorpora, dado que se trata de una ruta que lleva pasajeros al Aeropuerto Norte, una carga adicional de 10 kg por pasajero que simboliza el equipaje que pudieran llevar: $5719 \text{ kg} + 83 \text{ pasajeros} \cdot 10 \frac{kg \text{ equipaje}}{pasajero} = 6549 \text{ kg}$ totales.
- Se suma 1 kW adicional a la demanda de potencia auxiliar del vehículo, lo que simboliza una carga extra sobre el sistema de aire acondicionado.

Con estas modificaciones, el consumo en la línea 020 asciende a 1,577 kWh/km, un aumento del 22,48% con respecto al consumo en condiciones normales. Los consumos en las rutas analizadas son los mostrados en la Tabla 4.12.

Tabla 4.12. Consumos del modelo eléctrico de 14 m en peor caso posible.

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kWh/km)	1,553	1,577	1,447	1,295	1,652

De la misma manera que en el caso anterior, se emplean datos reales de operación, facilitados por TITSA para estudiar la autonomía de este vehículo. En este caso, se recorre una distancia diaria por vehículo de 394,89 km. Con este dato y con los límites establecidos por seguridad, que determinan que el 70% de la capacidad de la batería debe ser capaz de proveer energía para cubrir la distancia diaria, se calcula la autonomía, como se muestra en la Ecuación 4.7.

$$Autonomía (peor caso) = \frac{0,7 \cdot 550 \text{ kWh}}{1,577 \frac{\text{kWh}}{\text{km}}} = 244,13 \text{ km} \quad (4.7)$$

Se observa que el vehículo no es capaz de cubrir la distancia diaria, con lo que esta configuración debe descartarse del estudio. La evolución del SOC diaria es visible en la Figura 4.6. En ella se observa cómo a partir del viaje 20, el SOC ya está en la zona de reserva energética, que procede a cruzar en el siguiente viaje; más allá de este recorrido, el vehículo no podría operar. Los datos mostrados más allá no tienen sentido físico alguno, pero no se eliminan para mostrar que esta configuración no puede emplearse en esta ruta.

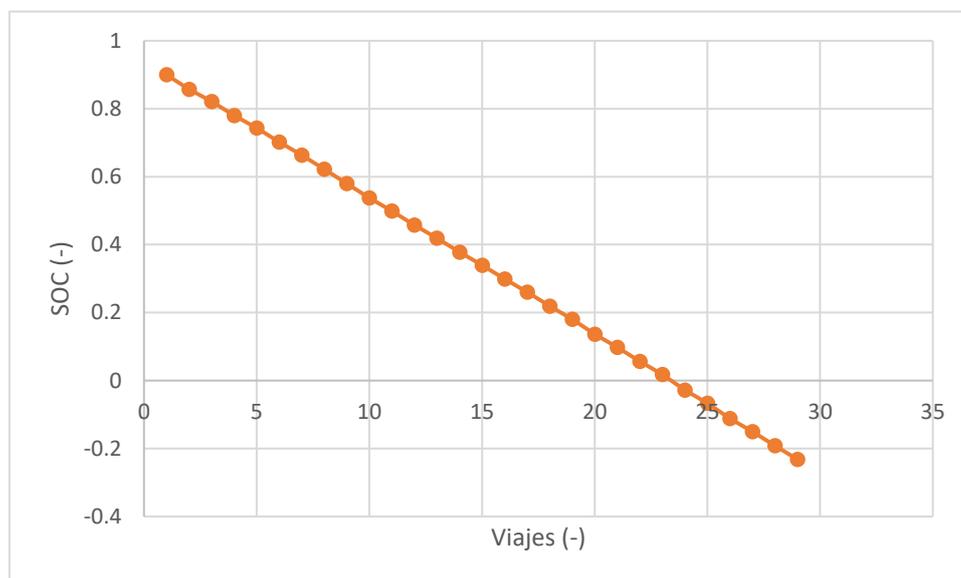


Figura 4.6. Evolución del SOC (Carga en cochera, Línea 020).

4.3.2 Casos de carga a final de línea - *End Of Line (EOL) charging*

- Procedimiento de cálculo

Para determinar el tamaño de batería necesario, se debe seguir un proceso iterativo que utiliza como valor inicial el consumo obtenido para el vehículo de carga en cochera en el supuesto de peor caso posible.

El siguiente valor a conocer es la distancia recorrida entre tiempos en los que el vehículo permanece en las estaciones finales de la línea un tiempo suficiente como para poder cargar su batería. A este último se le denomina como “*dwell time*” y el disponible tras recorrer esta distancia es otro parámetro necesario en este análisis.

Con el consumo inicial y la distancia recorrida entre períodos de carga, llamada distancia crítica en este trabajo, se estima una capacidad de batería mediante la Ecuación 4.8:

$$\text{Capacidad batería (kWh)} = \frac{\text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right) \cdot \text{Distancia crítica (km)}}{0,7} \quad (4.8)$$

Una vez se obtiene la capacidad estimada, se introduce esta en el modelo de FASTSim en el escenario “Peor caso posible”. El consumo resultante en la línea estudiada se vuelve a introducir en la ecuación, para obtener una estimación de capacidad de batería más ajustada. Este proceso se repite hasta que la capacidad de batería, redondeada de 50 en 50 kWh, se mantiene idéntica entre dos iteraciones.

Con la capacidad final de batería, se selecciona una potencia para el cargador que se empleará en los finales de línea. Mediante la Ecuación 4.9 se observa si el tiempo necesario para recargar la batería completamente es aproximadamente el disponible.

$$\text{Tiempo recarga (min)} = \frac{\text{Capacidad batería (kWh)}}{\text{Potencia cargador (kW)}} \cdot 60 \quad (4.9)$$

Para verificar realmente la estrategia de carga a seguir, se establece un SOC inicial del 90% y se va restando el porcentaje perdido por cada viaje, de la manera mostrada en la Ecuación 4.10:

$$\text{SOC} = \text{SOC}_{prev} - \frac{\text{Consumo} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{km}} \right) \cdot \text{Distancia (km)}}{\text{Capacidad batería (kWh)}} \quad (4.10)$$

Al llegar a un tiempo destinado a la recarga, el siguiente viaje comienza con un SOC aumentado en virtud de la Ecuación 4.11, que determina cuánto ha podido recargar el vehículo su batería:

$$SOC_{recarga} = SOC_{prev} + \frac{\eta_{charger} \cdot Potencia\ cargador\ (kW) \cdot \frac{Dwell\ time\ (min)}{60}}{Capacidad\ batería\ (kWh)} \quad (4.11)$$

Con estas ecuaciones, introducidas en una hoja Excel parametrizada, se puede realizar un estudio bastante más certero de la evolución de la carga y descarga de este tipo de arquitectura a lo largo del día, y se puede ajustar mejor la potencia del cargador. Se evitará que se descienda del 20% de SOC. Una vez ajustada la potencia del cargador, se define la estrategia de carga definitiva para cada caso.

- Modelo de 18 m

El resultado del proceso iterativo, iniciado con el consumo en el peor caso posible de la configuración de carga en cochera, es un tamaño de batería de 200 kWh y una potencia de pantógrafo de 500 kW con un rendimiento del 90%.

La ubicación de los pantógrafos, con dos en cada extremo de línea (uno de uso convencional y otro de reserva) se muestra en la Figura 4.7.



Figura 4.7. Ubicación de pantógrafos (Carga EOL, Línea 467).

El modelo definitivo es puesto a prueba, en el escenario “Peor caso posible”, y la evolución resultante de su SOC en la ruta estudiada, viaje a viaje, se muestra en la Figura 4.8.

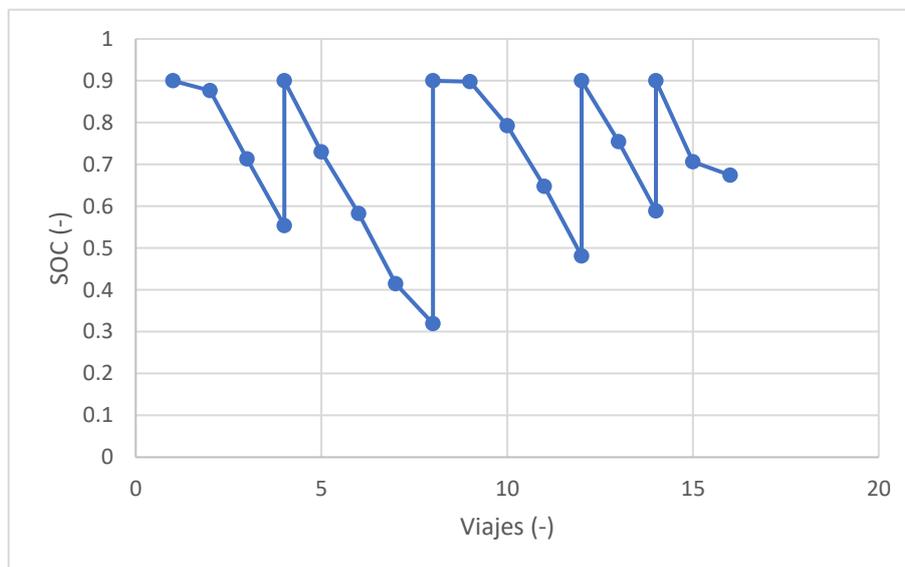


Figura 4.8. Evolución del SOC (Carga *EOL*, Línea 467).

Posteriormente se ejecuta otra simulación de FASTSim con la carga de pasajeros y aire acondicionado convencional, para obtener los consumos energéticos esperados en las rutas estudiadas. Estos resultados se recogen en la Tabla 4.13.

Tabla 4.13. Consumos del modelo eléctrico de 18 m (*EOL*).

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kWh/km)	1,236	1,279	1,140	1,014	1,301

Se observa cómo el consumo se reduce considerablemente comparado con el vehículo equivalente de carga en cochera, gracias a la reducción de tamaño de batería, que implica un ahorro en peso adicional. El consumo resultante en la línea 467 es un 17,54% inferior al obtenido en el escenario “Peor caso posible” tras la iteración, de 1,340 kWh/km.

- Modelo de 14 m

Como en el caso de 18 m, se sigue un proceso iterativo para estimar el tamaño de batería necesario. Como valor inicial se toma el consumo en el peor caso posible del vehículo de 18 m, al ser el único valor realista disponible, ya que la configuración eléctrica de carga en cochera de 14 m no es capaz de realizar la ruta.

El resultado del proceso iterativo es un tamaño de batería de 200 kWh, con una potencia de pantógrafo de 800 kW y un rendimiento del 90%. La ubicación de los pantógrafos (dos en el Intercambiador de Santa Cruz, uno de uso convencional y otro de reserva) es visible en la Figura 4.9. En este caso no se colocan pantógrafos en el otro final de línea (Aeropuerto de Tenerife Norte) debido al bajo potencial de aprovechamiento de estos por otras líneas.



Figura 4.9. Ubicación de pantógrafos (Carga EOL, Línea 020).

La evolución de su SOC, viaje a viaje, a lo largo de la jornada, es mostrada en la Figura 4.10.

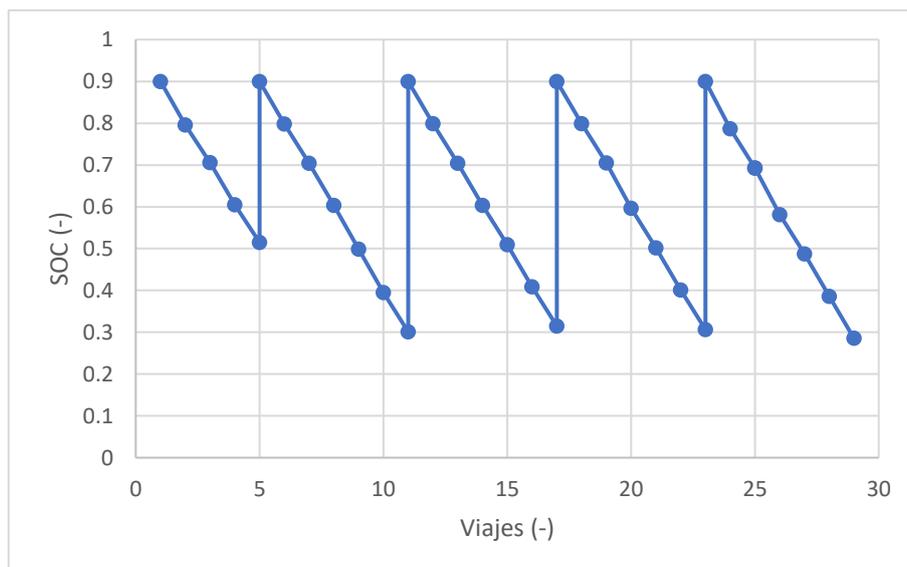


Figura 4.10. Evolución del SOC (Carga EOL, Línea 020).

Una vez se obtienen los resultados, se ejecuta el modelo resultante con la carga esperada de pasajeros (incluyendo sus equipajes) y aire acondicionado, resultando en los consumos por línea mostrados en la Tabla 4.14.

Tabla 4.14. Consumos del modelo eléctrico de 14 m (EOL).

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kWh/km)	1,046	1,048	0,975	0,887	1,120

Comparado con su homólogo de carga en cochera, se observa una reducción de consumo muy considerable, lo que permite poder realizar una estrategia de carga capaz de prestar el servicio en esta línea con la tecnología actual. El consumo en la línea 020 es un 34,26% inferior al obtenido como resultado del proceso iterativo en el escenario "Peor caso posible", de 1,407 kWh/km.

4.4 Estudio de arquitecturas basadas en la pila de combustible en las rutas analizadas

En este apartado se estudia la viabilidad de las arquitecturas basadas en la pila de combustible alimentada por hidrógeno. Se emplearán los modelos de 14 y 18 m en sus respectivas rutas y se estudiará si son capaces de realizar el servicio.

Se considerará que pueden emplear el 100% del hidrógeno almacenado en sus tanques, aunque la información sobre esta hipótesis es escasa. Se supondrá que los vehículos cuentan con sistemas para mantener el suministro de hidrógeno aunque la presión en los tanques descienda.

Para este análisis, ambos modelos se simularán bajo el escenario "Peor caso posible" para cada una de sus rutas. Esto implica las siguientes modificaciones a los parámetros:

- La demanda de potencia auxiliar sube 1 kW en ambos casos.
- La carga de pasajeros sube a 5719 kg para el modelo de 18 m y 6549 kg para el modelo de 14 m.

Primero se analiza el vehículo de 18 m. Los resultados de consumo del modelo bajo el escenario planteado se muestran en la Tabla 4.15:

Tabla 4.15. Consumos del modelo de pila de combustible de 18 m en peor caso posible.

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kg H ₂ /km)	0,092	0,106	0,092	0,106	0,121

Conociendo que tiene una capacidad de 51,2 kg de hidrógeno, se utiliza la Ecuación 4.12 para hallar su autonomía máxima.

$$\text{Autonomía (peor caso)} = \frac{\text{Capacidad del tanque (kg H}_2\text{)}}{\text{Consumo } \left(\frac{\text{kg H}_2}{\text{km}}\right)} \quad (4.12)$$

El cálculo realizado, con los valores concretos del modelo, se muestran en la Ecuación 4.13.

$$\text{Autonomía (peor caso, 18 m)} = \frac{51,2 \text{ kg}}{0,092 \frac{\text{kg H}_2}{\text{km}}} = 556,52 \text{ km} \quad (4.13)$$

Según los datos aportados por TITSA, cada vehículo recorre 280,82 km diarios en la línea 467. Por lo tanto, se prueba, de forma aproximada, que el vehículo es capaz de realizar el servicio diario en esta línea sin repostar. Se puede apreciar que se cuenta con un elevado margen de seguridad, lo que permitiría al vehículo incluso cubrir parte del servicio del día siguiente si el gestor de la flota así lo considera.

Ahora es el turno de analizar el modelo de 14 m. Este modelo tiene una capacidad de 40 kg. Con las modificaciones introducidas por el escenario “Peor caso posible” los consumos en las rutas analizadas son los mostrados en la Tabla 4.16.

Tabla 4.16. Consumos del modelo de pila de combustible de 14 m en peor caso posible.

	Línea 122	Línea 020	Línea 467	Línea 905	Línea 232
Consumo (kg H ₂ /km)	0,085	0,101	0,085	0,098	0,111

Se emplea de nuevo la Ecuación 4.12 para hallar la autonomía máxima. El cálculo con los datos concretos se puede ver en la Ecuación 4.14.

$$\text{Autonomía (peor caso, 14 m)} = \frac{40 \text{ kg}}{0,101 \frac{\text{kg H}_2}{\text{km}}} = 396,04 \text{ km} \quad (4.14)$$

Los datos facilitados por TITSA dan una distancia de 394,89 km. El resultado implica que el vehículo es capaz de prestar el servicio en esta ruta, pero sin márgenes de seguridad en absoluto. De hecho, dado que este es un modelo inexistente, es posible que en el mercado no se oferten vehículos con 40 kg de capacidad, lo que determinaría el no poder operar esta ruta con vehículos de hidrógeno, a no ser que se lograra reducir el consumo mediante otras medidas como la reducción de peso.

4.5 Consideraciones para el análisis económico

Para emplear el modelo económico, se requieren algunos factores económicos comunes a los modelos, siendo generalmente introducidos en euros referidos a distintos parámetros (€/l, €/kW, €/kg)

- Coste de motor de combustión interna (€/kW): tiene un valor de 90 €/kW [26].
- Coste de motor eléctrico y electrónica (€/kW): se toma un valor de 125,85 €/kW [27], empleado en el posterior estudio.
- Coste de pila de combustible (€/kWh) se toma el valor por defecto en FASTSim, de 159,80 €/kWh.
- Coste de batería y electrónica (€/kWh) se toman valores dependiendo de si la batería debe entregar mucha potencia para una pequeña capacidad (800 €/kWh) o si es de gran tamaño y debe poder almacenar una gran cantidad de energía (500 €/kWh) según lo establecido en la bibliografía [7].
- Coste de depósito de combustible (€/kWh) para este análisis se toma un precio de 0,07 €/kWh aplicable en vehículos convencionales e híbridos, y de 15,04 €/kWh en vehículos alimentados por hidrógeno, ambos valores tomados de los aportados por defecto en FASTSim.
- Coste de chasis (€/kg) para todos los modelos se toma un valor común de 19,30 €/kg, derivado de considerar un precio de 210000 € [15] para el chasis de un vehículo eléctrico de 12 m, y dividirlo entre el chasis weight del modelo Electric MAN 12,2 m (10882 kg) cuyos datos han sido aportados por TITSA.
- Otros costes (€/unidad): se emplea como un parámetro de ajuste para cada modelo; sirve para sumar o restar valor al vehículo modelado para que su precio se ajuste a un valor objetivo.
- Los impuestos aplicables se reducen al IGIC (7%) [16].
- La tasa de descuento DR se toma como un 5% [15].
- Para cuantificar el coste de mantenimiento general y otros gastos operativos, atendiendo a lo expuesto en artículos especializados [15], se toma un valor de 0,25 €/km para vehículos diésel e híbridos, y de 0,11 €/km para vehículos eléctricos y de pila de combustible.
- Se escoge realizar reemplazos de baterías y pilas de combustible cada 6 años. El precio de los reemplazos de batería por kilovatio-hora es el mismo que el usado para su adquisición, con posterior ajuste mediante el parámetro NPV, y el coste de un reemplazo de pila de combustible se da como 50000 € por vehículo [15]
- Se toman costes de consumibles facilitados por TITSA. El combustible diésel se paga a 1,047 €/l, la electricidad a 0,099 €/kWh, y se pagan 3,6 € al mes por cada kilovatio contratado. El coste del hidrógeno se toma como 14 €/kg, pero este valor se toma de una oferta que la propia empresa propuso y para la que no recibió ofertas de suministro alguno. Este coste es congruente con lo mostrado en proyectos relacionados [15] para una hidrogenera basada en el proceso de electrólisis y alimentada por energía renovable.

- Se supone un coste de cargador de 15000 € para un sistema de carga lenta, de 150 kW por enchufe, a montar en cochera (valor aportado por TITSA) y para pantógrafos, se supone un coste de 350000 € [28] para potencias entre 500 y 800 kW.
- Para el mantenimiento de la infraestructura de carga, se toma un valor del 2% del precio de adquisición total para cargadores y pantógrafos [29] y un valor medio del 3,67% [15] para la hidrogenera, que en este caso solo se considera como zona de almacenamiento y repostaje, no de generación de hidrógeno verde, con un coste unitario de 644000 € [15] y una capacidad de suministro de 500 kg diarios, lo que, sumando el coste de la potencia contratada del compresor empleado, da un valor total de 698000 €, que se empleará en el análisis.

