DEPARTAMENTO DE INGENIERIA MECÁNICA

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales

GESTIÓN ENERGÉTICA PARA FLOTAS DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS E HÍBRIDOS CON PILA DE COMBUSTIBLE

Autor: D. Edwin Raúl Grijalva Campana

Ingeniero en Mecánica Automotriz

Director: D. José María López Martínez

Dr. Ingeniero Industrial

2019

Agradecimientos

Quiero expresar mi más profundo agradecimiento a todas las personas que han contribuido para poder concluir esta nueva etapa de mi vida. A mi padre y hermano por haberme apoyado en estos últimos años. A mi madre siempre pendiente de cada avance que lograba. A mi esposa Sully y a mi hijo Luis Alejandro, fueron mi fuerza para cada día enfrentar los nuevos retos que venían. Mucha parte de este logro es gracias a estas personas tan importantes en mi vida. Sin el aporte de cada una de ellas hoy no estaría logrando este enorme reto.

Gracias a D. José María López Martínez, mi director de tesis, por sus constantes sugerencias y consejos, además de su calidad humana, lo más sobresaliente que puedo destacar en estos años que tengo el gusto de conocerlo.

También quiero agradecer a todos mis compañeros del grupo de investigación de Sistemas Alternativos de Propulsión e Impacto Medioambiental de los Vehículos Automóviles, en especial a Nuria y Víctor por echarme una mano cuando lo necesité.

Mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Madrid y en especial al Instituto Universitario de Investigación del Automóvil (INSIA) por haberme acogido durante estos tres años, a todos los profesores de esta casa que contribuyeron en fortalecer los múltiples conocimientos que voy llevando conmigo.

Índice

Agradecimientos	i
Índice.....	ii
Lista de figuras.....	vii
Lista de tablas	xii
Nomenclatura	xiv
Resumen	xix
Abstract.....	xx
Capítulo 1	1
1. Introducción	1
1.1. Ámbito de aplicación de la tesis	1
1.2. Objetivos de la tesis	3
1.3. Metodología	5
1.4. Estructura de la tesis.....	6
Capítulo 2.....	9
2. Estado del Arte.....	9
2.1. Preliminar	9
2.1.1. Las políticas europeas hacia 2030.....	13
2.1.2. Políticas sobre el transporte público	14
2.1.3. Las emisiones por tecnología.....	14
2.1.4. La hoja de ruta del vehículo eléctrico según IEA	16
2.1.5. Estado actual de la movilidad eléctrica en autobuses urbanos.....	17
2.1.6. Estado actual del litio	20
2.1.7. Estado actual de los cargadores	21
2.2. Análisis de la energía primaria a nivel mundial y local	23

2.2.1. La demanda energética a nivel mundial.....	23
2.2.2. Consumo de energía primaria en España.....	25
2.3. Impacto ambiental del transporte a nivel mundial y local	27
2.4. Matriz de generación eléctrica	28
2.4.1. Centrales de generación integradas al sistema eléctrico español peninsular. ..	31
2.4.2. Enfoque a las energías renovables eólica y solar fotovoltaica	37
2.4.3. El costo normalizado de la energía LEC	42
2.5. Almacenamiento de energía	43
2.6. Almacenamiento electroquímico con baterías.....	47
2.6.1. Características eléctricas de una batería	48
2.6.2. Baterías aplicadas en el vehículo.....	51
2.7. El hidrógeno como vector energético.....	59
2.7.1. Naturaleza química del hidrógeno.....	59
2.7.2. Propiedades energéticas del hidrógeno	60
2.7.3. Producción, utilización y demanda de hidrógeno	61
2.7.4. Métodos de obtención de hidrógeno	62
2.7.5. Almacenamiento de hidrógeno.....	63
2.7.6. Costes del hidrógeno	71
2.8. La pila de combustible	77
2.8.1. La pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)	78
2.9. Vehículos híbridos y eléctricos (Tipos de configuraciones).....	84
2.10. Ciclos de conducción	89
2.10.1. Ciclos de conducción en vehículos de golf.....	90
2.10.2. Ciclos de conducción en autobuses urbanos	96
2.11. Análisis del ciclo de vida de los vehículos de carretera	102
2.11.1. Análisis de ciclo de vida de autobuses urbanos	104

Capítulo 3.....	109
3. Diseño de los componentes del sistema de tracción de un vehículo eléctrico.....	109
3.1. Introducción.....	109
3.2. Configuración del tren propulsor	110
3.3. Dinámica vehicular longitudinal.....	112
3.3.1. Resistencia a la rodadura	114
3.3.2. Resistencia aerodinámica	115
3.3.3. Resistencia gravitatoria.....	115
3.3.4. Fuerza neta	116
3.4. Criterios de prestaciones de los vehículos.....	116
3.5. Diseño del tren de potencia.....	119
3.5.1. Potencia de tracción requerida para aceleración	119
3.5.2. Potencia de tracción requerida para velocidad máxima.....	121
3.5.3. Potencia de tracción requerida para la pendiente máxima	121
3.5.4. Características de par del motor eléctrico.....	122
3.6. Frenada regenerativa.....	124
3.7. Sistemas auxiliares	126
3.8. Diseño del sistema de almacenamiento de energía.....	126
3.8.1. Potencia, energía y estado de carga de las baterías	126
3.8.2. Sistema de pila de combustible.....	129
3.9. Convertidores DC–DC	130
3.10. Inversores DC–AC	131
3.11. Rendimiento del tren de potencia.....	132
3.12. Criterios de diseño del vehículo de golf	132
3.12.1. Metodología para obtener el ciclo de conducción.....	132
3.12.2. Prestaciones para el vehículo de golf.....	136

3.12.3.	Diseño del sistema de almacenamiento de energía	138
3.13.	Criterios de prestaciones para buses urbanos	144
3.13.1.	Metodología para obtener el ciclo de conducción de prueba.....	144
3.13.2.	Diseño de los componentes del sistema de tren potencia.....	149
3.13.3.	Diseño de los sistemas auxiliares.....	150
Capítulo 4.....	153	
4.	Modelos de simulación.....	153
4.1.	La herramienta de simulación	153
4.2.	Modelos de simulación desarrollados	154
Capítulo 5.....	163	
5.	Gestión de carga para las flotas de vehículos	163
5.1.	Estrategia de conexión a la red eléctrica de España	163
5.2.	Determinación de emisiones CO ₂ generadas a partir de la conexión a la red eléctrica de España	163
5.3.	Proyecciones del mix eléctrico español hacia 2030	165
5.4.	Definición del escenario para cargar la flota de vehículos de golf.....	167
5.5.	Definición del escenario para la sustitución y carga de la flota de autobuses.	168
Capítulo 6.....	173	
6.	Resultados. Análisis de caso de vehículo de golf FCEREV	173
6.1.	Propuesta de solución energética	173
6.2.	Ajuste del perfil de velocidad del recorrido por el campo de golf	173
6.3.	Esfuerzo de tracción en el recorrido.....	174
6.4.	Gestión de la potencia y energía del sistema propulsor.....	176
6.5.	Estado de carga en modo EV y FCEREV	178
6.6.	Análisis comparativo con otras tecnologías de baterías.	180
6.7.	Comparación entre resultados experimentales y simulados	181
6.8.	Gestión de la energía consumida por la flota	183

Capítulo 7	185
7. Resultados. Análisis de caso de autobús eléctrico urbano	185
7.1. Esfuerzo de tracción en el recorrido.....	185
7.2. Gestión de la potencia y energía del sistema propulsor.....	186
7.3. Ajuste de la capacidad de la batería	191
7.4. Determinación de emisiones CO ₂ a partir de la generación eléctrica en REE	192
7.5. Factor de emisión del pozo a la rueda (WTW)	196
7.6. Comparaciones entre escenarios de sustitución de la flota	201
7.7. Análisis de las emisiones de CO ₂ durante el ciclo de vida del autobús eléctrico frente a las tecnologías tradicionales.	203
Conclusiones.....	206
Futuras líneas de trabajo.....	209
Referencias	211

Lista de figuras

Figura 1.1. Metodología aplicada.	6
Figura 2.1. Evolución de ventas de vehículos híbridos [8].	10
Figura 2.2. Evolución de ventas mundiales de vehículos eléctricos, 2013 – 2017 [9].	11
Figura 2.3. Participación global de EV bajo escenarios de las Nuevas Políticas y EV30@30 [9].	12
Figura 2.4. Estimación de las emisiones de CO ₂ para diferentes tecnologías entre los años 2010 y 2050 [12]	15
Figura 2.5. Proyecciones de ventas anuales de vehículos ligeros por tipo de tecnología en el escenario del BLUE Map [14].	16
Figura 2.6. Distribución de los recursos de litio a nivel mundial [32].	21
Figura 2.7. Cargadores para vehículos eléctricos a nivel mundial hasta 2017 [9].	23
Figura 2.8. Demanda de energía primaria a nivel mundial [36].	25
Figura 2.9. Demanda energética en España desde 1973-2014 [37].	26
Figura 2.10. Consumo final de la Energía por sectores en 2013.	27
Figura 2.11. Evolución de la generación eléctrica renovable y no renovable peninsular [43].	31
Figura 2.12. Centrales base en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).	32
Figura 2.13. Centrales programadas en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).	33
Figura 2.14. Centrales punta en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).	33
Figura 2.15. Centrales de régimen especial en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).	34
Figura 2.16. Potencia instalada en energía solar FV hasta el año 2008 [44].	38
Figura 2.17. Proyección de los costes futuros de los módulos fotovoltaicos [44].	39
Figura 2.18. Proyección hasta el año 2050 en la producción de energía eléctrica a partir de instalaciones solares fotovoltaicas [45].	40
Figura 2.19. Potencia instalada con instalaciones eólicas en la Unión Europea [48].	41
Figura 2.20. Escenario azul para las energías renovables en 2050 [47].	42
Figura 2.21. Costo de la energía normalizada para varios sistemas de generación eléctrica [52].	43
Figura 2.22. Distribución por tipo de almacenamiento de energía a grande escala [54].	44
Figura 2.23. Grado de madurez tecnológica de los sistemas de almacenamiento de energía [54].	45

Figura 2.24. Potencia y energía específica para sistemas de almacenamiento y convertidores de energía utilizados en vehículos [55].	46
Figura 2.25. Potencia y energía específica para los diferentes tipos de baterías [54].	48
Figura 2.26. Reacciones químicas durante la descarga (a) y carga (b) de una batería de Plomo–ácido; (c) muestra la estructura de esta tecnología [61].	52
Figura 2.27. Esquema de una celda de batería tipo Na-NiCl ₂ [64].	54
Figura 2.28. Esquema de una celda de batería tipo Ni-MH [68].	56
Figura 2.29. Esquema de una celda de iones de litio [68].	57
Figura 2.30. Producción y uso del hidrógeno en el año 2009 [81].	62
Figura 2.31. Métodos de producción de hidrógeno.	63
Figura 2.32. Métodos de almacenamiento de hidrógeno [83].	64
Figura 2.33. Volumen que ocupa distintas técnicas de almacenamiento de hidrógeno (Toyota press information, 33rd. Tokyo Motor Show, 1999) [89].	70
Figura 2.34. Estructura interna de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) [128].	78
Figura 2.35. Curva de polarización de una pila de combustible tipo PEM [129].	81
Figura 2.36. Curva de rendimiento y densidad de potencia en función de la densidad de corriente una pila de combustible tipo PEM [62].	82
Figura 2.37. Sistema de pila de combustible [62].	83
Figura 2.38. Curvas características del sistema de pila de combustible [62].	84
Figura 2.39. Tipos de configuraciones híbridas convencionales. (a) Serie (Acoplamiento eléctrico). (b) Paralelo (Acoplamiento Mecánico). (c) Serie–Paralelo (Acoplamiento mecánico y eléctrico). (d) Serie–Paralelo complejo (Acoplamiento mecánico y eléctrico).	85
Figura 2.40. Configuración híbrida con pila de combustible [130].	86
Figura 2.41. Configuraciones para PHEV, serie, paralelo y serie–paralelo [62].	87
Figura 2.42. Configuración PHEV con sistema de pila de combustible [130].	88
Figura 2.43. Configuración del vehículo eléctrico BEV [130].	89
Figura 2.44. Disposición de bucle de prueba para el vehículo de golf [133].	92
Figura 2.45. Ciclo de conducción aplicado por Saad Alam et al. [134].	93
Figura 2.46. Ciclo de conducción aplicado por Liang J, et al. [135].	93
Figura 2.47. Prueba de conducción aplicado por Tolj et al. [136]. (a) En modo eléctrico; (b) En modo híbrido (PC + baterías).	94
Figura 2.48. Ciclo de conducción aplicado por Hamid et al. [137].	95

Figura 2.49. Ciclo de conducción ECT (medidas reales del ciclo FIGE) usados en vehículos pesados [139].	97
Figura 2.50. Ciclo de conducción Braúnschweig para autobuses urbanos [140].	98
Figura 2.51. Ciclo de conducción ADEME-RATP París para autobuses urbanos [140].	99
Figura 2.52. Ciclo de conducción WHVC [142].	100
Figura 2.53. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Porto-Portugal [139,143].	101
Figura 2.54. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Espoo-Finlandia [144,145].	101
Figura 2.55. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Lappeenranta-Suecia [146].	101
Figura 2.56. Esquema del ciclo de vida de un vehículo [148].	103
Figura 2.57. Energía requerida en el ACVG de los buses analizados según el estudio [148].	105
Figura 2.58. Emisiones de GEI generadas en el ACVG de los buses analizados según el estudio [148].	106
Figura 2.59. Contribución porcentual de cada etapa en el consumo de energía fósil en los buses analizados según el estudio [148].	107
Figura 2.60. Contribución porcentual de cada etapa al total de emisiones de GEI generadas en los buses analizados según el estudio [148].	107
Figura 2.61. Ciclo de vida de las baterías para vehículos eléctricos [148].	108
Figura 3.1. Configuración tradicional de un vehículo eléctrico [58].	110
Figura 3.2. Configuración del sistema de tracción del vehículo de golf.	111
Figura 3.3. Configuración del sistema de tracción del bus eléctrico urbano.	111
Figura 3.4. Factores físicos para modelar y diseñar el sistema de propulsión.	113
Figura 3.5. Velocidad máxima como la intersección entre el esfuerzo de tracción del vehículo eléctrico y sus resistencias al movimiento [58].	117
Figura 3.6. Velocidad de aceleración de un vehículo eléctrico accionado por un motor con una transmisión de una sola marcha [58].	118
Figura 3.7. Conexión esquemática del sistema de transmisión que conecta el eje del motor eléctrico con las ruedas.	122
Figura 3.8. Curva de par máximo para la frenada regenerativa.	125
Figura 3.9. Gráfico potencia – tiempo. (a) Configuración pila–batería; (b) Configuración batería–pila [62].	130
Figura 3.10. Esquema del sistema de adquisición de datos instalado en el vehículo de golf.	133
Figura 3.11. (a) Ruta de prueba; (b) Perfil de velocidad de la ruta 1.	134
Figura 3.12. (a) Ruta de prueba; (b) Perfil de velocidad de la ruta 2.	135
Figura 3.13. Perfil de altura para los ciclos de conducción de las rutas 1 y 2.	136
Figura 3.14. Resultados medidos en la ruta de prueba.	140

Figura 3.15. Frecuencia de potencias instantáneas.....	140
Figura 3.16. Curvas características de polarización y potencia de la pila de combustible FCS-C200 dadas por el fabricante [153,162].	142
Figura 3.17. Curvas de polarización y potencia de la pila de combustible FCS-C200 obtenidas por Khanungkhid y Piumsomboon [163].	143
Figura 3.18. Diagrama de bloques de la estrategia de control — Máximo estado de carga de la batería. ...	144
Figura 3.19. Esquema de la instalación del equipo de medida a bordo del autobús.....	145
Figura 3.20. Líneas urbanas: Circular C1 (amarillo), Línea 27 (azul), Línea 63 (verde).....	146
Figura 3.21. Ruta de prueba estándar en carretera. Línea de autobús circular C1 (la sección púrpura indica la ruta 1; la sección blanca indica la ruta 2).	146
Figura 3.22. Perfiles de velocidad y altura reales para un resultado típico en la ruta 1.....	147
Figura 3.23. Perfiles de velocidad y altura reales para un resultado típico en la ruta 2.....	147
Figura 3.24. Microciclo típico en una ruta urbana. Line 27 EMT–Madrid.....	148
Figura 3.25. Características de potencia y par del motor de tracción frente a la velocidad angular del motor.	150
Figura 4.1. Modelo del vehículo de golf eléctrico de autonomía extendida con pila de combustible	154
Figura 4.2. Modelo del autobús urbano eléctrico.	155
Figura 4.3. Modelo equivalente de una celda de batería	157
Figura 5.1. Trayectoria y rendimiento de la conversión de la energía a través de los componentes de la red eléctrica y del sistema de carga del vehículo [151].	165
Figura 5.2. Flotas de autobuses urbanos de la EMT [180].	171
Figura 6.1. Perfiles de velocidad ajustados: (a) Ruta 1. (b) Ruta 2.....	174
Figura 6.2. Esfuerzo de tracción en diferentes puntos operativos para las rutas 1 y 2.	175
Figura 6.3. Curva de par y rendimiento del motor eléctrico HPQ3–48.	176
Figura 6.4. Perfil de velocidad completo (ruta 1 y ruta 2).....	177
Figura 6.5. Potencia instantánea del motor eléctrico.	177
Figura 6.6. Potencia instantánea de batería de tracción y pila de combustible.....	178
Figura 6.7. Energía consumida durante el ciclo	178
Figura 6.8. Variación del estado de carga durante el ciclo de conducción en modo EV	179
Figura 6.9. Variación del estado de carga durante el ciclo de conducción en modo FCEREV.	179
Figura 6.10. Vehículo eléctrico de golf de autonomía extendida con pila de combustible.	182
Figura 6.11. Componentes del sistema de propulsión.	182

Figura 6.12. Adquisición de datos experimentales.....	183
Figura 6.13. Consumo anual de energía eléctrica y de hidrógeno de la flota.....	184
Figura 7.1. Esfuerzo de tracción en diferentes puntos operativos para las rutas 1 y 2.	186
Figura 7.2. Comportamiento del modelo de simulación del autobús urbano para la Ruta 1.	188
Figura 7.3. Comportamiento del modelo de simulación del autobús urbano para la Ruta 2.	190
Figura 7.4. Demanda típica del del mix eléctrico de España para un día de verano (Julio 30, 2017 [42])....	193
Figura 7.5. Factores de emisión de CO ₂ del mix eléctrico español para el año 2017.	194
Figura 7.6. Intensidad de emisión de CO ₂ del autobús urbano modelado en función de distintos horarios de carga, se considera la generación del mix eléctrico español en 2017.....	196
Figura 7.7. Comparación de las emisiones estimadas de CO ₂ por la sustitución de la flota de autobuses en las diferentes fases a partir de la generación eléctrica 2017 en el actual mix eléctrico español.....	199
Figura 7.8. Comparación de las emisiones estimadas de CO ₂ por la sustitución de la flota de autobuses en las diferentes fases a partir de la generación eléctrica del escenario DG2030 del mix eléctrico español.	200
Figura 7.9. Comparación de las emisiones estimadas de CO ₂ entre el mix eléctrico español actual y el del escenario DG2030.....	200
Figura 7.10. Actuales intensidades de emisiones de CO ₂ según las etapas del ciclo de vida de las tecnologías de la flota de autobuses urbanos de la EMT.	204
Figura 7.11. Intensidad de emisiones de CO ₂ proyectada hacia el horizonte DG2030 según	205

Lista de tablas

Tabla 2.1. Características técnicas de autobuses eléctricos disponibles comercialmente.....	19
Tabla 2.2. Emisiones de MtCO_2 causadas por el sector del transporte [37–40].	28
Tabla 2.3. Potencia instalada en el mix eléctrico español a nivel peninsular [42,43].	30
Tabla 2.4. Propiedades del Hidrógeno [69–71].	60
Tabla 2.5. Densidades de energía volumétrica y gravimétrica de los combustibles utilizados en el transporte [72–75].	61
Tabla 2.6. Categorización en el almacenamiento de H_2 [85].	64
Tabla 2.7. Categorización de Hidruros Metálicos [85].	67
Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de vehículos eléctricos con pila de combustible.	69
Tabla 2.9. Costos del hidrógeno según las tecnologías actuales.	75
Tabla 2.10. Propiedades técnicas de las principales pilas de combustible [122–127]	77
Tabla 3.1. Valores de coeficiente a la rodadura para distintos tipos de vehículos [85].	114
Tabla 3.2. Coeficientes C_x para varios tipos de vehículos.	115
Tabla 3.3. Prestaciones para los vehículos analizados.	119
Tabla 3.4. Especificaciones del vehículo de golf.....	137
Tabla 3.5. Especificaciones motor eléctrico HPEVS AC-20.....	137
Tabla 3.6. Pila de Combustible FCS-C200. Especificaciones [162,163]	141
Tabla 3.7. Especificaciones del ciclo de conducción medido.....	147
Tabla 3.8. Especificaciones del autobús urbano eléctrico.	149
Tabla 3.9. Especificaciones de la máquina eléctrica.....	150
Tabla 3.10. Valores estimados y seleccionados del tren de potencia.	152
Tabla 4.1. Especificaciones para la curva de polarización en el simulador de software automotriz [162–164,172].	162
Tabla 5.1. Factor de emisión de CO_2 por tipo de generador [173,174].	164
Tabla 5.2. Rendimiento global de los componentes del sistema de carga [151,159].	164
Tabla 5.3. Centrales de generación eléctrica en España peninsular hasta 2030 [5,175–177].	166
Tabla 5.4. Generación de las centrales eléctricas en España peninsular hasta 2030 [5,175–177].	167

Tabla 5.5. Características de la flota de vehículos de golf.....	168
Tabla 5.6. Especificaciones del informe anual 2017 de la EMT.....	172
Tabla 6.1. Comparación entre los modos EV y FCEREV.	180
Tabla 6.2. Comparaciones entre diferentes tecnologías de baterías aplicadas a la simulación de golf car.	181
Tabla 6.3. Comparaciones entre pruebas medidas y simuladas.	181
Tabla 6.4. Resultados de la gestión de energía en la flota.	184
Tabla 7.1. Resultados relevantes obtenidos durante la simulación de rutas.	191
Tabla 7.2. Comparación del FE promedio en el mix eléctrico peninsular frente al FE en el horario de 00:30 a 03:50 am.	195
Tabla 7.3. Detalle de los resultados simulados del bus eléctrico urbano al funcionar durante una jornada laboral completa y su conexión entre las 00:30 y 03:50 am en el mix eléctrico español.....	197
Tabla 7.4. Comparación de las emisiones de CO ₂ de los diferentes autobuses de la flota frente al modelo propuesto.	198
Tabla 7.5. Comparación de las emisiones gases contaminantes y de GEI (CO ₂) para diferentes escenarios de la flota de autobuses.....	202

Nomenclatura

A_f	Área frontal del vehículo
a_x	Aceleración longitudinal
act	Pérdidas de activación de la pila de combustible
b	Pendiente de Tafel
C_x	Coeficiente aerodinámico
C_{BAT}	Capacidad de la batería
$C_{QH,conc}$	Capacitancia por sobretensión de concentración
$C_{QH,trans}$	Capacitancia por sobretensión de transferencia
C_{mix}	Requerimiento de carga del mix eléctrico
c_h	Concentración molar de oxígeno en el canal
C_h^*	Concentración de oxígeno en la entrada del canal
c_{ref}	Concentración molar de oxígeno de referencia
D	Coeficiente de difusión del oxígeno en el CCL
D_b	Coeficiente de difusión de oxígeno en el GDL
$E_{BAT,out}$	Energía cedida por la batería
E_{BES}	Capacidad de almacenamiento de energía de la batería
E_{BAT}	Energía descargada por la batería
ΔE_{max}	Energía consumida durante el ciclo
EI_{veh}	Intensidad de emisión de CO ₂ del vehículo
FE_{mix}	Factor de emisión del mix eléctrico
f_0	Valor del coeficiente de resistencia a la rodadura a velocidad próxima a cero
f_s	Factor de variación de f_r con la velocidad
f_r	Coeficiente de rodadura
F_{net}	Fuerza neta
F_T	Esfuerzo tractor

F_{Tmax}	Esfuerzo tractor máximo
F_{xa}	Resistencia aerodinámica
F	Constante de Faraday
I_r	Momento de inercia de las masas que giran con las ruedas respecto a sus ejes de giro
I_t	Momento de inercia de los componentes de la transmisión
i	Deslizamiento de la rueda
i_d	Corriente de descarga constante
i_*	Densidad de corriente de intercambio volumétrico
$I_{QH,ohmic}$	corriente actual de la celda de la batería
I_X	Corriente que pasa por la resistencia óhmica de los sistemas auxiliares
j_0	Densidad de corriente una celda de la pila de combustible
j_σ	Parámetro de densidad de corriente
j_*	Parámetro escalar de densidad de corriente
j_{lim}^*	Límite de densidad de corriente debido al transporte de oxígeno del GDL
$\tilde{j}_0$	Densidad de corriente adimensional
$k_{v,add,trac}$ + $k_{v,add,push}$	El equivalente a γ_m
$k_{W,emp}$	Coeficiente empírico de resistencia a la rodadura
l_t	Espesor de la capa de catalizador
l_b	Espesor del GDL
m	Masa del vehículo (incluyendo pesos adicionales)
M_{ME}	Par del motor eléctrico
M_{EMout}	Par de salida del motor eléctrico
P	Peso del vehículo
P_{ME}	Potencia nominal del motor eléctrico
P_{MEmax}	Potencia máxima del motor eléctrico
$P_{ME,el}$	Potencia eléctrica del motor eléctrico
P_{MEmec}	Potencia mecánica del motor eléctrico

$P_{ME_{loss}}$	Potencia perdida debido a las pérdidas en el hierro, en el cobre y las provocadas por la fricción
$P_{ME,el,ent}$	Potencia eléctrica que entra la motor cuando hay frenada regenerativa
P_t	Potencia de tracción
$\bar{P}_{drag}$	Potencia media de arrastre
$P_{t_{ace}}$	Potencia de tracción requerida para la aceleración
$P_{t_{vel}}$	Potencia de tracción requerida para velocidad máxima
$P_{t_{slp}}$	Potencia de tracción requerida para la pendiente máxima
P_f	Potencia de frenado
P_{BAT}	Potencia de las baterías
$P_{BAT,out}$	Potencia de salida en los terminales de la batería durante la tracción
$P_{BAT,in}$	Potencia de entrada en los terminales de la batería durante la frenada regenerativa
P_{PC}	Potencia de la pila de combustible
P_{aux}	Potencia de los sistemas auxiliares
Q_{QH}	Capacidad disponible
$Q_{QH,max}$	Capacidad nominal
$Q_{QH,conc}$	Capacitancia por sobretensión de concentración
$Q_{QH,trans}$	Capacitancia por sobretensión de transferencia
r^2	Producto del radio cinemático equivalente con el radio del neumático bajo carga suponiendo como coincidentes a cada uno de ellos
r	Radio nominal de la rueda
r_e	Radio de la rueda bajo carga
R_a	Resistencia al avance
R_g	Resistencia gravitatoria
R_r	Resistencia a la rodadura
$R_{r,stab}$	Resistencia a la rodadura en estado estacionario
R_{QH}	Resistencia de los elementos RC (Resistencia–Condensador)
$R_{X,act}$	Resistencia óhmica que representa los sistemas auxiliares
$R_{\Omega j_0}$	Pérdidas de tensión debido a las resistencias óhmicas en la pila de combustible

SOC	Estado de carga de una batería
SOC_t	Máximo estado de carga de la batería
SOC_b	Mínimo estado de carga de la batería
SOC_{QH}	estado de carga de la celda de la batería
$T_{W,act}$	Temperatura actual del neumático
$T_{W,stab}$	Temperatura del neumático estabilizada
T_{QH}	Temperatura actual de batería
t_a	Tiempo de aceleración
t_{CCL}	Pérdidas por transporte de masa en el CCL
t_{GDL}	Pérdidas por transporte de masa en el GDL
$U_{QH,terminal}$	Voltaje ideal de la celda
$U_{X,net}$	Tensión en la resistencia de los sistemas auxiliares
V	Velocidad del vehículo
V_{max}	Velocidad máxima
V_b	Velocidad base
V_f	Velocidad final
V_{re}	Velocidad lineal del vehículo
V_{DC}	Tensión del paquete de baterías
V_{cell}	Tensión de cada celda de la pila de combustible
V_{OC}	Tensión de circuito abierto de celda de la pila de combustible
$WSER$	Requerimiento de energía en el enchufe cargador
β	Parámetro adimensional en función del valor de la densidad de corriente adimensional $\tilde{j}_0$
γ_m	Factor de mayoración de masa
η_j	Rendimiento de la transmisión
$n_{ME,max}$	Régimen máximo del motor eléctrico
η_{ME}	Rendimiento del motor eléctrico
$\eta_{ME,gen}$	Rendimiento del motor eléctrico en modo generador
η_T	Rendimiento total del tren de potencia

$\eta_{BAT,dis}$	Rendimiento de la batería en descarga
$\eta_{BAT_{Ch}}$	Rendimiento de la batería en carga
η_{DC-AC}	Rendimiento del inversor
η_{FC}	Rendimiento de la pila de combustible
η_{DC-DC}	Rendimiento del convertidor
η_0	Pérdidas totales de voltaje en la capa catalítica del cátodo de la pila de combustible
η_{trans}	Rendimiento de transmisión de la energía eléctrica en alta tensión
η_{dist}	Rendimiento en la distribución de la energía eléctrica
$\eta_{charged}$	Rendimiento de carga (conector - batería)
θ	ángulo de pendiente de calzada
λ	Factor de frenada regenerativa
ρ	Densidad del aire
ξ_j	Relación de transmisión del motor respecto a las ruedas
$\xi_{j',min}$	Relación de transmisión mínima de la caja de cambios
ξ_d	Relación de transmisión del diferencia
σ_t	Conductividad iónica en el CCL
ω_{ME}	Velocidad angular del motor eléctrico
ω_{re}	Velocidad angular de las ruedas motrices

El presente trabajo desarrolla una metodología para gestionar la energía de flotas de vehículos eléctricos evaluando dos tipos de configuraciones. La primera se refiere a la de un tren propulsor híbrido con pila de combustible (configuración batería–pila), que corresponde a un vehículo eléctrico de autonomía extendida. Este sistema incluye dos fuentes de almacenamiento de energía: el primero es el de un paquete de baterías de plomo–ácido con una capacidad de 5,04 kWh, mientras que el segundo consiste en una botella con hidrógeno almacenado en hidruros metálicos y su uso mediante una pila de combustible de membrana polimérica de 200 W de potencia. La segunda configuración del tren de potencia se refiere a la de un vehículo eléctrico puro propulsado por baterías, para este caso se ha optado por baterías de litio–hierro fosfato con una capacidad de 324 kWh.

Para obtener los resultados se ha partido de medidas experimentales de ciclos de conducción con sus correspondientes perfiles de altura. Se han planteado las prestaciones de los vehículos y se ha desarrollado un modelo de simulación con una herramienta de software para cada tipo de configuración del tren propulsor. De esta manera se han obtenido datos de consumo de energía y de combustible a través de cada ciclo de conducción.

La parte final del trabajo muestra los resultados desde dos puntos de vista. La configuración híbrida con pila de combustible se plantea como una solución energética a una aplicación de movilidad específica, mientras que la configuración eléctrica pura está más enfocada hacia la movilidad sostenible en el ámbito urbano.

Abstract

This thesis develops a methodology to manage the energy of fleets of electric vehicles evaluating two types of configurations. The first one refers to a hybrid powertrain with a fuel cell (Battery-Fuel cell configuration), which corresponds to an electric vehicle with extended range. The system includes two sources of energy storage: The first is that of a lead-acid battery pack with a capacity of 5.04 kWh, while the second consists of a hydrogen bottle stored in metal hydrides and its use by a polymer membrane fuel cell with 200 W of power. The second powertrain configuration is that of a pure electric vehicle powered by batteries, for this case we have chosen lithium-iron phosphate batteries with a capacity of 324 kWh.

To obtain the results, experimental measurements of driving cycles with their corresponding height profiles have been started. The performance of the vehicles has been proposed and a simulation model has been developed with a software tool for each type of powertrain configuration. In this way, energy and fuel consumption data have been obtained through each driving cycle.

The final part of the work shows the results from two points of view. The hybrid configuration with a fuel cell is proposed as an energy solution to a specific mobility application, while the pure electrical configuration is more focused on sustainable mobility in the urban environment.

1.1. **Ámbito de aplicación de la tesis**

El vehículo eléctrico se proyecta como el sustituto del impulsado con motor de combustión, esto se debe fundamentalmente a la regulación de emisión de gases contaminantes y de efecto invernadero que se establecen a nivel mundial. El calentamiento global sigue siendo uno de los principales problemas en el planeta, y el transporte es uno de los sectores más incidentes.

Dadas las exigentes normas medioambientales, en los últimos años se ha despertado significativamente el interés hacia nuevas tecnologías de movilidad, esto ha provocado que las marcas de fabricantes de vehículos estén dedicando grandes presupuestos a la investigación hacia una movilidad sostenible.

Actualmente las alternativas propuestas para reducir las emisiones contaminantes en el transporte se enfocan al uso de vehículos híbridos (MCI + ME) y eléctricos, los primeros aún incluyen en su sistema un motor de combustión interna y en el presente es una tecnología madura pero considerada como de transición. Se prevé que el vehículo eléctrico sea la alternativa de recambio a mediano y largo plazo, sin embargo, debe vencer aún barreras tecnológicas que no han permitido su uso masivo, principalmente el de autonomía para desplazarse por trayectos de largo recorrido. Otro problema fundamental viene a ser la fuente primaria con la que se genera su recarga, además de la infraestructura de carga, ya que este tipo de vehículos normalmente toma la energía de la red eléctrica. Para que exista una sostenibilidad en la movilidad, la energía de recarga debe provenir de

fuentes renovables, de otro modo no se estaría emitiendo en el vehículo, pero si en la fuente.

Un tema controvertido relacionado con los vehículos eléctricos es el ciclo de vida de las baterías y como afecta a la intensidad de las emisiones de CO₂. Este parámetro conduce a la comparación con el resto de las tecnologías, principalmente con las de vehículos diésel y gasolina. Existen estudios en los que se ha analizado el ciclo de vida completo de un vehículo eléctrico de batería (BEV), demostrando que la contaminación por baterías de litio es solo el 14% de la intensidad total de emisión de CO₂ durante la vida del vehículo [1,2].

La fortaleza del vehículo eléctrico en comparación con las tecnologías tradicionales es que depende del mix eléctrico de un país. A modo de ejemplo, en la Unión Europea, el mix eléctrico de Polonia tienen el mayor factor de emisión (650 gCO₂/kWh). A pesar de esto, si se incorporan vehículos eléctricos a este mix eléctrico, su intensidad de emisión de CO₂ es un 25% menos contaminante que un vehículo diésel ligero [1]. El factor de emisión promedio de la Unión Europea es de 300 gCO₂/kWh, con el objetivo de alcanzar los 200 gCO₂/kWh para 2030 [3]. Mientras que España en 2017 tuvo un factor de emisión de 284 gCO₂/kWh, y de 257 gCO₂/kWh a nivel peninsular [4]. En el escenario DG2030 se espera un factor de emisión en el mix eléctrico español de 82 gCO₂/kWh a nivel peninsular [5], con estos factores de emisión se ratifica que el uso del vehículo eléctrico es la vía más solvente de movilidad sostenible.

Existe una alternativa que se deriva del vehículo eléctrico de baterías (BEV) denominada vehículo híbrido de pila de combustible (FCHEV), esta tecnología consiste en combinar la energía eléctrica de una batería con la de una pila de combustible que utiliza al hidrógeno (H₂) como vector energético. Por razones tecnológicas, que se explicarán en capítulos posteriores, es poco probable que dichos vehículos se propulsen únicamente con pila de combustible (FCEV). Los vehículos eléctricos que utilicen pila de combustible

pretenden resolver el problema tanto de autonomía como del repostaje (de 3 a 5 minutos) [6].

El H_2 es un elemento que puede estar almacenado en estado líquido en tanques criogénicos, cilindros de gas a alta presión e hidruros metálicos [7], en el sector de la automoción el almacenamiento a alta presión es el más utilizado. El principal problema del uso del H_2 en el transporte es que este elemento no se encuentra en estado puro en la naturaleza, sino que forma parte de otros compuestos principalmente el agua (H_2O) e hidrocarburos (HC), por lo que, debe ser producido a partir de fuentes primarias de energía. En el presente la mayor parte de H_2 producido proviene principalmente de fuentes no renovables, de hecho, el 96 % se genera de esta manera. Para que este combustible sea sostenible en los vehículos debe provenir de fuentes renovables de energía (energía solar, eólica, geotérmica, hidráulica, etc.), de otra forma se estaría recurriendo nuevamente a no contaminar en el vehículo, pero sí en la fuente.

1.2. Objetivos de la tesis

Este trabajo de investigación tiene como objetivo general desarrollar una metodología para determinar la gestión energética de flotas de vehículos eléctricos e híbridos con pila de combustible.

Para la consecución de este objetivo general se ha planteado los siguientes objetivos específicos:

1. Determinar los parámetros de diseño del tren de potencia para vehículos eléctricos e híbridos con pila de combustible.
2. Determinar los parámetros vinculados al ciclo de conducción relacionándolos con las prestaciones energéticas de los vehículos eléctricos e híbridos con pila de combustible.

3. Determinar el consumo de energía y combustible en un ciclo de conducción para cada configuración propuesta en los dos casos de análisis.
4. Definir escenarios adecuados para gestionar estratégicamente la recarga de combustible y energía eléctrica.

Los casos de análisis en el desarrollo de esta tesis se concretan en dos flotas específicas relacionadas una con tren propulsor puramente eléctrico y la otra con tren propulsor híbrido con pila de combustible. Para cada uno de los casos de análisis se plantean los siguientes objetivos secundarios propios de su aplicación concreta:

Para la flota de vehículos híbridos con pila de combustible:

1. Analizar el modelo de pila de combustible planteado en el software de simulación.
2. Comparar el comportamiento del vehículo en modo eléctrico puro y en modo híbrido, de esta forma determinar el estado de carga de la batería al final de una jornada laboral.
3. Analizar los costos que incurre la carga de energía eléctrica y repostaje de hidrógeno (generado por electrólisis) a partir del costo diferenciado de la tarifa 2.0 DHS para vehículos eléctricos.

Para la flota de vehículos eléctricos:

1. Analizar el comportamiento del mix eléctrico español, especialmente el que va relacionado a los factores de emisiones de las centrales eléctricas y como esto afecta a la intensidad de emisiones de los autobuses eléctricos.
2. Definir horarios de conexión de las flotas de vehículos eléctricos en el mix eléctricos y como afecta en la intensidad de emisión.

3. Definir un escenario de remplazo de la flota hacia 2030 y con el escenario del mix eléctrico DG2030, de esta manera determinar las emisiones que se pueden reducir en la transición energética por el cambio de tecnología.
4. Comparar a través del análisis se ciclo de vida global (ACVG) la intensidad de emisión de CO₂ de cada tecnología de vehículo.

Se debe recalcar que esta tesis doctoral propone un análisis de escenarios energéticos, lo que conlleva a ciertos límites, tomando en cuenta que ningún escenario es una predicción del futuro, sino que son situaciones que se proponen en un modelo de cálculo que indica lo que ocurriría si se hiciesen algunas cosas que en la práctica podrían o no realizarse.

1.3. Metodología

La metodología propuesta se redacta a lo largo de los capítulos, resumiendo esto, en primer lugar, se ha realizado el estado del arte de todo lo concerniente a la tecnología del vehículo eléctrico. Para el posterior desarrollo, la Figura 1.1 muestra un diagrama esquemático de lo planteado a lo largo de esta investigación.

Se han tomado datos ensayados en recorridos a través de equipos de medición instalados en los vehículos, de esta manera se ha obtenido un ciclo de conducción experimental para cada aplicación. En función del ciclo de conducción se determinan las prestaciones del vehículo las cuales permiten diseñar el tren propulsor de cada configuración. Una vez realizado el diseño, se ha presentado un modelo de simulación a través de una herramienta de software, obteniendo como resultado datos del consumo de energía y combustible en cada caso de análisis, para la posterior validación de los modelos. De esta manera se han propuesto escenarios energéticos para la gestión de carga de las flotas y la obtención de los resultados descritos en los capítulos 6 y 7.