A partir del consumo, kilometraje y número de vehículos de cada flota, se puede estimar el hidrógeno necesario para cada una: 337,36 kg para los vehículos de la línea 467 y 158,75 kg para la línea 020. Se verifica así que la capacidad de la hidrogenera es suficiente para ambos casos de estudio.

- En el estudio de emisiones, se emplea la estimación media de costes sociales (25 €/tm CO₂)
- Para el cálculo de emisiones indirectas de CO₂, se emplea un valor de intensidad de carbono de la red de 558,5 gCO₂/kWh para vehículos con estrategia de carga en cochera, correspondientes a la generación en horarios nocturnos, y de 520,9 gCO₂/kWh para vehículos con estrategia *EOL* [30].
- Se considera que las baterías usadas se venden tras su reemplazo y al final de la simulación económica, por un 20% de su valor de compra (sin impuestos) en el año de su venta. De la misma forma, se considera que el vehículo se vende, salvo las baterías, por un 15% de su valor de adquisición (sin impuestos) en el año final de la simulación. Estos porcentajes fueron escogidos como ilustración de la posible reducción de costes que estas ventas pueden conseguir, pero son independientes del resultado principal.

Las aplicaciones de las baterías usadas son aún un campo incierto, en el que distintos trabajos dan estimaciones de precios muy dispares entre sí. En cuanto a la venta de vehículos, el porcentaje depende del trato que se le dé al vehículo (venta de este a otro operador de transporte, venta pieza a pieza con el fin de proveer repuestos, o venta a un desguace).

- Los precios de los vehículos se basan en datos aportados por TITSA para los modelos diésel de 14 y 18 m, híbrido de 14 m y eléctrico de 18 m. El resto de los precios se han estimado mediante la suma del coste de sus componentes, redondeado hasta el millar más próximo. En cuanto al coste de los vehículos FCEB, se considera, dado que la información sobre estos es escasa, que su precio es igual al del vehículo eléctrico de carga en cochera de la misma longitud.

4.6 Modelización económica

En este apartado se muestran los modelos económicos de cada vehículo y sus resultados. Se descarta el modelo eléctrico de carga en cochera de 14 m al ser incapaz de realizar el servicio diario. Sin embargo, se ha calculado este al ser necesario para aproximar el precio de la flota FCEB: estos resultados se muestran en el Anexo III de este TFG, al igual que los parámetros de entrada y salida detallados.

4.6.1 Flota línea 467

En la Tabla 4.17 se muestran los parámetros generales empleados por todos los modelos simulados en esta línea.

Tabla 4.17. Parámetros generales de simulación – Línea 467.

Parámetro	Valor
Duración (años)	10
Distancia recorrida mensualmente por vehículo (km)	8424,69
Eficiencia de cargadores	90%
Eficiencia de la red eléctrica	92%
Horas de carga en cochera	8
Vida útil de instalaciones (años)	25
Emisiones WTT (kgCO ₂ /MWh)	55,8
Emisiones TTW (kgCO ₂ /l)	2,62
PCI combustible (kJ/l)	35900

La Tabla 4.18 recoge los resultados económicos principales obtenidos de cada modelo.

Tabla 4.18. Resultados económicos de la flota de 18 m.

Resultado	Diésel	HEV	BEB cochera	BEB EOL	FCEB
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	390 k€	550 k€	800 k€	640 k€	800 k€
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	417,3 k€	588,5 k€	856 k€	684,8 k€	856 k€
Costes de adquisición	5,425 M€	7,651 M€	11,25 M€	10,33 M€	11,83 M€
Costes de operación	9,023 M€	6,852 M€	6,406 M€	5,308 M€	13,79 M€
Costes totales	14,45 M€	14,50 M€	17,65 M€	15,64 M€	25,61 M€
Costes totales por vehículo	1,111 M€	1,116 €	1,358 M€	1,203 M€	1,970 M€
<i>Lifecycle cost</i>	1,10 €/km	1,10 €/km	1,34 €/km	1,19 €/km	1,95 €/km
Valor residual	0,03 €/km	0,05 €/km	0,15 €/km	0,09 €/km	0,08 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,07 €/km	1,06 €/km	1,19 €/km	1,10 €/km	1,87 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,12 €/km	1,09 €/km	1,22 €/km	1,11 €/km	1,87 €/km

Las tablas 4.19 y 4.20 muestran los componentes del *lifecyle cost* en porcentaje y en €/km, respectivamente.

Tabla 4.19. Porcentajes del *lifecyle cost* de la flota de 18 m.

Componente de coste	Diésel	HEV	BEB cochera	BEB EOL	FCEB
Infraestructura	0.00%	0.00%	0.68%	9.14%	2.73%
Costes de adquisición	37.55%	52.75%	63.03%	56.92%	43.45%
Costes energéticos	44.89%	28.86%	10.92%	13.04%	43.91%
Mantenimiento	17.56%	17.49%	6.56%	10.28%	6.07%
Reemplazos	0.00%	0.89%	18.81%	10.62%	3.84%

Tabla 4.20. Componentes del *lifecyle cost* de la flota de 18 m.

Componente de coste	Diésel	HEV	BEB cochera	BEB EOL	FCEB
Infraestructura	0,00 €/km	0,00 €/km	0,01 €/km	0,11 €/km	0,05 €/km
Costes de adquisición	0,41 €/km	0,58 €/km	0,85 €/km	0,68 €/km	0,85 €/km
Costes energéticos	0,49 €/km	0,32 €/km	0,15 €/km	0,16 €/km	0,86 €/km
Mantenimiento	0,19 €/km	0,19 €/km	0,09 €/km	0,12 €/km	0,12 €/km
Reemplazos	0,00 €/km	0,01 €/km	0,25 €/km	0,13 €/km	0,07 €/km

4.6.2 Flota línea 020

La Tabla 4.21 muestra los parámetros de uso general por los modelos simulados.

Tabla 4.21. Parámetros generales de simulación – Línea 020.

Parámetro	Valor
Duración (años)	10
Distancia recorrida mensualmente por vehículo (km)	11846,67
Eficiencia de cargadores	90%
Eficiencia de la red eléctrica	92%
Horas de carga en cochera	8
Vida útil de instalaciones (años)	25
Emisiones WTT (kgCO ₂ /MWh)	55,8
Emisiones TTW (kgCO ₂ /l)	2,62
PCI combustible (kJ/l)	35900

La Tabla 4.22 recoge los principales resultados económicos de cada modelo.

Tabla 4.22. Resultados económicos de la flota de 14 m.

Resultado	Diésel	HEV	BEB EOL	FCEB
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	285 k€	400 k€	600 k€	715 k€
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	304,95 k€	428 k€	642 k€	765,05 k€
Costes de adquisición	1,220 M€	1,712 M€	3,298 M€	3,758 M€
Costes de operación	3,265 M€	2,969 M€	2,385 M€	6,262 M€
Costes totales	4,485 M€	4,681 M€	5,683 M€	10,02 M€
Costes totales por vehículo	1,121 M€	1,170 M€	1,421 M€	2,505 M€
<i>Lifecycle cost</i>	0,79 €/km	0,82 €/km	1,00 €/km	1,76 €/km
Valor residual	0,02 €/km	0,04 €/km	0,08 €/km	0,07 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	0,76 €/km	0,79 €/km	0,92 €/km	1,69 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	0,80 €/km	0,82 €/km	0,93 €/km	1,69 €/km

Las Tablas 4.23 y 4.24 recogen los componentes del lifecycle cost como porcentajes sobre el total y en €/km, respectivamente.

Tabla 4.23. Porcentajes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 14 m.

Componente de coste	Diésel	HEV	BEB EOL	FCEB
Infraestructura	0,00%	0,00%	12,85%	6,97%
Costes de adquisición	27,20%	36,58%	45,19%	30,54%
Costes energéticos	48,32%	39,12%	20,06%	50,27%
Mantenimiento	24,48%	23,45%	12,91%	9,21%
Reemplazos	0,00%	0,85%	8,99%	3,02%

Tabla 4.24. Componentes del *lifecycle cost* de la flota de 14 m.

Componente de coste	Diésel	HEV	BEB EOL	FCEB
Infraestructura	0,00 €/km	0,00 €/km	0,13 €/km	0,12 €/km
Costes de adquisición	0,21 €/km	0,30 €/km	0,45 €/km	0,54 €/km
Costes energéticos	0,38 €/km	0,32 €/km	0,20 €/km	0,89 €/km
Mantenimiento	0,19 €/km	0,19 €/km	0,13 €/km	0,16 €/km
Reemplazos	0,00 €/km	0,01 €/km	0,09 €/km	0,05 €/km

5 ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este apartado se realiza una comparativa y estudio de las simulaciones descritas en los capítulos anteriores.

5.1 Línea 467

En esta línea, se han obtenido unos *lifecycle cost* considerablemente grandes, debido principalmente al tamaño de vehículo necesario (18 m) y el gran número de estos asociados al servicio, con los requisitos añadidos de la infraestructura y mantenimiento necesarios.

Se puede observar cómo, en la Figura 5.1, el *lifecycle cost* de las arquitecturas diésel e híbrida paralela es aproximadamente igual. Esto llevaría a pensar que la arquitectura híbrida no ofrece beneficio económico alguno en esta línea; lo mismo podría decirse de todas las otras tecnologías estudiadas aquí, y este suele ser el principal factor decisivo en las empresas de transporte.

Sin embargo, se puede observar en las Figuras 5.1 y 5.2 como los costes energéticos de la flota híbrida son notablemente inferiores a los de una flota diésel, gracias a su mayor eficiencia en escenarios altamente transitorios (aceleración/desaceleración) como los visibles en esta línea. Dado que los costes de mantenimiento (incluyendo reemplazo de batería a los 6 años) son muy similares, se concluye que una flota híbrida requiere menores gastos de operación. Con esto se compensa el mayor desembolso inicial, obteniendo un resultado final competitivo con la flota diésel. Esta situación de mayor desembolso inicial con menores gastos de operación puede resultar beneficioso para operadores de transporte dependientes de asignaciones económicas gubernamentales para adquirir vehículos o flotas enteras, con menores recursos propios para el mantenimiento de estos.

Por otra parte, la reducción de consumo de la flota redonda en un beneficio medioambiental, como se puede ver en la Figura 5.4, ya que esta flota emite menos CO₂ durante toda su vida que su equivalente diésel; en concreto, 16,44 kilotoneladas métricas frente a las 25,48 kilotoneladas métricas de una flota diésel, una reducción de 9,04 kilotoneladas, o del 35,47 %. Si se añaden los costes sociales al *lifecycle cost* obtenido, como se muestra en la Figura 5.3, esta diferencia en emisiones resulta en una ventaja neta para la arquitectura híbrida, ya que su coste global es menor, lo que, sumado a un mayor potencial de ventas al contar con una batería, que puede venderse a instalaciones de almacenaje energético residencial, convierte a una flota híbrida en la opción superior comparado a una flota diésel convencional para un operador de transporte público.

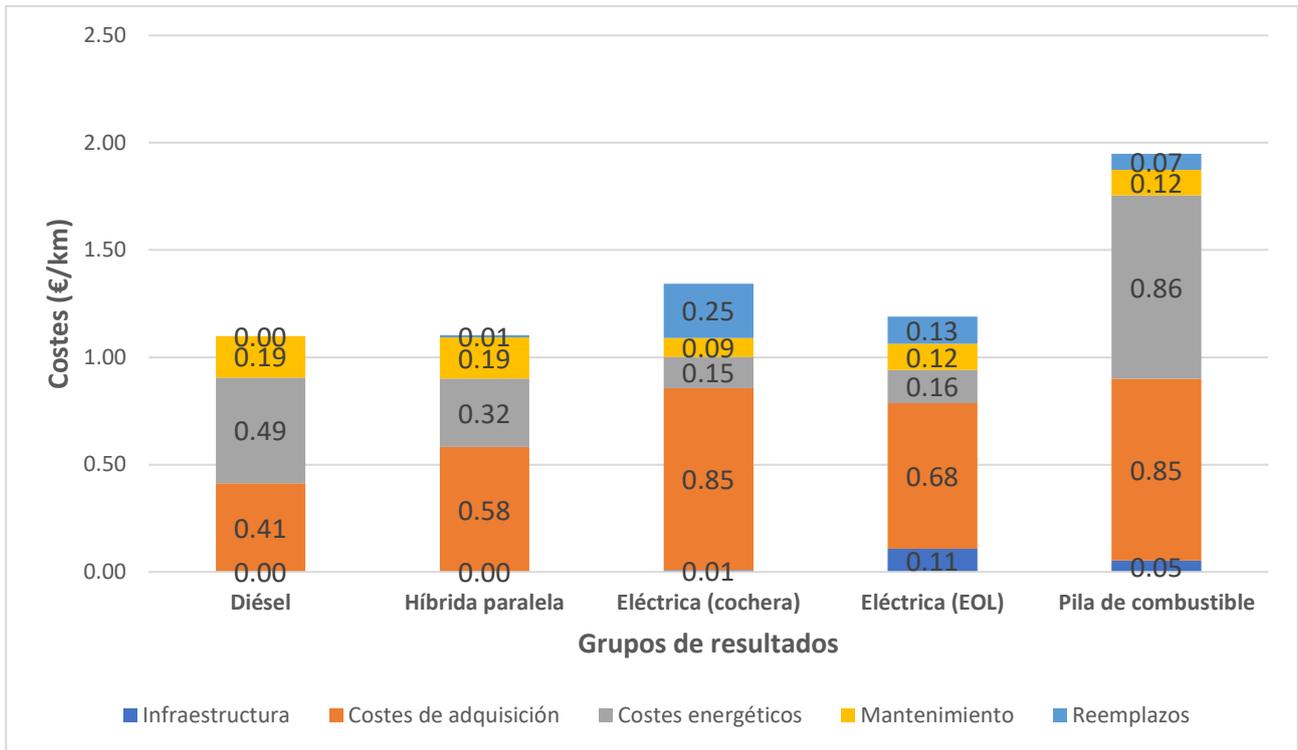


Figura 5.1. Comparativa de *lifecycle cost* de los modelos de la línea 467.

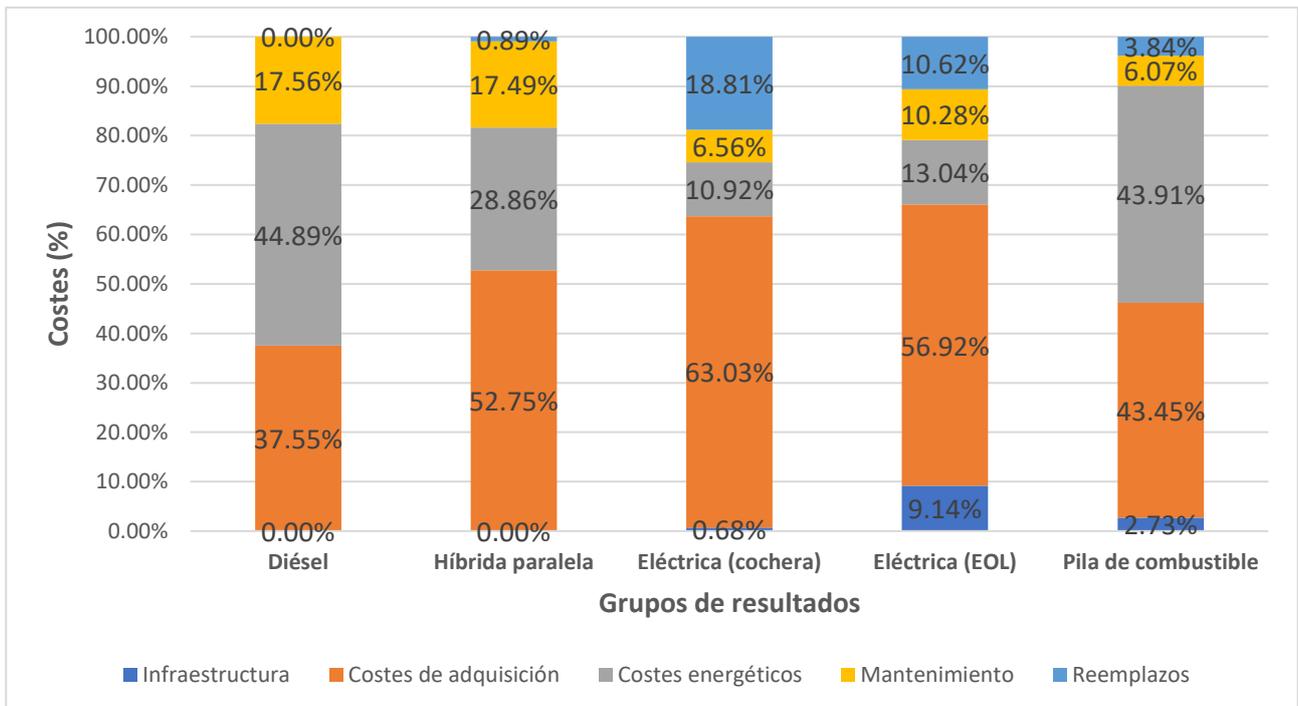


Figura 5.2. Comparativa porcentual del *lifecycle cost* de los modelos de la línea 467.

En cuanto a las opciones eléctricas, se dispone de dos estrategias viables para prestar servicio en la ruta (carga en cochera y *EOL*), ambas con emisiones reducidas comparadas con la arquitectura híbrida. Comparando costes, en la Figura 5.1 se aprecia que la estrategia de carga *EOL* presenta una clara ventaja frente a la estrategia de carga en cochera, ya que permite reducir los costes de adquisición comparado con esta, incluso teniendo en cuenta la adquisición de infraestructura. Es preciso destacar que este coste de infraestructura no tiene en cuenta el coste de la obra civil requerida, ya que este es un valor muy variable según la ubicación. Si este coste es considerable, las tendencias podrían verse afectadas notablemente.

Adicionalmente, la estrategia *EOL* permite reducir los costes de los reemplazos de batería, como se ve en las Figuras 5.1 y 5.2, especialmente notables en este caso, al tratarse de una flota de considerable tamaño.

Ambas reducciones de coste resultan en una alternativa competitiva en *lifecycle cost*, incluso comparado a las configuraciones diésel e híbrida. Si se tiene en cuenta la posible venta de vehículos y baterías, sumado a menores costes sociales (como se ve en la Figura 5.4), el coste total de la estrategia *EOL* es de 1,11 €/km, muy similar al resultado final de las arquitecturas híbrida y diésel, como muestra la Figura 5.3.

Aunque no sea apreciable en la Figura 5.1, la estrategia *EOL* también tiene un menor consumo energético por vehículo. El coste energético total es mayor en este caso, comparado a la estrategia de carga en cochera, debido a la necesidad de tener mayor potencia contratada.

De no poder implementarse esta arquitectura, la estrategia de carga en cochera es también una opción a considerar, ya que se ha probado en los apartados anteriores que es una estrategia factible en esta línea con la tecnología actual. El principal problema es el alto coste de adquisición inicial, sumado al elevado coste en el que se incurre al reemplazar las baterías de una flota de vehículos de este tipo.

Como en el caso híbrido, esta podría ser una opción factible si la empresa de transporte puede realizar desembolsos considerables al adquirir sus nuevas flotas, pero también demanda que la nueva flota sea de bajo coste de operación y mantenimiento, cosa en la que esta configuración destaca sobre todas las demás. Claro está, esta afirmación sólo es válida durante los primeros años; el coste de las baterías nuevas también forma parte del mantenimiento de esta flota, por lo que la empresa debe estar dispuesta a realizar grandes desembolsos en un plazo de 6 años, pudiendo reducir los costes al mínimo entre la adquisición y el año de compra de reemplazos. Por otra parte, si el fabricante entra en un acuerdo con el operador e incluye el coste de estos reemplazos en el de la adquisición de la flota, el coste en €/km se reduce considerablemente, incluso pudiendo pasar a ser una opción de menor coste que la estrategia *EOL*.

Por último, se estudia una configuración FCEB, aunque su simulación económica fue realizada con datos aproximados y sin referencia de operaciones reales de este tipo de flotas. Llama la atención el alto *lifecycle cost* de esta arquitectura, como se ve en la Figura 5.1, que se debe a dos factores principales: el alto coste del vehículo (para el que se ha tomado el mismo precio que el vehículo eléctrico de estrategia de carga en cochera, como suposición, ya que se carece de precios de fabricantes) y el alto coste del hidrógeno (para el que se usó un valor de 14 €/kg, basado en una propuesta de TITSA a empresas de suministro). Esto demuestra uno de los principales problemas de la tecnología de pila de combustible, y es el bajo grado de madurez que esta presenta; aún tiene costes muy elevados tanto en adquisición como en operación debido a su baja implantación, y la baja densidad energética por volumen del hidrógeno, sumado a las ofertas actuales de motorización, dificulta su aplicación en rutas distintas a las de tipo urbano o interurbano con bajo gradiente y recorrido total.