Figura 1.1. Metodología aplicada.

1.4. Estructura de la tesis

La presente investigación está estructurada en ocho capítulos, siendo la presente introducción el primero de ellos.

En el segundo capítulo se estudia el estado del arte de la tecnología actual. Se analiza temas importantes como el impacto medio ambiental del transporte por carretera, la matriz eléctrica española (mix eléctrico), la introducción de las principales energías renovables (eólica y solar fotovoltaica). Además, se analiza el estado actual de los vehículos eléctricos, principalmente sus tipologías y las formas de almacenamiento de energía requeridas por los sistemas propulsores.

En el tercer capítulo se diseña los componentes del sistema de propulsión para los dos tipos de configuraciones. Los cálculos se realizan mediante el análisis de la dinámica vehicular longitudinal, tomando en cuenta las fuerzas resistentes y los criterios de prestaciones que se desean obtener.

En el cuarto capítulo se modela mediante una herramienta de simulación el comportamiento energético de los dos casos de análisis. Se ha validado el modelo mediante un ciclo de conducción experimental. De esta manera se obtienen resultados como: el consumo de energía y combustible, estado de carga de las baterías y comportamiento de los distintos componentes del sistema de propulsión.

En el quinto capítulo se analiza la gestión de la carga de las flotas, para la flota de vehículos de golf se plantea una gestión de carga combinada, ya que por un lado se deben cargar las baterías, mientras que también se debe repostar el hidrógeno consumido, el cual se propone sea generado mediante un electrolizador conectado a la red eléctrica. Para el caso de la flota de autobuses urbanos, al ser un vehículo eléctrico propulsado exclusivamente por baterías, se plantea una estrategia de conexión a la red eléctrica. El objetivo para este caso es determinar la incidencia positiva que conlleva la electrificación de la movilidad urbana.

En el capítulo 6 se presenta los resultados referentes a la flota de vehículos de golf, aquí se muestra la gestión de la potencia y energía del sistema propulsor. Para este caso se compara los resultados del modelo físico construido con el modelo simulado. Además, se calcula la energía eléctrica y repostaje de hidrógeno de toda la flota y los costes que llevaría con la tarifa actual de energía eléctrica.

En el capítulo 7 se presenta los resultados correspondientes a la flota de autobuses urbanos. Al igual que en el capítulo 6 se muestran los resultado de la simulación, sin embargo, el análisis en esta aplicación está más enfocada a la determinación de gases

contaminantes y de efecto invernadero que se estarían reduciendo frente a la flota actual y las proyecciones evolutivas con los nuevos escenarios del mix eléctrico. Además, tiene un apartado comparativo del análisis de ciclo de vida global de todas las tecnologías de propulsión de los autobuses urbanos.

Finalmente, el capítulo 8 presenta las conclusiones y las aportaciones realizadas por esta tesis doctoral, así como también plantea las futuras líneas de investigación que pueden derivarse de este trabajo.

2.1. Preliminar

Los vehículos con sistemas de propulsión alternativa se han incrementado en los últimos 20 años, desde el lanzamiento del primer Toyota Prius en 1997, se puede afirmar que el desarrollo de esta tecnología ha tenido un aumento exponencial. La Figura 2.1 muestra la tendencia de participación en ventas de los distintos modelos de vehículos híbridos livianos de las catorce principales marcas de automóviles en los últimos quince años. Esta tendencia ha llevado a un número cada vez mayor de vehículos híbridos con una situación actual de más de 50 modelos, lo que permite ver que la tecnología llega a un mayor número de clientes. Una tendencia similar también se puede ver en la Figura 2.1 para las ventas de automóviles híbridos en los principales mercados, aunque todavía representan una pequeña parte de los mercados de automóviles de pasajeros de EE. UU y Europa, con un 3,2% y un 0,7% respectivamente. Si bien los catorce fabricantes de automóviles más grandes del mundo producen vehículos híbridos, Toyota lleva la delantera al mantener su liderazgo en el mercado desde el Prius de 1997, y sus ventas representaron en 2012 casi el 70% de las ventas de automóviles híbridos en los Estados Unidos [8].

Figura 2.1. Evolución de ventas de vehículos híbridos [8].

Respecto a los vehículos eléctricos, su participación cada vez es más representativa, de hecho, las ventas de automóviles eléctricos en 2017 superaron el millón de unidades en todo el mundo, una cifra récord que representa un crecimiento en ventas del 54% en comparación con las de 2016. En países como Noruega en 2017 los automóviles eléctricos representaron el 39% del total de las ventas de automóviles nuevos, considerando a este mercado como el más desarrollado del mundo en términos de participación de ventas. Los siguientes mercados europeos exitosos son Islandia y Suecia que lograron una participación de venta de 11,7% y 6,3% respectivamente [9,10]. Otro país con una gran participación es China, el cual acapara más de la mitad de las ventas mundiales de vehículos eléctricos, con una participación en su mercado del 2,2% del volumen total vendido en 2017 [9].

Con estos números en el presente existen ya más de 3 millones de automóviles eléctricos rodando a nivel mundial, luego de superar el umbral de 1 millón en 2015 y los cercanos 2 millones en 2016. Del total ponderado la mayor participación del mercado la tiene China en donde se encuentran el 40% de vehículos con este tipo de tecnología. La

Figura 2.2 muestra el incremento de la participación de vehículos eléctricos desde 2013 hasta el año 2017 según un informe de la IEA.

Figura 2.2. Evolución de ventas mundiales de vehículos eléctricos, 2013 – 2017 [9].

La electrificación en vehículos de transporte pesado, específicamente en autobuses también se está desarrollando con rapidez. En 2017, las ventas de autobuses eléctricos fueron aproximadamente de 100 000 unidades y en el presente existen 370 000 unidades en total. Otro tipo de vehículo que ha logrado una gran participación son los eléctricos de dos ruedas que alcanzaron los 250 millones de unidades. La electrificación de estos dos tipos de vehículos ha sido impulsada principalmente por los desarrollos hechos en China, que representan el 99% del total de la producción [9].

Hasta ahora la implementación de vehículos eléctricos se debe principalmente a las políticas de movilidad propuestas. Los principales mercados por volumen (China) y por cuota de ventas (Noruega) tienen el principal impulso político [10], que se enfoca principalmente en vehículos ligeros (LDV por sus siglas en inglés), así como también para autobuses y vehículos de dos ruedas. Los volúmenes más grandes de autobuses se encuentran en China, el país con las políticas más fuertes sobre la movilidad eléctrica. La Unión Europea también espera tener mayor participación con la reciente propuesta sobre emisiones de dióxido de carbono (CO₂) para estándares hacia el horizonte 2030 [11]. Otros

países del planeta en menor grado también apuntan a un creciente aporte del vehículo eléctrico.

La mayor participación de esta tecnología depende en gran medida de las políticas de apoyo existentes y anunciadas, además de las reducciones de costos que implique su fabricación. Bajo este escenario el número de vehículos eléctricos livianos en carretera podrían alcanzar una participación de 125 millones de unidades para 2030, inclusive si las ambiciones políticas continúan en aumento para cumplir los objetivos climáticos, bajo el escenario EV30@30 (escenario lanzado en Octava Reunión Ministerial de Energía Limpia en 2017), se estimaría que el número de vehículos eléctricos livianos podría llegar hasta 220 millones en 2030, 130 millones propulsados por baterías (BEV) y 90 millones de híbridos enchufables (PHEV) [9]. En la Figura 2.3 se puede observar lo antes mencionado.

Figura 2.3. Participación global de EV bajo escenarios de las Nuevas Políticas y EV30@30 [9].

EL rápido desarrollo de la producción de baterías de litio y la reducción de costos por el aumento de las ventas de automóviles eléctricos, han tenido efectos positivos en otros modos de transporte, como los autobuses urbanos. Estos también experimentan una transición significativa a la movilidad eléctrica, a pesar de que existen aún algunos desafíos como el alto costo de capital y la complejidad de la instalación de infraestructura de carga,

en ciudades de China y Europa están teniendo un alto impacto. Por ejemplo, las políticas en ciudades de China impulsaron la electrificación de las flotas de autobuses urbanos, mientras que, en Europa, una combinación de política pública, y los interés de las ciudades para mejorar la calidad del aire.

2.1.1. Las políticas europeas hacia 2030

El 8 de noviembre de 2017, la Comisión Europea presentó una propuesta legislativa que establece nuevos estándares de emisión de CO₂ para vehículos de turismo y vehículos comerciales ligeros (furgonetas) en la UE para el período posterior a 2020 [11]. El marco propuesto se basa en el reglamento vigente que establece estándares de emisión de CO₂ para automóviles y furgonetas que se derogarán el 1 de enero de 2020 (REGLAMENTO (CE) No 443/2009 DEL PARLAMENTO EUROPEO Y DEL CONSEJO).

Los objetivos se establecen para el promedio de emisiones en la UE de automóviles y furgonetas nuevas a partir de 2025 en adelante, con objetivos más estrictos que se aplicarán desde 2030, incluyendo un mecanismo para incentivar la utilización de vehículos de cero y bajas emisiones de manera neutral desde el punto de vista tecnológico.

Las propuestas se establecen en contribuir los compromisos de la UE en virtud del acuerdo de París, reducir los costos de combustible para los consumidores, fortalecer la competitividad de la industria automotriz de la UE y estimular el empleo. La meta es lograr la reducción del 26% de emisiones medias tanto de automóviles como de furgonetas respecto a las de 2021. La primera fase consiste en que para 2025, las emisiones promedio en automóviles y furgonetas sean un 15% más bajas que en 2021, a fin de garantizar que las reducciones de emisiones se produzcan lo antes posible.

Para proporcionar la transición del marco actual al futuro, la propuesta también incluye los objetivos ya establecidos para 2020/2021 de 95 gCO₂/km para turismos y 147 gCO₂/km para vehículos comerciales ligeros, los cuales se basan en el procedimiento de la prueba NEDC. Sin embargo, a partir de 2021 los objetivos de emisión se basarán en el

nuevo procedimiento de la prueba de emisiones WLTP (Worldwide Harmonised Light Vehicle Test Procedure), que se introdujo desde el 1 de septiembre de 2017.

Finalmente, lo que se pretende es acelerar la captación del mercado de vehículos de cero y bajas emisiones, el marco propuesto plantea un mecanismo de incentivo de neutralidad tecnológica, de este modo brindar al mercado una señal clara de inversión en vehículos limpios. El incentivo cubre los vehículos de cero emisiones como los de batería o pila de combustible y los de baja emisión (que las emisiones no excedan de 50 gCO₂/km), estos son principalmente los vehículos híbridos enchufables.

2.1.2. Políticas sobre el transporte público

Respecto al transporte público, la UE en busca del horizonte 2020 resolvió el 23 de abril de 2009 dar a conocer “DIRECTIVE 2009/28/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL, on the promotion of the use of energy from renewable sources and amending and subsequently” [2], la cual hace referencia en un apartado al transporte público en particular, incentivando su uso, la aplicación de tecnologías de eficiencia energética y el uso de fuentes renovables en este sector, de este modo reducir la dependencia del petróleo.

Este planteamiento incentiva a que los estados miembros deben esforzarse por reducir el consumo total de energía y aumentar la eficiencia energética en el transporte. Entre los principales medios para reducir el consumo de energía en el transporte se encuentran la planificación del transporte, el fomento del transporte público, el aumento de la producción de vehículos eléctricos y la fabricación de vehículos más eficientes desde el punto de vista energético.

2.1.3. Las emisiones por tecnología

La Figura 2.4 muestra la intensidad de emisiones de CO₂ de las distintas tecnologías de vehículos. Se puede decir que existen diferentes alternativas a los BEV que podrían reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y reducir la dependencia del petróleo

en el sector del transporte. En primer lugar, se podría mejorar la eficiencia de los vehículos con motores de combustión interna (ICEV por sus siglas en inglés) tanto diésel como gasolina y reducir sus emisiones, esta solución es la más económica, sin embargo, nunca será una tecnología de cero emisiones, aunque se están desarrollando biocombustibles para reducir la dependencia del petróleo, muy difícilmente llegarán a cumplir la normativa de emisiones propuesta por la Comisión Europea. Los vehículos híbridos paralelos o híbridos serie también son una buena alternativa a los BEV, particularmente para usos de larga distancia o para automóviles más grandes debido a que tienen una mayor autonomía y su batería es de menor capacidad por lo que su precio es más bajo. Los FCHEV también son una alternativa, al igual que los BEV, son la solución con cero emisiones en el punto de uso, pero con la ventaja de mayor autonomía para viajes largos. Por la escalabilidad de la pila de combustible es aplicable tanto para vehículos livianos como para pesados, sin embargo, hasta ahora el mayor problema sigue siendo la vida útil y el costo de la pila de combustible, además la red de infraestructura necesaria es más compleja que para los vehículos eléctricos [12,13].

Figura 2.4. Estimación de las emisiones de CO₂ para diferentes tecnologías entre los años 2010 y 2050 [12] .

A pesar de las mejoras en el ahorro de combustible, la capacidad de los ICEV para reducir el CO₂ es significativamente menor que los BEV y FCHEV, que pueden alcanzar valores cercanos a cero emisiones de CO₂ bajo un análisis del pozo a rueda.

2.1.4. La hoja de ruta del vehículo eléctrico según IEA

Según un informe de la Agencia Internacional de la Energía (IEA por sus siglas en inglés) bajo un escenario denominado “BLUE Map Scenario” [14], las emisiones anuales de CO₂ se lograrían reducir a la mitad de 2005 a 2050, el informe completo describe la contribución de los diferentes sectores para alcanzar este objetivo, así como el papel de los diferentes grupos de interés, y cómo deben interactuar. El rol de los vehículos livianos BEV y PHEV, bajo este escenario deben reducir a nivel mundial un 30% las emisiones actuales de CO₂ en el sector del transporte por carretera para 2050.

El escenario BLUE Map maneja objetivos ambiciosos como: al menos 5 millones de BEV y PHEV vendidos hasta 2020, y el 50% de las ventas en todo el mundo para 2050 [14]. La Figura 2.5 muestra la distribución de las ventas anuales de los vehículos ligeros por tecnología hasta 2050. Las ventas de BEV aumentan desde 2030 y en 2050 son el segundo tipo de vehículo más vendido después de los vehículos con pila de combustible.

Figura 2.5. Proyecciones de ventas anuales de vehículos ligeros por tipo de tecnología en el escenario del BLUE Map [14].

Se puede observar un escenario bastante optimista para 2050, donde los vehículos diésel y gasolina tendrían una participación mínima en el mercado. Para cumplir los objetivos del escenario y aminorar la concentración de GEI en la atmósfera, la cuota de mercado de los BEV debe incrementarse muy rápidamente para reemplazar los ICEV de gasolina y diésel. Este escenario ilustra el hecho de que la IEA cree en el potencial de los BEV para que sean aceptados por los consumidores y reduzcan significativamente las emisiones del transporte por carretera.

Por otro lado, la tecnología de vehículos híbridos con pila de hidrógeno aún está en fase de investigación, siendo como se mencionó anteriormente la pila de combustible el desafío a vencer para consolidar a este tipo de vehículo. Actualmente hay una pequeña flota con esta tecnología, por ejemplo, en los Estados Unidos existen alrededor de 3500 automóviles FCHEV (en particular en California), que representan casi la mitad de la flota mundial de FCHEV, Japón es el segundo con 2300 unidades, finalmente, en Europa existen alrededor de 1200 vehículos, principalmente en Alemania y Francia [9].

2.1.5. Estado actual de la movilidad eléctrica en autobuses urbanos

El transporte público a través de autobuses urbanos juega un rol fundamental en la sociedad, siendo un medio bastante eficiente si se habla de transportar un considerable número de personas por la ciudad. De hecho, con las tasas ocupación actuales para automóviles, un autobús urbano estándar completo puede retirar más de 40 automóviles de la ciudad [15], por lo que se puede mejorar notablemente los problemas de tráfico, contaminación y ruido.

Considerando el aumento de las actuales tasas de movilidad por parte de la sociedad, el problema se agrava aún más. Se debe tomar en cuenta que esto incrementa el volumen de la flota, como consecuencia mayores niveles de emisiones si se utilizan flotas convencionales. Bajo este argumento un tema en la actualidad es promover la movilidad sostenible a través de distintas soluciones no tradicionales, donde el vehículo propulsado

eléctricamente con baterías (BEV) juega un rol fundamental. Estos tipos de vehículos tienen múltiples ventajas sobre los convencionales impulsados por motores de combustión como: ausencia de ruido, ausencia de emisiones en el punto de uso, un alto rendimiento global y principalmente la independencia del petróleo (dependiendo del mix eléctrico).

Existen actualmente varios modelos con este tipo de propulsión en el mercado, que suelen tener dos configuraciones, la primera tiene equipada un paquete de baterías de baja capacidad, compensada con una alta potencia. Este tipo de configuración no permite realizar recorridos muy extensos por lo que el vehículo debe ser recargado después de recorrer unos pocos kilómetros (entre 7 y 10 km), su ventaja es una carga que toma pocos minutos, además de no incorporar el peso de un paquete grande de baterías, sin embargo, su desventaja es la necesidad de una red de infraestructura extensa lo que puede derivar en altos costes. La segunda configuración que es análisis de esta investigación consiste en equipar al autobús con un paquete de baterías grande con alta capacidad, esto permite tener una autonomía extensa para recorrer varios kilómetros, una vez finalizada la jornada de trabajo debe realizar la carga normalmente en la red eléctrica.

En la actualidad existen varias marcas fabricantes de autobuses eléctricos propulsados con baterías de alta capacidad. La autonomía suele ser como mínimo 200 km y actualmente la empresa Proterra ha expuesto un vehículo que puede llegar hasta los 563 km sin recargar [16]. Los ratios de consumo suelen estar entre 0,9 y 1,8 kWh/km. La Tabla 2.1 muestra algunos modelos existentes en el mercado.

Tabla 2.1. Características técnicas de autobuses eléctricos disponibles comercialmente.

Fabricante	Modelo	Capacidad de la batería [kWh]	Autonomía [km]	Consumo de energía [kWh/km]	Tecnología de la batería
Proterra	Proterra Catalyst E2 [16]	440	404	1,09	Litio–titanato
	Proterra Catalyst E2+ [16]	550	488	1,13	
	Proterra Catalyst E2max [16]	660	563	1,17	
BYD	BYD k7 [17]	195,6	217	0,90	Litio–hierro fosfato
	BYD k9s [18]	320	260	1,23	
	BYD k9 [19]	324	250	1,29	
	BYD k11 [20]	591	322	1,84	
	BYD C6 [21]	128	200	0,64	
	BYD C9 [22]	350	200	1,75	
	BYD C10 [23]	394	322	1,22	
Irizar	Irizar ie2 [24]	376	250	1,50	Sodio–Níquel
Designline EBusco	ECO-Smart I [25]	261,8	200	1,31	Sodio–Níquel
	YTP-1 [26]	311	300	1,04	Litio–hierro fosfato
Chongqing Hengtong	EBus [27]	77,6	50	1,55	Litio–titanato
New Flyer	Xcelsior CHARGE [28]	454	418	1,09	Ion–litio (Níquel Manganese Cobalto)
ZEPS	CCW ZEPS [29]	242	220	1,10	Litio–hierro fosfato

Respecto al consumo de energía, a pesar de que los fabricantes ofrecen datos de autonomía en sus catálogos, no suele especificar en qué condiciones ocurren. Teniendo en cuenta esto, la estimación del consumo de energía durante un ciclo de conducción es muy importante en este tipo de vehículos ya que funcionan en zonas de tráfico severas, propias del entorno urbano, además de una jornada laboral extensa. Por esta razón, la autonomía puede ser representativamente menor a la que el fabricante provee. Un claro ejemplo es el de los autobuses urbanos funcionando en Copenhague – Dinamarca, donde se sometieron a pruebas a vehículos BYD k9 en recorridos por distintas líneas. Los resultados mostraron que con tráfico pesado los ratios de consumo variaban entre 1,24 a 1,77 kWh/km [30], es decir que las autonomías podían variar entre 261 y 183 km para este vehículo. La variación medida podía significar diferencias de hasta 26,8 % respecto al dato de fabricante.

2.1.6. Estado actual del litio

La principal tecnología de almacenamiento de energía para los vehículos eléctricos son las baterías de litio, sin embargo, existen preocupaciones sobre la disponibilidad de litio para satisfacer el aumento de la demanda inherente al desarrollo de los BEV. Se estima que por cada kWh de energía de batería se necesita 1,5 kilogramos de carbonato de litio [31]. Un rápido aumento de la demanda podría llevar a una escasez de litio, derivándose en un aumento del precio en el mercado y una disminución de la competitividad de los BEV. Los otros elementos de las baterías de iones de litio son abundantes y generan menos preocupación, a excepción del cobalto que en la actualidad también es un elemento que está generando preocupación, principalmente porque alrededor del 60 % se extrae de la República democrática del Congo, un país que no ha demostrado estabilidad en el pasado, además de que el refinamiento se lo hace mayormente en China, lo anterior mencionado junto a la demanda de este elemento en los últimos años ha causado un incremento entre dos y tres veces su coste [9].

Las cifras de demanda de litio son susceptibles de aumentar en los próximos años, a medida que crece el interés en las baterías con este tipo de material, por ejemplo, en 2007 los recursos de litio conocidos a nivel mundial eran estimados en 14 millones de toneladas [32]. En 2010 las reservas mundiales se estimaron en 9,9 millones de toneladas de litio. Desde 2009 las explotaciones de este elemento han sido numerosas en países como Argentina, Bolivia y Canadá, a pesar de una reducción en la demanda de litio en 2009. Europa no tiene grandes depósitos, de hecho, tres cuartas partes de todo el litio se encuentran en Sudamérica. La Figura 2.6 muestra la distribución geográfica de los recursos de litio conocidas en el planeta

Figura 2.6. Distribución de los recursos de litio a nivel mundial [32].

Las baterías de litio no quedan delimitadas al uso en vehículos eléctricos sino que en otras aplicaciones como teléfonos móviles y ordenadores portátiles que representan hoy en día el 23% del mercado global de uso final de litio, mientras que otras aplicaciones vienen a ser las de la cerámica y el vidrio, además, también se utilizan para lubricantes de grasa y otros mercados [32], por lo que la competencia por el recurso no se limita exclusivamente a la industria del automóvil pudiendo resultar en una preocupación a posteriori. La conclusión más común es que el suministro de litio será suficiente durante unas décadas, incluso si se considera necesario reducir la cantidad de litio utilizada en una batería y el desarrollo del proceso de reciclaje.

2.1.7. Estado actual de los cargadores

La infraestructura de carga es crucial para la aceptación social de los BEV, ya que la "ansiedad de autonomía" podría atenuarse mediante una red adecuada de puntos de carga. Aunque existen propuestas alternativas para solucionar la carga de las baterías como las estaciones de cambio de batería o carga inductiva, sin lugar a duda, la carga conductiva es la más conveniente por su simplicidad. En este tipo de carga el vehículo se conecta a través de un cable a la red eléctrica, siendo un método bastante eficiente, ligero, compacto, permitiendo inclusive flujos de energía bidireccionales. Los inconvenientes corresponden a

problemas de seguridad como: El cable entre el enchufe y el vehículo en lugares públicos y en los garajes pueda resultar peligroso, por posibles tropiezos de peatones o los propietarios de los automóviles, además se debe tomar en cuenta la seguridad por suministro eléctrico al manejar alto voltaje y corriente.

La red de infraestructura en áreas públicas representa una inversión importante, teniendo en cuenta que los inversores privados preferirían invertir en una red de carga si existe demanda de estos vehículos. Por esta razón, es aún necesario crear incentivos para la creación de infraestructura en áreas públicas, o incluso proporcionar los puntos de carga gratuitamente. Los cargadores privados en residencias y lugares de trabajo se estimaron en 2017 en casi 3 millones en todo el mundo, siendo las instalaciones de carga privadas en hogares las más numerosas. Los puntos de carga para flotas (principalmente autobuses) suman unas 366 000 unidades y casi todas están en China [9].

Los cargadores de acceso público complementan el papel de los privados y completan la infraestructura de suministro de energía eléctrica para este tipo de vehículos. La mayoría de los cargadores a los que se puede acceder públicamente son puntos de venta de recarga, que en 2017 fueron de casi 320 000 en todo el mundo complementados con más de 110 000 cargadores rápidos [9]. Los cargadores rápidos son importantes para aumentar el atractivo de los BEV al permitir que sean posibles los viajes de larga distancia, con una carga de alrededor de 30 minutos hasta el 80% del SOC según Tesla [33].

La Figura 2.7 muestra la tendencia ascendente de la infraestructura de carga que se ha dado desde 2010 hasta 2017 para todos los tipos de cargadores existentes en el planeta.

Figura 2.7. Cargadores para vehículos eléctricos a nivel mundial hasta 2017 [9].

2.2. Análisis de la energía primaria a nivel mundial y local

2.2.1. La demanda energética a nivel mundial

La energía juega un rol fundamental en el desarrollo de la sociedad humana, que se ha convertido en una demandante continua de esta. La energía primaria es toda forma de energía disponible en la naturaleza antes de ser convertida en energía final. Esta última es la forma de energía que llega al punto de consumo para ser transformada en energía útil. Dentro de la energía primaria se distingue entre las no renovables y las renovables. Las primeras, tales como el carbón, el petróleo o el gas, son aquellas que una vez consumidas, puede decirse que no son repuestas por la naturaleza, mientras que las segundas presentan una tasa de reposición del mismo orden que la de su consumo, como la solar, eólica o hidráulica.

La cadena energética es el conjunto de transformaciones que experimenta la energía primaria para llegar a energía final y posteriormente a energía útil. Toda la cadena presenta a lo largo de sus diversas etapas distintas pérdidas, por diferentes causas, de tal forma que la energía final siempre es menor que la primaria de la que procede y a su vez, la energía útil menor que la final.

Para establecer balances de energía primaria se utiliza un valor equivalente que normaliza los valores de los diferentes tipos de energía primaria. La unidad utilizada para estos análisis se denomina Toe o Tep, tonelada equivalente de petróleo por sus siglas en inglés ($1 \text{ toe} = 107 \text{ kcal} = 11,63 \text{ MWh}$). En cambio, para la energía final y la energía útil se utilizan diversas unidades como kWh, kcal, MJ, entre otras.

El consumo mundial de energía ha aumentado significativamente en las últimas décadas. Existen dos factores preponderantes a este fenómeno. El primero debido al aumento de la población mundial, ya que, de 5280 millones de habitantes en 1990, en 2015 pasaron a ser 7733 millones, mientras que el segundo factor se debe al aumento de consumo de energía primaria per cápita. Según la International Energy Agency (IAE) en 1990 el consumo de energía primaria fue de 1,66 toe/cápita, y en el presente es de 1,86 toe/cápita [34,35]. Para el consumo de energía eléctrica la situación es similar ya que de consumir anualmente 2,07 MWh per cápita en 1990 hoy se consume alrededor de 3,05 MWh per cápita, es decir un aumento del 47 % [34,35].

Para cubrir la demanda energética actual se recurre principalmente a la utilización de recursos como el petróleo, el gas natural y el carbón, de hecho, el consumo de energía primaria en el planeta depende en más del 80% de estos tres [37]. Es preocupante el hecho que este porcentaje de dependencia de energías primarias ligadas al carbono se venga manteniendo en este orden de magnitud desde hace tiempo. El excesivo uso de estas fuentes desencadena en la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). En el presente existen políticas que se enfocan a cambiar paulatinamente el modelo energético y el empleo de recursos alternativos. La Figura 2.8 muestra la estructura del consumo mundial de energía primaria en los últimos 40 años.

1973 and 2014 fuel shares of TPES

Figura 2.8. Demanda de energía primaria a nivel mundial [36].

2.2.2. Consumo de energía primaria en España

La demanda energética de un país implica factores como: la situación geográfica, las necesidades de consumo de la población, la industria, el sector eléctrico, el PIB, etc. España en 2014 tuvo un consumo de energía primaria de 113,9 Mtoe, que fue cubierto en un 72,2 % con fuentes fósiles (petróleo 41,2%, gas natural, 20,8 % y carbón). Las energías renovables tuvieron una participación relativamente importante con el 14,9 %, y finalmente la energía nuclear con un 13,1 % [37]. La evolución del consumo energético desde 1974 hasta 2014 se puede observar en la Figura 2.9.

Figura 2.9. Demanda energética en España desde 1973-2014 [37].

La figura anterior muestra la contribución de cada tipo de energía en los últimos 40 años. La demanda ha sido creciente hasta el año 2008 para luego tener una decaída debida principalmente a la recesión económica del país. Los recursos no renovables siguen siendo el principal aporte para cubrir la demanda, pero a partir del año 2000 se incorporan las energías renovables no convencionales (excluyendo la hidráulica que existían anteriormente) al sistema. Se puede destacar un incremento notable de la energía eólica y solar, sin embargo, a partir de 2012 sus aportes se han mantenido constantes debido al cese de incentivos para este tipo de energías.

2.2.2.1. Uso final de la energía en España

Al igual que el consumo de energía primaria, el uso final de la energía ha tenido un comportamiento creciente desde el año 1973 hasta el año 2005 llegando a un máximo de 102,1 Mtoe, luego se ha estabilizado hasta 2007 teniendo un ligero decremento en 2006. A partir de 2007 el consumo de la energía final ha ido decreciendo, principalmente a la recesión económica. Para el año 2013 el consumo de energía final fue de 81,5 Mtoe, siendo el transporte el principal consumidor con 28,2 Mtoe, seguido por el sector industrial con 25,18 Mtoe, el sector residencial con 15 Mtoe, mientras que en el sector comercial fue de 13,2 Mtoe [37]. La Figura 2.10 muestra el aporte porcentual de cada sector.

Figura 2.10. Consumo final de la Energía por sectores en 2013.

2.3. Impacto ambiental del transporte a nivel mundial y local

El calentamiento global sigue siendo uno de los principales problemas en el planeta, y el transporte es uno de los sectores que más contribuye al mismo. Según informes de la IEA en 2015 se emitieron 32,25 GtCO₂ por la combustión de distintos vectores energéticos en todo el planeta (44,9 % por el carbón, 34,6 % por el petróleo y sus derivados, 19,9% por el gas natural y 0,6 % por otros combustibles [36]), de estas emisiones el sector del transporte es el segundo más representativo con un aporte del 24 % solo detrás del sector de la electricidad y calor con el 42 %.

Analizando a nivel español, en 2015 se emitieron 239,7 MtCO₂, siendo el sector del transporte el más contaminante con 34,1 %, seguido por la generación de energía eléctrica con 28,4%, la industria representó el 16,6%, otras industrias energéticas (incluyendo la refinación) el 7,9%, los hogares el 6,6% y los sectores comerciales el 6,5% [37]. El sector del transporte marca una tendencia similar a la mundial y el transporte por carretera es el más representativo con 81,08 MtCO₂ de un total de 86,13 MtCO₂, dicho de otro modo, este tipo de transporte representa el 94 % del total de emisiones de todo el sector en España.

La Tabla 2.2 muestra el desglose de los distintos tipos de transporte que contribuyen a la emisión de CO₂, a nivel mundial como a nivel local, donde el transporte por carretera es el más incidente para ambos casos.

Tabla 2.2. Emisiones de MtCO₂ causadas por el sector del transporte [37–40].

Tipo de transporte	Mundial (1990)	Mundial (2015)	España 1990	España 2015
Aviación doméstica	280	320	2,098	2,701
Aviación internacional	260	520	-	-
Carretera	3310	5800	51,26	81,08
Navegación doméstica	100	180	5,39	1,99
Navegación internacional	380	660	-	-
Otros	280	260	0,451	0,36
Total	4610	7720	59,20	86,13

La causa de las emisiones de CO₂ en el sector del transporte es el uso excesivo de combustibles a partir de fuentes no renovables, especialmente la gasolina y el gasóleo. En particular, las emisiones del transporte por carretera provocan dos problemas fundamentales, el primero es de orden local debido a que en áreas urbanas afecta los altos niveles de ruido y polución (PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, HC, CO), el segundo en cambio está relacionado a nivel global con las emisiones de CO₂ a la atmósfera.

Para poder agrupar en un solo resultado a los gases GEI antropogénicos se utiliza una unidad denominada CO₂-equi que engloba la contribución de los potenciales de calentamiento global (GWP) de los distintos GEI (CO₂, CH₄, N₂O y gases hidrofluorocarbonos (HFC), perfluorocarbonos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) [41]), propuestos por IPCC (Intergovernmental panel on climate change).

2.4. Matriz de generación eléctrica

La matriz de generación eléctrica nacional es uno de los factores que trascienden en el desarrollo económico de un país, debido a su incidencia en el precio final de la energía eléctrica. La energía eléctrica es un vector energético producido fundamentalmente a partir

de recursos primarios, y que se genera en función de la demanda, siendo la capacidad global de acumulación muy pequeña.

Las características del sistema eléctrico deben incluir: seguridad en el suministro, economía de costes, minimización de impactos ambientales y sostenibilidad de recursos. Lo que comporta, entre otros aspectos, a la diversificación de fuentes energéticas y de tecnologías de generación, el aumento de energías renovables, el uso de recursos y tecnologías de bajo impacto y la minimización de costes. El mix de generación debe conjugar todo estos factores a fin de alcanzar un equilibrio óptimo entre los mismos. Es evidente que este punto de equilibrio varía con el tiempo en función de los distintos escenarios que se van presentando. Planteamientos importantes relacionados con esta cuestión son los compromisos del acuerdo de París COP 21 así como la estrategia energética de la UE (Horizonte 2020 y Horizonte 2030), que buscan mitigar las emisiones de GEI.

El mix eléctrico español está formado por centrales térmicas, carbón y gas en ciclo combinado (los derivados del petróleo como el fuelóleo o gasóleo tienen muy poca significación), nucleares, renovables (hidráulica, eólica, fotovoltaica, termosolar, biogás y biomasa). Las energías renovables (excluyendo la gran hidráulica que existía con anterioridad) se han implementado sobre la base de un marco legal que ofrecía incentivos, teniendo como objetivo liberar al país de la alta dependencia de fuentes no renovables. La Tabla 2.3 muestra los valores nominales de potencia instalada para cada tipo de central y la generación de energía eléctrica para el año 2017.

Tabla 2.3. Potencia instalada en el mix eléctrico español a nivel peninsular [42,43].

Tipo de central eléctrica	Potencia [MW]	Generación eléctrica [GWh]	Porcentaje de contribución [%]	Factor de carga
Energías renovables				
Eólica	22 922	47 498	19,1	0,24
Hidroeléctrica	17 030	18 361	7,4	0,12
Solar fotovoltaica	4 439	7 988	3,2	0,21
Solar Térmica	2 304	5 348	2,2	0,26
Otras renovables	852	3 603	1,5	0,48
Residuos renovables	123	728	0,3	0,68
<i>Total renovables</i>	<i>47 670</i>	<i>83 526</i>	<i>33,7</i>	<i>-</i>
Energías no renovables				
Ciclo combinado (Gas)	24 948	33 855	13,6	0,15
Carbón	9 536	42 593	17,1	0,51
Nuclear	7 117	55 609	22,4	0,89
Cogeneración	5 818	28 134	11,3	0,55
Bombeo	3 329	2 249	0,9	0,08
Residuos no renovables	459	2 459	1,0	0,61
<i>Total no renovables</i>	<i>51 207</i>	<i>164 898</i>	<i>66,3</i>	<i>-</i>
Total	98 877	248 424	100	-

El mix eléctrico español posee hasta 17 tipos de centrales eléctricas en todo el territorio (15 en el Sistema Peninsular), esto ha ocurrido principalmente por políticas energéticas nacionales y a nivel de la UE que provocó ser parte de los países pioneros en la inclusión de energías renovables al mix energético nacional. Actualmente cuenta con un total de 104 GW de potencia instalada, de los cuales 98,87 GW se encuentran instalados en el territorio peninsular. En la Figura 2.11 se puede observar la generación de energía peninsular desde 2008 hasta el 2017, para este último fue de 248,4 TWh; 33,7% a partir de energías renovables, mientras que el 66,3% con energías no renovables.

Figura 2.11. Evolución de la generación eléctrica renovable y no renovable peninsular [43].

2.4.1. Centrales de generación integradas al sistema eléctrico español peninsular.

Las centrales dentro del sistema eléctrico de potencia (SEP) adoptan un régimen de producción según la demanda a lo largo del día, al tipo de central y a los requisitos del SEP (por ejemplo, necesidades de reserva rodante). De acuerdo con el desempeño que tengan dentro del mix eléctrico suelen clasificarse según se detalla a continuación:

Centrales base: Este tipo de centrales trabajan de forma continua, en condiciones próximas a la plena carga y cubren la base de la curva de demanda. Su factor de carga (relación entre la energía producida durante un periodo de tiempo y la que hubiera producido durante ese mismo tiempo si hubiera estado trabajando a plena carga) y factor de disponibilidad son altos.

En el sistema eléctrico español son las nucleares las principales centrales base, a pesar de tener una potencia instalada mediana (7117 MW) genera más de la quinta parte de la energía eléctrica del sistema peninsular, con un factor de carga de 0,89 y un factor de disponibilidad de 0,98. Por su comportamiento en el mix eléctrico otro tipo de central base se puede considerar a la térmica renovable y a las de cogeneración y residuos. El comportamiento de estas centrales para un día típico de verano se puede observar en la Figura 2.12.

Cabe indicar que las centrales de renovables sujetas a variabilidad meteorológica (eólica, solar), aunque por sus características no tendrían la consideración de centrales base, dada la peculiaridad de su producción, la energía generada tiene prioridad de entrada al mix de producción respecto a otras energías totalmente gestionables, por lo que en principio podrían considerarse centrales base.

Figura 2.12. Centrales base en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42])

Centrales Programadas: En este tipo de centrales, la generación de energía eléctrica sigue la curva de demanda. La potencia que suministran varía por escalones a determinadas horas del día. En el sistema eléctrico español son las centrales de carbón y de ciclo combinado las principales centrales de este tipo, además, por su comportamiento también a los intercambios internacionales (transacciones de energía por las líneas de interconexión internacional, incluida la circulación en bucle de la energía por el propio diseño de la red) se los puede considerar dentro de este grupo. La Figura 2.13 muestra el comportamiento de estas para un día típico de verano.

Figura 2.13. Centrales programadas en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).

Centrales Punta: Están destinadas a cubrir la demanda de energía eléctrica en las horas de mayor consumo (horas pico o punta). Su funcionamiento es periódico, es decir en breves espacios de tiempo casi todos los días durante determinadas horas. Las centrales hidráulicas, y en particular las del tipo de bombeo, junto con las de gas, cumplen esta función. La Figura 2.14 muestra el comportamiento de este tipo de centrales.

Figura 2.14. Centrales punta en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).

Centrales de régimen especial: La producción en régimen especial corresponde a un cierto tratamiento económico que la administración aplica a la energía eléctrica

producida por determinado tipo de sistemas que favorezcan el uso de energías renovables (solar, eólica, minihidráulica, biomasa, etc.) o bien a sistemas de alta eficiencia energética (cogeneración). Como se puede observar en la Figura 2.15 se ha incluido a las centrales eólicas, solares térmicas y solares fotovoltaicas según los datos de REE (Red Eléctrica de España).

Figura 2.15. Centrales de régimen especial en el sistema eléctrico peninsular. (Agosto 12, 2017 [42]).

2.4.1.1. Análisis de la generación de las centrales de energías renovables.

Las energías renovables integradas al sistema eléctrico peninsular tienen un importante grado de implantación. Para el año 2017 (año de análisis) representaron el 33,7 % de la generación total. La mayor participación fue la de energía eólica con el 19,1 %, es decir casi un quinto de la generación total, solo detrás de las centrales nucleares. Esto confirma su importancia en el mix eléctrico, representando además el 56,9 % de la generación con energías renovables. La segunda energía renovable más importante por su potencia instalada y generación es la hidráulica, esto se debe a que es una tecnología madura y probada, suele estar en el mix eléctrico de muchos países que gozan de recursos hídricos. El comportamiento de generación depende de la disponibilidad del recurso hídrico por las precipitaciones a través del año. Hidrológicamente hablando el 2017 fue un año seco

lo que ha causado una producción de energía eléctrica menor que otros años, con una participación de apenas el 7,4 %, de la generación total peninsular, a pesar de esto es la segunda energía renovable en aporte al sistema con el 21,9 %

La energía solar fotovoltaica es una de las energías renovables más prometedoras principalmente por su facilidad de instalación, la reducción de los costes de inversión de los últimos años y al potencial solar que existe por la ubicación geográfica de España. Aunque en principio se apostó mucho por este tipo de energía, en los últimos años no ha existido un incremento importante de potencia instalada (aumentando apenas un 0,4% respecto a 2014). Esta energía en el 2017 representó el 3,2 % de la generación total y el 9,6% de la producción de energías renovables.