A estos problemas se añade la fuente del hidrógeno consumido, ya que este puede ser producido a partir de combustibles fósiles en procesos contaminantes, lo que causaría que esta arquitectura crease más problemas medioambientales que los que supuestamente resuelve. Por otra parte, si este hidrógeno ha de ser obtenido mediante energía renovable, se requeriría una gran implantación de generación renovable en la red eléctrica de la isla, lo que demanda una inversión muy considerable en nuevos centros de generación. Es por ello por lo que no se han calculado las emisiones de CO₂ de esta flota, dado que se desconoce el origen del hidrógeno a emplear en una hipotética primera operación con este tipo de vehículos.

En definitiva, la opción de una flota FCEB es aún lejana, y se necesitaría disponer de una fuente de hidrógeno barato y renovable para que esta fuese competitiva en la línea 467, además de una reducción en los costes de adquisición, que pueden venir dados por una mayor implantación de esta arquitectura en el mercado de autobuses, si resulta ser más efectiva que un vehículo híbrido o puramente eléctrico. Por otra parte, es aconsejable observar la evolución de esta arquitectura antes de programar su implementación, dado que esta aún se halla en los primeros estadios de su desarrollo, y la gama de vehículos ofertados por las principales marcas no abarcan todas las posibles situaciones de trabajo.

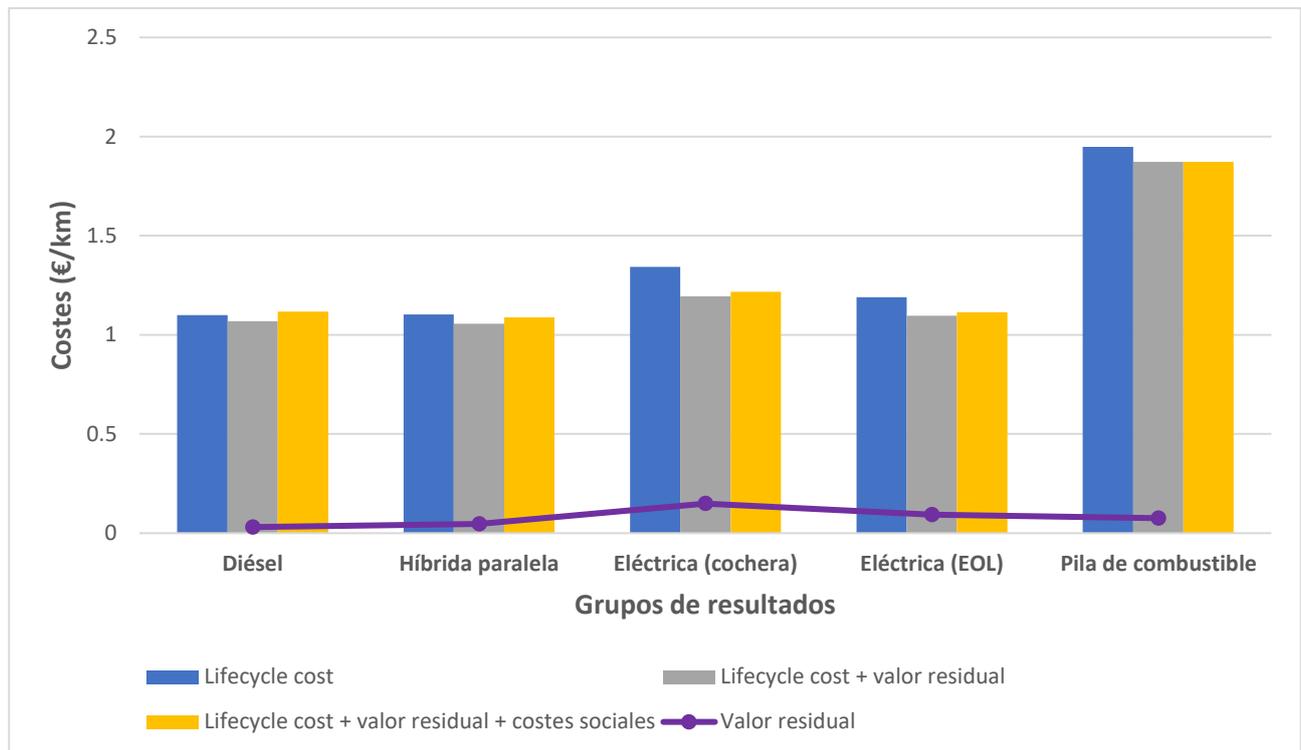


Figura 5.3. Comparativa de costes totales de operación de los modelos de la línea 467.

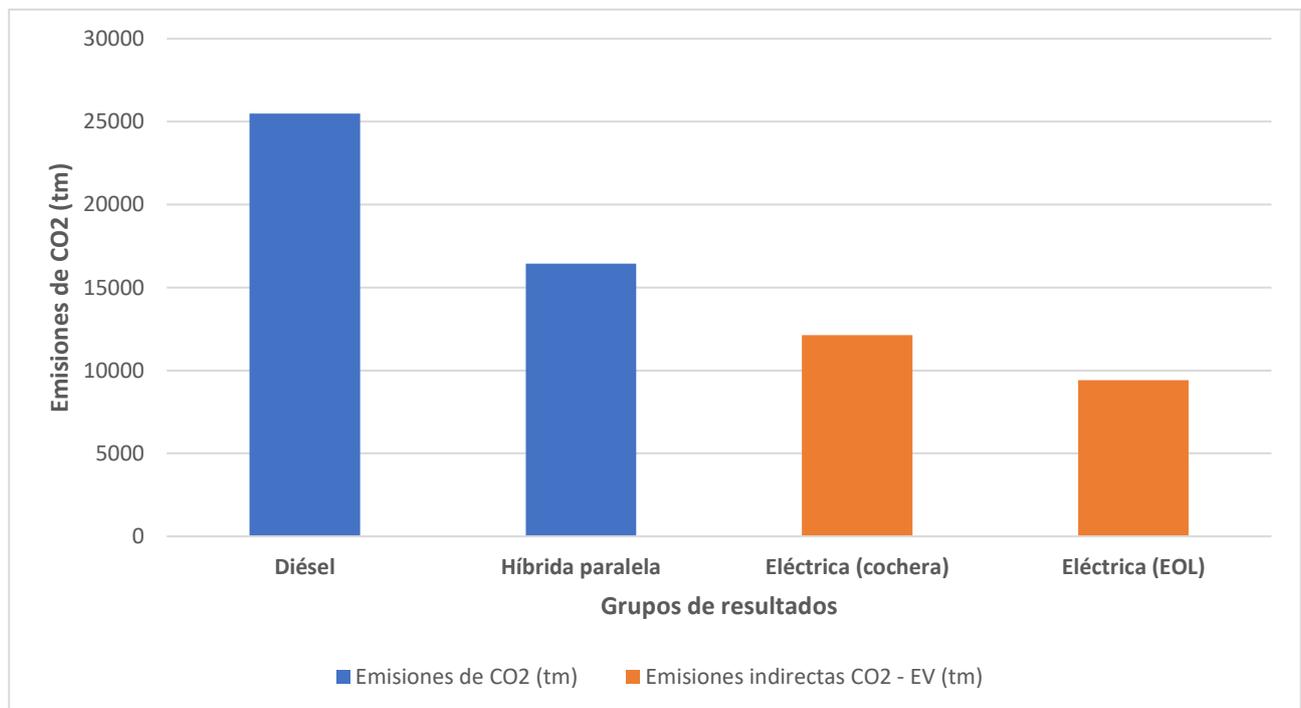


Figura 5.4. Comparativa de emisiones de CO₂ de los modelos de la línea 467.

5.2 Línea 020

Esta línea es especialmente interesante, dado que es difícil encontrar un recorrido con una dicotomía tan marcada entre sus viajes de ida y vuelta, marcando el primero la mayor parte del consumo en la línea, y en la segunda, el gran potencial de regeneración presente en el descenso a Santa Cruz.

Como en el caso de la línea 467, en la Figura 5.5 se aprecia que las arquitecturas diésel e híbrida presentan valores de *lifecycle cost* similares, aunque en este caso, es evidente que la flota híbrida es ligeramente más costosa que el equivalente completamente diésel, en concreto, 0,03 €/km más, debido principalmente a tres factores: el incremento de gastos en reemplazos de baterías, el coste de adquisición más elevado de la flota, y la insuficiente reducción en los costes energéticos, debidos a una ruta que no permite explotar el potencial de la tecnología híbrida.

Esta línea, con solo dos paradas intermedias (La Laguna y el C.C. Meridiano, esta última dependiendo del sentido del recorrido) y cuatro paradas en total, que hace la mayor parte de su recorrido en la Autopista del Norte (TF-5) a una alta velocidad media, más bien favorece a la arquitectura diésel, al permitir que trabaje en un punto de operación con alto rendimiento. Es por esto que tampoco se logra una reducción en las emisiones de CO₂ tan significativa como la obtenida en la línea 467, como se ve en la Figura 5.8, con un valor de 8,51 kilotoneladas métricas para la flota diésel, comparado con 7,19 kilotoneladas métricas para la híbrida; una reducción de 1,32 kilotoneladas métricas o 15,51% sobre las emisiones de la flota diésel.

Esta reducción en emisiones, aunque menor que en el caso de la línea 467, permite minimizar la huella medioambiental de esta flota a un coste muy similar al de una flota diésel, ya que, teniendo en cuenta la venta de vehículos y baterías, además de los costes sociales, esta opción es solo 0,02 €/km más cara que la flota diésel equivalente. Si se penalizaran más severamente las emisiones de CO₂, la ventaja de esta flota aumentaría. Se puede esperar que, en el futuro, los costes de adquisición de este tipo de vehículo se reduzcan gracias a su mayor implantación, en cuyo caso la ventaja de una flota de estas características sería aún más patente.

En cuanto a las opciones completamente eléctricas, en este caso solo se dispone de una flota con carga *EOL*, siendo la única de las configuraciones discutidas inicialmente capaz de realizar el servicio en esta línea con la tecnología actual. Comparando su *lifecycle cost* con el de las flotas analizadas previamente, se aprecia cómo esta tiene un coste mayor, de 1 €/km, frente a los 0,79 €/km y 0,82 €/km de las arquitecturas diésel e híbrida, respectivamente. Este salto en el *lifecycle cost* se debe principalmente a tres factores:

- El elevado coste de adquisición de la flota: como era de esperar, el vehículo eléctrico es más caro que sus contrapartes diésel e híbrida; en este caso, 200

k€ más caro que el híbrido, lo que marca un coste de adquisición 50% superior aproximadamente.

- La necesidad de adquirir infraestructura: se requieren dos cargadores tipo pantógrafo, de alta potencia, en el Intercambiador de Santa Cruz. Aunque son la mitad de los necesarios en la flota planteada para la línea 467, su coste se reparte entre una flota mucho menor, lo que lleva a que tenga un papel más destacado en el cálculo del *lifecycle cost*. Por otra parte, la ubicación de estos cargadores permitiría que se compartieran con otras rutas, algo que no se ha considerado en esta simulación, lo que reduciría los costes de infraestructura asociados a esta.
- La adición de los reemplazos de batería: como en todas las configuraciones eléctricas en este análisis, se realiza un cambio de baterías a los 6 años con el fin de mantener el desempeño óptimo de los vehículos. Aunque este coste no es el más elevado en la estrategia *EOL*, no puede despreciarse en absoluto.

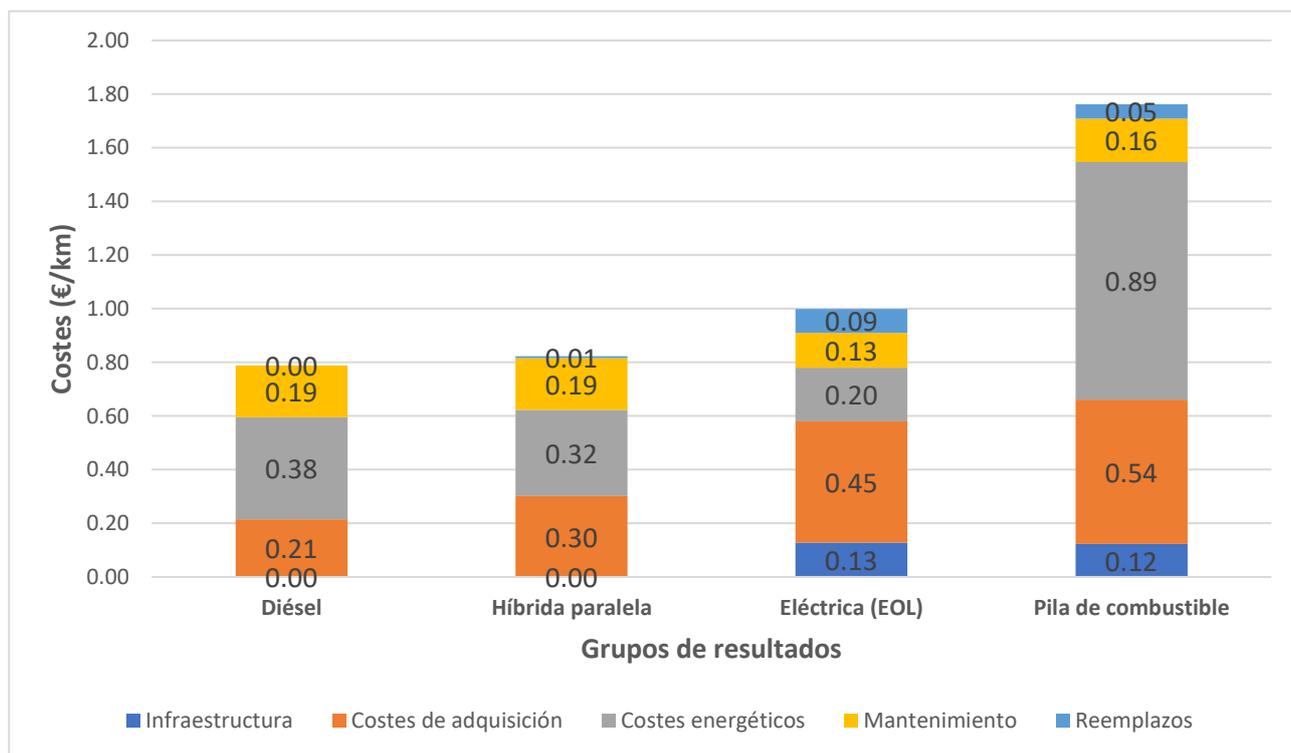


Figura 5.5. Comparativa de *lifecycle cost* de los modelos de la línea 020.

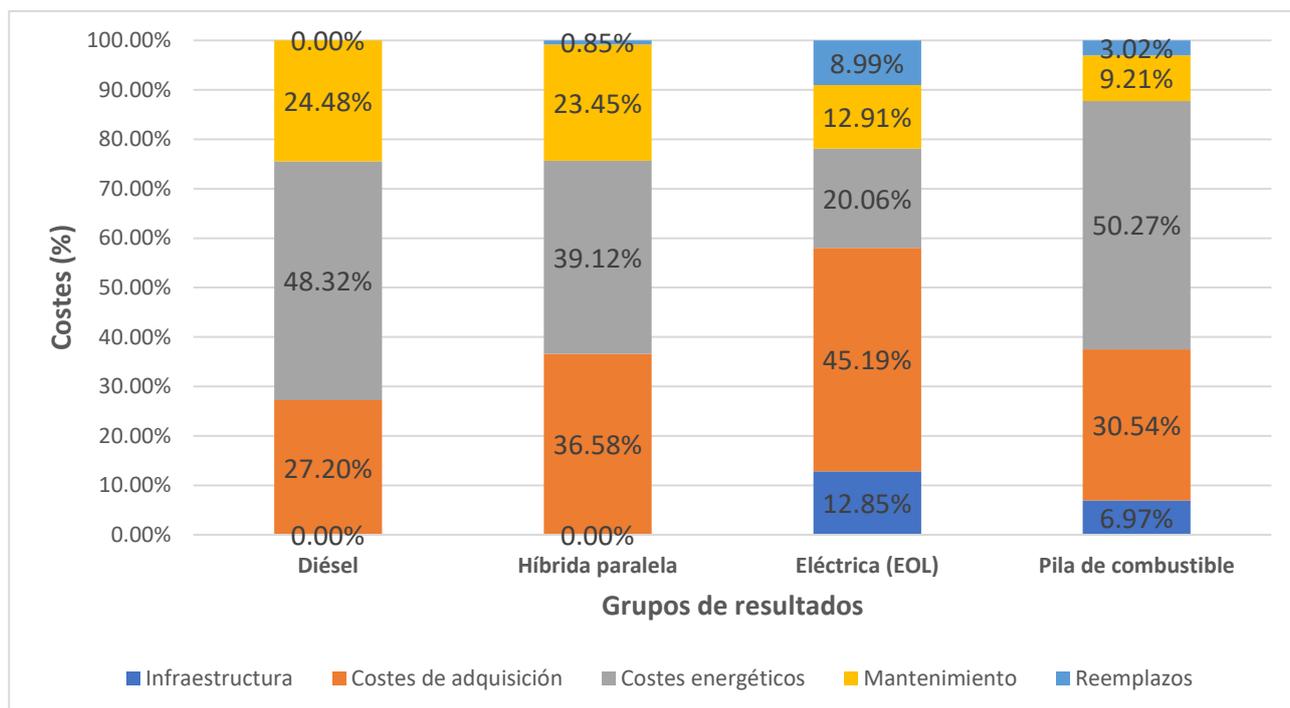


Figura 5.6. Comparativa porcentual del *lifecycle cost* de los modelos de la línea 020.

En cuanto a los costes energéticos, como puede esperarse, se reducen considerablemente, pero no lo suficiente como para compensar el coste elevado de adquisición, reemplazos e instalaciones. Por otra parte, el coste de mantenimiento general también se reduce, en consonancia con lo mostrado en artículos relacionados [15] pero a la vez se añade el mantenimiento de la infraestructura de carga, lo que amortigua el efecto de esta reducción de costes.

Sin embargo, la principal ventaja de esta configuración puede verse en la Figura 5.8, en sus emisiones de CO₂; de las tres flotas analizadas en cuanto a efectos medioambientales, es la que conlleva menores emisiones (en este caso indirectas), con un valor de 3,75 kilotoneladas métricas a lo largo de su vida útil: una reducción del 55,97% comparado con la flota diésel. Por otra parte, la venta del vehículo y las baterías, sumado a la menor penalización medioambiental, resultarían en un coste de 0,93 €/km, más cercano a las configuraciones diésel e híbrida, como se ve en la Figura 5.7. Esta configuración podría ser la más económica si se penaliza con altos precios las emisiones de CO₂, en cuyo caso las arquitecturas con motores de combustión interna se verían perjudicadas.

Por último, se analiza una flota de modelos FCEB. Como se vio en la línea 467, esta arquitectura aún presenta un elevado grado de inmadurez, siendo sus principales

problemas el elevado coste de adquisición de la flota y los altos costes del hidrógeno (y la cuestión de su procedencia) visibles en las Figuras 5.5 y 5.6. Estos problemas se suman a la necesidad de construir infraestructura específica para el almacenamiento de hidrógeno, y resultan en un *lifecycle cost* de más del doble de una flota diésel (1,76 €/km frente a 0,79 €/kg). Si se agregase el coste de obra civil para la hidrogenera, que no se ha considerado en este análisis, el *lifecycle cost* ascendería aún más. Como en el caso de la configuración *EOL*, no se ha considerado que la hidrogenera se pueda compartir con otras flotas, lo que, dado su hipotética ubicación en Santa Cruz, es una opción factible. En ese caso, los costes de infraestructura podrían reducirse al ser repartidos entre varios vehículos.

Por lo tanto, esta configuración de flota es impracticable, por el momento; se puede esperar que, al igual que para la ruta 467, los precios de vehículo y combustible desciendan lo suficiente para convertir a esta configuración en una alternativa competitiva con las ofertas eléctricas al menos, lo que permitiría a un posible operador beneficiarse de sus ventajas (repostaje sencillo y rápido, lo que permite aumentar la autonomía del vehículo, coste de infraestructura ligeramente inferior y de mayor sencillez, bajos costes de mantenimiento general).

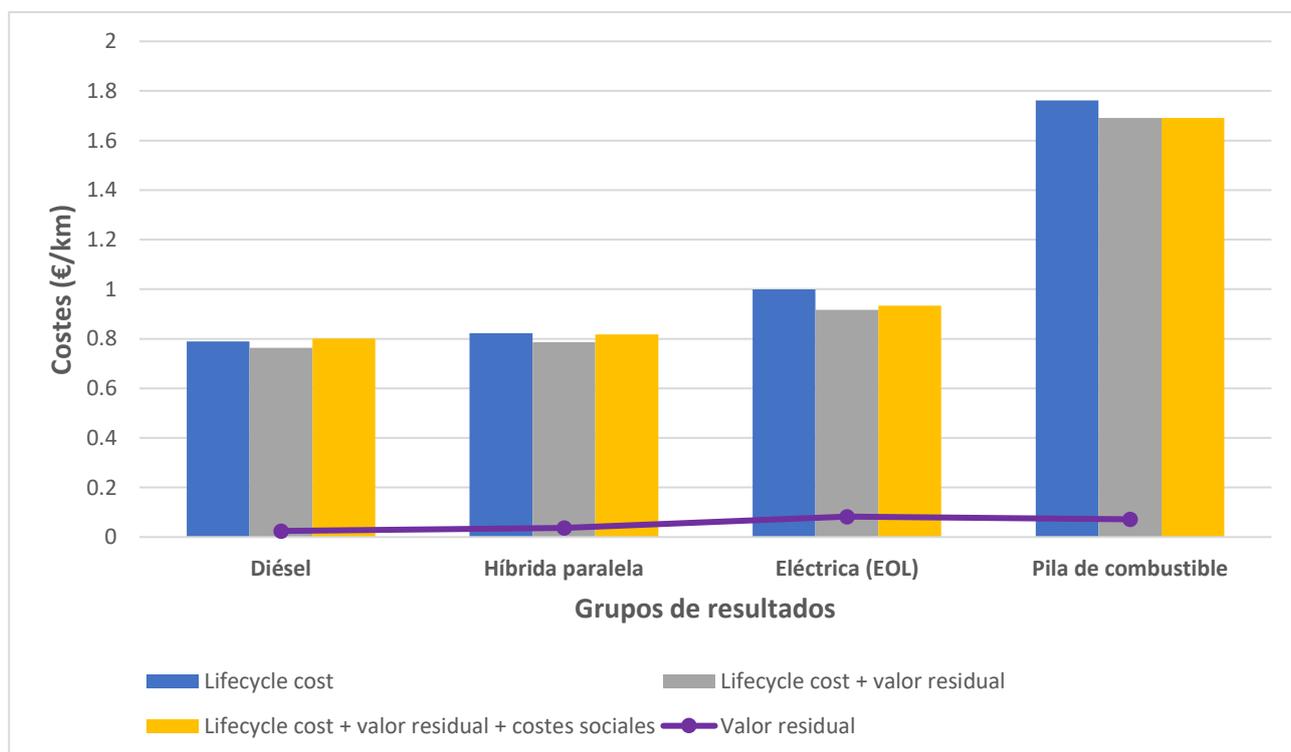


Figura 5.7. Comparativa de costes totales de operación de los modelos de la línea 020.

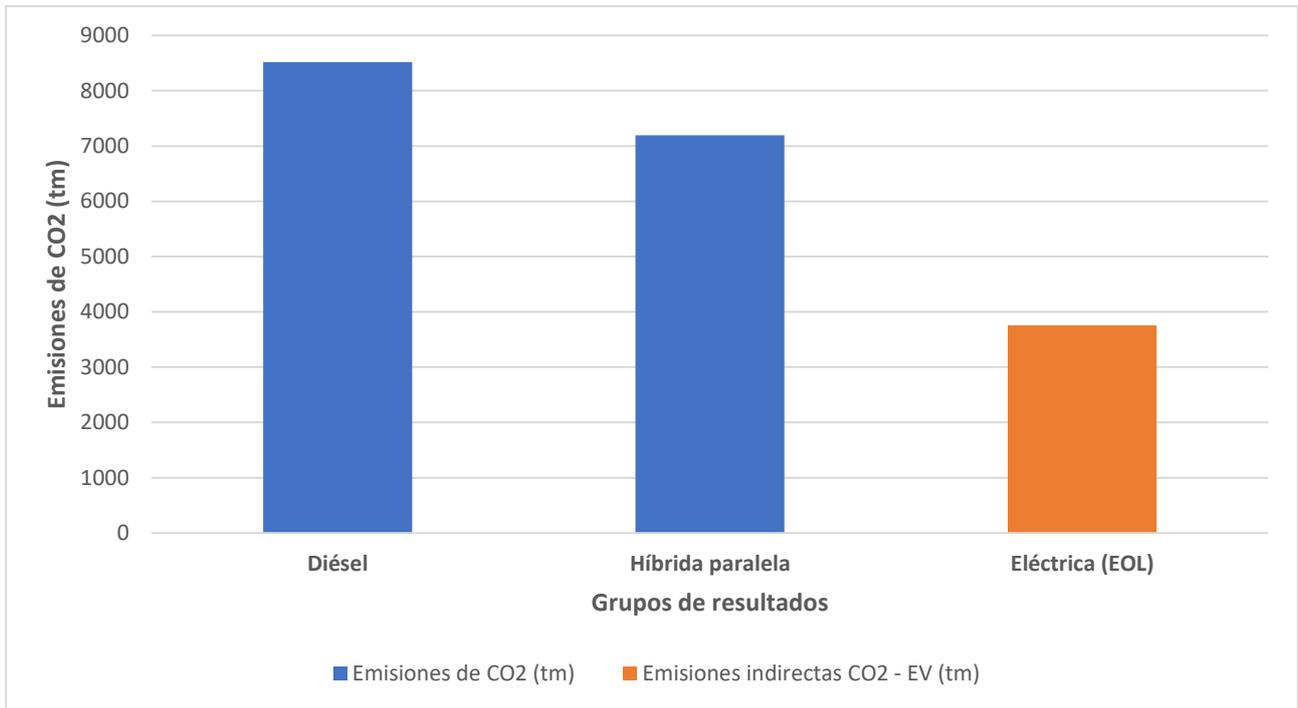


Figura 5.8. Comparativa de emisiones de CO₂ de los modelos de la línea 020.

6 CONCLUSIONES

En general, se ha podido observar cómo la implementación de nuevas arquitecturas propulsivas permite reducir el impacto medioambiental de las flotas de transporte en las dos rutas estudiadas, a cambio de un ligero sobrecoste.

En la línea 467, se concluye que la arquitectura híbrida presenta varias ventajas sobre el resto de las opciones:

- *Lifecycle cost* bajo. Es la opción alternativa al diésel más barata, con un valor de 1,10 €/km, presentando claras ventajas medioambientales sobre esta, sumado a menores gastos de operación, ambas gracias a su menor consumo.
- Sin necesidad de nuevas infraestructuras. Al contrario que las arquitecturas eléctrica y FCEB, esta configuración funciona con las infraestructuras ya existentes para la flota diésel que realiza el servicio actualmente.
- Bajo coste de reemplazos. Las baterías son de baja capacidad, lo que redundaría en un menor gasto a la hora de reemplazarlas.

Estas ventajas la hacen especialmente apropiada a la hora de su implementación por un operador de transporte. Sin embargo, una de las principales desventajas de los vehículos diésel, el uso de combustibles fósiles, sigue presente en esta configuración.

Es por ello que la segunda opción más ventajosa es la eléctrica en estrategia *EOL*, ya que permite reducir los costes de adquisición de una flota eléctrica al mínimo; aún añadiendo los costes de infraestructura, el coste total de adquisición, de 10,33 M€, es inferior al de una flota eléctrica con carga en cochera, y el *lifecycle cost*, de 1,19 €/km, también se reduce en comparación a esta, aunque es algo superior al de la arquitectura híbrida. La principal ventaja de esta configuración, además de ser la opción de menor *lifecycle cost* de las arquitecturas de cero emisiones TTW, es la posibilidad de reducir sus emisiones de CO₂ indirectas mediante una mayor implantación de centros de generación de energía renovable en la red eléctrica de la isla de Tenerife, lo que reduciría su intensidad de carbono. Esta ventaja, que no comparte la propuesta híbrida, hace que esta configuración pueda ser aún más respetuosa con el medio ambiente, y más apropiada para una futura flota, ya que una reducción de la intensidad de carbono de la red sumado a un descenso en los precios de estos vehículos, fruto de su mayor implementación, harían de esta configuración una opción a considerar en un futuro reemplazo.

La implementación futura de costes sociales sobre las emisiones de CO₂ también remarcarían la ventaja de esta arquitectura sobre las otras, ya que su consumo, en virtud de su menor peso, es menor al de un vehículo eléctrico de carga en cochera, lo que reduce sus emisiones indirectas.

En cuanto a la línea 020, se aprecia la dificultad de ofrecer, actualmente, una propuesta de flota con un *lifecycle cost* inferior al obtenido por una flota diésel; pero en el marco actual de transición ecológica, aportar una propuesta competitiva se hace necesario. Esta ruta tiene, debido a su perfil de velocidades y gradientes, grandes dificultades para su electrificación con la tecnología actual. Mediante la estrategia *EOL*, se ha podido ofrecer una alternativa, aunque considerablemente más cara que su equivalente diésel, con un *lifecycle cost* de 1,00 €/km.

La posible implementación de esta estrategia permitiría ofrecer una alternativa de bajas emisiones al servicio de esta ruta. Estas emisiones, de tipo indirecto, se podrían reducir mediante la implantación de nuevos centros de generación de energía eléctrica por fuentes renovables; incluso se podrían reducir a cero si toda la energía consumida en la isla tuviese fuentes renovables, pero este caso hipotético aún está muy lejos.

En este caso, la opción híbrida también es viable, especialmente gracias a ser la arquitectura alternativa más barata, con un *lifecycle cost* de 0,82 €/km, aunque no aporta beneficios tan marcados en consumo de combustible como el caso de la línea 467. Se logra una reducción del 15,51% en consumo y, por tanto, en emisiones de CO₂, un beneficio que se puede conseguir sin necesidad de invertir en infraestructuras de carga o almacenamiento de combustible nuevas. El principal problema de esta opción consiste en que esta mejora es limitada y no va a aumentar a lo largo de la vida útil del vehículo, dado que no puede beneficiarse de un mayor grado de generación renovable en la red eléctrica. Además, la tecnología híbrida no logrará mayores reducciones en modelos futuros, ya que el perfil de la línea 020 no es apropiado para este tipo de configuraciones.

Para ambas rutas en general, la aplicación de vehículos de pila de combustible es aún una opción lejana, aunque se puede comprobar que la tecnología actual puede dar una propuesta para el servicio de la línea 467, donde se ha empleado un modelo basado en un vehículo disponible comercialmente. El alto coste del combustible y el alto precio de esta tecnología, por no hablar de la incertidumbre en cuanto a estos precios y la procedencia del hidrógeno, desaconsejan la implantación de esta arquitectura a corto-medio plazo, al no ofrecer beneficios algunos en cuanto a costes. Los *lifecycle cost* de las flotas para las líneas 467 y 020, de 1,95 y 1,76 €/km, respaldan estas conclusiones.

En definitiva, los resultados de este trabajo recomiendan implementar vehículos híbridos paralelos o eléctricos con estrategias de carga tipo *EOL*: estos últimos cuentan con la ventaja de que su infraestructura de carga puede emplearse, si existe un correcto mantenimiento, para las siguientes flotas que la sucedan, reduciendo los costes totales de estas.

Los vehículos híbridos, en el marco actual de cambio del sector del transporte en la Unión Europea, pueden verse como “vehículos de transición” a una electrificación

completa. Esto es evidente especialmente en zonas que tardarán más en adaptarse a esta tendencia, como es el caso de la isla de Tenerife en particular y el Archipiélago Canario en general. Mediante este trabajo, se ha mostrado que obtienen beneficios claros sin elevar excesivamente los costes.

En cuanto a los vehículos eléctricos de tipo carga *EOL*, su implementación es factible, siempre que se estudien los costes a más largo plazo. Esto viene dado por el alto coste de sus infraestructuras, que deben ser aprovechadas durante más tiempo que el servicio de los propios vehículos, lo que requeriría un estudio concreto de estas arquitecturas, algo que se sale del alcance de este trabajo.

Para cerrar este apartado, se destaca el valor de este trabajo como una guía sobre el estudio de vehículos de transporte de pasajeros y su implementación en la isla de Tenerife, ya que se ha mostrado la obtención, a partir de los datos obtenidos por TITSA o tomados de la información publicada por los fabricantes, de modelos fiables y representativos de los vehículos reales. Añadido a esto, la herramienta de simulación económica desarrollada para su uso en este trabajo se perfila como un programa de gran utilidad para operadores de transporte e investigadores por igual, permitiendo realizar estudios y comparativas económicas de forma sencilla y rápida, con una curva de aprendizaje no muy pronunciada y con una interfaz intuitiva y de fácil manejo. Es de destacar que este trabajo puede servir como “Manual del usuario” de esta herramienta, reforzando la importancia de este.

7 CONCLUSIONS

Generally, it can be seen how the introduction of new, alternative vehicle configurations allows for a reduction of the environmental impacts of the fleets in the two cases shown here, in exchange for a small cost hike.

In Line 467, the hybrid configuration is shown to have various advantages over the other options:

- Low lifecycle cost. It is indeed the cheapest alternative to a diesel fleet, with a cost of 1,10 €/km, showing clear environmental advantages along with reduced operating expenses, all thanks to its reduced fuel consumption.
- No need for additional infrastructure. This configuration works with the existing infrastructure for diesel buses, as opposed to the BEB and FCEB configurations which do need new infrastructure.
- Low replacement costs. Hybrid vehicles' batteries are of low capacity, which means lower costs when the need arises to replace them.

These advantages make it a good fit to serve in this route. Yet it has one of the main disadvantages of diesel buses, the use of fossil fuels as its energy source.

That's why the second most advantageous option is an electric fleet configured for *EOL* charging, as it allows for the reduction of acquisition costs to a minimum; even adding the greater infrastructure costs of this configuration, the resulting acquisition cost, of 10,33 M€, is inferior to that of a depot charging electric fleet, and its lifecycle cost, of 1,19 €/km, is reduced as well, even though it is slightly more expensive than that of a hybrid fleet. The main advantage of this configuration, added to being the one with the smallest lifecycle cost of those configurations with zero direct emissions, is the possibility to reduce its indirect CO₂ emissions through a greater implementation of renewable energy generation in the island of Tenerife's electric grid, which would reduce its carbon intensity. This advantage, which is not shared by its hybrid counterpart, makes this option much more environmentally friendly, and more appropriate for a future fleet, as a reduction in grid carbon intensity coupled to a drop in electric vehicle prices, as a consequence of their greater implementation, would make this configuration an option to consider for an upcoming replacement.

A future implementation of social costs over CO₂ emissions would also underline the advantages of this configuration over the others, as its energy consumption, because of its lower weight, is less than that of a depot charging electric bus, which reduces its indirect emissions.

In Line 020, it's difficult nowadays to provide an alternative bus fleet with a lower lifecycle cost than that of a diesel fleet; yet, in the current trend of change to more ecologic ways, it is necessary to give such an option. This route shows, due to its

velocity and gradient profiles, great difficulties for its electrification with current technology. Using an *EOL* charging strategy, it is possible to provide a working alternative, though considerably more expensive than its diesel equivalent, with a lifecycle cost of 1,00 €/km.

The implementation of this strategy would offer a low-emission alternative fleet for service in this route. Its indirect emissions could be reduced by the introduction of new renewable energy generation facilities; they could even be reduced to zero if all energy consumption in the island came from renewable sources, but this hypothetical case is still far away.

In this case, the hybrid option is still viable, thanks to being the cheapest alternative to a diesel fleet, with a lifecycle cost of 0,82 €/km, even though it doesn't provide as great a benefit in fuel consumption as in Line 467, achieving a reduction of 15,51% in fuel consumption, and therefore in CO₂ emissions. This can be achieved with no need to invest in new charging or fuel storage infrastructure. The main problem of this configuration resides in the limited nature of this improvement, which won't increase during the lifetime of the vehicle, as it cannot benefit from a larger renewable share of energy generation in the electric grid. Furthermore, hybrid technology won't be able to provide much further improvement in future models, as the profile of Line 020 does not suit these kinds of vehicles.

For both lines, the implementation of fuel-cell electric vehicles is still a far cry from becoming a reality, even though it has been shown that current technology can provide a solution for Line 467, where the tested model is based on a commercially available model. Its high fuel costs and great overall cost, not to mention the uncertainty about these prices and the source of the hydrogen, are discouraging facts which discard this configuration from short- to mid-term implementation, as there is no benefit whatsoever in terms of costs. The lifecycle cost results of these fleets for lines 467 and 020, 1,95 and 1,76 €/km respectively, back up these statements.

In conclusion, the results shown in this thesis encourage the implementation of hybrid or *EOL* charging electric vehicles: the latter have the added advantage of the possible reuse of their charging infrastructure, assuming correct maintenance, by newer fleets, reducing their total cost.

Hybrid vehicles, in the current climate of change in the European Union transportation field, can be seen as "transition vehicles" to a full electrification. This is especially evident in areas which will need more time to adapt to this trend, as is the case with the island of Tenerife in particular, and the Canary Islands Archipelago in general. This thesis has shown that these configurations can obtain clear benefits without a steep increase in cost.

The implementation of *EOL* charging electric vehicles is feasible, if its longer-term costs are studied as well. This is due to the high cost of the required infrastructure,

which needs to be used for a longer time than the vehicles themselves, which requires a concrete study on these architectures, one that is beyond the scope of this thesis.

To sum up, it is fair to point out the importance of this thesis as a guide on the study of passenger transport vehicles and their implementation in the island of Tenerife, as it has shown the development of reliable and accurate vehicle models from data given by TITSA or taken from manufacturer information. Added to that, the economic simulator program developed for this thesis has proved itself as a tool of potentially great value for transportation businesses and researchers alike, allowing for the easy making of economic studies and comparisons. It has a gentle learning curve, and its interface is intuitive and easily operated. This thesis can be seen as a “User’s manual” of the program, underlining its own importance.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] European Commission, “Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL amending Regulation (EU) 2019/1242 as regards strengthening the CO₂ emission performance standards for new heavy-duty vehicles and integrating reporting obligations, and repealing Regulation (EU) 2018/956” [Online] Disponible en: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2023:88:FIN>
- [2] K. Kivekäs, A. Lajunen, J. Vepsäläinen, K. Tammi, “City Bus Powertrain Comparison: Driving Cycle Variation and Passenger Load Sensitivity Analysis” *Energies*, Vol. 11, Issue 7, 4 julio 2018, <https://doi.org/10.3390/en11071755>
- [3] S. Cheng, L. Xu, J. Li, C. Fang, J. Hu, M. Ouyang, “Development of a PEM Fuel Cell City Bus with a Hierarchical Control System”. *Energies*, Vol. 9, Issue 6, mayo 2016, <https://doi.org/10.3390/en9060417>
- [4] F. Ueckerdt, C. Bauer, A. Dirnaichner, J. Everall, R. Sacchi, G. Luderer, “Potential and risks of hydrogen-based e-fuels in climate change mitigation”. *Nature Climate Change*, 6 mayo 2021, <https://doi.org/10.1038/s41558-021-01032-7>
- [5] A. Aamodt, K. Cory, K. Coney, “Electrifying Transit: A Guidebook for implementing battery electric buses”. National Renewable Energy Laboratory, Abril 2021. [Online] Disponible en: www.nrel.gov/publications
- [6] Life-cycle costing. European Commission. <<https://ec.europa.eu/environment/gpp/lcc.htm>> Consultada el día 04/07/2023.
- [7] A. Lajunen, “Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 172, enero 2018, pp. 56-67, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066>
- [8] FASTSim: Future Automotive Systems Technology Simulator, <www.nrel.gov/fastsim> Consultada el día 04/07/2023.
- [9] T. Dallman, O. Delgado, L. Jin, R. Minjares, R. Gadepalli, C. A. Cheriyan, “Strategies for deploying zero-emission bus fleets: Route-level energy consumption and driving range analysis” International Council on Clean Transportation (ICCT). [Online] Disponible en: <https://theicct.org/publication/strategies-for-deploying-zero-emission-bus-fleets-route-level-energy-consumption-and-driving-range-analysis/>
- [10] *The Energy and Fuel Data Sheet*, University of Birmingham, Marzo 2011. [Online]. Disponible en: https://www.claverton-energy.com/wordpress/wp-content/uploads/2012/08/the_energy_and_fuel_data_sheet1.pdf

[11] An Introduction to Hydrogen Fuel Cell Electric Vehicles and Refuelling Stations, Cenex, Mayo 2021. <<https://www.cenex.co.uk/app/uploads/2021/05/Intro-to-hydrogen-1.pdf>> Consultada el día 11/07/2023.