Otra de las energías renovables incorporadas dentro del mix eléctrico peninsular, es la energía térmica solar, sin embargo, sus altos costes de instalación y mantenimiento no permiten que tengan un amplio despegue, lo que justifica junto a la supresión de incentivos a las ERNC el hecho que en los últimos años no se han realizado nuevas instalaciones en España. En el año 2017 su contribución de generación fue de 2,2 % que representa un 6,4 % de la producción de energías renovables.

Otras centrales con fuentes renovables son las de biogás, biomasa, hidráulica marina y geotérmica, agrupadas en un mismo grupo por REE ya que aún tienen instalaciones muy pequeñas, sin tener un factor de impacto representativo individualmente. En 2017 han generado el 1,5 % de la energía total del sistema eléctrico peninsular, que representan el 4,3 % de la generación con energías renovables.

Los residuos renovables que son material orgánico no fósil de origen biológico representan el 0,3% de la generación peninsular y el 0,9% de la generación con energías renovables.

2.4.1.2. Análisis de la generación de las centrales de energías no renovables.

Este tipo de centrales son las más representativas en el sistema eléctrico peninsular, en 2017 significaron el 66,3 % de energía eléctrica generada, sin embargo, un punto en contra radica, en que, España es un país con escasos recursos fósiles y se ve obligado a importar fuentes de energía primaria como carbón, gas, petróleo y sus derivados. A continuación, se mencionan las centrales eléctricas de este tipo que están vinculadas al mix eléctrico peninsular.

La energía nuclear es la más significativa de este tipo de centrales de generación y del sistema eléctrico español. A pesar de su mediana potencia instalada (7117 MW) produjo en el año 2017 el 22,4 % de la energía generada en la península. Su ventaja radica en su competitivo precio de producción, por lo que su constante funcionamiento durante el año la convierte en una central base.

Las centrales de carbón se han convertido en la tercera fuente de generación de energía eléctrica en la península, esto se debe principalmente a la escasez del recurso hídrico en 2017, suplantando el déficit energético de las centrales hidráulicas. Han representado el 17,1 % de la generación de energía eléctrica en la península. Se prevé el cierre progresivo de estas centrales, fundamentalmente por los compromisos de reducción de GEI.

Las centrales de ciclo combinado son un tipo de centrales importantes en el mix y su interacción depende de la curva de demanda, siendo el gas natural su fuente de energía. En 2017 también ha suplido la baja generación hidráulica, representando la cuarta estructura más importante en generación, al producir el 13,6 % del total de generación en la península.

Las centrales de cogeneración tienen gran proyección al tener una alta eficiencia energética ya que aprovechan la energía mecánica y energía calorífica. En el año 2017 representaron el 11,3 % de la generación total peninsular.

Las centrales de bombeo son capaces de generar energía eléctrica a partir de centrales hidroeléctricas cuyo embalse asociado puede no recibir ningún tipo de aportación natural de agua, sino que esta proviene de la elevación de un vaso interior. En 2017 representó el 0,9 % de la generación total peninsular.

Otros tipos de centrales son las de residuos. Este tipo de centrales aportaron en 2017 el 1,0 % de la generación eléctrica peninsular.

2.4.2. Enfoque a las energías renovables eólica y solar fotovoltaica

Las energías renovables juegan un papel preponderante para alcanzar los múltiples objetivos planteados para la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero. En la actualidad estos sistemas juegan el rol más importante en el sector eléctrico. Las que más se han destacado a nivel mundial y en particular en España, son la eólica y la solar fotovoltaica, convirtiéndose en la actualidad en las más importantes.

2.4.2.1. Energía Solar Fotovoltaica y su puesta al futuro

Este tipo de energía fundamenta su funcionamiento en la conversión de la radiación del sol a partir de los fotones de luz en energía eléctrica a través del efecto fotoeléctrico. El material más utilizado para construir las células solares fotovoltaicas en el presente y que al parecer prevalecerá es el silicio monocristalino y policristalino.

España ha sido uno de los países pioneros en incorporar grandes centrales fotovoltaicas en su mix eléctrico. En el año 2008 llegó a ser el segundo país del mundo con más instalaciones fotovoltaicas como se puede observar en la Figura 2.16, con alrededor de 3340 MW de los 14 500 MW [44] instalados en aquel entonces en todo el planeta, sin embargo, la recesión económica del país y el déficit tarifario obligaron que las centrales de este tipo ya no estén sujetas a primas de subvención y actualmente entran a participar en el mercado como cualquier otra energía.

En la actualidad, España dispone de un parque solar fotovoltaico con una potencia instalada de 4439 MW, con un incremento de apenas 1099 MW en los últimos 10 años, quedando relegado en el consolidado mundial, que en estos momentos tiene instalados 230 GW, es decir 15 veces más que en 2008. Los países asiáticos son los que mayormente han apostado sobre este tipo de energía, principalmente China y Japón, que de los 50 GW instalados en el último año han aportado alrededor de la mitad (15,2 GW en China y 11 GW en Japón). En Europa los países que siguen incrementado su parque solar con más fuerza son Reino Unido con 3,5 GW, Alemania con 1,5 GW y Francia con 0,9 GW [45].

Figura 2.16. Potencia instalada en energía solar FV hasta el año 2008 [44].

Un factor determinante para el aumento de este tipo de energía es, sin lugar a duda, el bajo coste que han alcanzado los módulos fotovoltaicos de silicio en los últimos años. Los precios de los módulos cayeron rápidamente de 4 USD/W en 2008 a 0,8 USD/W en 2012, pero desde entonces se han estabilizado. Se estima que los costes de los módulos disminuyan aún más a medida que aumente el despliegue y la tecnología mejore en las próximas dos décadas. Según proyecciones hechas por la IEA se prevé que para 2035 los módulos tendrán un coste entre 0,3 y 0,4 USD/W, lo antes mencionado se muestra en la Figura 2.17.

Notes: Orange dots indicate past module prices; purple dots are expectations. The oval dots correspond to the deployment starting in 2025, comparing the 2DS (left end of oval) and 2DS hi-Ren (right end).

Figura 2.17. Proyección de los costes futuros de los módulos fotovoltaicos [44].

La puesta a futuro indica que el costo total de una instalación fotovoltaica completa (modulo, inversor, transformador, cableado, protecciones, etc.) para el año 2030 estará por debajo de 1 USD/W, lo que permitirá tener competitividad, al tener un LEC (coste normalizado de la energía) cercano a las energías tradicionales, esto si puntualizamos la aplicabilidad en zonas de alta radiación solar como es el caso de España. Lo que permitirá estar relativamente cercano a los precios que alcanza la electricidad en los mercados liberalizados de generación (precios de “pool”, que se sitúan entre 6 y 8 céntimos de euro por kWh actualmente) [46].

Se puede predecir la alta participación que tendrá la energía solar fotovoltaica a futuro. Actualmente existen alrededor de 230 GW instalados y se proyecta que para el año 2030 se incremente a 1721 GW y para 2050 a 4674 GW. La Figura 2.18 muestra las proyecciones previstas con alrededor de 6000 TWh de energía eléctrica generada para el año 2050 [45], una cifra representativa de energía limpia y sin emisiones de CO₂.

Figura 2.18. Proyección hasta el año 2050 en la producción de energía eléctrica a partir de instalaciones solares fotovoltaicas [45].

2.4.2.2. Energía Eólica y su puesta al futuro

Este tipo de energía recurre al uso del viento para generar energía mecánica y finalmente transformarla en energía eléctrica. El uso del recurso eólico debe ser bien tratado ya que existen factores que pueden aminorar el aprovechamiento de este, principalmente su variabilidad y aleatoriedad. Se determina métodos estadísticos para su uso, de esta manera se puede determinar el potencial en cada emplazamiento.

Se apuesta fuertemente a nivel mundial en esta energía junto a la solar fotovoltaica. España también ha sido de los países pioneros en integrar esta energía a su sistema eléctrico y en 2008 fue el tercer país en potencia acumulada en recurso eólico con 16,5 GW solo detrás de Alemania con 23,9 GW y USA con 25,1 GW, con una producción en ese año de alrededor de 31,5 TWh [47]. Su crecimiento se ralentizó, al igual que el resto de las energías renovables no convencionales, debido al cambio del marco legal que las limitó a seguir creciendo en potencia, sin incrementos importantes en los últimos años. Actualmente tiene instalado alrededor de 23 GW. A pesar de esto, en la Unión Europea, sigue en el segundo escalafón en potencia total instalada [48] como se puede apreciar en la Figura 2.19.

Figura 2.19. Potencia instalada con instalaciones eólicas en la Unión Europea [48].

Esta energía es potencialmente viable para remplazar las energías convencionales aún más con la aminoración de los precios. En 2009 el vatio pico para una instalación completa “Onshore” estuvo en el rango de 1,45 \$/W a 2,6 \$/W. En el año 2013 los precios estuvieron entre 1,1 \$/W y 1,7 \$/W. La apuesta se proyecta a instalaciones de este tipo ya que las “Offshore” aún tiene precios muy costosos (de dos a tres veces los costos de las Onshore), aunque el recurso eólico suele ser más alto la inversión aún no justifica. Se prevé que la energía eólica siga aumentando progresivamente a nivel mundial, según la IEA en 2030 se generará 5400 TWh y en 2050 alrededor de 9100 TWh [49].

Las perspectivas de las energías renovables en un escenario azul aminoraran en gran medida el problema medio ambiental que se quiere mitigar, reduciendo las emisiones de los gases de efecto invernadero. Se estima una gran participación de energía eólica, solar fotovoltaica e hidráulica principalmente y en menor medida el resto de las energías renovables [47]. Se proyecta para el año 2050 (Figura 2.20) una generación de alrededor de 18 000 TWh con energías renovables que ya es un valor importante, si se menciona que

en el año 1973 se consumieron 6131 TWh y en 2014 el valor de 23 816 TWh total de energía eléctrica [50].

Figura 2.20. Escenario azul para las energías renovables en 2050 [47].

2.4.3. El costo normalizado de la energía LEC

Para poder comparar de manera objetiva a cada tipo de central de generación de energía, existe un método que pretende equiparar las condiciones de cada una de estas. Este indicador se establece como el LEC o LCOE (por sus siglas en inglés), y es un coste normalizado que representa el precio de producción de electricidad a lo largo de la vida útil de una central, que incorpora los costes de inversión y actualizado para una determinada tasa de descuento. El LEC se usa como un valor de paridad cuando se compara distintas tecnologías de generación de energía, de esta manera se puede comparar los costes de cualquier tipo de energía a través del tiempo. Entre las características principales están:

- Mide todos los costos monetarios que tiene la central generadora durante toda la vida en función de la producción de energía.
- Calcula el valor presente del costo total de construir y operar una planta de energía durante un tiempo de vida supuesto.

- Permite la comparación de diferentes tecnologías (por ejemplo, eólica, solar, gas natural, carbón, pilas de combustible, nuclear, etc.), en función del tamaño del proyecto, costo de capital, riesgo, rendimiento y capacidades.

EL LEC puede variar su coste de acuerdo a muchos factores como: el lugar, los recursos, políticas energéticas de una nación, etc. [51], sin embargo, un estudio hecho por el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE) [52] muestra el LEC de varios tipos de plantas de generación de energía. Aquí, se ha tomado en cuenta varios estudios para cada una de ellas. La Figura 2.21 muestra lo antes dicho.

Figura 2.21. Costo de la energía normalizada para varios sistemas de generación eléctrica [52].

2.5. Almacenamiento de energía

Es un proceso que consiste en absorber energía y almacenarla por un periodo de tiempo, luego de esto liberarla y suministrarla a un sistema energético. Esto puede resultar beneficioso en periodos de tiempo donde exista una alta demanda de energía, por ejemplo, en el pico de la curva de demanda del sistema eléctrico donde suelen actuar las centrales de bombeo.

Las tecnologías de almacenamiento de energía se pueden implementar en escalas grandes y pequeñas de manera distribuida y centralizada en todo sistema energético. Si bien algunas tecnologías están maduras (hidráulicas de bombeo), la mayoría aún se encuentra en etapas de desarrollo, pero se espera en futuro explotar plenamente su potencial a nivel comercial.

La clasificación de los sistemas de almacenamiento de energía (ESS por sus siglas en inglés) se determina con el uso de energía en una forma específica. Por lo que, se agrupan según su tipo en: almacenamiento mecánico, electroquímico, químico, eléctrico, térmico e híbrido [53]. A pesar de existir varias opciones en el almacenamiento de energía, las hidráulicas por bombeo (energía mecánica) son las que predominan con el 99 % de los sistemas, el restante 1 % se encuentra distribuido en sistemas de almacenamiento como baterías, CAES (compressed air energy storage), volantes de inercia y almacenamiento de hidrógeno [54]. La distribución presentada en la Figura 2.22 está basada en un informe de la IEA con alrededor de 140 GW de sistemas de almacenamiento de energía a gran escala que se encuentran instalados en redes eléctricas de todo el mundo.

Figura 2.22. Distribución por tipo de almacenamiento de energía a grande escala [54].

El almacenamiento de energía eléctrica en el presente aún es un reto, que a diferencia de los combustibles fósiles su gestión es compleja, lo que deriva en valores de energía y potencia específica bajos frente a los anteriores, además, gran parte de las tecnologías todavía se encuentran en desarrollo. La Figura 2.23 muestra el grado de madurez de los principales sistemas de almacenamiento eléctricos y térmicos. Se puede observar que a excepción del almacenamiento por bombeo hidráulico (PSH por sus siglas en inglés) todos los tipos de sistemas de almacenamiento eléctricos están aún en fase de investigación, desarrollo y demostración de su viabilidad.

Figura 2.23. Grado de madurez tecnológica de los sistemas de almacenamiento de energía [54].

Respecto a los vehículos eléctricos, los métodos de almacenamiento de energía eléctrica empleados se enfocan principalmente a los dispositivos electroquímicos a partir de baterías secundarias, aunque en los últimos años se encuentran en investigación y desarrollo otros métodos como el almacenamiento químico a través del hidrógeno y su uso en pilas de combustible, así como también el almacenamiento eléctrico a través de ultracondensadores.

Las baterías de ion-litio son empleadas mayormente en este tipo de vehículos, principalmente porque son las que han alcanzado un mayor grado de madurez sobre los

otros dos métodos de almacenamiento (hidrógeno o ultracondensadores). Su equilibrada potencia y energía específica permite una adaptación a las condiciones requeridas en un vehículo, sobre todo a las relacionadas a los picos transitorios de potencia y capacidad de almacenamiento, lo que puede garantizar su funcionamiento como un sistema individual. Esto no ocurre en los sistemas de almacenamiento con H_2 que utilizan pila de combustible, ya que, a pesar de tener una buena energía específica, su baja potencia específica no permite adaptarse correctamente a los picos transitorios de potencia demandada en un vehículo, además de las características tecnológicas de la pila, la cual debe trabajar en lo posible dentro de un régimen constante. Los ultracondensadores poseen características con una alta potencia específica por lo que podría absorber picos transitorios en la tracción de un vehículo, sin embargo, su baja energía específica no le permite trabajar como un sistema único de almacenamiento de energía en un VE. La Figura 2.24 muestra la energía y de potencia específica en sistemas de almacenamiento de energía para vehículos automóviles.

Figura 2.24. Potencia y energía específica para sistemas de almacenamiento y conversores de energía utilizados en vehículos [55].

Por las razones mencionadas anteriormente los vehículos que utilizan sistemas con pila de combustible o con ultracondensadores deber ser híbridos, normalmente con una batería, o incluso suelen haber sistemas con los tres tipos de almacenamiento de energía. Estos sistemas combinan por medio de acoplamientos eléctricos la potencia de salida de dos o más elementos, de esta manera se puede obtener las características principales de cada sistema como: energía específica, potencia específica, tasa de descarga, tiempo de respuesta, ciclo de vida e incluso costos.

2.6. Almacenamiento electroquímico con baterías

Actualmente hay varios tipos baterías secundarias, existen tecnologías antiguas que han alcanzado su total madurez y se encuentran consolidadas a nivel comercial, así como también nuevas tecnologías en fase de desarrollo las cuales alcanzan altos valores de energía y potencia específica.

Entre las principales baterías que se utilizan para la propulsión de un vehículo eléctrico se tiene: Las baterías de plomo-ácido, las cuales tienen una energía específica entre 20 y 40 Wh/kg [56], con la ventaja de ser una tecnología conocida, madura y de bajos costes (aproximadamente 100 USD/kWh [57]), aunque la energía específica es baja en relación al resto de tecnologías actuales, es adecuada para vehículos con bajas prestaciones [58,59]. Otro tipo de tecnología viene a ser las baterías de níquel-metal hidruro (Ni-MH), considerada una tecnología madura, por lo que su máximo potencial ya ha sido alcanzado, así que tanto sus costes como características difícilmente varíen. La energía específica de esta tecnología suele estar entre 60 a 80 Wh/kg [56], mientras que su costo se estima entre 700 y 800 USD/kWh [59]. Esta tecnología es utilizada en vehículos híbridos como el Toyota Prius.

Otro tipo de baterías vienen a ser las de cloruro de níquel sódico (Na/NiCl₂, Zebra), considerada una tecnología segura y de bajo costo (un tercio del precio de las baterías de iones de litio), tiene una energía específica satisfactoria, que es comparable a la de ion-litio

(aproximadamente 120 Wh/kg). Su desventaja es que su potencia específica es mucho menor, de alrededor de 150 W/kg [60], lo que provoca un mayor peso por unidad de potencia.

Finalmente, las baterías del tipo de iones de litio son una tecnología que ha ganado mucho campo en los últimos años, no obstante se encuentra en fase de desarrollo e investigación como también en demostración. Por sus características tienen mucha aceptación en la industria del automóvil y está prevista como la tecnología a adoptar en los sistemas de propulsión de los vehículos híbridos y eléctricos. Su energía específica varía entre 120 y 180 Wh/kg y su precio puede rondar los 750 USD/kWh [57]. La Figura 2.25 muestra las características de potencia y energía específica de las principales tecnologías de baterías.

Figura 2.25. Potencia y energía específica para los diferentes tipos de baterías [54].

2.6.1. Características eléctricas de una batería

Al ser las baterías dispositivos que convierten energía química en eléctrica durante la descarga y energía eléctrica en química durante la carga, poseen ciertos parámetros que a continuación se detallan:

Tensión circuito abierto: Es la tensión instantánea de una batería cuando se encuentra en estado de reposo.

Tensión nominal: Valor convencional de la tensión con la que se designa a una batería y para la cual ha sido previsto su funcionamiento.

Tensión instantánea: Diferencia de potencial entre los terminales positivo y negativo de una batería en un instante dado.

Tensión de corte: Mínima tensión permisible, la cual una batería no debería bajar durante su operación.

Resistencia interna: Es un parámetro que permite modelar las pérdidas en una batería. Tiene una componente eléctrica y otra del tipo electroquímico.

Capacidad: Cantidad de carga eléctrica liberada por el material activo del electrodo negativo y consumido por el electrodo positivo en una descarga completa de la batería.

Capacidad nominal: Es la capacidad que puede entregar una batería desde plena carga hasta llegar a la tensión de corte, a una temperatura de ambiente fijada y utilizando una razón de carga específica.

Tasa de descarga: Es la corriente a la que se descarga una batería respecto al tiempo. Se expresa en C/h donde C es la capacidad de la batería y h es el tiempo en horas.

Estado de carga: Es la capacidad actual de una batería (expresado de manera porcentual donde 100 % significa estado lleno y 0 % estado vacío) y se define como la relación entre la capacidad disponible y la capacidad nominal.

Profundidad de descarga: Es la carga que se ha sacado de una batería durante la descarga y es complementaria al estado de carga, es decir la suma de las dos debe dar como resultado la capacidad nominal de la batería.

Estado de salud: Condición actual de la batería frente a la condición de fábrica de esta, usualmente empleada para representar el porcentaje de capacidad actual de la batería frente a la nominal.

Autodescarga: Reducción del estado de carga, el cual es causado por reacciones químicas internas de la batería cuando está a circuito abierto.

Energía de la batería: Es la cantidad de energía que dispone una batería, se mide en términos de capacidad y tensión, siendo el producto de ambas.

Energía específica: Energía que puede almacenar una batería por unidad de masa (Wh/kg).

Densidad de Energía: Energía que puede almacenar una batería por unidad de volumen (Wh/l).

Potencia de la batería: Es la cantidad de potencia que dispone una batería, viene expresado por el producto del voltaje por la corriente, ambos en sus valores nominales.

Potencia específica: Potencia que puede entregar una batería por unidad de masa (W/kg).

Densidad de potencia: Potencia que puede entregar una batería por unidad de volumen (W/l).

Rendimiento: Es la relación entre la tensión de operación y la tensión de circuito abierto, este parámetro toma en cuenta las pérdidas de energía o potencia durante la carga y descarga las cuales aparecen en forma de tensión.

Ciclos de vida de la batería: Son el número de ciclos carga/descarga que se pueden realizar hasta que la capacidad de la batería pueda mantener sus prestaciones dentro de unos límites predeterminados, que en el caso de los vehículos eléctricos es cuando el estado de salud de la batería sea del 80% de su capacidad nominal.

2.6.2. Baterías aplicadas en el vehículo

Existen cuatro tecnologías principalmente usadas en la automoción, las baterías de plomo–ácido, las de sales fundidas (ZEBRA), las de níquel metal hidruro y las de ion–litio. El principio de funcionamiento de una batería está basada en procesos de reducción y oxidación (redox), un proceso en el cual uno de los componentes se oxida (pierde electrones) y el otro se reduce (gana electrones). Aunque todas las tecnologías están vigentes, al parecer las de ion– litio son las que más puesta a futuro tienen. En los siguientes apartados se describe cómo funciona cada tecnología.

2.6.2.1. Baterías de plomo-ácido

Este tipo de batería posee bajas densidades de energía y potencia, siendo una tecnología madura y probada por lo que su rango de mejora es escaso. Por sus características no va a tener mayor participación en los sistemas de propulsión de vehículos eléctricos, excepto para aplicaciones concisas donde las prestaciones sean bajas (carros de golf, de vecindario, vehículos de dos ruedas, etc.). Su tecnología utiliza plomo metálico (Pb) en el electrodo negativo, mientras que dióxido de plomo (PbO₂) en el electrodo positivo y de electrolito utiliza solución de agua destilada y ácido sulfúrico (H₂SO₄).

En la descarga los electrones que provienen del electrodo negativo se consumen en el electrodo positivo produciéndose PbSO₄ (Figura 2.26a) Cuando la batería se carga, se produce un proceso inverso, el sulfato de plomo se reconvierte en plomo en el electrodo negativo, mientras que en el positivo en oxido de plomo (Figura 2.26b). Los electrones son consumidos en el electrodo negativo, mientras que el positivo libera electrones.

La reacción en el electrodo positivo:

La reacción en el electrodo negativo:

La reacción electroquímica global del proceso es la siguiente:

Figura 2.26. Reacciones químicas durante la descarga (a) y carga (b) de una batería de Plomo-ácido; (c) muestra la estructura de esta tecnología [61].

Este tipo de batería tiene un tiempo de vida útil entre 5–15 años con un máximo de 1000 ciclos de vida al 80% de capacidad y proporciona una eficiencia entre 70–90% [61–63]. La tecnología tiene dos tipos de variantes, las baterías abiertas ventiladas que son las más usadas a nivel comercial, las cuales tienen puntos de acceso interior con la finalidad de verificar el electrolito, reponer agua destilada y como ventilación de gases producidos. La otra tecnología es la batería sellada o regulada por válvula (VRLA – valve regulated lead acid), con las ventajas de una alta potencia específica, bajo costo inicial y capacidad de carga rápida, además no requiere mantenimiento al evitar fugas del electrolito y la mínima emisión de gases, pero como desventajas tiene un menor número de ciclos y la imposibilidad de reponer agua destilada por sobrecargas [64]. Se debe acotar que el

electrolito en este tipo de batería es del tipo gel o también de material de vidrio adsorbido (AGM) [59].

2.6.2.2. Baterías basadas en sodio

Otro tipo de tecnología vienen a ser las baterías basadas en el sodio. Este elemento posee una baja masa atómica y presenta buenas cualidades electroquímicas, lo que permite que el voltaje por celda sea de alrededor de 2,5 V. Existe ventaja de explotación ya que es un elemento abundante en el planeta lo que conlleva a bajos costes, además, tiene dos tipos de tecnologías.

Las de sodio azufre (Na-S), es una tecnología desarrollada hace unas décadas por Ford [65]. Su disposición consiste en que el ánodo (electrodo negativo) esté formado por sodio sólido fundido y el cátodo (electrodo positivo) sea de azufre fundido, mientras que el electrolito es un cerámico sólido de beta-alúmina [60,62]. Dadas sus características de alta temperatura (entre 300 y 350 °C) requieren de un sistema de gestión térmica, además que a altas cargas desarrollan una alta resistencia interna, provocando una baja tensión respecto a la nominal y problemas de seguridad por la misma tecnología que puede producir excesivo calor y explosiones, por esta razón se ha descartado el uso de este tipo de baterías en automoción.

Considerando la misma tecnología basada en sodio se ha desarrollado un concepto de batería más simple que es la de sodio metal cloruro (Na-MCl), denominadas con el nombre comercial ZEBRA (Zero Emission Battery Research Activities). Este tipo de baterías pueden tener el cátodo de varios cloruros de metal como el cloruro de níquel (NiCl_2), cloruro de hierro (FeCl_2), o una combinación de cloruro de níquel-hierro (Ni-FeCl_2) [66]. Para obtener un buen contacto iónico entre el ánodo y cátodo a diferencia de las anteriores se añade un segundo electrolito líquido de cloruro de aluminio y sodio (NaAlCl_4) en una capa entre el NiCl_2 y la beta-alúmina [62]. La Figura 2.27 muestra la constitución interna de este tipo de batería.

En una batería ZEBRA con cátodo de cloruro de níquel (NiCl_2), las reacciones químicas son las siguientes:

Para el electrodo positivo:

Para electrodo negativo:

La reacción electroquímica global del proceso es:

Figura 2.27. Esquema de una celda de batería tipo Na- NiCl_2 [64]

Las baterías ZEBRA, son una tecnología segura y de bajo costo, pueden soportar más de 1000 ciclos sin una degradación significativa, con la ventaja de poder descargarse casi al 100% de su capacidad total sin degradación en su ciclo de vida [57,67]. Su energía específica es de aproximadamente 120 Wh/kg, lo que la hacen comparables a las de ion-litio, sin embargo, su desventaja radica en que su potencia específica es baja (150 W/kg), por lo que una opción para el uso en vehículos eléctricos es híbridarlas con supercondensadores [60]. Su temperatura de trabajo es de 250 a 350 °C, algo similar a las de (Na-S), lo que provoca pérdidas térmicas por su temperatura de funcionamiento. A pesar de ello, es una plena alternativa para los vehículos eléctricos ya que poseen condiciones seguras bajo condiciones normales de uso [62].

2.6.2.3. Baterías de níquel metal hidruro

Este tipo de batería tienen un electrolito alcalino para el paso de los iones entre el ánodo y cátodo, consta de un electrodo positivo de oxihidróxido de Níquel (NiOOH), un electrodo negativo que es un metal hidruro (MH) y una solución de hidróxido de potasio (KOH) para el electrolito. Estas baterías dependen de que el hidrógeno pueda ser almacenado reversiblemente en forma de un hidruro de metal, el cual se forma en el electrodo negativo de la celda. El electrodo positivo es un electrodo estándar de óxido de níquel [64].

La Figura 2.28 muestra los procesos electroquímicos de carga y descarga de una batería de Ni-MH. Durante la descarga el oxihidróxido de níquel (NiOOH) se convierte en hidróxido de níquel en el electrodo positivo, mientras que en el electrodo negativo el H₂ se libera del metal formado agua y electrones, en la descarga el proceso es inverso.

Figura 2.28. Esquema de una celda de batería tipo Ni-MH [68].

Las reacciones electroquímicas que se producen para el proceso de carga y descarga en una batería de Ni-MH son las siguientes:

En el electrodo positivo:

En el electrodo negativo:

La reacción electroquímica global del proceso es:

Este tipo de batería ofrece la energía específica más alta entre todas las baterías a base de níquel (entre 60 y 80 Wh/kg), con una potencia específica entre 150 y 300 W/kg, además de un extenso ciclo de vida que varía entre 800 y 2000 ciclos [59,66]. Además,

tiene factores positivos como una recarga rápida y operación libre de mantenimiento, sin embargo, su coste inicial es elevado parecido a las de ion-litio.

2.6.2.4. Baterías de ion-litio

Esta tecnología ha ganado mucha participación en los últimos años, ya que el litio es el metal más liviano y tiene un elevado potencial de reducción [64], lo que permite que las baterías de este tipo sean ligeras y compactas. Además de una mayor ciclabilidad, tiene mayor energía y potencia específica que las tecnologías anteriormente descritas (plomo-ácido, ZEBRA y Ni-MH).

En su estructura convencional, una batería de iones de litio contiene un ánodo de litio intercalado con carbón con la forma del grafito, como por ejemplo las microperlas de mesocarbono, un cátodo formado por un óxido de metal de litio, por ejemplo el óxido de litio-cobalto (LiCoO_2) y un electrolito que consiste en una solución de una sal de litio (por ejemplo el hexafluorofosfato de litio LiPF_6) en un disolvente orgánico mixto como por ejemplo el carbonato de dimetilo (DMC). La Figura 2.29 muestra la disposición típica de batería de ion-litio.

Figura 2.29. Esquema de una celda de iones de litio [68].

Las reacciones químicas en baterías del tipo de óxidos laminares derivados del LiCoO_2 en el electrodo positivo, de material carbonoso C (grafito) en el electrodo negativo y electrolito LiPF_6 (EC-DMC) se presenta a continuación.

En el electrodo positivo:

En el electrodo negativo:

La reacción global queda como:

Si la reacción global se quiere analizar para los distintos tipos de baterías de ion-litio, quedaría formulada de la siguiente manera:

Existen varios tipos de tecnologías de baterías de ion-litio que dependen del material del electrodo positivo. De acuerdo con esto puede haber baterías de óxido de litio cobalto (LiCoO_2), óxido de litio y manganeso (LiMn_2O_4), litio-hierro fosfato (LiFePO_4), óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (LiNiMnCoO_2), baterías de óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (LiNiCoAlO_2) y titanato de litio ($\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$).

En la actualidad esta tecnología ha alcanzado una alta energía específica (entre 120 y 180 Wh/kg), una alta potencia específica que varía de 500 a 2000 W/kg, además de características positivas como una baja autodescarga y una vida útil larga, sin embargo, esta última se puede ver afectada por la temperatura y por descargas profundas bruscas.

Por todas las características favorables como su pequeño tamaño, su peso ligero y su alto potencial frente al resto de tecnologías han ganado aplicabilidad en productos eléctricos y electrónicos portátiles, hasta colocarse hoy en día en aplicaciones más demandantes como las de un vehículo.

2.7. El hidrógeno como vector energético

El hidrógeno es un potencial portador de energía, se encuentra clasificado dentro de los sistemas de almacenamiento de energía química. Se espera que en un futuro próximo represente un aporte importante a la sociedad, su uso se enfoca principalmente en la generación de energía eléctrica a partir de celdas de combustible, donde el gas hidrógeno entra en contacto con el oxígeno a partir de una reacción electroquímica y de esta manera se genera energía eléctrica.

Se prevé que su uso esté destinado para aplicaciones estacionarias como de movilidad con vehículos, sin embargo, algunos aspectos a tratar y mejorar son: la capacidad de almacenamiento gravimétrico y volumétrico, la potencia de salida, la temperatura de operación, la vida útil, el reciclado y el costo de la energía limpia.

2.7.1. Naturaleza química del hidrógeno

El hidrógeno es el primer elemento químico de la tabla periódica, en su estructura más simple está formado por un electrón y un protón sin poseer neutrones, bajo esta estructura se le denomina con el nombre de protio, el cual es el isótopo de hidrógeno con mayor abundancia en el planeta con 98,985 % y es el que forma parte el agua. Existen dos isótopos más denominados deuterio y tritio, el primero es parte del agua de mar en una proporción de 30 gramos por metro cúbico y su abundancia isotópica es de 0,015 % [69,70]; mientras que el tritio no existe en estado natural sino que se lo obtiene a través de reacciones nucleares y es de carácter radioactivo. Otra característica del hidrógeno es ser el elemento más liviano y simple del planeta al poseer una masa atómica de 1,008 u. Cuando se une con otro de sus átomos se lo denomina hidrógeno molecular o hidrógeno

diatómico (H_2), es así como se encuentra en condiciones normales (a una presión 1 atm y temperatura 25°C), sin embargo, no se lo encuentra en estado puro debido a su volatilidad, sino formando parte de elementos compuestos, principalmente el agua y a través de cadenas con el carbono en los hidrocarburos. Otras características son: ser incoloro e inodoro además de tener una alta inflamabilidad debido a que se quema en concentraciones entre 4 y 75 %. La temperatura de autoignición es de 585 °C y para quemarse con el oxígeno explota por ignición. Su densidad es de 0,089 kg/m³ en estado gaseoso y de 0,07 g/cm³ en estado líquido [69,71]. En la Tabla 2.4 se muestra las características químicas del hidrógeno.

Tabla 2.4. Propiedades del Hidrógeno [69–71].

Propiedad	Valor
Nombre, símbolo, número	Hidrógeno, H, 1
Categoría	No metal
Peso atómico	1,008 u
Electrones, protones, neutrones	1, 1, 0
Color, olor	Incoloro, inodoro
Tóxico	No, asfixiante simple
Fase	Gas
Densidad	Gas: 0,089 g/l; Líquido: 0,07 g/cm ³
Energía de ionización	13,5989 eV
Relación de expansión de líquido a gas	1:848 (condiciones atmosféricas)
Rango de inflamabilidad en el aire	4 – 75 %
Velocidad de la llama laminar	3,06 m/s
Punto de inflamabilidad	-253 °C

2.7.2. Propiedades energéticas del hidrógeno

Aunque la finalidad actual del hidrógeno no está enfocada al campo de la energía, este tiene grandes propiedades que lo destacan sobre el resto de los vectores energéticos. Se lo debe comparar con otros combustibles principalmente con los de origen fósil ya que son los que más se utilizan en la actualidad y a los que espera remplazar en la transición energética. Con relación a la energía específica, el hidrógeno es altamente superior con un PCS (poder calorífico superior) de 141, 9 MJ/kg, frente a combustibles convencionales de uso frecuente como la gasolina, diésel y gas metano con valores de 47,5 MJ/kg, 44,8 MJ/kg

y 55,5 MJ/kg respectivamente [72], sin embargo, su densidad de energía es muy inferior a estos mismos combustibles, tres veces menor si el hidrógeno es líquido y hasta seis veces menor si el hidrógeno está en estado gaseoso [73]. En la Tabla 2.5 se muestra los valores energéticos del hidrógeno junto a los combustibles más usados actualmente en el transporte, estos en función de su energía por unidad de masa y por unidad de volumen.

Tabla 2.5. Densidades de energía volumétrica y gravimétrica de los combustibles utilizados en el transporte [72–75].

Combustible	PCS (MJ/kg)	PCI (MJ/kg)	Densidad de energía (MJ/l)
Hidrógeno (líquido)	141,9	120,0	10,1
Hidrógeno gaseoso (comprimido a 700 bar)	141,9	120,0	5,6
Hidrógeno (presión atmosférica)	141,9	120,0	0,0107
Gasolina	47,5	44,5	34,2
Diésel	44,8	42,5	34,6
Gas Natural (presión atmosférica)	55,5	50,0	0,0378
Etanol	29,73	26,81	23,66
Metanol	22,72	18,1	18,08
GLP (Propano)	49,6	46,35	25,3

2.7.3. Producción, utilización y demanda de hidrógeno

En el presente la mayor parte del hidrógeno obtenido procede de recursos de origen fósil, de hecho, alrededor del 96 % se genera de esta manera. El 50 % a partir del reformado con vapor de agua del gas natural, el 30 % a partir del reformado del petróleo, el 18 % de la gasificación del carbón, mientras que solo el 3,9 % es a partir de la electrólisis del agua y el 0,1 % de otros tipos de procesos [76]. Respecto a la producción de hidrógeno, en el año 2016 fue de alrededor de 85 millones de toneladas métricas en todo el mundo y se prevé un incremento en la producción entre el 5 y 7% anual [77]. Su uso normalmente está destinado, como se observa en la Figura 2.30, a procesos de refinado de petróleo, a la obtención de fertilizantes a base de amoníaco, producción de metanol en la hidrogenación de alimentos y en la metalurgia, de hecho, aproximadamente el 95% de la producción total es utilizada por la industria petroquímica y el resto es utilizado por consumidores comerciales [78–82].

Figura 2.30. Producción y uso del hidrógeno en el año 2009 [81].

2.7.4. Métodos de obtención de hidrógeno

Para producir hidrógeno se necesita como base recursos primarios con la inversión previa de cierta cantidad de energía, sin embargo, por la concepción y disponibilidad de cada tipo de método, implican distinto coste para cada uno de estos. De acuerdo con la materia prima utilizada, existen dos formas principales de conseguir hidrógeno y a partir de estas se puede desglosar en múltiples técnicas, el primer método es a partir de recursos fósiles y el segundo es a partir de fuentes renovables.

La primera categoría procesa los combustibles fósiles e incluye los métodos de reformado de hidrocarburos y pirólisis. En el proceso de reformado de hidrocarburos, las técnicas químicas son: el reformado con vapor, la oxidación parcial y el reformado con vapor autotérmico.

La segunda categoría contiene los métodos que producen hidrógeno a partir de recursos renovables, ya sea a partir de biomasa o del agua. Utilizando la biomasa como materia prima estos métodos se pueden subdividir en dos subcategorías generales: procesos termoquímicos y biológicos. La tecnología termoquímica implica principalmente la pirólisis, la gasificación, la combustión y la licuefacción, mientras que los procesos biológicos son la biofotólisis directa e indirecta, la fermentación oscura y la fotofermentación. La segunda clase de tecnología renovable se refiere a los métodos que

pueden producir hidrógeno a través de la división molecular del agua, estos procesos son la electrólisis, la termólisis y la fotólisis. Estas técnicas utilizan el agua como único material de entrada. En la Figura 2.31 se muestra las diversas vías para la producción de hidrógeno.

Figura 2.31. Métodos de producción de hidrógeno.

2.7.5. Almacenamiento de hidrógeno

El hidrógeno es un gran portador de energía, su energía específica es bastante elevada respecto a otros combustibles, sin embargo, tiene una baja densidad de energía. El almacenamiento también resulta una dificultad técnica hoy en día por lo que limita la factibilidad del hidrógeno como fuente de energía a gran escala.

A temperatura y presión ambiente 1 kilogramo de hidrógeno molecular ocuparía $11,11 \text{ m}^3$ [83], es por eso que se requiere almacenarlo bajo otras características técnicas como se muestra en la Figura 2.32. Para que exista viabilidad en su manejo y pueda ser utilizado para fines energéticos debe ocupar menos espacio, es así como 6 Kg de hidrógeno sometido a una presión de 700 bar ocuparía un volumen de 150 litros. En la actualidad muchos estudios se inclinan a mejorar la técnica de almacenamiento inclusive en distintos estados de la materia.

Figura 2.32. Métodos de almacenamiento de hidrógeno [83].

Actualmente existen tres formas tangibles de almacenar hidrógeno, la primera es almacenarlo en estado gaseoso y comprimido, la segunda en estado líquido a temperaturas muy bajas o criogénicas y la tercera es combinarlo con elementos en estado sólido, de manera física (fisisorción) con el carbono, o química con otros materiales como los metales de transición formando hidruros simples o con metales ligeros formando hidruros complejos [84]. La Tabla 2.6 muestra los tres tipos de almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 2.6. Categorización en el almacenamiento de H₂ [85].

Categoría	Subcategoría	Densidad Volumétrica [kg-H ₂ /m ³]	Densidad gravimétrica [wt. %]	Presión [bar]	Temperatura [°C]
Gas	Cilindros de alta presión	≤40	13	800	25
Líquido	Hidrógeno en tanques criogénicos	70,8	Dependiente del tamaño	1	-252
Sólido	Fisisorción en carbono	20	≈ 2	100	-80
	Hidruros metálicos	150	≈ 2	1	25
	Compuestos complejos	150	<18	1	>100
	Oxidación química de metales con agua	>150	<40	1	25

2.7.5.1. Hidrógeno comprimido

Es una de las técnicas más desarrolladas, debido principalmente a su sencillez y economía, se trata de comprimir el hidrógeno en tanques a alta presión (entre 200 y 700 bar), de esta manera se incrementa la masa del hidrógeno por unidad volumétrica, para lograr comprimir el gas se necesita la interacción de energía sobre el sistema que puede ser a través de un compresor mecánico de émbolos y a compresión isotérmica [7], el trabajo teórico viene dado por la ecuación:

$$\Delta G = RT \ln \left(\frac{p}{p_0} \right) \quad (2.14)$$

Donde R es la constante de los gases, T es la temperatura absoluta, p es la presión final y p_0 la presión inicial, con un error menor al 6 % para presiones en el rango entre 0,1 y 100 MPa. La compresión isotérmica del hidrógeno de 0,1 a 80 MPa consume 2,21 kWh/kg, con una densidad gravimétrica de 13 wt% y una densidad volumétrica de hasta 40 kg/m³ en laboratorio [7,72]. En un proceso real, el consumo de trabajo es significativamente mayor porque la compresión no es isotérmica. Posibles relaciones de compresión superiores de 20: 1 se pueden lograr con presiones finales mayores a 100 MPa.

La seguridad de los cilindros presurizados es una preocupación, especialmente en regiones altamente pobladas. Se prevé que los futuros recipientes a presión consten de tres capas: un revestimiento interno de polímero envuelto con un compuesto de fibra de carbono (que es el componente que soporta la tensión) y una capa exterior de un material de aramida capaz de resistir la corrosión mecánica.

2.7.5.2. Hidrógeno líquido

Es una tecnología con un alto nivel de madurez y mantiene una cuota importante en el mercado. Para usar esta técnica el hidrógeno debe ser llevado a temperaturas criogénicas y almacenarlo en tanques de este tipo. El ciclo de licuefacción más simple es el ciclo de Joule–Thompson (ciclo Linde), este proceso necesita de dos etapas de tratamiento

del hidrógeno, la primera consiste en comprimirlo y la segunda en enfriarlo a través de intercambiadores de calor [72].

Debido al bajo punto de temperatura de saturación del hidrógeno líquido, se necesita mucha cantidad de energía, por ejemplo, para obtener hidrógeno criogénico a $-252\text{ }^{\circ}\text{C}$ se debe invertir para los dos procesos antes nombrados $15,2\text{ kWh/kg-H}_2$, esto significa entre el 30 y 40 % del poder calorífico inicial del hidrógeno [84]. Para este tipo de almacenamiento la densidad gravimétrica depende del tamaño del tanque y la densidad volumétrica es de $70,8\text{ kg/m}^3$, esta última es mucho más alta que en el almacenamiento de gas comprimido, sin embargo, tiene desventajas como una mayor inversión energética para almacenar el hidrógeno y pérdidas liberadas a la atmósfera por evaporación estimadas en $0,4\text{ gH}_2/\text{kWh}$ [86], aunque tenga un aislamiento perfecto debido a que es un sistema abierto. Esta técnica de almacenamiento es una alternativa favorable en sectores donde el costo del hidrógeno no viene a ser una cuestión estrictamente importante y el consumo se realiza en tiempos cortos. Como, por ejemplo, aplicaciones aéreas, espaciales y transporte transoceánico en barco [87]. Al ser una tecnología compleja se prevé quedará reservada al uso industrial, debido a las complicaciones asociadas al uso generalizado para uso normal en los ciudadanos.

2.7.5.3. Fisisorción en carbono

Este tipo de almacenamiento de hidrógeno es muy efectivo ya que permite almacenar mayores cantidades de hidrógeno que los métodos anteriormente nombrados, además, las presiones y temperaturas son moderadas. Ofrece una alta densidad volumétrica incluso mayor que la del hidrógeno líquido [7]. La técnica aplicada se denomina fisisorción o adsorción física, consiste en que el hidrógeno molecular se adhiera a otra superficie normalmente sólida. La característica que este método debe cumplir es que el elemento adsorbido, en este caso el hidrógeno, conserve su naturaleza química. El carbono es un elemento idóneo como superficie sólida para estas aplicaciones. En los últimos años se han

realizado múltiples estudios sobre este elemento, teniendo características como bajo peso y coste, pudiéndose además obtener numerosos polímeros y nanoestructuras como grafito, carbón activado, nanofibras, nanotubos y grafeno [88]. Para este método de almacenamiento la densidad gravimétrica suele ser de 10,8 wt% y la densidad volumétrica de 41 kg/m³ [72,87].

2.7.5.4. Hidrógeno en Hidruros de metal

Es otro tipo de adsorción que consiste en que el hidrógeno se asocie a metales de transición como el magnesio, zirconio, hierro y titanio, para formar hidruros. En la Tabla 2.7 se muestran los más representativos para cada uno de ellos con su grupo hidruro y sus características.

Tabla 2.7. Categorización de Hidruros Metálicos [85].

Grupo	Aleación representativa	Hidruro	wt. %	P [bar]	T [°C]
A	Mg	MgH ₂	7,6	1	300
AB ₂	ZrV ₂	ZrV ₂ H _{5,5}	3,01	10	50
AB ₅	LaNi ₅	LaNi ₅ H _{6,5}	1,37	2	25
AB	FeTi	FeTi _{1,9}	1,89	5	30
A ₂ B	Mg ₂ Ni	Mg ₂ NiH ₄	3,59	1	282

Con esta técnica se tienen densidades volumétricas de 150 kg/m³, sin embargo, como se puede observar en la anterior tabla, su densidad gravimétrica es bastante baja entre el 2 y 3 % [7,89], excepto para el hidruro de base MgH₂, el cual tiene una densidad gravimétrica de 7,6 wt%, pero sus propiedades termodinámicas y cinéticas no son favorables, por lo que no se logra con facilidad disminuir la temperatura de equilibrio, además son muy sensibles a los gases atmosféricos, por lo que se dificulta aún más su manipulación.

Hay que acotar que los hidruros metálicos se forman a través de reacciones exotérmicas, lo que significa que existe liberación de calor durante la adsorción del

hidrógeno, y que requiere la misma cantidad de calor para que el hidrógeno sea liberado del hidruro para ser utilizado [87].

2.7.5.5. Hidrógeno en compuestos complejos

Existe también la posibilidad de hacer reaccionar al hidrógeno con metales ligeros del grupo 1,2 y 3 como el litio, berilio, sodio, magnesio, boro y aluminio, a estas aleaciones se les denomina hidruros complejos. Lo interesante en este tipo de metales es su peso ligero y el número de átomos de hidrógeno asociado al metal, el cual suele ser de dos en muchos casos. Con esto se alcanza mejores características de almacenamiento, por ejemplo, el $\text{Al}(\text{BH}_4)_3$ y Mg_2FeH_6 tienen una densidad volumétrica de 150 kg/m^3 y una densidad gravimétrica un poco menor de 18 wt% [7,72]. A diferencia de los hidruros metálicos, en estos elementos, el hidrógeno se libera a través de descomposiciones en cascada donde las reacciones se dan por etapas requiriendo de diferentes condiciones (desorción a temperatura elevada y adsorción a presiones altas).

Los hidruros complejos abren un nuevo campo de materiales de almacenamiento de hidrógeno. Los boruros son especialmente interesantes debido a la alta densidad gravimétrica y volumétrica de hidrógeno.

2.7.5.6. Oxidación química de metales con agua

El hidrógeno se puede generar haciendo reaccionar metales y compuestos químicos con agua. Una de estas reacciones es la del sodio (Na) que se transforma en hidróxido de sodio (NaOH). La reacción no es directamente reversible, pero el NaOH puede eliminarse y reducirse de nuevo a sodio metálico. Dos átomos de sodio reaccionan con dos moléculas de agua (H_2O) y producen una molécula de hidrógeno. La molécula de hidrógeno produce un H_2 molecular y oxígeno en la combustión, que puede ser reciclado para generar más gas de hidrógeno, sin embargo, el segundo H_2 debe añadirse a la molécula de oxígeno, necesaria para la oxidación de los dos átomos de Na, por lo que, con esta técnica se llega

a una densidad gravimétrica de hidrógeno de 3% [7]. Si el mismo proceso es llevado a cabo con litio (Li) conduce a una densidad gravimétrica de 6,3% [89].

2.7.5.7. Perspectivas del almacenamiento de hidrógeno en vehículos de transporte por carretera

La técnica de almacenamiento más usada en el transporte por carretera es la del hidrógeno comprimido en cilindros a alta presión. Existen ya modelos tanto en el mercado como en desarrollo que lo confirman (Tabla 2.8). A pesar de una menor densidad gravimétrica y volumétrica, su forma sencilla y su rápido repostaje entre 3 y 5 minutos [90] han permitido que los esfuerzos se vuelquen hacia esta tecnología.

Tabla 2.8. Especificaciones técnicas de vehículos eléctricos con pila de combustible.

Modelo de Vehículo	Almacenamiento eléctrico	Tipo de almacenamiento de H ₂	Consumo [kg H ₂ /100 km]
Honda Clarity Fuel Cell 2017	Ion-litio	3,92 kg H ₂ – 350 bar	1,015
Toyota Mirai 2016	NiMH – 1,6 kWh	5 kg H ₂ – 700 bar	1,03
Hyundai Tucson Fuel Cell 2006	Litio-Polímero	3,7 kg H ₂ – 350 bar	0,96
Hyundai ix35 2013	Litio-Polímero – 0,95 kWh	5,64 kg H ₂ – 700 bar	1,07
Toyota FCHV-adv	NiMH – 1,6 kWh	6 kg H ₂ – 690 bar	0,73
Audi Sportback A7h-tron Quattro 2014	Ion -Litio – 8,8 kWh	5 kg H ₂ – 700 bar	1,0
Mercedes-Benz Class Fcell	Ion -Litio – 1,4 kWh	3,7 kg H ₂ – 700 bar	0,97
Roewe 950 Fuel Cell 2014	Ion - Litio	4,34 kg H ₂ – 700 bar	1,085
Volkswagen Golf Hymotion 2014	Ion -Litio – 8,8 kWh	5 kg H ₂ – 700 bar	1,0
Kia Borrego FCEV	Supercondensadores	8,25 kg H ₂ – 700 bar	1,1

La Figura 2.33 muestra una comparación del volumen que pueden ocupar distintas tecnologías de almacenamiento de hidrógeno, el estado gaseoso es la técnica menos efectiva, ya que para almacenar 4 kg de hidrógeno a 200 bar se necesita un tanque de aproximadamente 220 litros, a diferencia de las otras técnicas como en estado sólido (hidruros metálicos) o líquido (hidrógeno en tanques criogénicos) donde los mismos 4 kg ocupan mucho menos espacio, sin embargo, esta figura tiene un fin meramente informativo

ya que los datos corresponden al año 1999. En el presente existen modelos de vehículos como el Toyota Mirai que almacenan 5 kg H_2 en 122,4 litros mientras que el Hyundai ix35 almacena 5,64 kg H_2 en 144 litros, ambos a una presión de 700 bar, es decir los mismos 4 kg de hidrógeno a 700 bar ocuparían menos de la mitad de espacio que hace dos décadas.

Figura 2.33. Volumen que ocupa distintas técnicas de almacenamiento de hidrógeno (Toyota press information, 33rd. Tokyo Motor Show, 1999) [89].

Los objetivos establecidos para uso en el transporte, según el Departamento de Energía de los Estados Unidos (DOE por sus siglas en inglés), marcan valores de densidad gravimétrica de 5,5 wt% y densidad volumétrica de 40 kg/m³ para el año 2020, y como requerimiento a largo plazo una densidad gravimétrica de 7,5 wt% con una densidad volumétrica de 70 kg/m³ [91]. Existen marcas como Toyota que han alcanzado ya las metas fijadas para el año 2020 como es el caso de su modelo Mirai, que en la actualidad tiene una densidad gravimétrica de 5,7 wt% y una densidad volumétrica de 40,85 kg/m³ a una presión de 700 bar [88].

2.7.6. Costes del hidrógeno

El coste del hidrógeno es variable y depende de la tecnología empleada. Actualmente el menor precio procede del reformado de combustibles fósiles. La Tabla 2.9 describe los costes del hidrógeno para varias tecnologías según la literatura científica.

2.7.6.1. Tecnologías con fuentes fósiles

El reformado centralizado con vapor del gas natural (SMR por sus siglas en inglés) a gran escala es actualmente uno de los métodos más barato de producir hidrógeno con costes entre 2,01 y 5,0 \$/kg [92,93] para los que incluyen sistema de captura de CO₂ y de 0,75 y 3,01 \$/kg sin sistema de captura de CO₂ [94,95], el costo del gas natural para estos estudios se estimó entre 6,09 y 10 \$/MMBtu, con eficiencias entre 80 y 83 %. A pesar de los bajos costes del proceso, la principal desventaja es la emisión de 0,3 a 0,4 m³ de CO₂ por cada metro cúbico de hidrógeno obtenido [72].

Otro proceso a partir de fuentes fósiles es la oxidación parcial (POX por sus siglas en inglés), el cual es un método apropiado para utilizar residuos pesados de petróleo y carbón, dando como resultado hidrógeno y monóxido de carbono, la eficiencia en estos sistemas puede ser de 60 a 80 % [96,97]. El costo del hidrógeno producido por carbón con el método POX puede variar entre 0,83 \$/kg y 1,74 \$/kg para sistemas sin captura de CO₂ [92,98] y de 0,37 \$/kg a 2,33 \$/kg para sistemas con captura de CO₂ [96,97], los factores tomados en cuenta en estos estudios fueron: los costos laborales, eficiencia de la planta, costo del carbón, factor de capacidad de operación–producción y costo total del capital directo.

El reformado autotérmico (ATR por sus siglas en inglés) es otro método a partir de recursos fósiles para obtener hidrógeno. Los costes pueden variar entre 0,95 y 4,28 \$/kg, con eficiencias del 60 al 65 % [99,100]. Finalmente, la pirólisis de hidrocarburos es un proceso en el que la única fuente para producir hidrógeno es el hidrocarburo en sí, que sufre una descomposición térmica, aquí los costos pueden variar entre 1,59 y 1,7 \$/kg [72].

2.7.6.2. Tecnologías con fuentes renovables

El hidrógeno a partir de fuentes renovables es otra opción, pero sus costes altos y tecnología aún en desarrollo no permiten una contribución importante. Para los procesos por biomasa existen los biológicos que a su vez se clasifican en los de biofotólisis directa con costes de 2,13 a 2,84 \$/kg, los de biofotólisis indirecta con costes de 1,42 a 2,84 \$/kg ambos con eficiencias de alrededor del 10 %, también están los procesos de fotofermentación con costes de 2,83 a 31,92 \$/kg y eficiencias del 45 al 60 %, otros procesos son los de fermentación oscura que tienen costes que varían entre 2,57 y 2,95 \$/kg con eficiencias del 60 al 80 %.

Dentro de la biomasa también existe los procesos termoquímicos que a su vez se clasifican en los de pirólisis con costes de 1,25 a 2,57 \$/kg y eficiencias del 30 al 50 %, los de gasificación con costes de 1,44 a 2,27 \$/kg y eficiencias menores o iguales al 52 %. Para los procesos de combustión y licuefacción el autor no ha encontrado costes dentro de la literatura científica, debido a que estos dos métodos son los menos estudiados, principalmente porque ambos ofrecen una baja producción de hidrógeno y requieren complicadas condiciones de operación [101] .

Otro proceso para las fuentes renovables consiste en obtener el hidrógeno a través de la separación molecular del agua, el cual puede ser por electrólisis, termólisis o fotólisis. Los procesos de electrólisis pueden derivarse de la red eléctrica, en este caso el coste es variable y dependerá del mix eléctrico de cada país. Los recursos renovables pueden ser una buena alternativa para generar hidrógeno, en este ámbito, los recursos solares tienen gran expectativa debido al alto potencial de radiación sobre la esfera terrestre de alrededor de $5,457 \times 10^{18}$ MJ al año, que es un valor alto si se toma en cuenta que el consumo de energía de todas las fuentes energéticas en 2005 fue de 4.883×10^{14} MJ [96].

La electrólisis del agua a partir de energía solar fotovoltaica es una opción a medida que los módulos fotovoltaicos han ido reduciendo su precio con el desarrollo de la

tecnología, especialmente los de silicio cristalino y policristalino. La ventaja de este tipo de sistema es que pueden utilizar la energía excedente de las centrales solares fotovoltaicas conectadas a la red eléctrica, sin embargo, la mejor opción por su facilidad de manejo es la de sistemas autónomos, esto se debe principalmente a que se puede optar por sistemas autónomos pequeños que pueden ir entorno a los kilovatios. Los costos están íntimamente relacionado al potencial solar en cada emplazamiento y al coste del equipo, sin embargo, los costes de producción pueden oscilar entre 5,78 y 23,27 \$/kg-H₂ con eficiencias de alrededor del 10 % [98,102].

La electrolisis a partir de la energía del viento y su transformación a energía eléctrica a través de aerogeneradores eólicos es otra opción, al igual que la energía solar fotovoltaica sus costes se han visto reducidos lo que permite pensar seriamente en una opción para obtener hidrógeno sin la emisión de CO₂ [103,104]. Los costes pueden variar entre 2,27 y 5,55 con eficiencias de alrededor del 32 % [105], aunque al igual que la solar FV, sus valores dependerán de la localización donde se instale el sistema.

La obtención de hidrógeno con electrólisis a partir de energía nuclear es otra opción, su propuesta se fundamenta en el uso de esta energía en los momentos de menor consumo del usuario en la red eléctrica usando el excedente para generar hidrógeno el precio estimado sería entre 4,15 y 7,0 \$/kg [72].

Respecto a los procesos de termólisis, estos consisten en la separación molecular del de agua de manera termoquímica, en este proceso se calienta el agua a una temperatura elevada (generalmente a más de 2500 °C) hasta que se descompone en hidrógeno y oxígeno. La alta temperatura requerida puede ser suministrada por calor solar (colectores solares) o energía nuclear [106], para los primeros los costes pueden estar entre 7,98 y 8,4 \$/kg, con eficiencias del 17,4 al 20,8 % [107], mientras que para los que utilizan energía nuclear los costes pueden estar entre 1,65 y 2,67 \$/kg, con eficiencias del 40 % [96,108,109].

Finalmente, una opción reciente es la separación molecular del agua a través de procesos de fotólisis, el cual consiste en absorber la luz solar a través de materiales semiconductores y con la ayuda de fotocatalizadores descomponer el agua en hidrógeno y oxígeno [110]. Los costes pueden variar entre 10,36 y 93,66 \$/kg, con eficiencias de tan solo 0,06 % [76,111].

Tabla 2.9. Costos del hidrógeno según las tecnologías actuales.

Proceso	Eficiencia	Recurso Energético	Estudio	Año	Costo (\$/kg)
Combustibles Fósiles					
SMR sin CCS (mínima)	83%	Gas Natural	Abbas y Wan Daud [94]	2014	0,75
SMR sin CCS (máxima)	83%	Gas Natural	Penner [95]	2006	3,01
SMR con CCS (mínima)	80 %	Gas Natural	Rutkowski/NREL [92]	2012	2,01
SMR con CCS (máxima)	80 %	Gas Natural	Lattin y Utgikar [93]	2006	5,0
POX sin CCS (mínima)	70 -80 %	Carbón	Gray y Tomlinson [98]	1998	0,83
POX sin CCS (máxima)	70 – 80 %	Carbón	Rutkowski/NREL [92]	2008	1,74
POX con CCS (máxima)	60 - 75 %	Carbón	Rutkowski/NREL [92]	2008	2,33
POX con CCS (mínima)	60-75 %	Carbón	Gray y Tomlinson [98]	1998	0,37
ATR con CCS (máxima)	60-65%	Gas Natural	Myers, D. et al. [100]	2002	4,28
ATR con CCS (mínima)	60 -65%	Gas Natural	Damen, K. et al. [99]	2006	0,95
Pirólisis de hidrocarburos (máxima)	-	Gas Natural	P.Nikolaidis,A.Poullikkas [72]	2017	1.59
Pirólisis de hidrocarburos (mínima)	-	Gas Natural	P.Nikolaidis,A.Poullikkas [72]	2017	1.7
Recursos Renovables					
Biofotólisis Directa (máxima)	10 %	Sol	Hallenbeck and Benemann [101]	2002	2,84
Biofotólisis Directa (mínima)	10 %	Sol	Tredici, M. et al. [112]	1998	2,13
Biofotólisis Indirecta (máxima)	10 %	Sol	Hallenbeck, Benemann [113]	2002	2,84
Biofotólisis Indirecta (máxima)	10 %	Sol	Benemann [114]	1998	1,42
Foto fermentación (máxima)	45-60%	Sol	Urbaniec, Grabarczyk [115]	2014	31,92
Foto fermentación (mínima)	45-60%	Sol	Dincer, Acar [76]	2014	2,83
Fermentación oscura (máxima)	60-80%		Lee, D. et al. [116]	2011	2,95
Fermentación oscura (mínima)	60-80%		Dincer, Acar [76]	2013	2,57
Pirólisis Biomasa (máxima)	30-50%	Biomasa	Bartelsa, J. et al. [96]	2007	2,57
Pirólisis Biomasa (mínima)	30-50%	Biomasa	Padro and Putsche [117]	1999	1,25
Gasificación Biomasa (máxima)	≤ 52%	Biomasa leñosa cultivada	Mann and Steward [92]	2010	2,27
Gasificación Biomasa (mínima)	≤ 52%	Aserrín de madera, cascara de oliva, residuo de plástico	Uddin et al. [118]	2014	1,44

Proceso	Eficiencia	Recurso Energético	Estudio	Año	Costo (\$/kg)
Electrólisis Eólica (mínima) ^a	32%	Viento	Levene et al. [105]	2006	2,27
Electrólisis Eólica (máxima) ^a	32%	Viento	Levene et al. [105]	2006	5,55
Electrólisis Solar Fotovoltaica (máxima) ^b	10%	Solar	Glatzmaier [119]	1998	23,27
Electrólisis Solar Fotovoltaica (mínima) ^b	10%	Sol	Gray and Tomlinson [98]	2002	5,78
Electrólisis nuclear (máxima) ^b	32%	Uranio	Nikolaidis y Poullikkas [72]	2017	7,0
Electrólisis nuclear (mínima) ^b	32%	Uranio	Nikolaidis y Poullikkas [72]	2017	4,15
Termólisis nuclear Cu-Cl (máxima)	45%	Uranio	Nikolaidis y Poullikkas [72]	2017	2,67
Termólisis nuclear S-I (mínima)	45%	Uranio	Richards et al. [120]	2005	1,65
Termólisis solar (máxima)	17,4 %	Sol	Nikolaidis y Poullikkas [72]	2017	8,4
Termólisis solar (mínima)	20,8 %	Sol	Nikolaidis y Poullikkas [72]	2017	7,98
Fotólisis, separación molecular del agua (máxima)	0,06%	Sol	DOE [111]	2014	93,66
Fotólisis separación molecular del agua (mínima)	0,06%	Sol	James et al [121]	2009	10,36

^a Se tiene en cuenta una eficiencia del aerogenerador de 45% y una eficiencia del 70%; y con un costo del electrolizador de 450 \$/kW

^b Se tiene en cuenta una eficiencia del módulo solar fotovoltaico de 14% y una eficiencia del 70% y el coste está basado en valores del módulo entre 0,75 \$/W_p - 5 \$/W_p con un costo del electrolizador de 450 \$/kW.

2.8. La pila de combustible

La pila de combustible (PC) es un dispositivo que convierte la energía química contenida de un combustible en energía eléctrica a través de un proceso electroquímico. La PC es independiente de procesos térmicos, por lo que no está sujeta al límite de Carnot y su eficiencia es mayor. En un sistema de pila de combustible la energía relacionada con la reacción electroquímica del combustible (hidrógeno molecular, metanol, etanol, etc.) junto con el oxígeno da como resultado agua, electricidad y calor.

Las pilas de combustible se clasifican de acuerdo con el electrolito empleado y la reacción química. Existen seis tipos de pilas de combustible donde la investigación ha inclinado sus esfuerzos, estas son: La pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), la pila de combustible de metanol directo (DMFC), la pila de combustible de óxido sólido (SOFC), la pila de combustible alcalina (AFC), la pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC) y la pila de combustible de carbonato fundido (MCFC). Las pilas PEMFC y DMFC son de membrana de intercambio protónico, las primeras utilizan como combustible hidrógeno (H_2) mientras que las segundas utilizan metanol. Las características de cada tipo de pila de combustible se describen en la Tabla 2.10:

Tabla 2.10. Propiedades técnicas de las principales pilas de combustible [122–127]

Tipo de Pila de combustible	Temperatura de operación (°C)	Rendimiento (%)	Combustible	Aplicaciones
PEMFC	60 – 80	40 – 60	H_2	Transporte, portátil, estacionario de baja potencia
SOFC	800 – 1000	55 – 65	H_2 , CH_4 , CO	Estacionario
MCFC	600 – 700	55 – 65	H_2 , CH_4 , reformados	Estacionario de alta potencia
DMFC	50 – 200	35 – 60	Metanol (CH_3OH+H_2O)	Portátil
AFC	65 – 250	60 – 70	H_2	Espacio, submarino
PAFC	160 – 220	36 – 45	H_2	Estacionario de media potencia

2.8.1. La pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC)

Este tipo de pila de combustible utiliza hidrógeno molecular (H_2) como combustible, está compuesta por tres componentes activos: un electrodo negativo (ánodo) donde se liberan los electrones en presencia de un catalizador, un electrodo positivo (cátodo) a donde viajan los electrones para combinarse con los iones positivos y el oxígeno, y un electrolito polimérico (Nafion®) intercalado entre ellos. Los electrodos consisten en un material poroso que está cubierto con una capa de catalizador de platino. La Figura 2.34 muestra el funcionamiento dentro de una pila de combustible PEMFC.

Figura 2.34. Estructura interna de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC) [128].

El hidrógeno molecular H_2 se suministra hacia el ánodo donde reacciona electroquímicamente, aquí el hidrógeno se oxida para producir iones de hidrógeno y electrones, estos últimos viajan hacia un circuito externo (por ejemplo, un motor eléctrico) para luego reaccionar en el cátodo con iones positivos y oxígeno y formar agua. Las reacciones químicas son las siguientes:

En el ánodo:

En el cátodo:

La reacción global:

Actualmente la pila de combustible PEMFC es la más utilizada en aplicaciones de automoción, esto se debe a su confiabilidad y respuesta rápida a transitorios en comparación con las otras pilas de combustible. La tecnología que utiliza cada celda de la PEMFC se construye utilizando membranas de electrolito polimérico (Nafion®) como conductor de protones y materiales basados en platino (Pt) como catalizador. Sus principales características incluyen baja temperatura de operación (60–80°C), alta potencia específica y fácil escalado.

Sin embargo, para alcanzar la madurez tecnológica para aplicaciones de automoción, se debe resolver aún el problema relacionado con la cantidad de horas de vida útil del sistema, según el Departamento de energía de los Estados Unidos (DOE), se requiere una vida útil de 5000 horas en condiciones de funcionamiento reales que incluyan: impurezas en el combustible y el aire; condiciones de arranque y parada del sistema; congelación y descongelación; ciclos de humedad; calidad de los componentes del sistema de pila de combustible para soportar las tensiones en la estabilidad química y mecánica de los materiales [92]. Se debe mencionar que hay compañías como 3M Company que han logrado más de 7500 horas de durabilidad para el conjunto de electrodos de membrana (MEA) en sus pruebas de laboratorio [127].

2.8.1.1. Curvas de polarización de la pila de combustible PEMFC

El voltaje teórico máximo alcanzable por una pila de combustible alimentada con H_2/O_2 a circuito abierto se denota por la ecuación:

$$V_r = \frac{\Delta G}{2F} \quad (2.18)$$

Donde ΔG es el cambio de energía libre de Gibbs en condiciones estándar (237,04 kJ/mol) y F es la constante de Faraday (96 495 C/mol). En estas condiciones el valor de tensión es de 1,23 V, con temperaturas por debajo de los 100°C [62,128], sin embargo, este valor es teórico ya que en la realidad esto no ocurre. La razón se relaciona a la existencia de obstáculos cinéticos en los electrodos, o porque el proceso no tiene lugar en la manera supuesta en el cálculo termodinámico de V_r , por lo que esta caída de tensión depende de los materiales de los electrodos y tipo de electrolito [62].

Determinado que la tensión a circuito abierto es menor que la ideal, en la Figura 2.35 se aprecia una caída brusca inicial de la tensión, esto se debe a que a intensidades de corriente bajas existe una polarización a circuito abierto por activación del electrodo que se traduce en un descenso del voltaje de la celda [125]. Este comportamiento es típico en las pilas de combustible tipo PEM, y se debe a la cinética intrínseca de la activación de los reactivos en la superficie del electrodo (catalizador). A estas pérdidas se las conoce con el nombre de **pérdidas de activación**.

Siguiendo la curva de polarización observamos que la tensión decae linealmente, estas pérdidas se denominan **pérdidas óhmicas**, y se deben a la resistencia iónica en el electrolito y los electrodos, a la resistencia electrónica tanto en los electrodos como en los colectores y a la resistencia de contacto.

En la parte final de la curva se observa otro tipo de pérdidas que se da a altas densidades de corriente denominadas como **pérdidas por concentración o transporte de masa**, que se dan por los límites impuestos por el transporte de masa.

Figura 2.35. Curva de polarización de una pila de combustible tipo PEM [129].

Como se dijo anteriormente, una pila de combustible no está sometida al límite de rendimiento teórico que impone el Ciclo de Carnot, ya que es un dispositivo electroquímico que está expuesto a un proceso de oxidación isotérmica en lugar de oxidación por combustión. El rendimiento de la pila de combustible puede determinarse mediante su curva de polarización, la cual tiene en cuenta las características eléctricas voltaje–corriente. Usando la definición de voltaje reversible (V_r) de la ecuación (2.18), se puede definir la eficiencia de voltaje de una pila de combustible como:

$$\eta_{PC} = \frac{V}{V_r} \quad (2.19)$$

Para poder comparar cada tipo de pila de acuerdo con su tamaño, en los resultados eléctricos se impone un proceso de normalización de la corriente con respecto al área de reacción electroquímica de la pila. Para esto se compara mediante parámetros característicos como la densidad de corriente (A/cm^2) y la densidad de potencia (W/cm^2).

La Figura 2.36 muestra la curva característica en función del rendimiento–corriente y potencia–corriente.

Figura 2.36. Curva de rendimiento y densidad de potencia en función de la densidad de corriente una pila de combustible tipo PEM [62].

La figura anterior demuestra que el rendimiento decrece con la intensidad de corriente, mientras que la potencia crece a mayor corriente. Por lo que una pila de combustible a baja potencia e intensidad tendrá un rendimiento alto, sin embargo, teniendo en cuenta la energía consumida por los auxiliares (compresor de aire, bomba de agua, etc.) una baja potencia da como resultado un bajo rendimiento, por la demanda de potencia de estos elementos [62].

2.8.1.2. Sistemas auxiliares de la pila de combustible

Dado que la pila de combustible no puede funcionar por sí sola necesita un conjunto de elementos que complementen su funcionamiento, a estos se les denomina sistemas auxiliares. Los principales elementos auxiliares incluyen el compresor de aire, bomba de refrigeración, ventiladores, humidificadores, sistema de suministro de hidrógeno, reguladores y electrónica de control. La unión de estos elementos junto con la pila de combustible y el depósito de combustible se denomina sistema de pila de combustible (Figura 2.37).

Figura 2.37. Sistema de pila de combustible [62].

El sistema de pila de combustible tiene un autoconsumo de energía para su funcionamiento, esto se debe al conjunto de elementos auxiliares, por lo que, la potencia útil del sistema se ve reducida. El elemento auxiliar que mayor potencia demanda es el compresor de aire (incluido su motor de accionamiento), esto significa pérdidas de hasta el 10%, mientras que el resto de elementos demandan menos potencia en relación a este [62]. Se debe mencionar que el compresor de aire se incluye en sistemas con pilas de combustible con potencias mayores a 10 kW [62].

La Figura 2.38 muestra las curvas características de un sistema con pila de combustible. La región de óptimo funcionamiento del sistema está comprendida en el rango medio de corriente, es decir entre el 7 y 50%. De esto se deduce que una alta intensidad de corriente conduce a un bajo rendimiento debido a la caída de tensión en la pila de combustible, al igual que, una baja intensidad de corriente conduce también a un bajo rendimiento debido al aumento del porcentaje en el consumo de energía de los auxiliares.

Figura 2.38. Curvas características del sistema de pila de combustible [62].

2.9. Vehículos híbridos y eléctricos (Tipos de configuraciones)

Los vehículos eléctricos funcionan en diferentes grados de electrificación. Dependiendo de la configuración del sistema de propulsión, estos pueden ser: Híbridos eléctricos (serie y paralelo) y vehículos eléctricos de baterías. Con la excepción del híbrido paralelo, todos estos sistemas comparten un concepto central en que la energía para propulsar el vehículo se derive de un sistema de tracción eléctrica. La principal diferencia entre estas tecnologías es la fuente de alimentación que suministra la energía al motor eléctrico.

Las configuraciones híbridas utilizan un motor de combustión interna (MCI) y un motor eléctrico (ME), aunque también se puede sustituir el motor de combustión interna por una pila de combustible (PC). Existen varias disposiciones para proporcionar la potencia de propulsión a las ruedas. Los vehículos híbridos con MCI y ME están configurados en dos formas distintas: en serie y en paralelo. En la configuración en serie, el MCI se utiliza para generar electricidad que se transfiere al motor eléctrico o se almacena en un paquete de baterías a través de un generador como se muestra en la Figura 2.39a. En la configuración en paralelo (Figura 2.39b), tanto el motor de combustión como el eléctrico están conectados

para propulsar el vehículo. La potencia de tracción podría derivarse independientemente del MCI, del EM, o mediante una combinación de ambos.

Existen configuraciones derivadas de las dos anteriores como es el caso de la configuración serie-paralelo (Figura 2.39c). La característica de esta configuración es el empleo de dos acopladores de potencia: mecánico y eléctrico, siendo la combinación de una estructura en serie y otra en paralelo, con las características principales de ambos modos de operación. Como punto negativo es que tiende a ser un sistema complicado y costoso. Otra configuración es la serie-paralelo compleja (Figura 2.39d), que tiene una estructura similar a la serie-paralelo, la única diferencia es que la función de acoplamiento eléctrico se mueve del convertidor de energía a las baterías, y se agrega un convertidor de energía más entre el motor/generador y las baterías.

Figura 2.39. Tipos de configuraciones híbridas convencionales. (a) Serie (Acoplamiento eléctrico). (b) Paralelo (Acoplamiento Mecánico). (c) Serie-Paralelo (Acoplamiento mecánico y eléctrico). (d) Serie-Paralelo complejo (Acoplamiento mecánico y eléctrico).

Respecto a los vehículos híbridos con pila de combustible (FCHEV), la combinación de dos fuentes de energía es necesaria debido a la baja densidad de potencia de la pila de combustible, por lo que es recomendable que el vehículo posea una fuente que absorba los picos de potencia. La arquitectura de los FCHEV puede variar según los requisitos y las necesidades. Por ejemplo, en el sistema de pila de combustible–batería, la potencia del sistema de pila de combustible es mayor que el de la batería, en esta configuración el elemento principal para la propulsión es la pila de combustible mientras que la batería es un sistema auxiliar que absorbe los picos de potencia de corta duración, se puede suplantar las baterías con ultracondensadores para esta tarea e inclusive pueden estar los tres sistemas integrados. También está la configuración batería–pila de combustible, donde el sistema de pila de combustible tiene menor potencia que las baterías, en este caso la función principal de la pila de combustible es cargar las baterías, mientras que estas últimas son el elemento principal para la propulsión del vehículo. Como se puede observar en la Figura 2.40 la configuración en ambos casos es igual, esto se debe a que tienen únicamente acoplamiento eléctrico, a diferencia de los vehículos híbridos convencionales que también pueden tener acoplamientos mecánicos.

Figura 2.40. Configuración híbrida con pila de combustible [130].

Las demandas de un alto índice de hibridación han conducido al desarrollo de una tecnología híbrida enchufable. Un vehículo híbrido enchufable (PHEV) se define según SAE como un vehículo híbrido con disponibilidad de almacenar y usar energía eléctrica de la red almacenada en las baterías [62], esto se permite mediante un enchufe cargador. Este tipo de configuración está diseñado para utilizar total o parcialmente la energía del almacenamiento de las baterías, de esta manera requiere en menor proporción otros vectores energéticos como la gasolina, el diésel, gas natural e hidrógeno. Aunque PHEV pueden utilizar distintos tipos de configuraciones híbridas como se observa en la Figura 2.41 (serie, paralela, serie-paralelo), la configuración en serie es la recomendable, ya que proporciona una opción de manejo solo en modo eléctrico sin usar el sistema generador dentro de un rango de autonomía limitado [131].

Figura 2.41. Configuraciones para PHEV, serie, paralelo y serie-paralelo [62].

Existen configuraciones PHEV que utilizan también un sistema de pila de combustible en vez del MCI, este tipo de configuración podría ser conveniente para autobuses urbanos, de hecho existe un caso de un autobús urbano en Brasil [132], el cual opera en una ruta de 11 km de longitud. De las pruebas realizadas su consumo de energía

fue de 17,6 kWh durante 1250 s del recorrido de la ruta, con una relación de consumo de 1,6 kWh/km. La Figura 2.42 muestra la configuración esquemática de esta configuración.

Figura 2.42. Configuración PHEV con sistema de pila de combustible [130].

La última configuración corresponde al vehículo eléctrico de baterías (BEV), este tipo de vehículos utilizan un paquete de baterías como fuente de energía que se carga a través de la red eléctrica, con la posibilidad de que el sistema de carga puede estar a bordo o fuera de él. La ventaja de esta configuración es que el tren motriz tiene pocos elementos mecánicos que contribuye a un menor peso del vehículo, además tiene menores pérdidas de conversión de energía que en los sistemas mecánicos. Sin embargo, el principal requisito de este tipo de vehículos son los motores de tracción con un alto par para acelerar el vehículo, lo que reduce la eficiencia, ya que este tipo de motores necesitan un alto flujo de corriente en el devanado del inducido, lo que resulta en una pérdida de calor en el motor. Su limitante actual y a resolver es la autonomía para desplazarse en largos trayectos y el tiempo de carga de las baterías. La configuración básica de un vehículo eléctrico BEV se muestra en la Figura 2.43.

Figura 2.43. Configuración del vehículo eléctrico BEV [130].

2.10. Ciclos de conducción

Con el objetivo de cumplir ciertos requisitos de emisiones, desde ya hace algunos años los vehículos han sido evaluados con pruebas estandarizadas conocidas como ciclos de prueba o ciclos de conducción. Estos se definen como una secuencia de puntos de prueba, cada uno con una velocidad del vehículo definida, aunque también puede ser definida a una velocidad del régimen de giro del motor. Estos puntos de prueba se dividen en pasos de tiempo (generalmente segundos), durante los cuales la aceleración y la desaceleración se suponen constantes. A veces, aparte de la velocidad del vehículo también se proporciona el perfil de altura del trayecto frente al tiempo. Los ciclos de conducción suelen durar desde unos pocos minutos hasta valores de 30 minutos.

Estos ciclos son importantes ya que sirven como métodos de medición estandarizados para las emisiones de contaminantes y el consumo de combustible, de tal manera que incluyan en los vehículos procesos de certificación. En realidad, los estándares de emisión dependen en gran medida del ciclo y del procedimiento de prueba empleado. La estandarización permite también comparar diferentes vehículos o motores que cumplen la misma operación.

A nivel investigativo estos ciclos sirven para caracterizar condiciones de conducción con el fin de establecerlas como representativas. La calidad de un ciclo de conducción en comparación a la de conducción en el mundo real es de suma importancia para cualquier objetivo, ya sea de calidad del aire o reducción de emisiones. Los ciclos de conducción pueden ser de diferentes tipos y depende en sí de lo que deseen probar, si bien es para todo el vehículo o solo para su motor, por lo que existen los que se realizan con dinamómetro de chasis o con banco motor.