[12] C. Baker, M. Moniot, A. Brooker, L. Wang, E. Wood, J. Gonder, “Future Automotive Systems Technology Simulator (FASTSim) Validation Report – 2021” National Renewable Energy Laboratory, Octubre 2021. [Online] Disponible en: www.nrel.gov/publications

[13] Understanding MPG and MPGe, Erik Kountz, <<http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/kountz2/>> Consultada el día 04/07/2023.

[14] A. D. Goncalves De Jesús, “Análisis del potencial del hidrógeno para reducir las emisiones de CO₂ en el parque automovilístico de Tenerife” Trabajo Fin de Grado, Dept. Ing. Ind., Univ. de La Laguna, La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Sept. 2021.

[15] H. Kim, N. Hartmann, M. Zeller, R. Luise, T. Soylyu, “Comparative TCO Analysis of Battery Electric and Hydrogen Fuel Cell Buses for Public Transport System in Small to Midsize Cities”. *Energies*, Vol. 14, Issue 14, Julio 2021, <https://doi.org/10.3390/en14144384>

[16] *Impuesto especial sobre determinados medios de transporte*, Agencia Tributaria, 2015, https://www.agenciatributaria.es/static_files/AEAT/Aduanas/Contenidos_Privados/Impuestos_especiales/estudio_relativo_2015/7_MEDIOS_TRAN.pdf

[17] *Histórico Carburantes*. Gobierno de Canarias. Disponible en: <https://www.gobiernodecanarias.org/energia/materias/hidrocarburos/carburantes/>.

[18] E.SIOS, Red Eléctrica de España, <www.esios.ree.es> Consultada el día 04/07/2023.

[19] C. Valsecchi, P. ten Brink, S. Bassi, S. Withana, M. Lewis, “Environmentally Harmful Subsidies (EHS): Identification and Assessment”, IEEP, Noviembre 2009.

[20] H2.City Gold, CaetanoBus, <<https://caetanobus.pt/es/buses/h2-city-gold/>> Consultada el día 04/07/2023.

[21] O. García-Afonso, “Impact of powertrain electrification on the overall CO₂ emissions of intercity public bus transport: Tenerife Island test case”. *Journal of Cleaner Production*, Vol. 412, 1 agosto 2023, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137365>

[22] Vehículos MAN España, <<https://www.man.eu/es/es/pagina-de-inicio.html>>, Consultada el día 04/07/2023.

[23] “Hydrogen” Solaris Vehículos, <<https://www.solarisbus.com/es/vehiculos/zero-emissions/hydrogen>> Consultada el día 04/07/2023.

[24] L. Eudy, M. Post, “BC Transit Fuel Cell Bus Project: Evaluation Results Report” National Renewable Energy Laboratory, Febrero 2014. [Online] Disponible en: www.nrel.gov/publications

[25] R. Nekkers, F. Ex, J. van Beckhoven, “Hydrogen buses on the Veluwe: Interim report of the deployment of 2 hydrogen buses for passenger transport at Keolis, September 2018 – March 2020” Keolis, Abril 2020. [Online] Disponible en: https://www.h2nodes.eu/images/docs/20200416_status_verslag_2BP_Hydrogen_buses_on_the_Veluwe_Eng_.pdf

[26] S. Pardhi, M. El Baghdadi, O. Hulsebos, O. Hegazy, “Optimal Powertrain Sizing of Series Hybrid Coach Running on Diesel and HVO for Lifetime Carbon Footprint and Total Cost Minimisation”. *Energies*, Vol. 15, Issue 19, Septiembre 2022, <https://doi.org/10.3390/en15196974>

[27] V. Nair, S. Stone, G. Rogers, S. Pillai. “Medium and Heavy-Duty Electrification Costs for MY 2027-2030 Final Report”, Environmental Defense Fund, 2022. [Online] Disponible en: https://blogs.edf.org/climate411/wp-content/blogs.dir/7/files/2022/02/EDF-MDHD-Electrification-v1.6_20220209.pdf

[28] N. Hoofman, M. Messagie, T. Coosemans, “Analysis of the potential for electric buses” European Copper Institute, 2019. [Online] Disponible en: <https://leonardo-energy.pl/wp-content/uploads/2019/02/Analysis-of-the-potential-for-electric-buses.pdf>

[29] L. Lanz, B. Noll, T. S. Schmidt, B. Steffen, “Comparing the levelized cost of electric vehicle charging options in Europe”. *Nature Communications*, 8 septiembre 2022, <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32835-7>

[30] *Anuario Energético de Canarias, Año 2022*. Instituto Canario de Estadística (ISTAC) [Online] Disponible en: <http://www.gobiernodecanarias.org/istac/estadisticas/sectorsecundario/industria/energia/C00052D.html>

9 ANEXO I: CREACIÓN DE MODELOS EN FASTSIM

Para la implementación de los autobuses estudiados como modelos en FASTSim, inicialmente se debe crear un archivo de perfil, creado mediante el botón “Save as” en la pestaña “*VehicleIO*”. Para la creación de tales perfiles, lo más conveniente es escoger un vehículo, de los ya incluidos como ejemplos en FASTSim, que por configuración propulsiva o estructural sea afín al modelo que se quiera crear. Para los modelos creados, las bases fueron las siguientes:

- Para los modelos de propulsión convencional, se tomó como base el modelo “*Line Haul Conv*” que corresponde a un camión genérico de tamaño medio, movido por un motor diésel. Esta configuración es muy semejante a la de un autobús tanto en estructura (distancia entre ejes, tamaño de ruedas, masa) como en arquitectura propulsiva (un motor diésel que alimenta al eje trasero, aunque el motor debe desplazarse atrás) lo que permitió reducir el número de cambios necesarios.
- Para los modelos de arquitectura híbrida paralela, se configura en base al Ford C-Max de 2016, cuya simulación se incluye en FASTSim. Este es un turismo familiar que comparte configuración propulsiva con los modelos a desarrollar. Para este caso, al igual que para los que siguen, la configuración estructural estaba muy lejana del modelo deseado, por lo que se tuvieron que modificar los parámetros pertinentes.
- Para los modelos completamente eléctricos, se toma como base el Tesla Model S de 2016, también incluido en FASTSim por defecto. Este vehículo, un sedán de alta gama eléctrico, presenta una configuración de propulsión eléctrica con tracción trasera, al igual que los autobuses a simular.
- Para los modelos basados en propulsión eléctrica alimentados por pila de combustible, se emplea como base el Toyota Mirai de 2018, el primer vehículo de fabricación en serie alimentado por hidrógeno.

Una vez obtenido el archivo con la base del vehículo correspondiente, se comienzan a modificar los parámetros. La primera categoría “*Vehicle*” mostrada en la Figura 9.1, requiere modificar los parámetros “*Drag coefficient*”, “*Frontal area*”, “*Vehicle glider mass*”, “*Wheelbase*” y “*Cargo mass*” principalmente. El parámetro “*Cargo mass*” es inicialmente de 75 kg, la masa del conductor, pues se buscará igualar la masa resultante del modelo a su masa en orden de marcha, o MOM; que consiste en la masa del vehículo con todos los fluidos requeridos para su operación (combustible, lubricante...) sumando la masa del conductor, de 75 kg.

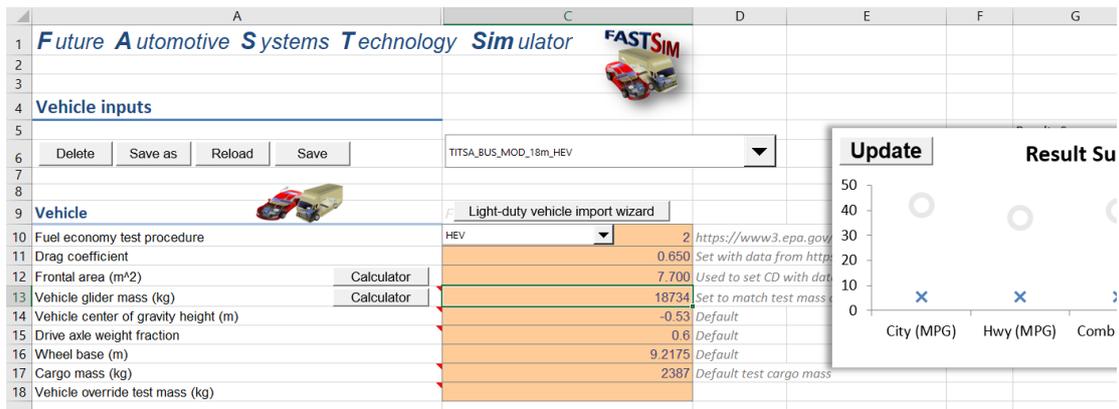


Figura 9.1. Apartado "Vehicle".

A continuación, si el vehículo es diésel, híbrido o de pila de combustible, se debe modificar el conjunto de parámetros del siguiente apartado, "Fuel storage" en concreto, el parámetro "Fuel storage energy". Las mismas condiciones aplican para el apartado "Fuel converter" donde se debe modificar el valor "Fuel converter power". Ambos apartados son visibles en la Figura 9.2.



Figura 9.2. Apartados "Fuel storage" y "Fuel converter".

Si el vehículo cuenta con un motor eléctrico, en el siguiente submenú, “*Motor*” se debe introducir el valor correcto de “*Motor power*”, al igual que en el apartado “*Traction battery*” donde se deben editar los valores “*Battery power*” y “*Battery energy*”, como se ve en la Figura 9.3.

34				
35	Motor			
36	Motor power (kW)		130	https://www3.epa.gov/otaa/tcldata.htm
37	Motor peak efficiency	Show/hide chart	95%	Increased for 2016: previously 93%: 95%
38	Motor time to full power (s)		4	Default
39	Motor controller mass (kg/kW)		0.833	A. Simpson, Cost Benefit Analysis of Plug
40	Motor controller base mass (kg)		21.6	A. Simpson, Cost Benefit Analysis of Plug
41				
42	Traction battery			
43	Battery power (kW)		140.0	https://www3.epa.gov/otaa/tcldata.htm
44	Battery energy (kWh)		25.0	User
45	Battery mass (kg/kWh)		8.0	See ESS Chars worksheet
46	Battery base mass (kg)		75.0	See ESS Chars worksheet
47	Battery round trip efficiency		90.0%	Increased for 2016: previously 95.1% htt
48	Battery life coefficient A (product)		110	VARTA: http://www.ocean.udel.edu/cn
49	Battery life coefficient B (power)		-0.6811	VARTA: http://www.ocean.udel.edu/cn

Figura 9.3. Apartados “*Motor*” y “*Traction battery*”.

En el apartado “*Wheel*” se editan todos los parámetros de igual forma en todos los vehículos, salvo el factor “*Number of wheels*” que es de 4 en los vehículos de 12 m y de 6 en los de 14 y 18 m. El último apartado a modificar es “*Misc*” donde, para los peores casos, se modifica el valor del parámetro “*Auxiliary loads*” y se verifica las eficiencias de transmisión según arquitectura propulsiva. Los apartados “*Wheel*” y “*Misc*” son visibles en la Figura 9.4.

50				
51	Wheel			
52	Wheel inertia (one wheel) (kg*m ²)		1	Default
53	Number of wheels		6	Default
54	Rolling resistance coefficient		0.008	Set with data from https://www3.epa.gov/otaa/tcldata.htm
55	Tire radius (m)	Calculator	0.4655	Default
56	Wheel coefficient of friction		0.7	Default
57				
58	Energy management			
59				
60				
61				
62				
63				
64				
65				
66				
67				
68				
69	Misc.			
70	Alternator efficiency (conv. veh only)		100%	Default - assumes it is included with au
71	Charger efficiency		86%	86%: Henning Lohse-Busch, M. Duaba, I
72	Auxiliary loads (kW)		4	Default HEV
73	Force auxiliary loads on fuel converter (true/false)		FALSO	
74	Transmission mass (kg)		114	Default
75	Transmission efficiency		95.0%	Default HEV
76	Component mass multiplier		1.40	1.4 - 1.5: D. E. Malen, K. Reddy, Prelimi
77	Max battery to fuel energy error		0.50%	Default - SOC balancing criteria for HEV
78	Max regen	Show/hide chart	98%	Default based on matching regen test d

Figura 9.4. Apartados “*Wheel*” y “*Misc*”.

Una vez modificados los apartados, se guardan estas modificaciones en el perfil creado, mediante el botón “*Save*” en la parte superior.

A continuación, es necesario cargar un ciclo, o modelo de ruta, en el apartado “*Additional drive cycles*” para hacer una prueba del modelo creado. Se selecciona un ciclo de la lista “*Options*” y con las flechas, se pasa a “*Selections*”: en esta última

lista se ubican los ciclos que se ejecutarán. Esta interfaz se puede apreciar en la Figura 9.5.

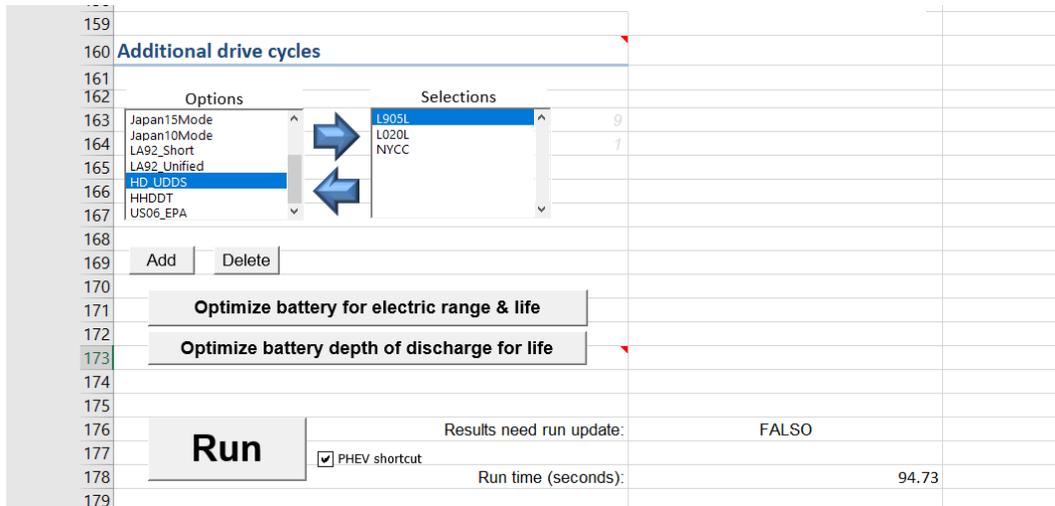


Figura 9.5. Apartado “Additional drive cycles”.

Al pulsar “Run” el modelo es puesto a prueba en estos ciclos, junto a las comprobaciones estándar de circulación en ciudad, autopista y de régimen mixto. Esto da una serie de resultados visibles en el apartado “Results” pero el más inmediatamente importante es el valor “Mass” pues da el valor de la masa resultante del vehículo, que se compara con la MOM facilitada para el vehículo por TITSA.

En esta primera iteración no se consigue que “Mass” sea igual a la MOM. Para ello, se ajusta el valor “Glider mass”, mediante la Ecuación 9.1:

$$Glider\ mass\ (iteración\ 2) = Glider\ mass\ (iteración\ 1) + (MOM - Mass) \quad (9.1)$$

Se ejecuta la segunda iteración con el botón “Run” y se comprueba que el parámetro “Mass” es igual al valor de la MOM del vehículo que se quiere modelizar. Una vez hecho esto, se puede sumar la carga de pasajeros al valor actual de “Cargo mass” y se ejecuta el modelo una tercera vez. Cuando finalice esta iteración, se puede guardar el modelo.

Para estudiar las rutas analizadas, se emplea el modo “Batch run” en la hoja “Batch interface” para el que se debe añadir la hoja “Batch” que contiene los datos de cada ruta, siguiendo el ejemplo provisto “Batch cycles example”. La hoja “Batch interface” es visible en la Figura 9.6.

El modo “Batch run” permite ejecutar el modelo en las cinco rutas de una sola vez, y es el modo de proceder para obtener los resultados, que se comparan como se muestra en el apartado 3.1.3, “Validación de arquitecturas propulsivas estudiadas”.

Para la validación de los modelos, se siguen los pasos descritos en el mismo apartado.

Si el modelo no puede validarse, como es el caso de los vehículos FCEB, no se realizan iteraciones sobre el modelo como se describe anteriormente; el valor “*Glider mass*” se ajusta aproximadamente a lo esperado para un vehículo del tamaño estudiado, y se utiliza, de cierta forma, como un parámetro de ajuste adicional para mantener el consumo en los rangos mencionados por la literatura pertinente.

	L122	L020	L467	L805	L232
24 Cycle results					
25 Delta ESO(kWh)	0.000%	0.000%	0.344%	0.000%	-0.006%
26 Fuel economy (MPGGE)	3.3	8.1619	10.0676	3.3718	7.8625
27 Gallons gasoline equivalent used	1.3	1.8	1.4	1.3	1.7
28 Electric consumption (kWh/mile)	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000
29 Battery consumption (kWh/mile)	0.000	0.000	0.005	0.000	0.000
30 Max range miles (MPH)	24.52789795	14.48454	8.6601539	5.2363191	22.369
31 Distance	11.76	15.05	14.54	11.76	13.66
32 CS battery percent wear per mile	1.704E-06	1.541E-06	1.423E-06	1.168E-06	1.084E-06
33 CS battery life (miles)	536.310	649.720	782.831	670.653	922.491
34 Mass (kg)	17285	17285	17285	17285	17285
35 Max traction acceleration (mpg2)	4.4	4.4	4.4	4.4	4.4
36 Motor average output efficiency	93.4%	93.3%	93.3%	93.3%	93.3%
37 Fuel converter average efficiency	54.3%	54.4%	56.1%	55.4%	53.0%
38 No electric system	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
39 No electric aux loads	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO	FALSO
40 Average ESO(kWh/cycle)	0.0941	0.1406	0.0778	0.0532	0.0479
41 Number of cycles per mile	11.2	6.7	14.5	19.3	16.7
42 Percent driving with road-side charging	0%	0%	0%	0%	0%
43					
44 Energy Information (kWh)					
45 Losses	New Cum Total	New Cum To	New Cum Tot	New Cum Tot	New Cum Total
46 Drag	17325	24827	3581	3444	4367
47 Access	-7362	-34895	2638	-8951	-862
48 Tire	25675	32839	31735	25970	28623
49 Brake	23932	63442	31689	56336	61234
50 Transmission	3069	3703	3516	2342	3735

Figura 9.6. Hoja “Batch interface”.

La ejecución del modelo ya validado o verificado en las rutas estudiadas arroja los valores de consumo necesarios para el análisis económico, pero estos son dados como millas por galón de gasolina equivalente, para los modelos diésel, híbrido y de pila de combustible, y en kilovatios-hora por milla, en los modelos eléctricos. Para pasar a las unidades empleadas en el SI y utilizadas para este trabajo (litros por kilómetro en vehículos diésel e híbridos, kilovatios-hora por kilómetro en vehículos eléctricos, y kilogramos de hidrógeno por kilómetro en vehículos de pila de combustible) se sigue el procedimiento mostrado a continuación.

Para pasar de millas por galón de gasolina equivalente a litros por kilómetro, se emplea la Ecuación 9.2.

$$f_{Conv-HEV} (l/km) = \frac{1}{f_{Conv-HEV} (mpgge) \cdot 1,13 \frac{GGE}{DGE} \cdot \left(\frac{1 \text{ gal}}{3,785 \text{ l}} \cdot \frac{1,609 \text{ km}}{1 \text{ mile}} \right)} \quad (9.2)$$

Para pasar de kilovatios-hora por milla a kilovatios-hora por kilómetro, se emplea la Ecuación 9.3.

$$f_{electricity} \left(\frac{kWh}{km} \right) = f_{electricity} \left(\frac{kWh}{mile} \right) \cdot \frac{1 \text{ mile}}{1,609 \text{ km}} \quad (9.3)$$

Y por último, para pasar de millas por galón de gasolina equivalente a kilogramos por kilómetro de hidrógeno, se emplea la Ecuación 9.4.

$$f_{H_2} \left(\frac{kg \text{ H}_2}{km} \right) = \frac{1,011 \frac{kg \text{ H}_2}{GGE}}{f_{H_2} (mpgge) \cdot \frac{1,609 \text{ km}}{1 \text{ mile}}} \quad (9.4)$$

Las relaciones de 1,13 GGE por DGE [1] y de 1,011 kg H₂ por GGE [2] se toman de trabajos académicos especializados en el tema.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Understanding MPG and MPGe, Erik Kountz, <<http://large.stanford.edu/courses/2016/ph240/kountz2/>> Consultada el día 04/07/2023.