De lo que corresponde al ámbito de aplicación de este tema de tesis, dado que el principio de los ciclos de conducción no es medir consumo de energía. En el caso de vehículos de movilidad especial como el vehículo de golf no existen ciclos homologados, mientras que, para vehículos de transporte pesado, los ciclos de conducción estandarizados se rigen únicamente a pruebas de motor. En los apartados siguientes se explora lo concerniente a ciclos de conducción experimentales para las dos aplicaciones que hace referencia esta tesis doctoral.

2.10.1. Ciclos de conducción en vehículos de golf

Como se conoce, los vehículos de golf permiten desplazarse a los actores de una partida de golf (jugadores) en distancias cortas a través del campo donde se desenvuelve el juego. Existe una amplia gama de categorías, pero los más empleados son los de tipo gasolina y eléctricos, sin embargo, la popularidad de los segundos se ha implementado considerablemente, esto se debe a que los costos totales son más bajos, mayormente porque el precio de la electricidad es menor que el de la gasolina y por los bajos costes de mantenimiento que necesita. En vista de que muchos campos de golf reemplazan sus flotas de vehículos de golf cada tres a cinco años, la oportunidad de invertir en tecnología más eficiente ha mostrado un impacto importante en el ahorro de energía en un tiempo relativamente corto. Además, los vehículos de golf eléctricos son cero emisiones en el punto de uso.

A pesar de las ventajas que tiene el uso de vehículos eléctricos para estas aplicaciones, sus cualidades energéticas se hayan limitadas con relación a los de combustibles fósiles, principalmente la densidad de energía. Además, el consumo de energía depende de la operación del vehículo, el cual está relacionada con el comportamiento del conductor y es indispensable la previsión de un ciclo de conducción adecuado tanto para el dimensionamiento de los componentes del sistema de propulsión como de los elementos relacionados con la carga y almacenamiento de energía.

Debido a la carencia de un ciclo de conducción normalizado las cualidades energéticas no se hayan establecidas de una manera clara, lo que puede diferir con las que brinda el fabricante. De hecho, para poder descubrir estas cualidades una de las mayores empresas como lo es EZ-GO contrató al Departamento de Transporte Eléctrico de Southern California Edison (SCE por sus siglas en inglés) a través de la administración del campo de golf de la US Navy en Seal Beach, para comparar las características de rendimiento de dos de sus vehículos, el EZ-GO RXV (48 V CA) que incluye frenada regenerativa frente al EZ-GO TXT (36 V DC) sin frenada regenerativa [133].

Para este caso y con el fin de probar los vehículos de golf mencionados, SCE desarrolló un bucle de prueba diseñado para simular las demandas típicas de arranque y parada del vehículo durante un juego de golf. Para que la prueba fuera repetible, los ingenieros de SCE decidieron desde el principio que el circuito de prueba tendría que estar en una superficie pavimentada y plana, ya que hay mucha variabilidad de césped y terreno en los campos de golf reales. A partir del análisis de los campos de golf en el territorio de servicio de SCE y de los estudios internos previos de tiempo y movimiento, se diseñó el trayecto que se muestra en la Figura 2.44.

Figura 2.44. Disposición de bucle de prueba para el vehículo de golf [133].

Las dimensiones indicadas en la Figura 2.44 corresponden a la parte interior del bucle de prueba. Los conos se colocan para marcar los carriles en A, B, C, D, E (puntos rojos) y los giros (puntos verdes). La prueba comienza en el punto A, el conductor acelera el vehículo a la velocidad máxima y conducen los 91,4 m (100 yardas) que va del punto A al B, para luego detenerse por completo. El conductor procede de manera similar en los puntos B, C, D, E y de regreso al punto A. Durante la prueba se registra la descarga de la batería en amperios-hora (Ah) y kilovatios-hora (kWh). Los resultados finales de sus pruebas indicaron que el vehículo de golf que incluía frenada regenerativa (EZ-GO RXV) consumía un 28 % menos de energía que el vehículo que no tenía frenada regenerativa (GO TXT).

Respecto a estudios realizados con vehículos de golf con sistemas híbridos con pila de combustible, existen escasos estudios en la literatura científica, como el hecho por Saad Alam et al. [134], quienes realizaron una simulación de un vehículo de golf híbrido con pila de combustible validado con el ciclo UDDS (Urban Dynamometer Driving Cycle) como se puede ver en la Figura 2.45. Otro estudio fue el realizado por Liang et al. [135], quienes realizaron un análisis en base a un modelo de simulación a partir del software ADVISOR,

validando su modelo con un ciclo de conducción modificado al UDDS denominado por estos autores como ciclo UDDS golf (Figura 2.46).

Figura 2.45. Ciclo de conducción aplicado por Saad Alam et al. [134].

Figura 2.46. Ciclo de conducción aplicado por Liang J, et al. [135].

Otro estudio fue hecho por Tolj et al. [136], quienes integraron un sistema con pila de combustible de 1,2 kW en un vehículo eléctrico de golf con un motor eléctrico de 5 kW de potencia nominal. Las pruebas de manejo se realizaron en el campus de la Universidad de Western Cape (UWC), en una ruta plana. Las pruebas incluyeron conducir el vehículo de golf en el modo alimentado por batería y en el modo híbrido (batería + pila de combustible). En ambos casos, las baterías primero se cargaron completamente (SOC = 100%), y la ruta fue la misma. La Figura 2.47 muestra el perfil de velocidad adoptado durante la ruta y la distancia recorrida para ambos modos.

Figura 2.47. Prueba de conducción aplicado por Tolj et al. [136]. (a) En modo eléctrico; (b) En modo híbrido (PC + baterías).

Para este caso los autores tomaron un perfil aleatorio y el fin de este proyecto era demostrar la extensión de autonomía que permite tener un sistema híbrido con pila de combustible sobre un modo eléctrico puro.

Otro caso de estudio es el presentado por Hamid et al. [137], quienes modificaron un vehículo eléctrico a un sistema híbrido con pila de combustible. El circuito se lo hizo en la Universidad Kebangsaan de Malaysia. La velocidad máxima del vehículo de golf fue de aproximadamente 20 km/h durante la prueba con potencia pico de hasta 4 kW. La Figura 2.48 muestra el perfil de velocidad adoptado durante la ruta, donde se puede observar que el trayecto se realizó de manera constante.

Figura 2.48. Ciclo de conducción aplicado por Hamid et al. [137].

A pesar de que estas pruebas han sido experimentales, todas las investigaciones excepto la de Hamid et al, no tomaron en cuenta que la velocidad máxima para este tipo de vehículos no debe superar los 24 km/h, según la norma ANSI / ILTVA Z130.1-2012 [138]. Además ninguno de los estudios tuvo en cuenta que en un campo de golf este tipo de vehículos debe recorrer una ruta con múltiples paradas por la concepción del juego debido a las paradas entre hoyos, además, por la orografía del campo de golf (recomendadas de hasta 25 % en rutas pavimentadas y 8,5 % en superficies sin pavimentar [138]), el consumo de energía puede ser representativamente mayor al de una superficie plana.

2.10.2. Ciclos de conducción en autobuses urbanos

En Europa, la legislación para probar los estándares de emisión de los vehículos pesados siempre ha sido a partir de un ciclo en banco motor, por lo que ningún ciclo sobre banco de rodillos se ha sido legislado. Sin embargo, el ciclo de FIGE (la versión de chasis nunca se ha estandarizado) es importante, ya que se usó como base para el desarrollo del ciclo estacionario europeo (ESC) y las pruebas de dinamómetro de motor del Ciclo Transitorio Europeo (ETC), que han sido aplicables durante muchos años en la UE para estándares de emisiones Euro III a V. El ciclo FIGE fue desarrollado por el Instituto FIGE (Forschungsinstitut für Geräusche und Erschütterungen), Aachen, Alemania (ahora TÜV Nord Group) a principios de los años 90, y se basó en mediciones reales en carretera en un proyecto de colaboración de Alemania y Suiza para actualizar los factores de emisión.

La versión final del ciclo se puede observar en la Figura 2.49. Las diferentes condiciones de manejo están representadas por tres partes del ciclo que incluyen conducción urbana, rural y de autopistas. La duración de todo el ciclo es de 1800 s y la duración de cada parte es de 600 s. La distancia total recorrida es de 29,5 km, con una velocidad máxima de 91,1 km/h. La primera parte representa la conducción en ciudad con una velocidad máxima de 50 km/h, arranques frecuentes, paradas y ralentí. La segunda parte es la conducción rural que comienza con un segmento de aceleración pronunciada, la velocidad media es de unos 72 km/h. La tercera parte es la conducción por autopista con una velocidad media de aproximadamente 88 km/h.

Se observa claramente que se hace hincapié en la conducción rural y en carretera, representativa en camiones. Por otro lado, solo la primera fase tiene un comportamiento transitorio que se espera encontrar en un autobús urbano.

El Instituto FIGE desarrolló el ciclo en dos variantes: para chasis y para dinamómetro de motor. A los fines de la certificación del motor, el ciclo ETC se realiza en un dinamómetro de motor. El ciclo FIGE se usa muchas veces con fines de investigación.

Figura 2.49. Ciclo de conducción ECT (medidas reales del ciclo FIGE) usados en vehículos pesados [139].

Otro ciclo europeo frecuentemente empleado en proyectos de investigación es el ciclo de conducción Braúnschweig (Figura 2.50), que fue desarrollado por la Universidad de Braúnschweig a mediados de los años 70. Está basado en el ciclo de conducción de vehículos livianos U.S. FTP-75, pero agregando más paradas, esto con el propósito de aumentar los periodos de ralenti y minimizar las altas velocidades del vehículo. El ciclo dura 1740 s para una distancia recorrida de aproximadamente 11 km, con una velocidad máxima de 58,2 km/h y una velocidad promedio de 22,5 km/h. Demuestra una ruta de autobús urbano típica con muchas fases de inactividad (30 en total o 2,75 por km). Excluyendo el período de inactividad inicial y final, hay 16 paradas de autobús y 12 paradas debido a las condiciones del tráfico, esto se definió en base a nueve ciudades alemanas en ese momento. Al igual que el ciclo de conducción FIGE no es un ciclo homologado.

Figura 2.50. Ciclo de conducción Braúnschweig para autobuses urbanos [140].

Otro ciclo de conducción en la UE es el propuesto por la Agencia Francesa de Medio Ambiente y Gestión de la Energía (ADEME), quienes realizaron un programa integral en 1998 sobre autobuses urbanos. Durante el curso del programa, se desarrolló un ciclo de autobuses con la colaboración de RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) basado en datos en tiempo real de la línea urbana número 21 en París [141]. El ciclo se muestra en la Figura 2.51, se lo conoce como ADEME-RATP o ciclo de París y se ha empleado en varios estudios de investigación relacionados con las emisiones de autobuses o en vehículos pesados. El ciclo es altamente transitorio (el 68% del tiempo está acelerando o desacelerando, con menos del 1% de crucero), y dura casi 32 minutos, para una distancia recorrida de 5,68 km. La velocidad máxima es de 48 km/h y la velocidad promedio es de 10,8 km/h.

Figura 2.51. Ciclo de conducción ADEME-RATP París para autobuses urbanos [140].

El World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC) es una prueba de dinamómetro de chasis desarrollada en base al mismo conjunto de datos utilizados para el desarrollo del World Harmonized Transient Cycle (WHTC). Si bien la prueba del dinamómetro de chasis WHVC no es idéntica a la prueba del motor WHTC, los resultados de WHVC se han usado ocasionalmente para comparar los respectivos niveles de emisiones del vehículo y del motor con fines de investigación. La Figura 2.52 muestra el ciclo de conducción.

La duración de la prueba WHVC es de 1800 s. La prueba incluye tres segmentos, que representan la conducción urbana, rural y de autopistas. Los primeros 900 segundos representan la conducción urbana con una velocidad promedio de 21,3 km/h y una velocidad máxima de 66,2 km/h. Este segmento incluye arranques frecuentes, paradas y ralentí. Los siguientes 481 segundos representan la conducción rural con una velocidad promedio de 43,6 km/h y una velocidad máxima de 75,9 km/h. Los últimos 419 segundos se definen como la conducción en carretera con una velocidad promedio de 76,7 km/h y una velocidad máxima de 87,8 km/h.

Figura 2.52. Ciclo de conducción WHVC [142].

Existen casos particulares a nivel investigativo respecto a la utilización de ciclos de conducción en autobuses urbanos, como el de Oliveira et al. [139,143] que experimentaron con una línea de autobús representativa en Portugal (Figura 2.53), el objetivo era medir las reducciones catalíticas con sistemas (SCR) en las emisiones de NOx de vehículos ligeros y pesados; en este estudio tomo en cuenta el perfil de velocidad y de altura. Otro estudio fue planteado por Kivekäs et al. [144,145], quienes experimentaron con una línea de autobús en Finlandia (Figura 2.54), que incluye 25 paradas de autobús operada por autobuses eléctricos, el objetivo fue realizar un análisis de la sensibilidad de la carga de los pasajeros y como inciden en el consumo de energía durante la ruta para distintas tipologías de tren motriz en autobuses urbanos. Immonen et al. [146] experimento con un ciclo de conducción del autobús en una línea de autobús que se midió en Suecia (Figura 2.55), aquí se modificó un autobús diésel en híbrido y el objetivo era investigar como el sistema híbrido proporciona un menor consumo de combustible en diferentes condiciones de operación.

Figura 2.53. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Porto–Portugal [139,143].

Figura 2.54. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Espoo–Finlandia [144,145].

Figura 2.55. Perfil de velocidad en línea de autobús urbano en Lappeenranta–Suecia [146].

Realizando una análisis de todos los ciclos de conducción, se observa que las velocidades no sobrepasan los 70 km/h en la zona urbana, asimismo, los ciclos experimentales hechos en Portugal, Finlandia y Suecia también tuvieron en cuenta el perfil de altura donde se realizó la prueba. Además, la velocidad promedio en la mayoría de casos sobrepasa los 10 a 11 km/h que tiene la flota de autobuses de la EMT [147].

2.11. Análisis del ciclo de vida de los vehículos de carretera

Para estimar la intensidad de emisiones de CO₂ que generan los vehículos de carretera durante toda su vida útil, es pertinente realizar un análisis de ciclo de vida (ACV), este tipo de evaluación permite una comparación detallada entre varias tecnologías de vehículos, además identifica los aspectos más críticos en términos de emisiones y dónde se pueden tomar medidas para reducirlos.

El ACV consiste en la recopilación y evaluación de las entradas, salidas e impactos ambientales potenciales de un producto a través de todas sus etapas consecutivas e interrelacionadas, que abarca desde que se extraen las materias primas, se procesan, se fabrica el producto, se ensambla, se distribuye, se utiliza y finalmente se gestiona su residuo, proporcionando resultados numéricos que permiten cuantificar categorías de impacto medioambiental como el cambio climático, el agotamiento de la capa de ozono, la acidificación, el agotamiento de recursos energéticos fósiles, energía consumida, entre otros. Es un análisis completo con el fin de poder comparar diferentes escenarios de uno o varios productos en su camino de la “cuna a la tumba” en el contexto de cada categoría de impacto.

En los vehículos de automoción este análisis consta del ciclo del combustible (extracción, producción y distribución) y del ciclo del automóvil (fabricación, operación/mantenimiento y reciclado). Las etapas consisten en:

- (a) El análisis del pozo al tanque (WTT) evalúa la energía requerida y las emisiones de GEI causadas por los procesos de extracción, producción y distribución del combustible hasta su suministro en las estaciones de repostaje.
- (b) El análisis del tanque a la rueda (TTW) evalúa la energía requerida y emisiones de GEI del uso del vector energético (gas, gasolina, diésel, electricidad, hidrógeno) en el vehículo. La unión del análisis del pozo al tanque y del tanque a la rueda se le conoce como análisis del pozo a la rueda (WTW).
- (c) El Análisis de Ciclo de Vida del vehículo (ACV_{veh}) evalúa la energía requerida y emisiones de GEI generadas en cada uno de los procesos que intervienen en las etapas de producción de materiales (PM), ensamblaje (EV), mantenimiento (MV) y final de vida útil (FVU) del vehículo.

Finalmente, el análisis se ciclo global (ACVG) es la integración de las tres partes antes mencionadas ($ACVG = a + b + c$), una representación esquemática se puede observar en la Figura 2.56.

Figura 2.56. Esquema del ciclo de vida de un vehículo [148].

Varios estudios de ACV muestran que la fase más crítica en términos de emisiones de GEI suele ser la fase de operación, ya sea en un vehículo convencional o eléctrico

[149,150], la excepción es para los BEV cargados con electricidad con un mix eléctrico con bajas emisiones de GEI, donde la fase de producción es la más crítica (Nissan Leaf, Peugeot iOn y Smart ED en el mix eléctrico Frances [151]). Los vehículos con motores de combustión interna de gasolina y diésel tienen las mayores emisiones durante la fase de operación, seguidos por los PHEV y los BEV, mientras que las emisiones durante la fase de producción son similares a todas las tecnologías de los vehículos, excluyendo la producción de baterías.

Para estimar correctamente el impacto del vehículo en términos de emisiones de GEI durante la fase de uso, es necesario caracterizar las pérdidas de energía en un vehículo. Para los vehículos con motor de combustión interna, estas pérdidas se traducen directamente en el consumo de combustible, sin embargo, dado que los vehículos eléctricos requieren energía de la red para cargar las baterías, las pérdidas adicionales en el sistema de transmisión y distribución deben ser contabilizadas, generalmente alrededor del 9-10%.

2.11.1. Análisis de ciclo de vida de autobuses urbanos

Para este apartado se tiene en cuenta el estudio hecho por García et al., quienes estimaron el ciclo de vida global de diferentes tipos de tecnologías de autobuses urbanos de la flota la EMT, se ha tenido en cuenta una vida útil de los vehículos de 880 000 km (55 000 km en un lapso de 16 años [152]) que es un valor típico para este tipo de vehículos.

Los resultados respecto al consumo de energía por kilómetro recorrido para cada tecnología se detallan en la Figura 2.57. Se puede observar que los vehículos con pila de combustible son los que mayor energía consumirán durante su vida útil, los factores que provocan esto vienen a ser: la corta vida útil de la pila de combustible estimada en 3200 horas de operación, que con una velocidad promedio típica de autobuses urbanos (11,71 km/h), sería de 37472 km, pero aún más crítico viene a ser el factor de utilización del gas natural para producir hidrógeno a partir de reformado de vapor o mediante electrólisis

con el mix eléctrico. En cambio, se puede observar que el consumo de energía por kilómetro de las otras tres tecnologías es muy similar.

Figura 2.57. Energía requerida en el ACVG de los buses analizados según el estudio [148].

La Figura 2.58 muestra la intensidad de emisiones de CO₂ de las diferentes tecnologías de autobuses, los resultados proyectan que los vehículos que más emitirían GEI durante su vida útil son los híbridos con pila de combustible que utilizan hidrógeno como combustible a partir del reformado del gas natural o por electrólisis del agua, hay que acotar que con un mix eléctrico más favorable, la intensidad de emisión y consumo de energía de estos puede disminuir considerablemente. La tecnología con menor intensidad de emisión de CO₂ es la del vehículo eléctrico, se demarca que García et al., ha considerado datos de 2012, por lo que los resultados para el vehículo eléctrico pueden ser aún más favorables como lo hará notar el autor en el capítulo 7.

Figura 2.58. Emisiones de GEI generadas en el ACVG de los buses analizados según el estudio [148].

La Figura 2.59 y Figura 2.60 muestra el peso porcentual que tiene cada etapa del ciclo de vida en términos de consumo de energía fósil y emisiones de CO₂ respectivamente. Se puede observar que para los autobuses que utilizan combustibles fósiles, la fase más crítica en cuanto a emisiones de CO₂ viene a ser la del tanque a la rueda (TTW), esto se debe al consumo de combustibles convencionales durante la vida útil del vehículo, la cual es inexistente en los vehículos eléctricos y con pila de combustible (al no consumir energías fósiles en esta fase), para estos, la fase más crítica viene a ser la del tanque a la rueda (WTT), donde existe consumo de energías fósiles para generar energía eléctrica para la carga de los BEV, mientras que para los FCHEV, el hidrógeno generado por gas natural o electrólisis del agua a partir de la red eléctrica.

Figura 2.59. Contribución porcentual de cada etapa en el consumo de energía fósil en los buses analizados según el estudio [148].

Figura 2.60. Contribución porcentual de cada etapa al total de emisiones de GEI generadas en los buses analizados según el estudio [148].

Un tema controvertido relacionado con los vehículos eléctricos es el ciclo de vida de las baterías y cómo afecta la intensidad de las emisiones de CO₂. Esto conlleva a realizar un análisis más exhaustivo que conduzca a la comparación con el resto de las tecnologías, principalmente los vehículos diésel y gasolina. Existen estudios en los que se ha analizado el ciclo de vida completo de un vehículo eléctrico demostraron que la contaminación por baterías de litio es hasta el 14% de la intensidad total de emisión de CO₂ del vehículo [1,2].

El impacto ambiental de producir una batería de litio puede variar de 40 a 350 kgCO₂/kWh, con un promedio de 110 kgCO₂/kWh. La Figura 2.61 muestra el ciclo de vida de las baterías de litio, hay que tomar en cuenta que una vez culminada el ciclo de la batería en el automóvil (cuando su estado de conservación sea menor al 80% de su capacidad nominal), se prevé una segunda vida útil donde la exigencias transitorias sean mínimas, como por ejemplo aplicaciones estacionarias lo que llevaría a aumentar su vida útil.

Figura 2.61. Ciclo de vida de las baterías para vehículos eléctricos [148].

Diseño de los componentes del sistema de tracción de un vehículo eléctrico

3.1. Introducción

Este capítulo aborda lo concerniente al diseño del tren propulsor para los dos tipos de configuración de vehículo eléctrico que presenta este trabajo de investigación. El primero tiene que ver con un vehículo de golf, mientras que el segundo con un autobús urbano. Los criterios de prestaciones han sido tomados en cuenta, los cuales se derivan del tipo de aplicación donde se van a desenvolver cada vehículo.

El primer análisis de caso se enfoca en una solución energética puntual, debido a que los vehículos de golf eléctricos no suelen gozar de una buena autonomía. Estos vehículos pueden realizar como máximo entre 2 y 3 rutas para completar una partida del golf [133], por lo que, el vehículo se encuentra limitado en autonomía. La propuesta presentada es la utilización de un sistema auxiliar de energía, en particular la de un sistema con pila de combustible. Es por ello por lo que la metodología propuesta aquí puede ser aplicable para otro tipo de vehículos de movilidad especial.

El segundo caso tiene como prioridad el análisis de la transición tecnológica hacia una movilidad sostenible. Plantea una propuesta basada en escenarios sobre el remplazo de flotas de autobuses urbanos convencionales por autobuses urbanos eléctricos. El análisis en esta aplicación está más enfocada a la determinación de gases contaminantes y de efecto invernadero que se estarían reduciendo frente a la flota actual de la EMT en particular a las proyecciones evolutivas con los nuevos escenarios del mix eléctrico.

3.2. Configuración del tren propulsor

El sistema de propulsión consta de tres subsistemas. El primero es la tracción eléctrica que a su vez tiene componentes como los convertidores e inversores electrónicos de potencia, la unidad electrónica de control, el motor eléctrico, la transmisión y las ruedas. El segundo subsistema es el de almacenamiento de energía que consta de la fuente de energía, la unidad de gestión de la energía y la unidad de carga. El tercer subsistema es el de los auxiliares que constan de los elementos consumidores como dirección electrónica, calefacción, aire acondicionado, etc. La Figura 3.1 muestra la configuración típica de los vehículos eléctricos.

Figura 3.1. Configuración tradicional de un vehículo eléctrico [58].

La configuración adoptada en los dos tipos de vehículos analizados en la presente tesis se muestran en la Figura 3.2 (vehículo de golf) y Figura 3.3 (autobús urbano). Se puede observar que, según la aplicación, la disposición del tren propulsor del vehículo puede cambiar la configuración tradicional mostrada en la Figura 3.1. Dicho esto, la estructura del vehículo de golf está compuesto por; una botella que almacena 0,085 kg de hidrógeno en hidruros metálicos, por una la pila de combustible de 200 W y un paquete de

baterías de plomo-ácido con una capacidad de 105 Ah. A este tipo de configuración se le puede denominar vehículo eléctrico de autonomía extendida con pila de combustible (FCEREV por sus siglas en inglés). En el caso del autobús eléctrico urbano, este simplemente está propulsado por baterías, esta configuración se suele denominar vehículo eléctrico de baterías (BEV por sus siglas en inglés).

Figura 3.2. Configuración del sistema de tracción del vehículo de golf.

Figura 3.3. Configuración del sistema de tracción del bus eléctrico urbano.

3.3. Dinámica vehicular longitudinal

El diseño óptimo de un tren propulsor depende en gran medida de un correcto análisis de la dinámica vehicular longitudinal. Para calcular la fuerza de tracción necesaria para el movimiento del vehículo se debe analizar las fuerzas resistentes que debe vencer (Figura 3.4), estas son: la resistencia a la rodadura, la resistencia aerodinámica, la resistencia gravitatoria y la resistencia a la inercia. Aplicando la segunda ley de Newton y el teorema de Euler se tiene que:

$$ma_x\gamma_m = F_T - R_r - F_{xa} - R_g \quad (3.1)$$

$$R_a = R_r + F_{xa} + R_g \quad (3.2)$$

Donde m es la masa total del vehículo (incluye peso de pasajeros), a_x es la aceleración longitudinal, γ_m es el factor de mayoración de masa, F_T es el esfuerzo tractor, mientras que la fuerza resistente al avance R_a , viene a ser la suma de la resistencia a la rodadura R_r , la resistencia aerodinámica F_{xa} y la resistencia gravitatoria R_g .

Por lo que el esfuerzo tractor es igual a:

$$F_T = ma_x\gamma_m + R_r + F_{xa} + R_g \quad (3.3)$$

γ_m , representa un coeficiente de masa que toma en cuenta la inercia provocadas por las masas giratorias del vehículo (discos y tambores de freno, sistema de transmisión, etc.) que se estima mediante la siguiente expresión:

$$\gamma_m = 1 + \sum \frac{I_r}{mr^2} + \sum \frac{I_t \xi_j^2}{mr^2} \quad (3.4)$$

Donde I_r es el momento de inercia de las masas que giran con las ruedas respecto a sus ejes de giro, I_t es el momento de inercia de los componentes de la transmisión, r^2 es el producto del radio cinemático equivalente con el radio del neumático bajo carga

suponiendo como coincidentes a cada uno de ellos y ξ_j es la relación de transmisión respecto a las ruedas.

Alternativamente el esfuerzo tractor (F_T) también se puede calcular una vez dimensionado el tren de potencia a través de la siguiente expresión:

$$F_T = \frac{M_{ME} \xi_j \eta_j}{r_e} \quad (3.5)$$

Donde M_{ME} es el par del motor eléctrico, η_j es el rendimiento de la transmisión y r_e es el radio bajo carga (radio efectivo de las ruedas motrices).

Figura 3.4. Factores físicos para modelar y diseñar el sistema de propulsión.

(a) Vehículo de golf, (b) autobús urbano.

3.3.1. Resistencia a la rodadura

Es la resistencia que existe entre la banda de rodadura del neumático y la calzada, puede expresarse mediante la siguiente expresión:

$$R_r = f_r P \quad (3.6)$$

Donde f_r es el coeficiente de rodadura el cual está en función de varios tipos de factores como: del neumático (material, estructura, geometría de la banda de rodadura, materiales); de las condiciones operativas (temperatura, presión de inflado, velocidad, carga, esfuerzos longitudinales) y características de la superficie de rodadura (aspereza, material del camino, presencia o ausencia de líquidos en la carretera) [58,85]. El gran número de factores que influyen sobre la resistencia a la rodadura hace difícil obtener una expresión matemática que tenga en cuenta todos los factores anteriores, por lo que existen algunas relaciones empíricas en base a resultados experimentales que tienen en cuenta las más influyentes como la velocidad o la presión de inflado, por ejemplo, para neumáticos de turismo en pavimento de hormigón el coeficiente de resistencia a la rodadura puede estimarse como:

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2,5} \quad (3.7)$$

Donde f_0 es el valor del coeficiente de resistencia a la rodadura a velocidad próxima a cero, f_s factor de variación de f_r con la velocidad y V la velocidad en km/h. Sin embargo, existen valores típicos de f_r que se muestran en la Tabla 3.1 en función del tipo de neumático, según el vehículo empleado y el material de la calzada.

Tabla 3.1. Valores de coeficiente a la rodadura para distintos tipos de vehículos [85].

Tipo de Vehículo	Hormigón o asfalto	Dureza media	Arena
Turismos	0,015	0,08	0,30
Camiones	0,012	0,06	0,25
Tractores	0,020	0,04	0,20

3.3.2. Resistencia aerodinámica

Cuando un vehículo viaja a una velocidad determinada, el aire es una fuerza que resiste a su movimiento, esta fuerza se conoce como resistencia aerodinámica. Las acciones aerodinámicas que actúan sobre el vehículo pueden representarse por una resultante general de las fuerzas y un momento resultante aplicados ambos al centro de gravedad del vehículo. Estos dos vectores pueden representarse por sus componentes en las direcciones longitudinal, transversal y vertical. La resistencia aerodinámica al avance puede expresarse en función de la presión dinámica $\frac{1}{2} \rho V^2$, y de un coeficiente de proporcionalidad denominado coeficiente aerodinámico C_x , además también dependerá del cuadrado de la velocidad del vehículo V^2 , por lo que a velocidades más grandes se incrementa representativamente la resistencia aerodinámica ya que el vehículo tiene que atravesar más masa de aire por unidad de tiempo, y también depende del área frontal del vehículo A_f . La siguiente expresión estima la resistencia aerodinámica:

$$F_{xa} = \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 \quad (3.8)$$

El coeficiente aerodinámico de varios tipos de vehículos puede observarse en la tabla 3.2 [58,85].

Tabla 3.2. Coeficientes C_x para varios tipos de vehículos.

Turismo	Furgoneta	Autobús	Tractor- semirremolque	Camión-remolque
0,3 - 0,5	0,4 - 0,6	0,55 - 0,8	0,7 - 0,9	0,8 - 1

3.3.3. Resistencia gravitatoria

Es la resistencia debido a la circulación del vehículo por pendientes y se determina mediante la componente del peso en dirección paralela a la superficie de rodadura, por lo que:

$$R_g = P \sin \theta \quad (3.9)$$

Donde P es el peso del vehículo y θ es el ángulo de la pendiente a superar. Si la pendiente se sube, la fuerza es contraria causando resistencia al movimiento, en cambio si es descende, ayudará al movimiento siendo una fuerza propulsora.

3.3.4. Fuerza neta

La fuerza neta es la resultante de la diferencia de la fuerza de tracción provocada por el tren de potencia con las fuerzas resistentes (rodadura, aerodinámica y pendiente) está definida por:

$$F_{net} = ma_x \quad (3.10)$$

Donde m es la masa del vehículo y a_x es la aceleración lineal del vehículo en la dirección longitudinal, que es la variación de la velocidad con el tiempo $\left(\frac{dv}{dt}\right)$. Dependiendo de la aceleración deseada, el control de la fuerza neta se puede determinar, además dependiendo de esto la velocidad en el vehículo cambia.

3.4. Criterios de prestaciones de los vehículos

Las prestaciones de un vehículo se describen generalmente por su velocidad máxima de crucero, pendiente máxima y aceleración. La predicción del rendimiento del vehículo se basa en la relación entre el esfuerzo de tracción y la velocidad del vehículo. Para vehículos de carretera, se asume que el esfuerzo máximo de tracción está limitado por el par máximo y la potencia [58,85,153].

La velocidad máxima de un vehículo se define como la velocidad de crucero constante que el vehículo puede desarrollar a plena carga del motor y en una carretera plana. Se encuentra en el punto de intersección entre la curva de esfuerzo tractor máximo y las resistencias al movimiento, en caso de que estas no logren intersecarse se puede calcular mediante la expresión:

$$V_{max} = \frac{2\pi n_{ME,max}}{60 \xi_{j,min} \xi_d} r(1 - i) \quad (3.11)$$

Donde $n_{ME,max}$ es el régimen máximo del motor eléctrico $\xi_{j,min}$ es la relación de transmisión mínima de la caja de cambios, ξ_d es la relación de transmisión del diferencial y $r(1 - i)$ es el radio efectivo de la rueda.

La velocidad máxima está determinada por el equilibrio entre el esfuerzo de tracción del vehículo, la resistencia o la velocidad máxima de la planta vehicular y relaciones de engranajes de la transmisión, lo antes dicho puede ser expresado como:

$$\frac{M_{ME} \xi_j \eta_j}{r_e} = mg f_r + \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 \quad (3.12)$$

La ecuación (3.12) indica que el vehículo alcanza su velocidad máxima cuando el esfuerzo tractor representado por el término del lado izquierdo en la ecuación es igual a las fuerzas resistentes (rodadura y aerodinámica) representado por los términos del lado derecho. Como se observa en la Figura 3.5, la intersección de la curva de esfuerzo de tracción y la curva de fuerzas resistencia es la velocidad máxima del vehículo.

Figura 3.5. Velocidad máxima como la intersección entre el esfuerzo de tracción del vehículo eléctrico y sus resistencias al movimiento [58].

Respecto al criterio de aceleración este se describe por su tiempo de aceleración y distancia recorrida desde la velocidad cero hasta una velocidad determinada (0–20 km/h en el caso del vehículo de golf y 0–65 km/h en el autobús urbano) en terreno llano. Usando la ecuación (3.1), la aceleración del vehículo puede ser escrito como:

$$a_x = \frac{dV}{dt} = \frac{F_T - R_r - F_{xa}}{m\gamma_m} \quad (3.13)$$

Las Figura 3.6 muestra la aceleración junto con la velocidad para un vehículo con motor eléctrico con una transmisión de una sola marcha.

Figura 3.6. Velocidad de aceleración de un vehículo eléctrico accionado por un motor con una transmisión de una sola marcha [58].

Otro criterio importante viene a ser el de pendiente o rampa máxima, definido generalmente como el ángulo de inclinación que un vehículo puede superar a una cierta velocidad constante. Para vehículos pesados o vehículos todo terreno, la rampa máxima que un vehículo puede ascender es más importante inclusive que el criterio de máxima aceleración [85]. Como la circulación en rampas elevadas se produce a velocidades bajas, se puede ignorar la resistencia aerodinámica por lo que la ecuación (3.2) quedaría como:

$$R_a = R_r + R_g \quad (3.14)$$

A baja velocidad el límite del esfuerzo tractor disponible puede estar condicionado por la adherencia, en este caso la pendiente máxima que el vehículo puede superar a una velocidad dada se puede calcular por:

$$F_{T_{max}} = R_a = P f_r + P \sin \theta \quad (3.15)$$

De donde se obtiene:

$$\theta = \arcsin \frac{F_{T_{max}} - P f_r}{P} \quad (3.16)$$

Debe tenerse en cuenta que las prestaciones son particulares para cada tipo de vehículo y el entorno donde se va a desenvolver, para los dos casos de estudio se establecen las prestaciones en la Tabla 3.3.

Tabla 3.3. Prestaciones para los vehículos analizados.

Tipo de Vehículo	Velocidad Máxima [km/h]	Tiempo de aceleración [s]	Pendiente máxima [%]
Vehículo de Golf (FCEREV)	20	10	25
Bus Urbano (BEV)	65	28	18

Especificaciones basadas en ensayos realizados para este tipo de vehículos, además de bibliografía científica.

3.5. Diseño del tren de potencia

3.5.1. Potencia de tracción requerida para aceleración

Para valorar este criterio se toma en cuenta el comportamiento del vehículo en pista llana y se evalúa su conducta para pasar de una velocidad baja (normalmente 0 km/h) a una velocidad alta o máxima (dependiendo del vehículo: 20 km/h para el vehículo de golf y 65 km/h para el autobús urbano), se debe también contar con el tiempo y la distancia para lograrlo. Al ser vehículos eléctricos, la prueba se realiza a par máximo ya que en motores eléctricos el par es una función simple del régimen de giro, normalmente a velocidades

bajas el par es constante hasta que se alcanza una velocidad base y a partir de esta el par decae. El tiempo de aceleración se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$t_a = \int_0^{V_b} \frac{m\gamma_m}{\frac{P_{MEmax}\eta_j}{V_b} - mgf_r - \frac{1}{2}\rho_a C_x A_f V^2} dv + \int_{V_b}^{V_f} \frac{m\gamma_m}{\frac{P_{MEmax}\eta_t}{V} - mgf_r - \frac{1}{2}\rho_a C_x A_f V^2} dv \quad (3.17)$$

El primer término de la expresión corresponde al rango de régimen de giro en que la velocidad es menor a la velocidad base y el par es constante. El segundo término corresponde en cambio al rango de régimen de giro más allá de la velocidad base donde la potencia es constante y el par cae a medida que el régimen de giro aumenta. Sin embargo, se puede obtener una aproximación, esto es despreciando la resistencia a la rodadura y la aerodinámica. De esta manera la potencia de tracción quedaría determinada por la siguiente expresión:

$$t_a = \frac{m\gamma_m}{2P_t} (V_f^2 - V_b^2) \quad (3.18)$$

$$P_t = \frac{m\gamma_m}{2t_a} (V_f^2 - V_b^2) \quad (3.19)$$

La ecuación (3.19) solo tiene en cuenta la aceleración y no la potencia media de arrastre la cual se puede definir como:

$$\bar{P}_{-drag} = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} \left(mgf_r V + \frac{1}{2}\rho_a C_x A_f V^3 \right) dt \quad (3.20)$$

$$V = V_f \sqrt{\frac{t}{t_a}} \quad (3.21)$$

$$\bar{P}_{-drag} = \frac{1}{t_a} \int_0^{t_a} \left(mgf_r V + \frac{1}{2} \rho_a C_x A_f V^3 \right) dt \quad (3.22)$$

Sumando la potencia de arrastre a la potencia de tracción de la ecuación (3.19), la potencia de tracción en la aceleración quedaría expresada:

$$P_{t_{ace}} = \frac{\gamma_m m}{2t_a} (v_f^2 + v_b^2) + \frac{2}{3} mgf_r v_f + \frac{1}{5} \rho C_x A_f V_f^3 \quad (3.23)$$

Esta ecuación se aplica para un patrón de aceleración determinado, donde t_a es el tiempo de aceleración empleado y se define en función de lo que tarda el vehículo en alcanzar su velocidad máxima desde su velocidad inicial igual a 0 km/h, v_b es la velocidad base del vehículo, v_f es la velocidad final y suele representarse como el valor máximo de velocidad del vehículo.

3.5.2. Potencia de tracción requerida para velocidad máxima

La velocidad máxima ($v_{m\acute{a}x}$) de un vehículo se define como la velocidad de cruce constante que puede desarrollar a plena carga del motor y en una carretera plana, se encuentra en el punto de intersección entre la curva de esfuerzo tractor máximo y las resistencias al movimiento [19], en caso de que estas no logren intersecarse se puede calcular mediante la expresión (3.11). La potencia de tracción necesaria para alcanzar la velocidad máxima se puede obtener mediante la siguiente expresión:

$$P_{t_{vel}} = \left[(mgf_r) + \left(\frac{1}{2} \rho C_x A_f v_{m\acute{a}x}^2 \right) \right] v_{m\acute{a}x} \quad (3.24)$$

3.5.3. Potencia de tracción requerida para la pendiente máxima

En este criterio se analiza la potencia de tracción necesaria para que el vehículo pueda superar la pendiente máxima, por lo que el motor de tracción debe ser lo suficientemente potente como para superar el grado máximo requerido, se puede determinar mediante la siguiente expresión:

$$P_{t_{slp}} = \left(mg f_r \cos \theta + \frac{1}{2} \rho C_x A_f v_{m\acute{a}x}^2 + mg \sin \theta \right) V \quad (3.25)$$

Dado que el análisis se realiza en una pendiente elevada y a una velocidad baja se puede valorar despreciar el valor de la resistencia aerodinámica, por lo que la ecuación quedaría reducida a:

$$P_{t_{slp}} = (mg f_r \cos \theta + mg \sin \theta) V \quad (3.26)$$

Donde θ es el ángulo de la pendiente a superar y V es la velocidad con la que tiene que hacerlo.

3.5.4. Características de par del motor eléctrico

La transmisión del vehículo regula la transferencia de potencia (par y velocidad) del motor eléctrico a las ruedas, para esto se usa normalmente un sistema de engranajes como se muestra en la Figura 3.7. Para vehículos eléctricos puede ser necesario un solo cambio, sin embargo, esto depende de las características par-velocidad del vehículo. Si la región de potencia constante es grande puede ser suficiente un solo cambio para proporcionar alto par a bajas revoluciones, de lo contrario debe utilizarse una caja de cambios múltiples.

Figura 3.7. Conexión esquemática del sistema de transmisión que conecta el eje del motor eléctrico con las ruedas.

El tamaño del motor eléctrico en términos de potencia nominal está ligado a la potencia mecánica de salida y a la eficiencia, estos se deducen de los requisitos mínimos

de eficiencia nominal los cuales deben cumplir los niveles de eficiencia IE2 a partir del 16 de junio de 2011 según la comisión Europea [154]. El rendimiento para este tipo de motores ronda el 94%. La siguiente expresión determina la potencia eléctrica del motor:

$$P_{ME,el} = \frac{P_{ME,mec}}{\eta_{ME}} \quad (3.27)$$

$$P_{ME,mec} = \frac{P_t}{\eta_j} \quad (3.28)$$

Donde $P_{ME,el}$ es la potencia eléctrica del motor eléctrico, $P_{ME,mec}$ es la potencia mecánica del motor eléctrico, η_{ME} es el rendimiento del motor eléctrico, P_t es la potencia requerida para la tracción que puede ser $P_{t_{ace}}$, $P_{t_{vel}}$ o $P_{t_{slp}}$, dependiendo de los requerimientos del vehículo y η_j es el rendimiento de transmisión.

La característica de par máximo del motor se describe a través de las correlaciones entre el par de salida, la potencia de salida y la velocidad angular. El par de salida del motor se calcula utilizando la siguiente expresión:

$$M_{MEout} = \frac{P_{ME,mec}}{\omega_{ME}} \quad (3.29)$$

$$\omega_{ME} = \xi_j \omega_{re} = \xi_j \frac{V_{re}}{r_e} \quad (3.30)$$

$$r_e = r(1 - i) \quad (3.31)$$

Donde M_{EMout} es el par de salida, ω_{ME} es la velocidad angular del motor eléctrico, ω_{re} es la velocidad angular de las ruedas motrices, V_{re} es la velocidad lineal del vehículo, i es el deslizamiento longitudinal (0,1 – 0,3) y r es el radio nominal de las ruedas motrices.

3.6. Frenada regenerativa

Una característica importante de los vehículos eléctricos es la capacidad de recuperar la energía. Para que esto suceda la máquina eléctrica invierte su funcionamiento de motor propulsor a generador, convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica que puede ser almacenada en las baterías. A pesar de ello, este proceso está sujeto a restricciones y, por lo tanto, su modelado requiere una serie de suposiciones, como se describe a continuación.

En primer lugar, se supone que la curva característica de par-velocidad en el modo generador es simétrica a la del modo motor, lo que implica que el par toma valores negativos durante la frenada regenerativa, como se muestra en la Figura 3.8. Además, el funcionamiento de los sistemas de frenado mecánico y regenerativo son complementarios debido a la limitación del par máximo del motor eléctrico y al estado máximo de carga (SOC) de la batería. De esto se deduce que cuando el par de frenado es menor o igual que el par máximo del generador (puntos A y B, respectivamente, en la Figura 3.8), solo se aplica el freno del motor eléctrico por ende el de la frenada regenerativa. Sin embargo, si el par de frenado excede el límite de par (punto C de la Figura 3.8), el generador funciona al punto de par máximo (P_{regen}) y el resto de la potencia (P_{mec}) se desperdicia como calor debido al frenado mecánico.

Figura 3.8. Curva de par máximo para la frenada regenerativa.

Existen también otras limitantes respecto al frenado regenerativo ya que no produce fuerza de frenado a bajas velocidades del vehículo, esto se debe a las bajas condiciones de par disponibles, por lo que el sistema de frenado mecánico es el único responsable en estas zonas de velocidad para que el vehículo se detenga.

Para tener en cuenta este factor además de otros como el esfuerzo de frenado aplicado y del control del sistema de frenado se utiliza un factor de frenada regenerativa λ ($0 < \lambda < 1$), de esta manera se logra estimar el porcentaje de frenada que se puede recuperar por medio del motor eléctrico.

También debe tomarse en cuenta los umbrales de velocidad y aceleración del vehículo, para que el motor eléctrico pueda regenerar energía debe superarse la velocidad de 15 km/h para los autobuses [155], además se toma en cuenta eventos de frenado rápido (como durante el frenado de emergencia del vehículo) ya que no es posible la regeneración en periodos tan cortos con desaceleraciones tan bruscas, para este caso el umbral es de $-3,0 \text{ m/s}^2$. En todo caso la potencia de frenado regenerativa está sujeta a la limitación de par mostrada en la Figura 3.8 para todos los casos mencionados. Teniendo en cuenta todo

esto y cuando la potencia de tracción es negativa ($P_t < 0$) se obtienen la siguientes expresión:

$$P_{ME,el,ent} = P_{MEmec} \eta_{ME,gen} \lambda \quad (3.32)$$

Donde $P_{EM,el,ent}$ es la potencia eléctrica que entra la motor cuando hay frenada regenerativa, $\eta_{EM,gen}$ es el rendimiento del motor eléctrico en modo generador y λ es el factor de frenada regenerativa.

3.7. Sistemas auxiliares

Los sistemas auxiliares son componentes complementarios para el vehículo, no forman parte del sistema propulsor, sin embargo, son los encargados de brindar seguridad activa, pasiva y confort. En el vehículo de golf no existen sistemas auxiliares, excepto la integración de las luces de alumbrado exteriores. Para el autobús urbano en cambio puede haber una amplia gama de componentes que integran los sistemas auxiliares como: la iluminación interior y exterior, bomba de refrigeración, dirección eléctrica, aire acondicionado, frenos neumáticos, etc.

Estos sistemas tienen gran importancias en el diseño energético del vehículo, ya que su consumo de energía puede ser representativo. En la sección 3.11 se toma en cuenta esto para el dimensionamiento del sistema de almacenamiento de energía del vehículo.

3.8. Diseño del sistema de almacenamiento de energía

3.8.1. Potencia, energía y estado de carga de las baterías

La potencia necesaria en la batería debe ser mayor o igual que la potencia del motor eléctrico (P_{ME}) más la potencia de los sistemas auxiliares (P_{aux}). La siguiente expresión estima lo antes dicho:

$$P_{BAT} \geq P_{ME} + P_{aux} \quad (3.33)$$

La potencia de salida en los terminales de la batería durante la tracción del vehículo ($P_t > 0$) se calcula mediante la expresión:

$$P_{BAT,out} = \frac{V}{\eta_{ME} \eta_j} \left[mgf_r \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 + ma_x \gamma_m \right] + P_{aux} \quad (3.34)$$

El primer término representa la potencia necesaria para la tracción que es igual a la potencia de resistencia (rodadura, pendiente, aerodinámica e inercia), sobre las pérdidas de potencia en la transmisión y en el motor eléctrico, representados por sus rendimientos η_j y η_{ME} respectivamente, mientras que el segundo término se aplica exclusivamente para el modelo del autobús urbano y representa la potencia de consumo de los auxiliares, la cual se considera como constante en este modelo.

La energía recuperada durante el recorrido es procedente de la frenada regenerativa, por lo que la potencia de entrada en los terminales de la batería viene expresada por:

$$P_{BAT,in} = \lambda V \eta_{ME,gen} \eta_j \left[mgf_r \cos \theta + mg \sin \theta + \frac{1}{2} \rho C_x A_f V^2 + ma_x \gamma_m \right] - P_{aux} \quad (3.35)$$

Donde la pendiente, la aceleración o incluso ambos son negativos, λ ($0 < \lambda < 1$) es el factor de frenada regenerativa y es una función del esfuerzo de frenado aplicado, del diseño y del control del sistema de frenado de tal manera que permite estimar el porcentaje de frenada que se puede recuperar por medio del motor eléctrico en modo generador con su respectivo rendimiento $\eta_{EM,gen}$.

La expresión anterior se aplica cuando $P_t < 0$, el umbral de aceleración en el límite máximo es $a_x < -3,0 \text{ m/s}^2$ y $V > 15 \text{ km/h}$. En caso de no cumplirse estas condiciones no existirá frenada regenerativa en los autobuses, para el caso del vehículo de golf estos factores no se tomaron en cuenta.

La energía cedida por la batería en el ciclo de conducción viene determinada por la expresión:

$$E_{BAT,out} = \int_{t_0}^{t_1} P_{BAT,out} dt - \int_{t_0}^{t_1} P_{BAT,in} dt \quad (3.36)$$

El primer término representa la energía necesaria para la tracción (en el caso del autobús urbano incluye también la energía consumida por los sistemas auxiliares), mientras que el segundo representa la energía recuperada por efecto de la frenada regenerativa.

El estado de carga se refiere a la capacidad actual de una batería (expresado de manera porcentual donde 100 % significa estado lleno y 0 % estado vacío) y se define como la relación entre la capacidad disponible Q_{QH} y la capacidad nominal $Q_{QH,max}$.

$$SOC = \frac{Q_{QH}}{Q_{QH,max}} \quad (3.37)$$

En un intervalo de tiempo dt con una corriente de descarga constante i , el estado de carga puede expresarse mediante el método de integración actual como:

$$SOC = \frac{Q_{QH,max} - \int_{t_0}^t i dt}{Q_{QH,max}} \quad (3.38)$$

La estimación del estado de carga es un parámetro fundamental en los vehículos de este tipo. Los métodos comúnmente utilizados para estimar el SOC son: el método de conteo de Coulomb, las mediciones de voltaje en circuito abierto, los modelos basados en circuitos equivalentes dinámicos, la espectroscopia de impedancia electroquímica, el método de red neuronal artificial y los filtros de Kalman extendidos (EKF). El modelo tradicionalmente más manejado es el de estimar el estado de carga mediante el método de conteo de Coulomb, que es un método adecuado utilizado en vehículos eléctricos, que consiste en calcular el SOC midiendo la corriente de la batería e integrándola en el tiempo. Es un método simple, pero tiene que comenzar desde un valor de carga correcto [156].

Si se considera en el modelo de la ecuación (3.38) los parámetros expresados en Wh, la tensión $V(t)$ está relacionada con la corriente $i(t)$, el estado de carga se puede expresar como [155,157]:

Para el modelo eléctrico:

$$SOC = \left(1 - \int_{t_0}^t (P_{BAT,out} - P_{BAT,in}) dt / E_{BES} \right) \times 100\% \quad (3.39)$$

Para el modelo con pila de combustible

$$SOC = \left(1 - \int_{t_0}^t (P_{BAT,out} - P_{BAT,in} - P_{PC}) dt / E_{BES} \right) \times 100\% \quad (3.40)$$

Donde SOC es el estado de carga de la batería, $P_{BAT,out}$ es la potencia descargada por la batería debido a la tracción y los accesorios, $P_{BAT,in}$ es la potencia de carga hacia la batería a partir de la frenada regenerativa, P_{PC} es la potencia de la pila de combustible y E_{BES} es la capacidad de almacenamiento de energía de la batería.

3.8.2. Sistema de pila de combustible

La potencia del sistema de pila de combustible se diseña en función de la configuración que se requiera adoptar en el tren de potencia. Un vehículo híbrido con el sistema de pila de combustible como la principal fuente de energía y potencia (Configuración pila–batería) requiere un diseño complejo ya que el sistema debe cubrir gran parte de los requerimientos de la tracción del vehículo, mientras que la batería es un sistema auxiliar que absorbe los picos de potencia más altos (Figura 3.9a). Sin embargo, en las configuraciones batería–pila el diseño del sistema de pila de combustible puede resultar más sencillo ya que las baterías cubren los requerimientos de la tracción del vehículo, mientras que la potencia media de la pila de combustible se encuentra alejada de los picos transitorios de potencia, por lo que, su función es primordialmente cargar la batería (Figura 3.9b).

Figura 3.9. Gráfico potencia – tiempo. (a) Configuración pila–batería; (b) Configuración batería–pila [62].

En una configuración batería–pila, se puede optar por un amplio rango de potencia nominal del sistema de pila de combustible (siempre menor al de la batería), ya que lo que interesa aquí, es la cantidad de energía que brinde durante el ciclo de conducción, que la potencia en sí. Para el presente caso de análisis, la potencia nominal del sistema de pila de combustible es de 200 W, trabajando la pila de combustible a una potencia media de 128 W. Además, la configuración escogida se considera una buena elección para este aplicación ya que existe largos periodos de tiempo donde el vehículo de golf permanece en espera y la pila de combustible puede recargar la batería.

3.9. Convertidores DC–DC

Este componente sirve para transformar con alto rendimiento las tensiones de corriente continua en otra fuente de tensión continua. Los convertidores DC–DC se utilizan en el vehículo como acopladores entre los diferentes componentes eléctricos, a fin de compartir un bus de corriente común donde la tensión sea la misma, lo que permite un flujo de energía entre ellos. Existen dos configuraciones básicas: Reductor de tensión (Buck Converter) y Elevador de tensión (Boost Converter).

En este trabajo de investigación, en el vehículo de golf el convertidor DC–DC es un elevador de tensión (Boost Converter) ya que a la entrada del inversor ingresan 24 V de la pila de combustible y la salida es de 48 V, los cuales acoplan con las cuatro baterías en serie conectadas de 12 V cada una. El rendimiento de este componente es del 90 %.

En el autobús urbano este componente es igualmente un elevador de tensión (Boost Converter), a pesar de que la tensión de la batería está en un rango similar, sus transitorios obligan a colocar este elemento que se enfoca a la protección del circuito, la entrada de la tensión nominal del paquete de baterías es 540 V y sale 720 V a los distintos sistemas auxiliares.

3.10. Inversores DC–AC

Debido a que en los vehículos eléctricos se opta por motores eléctricos de tensión alterna, principalmente por sus menores costes, alta densidad de potencia y alto rendimiento (entre el 92% y el 98% [158,159]), se necesita un componente que acople la tensión continua de la batería con la que necesita el motor eléctrico, este elemento es el inversor DC–AC.

El inversor toma la tensión continua de la batería y la transforma en tensión alterna para que de este modo el motor de tracción produzca energía mecánica utilizada para mover las ruedas del vehículo. Además, este componente debe ser de flujo de energía bidireccional ya que el motor eléctrico de tracción transforma parte de la energía cinética de frenado en energía eléctrica por acción de la frenada regenerativa.

En el modelo físico del vehículo de golf esta función la realiza un controlador electrónico, el cual a su entrada admite voltajes de 36 – 60 V con un rendimiento del 98%, mientras que en el modelo de simulación lo lleva incluido el bloque del motor eléctrico, mientras que, en el autobús urbano al ser un modelo exclusivamente simulado el inversor DC–AC lo lleva incluido en el bloque del motor eléctrico, con un rendimiento del 96%.

3.11. Rendimiento del tren de potencia

El cálculo del rendimiento total para un tren de potencia con sistema puramente eléctrico es igual a:

$$\eta_T = \eta_{BAT,dis} \eta_{ME} \eta_{DC-AC} \eta_j \quad (3.41)$$

Donde η_T es el rendimiento total, $\eta_{BAT,dis}$ es el rendimiento de la batería en descarga, η_{ME} es el rendimiento del motor eléctrico, η_{DC-AC} es el rendimiento del inversor de continua a alterna y η_j es el rendimiento de la transmisión.

Mientras que para un sistema híbrido con pila de combustible sea con configuración batería–pila o pila–batería es el mismo, ya que en ambos casos se trata de un acoplamiento estrictamente eléctrico, a diferencia de los vehículos híbridos convencionales que también pueden tener acoplamientos mecánicos. La siguiente expresión define el rendimiento para esta configuración:

$$\eta_T = \eta_{FC} \eta_{DC-DC} \eta_{BAT,dis} \eta_{ME} \eta_{DC-AC} \eta_j \quad (3.42)$$

Donde η_{FC} es el rendimiento de la pila de combustible, mientras que η_{DC-DC} es el rendimiento del convertidor de continua.

3.12. Criterios de diseño del vehículo de golf

3.12.1. Metodología para obtener el ciclo de conducción

Para que los resultados sean fiables y diferenciándose de las investigaciones hechas en el apartado 2.10.1, se han experimentado ensayos en un campo de golf (Real Club de la Puerta de Hierro) con un vehículo de golf eléctrico, esto con el fin de tener en cuenta todos los factores reales como: la orografía del lugar, el camino trazado, la superficie de desplazamiento, etc. El objetivo fue obtener los consumos de energía y potencia, así como el perfil de velocidad y de altura.

El ciclo de conducción experimental en el campo de golf se ha obtenido a partir de un sistema de adquisición de datos (Figura 3.10), empleando los equipos de instrumentación adecuados (pinza amperimétrica, GPS, acelerómetro, tarjeta para medir tensión, etc.) se han medido variables físicas como la pendiente e inclinación de las rutas, los valores de velocidad y distancia recorrida en los tramos, asimismo, se han medido valores de tensión y corriente del consumo de la batería. Como resultado de estos ensayos se han obtenido perfiles de velocidad y de altura, además de la potencia de tracción y energía requerida en las rutas.

Figura 3.10. Esquema del sistema de adquisición de datos instalado en el vehículo de golf.

Se han determinado dos tramos, el primero, del hoyo 1 al 9 y el segundo del hoyo 9 al 18 (Figura 3.11 y Figura 3.12 respectivamente). El vehículo con el que se realizaron las pruebas preliminares posee las mismas características físicas que el propuesto, por lo que los datos obtenidos son válidos para el estudio. La distancia recorrida total en los dos tramos es cercana a los 8 km, 4,2 km para la ruta 1 y 3,78 km para la ruta 2, además, se puede observar en la Figura 3.13 que la elevación en la ruta 1 se encuentra entre 669 y 611 metros, lo que vienen a ser valores de pendiente entre 8,3 % como máxima y -10 % como mínima,

para la ruta 2 la elevación esta entre 668 y 632 metros, que comprenden valores de inclinación entre 9,62 % como máxima y -11,1 % como mínima.

(a)

(b)

Figura 3.11. (a) Ruta de prueba; (b) Perfil de velocidad de la ruta 1.

(a)

(b)

Figura 3.12. (a) Ruta de prueba; (b) Perfil de velocidad de la ruta 2.

Figura 3.13. Perfil de altura para los ciclos de conducción de las rutas 1 y 2.

3.12.2. Prestaciones para el vehículo de golf

Para definir las prestaciones del vehículo de golf se ha tomado como punto de partida las características típicas de esta clase de vehículos. El dimensionado del motor eléctrico y baterías se establecen en función de los requerimientos energéticos del vehículo y en función del ciclo de conducción experimental obtenido, considerado como el que se asemeja al recorrido propio de un campo de golf. Además, se ha preestablecido una pila de combustible de 200 W conectada directamente a las baterías por medio de un convertidor DC–DC para su carga durante todo el trayecto del recorrido. Una vez desarrollado el modelo matemático se ha procedido a ejecutar las simulaciones respectivas a través del programa AVL Cruise, comparándolo luego con el modelo final del vehículo

Para los cálculos de consumo de energía se ha considerado la masa del vehículo de golf en vacío añadiendo también la masa de los distintos componentes, el paquete de batería está estimado en 106,4 kg, la masa de los ocupantes se ha estimado en base a dos adultos que se encuentran sentados con altura de pie de 175 cm y masa de 77 kg cada uno [138], la masa del set de golf es de 30 kg cada uno. Los valores de C_x y f_r se estiman en 0,45 y 0,02 respectivamente [160]. La Tabla 3.4 muestra todos los parámetros considerados.

Tabla 3.4. Especificaciones del vehículo de golf

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Masa del vehículo [m_v]	342 kg	Coefficiente de Resistencia a la rodadura [f_r]	0,02
Conjunto de baterías [m_{BAT}]	106,4 kg	Factor de mayoración de la masa [γ_m]	1,042
Masa de pasajeros [m_{PAS}]	154 kg	Pendiente máxima [θ]	25 %
Masa del Apilamiento + BOP [m_{BOP}]	3 kg	Velocidad máxima [V_{max}]	5,5 m/s
Masa del tanque de hidrógeno [m_{H-T}]	6,5 kg	Velocidad base [V_b]	1,68m/s
Masa del equipamiento de golf	60 kg	Radio nominal de los neumáticos [r]	0,223m
Área frontal [A_f]	1,72 m ²	Tiempo de aceleración de 0 a 20 km/h [t_a]	10 s
Coefficiente aerodinámico [C_x]	0,45	Rendimiento de la transmisión [η_j]	95 %
Densidad del aire [ρ]	1,225 kg/m ³	Rendimiento del motor eléctrico [η_{ME}]	90 %
Aceleración gravitacional [g]	9,81 m/s ²	Rendimiento del convertidor DC-DC [η_{DC-DC}]	90 %

Mediante las expresiones (3.23), (3.24), (3.25), (3.27), (3.29) se calculan las potencias de tracción necesarias para velocidad máxima: 0,82 kW, para aceleración: 1,62 kW y para pendiente máxima: 2,42 kW. Aplicando los tres criterios se determina que el motor eléctrico debe tener como mínimo la potencia obtenida para pendiente máxima. También se determina que el par en ruedas necesario es de 445,25 Nm y el par máximo del motor es de 36,34 Nm. Las características del motor elegido se describen en la Tabla 3.5:

Tabla 3.5. Especificaciones motor eléctrico HPEVS AC-20.

Especificación	Valor
Motor eléctrico	37 VAC, 3 kW @ 3000RPM
Potencia Máxima	7,82 kW @ 1248RPM
Par	10,4 Nm @ 3000RPM (Par Nominal) 40,71 Nm @ 1248 RPM (Par Máximo)
Tren motriz	12.25:1 Eje de accionamiento directo, engranaje helicoidal de doble reducción
Baterías	Cuatro conectadas en serie de 12 V y 105 Ah

3.12.3. Diseño del sistema de almacenamiento de energía

3.12.3.1. Diseño del paquete de baterías

Para el dimensionamiento de las baterías, se ha recurrido a medir de manera experimental la potencia instantánea de la batería de tracción a través de cada uno de los tramos del circuito de recorrido. También se ha calculado el consumo energético acumulado en cada tramo, con el fin de poder estimar las características del sistema de almacenamiento de energía (Figura 3.14), un primer diseño se puede estimar mediante las siguientes expresiones:

$$E_{BES} = \frac{\Delta E_{max}}{SOC_t - SOC_b} \quad (3.43)$$

$$C_{BAT} = \frac{E_{BES}}{V_{DC}} \eta_{BAT} \quad (3.44)$$

Donde E_{BES} es la capacidad de almacenamiento de energía del vehículo, ΔE_{max} es la energía consumida durante el ciclo, teniendo en cuenta que las baterías de plomo-ácido no debe descargarse más de 10,5 V (para una batería de 12 V) a una temperatura de 25 °C [161]. Según la curva de estado de carga se ha considerado un SOC_b de 30 % y un SOC_t igual a 90 %, valores representativos que garantizan un número elevado de ciclos de carga y descarga para este tipo de baterías, η_{BAT} es el rendimiento de la batería igual a 80%. La energía de almacenamiento calculada para las baterías es de 1384 Wh con una capacidad de 28,82 Ah para todo el recorrido. Para garantizar al menos tres recorridos completos, los valores deberían ser de 4152 Wh de energía de almacenamiento y una capacidad de 86,46 Ah. Los cálculos obtenidos mediante estas ecuaciones se consideran referenciales ya que se debe tener en cuenta factores relevantes como las altas transiciones de potencia requeridas, las cuales pueden afectar a la vida útil de las baterías, además del efecto Peuker (relación entre el estado de carga de una batería y su ratio de descarga). Una aproximación más conservadora consiste en evaluar la recurrencia con la que se requiere cada valor de potencia instantánea y agruparlas estadísticamente como se denota en la

Figura 3.15. Analizando los picos de potencia de la Figura 3.14a y Figura 3.14b se observan valores de hasta 10 kW, sin embargo, la frecuencia de los valores de potencia instantánea de tracción no excede de 5000 W aproximadamente en el 95 % en las dos rutas, teniendo en cuenta que el voltaje es de 48 V, la corriente sería de 104 A, que a una tasa de descarga de 1C representa 104 Ah. Por lo que, un diseño más robusto, energéticamente hablando, es considerar 4 baterías de 12 V conectadas en serie con una capacidad de 105 Ah. Se han evaluado y caracterizado en simulink cinco tipos de baterías: dos con capacidad de 155 Ah, una de 115 Ah y dos de 105 Ah, las baterías escogidas por sus prestaciones son las US 27DCXC2 y su especificación se muestra en la Tabla 3.5. Se considera una buena elección selección para esta aplicación y tipología, ya que si se sobreestima el paquete de baterías con mayor capacidad habrá el inconveniente de aumentar el peso del vehículo y el uso de un paquete de baterías más pequeñas no cubriría todo el rango de picos transitorios de potencia.

(a)

(b)

Figura 3.14. Resultados medidos en la ruta de prueba.

Potencia de tracción (azul), Potencia promedio (verde) y energía consumida (naranja). (a) Ruta 1; (b) Ruta 2.

Figura 3.15. Frecuencia de potencias instantáneas.

Para la ruta 1 (rojo) y para la ruta 2 (azul).

3.12.3.2. Propuesta de gestión energética con pila de combustible.

Una vez dimensionados los componentes del tren de potencia y su fuente principal de energía, se ha incorporado un sistema con una pila de combustible de 200 W, la misión de este componente es cargar el paquete de baterías durante todo el trayecto. Su pequeño tamaño es suficiente para los requerimientos energéticos de este análisis, al ser un sistema auxiliar de energía. La nueva configuración adoptada es la de un vehículo eléctrico de

autonomía extendida o vehículo híbrido en serie. El fin de esta configuración es permitir realizar varios recorridos en el día, alargando la necesidad de recurrir a la recarga de las baterías a través de la red eléctrica.

El sistema de pila de combustible utilizado es el PEM Horizon FCS-C200, cuyas características se muestran en la Tabla 3.6. Este sistema carece de compresor de aire al tener una potencia de pila de combustible pequeña, por lo que trabaja con presión cercana a la atmosférica (entre 0,45 y 0,55 bar). Además, el sistema se humidifica solo y se enfría con aire mediante dos ventiladores colocados al costado, que también se utilizan para suministrar aire a las celdas apiladas.

Tabla 3.6. Pila de Combustible FCS-C200. Especificaciones [162,163]

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Número de celdas	40	Máxima temperatura	65 (°C)
Área activa	19 (cm ²)	Presión del H ₂	0,45–0,55 (bar)
Densidad de corriente	0,437 (A·cm ⁻²)	Pureza necesaria del H ₂	≥99,995 H ₂
Potencia nominal	200 (W)	Eficiencia	40% @ 24 V
Voltaje en el punto de máxima potencia	24 (V)	Caudal de salida máxima	2,6 (L/min)
Corriente en el punto de máxima potencia	8,3 (A)	Masa de la pila de combustible (con ventilador, caja y controlador)	2,63 (kg)
Voltaje de circuito abierto (V _{oc})	38 (V)	Tamaño	11,8 × 18,3 × 9,4 (cm)

Las curvas de polarización y de potencia de la pila de combustible se pueden observar en la Figura 3.16, donde la tensión en circuito abierto es de 0,95 V (menor al valor teórico por celda de 1,23 V), también se aprecia que a tensiones altas el suministro de corriente es bajo, por lo que el comportamiento de la pila en este punto no es el ideal, en esta región existen principalmente pérdidas potenciales en la capa catalítica del cátodo (CCL) llamadas de activación de reacción de reducción del oxígeno (ORR), pasada esta zona la curva se estabiliza y su decaimiento de la tensión es próximo a ser lineal, las pérdidas que predominan aquí son las resistivas u óhmicas. Finalmente a tensiones bajas

(menores a 0,6 V por celda), la corriente cae pronunciadamente por lo que la potencia también, en esta zona la pérdidas que predominan son por transporte de masa de la capa catalítica del cátodo y de la capa difusora de gas (GDL) [164].

Figura 3.16. Curvas características de polarización y potencia de la pila de combustible FCS-C200 dadas por el fabricante [153,162].

Se debe mencionar que la curva característica de la Figura 3.16, es la proporcionada por el fabricante, sin embargo, estas características pueden diferir de las reales, algo que demostró Khanungkhid y Piumsomboon [163], quienes caracterizaron este sistema de pila de combustible en particular a través de equipos de laboratorio. Las pruebas consistieron en hacer funcionar el sistema a presión constante (0,45 bar), para luego variar el rango de tensión entre 42,07 V como límite alto y 24,5 V como límite bajo. Se realizaron varios ensayos para obtener distintas curvas de polarización, de esta manera se obtuvieron valores promedios de la curva característica que se observa en la Figura 3.17. Como resultado los autores midieron valores de corriente máxima de 6,42 A a una tensión de 28 V, con una potencia máxima de 172 W.

Figura 3.17. Curvas de polarización y potencia de la pila de combustible FCS-C200 obtenidas por Khanungkhid y Piumsomboon [163].

3.12.3.3. Estrategia de control – Máximo estado de carga de la batería

La pila de combustible al ser de pequeño tamaño estará activa todo el tiempo, en los momentos de recorrido enviará su energía al motor eléctrico, mientras que en las paradas cargará las baterías, al final de la jornada se deben conseguir dos objetivos, el primero es realizar más recorridos que un vehículo eléctrico puro BEV y el segundo terminar la jornada con un estado de carga en las baterías mayor al 30% para garantizar un número elevado de ciclos de carga y descarga.

Los objetivos deseados en esta estrategia de control son: el de satisfacer la potencia demandada por el conductor, el rendimiento óptimo de los componentes del sistema híbrido y, sobre todo, mantener el estado de carga de la batería lo más alto posible. La Figura 3.18 muestra la estrategia de control adoptada en el modelo, esta garantiza el comportamiento del vehículo con los requisitos planteados. Las baterías son la principal fuente de energía y las que cubren los picos de potencia, mientras que el sistema de pila de combustible es un conjunto auxiliar cuyo principal objetivo es la recarga de la batería (configuración batería–pila). Esta estrategia es adecuada para aplicaciones en las que el comportamiento

(velocidad, aceleraciones, pendientes, etc.) es la primera preocupación, como es el caso de este vehículo donde existen frecuentes paradas y arranques.

Figura 3.18. Diagrama de bloques de la estrategia de control — Máximo estado de carga de la batería.

Donde: P_t es la potencia de tracción, P_f es la potencia de frenado, P_{MEmax} es la potencia máxima del motor eléctrico, SOC es el estado de carga de las baterías, SOC_{max} es el estado de carga máximo de las baterías y V es la velocidad del vehículo.

3.13. Criterios de prestaciones para buses urbanos

3.13.1. Metodología para obtener el ciclo de conducción de prueba

Se han utilizado datos experimentales obtenidos de condiciones reales de conducción. Las mediciones se registraron cuando el autobús estaba en servicio, por lo que los ciclos de movimiento y períodos de parada se pueden distinguir, a estos se les denominan microciclos cinemáticos. Los ciclos de movimiento se caracterizan por variables como el tiempo total, los tiempos de velocidad constante y los tiempos de aceleración y desaceleración. Los ciclos de conducción experimentales se obtuvieron a partir de equipos de instrumentación, los datos empleados corresponden exclusivamente a los de posicionamiento y velocidad, donde se usó un sistema GPS para la medición de la posición

exacta y velocidad en cada instante (Figura 3.19), que incluye además un ordenador portátil con un software específico de control del sistema, de toma y visualización de los datos y de generación de informes de resultados de los ensayos.

Figura 3.19. Esquema de la instalación del equipo de medida a bordo del autobús.

Las rutas fueron seleccionadas de tres grupos significativos de las líneas de autobús de la EMT en la ciudad de Madrid, que corresponden a las líneas 27, 63 y C1 (Figura 3.20). Estas rutas son las más representativas porque cubren el 53% de las rutas de autobús en el área urbana que circula en Madrid. Esta validado dentro del proyecto ECOTRAM donde se tomaron medidas de 30 líneas utilizando equipos a bordo [34–38]. Estas condiciones permitieron acercarse a la realidad ya que incluye todas las fuentes de variabilidad como: las condiciones ambientales y de tráfico, el comportamiento del conductor, la operación transitoria y las condiciones de operación variables de los vehículos.

Para esta investigación se ha elegido los datos obtenidos de la línea circular C1 (Figura 3.21). Los perfiles de velocidad y altura se pueden observar en la Figura 3.22 y Figura 3.23 para la ruta 1 y 2 respectivamente. Este ciclo de conducción es variable y representa mejor las diferentes condiciones operativas dentro del entorno urbano de la ciudad. El trazado se ha dividido en un itinerario de ida (ruta 1) y un itinerario de vuelta (ruta 2). La Tabla 3.7 proporciona un resumen de los datos obtenidos de los ensayos.

Figura 3.20. Líneas urbanas: Circular C1 (amarillo), Línea 27 (azul), Línea 63 (verde).

Figura 3.21. Ruta de prueba estándar en carretera. Línea de autobús circular C1 (la sección púrpura indica la ruta 1; la sección blanca indica la ruta 2).

Figura 3.22. Perfiles de velocidad y altura reales para un resultado típico en la ruta 1.

Figura 3.23. Perfiles de velocidad y altura reales para un resultado típico en la ruta 2.

Tabla 3.7. Especificaciones del ciclo de conducción medido.

Rutas	Velocidad Máxima [km/h]	Velocidad Promedio [km/h]	Distancia [km]	Tiempo [s]	Número de paradas [-]
Ruta 1	51,94	10,36	8,12	2833 + 240	30
Ruta 2	44,82	11,66	9,40	2903 + 240	26

En aplicaciones de vehículos pesados de transporte de personas en entornos urbanos normalmente se suele cumplir las siguientes condiciones generales y particulares para este caso de estudio:

- Los ciclos de conducción repiten normalmente el mismo patrón: ciclos de entre 1 y 3 minutos como máximo, con velocidades por debajo de los 60 km/h (Figura 3.24)
- Se realizan numerosas paradas, lo que reduce la potencia media consumida en tracción, a cambio de esto aumenta el número de aceleraciones y desaceleraciones.
- Necesidades de autonomía elevadas, puesto que la duración del servicio suele situarse en torno a 16–18 horas.
- Un consumo energético elevado de sistemas auxiliares, por lo que a la hora de dimensionar el sistema de almacenamiento de energía se debe prestar atención a esta variable.

Figura 3.24. Microciclo típico en una ruta urbana. Line 27 EMT–Madrid.

Las prestaciones se han limitado a los requerimientos de velocidad en zonas urbanas, donde raramente se alcanzan velocidades altas, por lo que la velocidad máxima para los cálculos se estimó en 65 km/h, de tal modo que pueda cubrir todo el rango de velocidades durante los trayectos de las rutas evaluadas. La Tabla 3.8 muestra las especificaciones típicas de un autobús urbano.

Tabla 3.8. Especificaciones del autobús urbano eléctrico.

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Masa del vehículo [m_v]	13800 kg	Pendiente máxima [θ]	18 %
Máxima masa autorizada (m_{max})	18000 kg	Velocidad máxima [v_{max}]	65 km/h
Carga de pasajeros [m_{PAS}] (32 sentados y 20 de pie de 70 kg)	3640 kg	Velocidad base [v_b]	15 km/h
Área frontal [A_f]	7,2 m ²	Radio nominal de los neumáticos [r]	0,571 m
Coefficiente aerodinámico [C_x]	0,6	Tiempo de aceleración de 0 a 65 km/h [t_a]	28 s
densidad del Aire [ρ]	1,225 kg/m ³	Rendimiento de la transmisión [η_j]	96 %
Aceleración gravitacional [g]	9,81 m/s ²	Relación de transmisión final [ξ_j]	17,7
Coeficiente de Resistencia a la rodadura [f_r]	0,012	Rendimiento del motor eléctrico [η_{ME}]	94%
		Rendimiento del inversor [η_{DC-AC}]	96%
Factor de mayoración de masa [γ_m]	1,04	Rendimiento del convertidor DC-DC [η_{DC-DC}]	95 %

3.13.2. Diseño de los componentes del sistema de tren potencia

Mediante el conjunto de expresiones (3.23), (3.24), (3.25), (3.27) y (3.29) se determina que la potencia del motor eléctrico debe de ser de 157 kW mientras que el par requerido de 152 Nm. Para realizar el modelo de simulación se escogieron las características de dos motores conectados a cada rueda del tren posterior, la potencia nominal de cada uno de ellos es de 85 kW y par nominal de 220 Nm, en conjunto la potencia nominal es de 170 kW y 440 Nm de par nominal. Se puede observar la curva característica de este motor en la Figura 3.25 , donde el par y la potencia máxima son de 530 Nm y 150 kW respectivamente para cada motor, de este modo se garantiza que cubrirá todo el rango de requerimientos. La Tabla 3.9 muestra en detalle las características de este componente.

Figura 3.25. Características de potencia y par del motor de tracción frente a la velocidad angular del motor.

Tabla 3.9. Especificaciones de la máquina eléctrica.

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Voltaje Nominal	650 V	Corriente Nominal	142 A
Potencia Nominal	85 kW	Velocidad Nominal	10000 rpm
Par Nominal	220 Nm	Masa	120 kg
Par máximo	530 Nm	Dimensiones	510 x 245 x 245 mm
Potencia máxima	150 kW	Temperatura ambiente	-30 °C – 70 °C

Para el análisis de este modelo se ha determinado una capacidad inicial de las baterías de 324 kWh, que está dentro de un rango similar para este tipo de vehículos como puede verse en la Tabla 2.1.

Se han propuesto en el diseño baterías de litio con fosfato de hierro, la energía específica oscilan entre 80 a 130 Wh/kg y la potencia específica entre 200 y 300 W/kg [63]. Al tener embarcada una capacidad de 324 kWh, la potencia de las baterías está comprendida entre 747 y 810 kW, por lo que el requerimiento de potencia máxima estaría cubierto en todo momento.

3.13.3. Diseño de los sistemas auxiliares

La estimación del consumo de energía de los componentes auxiliares tiene gran importancia debido a que la energía embarcada en el vehículo es limitada y recargarla puede tomar tiempos importantes. El vehículo al estar en constante funcionamiento durante

una extensa jornada, está expuesto a un gran consumo de energía de los sistemas auxiliares, según IEA de 20 a 40 kWh/100 km [9].

En la literatura científica se han encontrado múltiples casos donde se ha estimado el consumo de este sistema. Gao et al. estimó un consumo de energía de los sistemas auxiliares de 3980,2 kJ y 4812,1 kJ (1,1 kWh y 1,33 kWh respectivamente) para dos tipos de trenes de potencia probados según el ciclo CTBDC (China Typical Bus Driving Cycle) que tiene un tiempo aproximado de 1300 segundos, sin embargo, en estas pruebas no se incluyó el funcionamiento del aire acondicionado [165,166].

Según Miranda et al. el pico de potencia instantánea de todos los sistemas auxiliares juntos no excedió 10 kW en una ruta urbana de autobús en Brasil con 11 km de recorrido, el vehículo consumió 17,6 kWh de energía neta y los sistemas auxiliares consumieron 2,46 kWh en un tiempo de 1250 segundos que duró la ruta. Estos valores representaron el 14% del consumo total de energía del sistema con un ratio de consumo total del vehículo de 1,6 kWh/km [132].

Otros autores como Gao Z et al. estiman la potencia de los sistemas auxiliares en buses híbridos en serie y paralelo en 2,29 kW [167], mientras que de 3,75 kW para buses eléctricos [155], a diferencia de Göhlich et al. quien determinó una potencia de 6 kW para los sistemas auxiliares [168].

En base a la bibliografía mostrada, se ha propuesto un valor de 5 kW de potencia media de los sistemas de auxiliares, además para que el modelo sea más crítico se ha establecido que la potencia sea constante en todo el trayecto [155,167], de esta manera representar una condición extrema del consumo de energía en el modelo de simulación.

La Tabla 3.10 muestra un resumen de los parámetros de diseño escogidos en todo el sistema el tren de potencia y los auxiliares:

Tabla 3.10. Valores estimados y seleccionados del tren de potencia.