[2] A. D. Goncalves De Jesús, “Análisis del potencial del hidrógeno para reducir las emisiones de CO₂ en el parque automovilístico de Tenerife” Trabajo Fin de Grado, Dept. Ing. Ind., Univ. de La Laguna, La Laguna, Santa Cruz de Tenerife, Sept. 2021.

10 ANEXO II: CREACIÓN DE SIMULACIONES ECONÓMICAS

Para crear una simulación económica, primero se debe definir:

- El tipo de arquitectura propulsiva, que se selecciona en “*Arquitectura propulsiva estudiada*”
- Los costes del consumible, ya sea diésel, electricidad o hidrógeno: dependiendo de la arquitectura propulsiva será uno u otro, y se selecciona el correspondiente. Si se desea introducir un valor de consumible personalizado, se hace en el apartado “*Costes consumibles personalizados*”, en su casilla correspondiente, y seleccionando “Precio personalizado” en el consumible en cuestión, como se ve en la Figura 10.1.

A	B
1 Modelo económico - Parámetros de simulación	Menús desplegables
2	
3 <i>Parámetros generales</i>	
4 Arquitectura propulsiva estudiada	CV - Convencional (Diésel)
5 Costes combustible	Precio personalizado
6 Costes electricidad	Peor caso estimado (precio máximo durante 2022)
7 Costes hidrógeno	Mejor caso estimado (precios el 16/09/2019)
8 Selección coste componentes-coste total	Precio representativo para 2023 (precios el 04/02/2023)
9 Venta de baterías usadas (battery salvage)	Precio personalizado
10 Venta de vehículos (al final de la simulación)	No considerado
11 % valor de batería usada respecto al valor de la batería nueva	Sí
12 % valor de vehículo usado respecto al valor del vehículo nuevo	Datos aportados por el Gobierno de Canarias (https://www.gobiernodecanarias.org/energia/publicaciones/index.html)
13 Año de inicio de la simulación	20.00%
14 Longitud de simulación (años)	15.00%
15 Distancia recorrida mensualmente	2023
16 Evolución de distancia recorrida	10
17 Reducción de distancia recorrida mensualmente	8,425 kilómetros
18 Número de vehículos	Distancia constante
19 Incorporación del salario del conductor al estudio	500 kilómetros
20 Salario mensual conductor	13
21	No
	1080.00 €

Figura 10.1. Menú de selección de costes de consumible.

- Si se va a optar por introducir un precio global de cada vehículo o se va a estimar su precio mediante los componentes que lo forman. En este Anexo, se realizará de la segunda manera, dado que se juzga más compleja para un nuevo usuario y con mayores posibilidades de realizar un posterior análisis.
- Precio de venta de la batería y el vehículo al final de la vida útil, como un porcentaje sobre el coste inicial de adquisición. Este paso puede obviarse, si no se va a considerar estos valores residuales.
- El año de inicio de simulación y la longitud de esta. Estos parámetros establecen temporalmente a la estimación, y son fáciles de obtener, ya que la longitud de simulación suele estar alrededor de los 10 años.
- La distancia recorrida mensualmente, que se puede tomar de datos reales aportados por una empresa de transporte, o estimarse por medio de los horarios de servicio y la distancia recorrida sobre un mapa.
- El número de vehículos de la flota, para el que suele tomarse el ya existente, a no ser que se plantee modificar el servicio.

- El salario del conductor, aunque este es un parámetro opcional y sólo es obligado si por alguna razón este debe recibir un sueldo mayor por conducir determinada arquitectura (una mayor formación, por ejemplo).

Una vez definidos estos parámetros, se introducen los parámetros del modelo a simular en el apartado “Vehículo”. A estas alturas, el modelo ya da un coste de adquisición de un solo vehículo; es aquí donde el parámetro “Otros costes” juega un papel fundamental, dado que se ocupa de ajustar este precio resultante al esperado por el usuario.

Este parámetro puede usarse para simplemente redondear el resultado inicial, o llevarlo al valor que el usuario desea. Para realizar esta labor, se recomienda emplear la herramienta “Buscar objetivo” de Excel, como se muestra en la Figura 10.2, lo que agiliza este ajuste.

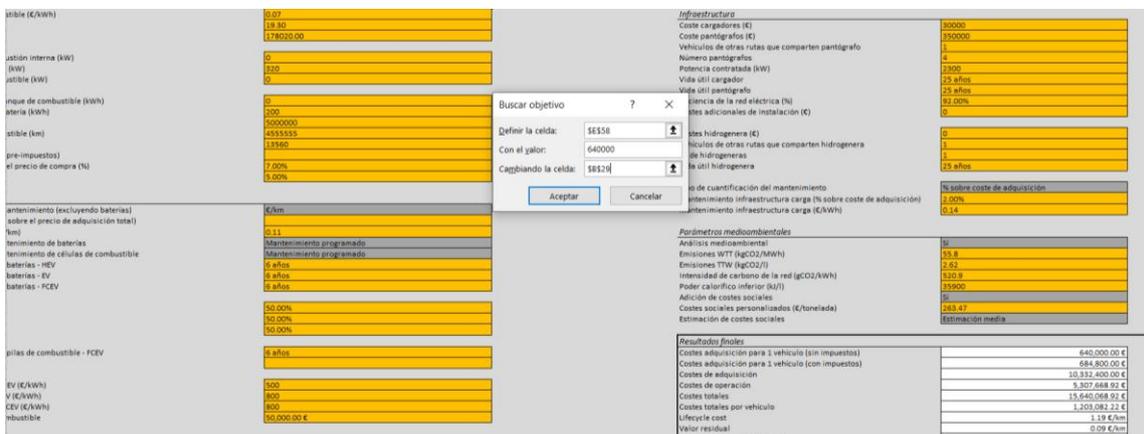


Figura 10.2. Uso de la herramienta “Buscar objetivo” en conjunto con el modelo económico.

En este apartado, se introducen además los impuestos sobre el valor del vehículo y la tasa de descuento DR. No se considera directamente el coste de asegurar el vehículo, pero se puede incluir en los costes de mantenimiento general o añadirse al valor del vehículo.

A posteriori, se escoge cómo se estudia el mantenimiento; estos valores suelen tomarse de la bibliografía.

- Costes de mantenimiento (excluyendo baterías) se puede estudiar como un valor en €/km, o como un porcentaje sobre el precio de adquisición total de la flota.
- Costes de mantenimiento de baterías y pilas de combustible; puede estudiarse como un mantenimiento programado (se hace en un año concreto) o se realiza cuando se supera un porcentaje crítico impuesto por el usuario; en este último caso es necesario introducir un valor de vida útil de batería y/o pila de combustible en km, a partir de valores del fabricante, en el apartado “Vehículo”

Sea como fuere, es necesario añadir el valor del reemplazo, en €/kWh para las baterías, y como un valor en euros para la pila de combustible.

Para analizar el coste energético de la arquitectura, ahora se debe introducir el consumo de esta, que se puede derivar de una medida realizada con vehículos reales o a través de un simulador adecuado, como FASTSim. Esta entrada se puede hacer en unidades métricas (l/km, kWh/km, kg H₂/km) o imperiales (mpgge, kWh/mile) a voluntad del usuario.

A continuación, se encuentra la herramienta de estimación de cargadores, sólo útil si se estudia una arquitectura eléctrica: para emplearla se debe introducir la profundidad de descarga máxima esperada, la potencia del cargador, las horas de carga disponibles y la eficiencia del cargador. Con esto se obtiene un número aproximado de cargadores, que se incluyen en el siguiente apartado, “*Infraestructura*”.

En el apartado “*Infraestructura*” solo relevante si se estudia una arquitectura eléctrica o de pila de combustible, se incluye el coste de los cargadores (que debe ser el total, ayudándose de la estimación previa) el coste de cada pantógrafo, si se incluyen, y el número de estos. Se puede introducir en el valor “Vehículos de otras rutas que comparten pantógrafo” un número que divide el coste total de los pantógrafos para reducir el coste, representando los vehículos que comparten esta infraestructura y no pertenecen a la flota estudiada.

Se debe aportar, además, la vida útil de cargadores y pantógrafos, la eficiencia de la red eléctrica, y la potencia contratada, que el usuario debe calcular a partir del número de cargadores y pantógrafos incluidos en la simulación. El coste de esta potencia contratada, si se desea incluir en la simulación, se debe introducir en el apartado “*Costes consumibles personalizados*”. Por último, se puede añadir el coste de la obra civil, entre otros, en la casilla “Costes adicionales de instalación” como un valor total en euros.

Para vehículos de pila de combustible, se dispone de los costes de la hidrogena (como valor total en euros) un factor divisor llamado “Vehículos de otras rutas que comparten hidrogena” el número de hidrogenas necesario, y su vida útil.

Para cerrar este apartado, se define el mantenimiento de las instalaciones, que puede cuantificarse mediante un valor en €/kWh suministrado o como un porcentaje sobre el coste de adquisición. Estos valores se toman de la literatura especializada en este tipo de análisis o, por defecto, se estiman en base a los costes anuales de reparaciones y reemplazos, si se dispone de estos.

El último apartado es el de “*Parámetros medioambientales*” y en él se deben introducir las emisiones WTT (en kg CO₂ por megavatio-hora) y TTW (en kg CO₂ por litro) además del poder calorífico del combustible empleado por las arquitecturas que

cuenten con un motor de combustión interna. Además, se debe aportar la intensidad de carbono de la red para poder calcular las emisiones indirectas de las configuraciones eléctricas. Para finalizar, en este apartado se decide si se deben añadir costes sociales al análisis económico, como se muestra en la Figura 10.3, para el cual se pueden dar las tres estimaciones incorporadas (mínima, media y máxima) y personalizada, que se puede introducir en el mismo apartado, en €/tonelada métrica de CO₂.

Parámetros medioambientales	
Análisis medioambiental	Sí
Emisiones WTT (kgCO ₂ /MWh)	55.8
Emisiones TTW (kgCO ₂ /l)	2.62
Intensidad de carbono de la red (gCO ₂ /kWh)	520.9
Poder calorífico inferior (kJ/l)	35900
Adición de costes sociales	Sí
Costes sociales personalizados (€/tonelada)	263.47
Estimación de costes sociales	Estimación media
	Estimación mínima
	Estimación media
	Estimación máxima
	Personalizado
Resultados finales	
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	729,575.22 €

Figura 10.3. Selección de estimación de costes sociales.

Una vez se ha introducido la información pertinente en cada apartado, la simulación económica ya estaría lista. Los resultados completos se enmarcan en un recuadro rectangular de bordes gruesos, y se subdividen en:

- **Resultados finales:** recogen los parámetros económicos más importantes, como el coste de cada vehículo, los costes de adquisición y mantenimiento, y el *lifecycle cost*. Son los factores más importantes para el usuario.
- **Resultados adicionales:** muestran parámetros de utilidad para estudiar la flota, como su consumo de combustible diésel, electricidad o hidrógeno, sus emisiones directas e indirectas, las emisiones por vehículo, y el valor residual de las instalaciones
- **Componentes del lifecycle cost:** este subapartado muestra la composición del *lifecycle cost* de la flota estudiada dividido en las cinco categorías de Infraestructura, Costes de adquisición, Costes energéticos, Mantenimiento, y Reemplazos, mostrado en el porcentaje que supone cada uno y los €/km que cada una de estas categorías suma. Con los datos de este apartado se trazan los dos gráficos mostrados debajo del recuadro de resultados.

Los resultados finales, al igual que los dos gráficos obtenidos, pueden copiarse directamente a un trabajo, como se ha hecho aquí, o compararse con otras arquitecturas simuladas con el mismo modelo en la hoja “Comparativa”

Para ello, se selecciona el rectángulo que enmarca los resultados cubriendo toda su área, y se copia este, como se muestra en la Figura 10.4.

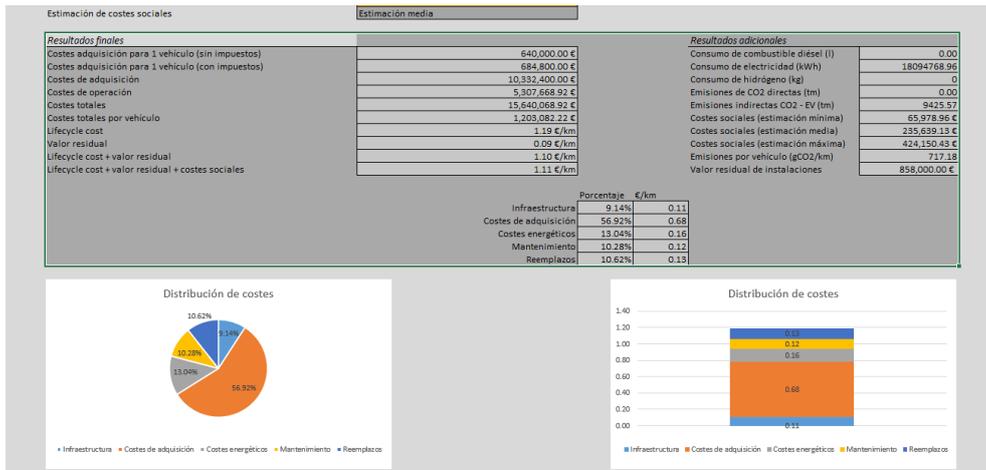


Figura 10.4. Selección de resultados para su comparación.

Se pega (seleccionando la opción “Pegar valores”) en la casilla que el usuario desee asignar a tal fin, como se ve en la Figura 10.5. Se dispone de 9 casillas, que pueden ser nombradas por el usuario para diferenciar los resultados en las gráficas.

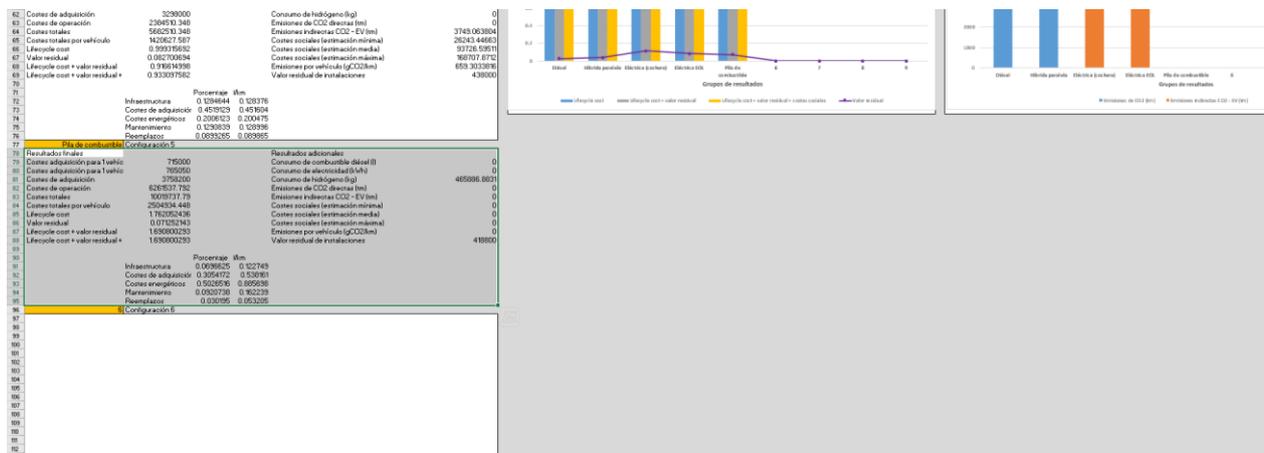


Figura 10.5. Colocación de resultados en comparativa.

Una vez se han cargado los resultados que se desea comparar, estos se mostrarán en las gráficas a la derecha. Se dispone de 4 gráficas por defecto, 3 de ellas comparando parámetros económicos y la última comparando las emisiones directas e indirectas de CO₂ en cada arquitectura. El usuario puede modificar estas gráficas, copiarlas a su trabajo, o añadir nuevas gráficas si necesita comparar otros parámetros específicos.

11 ANEXO III: RESULTADOS DETALLADOS DE SIMULACIONES ECONÓMICAS

En este anexo se recogen, tanto en tablas como gráficos, los resultados en detalle de las simulaciones económicas.

11.1 Modelo diésel de 18 m

Tabla 11.1. Resultados económicos de la flota diésel de 18 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	390000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	417300,00 €
Costes de adquisición	5424900,00 €
Costes de operación	9022742,35 €
Costes totales	14447642,35 €
Costes totales por vehículo	1111357,10 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,10 €/km
Valor residual	0,03 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,07 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,12 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	8022192,01
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	25482,09
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	178374,64 €
Costes sociales (estimación media)	637052,30 €
Costes sociales (estimación máxima)	1146694,13 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	1938,91
Valor residual de instalaciones	- €

Tabla 11.2. Componentes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 18 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,00	0,00
Costes de adquisición	37,55	0,41
Costes energéticos	44,89	0,49
Mantenimiento	17,56	0,19
Reemplazos	0,00	0,00

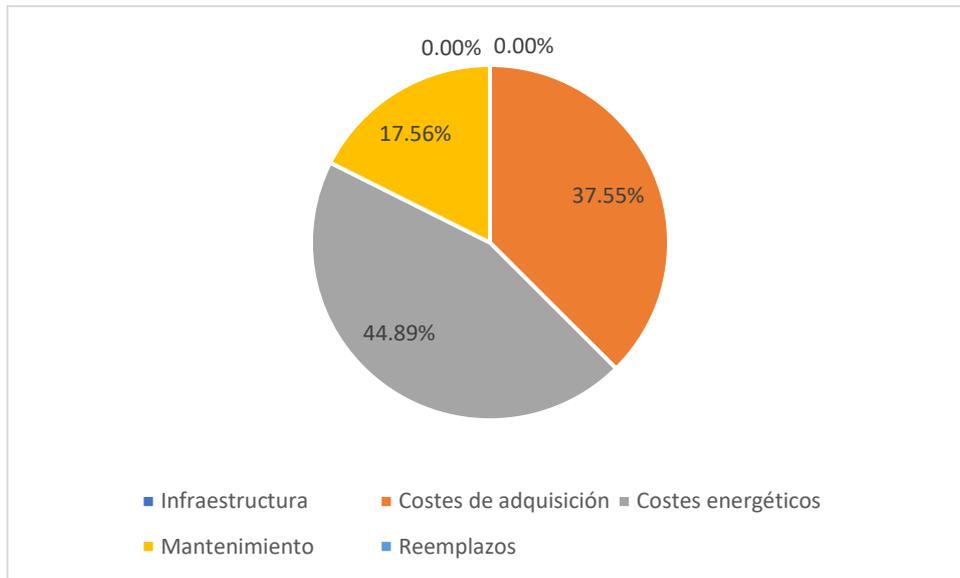


Figura 11.1. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 18 m.

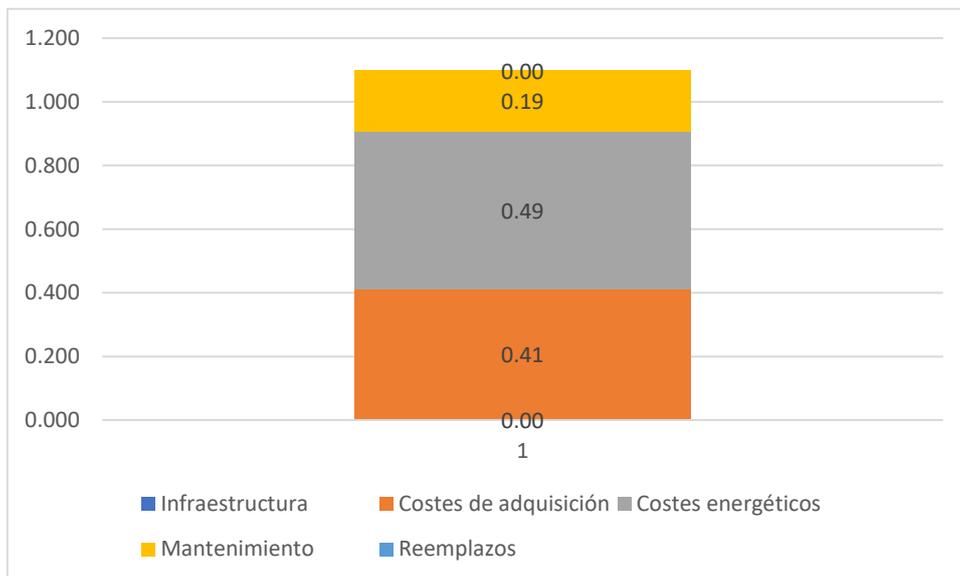


Figura 11.2. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 18 m.