Especificación	Valor Calculado	Valor seleccionado
Potencia tractora máxima	142 kW	-
Potencia eléctrica del motor eléctrico	157 kW	2 x 85 kW (Potencia Nominal)
Potencia mecánica del motor eléctrico	148 kW	-
Par del motor eléctrico	152 Nm	2 x 220 Nm (Par nominal)
Potencia de sistemas auxiliares	-	5 kW
Potencia de batería	175 kW	747 - 810 kW
Capacidad de baterías	-	324 kWh

Modelos de simulación

4.1. La herramienta de simulación

El software AVL Cruise (AVL, Graz, Austria) es una herramienta útil para estimar la energía consumida por un vehículo durante un ciclo de conducción. Este programa tiene rutinas específicas que permite realizar el análisis y optimización energética de vehículos con trenes de potencia convencionales, híbridos y eléctricos. Su enfoque va dirigido hacia el consumo de combustible, las emisiones y los análisis de rendimiento de los diferentes componentes del vehículo [153]. Estudios previos en los que se han implementado modelos de vehículos eléctricos con este software han demostrado su factibilidad. Por ejemplo, Varga [169] estimó el consumo de vehículos eléctricos ligeros bajo el Nuevo Ciclo de Conducción Europeo (NEDC), los modelos utilizados fueron: Citroën C-Zero, Mitsubishi i-MiEV, Renault Kangoo ZE y Renault Fluence ZE. Los resultados mostraron diferencias por debajo del 1,9% entre el consumo de energía medido y simulado. Otro estudio fue realizado por Rodríguez et al. [170] donde se reemplazó una flota de taxis convencionales por vehículos eléctricos. Los resultados mostraron que un vehículo eléctrico ligero consumía hasta ocho veces menos energía que un vehículo a gasolina, con las ventajas de no emitir CO₂, NO_x, HC, CO y partículas en suspensión (PM_{2.5}, PM₁₀).

4.2. Modelos de simulación desarrollados

Establecidos los parámetros de diseño del tren de potencia se ha utilizado el software AVL Cruise. Los modelos propuestos se observan en la Figura 4.1 para el vehículo de golf y Figura 4.2 para el autobús urbano. Estos modelos constan de varios bloques conectados entre sí y según un algoritmo lógico se encuentran predefinidos para interactuar entre cada uno de ellos. Bajo esta estructura se han introducido todos los parámetros y especificaciones de diseño explicados en los apartados anteriores incluyendo los perfiles de velocidad y altura.

Figura 4.1. Modelo del vehículo de golf eléctrico de autonomía extendida con pila de combustible

Figura 4.2. Modelo del autobús urbano eléctrico.

El software calcula la resistencia al avance mediante varios modelos, el utilizado aquí es el modelo físico que estima las fuerzas resistentes (R_a) en el bloque de la planta vehicular (bloque 1 para ambos modelos) mediante la siguiente expresión:

$$R_a = m a_x (k_{v,add,trac} + k_{v,add,push}) + F_{xa} + R_g \quad (4.1)$$

Donde $k_{v,add,trac}$ y $k_{v,add,push}$ representan el factor de mayoración de las masas que toma en cuenta la inercia provocada por las masas giratorias del vehículo.

La resistencia a la rodadura (R_r) se calcula separadamente en los neumáticos que unen el vehículo a la calzada (bloques 3–6 en el vehículo de golf y 4–7 en el autobús urbano). Se ha definido el modelo *transitorio*, para este caso, la resistencia a la rodadura

se calcula mediante un modelo de resistencia detallado. La siguiente expresión modela lo antes dicho:

$$R_r = R_{r,stab} \left[1 + k_{W,emp} (T_{W,act} - T_{W,stab}) \right] \quad (4.2)$$

Donde $R_{r,stab}$ es la resistencia a la rodadura en estado estacionario, $k_{W,emp}$ es el coeficiente empírico de resistencia a la rodadura, $T_{W,act}$ es la temperatura actual del neumático y $T_{W,stab}$ es la temperatura del neumático estabilizada.

La máquina eléctrica (bloque 9 en el vehículo de golf y bloques 12 y 13 en el autobús urbano) puede funcionar como motor eléctrico o como generador, con curvas características para cada modo. El bloque lleva dos componentes incluidos, el inversor DC - AC y el motor eléctrico. Para calcular las pérdidas de potencia y par se utiliza un modelo con el mapa característico de eficiencia. La potencia eléctrica del motor eléctrico está dada por:

$$P_{ME,el} = P_{MEmec} + P_{MEloss} \quad (4.3)$$

Que es una expresión alternativa a la ecuación (3.27) que maneja AVL Cruise y donde P_{MEloss} representa la potencia perdida debido a las pérdidas en el hierro, en el cobre y las provocadas por la fricción. Tomando en cuenta la convección de signos, si $P_{ME,el} > 0$ el motor actúa en modo motor para la propulsión del vehículo, mientras que si $P_{ME,el} < 0$ el motor actúa en modo generador recuperando parte de la energía cinética producida por las desaceleraciones. La potencia mecánica se puede obtener a partir de la expresión (3.29) como:

$$P_{MEmec} = M_{MEout} \omega_{ME} \quad (4.4)$$

Por lo que la potencia mecánica depende estrictamente de la velocidad angular (ω_{ME}) y del par motor ($M_{ME_{out}}$), mientras que la eficiencia depende del mapa característico del motor el cual es una función de estos tres parámetros.

La batería (bloque 12 en el vehículo de golf y bloque 17 en el autobús urbano) se representa por un modelo que consiste en una fuente de tensión y una resistencia que permite considerar procesos complejos internos en la batería (Figura 4.3), adicionalmente se pueden agregar dos elementos RC (Resistencia–Condensador) para describir la sobretensión de concentración y la sobretensión de transferencia [171]. La dependencia de la temperatura en la resistencia se puede activar opcionalmente. Las celdas individuales pueden ser modeladas, así como las combinaciones de estas, por lo que cualquier módulo se puede construir. Existe también un modelo que describe el comportamiento térmico de la batería, este considera el calentamiento causado por las pérdidas energéticas y el enfriamiento por la convección. El modelo permite habilitar la opción “temperature and SOC dependent” de esta manera las resistencias y capacitancias son dependientes de la temperatura (T_{QH}) y del estado de carga (SOC_{QH}). La ecuación referente al voltaje de salida en una celda de la batería ($U_{QH,terminal}$) se muestra a continuación:

Figura 4.3. Modelo equivalente de una celda de batería

$$U_{QH,terminal} = U_{QH,idle}(T_{QH}, SOC_{QH}) - I_{QH,ohmic} R_{QH}(T_{QH}, SOC_{QH}) - \frac{Q_{QH,conc}}{C_{QH,conc}}(T_{QH}, SOC_{QH}) - \frac{Q_{QH,trans}}{C_{QH,trans}}(T_{QH}, SOC_{QH}) \quad (4.5)$$

Donde $U_{QH, idle}$ es el voltaje ideal de la celda, T_{QH} es la temperatura actual de batería, SOC_{QH} es el estado de carga de la celda, $I_{QH, ohmic}$ es la corriente actual de la celda, R_{QH} es la resistencia de los elementos RC, $Q_{QH, conc}$ es la carga de la capacitancia por sobretensión de concentración, $C_{QH, conc}$ es la capacitancia por sobretensión de concentración, $Q_{QH, trans}$ es la carga de la capacitancia por sobretensión de transferencia y $C_{QH, trans}$ es la capacitancia por sobretensión de transferencia.

Los sistemas auxiliares en el autobús urbano están definidos en el modelo como consumidores eléctricos. Se simbolizan por un único bloque (bloque 16) que representa una resistencia óhmica donde hay pérdidas de corriente eléctrica, por lo que habrá consumo de energía. El software permite fijar el valor de resistencia óhmica con un valor constante o por medio de curvas características. En el modelo se ha escogido el de resistencia constante ya que se considera una potencia medía funcionando durante todo el ciclo de recorrido. La corriente instantánea se puede calcular mediante la expresión:

$$I_X = \frac{U_{X, net}}{R_{X, act}} \quad (4.6)$$

Donde I_X es la corriente que pasa por la resistencia óhmica $R_{X, act}$ que representa a los sistemas auxiliares y $U_{X, net}$ es la tensión en la resistencia.

El modelo también presenta componentes complementarios como la relación de transmisión final del vehículo (bloque 2 en el vehículo de golf y bloques 2 y 3 en el autobús urbano), que son los encargados de multiplicar el par que sale del eje del motor a los neumáticos del vehículo, para el caso del vehículo de golf a través del diferencial (bloque 10). Los frenos del vehículo (bloques 7-8 en el vehículo de golf y bloques 8-11 en el autobús urbano) se describen mediante las dimensiones de los componentes del sistema, además de un factor de frenado específico. El cockpit (bloque 11 en el vehículo de golf y bloque 14 en el autobús urbano) es el componente encargado de conectar al conductor con el

vehículo, las conexiones se realizan a través del bus de datos. El ASC (bloque 15 en el autobús urbano) representa el componente que controla los coeficientes de fricción de las ruedas individuales, si un coeficiente de fricción excede el valor máximo transferible la posición del acelerador varía. El convertidor DC-DC (bloque 13 en el vehículo de golf y bloque 18 en el autobús urbano) es un componente que sirve para transformar, con alto rendimiento, los voltajes de corriente continua. Su función es acoplar los diferentes rangos de tensión al que es adecuado en los componentes implicados en el bus de corriente continua, permitiendo el correcto flujo de energía. En el vehículo de golf su función es acoplar los diferentes rangos de voltajes al adecuado para el motor eléctrico, mientras que en el autobús urbano su función es adecuar el voltaje a los sistemas auxiliares.

El e-Drive Control System (bloque 14 en el vehículo de golf y bloque 19 en el autobús urbano) y eBrake & mBrake Unit (bloque 15 en el bloque en el vehículo de golf y bloque 20 en el autobús urbano), son funciones definidas por el usuario y su programación se realiza en lenguaje C. Las líneas de programación se interpretan durante la simulación sin necesidad de ser compiladas. La función eDrive corresponde al control del motor eléctrico y la función eBrake, ambos actúan sobre el control de la frenada regenerativa.

El monitor (bloque 16 en el vehículo de golf y bloque 21 en el autobús urbano) permiten mostrar algunos resultados de cálculo mientras se está ejecutando la simulación. Las constantes (bloque 18 en el vehículo de golf y el bloque 22 en el autobús urbano), es donde se definen valores que pueden ser usados por otros bloques a través del bus de datos.

El bloque 17 en el modelo del vehículo de golf, corresponde a la pila de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC). El modelo se basa en las ecuaciones electroquímicas (ecuaciones (4.7) – (4.11)), derivadas de la curva de polarización del lado del cátodo y tiene en cuenta las pérdidas de activación, óhmicas y de transporte de masa.

La siguiente expresión define la tensión de cada celda de la pila de combustible con las diferentes pérdidas a las que se encuentra expuesta:

$$V_{cell} = V_{OC} - \eta_0 - R_{\Omega} j_0 \quad (4.7)$$

Donde V_{OC} es la tensión de circuito abierto (0.95 V para este caso), $R_{\Omega} j_0$ son las pérdidas óhmicas debidas a la resistencia iónica en el electrolito, los electrodos, a la resistencia electrónica en los electrodos, colectores y a la resistencia de contacto, η_0 son las pérdidas totales de voltaje en la capa catalítica del cátodo (CCL) [164] y son representadas mediante la siguiente expresión:

$$\eta_0 = act + t_{CCL} + t_{GDL} \quad (4.8)$$

Las pérdidas de activación son definidas como:

$$act = b \operatorname{arcsinh} \left(\frac{\left(\frac{j_0}{j_{\sigma}} \right)^2}{2 \frac{c_h}{c_{ref}} \left(1 - \exp \left(\frac{-j_0}{2j_{*}} \right) \right)} \right) \quad (4.9)$$

Donde b es la pendiente de Tafel su valor normalmente es de 0,03 V, j_0 la densidad de corriente de la celda 0,437 A cm⁻², j_{σ} es un parámetro de densidad de corriente ($j_{\sigma} = 2i * \sigma_t b$), c_h es la concentración molar de oxígeno en el canal, c_{ref} es la concentración molar de referencia y j_{*} es un parámetro escalar de densidad de corriente ($j_{*} = \frac{\sigma_t b}{l_t}$).

Las pérdidas por transporte de masa en el CCL son iguales a:

$$t_{CCL} = \frac{\frac{\sigma_t b^2}{4FDc_h} \left(\frac{j_0}{j_{*}} - \ln \left(1 + \frac{j_0^2}{j_{*}^2 \beta^2} \right) \right)}{1 - \frac{j_0}{j_{lim}^{*} \frac{c_h}{c_{ref}}}} \quad (4.10)$$

Donde σ_t es la conductividad iónica en el CCL, F es la constante de Faraday, D es el coeficiente de difusión del oxígeno en el CCL, β es un parámetro adimensional en función del valor de la densidad de corriente adimensional $\tilde{j}_0$ que va relacionada con la curva de polarización de la celda su valor suele estar en un régimen de transición de $\cong 1$ para pilas PEM [172] ($\beta = \frac{\sqrt{2\tilde{j}_0}}{1+\sqrt{1.12\tilde{j}_0} \exp\sqrt{2\tilde{j}_0}} + \frac{\pi\tilde{j}_0}{2+\tilde{j}_0}$), y j_{lim}^* es el límite de densidad de corriente debido al transporte de oxígeno la capa de difusión del gas (GDL) ($j_{lim}^* = \frac{4FD_b C_h^*}{l_b}$).

Finalmente, las pérdidas por transporte de masa en el GDL son igual a:

$$t_{GDL} = -b \ln \left(1 - \frac{j_0}{j_{lim}^* \frac{C_h}{C_{ref}}} \right) \quad (4.11)$$

Los valores de estos parámetros característicos para la pila de combustible empleada son expuestos en la Tabla 4.1.

Tabla 4.1. Especificaciones para la curva de polarización en el simulador de software automotriz [162–164,172].

Especificación	Valor	Especificación	Valor
Tensión circuito abierto (V_{OC})	0,95 (V)	Densidad de corriente de celda (j_0)	0,437 (A·cm ⁻²)
Pendiente Tafel (b)	0,03 (V)	Constante de Faraday (F)	96 485 (As·mol ⁻¹)
Parámetro de densidad de corriente (j_σ)	$1,212 \times 10^{-3}$ (A·cm ⁻²)	Coefficiente de difusión de oxígeno en el CCL (D)	$1,36 \times 10^{-4}$ (cm ² ·s ⁻¹)
Parámetro escalar de densidad de corriente (j_*)	0,9 (A cm ⁻²)	Parámetro adimensional (β)	1311
Densidad de corriente de intercambio volumétrico (i_*)	$8,17 \times 10^{-4}$ (A·cm ⁻³)	Limitación de la densidad de corriente debida al transporte de oxígeno en el GDL (j_{lim}^*)	2958 (A·cm ⁻²)
Espesor de la capa de catalizador (l_t)	0,001 (cm)	Coefficiente de difusión de oxígeno en el GDL (D_b)	0,0259 (cm ² ·s ⁻¹)
Concentración de oxígeno en el canal (c_h)	$7,4 \times 10^{-6}$ (mol·cm ⁻³)	Resistencia Óhmica	0,126 (Ω ·cm ⁻²)
Concentración de oxígeno en la entrada del canal (C_h^*)	$7,36 \times 10^{-6}$ (mol·cm ⁻³)	Espesor del GDL (l_b)	0,025 (cm)
Concentración molar de oxígeno de referencia (c_{ref})	$7,36 \times 10^{-6}$ (mol·cm ⁻³)	Densidad de corriente adimensional ($\tilde{j}_0$)	1
Conductividad iónica en el CCL (σ_i)	0,03 (S/cm)	Limitación de la densidad de corriente debida al transporte de oxígeno en la GDL (j_{lim}^*)	2,95 (A·cm ⁻²)

Gestión de carga para las flotas de vehículos

5.1. Estrategia de conexión a la red eléctrica de España

En ambos casos se plantea la conexión nocturna, debido a la tipología de explotación de estos vehículos. Si bien no es muy factible la conexión simultanea de toda la flota (para el caso de los autobuses), la estrategia que se propone trata de dar un primer enfoque de los efectos positivos que conllevaría la introducción de autobuses eléctricos urbanos dentro de la ciudad, eliminando gases contaminantes y de efecto invernadero.

Para el caso de la flota de vehículos de golf debe tenerse en cuenta que, al ser vehículos híbridos con pila de combustible, además de la carga eléctrica de la red, también requieren el repostaje de hidrógeno, que para esta aplicación será por medio de botellas de hidruros metálicos. El objetivo de análisis para este tipo de aplicaciones es la de una puntual solución energética.

5.2. Determinación de emisiones CO₂ generadas a partir de la conexión a la red eléctrica de España

El componente de emisión a medir es el CO₂, no hay ninguna base de datos para factores de emisión de otros componentes de generación de energía eléctrica [169,170]. Para determinar las emisiones de CO₂ de un vehículo eléctrico se aplicará los factores de emisión del mix eléctrico español. Es pertinente asociar el factor de emisión que tiene cada central de generación y el aporte que representa en términos de energía a la red eléctrica. El factor de emisión de las diferentes centrales de generación según REE [42] se muestran en la Tabla 5.1:

Tabla 5.1. Factor de emisión de CO₂ por tipo de generador [173,174].

Tecnología de Generación Eléctrica	FE (gCO₂/ kWh)
Carbón	950
Eólica	0
Hidroeléctrica	0
Biomasa	0
Solar FV	0
Nuclear	0
Ciclo Combinado (Gas)	370
Cogeneración CHP*	370
Desperdicios no renovables	0.24

* El factor de emisión involucra las centrales de cogeneración y residuos

La intensidad de emisión de CO₂ del vehículo debido a la carga en el mix eléctrico se establece mediante la ecuación:

$$EI_{veh} = FE_{mix} C_{mix} \quad (5.1)$$

Donde EI_{veh} es la intensidad de emisión de CO₂ (gCO₂/km), FE_{mix} es el factor de emisión del mix eléctrico (gCO₂/kWh) y C_{mix} es el requerimiento de carga del mix eléctrico (kWh / km).

El factor de emisión (FE_{mix}) depende de los tipos de centrales de generación del mix eléctrico. Además, se debe tomar en cuenta el rendimiento de cada componente de la red eléctrica y del sistema de carga del vehículo (Tabla 5.2), estos elementos comprenden todo el proceso de transporte de la energía, desde que se genera en las centrales eléctricas hasta la que llega a las baterías del vehículo eléctrico.

Tabla 5.2. Rendimiento global de los componentes del sistema de carga [151,159].

Rendimiento [%]	η_{trans}	η_{dist}	$\eta_{charged}$ (rápida - lenta)	$\eta_{BAT_{Ch}}$	η_{WTT}
Rendimiento máximo	99	93	94 - 97	95	84,84
Rendimiento mínimo	98	91	91 - 95	90	76,25
Rendimiento promedio	98,5	92	92,5 - 96	92,5	80,55

Por lo que el requerimiento de carga del mix eléctrico (C_{mix}) se calcule mediante la expresión:

$$C_{mix} = \frac{WSER}{\eta_{trans} \eta_{dist}} \quad (5.2)$$

$$WSER = \frac{E_{BAT}}{\eta_{charged} \eta_{BAT_{Ch}}} \quad (5.3)$$

Donde $WSER$ es el requerimiento de energía en el enchufe cargador, E_{BAT} es la energía descargada por la batería, η_{trans} es el rendimiento de transmisión de la energía eléctrica en alta tensión, η_{dist} es el rendimiento en la distribución de la energía eléctrica que reducen la tensión a niveles adecuados (media y baja tensión), η_{charg} es el rendimiento de carga (conector - batería) y $\eta_{BAT_{Ch}}$ es el rendimiento de la batería en carga. La Figura 5.1 muestra el camino de conversión de la energía con sus rendimientos, desde la generación hasta las baterías.

Figura 5.1. Trayectoria y rendimiento de la conversión de la energía a través de los componentes de la red eléctrica y del sistema de carga del vehículo [151].

5.3. Proyecciones del mix eléctrico español hacia 2030

Se espera un cambio en el mix eléctrico español que permita un gran avance en la descarbonización del sector eléctrico hasta 2030, esto incluye la contribución sostenible de las fuentes de energía renovables. Según informes de la comisión de expertos de transición

energética en el año 2030 bajo el escenario DG2030, la contribución de la generación de electricidad a partir de energías renovables será del 62%, mientras que la de las energías no renovables será tan solo del 38% [5].

La conexión de vehículos eléctricos se analiza en los capítulos de resultados, considerando los cambios que se producirán en el mix eléctrico español en el escenario de generación distribuida de 2030 para el caso de las flotas de autobuses urbanos.

El escenario DG2030 es un escenario de referencia en el que se basan la mayoría de los ejercicios de simulación de sistemas eléctricos conectados a la red. La Tabla 5.3 muestra las proyecciones del cambio de potencia instalada en las centrales eléctricas en el mix eléctrico hasta el año 2030, mientras que la Tabla 5.4 pronostica la generación de energía eléctrica previsto en el escenario DG2030.

Tabla 5.3. Centrales de generación eléctrica en España peninsular hasta 2030 [5,175–177].

Tipo de central eléctrica	Potencia [MW] (2017)	Potencia [MW] (2020)	Potencia [MW] (2022)	Potencia [MW] (2026)	Potencia [MW] (2030)
Energías renovables					
Eólica	22 922	27 650	29 500	31 000	31 000
Hidroeléctrica	17 030	17 030	17 030	17 030	17 030
Solar fotovoltaica	4 439	5 790	15 000	30 687	47 157
Solar Térmica	2 304	2 304	2 304	3 269	2 300
Otras renovables	852	1 131	1 131	1 131	2 550
Residuos renovables	123	123	123	123	123
Total Renovables	47 670	54 028	65 088	83 240	100 160
Energías no renovables					
Ciclo combinado (Gas)	24 948	24 933	24 933	24 933	24 560
Carbón	9 536	9 536	9 536	9 536	847
Nuclear	7 117	7 117	7 117	7 117	7 117
Cogeneración	5 818	6 668	6 668	6 668	7 700
Bombeo	3 329	3 329	3 329	3 329	6 020
Residuos no renovables	459	677	677	677	677
Total no renovables	51 207	52 260	52 260	52 260	46 921
Baterías					2 358
Total [MW]	98 877	106 288	117 348	135 500	149 439

Tabla 5.4. Generación de las centrales eléctricas en España peninsular hasta 2030 [5,175–177].

Tipo de central eléctrica	Generación Eléctrica [GWh] (2017)	Generación Eléctrica [GWh] (2020)	Generación Eléctrica [GWh] (2022)	Generación Eléctrica [GWh] (2026)	Generación Eléctrica [GWh] (2030)
Energías renovables					
Eólica	47 498	57 295	61 129	64 237	64 923
Hidroeléctrica	18 361	18 361	18 361	18 361	32 257
Solar fotovoltaica	7 988	10 419	26 993	55 221	88 027
Solar Térmica	5 348	5 348	5 348	7 588	4 589
Otras renovables	3 603	4 783	4 783	4783	13 409
Residuos renovables	728	728	728	728	-
Total Renovables	83 526	96 934	117 341	150 918	203 205
Energías no renovables					
Ciclo combinado (Gas)	33 855	33 835	33 835	33 835	34 702
Carbón	42 593	42 593	42 593	42 593	0
Nuclear	55 609	55 609	55 609	55 609	50 868
Cogeneración	28 134	32 244	32 244	32 244	38 675
Bombeo	2 249	2 249	2 249	2 249	-
Residuos no renovables	2 459	3 627	3 627	3 627	-
Total no renovables	164 899	170 157	170 157	170 157	124 245
Baterías					-
Total [GWh]	248 425	267 091	287 498	321 075	327 450
Factor de emisión [gCO₂/kWh]	257	246	228	204	82

5.4. Definición del escenario para cargar la flota de vehículos de golf

La gestión de la energía de la flota debe ser combinada ya que se debe cargar las baterías de plomo-ácido y también repostar el hidrógeno consumido. Como se mencionó la pila de combustible es de pequeño tamaño y su función principal es cargar las baterías (configuración batería-pila). Lo que se pretende con esta disposición es extender la autonomía del vehículo para que pueda realizar la mayor cantidad de recorridos en un mismo día, con el objetivo que al finalizar la jornada el SOC no sea menor al 30%, caso contrario, conllevaría una vida corta de las baterías, además de la indisponibilidad del vehículo el resto del día.

Los escenarios planteados son los siguientes: El recorrido en días regulares no excederá las tres partidas (para los meses de septiembre a mayo), por lo que recorrerá como máximo 24 km, además los vehículos funcionaran en modo eléctrico exclusivamente

y el factor de utilización de la flota será del 50 %. En los meses de verano donde los recorridos pueden iniciarse desde las 06:30 am y finalizar a las 11:30 am, se pueden llegar a realizar hasta 5 partidas. Para los meses de junio y julio, de lunes a jueves se realizarán hasta cuatro recorridos, además los vehículos funcionaran en modo híbrido y el factor de utilización de la flota será del 60% mientras que el viernes, sábado y domingo se realizarán hasta cinco recorridos con un factor de utilización de la flota del 80%. Para todo el mes de agosto se supone los cinco recorridos, en modo híbrido y con un factor de utilización del 90 %. La carga del vehículo a la red eléctrica será nocturna en el modo de carga lenta con tipo de carga modo 2. El repostaje de hidrógeno se realizará mediante el remplazo de la botella de hidrógeno. Los parámetros que se han tomado en cuenta se describen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5. Características de la flota de vehículos de golf

Especificación	Detalle
Número de vehículos	20
Modo de carga	Lenta*
Tipo de carga	Modo 2**
Potencia de carga	825 W
Repostaje H ₂	Cambio de botella
Capacidad de H ₂	0,085 kg-H ₂
Total de días con 3 recorridos	273 días
Total de días con 4 recorridos	35 días
Total de días con 5 recorridos	57 días

*Precisa una potencia inferior a 7.4kW, AC monofásica 230 V/ 3,6 A.

** El vehículo se conecta directamente a un enchufe normal, es la propia instalación la que tiene las protecciones (magnetotérmico y diferencial)

5.5. Definición del escenario para la sustitución y carga de la flota de autobuses

La propuesta que plantea el autor como escenario es una sustitución gradual de la flota, de esta manera estimar las emisiones de CO₂ para el año base (2017) y las que se darán en los años 2020 (fase 1), 2022 (fase 2), 2026 (fase 3) y 2030 (fase 4), para el análisis se ha recurrido a varios datos obtenidos en literatura científica, fabricantes y en informes de la EMT. Para el consumo de energía y la intensidad de emisión de CO₂ de los autobuses

de la flota se ha tomado como punto de partida estudios anteriores [148,178,179] donde la estimación del factor de emisión se realizó bajo un análisis del pozo al tanque (WTT) y del tanque a la rueda (TTW).

El un número de rutas diarias por vehículo es de 20 y con un índice de ocupación de alrededor de 50% [147]. Se plantea un incremento anual de la flota e incremento de kilómetros anuales recorridos del 0,5% y el consumo de energía de cada tecnología de la flota se considera la misma a través del tiempo. Los vehículos se encuentran agrupados en cuatro categorías como lo informa la EMT (GNC, Diésel, Híbridos y Eléctricos) [147]. Finalmente, se toma los datos de generación del mix eléctrico del año 2017 obtenidos de REE [42].

La flota está compuesta por varias tecnologías, la EMT denomina parque verde a la flota de autobuses GNC, autobuses diésel que cumplen normativa Euro V y VI, autobuses eléctricos puros, así como también a los autobuses híbridos GNC y diésel, mientras que en el resto del parque clasifica a los autobuses diésel que cumplen normativa EURO III y IV. La Figura 5.2, muestra la composición por tecnología de la flota actual de la EMT.

La sustitución por fases se considera en base a una transición paulatina en el cambio de tecnología propuesta por el autor, teniendo en cuenta que el ciclo de vida de estos vehículos rondan entre 8 y a 10 años de vida, además como se observa en la Figura 5.2 existen una gran parte de autobuses nuevos como también autobuses cercanos a los 15 años de uso. En función de aquello se detallan las fases:

Fase 1: Correspondiente al año 2020. En esta fase se remplazan todos los autobuses diésel con normativa menor a EURO V, también los autobuses diésel con el año de uso menor a 2010 y los vehículos GNC-Diésel. En esta primera fase se sustituyen 644 autobuses que corresponden a un 31,42 % del total de la flota.

Fase 2: Correspondiente al año 2022. En esta fase se sustituyen el resto de los autobuses propulsados exclusivamente por diésel, los autobuses eléctricos con año de uso menor o igual a 2008 (renovación de flota) y los autobuses GNC con año de uso menor o igual a 2010. Aquí se remplazan 438 unidades correspondientes al 21,36 % del total de la flota.

Fase 3: Correspondiente al año 2026. Se sustituyen los autobuses GNC con año de uso menor o igual al 2016 y los vehículos híbridos GNC. En esta fase se remplazan 406 autobuses que corresponden a 19,80% del total de la flota.

Fase 4: Correspondiente al año 2030. En esta fase final se sustituyen todos los autobuses con año de uso 2017 y 2018, que corresponden a 562 unidades, con un peso del 27,41%. Los autobuses eléctricos remplazados de estos años corresponden a renovación de flota. Por lo que el año 2030 la flota será completamente eléctrica.

Type of Fuel	OEM	Model	Number of Vehicles	Weight of the Fleet%	EURO Standard	Year	
GREEN PARK			1,694	82.63			
NATURAL GAS	Conventional	BREDAME-NARINIBUS	Avandity CNG	39	1.90	EEV	2011
			Vivacity CNG	29	1.41	EEV	2011 (14); 2012 (15)
		IVECO	Citelis Airport CNG	12	0.58	EEV	2011
			Citelis CNG	176	8.58	EEV	2010 (22); 2011 (80); 2012 (50); 2013 (24)
			Cityclass CNG	241	11.76	EEV	2004 (24); 2005 (24); 2006 (53); 2007 (80); 2008 (29); 2009 (31)
		MAN	Lion's City CNG	42	2.05	EURO 6	2016 (10); 2017 (32)
			NG/313-F Articulate CNG	32	1.56	EEV	2012 (14); 2013 (16)
			NL/313-F CNG	143	6.98	EEV	2003 (3); 2007 (35); 2010 (26); 2011 (58); 2012 (19); 2013 (2)
		MERCEDES	Cit-CNG	322	15.71	EURO 4 - 6	2007 (35); 2017 (92); 2018 (195)
			Citaro G Articulate CNG	40	1.95	EURO 6	2017
		SCANIA	N280 UB CNG	186	9.07	EURO 6	2016 (33); 2017 (68); 2018 (85)
	Hybrid	TATA HISPANO	TML Hybrid CNG	10	0.49	EEV	2012 (5); 2013 (5)
Plug-in Hybrid	CASTROSÚA	Tempus CNG	8	0.39	EEV	2012	
Gas-Diesel	IVECO	Cityclass	2	0.10	EURO 5	2008	
	MAN	NL/273-F	1	0.05	EURO 4	2006	
DIESEL	Euro V or higher	IVECO	Citelis	36	1.76	EURO 5	2010 (24); 2011 (12)
			Cityclass	130	6.34	EURO 5	2004 (8); 2005 (69); 2006 (53)
		MAN	NG/313-F Articulate	9	0.44	EURO 5	2004
			NL/263-F	56	2.73	EURO 5	2002 (15); 2003 (17); 2004 (8); 2005 (16)
			NL/283-F	24	1.17	EEV	2010
		MERCEDES	O/530 Citaro	19	0.93	EURO 5	2002 (2); 2003 (17)
		SCANIA	N-94UB Omnicity	71	3.46	EURO 5	2004 (15); 2005 (35); 2006 (21)
		IVECO	Urbanway Full Hybrid	13	0.63	EURO 6	2017
			MAN	Lion's City Hybrid	17	0.83	EURO 6
	Hybrid						
	ELECTRIC	CASTROSÚA	Tempus Electric	5	0.25	Zero Emission	2017
			i2e	15	0.73	Zero Emission	2018
TECNOBÚS			Gulliver	16	0.78	Zero Emission	2007 (6); 2008 (10)
REST OF THE PARK			356.00	17.37			
DIESEL	Less than Euro V	IVECO	Cityclass	91	4.44	EURO 3 - 4	2006 (5); 2007 (1); 2008 (49); 2009 (36)
		MAN	NG Lion Articulate	4	0.19	EURO 4	2008
			NL/263-F	5	0.24	EURO 3	2004
			NL/273-F	76	3.71	EURO 4	2008 (36); 2009 (40)
		MERCEDES	O/530 Citaro	60	2.93	EURO 4	2008 (12); 2009 (48)
		SCANIA	N270 Omnicity	110	5.37	EURO 4	2008 (52); 2009 (58)
			N-94UB Omnicity	10	0.49	EURO 3	2006 (5); 2012 (5)
TOTAL OF THE FLEET			2,050	100.00			

Figura 5.2. Flotas de autobuses urbanos de la EMT [180].

Según datos de la EMT en el año 2017 la flota ha recorrido 91,4 millones de kilómetros en línea, con una velocidad en línea promedio de 13,28 km. La flota tiene una antigüedad promedio de 8,75 años y se han emitido a través de las rutas de líneas recorridas alrededor de 151 kt de CO₂. También cabe mencionar que de los kilómetros recorridos el 49,3 % los absorben los vehículos diésel, mientras que los de gas el 49,0 %, los híbridos y eléctricos recorren el 1,5 y 0,2 % respectivamente. La propuesta de este trabajo analiza una repartición equivalente de los kilómetros recorridos según el porcentaje que tenga en la flota cada tecnología, a partir de la fase 1. La conexión a la red eléctrica se plantea entre las 00:30 y 04:30, principalmente por que el horario laboral de este tipo de flotas fluctúa entre 05:30 a 23:30, por lo que la ventana de conexión a la red está limitada. La Tabla 5.6 muestra un resumen de datos proporcionados por la EMT en el informe de gestión 2017 [147].

Tabla 5.6. Especificaciones del informe anual 2017 de la EMT.

Especificación	Valor
Kilómetros en líneas recorridas	91 399 466 [km]
Kilómetros comerciales	98 095 840 [km]
Velocidad en línea	13,28 [km/h]
Índice de ocupación	48,51 [%]
Antigüedad del parque	8,75 [años]
Emisiones en líneas recorridas	151 055 [tCO ₂]
Emisiones comerciales	163 696 [tCO ₂]
Factor promedio de emisión de la flota	1652 [gCO ₂ / km]

Resultados. Análisis de caso de vehículo de golf FCEREV

6.1. Propuesta de solución energética

En este capítulo se plantea la solución para la gestión energética de la flota de vehículos de golf. Muestra un análisis del funcionamiento del vehículo a partir de la simulación por el campo de golf contrastado con pruebas reales que se realizaron, de esta manera se determina la precisión entre los parámetros medidos y simulados, además, analiza la gestión de la carga para este tipo de vehículos. Al ser un vehículo híbrido con pila de combustible se debe gestionar dos tipos de energía: la eléctrica y su carga hacia las baterías por medio de la red eléctrica y el repostaje de H_2 en la botella de hidruros metálicos, generado a partir de la electrólisis del agua con un electrolizador PEM y su conexión a la red eléctrica.

6.2. Ajuste del perfil de velocidad del recorrido por el campo de golf

Por la concepción del juego se deben realizar paradas entre hoyos, a su vez que en cada hoyo puede haber varios golpes o tiros que incluyan más paradas, se estima un tiempo para una partida completa en 195 minutos en promedio. Se han tratado los perfiles de velocidad expuestos anteriormente en base a esta aseveración y se han determinado nuevos perfiles de velocidad para los tramos 1 y 2 como se observa en la Figura 6.1 a y b respectivamente, estas incluyen las paradas que pueden darse por circunstancias del juego.

(a)

(b)

Figura 6.1. Perfiles de velocidad ajustados: (a) Ruta 1. (b) Ruta 2.

6.3. Esfuerzo de tracción en el recorrido

Un correcto diseño del sistema de propulsión debe garantizar que el esfuerzo tractor en el distinto rango de velocidades no exceda el esfuerzo tractor máximo calculado a partir de la expresión (3.5). De acuerdo con el perfil de velocidad obtenido en un campo de golf las capacidades máximas raramente se utilizan, de hecho, la mayor parte del tiempo el sistema de propulsión opera a carga parcial como se puede ver en la Figura 6.2. El rango de funcionamiento depende en gran medida de las condiciones de manejo como aceleraciones, desaceleraciones, subidas o bajadas por pendientes, sin embargo, el perfil

de velocidad obtenido se puede asumir como el de comportamiento típico de un conductor en un campo de golf, por lo que el par del motor eléctrico cumple el distinto rango de requerimientos. Se debe mencionar que el motor eléctrico al funcionar en varios rangos de velocidad angular y en distintas condiciones, su rendimiento difiere del máximo, por lo que se lo ha ensayado en un banco de pruebas, para conocer la curva de par motor y el rendimiento dependiendo de la velocidad, de esta manera determinar las condiciones del rendimiento en los distintos puntos de operación. Lo antes mencionado se muestra en la Figura 6.3.

Figura 6.2. Esfuerzo de tracción en diferentes puntos operativos para las rutas 1 y 2.

Figura 6.3. Curva de par y rendimiento del motor eléctrico HPQ3–48.

6.4. Gestión de la potencia y energía del sistema propulsor

Se ha simulado el comportamiento del vehículo de golf a partir del perfil de velocidad de la Figura 6.4 que es la unión de la ruta 1 y 2, el recorrido del trayecto es cercano a 8 km y lleva un tiempo de tres horas y quince minutos realizarlo como se mencionó anteriormente.

La demanda de potencia instantánea del motor eléctrico (Figura 6.5) se cubre en gran medida por las baterías y el estado de carga de estas dependerá de las condiciones de funcionamiento. En la Figura 6.6 se puede observar la potencia que suministra el paquete de baterías durante el recorrido, con picos cercanos a los 6 kW para las condiciones más demandantes. Además, se observa la potencia media de la pila de combustible que es de 128 W tomada de los ensayos realizados. La pila proporciona su energía durante todo el recorrido del trayecto, de hecho, al partir de un SOC inicial del 90% asumido al empezar la jornada, la pila nunca detiene su funcionamiento trabajando a

régimen constante, debido a que su potencia es pequeña y su función es principalmente cargar las baterías para mantener un SOC alto al final de la jornada.

En la Figura 6.7 se puede observar el consumo total de energía eléctrica durante el trayecto. El balance muestra que durante el ciclo de conducción se consumió una cantidad de energía total del sistema de 0,597 kWh (Total Output Energy), de los cuales 0,168 kWh (Energy discharge) fueron de la energía propia de la batería, 0,079 kWh de la frenada regenerativa y 0,350 kWh (Total Input Energy) a partir de la energía de la pila de combustible.

Figura 6.4. Perfil de velocidad completo (ruta 1 y ruta 2).

Figura 6.5. Potencia instantánea del motor eléctrico.

Figura 6.6. Potencia instantánea de batería de tracción y pila de combustible.

Figura 6.7. Energía consumida durante el ciclo

6.5. Estado de carga en modo EV y FCEREV

De la simulación realizada para el recorrido completo se observan los resultados del estado de carga para el modo eléctrico (Figura 6.8) y para el modo eléctrico con pila de combustible (Figura 6.9). Al recorrer los 8 km del circuito, el estado de carga en modo EV pasó de un SOC inicial de 90% a un SOC final de 73,17%, es decir disminuyó el 16,83%, a diferencia del modo FCEREV donde el estado de carga al terminar un recorrido fue de 85,0% con una disminución de tan solo 5,0% al inicial.

Figura 6.8. Variación del estado de carga durante el ciclo de conducción en modo EV.

Figura 6.9. Variación del estado de carga durante el ciclo de conducción en modo FCEREV.

Los resultados obtenidos son favorables, ya que lo que se pretende con esta disposición es extender la autonomía del vehículo para que pueda realizar la mayor cantidad de recorridos en un día. El objetivo es finalizar la jornada con un SOC no menor al 30%, de esta manera extender la vida útil de las baterías, pero sobre todo tener la disponibilidad completa del vehículo durante todos los días del año. El análisis se fija especialmente en los días de verano donde los recorridos pueden empezar a las 06:30 am y finalizar a las 11:30 am, lo que llevaría a exigencias de hasta cinco recorridos. En modo eléctrico no se podría pasar de los tres recorridos ya que se finalizaría con un SOC de 39,51% que imposibilita un cuarto recorrido, sin embargo, al disponer el vehículo de una

pila de combustible de pequeño tamaño se puede extender la autonomía y poder realizar dos recorridos más sin necesidad de realizar la carga diurna del vehículo.

El hidrógeno que alimenta la pila de combustible se encuentra almacenado en hidruros metálicos, la botella tiene un volumen de 2400 cm³, pesa 6,5 kg y posee una cantidad de 0,085 kg-H₂, permite extender la autonomía en 11,7 km en relación con el modo eléctrico, finalizando la batería con un estado de carga de 56,45% después de cinco recorridos. La Tabla 6.1 muestra los resultados relevantes.