11.2 Modelo híbrido de 18 m

Tabla 11.3. Resultados económicos de la flota híbrida de 18 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	550000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	588500,00 €
Costes de adquisición	7650500,00 €
Costes de operación	6852118,95 €
Costes totales	14502618,95 €
Costes totales por vehículo	1115586,07 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,10 €/km
Valor residual	0,05 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,06 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,09 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	5176837,21
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	16443,96
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	115107,75 €
Costes sociales (estimación media)	411099,11 €
Costes sociales (estimación máxima)	739978,41 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	1251,20
Valor residual de instalaciones	- €

Tabla 11.4. Componentes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 18 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,00	0,00
Costes de adquisición	52,75	0,58
Costes energéticos	28,86	0,32
Mantenimiento	17,49	0,19
Reemplazos	0,89	0,01

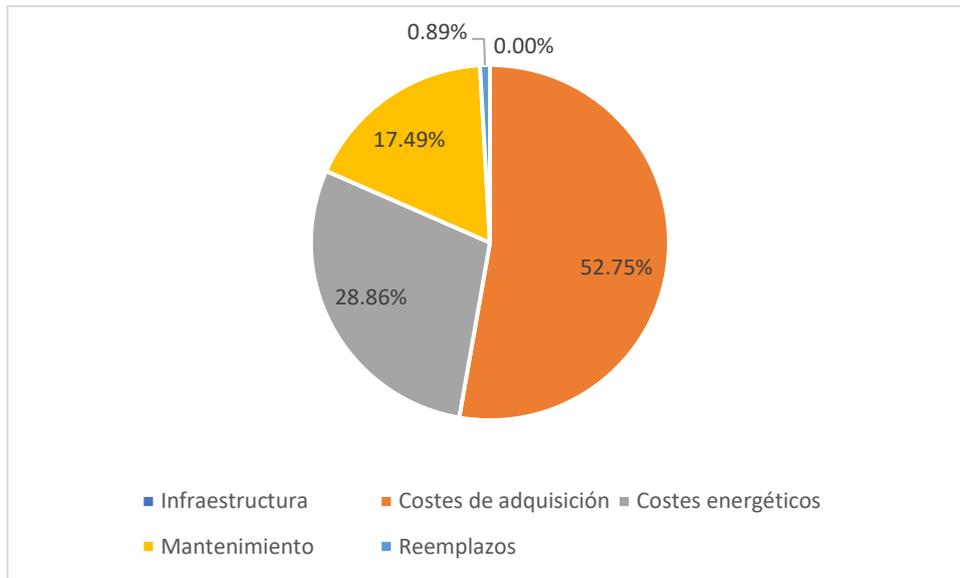


Figura 11.3. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 18 m.

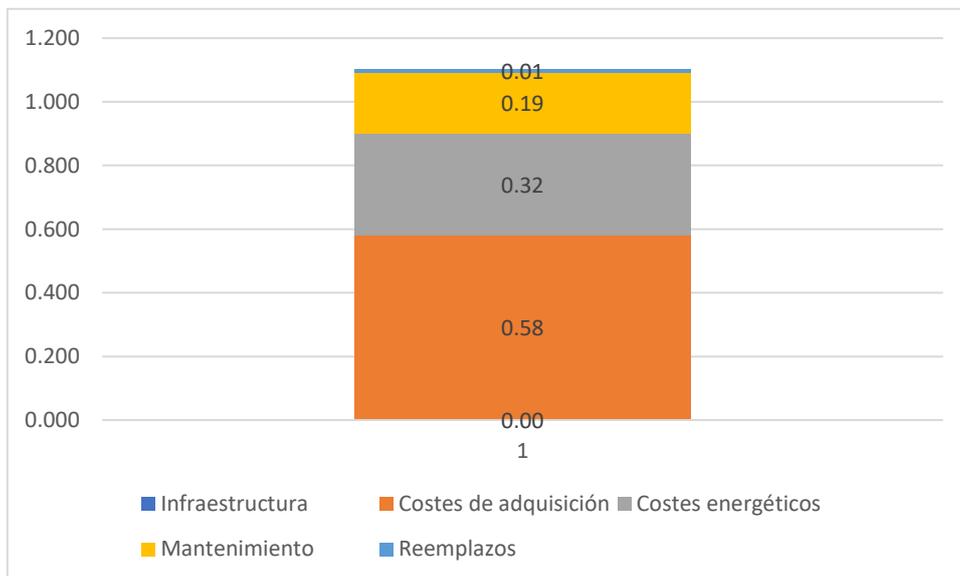


Figura 11.4. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 18 m.

11.3 Modelo eléctrico de 18 m

- Carga en cochera

Tabla 11.5. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	800000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	856000,00 €
Costes de adquisición	11248000,00 €
Costes de operación	6406460,43 €
Costes totales	17654460,43 €
Costes totales por vehículo	1358035,42 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,34 €/km
Valor residual	0,15 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,19 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,22 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	21713722,75
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	12127,11
Costes sociales (estimación mínima)	84889,80 €
Costes sociales (estimación media)	303177,85 €
Costes sociales (estimación máxima)	545720,14 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	922,74
Valor residual de instalaciones	72000,00 €

Tabla 11.6. Componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,68	0,01
Costes de adquisición	63,03	0,85
Costes energéticos	10,92	0,15
Mantenimiento	6,56	0,09
Reemplazos	18,81	0,25

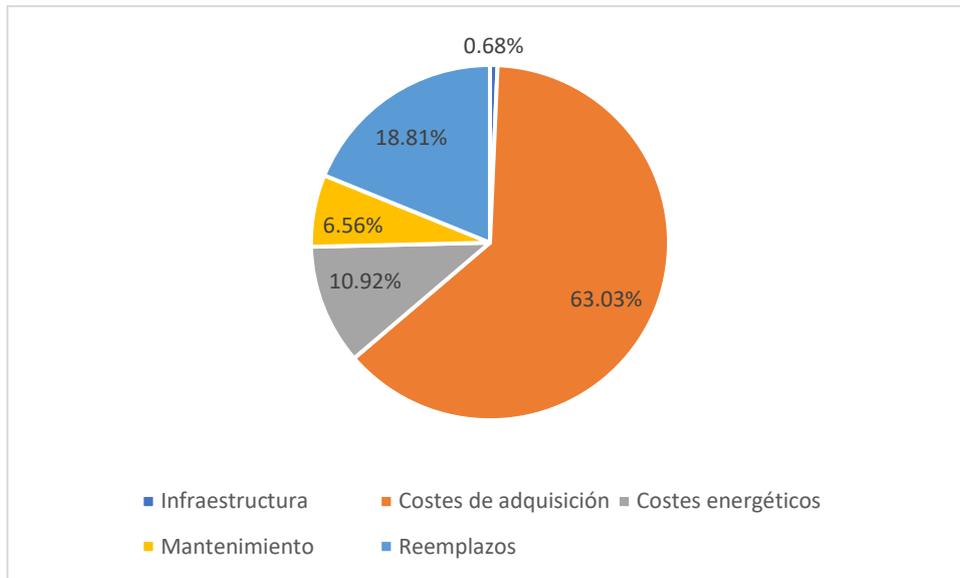


Figura 11.5. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m.

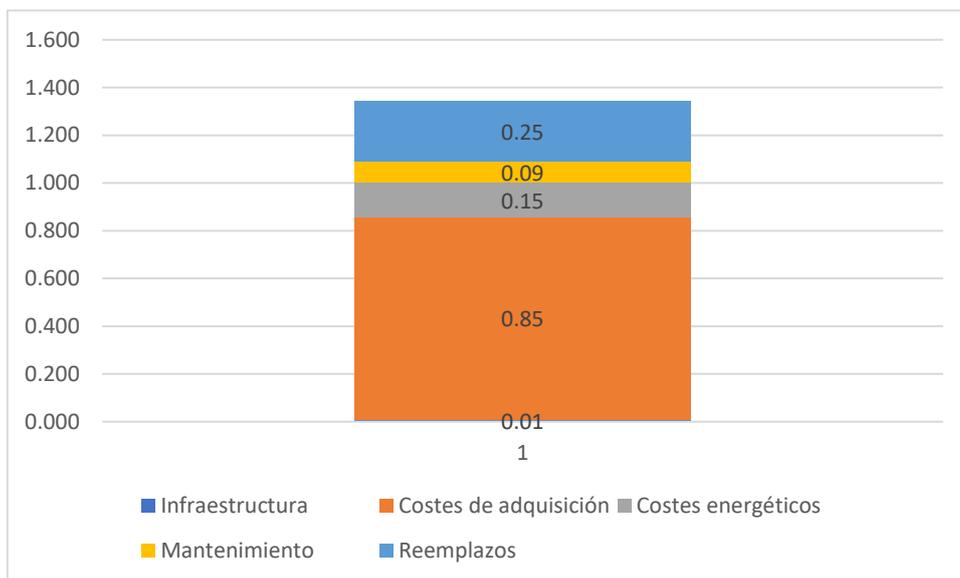


Figura 11.6. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 18 m.

- Carga *EOL*

Tabla 11.7. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga *EOL*) de 18 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	640000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	684800,00 €
Costes de adquisición	10332400,00 €
Costes de operación	5307668,92 €
Costes totales	15640068,92 €
Costes totales por vehículo	1203082,22 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,19 €/km
Valor residual	0,09 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,10 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,11 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	18094768,96
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	9425,57
Costes sociales (estimación mínima)	65978,96 €
Costes sociales (estimación media)	235639,13 €
Costes sociales (estimación máxima)	424150,43 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	717,18
Valor residual de instalaciones	858000,00 €

Tabla 11.8. Componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga *EOL*) de 18 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	9,14	0,11
Costes de adquisición	56,92	0,68
Costes energéticos	13,04	0,16
Mantenimiento	10,28	0,12
Reemplazos	10,62	0,13

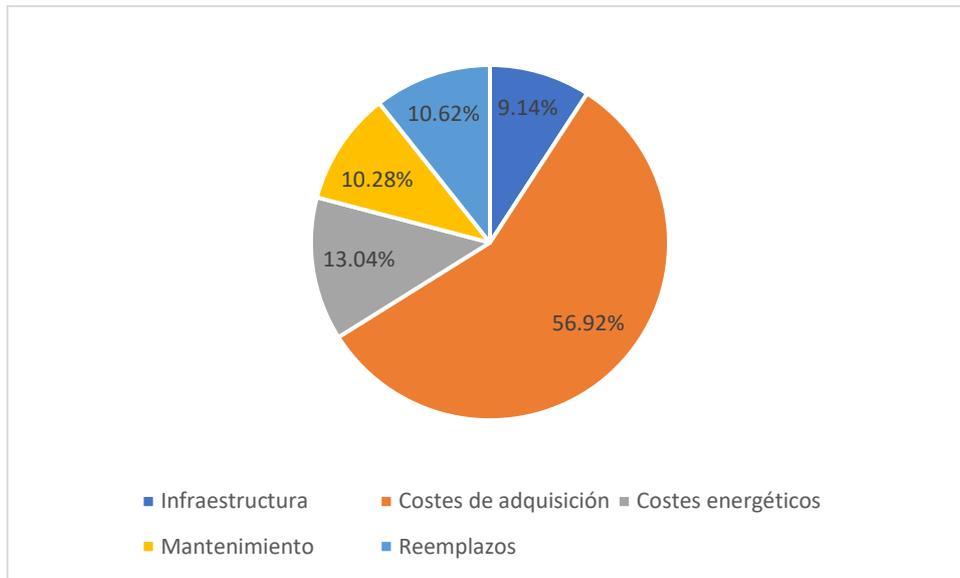


Figura 11.7. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (EOL) de 18 m.

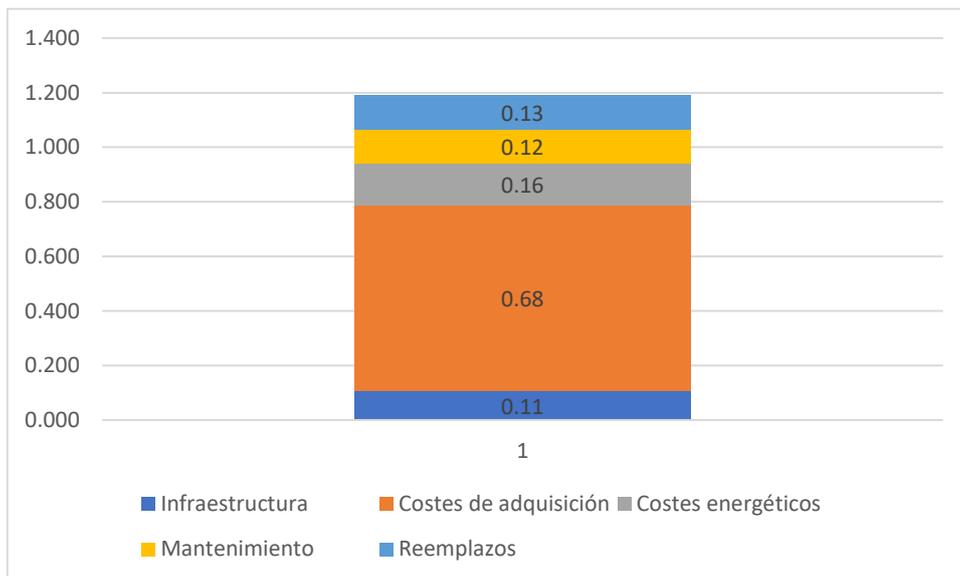


Figura 11.8. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (EOL) de 18 m.

11.4 Modelo de pila de combustible de 18 m

Tabla 11.9. Resultados económicos de la flota FCEB de 18 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	800000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	856000,00 €
Costes de adquisición	11826000,00 €
Costes de operación	13785898,95 €
Costes totales	25611898,95 €
Costes totales por vehículo	1970146,07 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,95 €/km
Valor residual	0,08 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,87 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,87 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	1040361,598
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	0,00 €
Costes sociales (estimación media)	0,00 €
Costes sociales (estimación máxima)	0,00 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	0,00
Valor residual de instalaciones	418800,00 €

Tabla 11.10. Componentes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 18 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	2,73	0,05
Costes de adquisición	43,45	0,85
Costes energéticos	43,91	0,86
Mantenimiento	6,07	0,12
Reemplazos	3,84	0,07

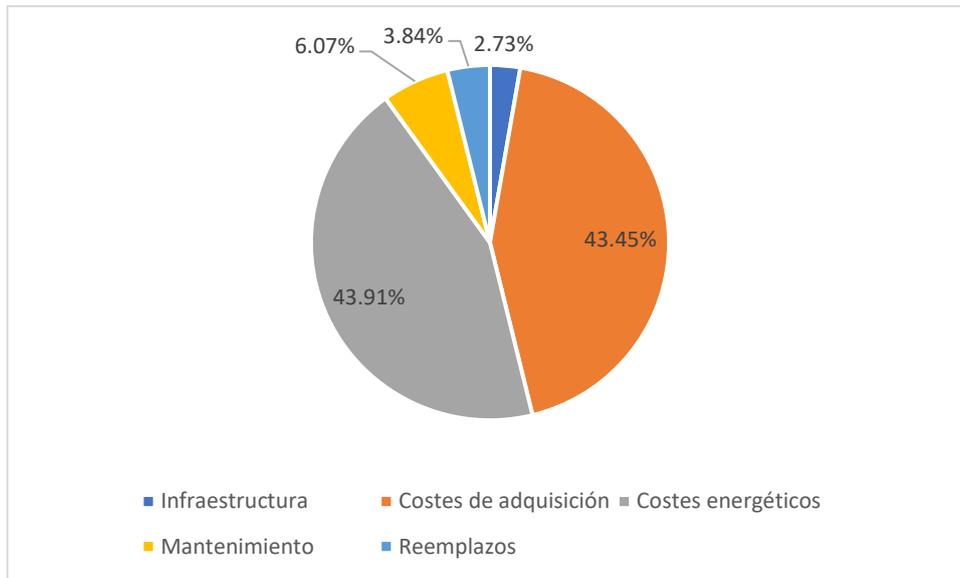


Figura 11.9. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 18 m.

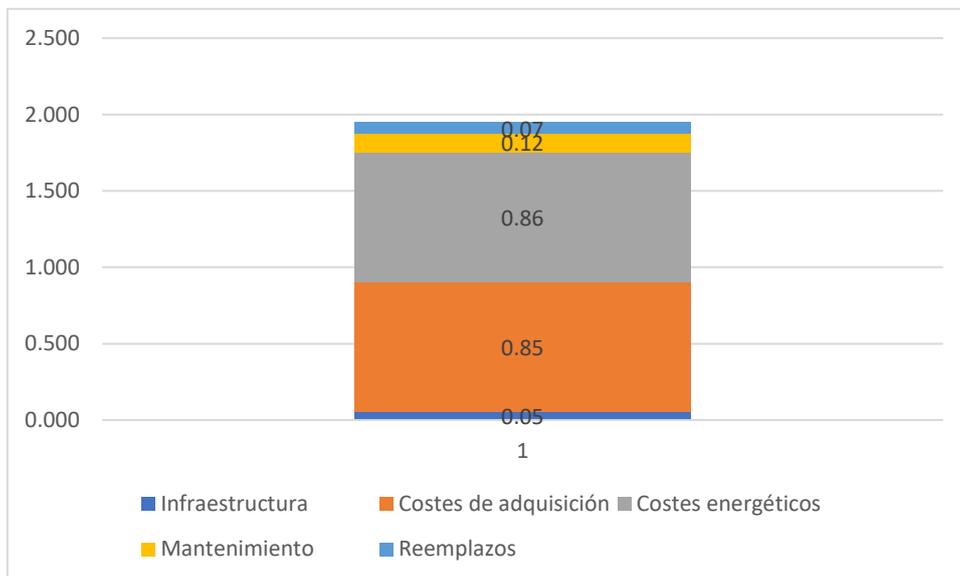


Figura 11.10. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 18 m.

11.5 Modelo diésel de 14 m

Tabla 11.11. Resultados económicos de la flota diésel de 14 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	285000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	304950,00 €
Costes de adquisición	1219800,00 €
Costes de operación	3264870,67 €
Costes totales	4484670,67 €
Costes totales por vehículo	1121167,67 €
<i>Lifecycle cost</i>	0,79 €/km
Valor residual	0,02 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	0,76 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	0,80 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	2680569,71
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	8514,70
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	59602,87 €
Costes sociales (estimación media)	212867,39 €
Costes sociales (estimación máxima)	383161,31 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	1497,38
Valor residual de instalaciones	- €

Tabla 11.12. Componentes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 14 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,00	0,00
Costes de adquisición	27,20	0,21
Costes energéticos	48,32	0,38
Mantenimiento	24,48	0,19
Reemplazos	0,00	0,00

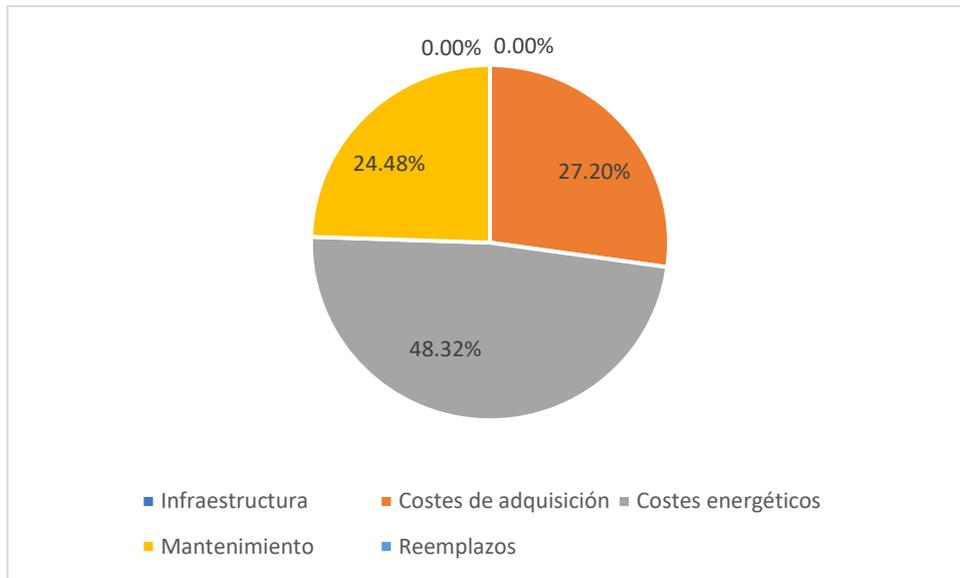


Figura 11.11. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 14 m.

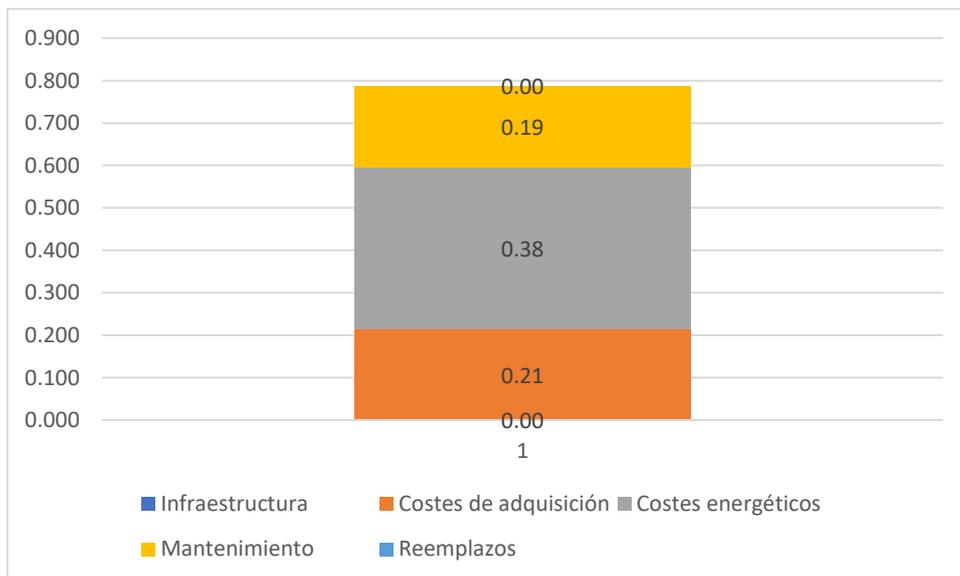


Figura 11.12. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota diésel de 14 m.

11.6 Modelo híbrido de 14 m

Tabla 11.13. Resultados económicos de la flota híbrida de 14 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	400000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	428000,00 €
Costes de adquisición	1712000,00 €
Costes de operación	2968733,47 €
Costes totales	4680733,47 €
Costes totales por vehículo	1170183,37 €
<i>Lifecycle cost</i>	0,82 €/km
Valor residual	0,04 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	0,79 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	0,82 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	2264893,76
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	7194,32
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	50360,25 €
Costes sociales (estimación media)	179858,04 €
Costes sociales (estimación máxima)	323744,48 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	1265,18
Valor residual de instalaciones	- €

Tabla 11.14. Componentes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 14 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,00	0,00
Costes de adquisición	36,58	0,30
Costes energéticos	39,12	0,32
Mantenimiento	23,45	0,19
Reemplazos	0,85	0,01

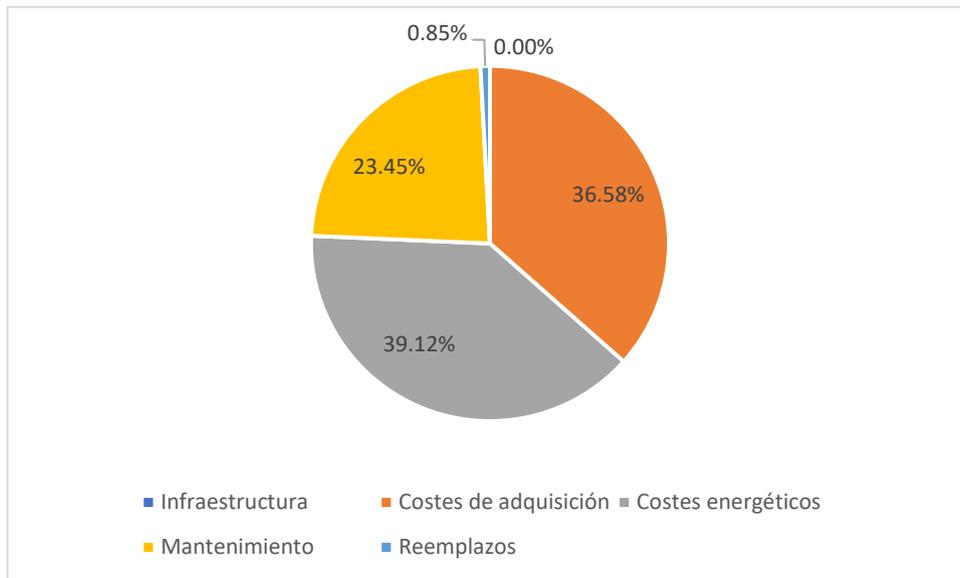


Figura 11.13. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 14 m.

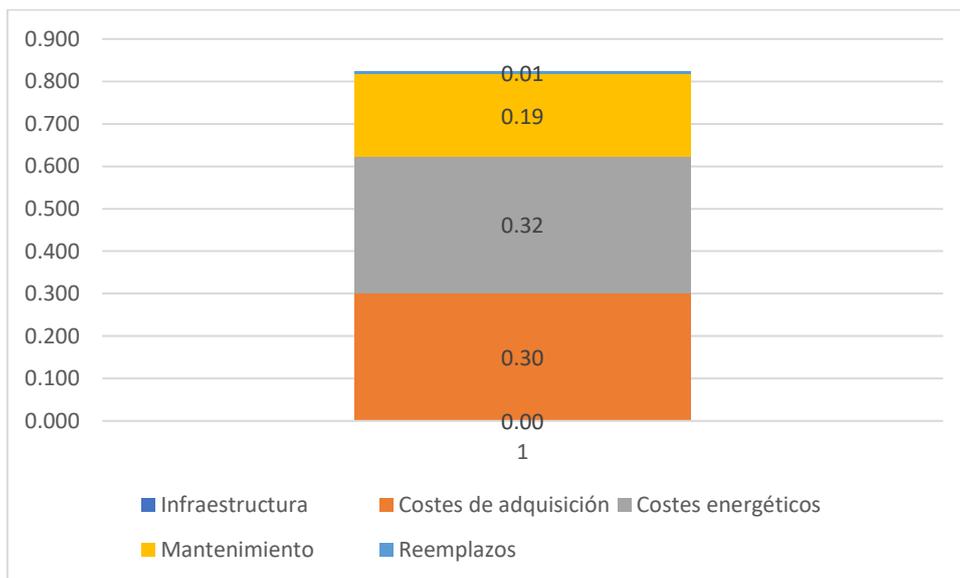


Figura 11.14. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota híbrida de 14 m.

11.7 Modelo eléctrico de 14 m

- Carga en cochera: en este caso, se realiza debido a que es necesario calcular su coste de adquisición como base para el modelo de flota FCEB. Estos resultados no representan una solución apropiada para el servicio regular de la ruta 020, por las razones mostradas en el apartado 4.3.

Tabla 11.15. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	715000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	765050,00 €
Costes de adquisición	3090200,00 €
Costes de operación	2093763,50 €
Costes totales	5183963,50 €
Costes totales por vehículo	1295990,87 €
<i>Lifecycle cost</i>	0,91 €/km
Valor residual	0,11 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	0,80 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	0,82 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	8845513,6
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	4940,22
Costes sociales (estimación mínima)	34581,54 €
Costes sociales (estimación media)	123505,48 €
Costes sociales (estimación máxima)	222309,87 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	868,78
Valor residual de instalaciones	18000,00 €

Tabla 11.16. Componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	0,58	0,01
Costes de adquisición	59,03	0,54
Costes energéticos	13,93	0,13
Mantenimiento	9,52	0,09
Reemplazos	16,94	0,15

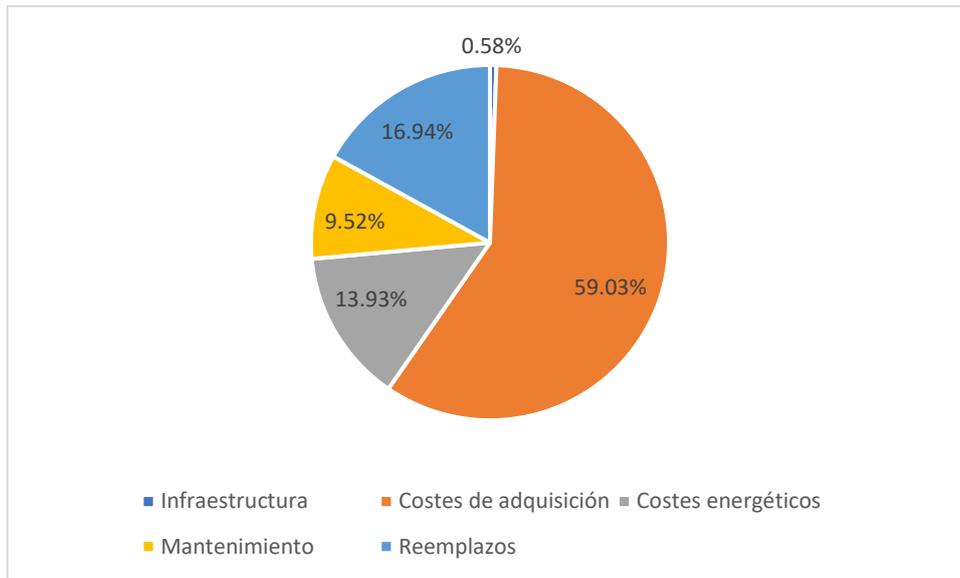


Figura 11.15. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m.

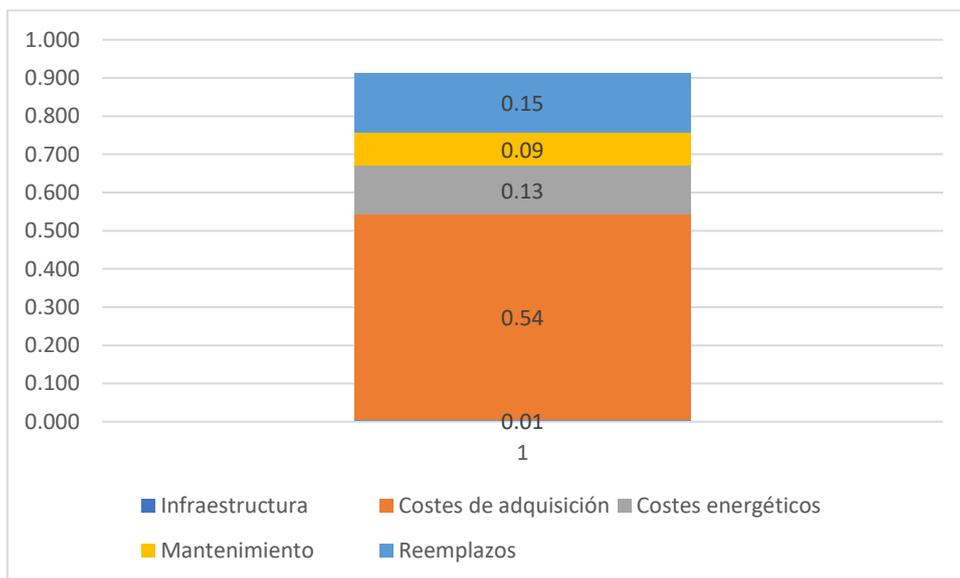


Figura 11.16. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga en cochera) de 14 m.

- Carga *EOL*

Tabla 11.17. Resultados económicos de la flota eléctrica (carga *EOL*) de 14 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	600000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	642000,00 €
Costes de adquisición	3298000,00 €
Costes de operación	2384510,35 €
Costes totales	5682510,35 €
Costes totales por vehículo	1420627,59 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,00 €/km
Valor residual	0,08 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	0,92 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	0,93 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	7197281,252
Consumo de hidrógeno (kg)	0
Emisiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emisiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	3749,06
Costes sociales (estimación mínima)	26243,45 €
Costes sociales (estimación media)	93726,60 €
Costes sociales (estimación máxima)	168707,87 €
Emisiones por vehículo (gCO ₂ /km)	659,30
Valor residual de instalaciones	438000,00 €

Tabla 11.18. Componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (carga *EOL*) de 14 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	12,85	0,13
Costes de adquisición	45,19	0,45
Costes energéticos	20,06	0,20
Mantenimiento	12,91	0,13
Reemplazos	8,99	0,09

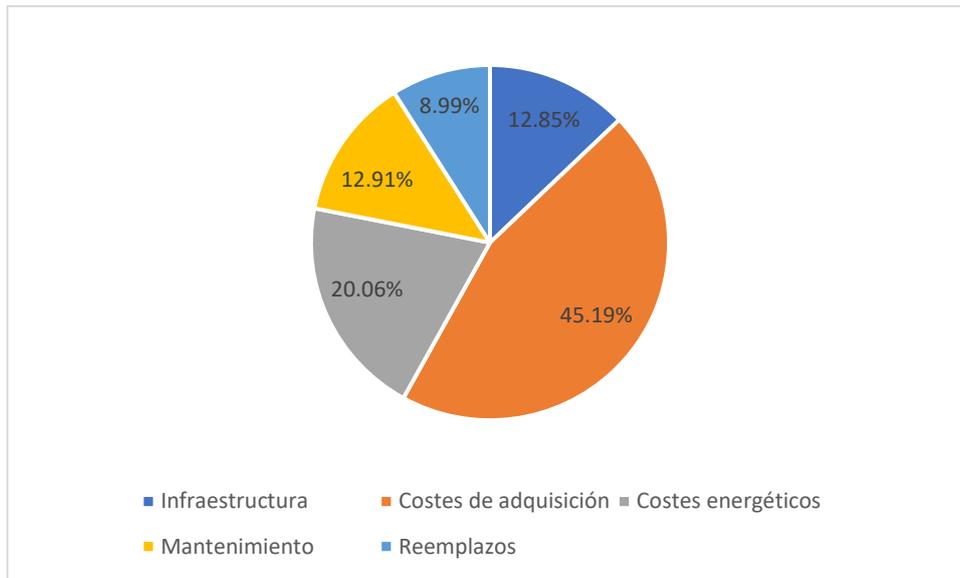


Figura 11.17. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (EOL) de 14 m.

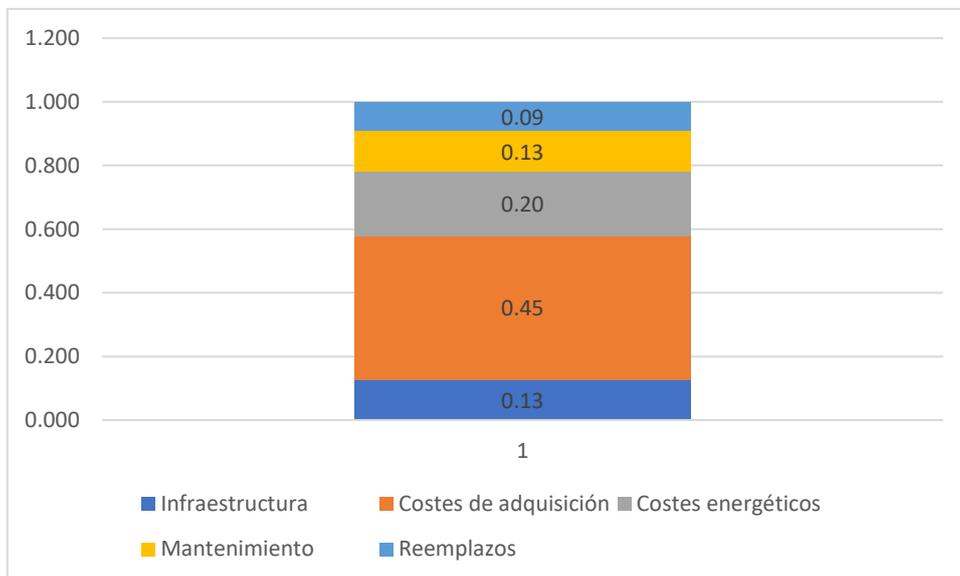


Figura 11.18. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota eléctrica (EOL) de 14 m.

11.8 Modelo de pila de combustible de 14 m

Tabla 11.19. Resultados económicos de la flota FCEB de 14 m.

Resultado	Valor
Costes adquisición para 1 vehículo (sin impuestos)	715000,00 €
Costes adquisición para 1 vehículo (con impuestos)	765050,00 €
Costes de adquisición	3758200,00 €
Costes de operación	6261537,79 €
Costes totales	10019737,79 €
Costes totales por vehículo	2504934,45 €
<i>Lifecycle cost</i>	1,76 €/km
Valor residual	0,07 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual</i>	1,69 €/km
<i>Lifecycle cost + valor residual + costes sociales</i>	1,69 €/km
Consumo de combustible diésel (l)	0,00
Consumo de electricidad (kWh)	0
Consumo de hidrógeno (kg)	465886,8831
Emissiones de CO ₂ directas (tm)	0,00
Emissiones indirectas CO ₂ - EV (tm)	0,00
Costes sociales (estimación mínima)	0,00 €
Costes sociales (estimación media)	0,00 €
Costes sociales (estimación máxima)	0,00 €
Emissiones por vehículo (gCO ₂ /km)	0,00
Valor residual de instalaciones	418800,00 €

Tabla 11.20. Componentes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 14 m.

Componente de coste	Porcentaje (%)	Valor en €/km
Infraestructura	6,97	0,12
Costes de adquisición	30,54	0,54
Costes energéticos	50,27	0,89
Mantenimiento	9,21	0,16
Reemplazos	3,02	0,05

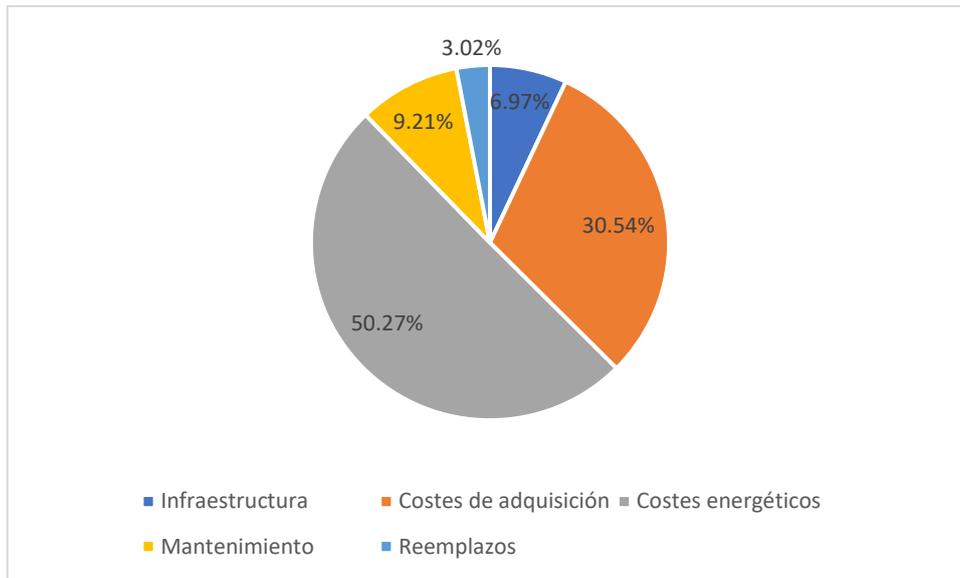


Figura 11.19. Gráfico circular de porcentajes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 14 m.

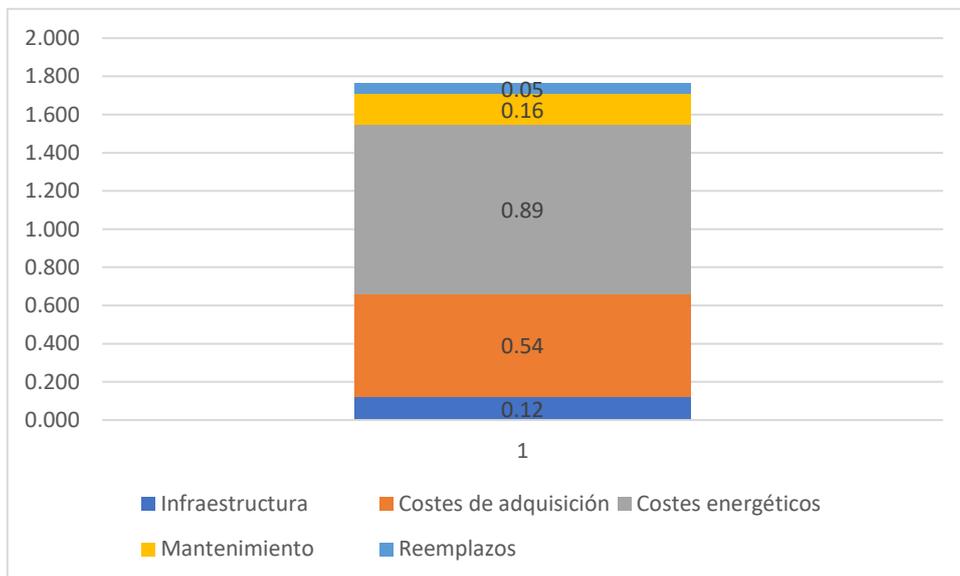


Figura 11.20. Gráfico de columnas apiladas de componentes del *lifecycle cost* de la flota FCEB de 14 m.