Tabla 6.1. Comparación entre los modos EV y FCEREV.

Parámetro	Modo EV	Modo ERFCEV	Diferencia
Autonomía (km)	30,8	42,5	11,7
Consumo de H ₂ (kg/100 km)	-	0,200	-
C _{ini} (Ah)	94,5	94,5	-
C _{fin} ^a (Ah)	76,83	89,26	12,43
SOC _{ini} (%)	90,0	90,0	-
SOC _{fin} ^a (%)	73,17	85,0	11,83
SOC _{fin} ^b (%)	56,34	80,0	23,66
SOC _{fin} ^c (%)	39,51	75,0	35,49

^a Después de un recorrido en el campo de golf.; ^b Después de un recorrido en el campo de golf; ^c Después de un recorrido en el campo de golf.

6.6. Análisis comparativo con otras tecnologías de baterías.

En función de lo detallado en el capítulo 2 (apartado 2.6.2), la Tabla 6.2 muestra una serie de comparaciones a partir de varias simulaciones hechas con las diferentes tecnologías de batería aplicadas al modelo del vehículo de golf. La energía total consumida y el estado de carga SOC se han obtenido para cada tipo de batería, donde ΔE y ΔSOC es la variación de energía y estado de carga respectivamente entre la tecnología usada (Baterías de plomo-ácido) y el resto de las tecnologías (Ni-MH, Ion – litio y Na/NiCl₂ – Zebra). Como se puede ver, la tecnología menos eficiente es la de las baterías de plomo-ácido, sin embargo, sus costos son mucho más bajos que el resto de las tecnologías, por lo que, para las aplicaciones de este tipo son las más adecuadas.

Tabla 6.2. Comparaciones entre diferentes tecnologías de baterías aplicadas a la simulación de golf car.

Tecnología de Batería	Energía específica (Wh/kg)	Costo de implementación (\$)	Energía Total de salida (kWh)	ΔE (%)	SOC (%)	ΔSOC (%)
Plomo – Ácido	47,3	504	0,597	0	85,0	0
Níquel – Hidruros Metálicos (Ni-MH)	70,0	3528	0,5829	-2,36	85,67	0,79
Ion Litio (Li-Ion)	100	3780	0,5722	-4,15	85,78	0,92
Sodio – Cloruro de Níquel (Na/NiCl ₂ , Zebra)	100	1260	0,5784	-3,11	85,70	0,82

6.7. Comparación entre resultados experimentales y simulados

El prototipo del vehículo de golf eléctrico se observa en la Figura 6.10, en el compartimento posterior que se muestra en la Figura 6.11 se observa la distribución de los componentes del sistema de propulsión como: el motor eléctrico, elementos del sistema de almacenamiento de energía, además del sistema de pila de combustible con sus respectivos componentes. Finalmente, en la Figura 6.12 se observa el equipo de instrumentación utilizado para la adquisición de datos de las distintas variables físicas utilizadas, tales como voltaje y corriente de batería, pila de combustible y el de la salida del convertidor DC-DC, también la obtención de los perfiles de velocidad y de altura. El equipo permite ingresar ecuaciones para el cálculo de otros datos en función de las variables medidas, a partir de los cuales se han obtenido: la potencia de la pila de combustible, la potencia del paquete de baterías y la potencia a la salida del convertidor, además del consumo de hidrógeno a partir de la curva del fabricante. En la Tabla 6.3 se muestra una comparativa entre los resultados medidos en las pruebas realizadas y los simulados en el software, se puede apreciar que el margen de error no supera el 6%.

Tabla 6.3. Comparaciones entre pruebas medidas y simuladas.

Parámetro	Medido*	Simulado	Error
Consumo de H ₂ (kg/100 km)	0,132	0,13	1,5%
Consumo total de energía (kWh)	45,80	43,2	-5,6%
Consumo de energía por km (kWh/km)	87,68	82,69	-5,6%

* Las pruebas de análisis se basan en un recorrido de 522,41 metros en pista llana con una velocidad mínima de 0 km/h y 20 km/h de máxima.

Figura 6.10. Vehículo eléctrico de golf de autonomía extendida con pila de combustible.

Figura 6.11. Componentes del sistema de propulsión.

Figura 6.12. Adquisición de datos experimentales.

6.8. Gestión de la energía consumida por la flota

Con los parámetros fijados en el apartado 5.4 se han definido tres casos: En el caso 1, donde se realizan tres recorridos como máximo por vehículo (modo EV), con un factor de ocupación de la flota del 50% y con un funcionamiento durante 273 días, el estado de carga disminuyó del 90% al 39,51% es decir una variación del 50,49%. Para el caso 2, donde se realizan hasta cuatro recorridos por vehículo (modo FCEREV) con un factor de ocupación de la flota del 60 % y un funcionamiento durante 35 días, a pesar de realizar más recorridos, el estado de carga del vehículo disminuyó del 90% al 70% con una variación del SOC de tan solo 20%. Para el tercer caso, donde se realizan hasta cinco recorridos (modo FCEREV) con un factor de ocupación del 80% y un funcionamiento de 57 días, el estado de carga del vehículo pasa de un estado inicial del 90% al 65%, es decir una variación del 25%. La Tabla 6.4 muestra los resultados principales del modelo presentado para la gestión de la energía de la flota y la Figura 6.13 el consumo de energía eléctrica e hidrógeno para cada caso, además de los valores anuales para la flota.

Respecto al costo del kilovatio-hora (kWh) de energía eléctrica en España, con la tarifa 2.0 DHS que es una tarifa especial para vehículos eléctricos, está estimado en 0,062

€/kWh sin incluir impuestos según IDAE [181], teniendo en cuenta el impuesto sobre la electricidad de 5,11% y el de 21 % del IVA, el precio de referencia será de 0,78 €/kWh, respecto al costo del hidrógeno el estudio plantea que sea obtenido a partir de la electrólisis del agua con el uso de un electrolizador PEM de 6 kW con un consumo de 63,1 kWh/kg-H₂, y una tasa de producción de hidrógeno de 0,5 a 1,0 Nm³ / h, con una producción máxima 2,27 kg-H₂ por día [182–185], su conexión es a partir de la red eléctrica.

Tabla 6.4. Resultados de la gestión de energía en la flota.

Parámetro	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Ruta recorrida [km]	24	32	40
Días de funcionamiento	273	35	57
Factor de ocupación [%]	50	60	80
ΔSOC [%]	50,49	20	25
WSER [kWh/km]	127,4	37,8	37,8
Tiempo de carga [h]	3,42	1,35	1,7
Consumo eléctrico diario (unitario) [kWh]	3,05	1,21	1,51
Consumo eléctrico anual (Flota) [kWh]	8344,8	508,6	1380,3
Consumo diario de H ₂ (unitario) [kg-H ₂]	-	0,064	0,08
Consumo de H ₂ anual de la flota [kg-H ₂]	-	26,88	72,96
Coste anual de la carga de energía eléctrica [€]	650,9	39,66	107,66
Coste anual del repostaje de H ₂ * [€]	-	153,89	417,70

* No incluye el coste del electrolizador, ni la botella de almacenamiento

Figura 6.13. Consumo anual de energía eléctrica y de hidrógeno de la flota.

Resultados. Análisis de caso de autobús eléctrico urbano

7.1. Esfuerzo de tracción en el recorrido

Al igual que en el caso anterior, se debe garantizar que el esfuerzo tractor en el distinto rango de velocidades no exceda el esfuerzo tractor máximo del sistema de propulsión. Al diseñar el tren propulsor se han tenido en cuenta las siguientes prestaciones: velocidad máxima, aceleración y pendiente máxima. Sin embargo, bajo una conducción normal estas capacidades raramente se utilizan, de hecho, la mayor parte del tiempo el sistema de propulsión opera a carga parcial y el rango de funcionamiento depende en gran medida de las condiciones de manejo como aceleraciones, desaceleraciones, subidas o bajadas por pendientes. Estas variaciones están condicionadas por situaciones de tráfico (condiciones de recorridos en la zona urbana con rutas predeterminadas y operación regular) como las del propio vehículo [62].

Existe gran dificultad en estimar con exactitud y a nivel cuantitativo el esfuerzo tractor y la variabilidad de la velocidad en condiciones de tráfico real, no obstante, los ciclos de conducción tratan de emular típicas condiciones de tráfico. Para este análisis se ha tenido en cuenta un ciclo experimental en rutas urbanas de Madrid que, a diferencia de ciclos homologados, tiene en cuenta el perfil de altura del recorrido. La Figura 7.1 muestra los distintos valores del esfuerzo tractor de acuerdo con el recorrido de las rutas.

Figura 7.1. Esfuerzo de tracción en diferentes puntos operativos para las rutas 1 y 2.

7.2. Gestión de la potencia y energía del sistema propulsor

El comportamiento del modelo de simulación del autobús urbano ha sido validado a partir de las rutas 1 y 2 (Figura 3.22 y Figura 3.23 respectivamente) que tienen un recorrido de 17,52 km y lleva un tiempo de 6216 segundos realizarlo (1h, 43 min y 36 s). La Figura 7.2a y la Figura 7.3a muestran el consumo eléctrico del vehículo durante el trayecto recorrido en la línea C1. Se puede observar que la energía eléctrica neta descargada por la batería durante el recorrido de la ruta 1 fue de 12,48 kWh mientras que para la ruta 2 de 3,79 kWh. En la Figura 7.2b y la Figura 7.3b se observa la potencia instantánea que suministra el paquete de baterías durante el recorrido, los picos de potencia máximos son hasta de 136 kW para tracción y 180 kW para regeneración en la ruta 1, mientras que para la ruta 2 de 142 kW para tracción y 135 kW para regeneración.

En la Figura 7.2c y la Figura 7.3c (para las rutas 1 y 2 respectivamente) se observa la potencia eléctrica y mecánica en el motor eléctrico, como era de esperar existen pérdidas de potencia ($P_{EM_{loss}}$) causadas por la fricción, las pérdidas en el hierro y en el cobre, además, también se debe tomar en cuenta las pérdidas de potencia por el rendimiento del inversor DC-AC, que en este modelo lo lleva incluido en los bloques del motor eléctrico (bloques 12 y 13 de la Figura 4.2).

Las curvas del estado de carga (SOC) durante los recorridos de las rutas 1 y 2 se pueden observar en la Figura 7.2d y la Figura 7.3d respectivamente. En el trayecto de la ruta 1 con una distancia de 8,12 km el SOC disminuyó un 3,83 % mientras que en la ruta 2 con una distancia de 9,65 km el SOC disminuyó un 1,28 %. El mayor consumo de energía de la ruta 1 tiene que ver con la orografía del trayecto, ya que al empezar la ruta se encuentra a 628 msnm y al finalizarla en 725 msnm (un incremento de 97 m), a diferencia de la ruta 2 que por el contrario empieza la ruta en 725 msnm y termina en 628 msnm (un decremento de 97 m). Esto se puede observar en la Figura 3.22 para la ruta 1 y Figura 3.23 para la ruta 2.

Finalmente, la Figura 7.2e y Figura 7.3e muestran los diagramas de energía durante los trayectos de ambas rutas. Durante la ruta 1 la energía total de salida fue de 17,35 kWh; 12,48 kWh fueron cedidos exclusivamente por la batería (Energía descargada) y 4,87 kWh por la frenada regenerativa (Energía total de entrada). Para la ruta 2 el consumo de energía total de salida fue de 11,98 kWh; 3,79 kWh fueron provenientes de la energía propia de la batería, mientras que 8,19 kWh de la frenada regenerativa. La energía total que cede el paquete de baterías en un ciclo completo es de 16,27 kWh. La Tabla 7.1 muestra un resumen de los principales datos obtenidos.

(a)

(b)

(c)

(d)

(e)

Figura 7.2. Comportamiento del modelo de simulación del autobús urbano para la Ruta 1.

- (a) Perfil de velocidad y energía eléctrica consumida. (b) Potencia instantánea de la batería.
 (c) Potencia eléctrica y mecánica del motor eléctrico. (d) Estado de carga. (e) Energía consumida durante el ciclo de conducción.

(d)

(e)

Figura 7.3. Comportamiento del modelo de simulación del autobús urbano para la Ruta 2.

(a) Perfil de velocidad y energía eléctrica consumida. (b) Potencia instantánea de la batería. (c) Potencia eléctrica y mecánica del motor eléctrico. (d) Estado de carga. (e) Energía consumida durante el ciclo de conducción.

Tabla 7.1. Resultados relevantes obtenidos durante la simulación de rutas.

Especificaciones	Ruta 1	Ruta 2	Ruta total línea C1
Energía total de salida [kWh]	17,35	11,98	29,33
Energía de entrada [kWh]	4,87	8,19	13,06
Energía eléctrica consumida [kWh]	12,48	3,79	16,27
Energía eléctrica consumida* [kWh]	124,80	37,90	162,70
Potencia eléctrica máxima en tracción (Baterías) [kW]	136,32	142,03	142,03
Potencia eléctrica máxima en regeneración (Baterías) [kW]	180,43	134,43	180,43
Potencia eléctrica máxima del motor en tracción [kW]	87,61	64,61	2 x 87,61
Potencia eléctrica máxima del motor en regeneración [kW]	70,76	73,62	2 x 73,62
Potencia mecánica máxima del motor en tracción [kW]	80,57	59,52	2 x 80,57
Potencia mecánica máxima del motor en regeneración [kW]	76,57	79,44	2 x 79,44
Variación del estado de carga (ΔSOC) [%]	3,83	1,28	5,11
Variación del estado de carga (ΔSOC) ** [%]	38,30	12,8	51,10

* Energía eléctrica consumida por el autobús urbano al final de la jornada (18 h – 10 viajes).

** Variación del SOC al final de la jornada de trabajo (18 h – 10 viajes).

7.3. Ajuste de la capacidad de la batería

La capacidad de la batería en un primer diseño se planteó en función de lo que ofrece las distintas marcas a nivel comercial (Tabla 2.1), sin embargo, de acuerdo con el comportamiento del autobús urbano en la ruta establecida, una forma adecuada de calcular la capacidad de la batería viene determinada por la siguiente expresión:

$$E_{BES} = \frac{\Delta E_{max}}{SOC_t - SOC_b} \quad (7.1)$$

Donde ΔE_{max} es la variación de energía durante el ciclo (162,7 kWh), SOC_t y SOC_b es el máximo y mínimo estado de carga de la batería. Por razones de rendimiento, el rango adecuado de $SOC_t - SOC_b$ para baterías de este tipo oscila entre 0,7 y 0,4. Para un valor de 0,6 la capacidad sería de alrededor de 270 kWh y para un valor de 0,5 la capacidad sería de 325 kWh. Por tanto, una capacidad nominal del paquete de baterías en este rango de valores sería apropiada para esta aplicación.

Es importante mencionar que, al ser un vehículo eléctrico de baterías, se debe garantizar la autonomía, así como su funcionamiento en las transiciones de potencia, por

lo que un SOC bajo limita gravemente su salida de potencia y al mismo tiempo conduce a una bajo rendimiento debido a un aumento en la resistencia interna.

7.4. Determinación de emisiones CO₂ a partir de la generación eléctrica en REE

El resultado más relevante en este análisis es la energía neta consumida por el autobús una vez terminada la jornada (Energía eléctrica consumida*), este valor es la energía descargada por la batería durante el recorrido diario.

Para que el paquete de baterías del autobús vuelva al estado de carga completo debe recargar la energía consumida (162,7 kWh). Para estimar la energía eléctrica requerida, se debe contabilizar también las pérdidas adicionales que existen por el rendimiento de cada componente del sistema de red eléctrica como: la transmisión (η_{trans}) y distribución (η_{dist}), además del requerimiento de energía en el enchufe cargador (WSER) el cual tiene en cuenta el rendimiento de carga del conector a la batería ($\eta_{charged}$) y el rendimiento de carga de la batería ($\eta_{BAT_{Ch}}$). Aplicando las ecuaciones (5.2) y (5.3) y tomando en cuenta los rendimientos de la Tabla 5.2 se calcula que la energía cedida por la red eléctrica para la recarga completa de las baterías del autobús tras una jornada laboral es de 213,3 kWh en el peor caso y 191,8 kWh en el mejor de los casos. En este estudio se plantea tomar el rendimiento medio, por lo que la energía que cede la red es aproximadamente de 200 kWh.

Los sistemas de carga rápida para este tipo de aplicaciones tienen como mínimo una potencia de 50 kW [9], para este caso se ha utilizado una potencia de carga de 60 kW [186], por lo que la carga completa tendrá un tiempo de 3 horas con 20 minutos aproximadamente. Como la ventana de conexión a la red es corto, se plantea conectar a partir de las 00:30 que es cuando el autobús ya ha cumplido su jornada laboral y ha pasado el tiempo de espera por logística, además, como se puede ver en la Figura 7.4 existen factores positivos

asociados a este horario de conexión como: un aporte importante de energías renovables especialmente energía eólica, corresponde al valle de la curva de demanda de energía de la red y el costo de la energía es menor.

Figura 7.4. Demanda típica del del mix eléctrico de España para un día de verano (Julio 30, 2017 [42]).

La Figura 7.5 muestra el análisis del factor de emisión (FE_{mix}) a partir de las curvas de demanda de todos los días del año 2017. La Tabla 7.2 muestra que con una conexión del vehículo en el horario entre 00:30 a 03:50 el factor de emisión anual en este horario (FE_{prom}) es en un 1,2 % menor al factor de emisión promedio anual peninsular (FE_{REE}). Aquí también se muestra un resumen del promedio mensual del año 2017 de la emisiones de gCO_2 por cada kWh generado de energía eléctrica.

Figura 7.5. Factores de emisión de CO₂ del mix eléctrico español para el año 2017.

Tabla 7.2. Comparación del FE promedio en el mix eléctrico peninsular frente al FE en el horario de 00:30 a 03:50 am.

FE (gCO ₂ /kWh)	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dec	Prom.
FE _{REE}	287	229	157	169	254	294	286	245	250	301	327	260	257
FE _{prom}	322	231	155	173	243	296	271	225	234	291	332	272	254
ΔFE (%)	12,2	0,9	-1,3	2,4	-4,3	0,7	-5,2	-8,2	-6,4	-3,3	1,5	4,6	-1,2

ΔFE (%) Variación de FE_{REE} frente a FE_{prom}.

La intensidad de emisión de CO₂ del vehículo eléctrico va asociada a la conexión a la red eléctrica, sin embargo, el factor de emisión de esta varía significativamente durante el año e incluso durante el día. Estas variaciones están asociadas con la naturaleza intermitente de las centrales renovables que tienen un aporte importante en el mix eléctrico español, por lo que algunas centrales eléctricas convencionales que utilizan fuentes con combustibles fósiles deben estar a la espera, provocando un aumento en las emisiones asociadas a la generación eléctrica en caso de su empleabilidad. Por ejemplo, en otoño e invierno, la contribución de energía eólica e hidráulica puede ser significativa debido a la naturaleza lluviosa y ventosa de estas estaciones, mientras que en el verano existe una gran importancia de la energía solar térmica y fotovoltaica por el número elevado de horas de sol. A pesar de ello, debido a las variaciones de las condiciones climáticas entre los años esto no siempre se cumple.

Como se vio en el capítulo 2 dado que las centrales eléctricas de carbón y gas funcionan como centrales programadas, deben mantenerse a un nivel mínimo de operación independientemente del consumo, esto se debe a que requieren un tiempo de puesta en marcha significativo que pueden llegar hasta las 8 horas. Este aspecto denota cuando es más limpio cargar un vehículo eléctrico, lo cual puede ser durante el día o por la noche dependiendo del mes y estación del año.

La Figura 7.6 muestra un análisis de sensibilidad de la intensidad de emisión de CO₂ que el autobús eléctrico modelado tendría con varios horarios de conexión en el mix

eléctrico español. Se puede observar que la conexión entre 10:00 y 13:20 es la que menor contribución de CO₂ realiza durante el año. También se puede ver que la conexión entre 14:00 y 17:20 en el verano es la más adecuada para tener bajas emisiones de CO₂, esto se debe al gran aporte que la energía solar térmica y fotovoltaica al mix eléctrico en esos meses. La conexión nocturna no es la que menores emisiones CO₂ provoca, debido a que en la mayor parte del año provoca una intensidad de emisión de CO₂ del vehículo superior al resto de horarios de conexión, sin embargo, para este análisis de caso es el horario ideal debido a la jornada laboral. A pesar de ello los factores positivos que conlleva este horario de conexión es la de un menor coste de la energía, además, corresponde al valle de la curva de demanda de energía de la red.

Figura 7.6. Intensidad de emisión de CO₂ del autobús urbano modelado en función de distintos horarios de carga, se considera la generación del mix eléctrico español en 2017.

7.5. Factor de emisión del pozo a la rueda (WTW)

La Tabla 7.3 muestra un resumen de los principales resultados obtenidos para el autobús eléctrico urbano durante una jornada completa como: la longitud de ruta, consumo eléctrico, la energía requerida del mix eléctrico, el consumo de energía, el requerimiento de carga del mix eléctrico (C_{mix}), y la intensidad de emisión de CO₂ del vehículo, este último

viene a ser el factor de emisión del pozo al tanque (WTT) y es el utilizado para comparar y determinar las emisiones ahorradas frente a los vehículos de la flota actual.

Tabla 7.3. Detalle de los resultados simulados del bus eléctrico urbano al funcionar durante una jornada laboral completa y su conexión entre las 00:30 y 03:50 am en el mix eléctrico español.

Modelo conceptual BEV	Longitud de Ruta [km]	Consumo eléctrico [kWh]	Energía eléctrica del mix [kWh]	Consumo de energía [kWh/km]	C_{mix} [kWh/km]	EI_{veh} [gCO ₂ /km]
Autobús Urbano	175,2	162,7	200	0,93	1,15	292,1

Para estimar las emisiones de CO₂ en las distintas fases de sustitución de la flota se ha tomado en cuenta estudios anteriores [148,178,179] donde se analizó el ciclo de vida de distintos tipos de autobuses de la flota de la EMT. Para el apartado de emisiones del tanque a la rueda (TTW) se han utilizado valores obtenidos mediante ensayos sobre una ruta de 15,5 km de la EMT, los datos fueron obtenidos en condiciones de tráfico real basados en pruebas con equipos a bordo y su posterior modelado [187].

Los resultados de la Tabla 7.4 muestran que el consumo de energía en autobuses eléctricos es representativamente menor al resto de tecnologías, seis veces menor a los autobuses diésel, cercano a ocho veces menor que los autobuses GNC y cinco veces menor a los autobuses híbridos; esto se debe a la alta eficiencia de conversión de la energía que tienen los vehículos eléctricos. La intensidad de emisión relacionada al CO₂ bajo un análisis del pozo a la rueda muestra que un autobús eléctrico con el mix eléctrico español 2017 (conectado entre 00:30 y 04:50), es cinco veces menos contaminante que uno diésel, cuatro veces menos que los GNC y tres veces menor que los híbridos.

Tabla 7.4. Comparación de las emisiones de CO₂ de los diferentes autobuses de la flota frente al modelo propuesto.

Tecnología del Autobús Urbano	Peso de la flota [%]	Consumo de energía [kWh/100 km]	El _{veh} - WTT [gCO ₂ /km]	El _{veh} - TTW [gCO ₂ /km]	El _{veh} - WTW [gCO ₂ /km]
Diésel*	34,34	571,19	162,14	1326,00	1488,14
Híbrido**	2,34	470,22	153,88	796,00	949,88
GNC***	61,56	727,57	186,92	1014,00	1200,92
Eléctrico****	1,76	93,0	292,10	0,00	292,10

* Incluye todos los autobuses diésel.

** Incluye todos los autobuses híbridos.

*** Incluye todos los autobuses de gas natural comprimido GNC.

**** Corresponde a los valores simulados en AVL Cruise.

La Figura 7.7 muestra la reducción de emisiones de CO₂ que se produciría en caso de una implementación total de la flota con autobuses eléctricos en un periodo de diez años, considerando el aporte del actual mix eléctrico. Se toma como referencia la flota actual de autobuses (Figura 5.2). En el año 2017 según la EMT las emisiones de CO₂ en líneas recorridas de la flota fue de 151 ktCO₂. Aplicando el escenario propuesto en este trabajo de investigación: En la fase 1 prevista para 2020, al sustituir el 31,42 % de la flota correspondiente exclusivamente a autobuses diésel se estima que las emisiones se reduzcan a 84,1 ktCO₂, es decir un 44,32 % menos que las de 2017. En la fase 2 prevista en el año 2022 al remplazar el 21,37 % de la flota (2,93 % correspondiente al resto de autobuses diésel, 17,66 % de los autobuses GNC y el 0,78 % de la renovación de autobuses eléctricos del año 2007 y 2008) se estima una reducción del 55,72 % respecto a las de 2017, es decir a 66,88 ktCO₂. En la fase 3 prevista en el año 2026 sustituyendo el 19,79 % de la flota (18,91 % autobuses GNC y el 0,88 % de autobuses híbridos GNC) se estima que las emisiones se reduzcan a 50,77 ktCO₂ es decir un 66,39 % menos de emisiones que en 2017. Finalmente, en 2030 donde toda la flota pase a ser 100 % eléctrica al sustituir el restante 27,41 % de la flota (24,97 % autobuses GNC, 1,46 % autobuses híbridos y 0,98 % de la renovación de los autobuses eléctricos), las emisiones se reduzcan a 28,48 ktCO₂ es decir un 81,15 % menos que las emisiones del año 2017.

La Figura 7.8 asume las mismas condiciones descritas anteriormente, pero con el mix eléctrico español hacia el horizonte 2030 concretamente en el escenario DG2030. Con un factor de emisión de 82 gCO₂/kWh previsto para para 2030, las emisiones se pueden reducir hasta en un 93,91 % comparadas con las de 2017. La Figura 7.9 compara las emisiones de CO₂ entre los dos escenarios.

Figura 7.7. Comparación de las emisiones estimadas de CO₂ por la sustitución de la flota de autobuses en las diferentes fases a partir de la generación eléctrica 2017 en el actual mix eléctrico español.

Figura 7.8. Comparación de las emisiones estimadas de CO₂ por la sustitución de la flota de autobuses en las diferentes fases a partir de la generación eléctrica del escenario DG2030 del mix eléctrico español.

Figura 7.9. Comparación de las emisiones estimadas de CO₂ entre el mix eléctrico español actual y el del escenario DG2030.

7.6. Comparaciones entre escenarios de sustitución de la flota

Como se pudo ver en los apartados anteriores, la flota está compuesta por varias tecnologías (diésel, GNC, híbridos, eléctricos) que utilizan gasóleo, gas natural y electricidad. Existe siempre la interrogante de cual tecnología es la más contaminante y en el caso de sustituir por otra, si esta última causará mejores o peores condiciones. Para este trabajo de investigación se ha visto importante ejemplificar con un estudio hecho por López et al., al remplazar la flota de la EMT.

Dentro del proyecto ECOTRAM se midieron las emisiones contaminantes producidas por el transporte colectivo de viajeros en la ciudad de Madrid. El análisis se fijó en el efecto del impacto medioambiental con la acción conjunta de las propiedades de los ciclos de conducción, el combustible y las características de los vehículos. El modelo ha sido validado en base a los resultados de ensayos realizados en un conjunto de líneas de la Empresa Municipal de Transporte (EMT), seleccionadas por la representatividad de los ciclos de operación realizados en las mismas.

La Tabla 7.5 muestra los resultados del informe de la EMT respecto a la emisión de gases contaminantes y GEI para el año 2017. También se muestra los resultados obtenidos por López et al. en 2009, donde propone distintos escenarios de sustitución de la flota para el mismo número de kilómetros recorridos en cada una de las rutas, teniendo en cuenta los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Los autobuses que utilizan como combustible diésel se cambian a biodiésel B100 sin modificar el tipo de autobús en lo que respecta a la normativa Euro.
- Escenario 2: Todos los autobuses de diésel y biodiésel son reemplazados por una flota de vehículos que cumplen con la normativa Euro IV y son propulsados por biodiésel. La flota de vehículos de gas no se cambia.

- Escenario 3: Toda la flota de autobuses está formada por vehículos que cumplen con la normativa Euro IV y son propulsados por biodiésel.
- Escenario 4: Toda la flota de autobuses está formada por vehículos propulsados por gas natural (GNC)

Tabla 7.5. Comparación de las emisiones gases contaminantes y de GEI (CO₂) para diferentes escenarios de la flota de autobuses.

Escenarios	CO ₂ (t)	HC (t)	NO _x (t)	CO (t)	PM (t)
EMT 2017	151056	19,27	373,0	259,84	3,59
López et al. 2009	148078	69,1	1790,0	862,7	7,0
Escenarios analizados por López et al.					
Escenario 1	148311	68,6	1796,7	858,6	6,6
Escenario 2	146312	57,4	1816,9	364,8	4,2
Escenario 3	144043	5,9	1953,6	61,8	5,1
Escenario 4	155628	281,2	1227,0	1676,6	0
Escenarios propuestos por el autor					
Escenario 2017*	30271	-	-	-	-
Escenario 2020	83805	-	-	-	-
Escenario 2022	65311	-	-	-	-
Escenario 2026	46660	-	-	-	-
Escenario DG2030	9194	-	-	-	-

*El escenario 2017 supone una sustitución completa de la flota actual por autobuses eléctricos con el número de kilómetros del estudio hecho por López et al.

Se puede observar que el escenario 1 conduce a ligeras reducciones de HC, CO y PM, pero implica ligeros aumentos de CO₂ y NO_x, debido al menor poder calorífico del biodiesel en comparación con el diésel y el mayor componente oxigenado. El escenario 2 conduce a reducciones mucho más significativas en los tres contaminantes HC, CO y PM (-16,9%, -57,7% y -40,6%, respectivamente) pero conlleva aumentos de alrededor del 1,5% en NO_x. El escenario 3, donde toda la flota estaría compuesta por vehículos Euro IV con biodiesel B100 es más favorable que las anteriores ya que llevaría a reducciones más representativas de HC, CO y PM (-91.5%, -92.8% y -27%, respectivamente), aunque las emisiones de NO_x aumentarían en un 9,1%. Por último, con el escenario 4 que reemplaza toda la flota de vehículos con vehículos a gas provoca un aumento considerable de las emisiones de HC y CO, pero el lado positivo es una reducción del 31,5% en las emisiones de NO_x y una reducción del 100% en las partículas suspendidas PM. Sin embargo, también

conduce a un aumento en las emisiones de CO₂ debido a la operación de este tipo de motor (motor encendido por chispa) en un ciclo urbano.

Respecto a los escenarios planteados por el autor se puede observar que una sustitución gradual de la flota en 10 años llevaría a una disminución significativa de las emisiones de CO₂ (hasta el 94 % en el mejor de los casos), pero sobre todo eliminaría por completo las emisiones de gases contaminantes locales (PM₁₀, PM_{2.5}, NO_x, HC, CO) causadas por la flota, que en la actualidad constituye un grave problema en ciudades metrópolis como Madrid que ha llevado a las autoridades a tomar medidas como el protocolo de actuación para episodios de contaminación por dióxido de nitrógeno.

7.7. Análisis de las emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida del autobús eléctrico frente a las tecnologías tradicionales.

Considerando el estudio hecho por García et al. [148,178,188], quienes realizaron un análisis detallado del ciclo de vida de la flota de autobuses urbanos de la EMT, y comparando con los resultados obtenidos por el autor de esta investigación para los autobuses eléctricos, la Figura 7.10 muestra una comparativa de la emisiones de CO₂ durante el ciclo de vida global entre las distintas tecnologías de la flota dentro del escenario actual. Para los autobuses con motores de combustión interna la fase dominante con mucha diferencia es la fase de operación (del pozo a la rueda – WTW), que representa entre el 90 y 95% de las emisiones globales, principalmente asociadas a la combustión de los combustibles. Para los autobuses eléctricos en cambio, dado que no tienen emisiones en la fase del tanque a la rueda (TTW), su fase crítica viene a ser la etapa del pozo al tanque (WTT) con alrededor del 75 % de las emisiones globales y la etapa del ciclo de vida del vehículo ACV_{veh} (producción de materiales, ensamblaje, mantenimiento y final de vida útil del vehículo) con un 25 %, esto se relaciona principalmente a la producción de la batería que representa una gran parte de estas emisiones, debido al alto requerimiento de energía para obtener los materiales utilizados en la producción de estas.

Figura 7.10. Actuales intensidades de emisiones de CO₂ según las etapas del ciclo de vida de las tecnologías de la flota de autobuses urbanos de la EMT.

La fortaleza del vehículo eléctrico radica en que depende del mix eléctrico, a diferencia de las tecnologías tradicionales en donde su uso es dependiente de vectores energéticos fósiles importados y que difícilmente bajen su intensidad de emisión ya sea por el ciclo de combustible o su uso en el vehículo. Se puede observar que con el actual mix eléctrico español, un autobús eléctrico tiene una intensidad de emisión de CO₂ significativamente menor en el ciclo de vida global del vehículo que el resto de las tecnologías, hasta cuatro veces menos que un vehículo a diésel y cercano a tres veces menos que los de gas natural y los híbridos diésel.

Si se proyecta el cambio del mix eléctrico español bajo el escenario DG2030 estos valores pueden resultar aún más favorables para esta tecnología, ya que las emisiones de CO₂ serían hasta nueve veces menor que los vehículos diésel, y cercano a seis veces menos contaminantes que los de gas e híbridos. La Figura 7.11 proyecta las emisiones de CO₂ para el año 2030 relacionados al ciclo de vida global de las distintas tecnologías de los autobuses urbanos de la EMT.

Figura 7.11. Intensidad de emisiones de CO₂ proyectada hacia el horizonte DG2030 según las etapas del ciclo de vida de las tecnologías de la flota de autobuses urbanos de la EMT.

Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un análisis de la gestión energética para flotas de vehículos eléctricos de baterías e híbridos con pila de combustible. Para esto se ha visto importante ejemplificar a través de dos casos de análisis, el primero corresponde a flotas de vehículos de golf con una configuración FCEREV, mientras que el segundo caso corresponde a flotas de autobuses urbanos con una configuración BEV.

En ambos casos se ha recurrido a la simulación como herramienta para estimar el consumo energía y combustible de los vehículos, además del comportamiento de los componentes del tren propulsor. Sin embargo, en el vehículo de golf también se ha podido desarrollar un modelo físico con el que se comparó los resultados.

La presente tesis doctoral ha demostrado la factibilidad para extender la autonomía de un vehículo de golf eléctrico a través de dos sistemas de almacenamiento de energía, logrando aumentar la autonomía del vehículo de 30,8 km en modo EV a 42,5 km en modo FCEREV, esto mediante la utilización de una botella de hidrógeno de 0,085 kg-H₂, lo que permite al vehículo realizar los recorridos máximos de partidas del golf en un mismo día (cinco).

A través de la simulación se ha obtenido que el estado de carga de las baterías después de tres recorridos ha finalizado en 39,51% en modo EV mientras que con 75% en modo FCEREV. El modo eléctrico no debe realizar más de tres recorridos ya que el umbral de SOC de las baterías es de 30%, mientras que en el modo FCEREV se podrían realizar hasta cinco recorridos con la botella de hidrógeno utilizada, finalizando la jornada con un SOC de 65%.

Se ha demostrado que con un sistema auxiliar con pila de combustible de pequeña potencia se puede suplir una necesidad de movilidad específica, lo que es factible para vehículos de mayores requerimientos, además de otras aplicaciones similares de vehículos como: de reparto urbano de última milla, para desplazamientos de peatones dentro de aeropuertos, recintos feriales, vecindarios, parques, etc.

Respecto a los vehículos eléctricos propulsados con baterías y su ejemplificación a través de autobuses urbanos. Se ha desarrollado un modelo de simulación de este tipo de vehículo y se ha considerado que remplazando gradualmente la flota convencional de la EMT por autobuses eléctricos en un tiempo de diez años y tomando en cuenta el escenario del cambio del mix eléctrico DG2030. Se puede concluir que:

- Un autobús eléctrico es más eficiente al tener menos pérdidas en el tren de potencia. Los resultados han mostrado que el consumo de energía en autobuses eléctricos es representativamente menor al resto de tecnologías, seis veces menor a los autobuses convencionales de diésel, cercano a ocho veces menor que los autobuses GNC y cinco veces menor a los autobuses híbridos.

- Los autobuses eléctricos son menos contaminantes que el resto de las tecnologías al tener la intensidad de emisión de CO₂ más baja. Bajo un análisis del ciclo de vida global, se demuestra que un autobús eléctrico con el mix eléctrico español actual es cuatro veces menos contaminante que un autobús diésel y alrededor de tres veces menos que un autobús GNC e híbrido, además que no emiten en el punto de uso gases de polución como: NO_x, CO, HC, PM₁₀ y PM_{2.5} que son perjudiciales para la salud. Si se tiene en cuenta el mix eléctrico español hacia el horizonte 2030 y en el escenario DG2030, un bus urbano eléctrico puede llegar a ser significativamente menos contaminante que las tecnologías convencionales: ocho veces menos contaminante que un bus diésel y cercano a seis veces menos que un autobús GNC e híbrido.

- Estudios anteriores realizados por este grupo de investigación han demostrado que, al remplazar la flota actual por autobuses GNC, a pesar de disminuir en un 31,5 % los NO_x y eliminar el 100 % de las PM, las emisiones de CO₂ se incrementan en un 5,1 %, de HC en un 307 % y CO en un 94,3 %, por lo que a opinión del autor de este trabajo la solución más viable si se quiere eliminar radicalmente los GEI y gases contaminantes es la inclusión de autobuses propulsados eléctricamente.

- Si bien aún existen controversias sobre los vehículos eléctricos principalmente por el impacto ambiental en la fabricación y al reciclaje de baterías, hay estudios que muestran que solo el 14% de la intensidad de emisión de CO₂ depende de las baterías en todo el ciclo de vida. Otro factor igualmente importante es el mix eléctrico al que se conecta el vehículo. La conexión del vehículo eléctrico a un mix eléctrico como el español, es sostenible, ya que actualmente el 33,7% de la energía eléctrica se genera a partir de fuentes renovables, con un factor de emisión más bajo que el promedio de la Unión Europea. Todas las valoraciones mostradas en esta investigación permiten pensar que la movilidad eléctrica es la solución más tangible si se quiere resolver al problema ambiental provocado por el sector del transporte.

Finalmente, esta tesis ha demostrado como la movilidad eléctrica puede ser viable tanto para aplicaciones pequeñas como vehículos de golf, como en aplicaciones de mayor alcance como el transporte público en autobuses urbanos.

Futuras líneas de trabajo

En el presente, el extenso campo de investigación del vehículo eléctrico permite tener una amplia gama de líneas de trabajo. Como continuación de este estudio y en función de lo tratado en esta tesis posibles líneas de investigación pueden ser:

1. Análisis de otras aplicaciones de movilidad: Los estudios sobre vehículos eléctricos de baterías e híbridos de pila de combustible están volcados a vehículos livianos de turismo, autobuses urbanos y vehículos pesados, sin embargo, las investigaciones en vehículos de movilidad especial como: de reparto urbano de última milla, para desplazamientos de peatones dentro de aeropuertos, recintos feriales, vecindarios, parques, etc., están reducidas.
2. Ciclo de vida de las baterías: Otra parte importante es un estudio a fondo de análisis de vida de la baterías de los vehículos eléctricos, esto quiere decir que se incluya los aspectos relacionados con un segundo uso de las baterías. Generalmente los fabricantes recomiendan el cambio del paquete de baterías una vez que la capacidad de la batería sea menor al 80% de su capacidad inicial, sin embargo, estas baterías son útiles para aplicaciones donde la exigencias transitorias sean mínimas, como por ejemplo aplicaciones estacionarias.
3. Optimización de la conexión de los vehículos a la red eléctrica: La conexión del vehículo a redes inteligentes mediante modos sofisticados de operación y estrategias de control, pueden promover mejores oportunidades de participación de los diferentes actores en el mercado de la energía, incluyendo al usuario final. En consecuencia, la interacción entre el vehículo eléctrico y las redes inteligentes facilitará el cumplimiento de los objetivos ambientales.

4. Optimización de los trenes de potencia: En base a la aplicación y ciclo de trabajo de cada vehículo se pueda determinar la mejor configuración de un vehículo eléctrico, ya sea propulsado únicamente con baterías o de forma híbrida con pila de combustible e inclusive la utilización de ultracondensadores.

Referencias

1. Messagie, M. Life Cycle Analysis of the Climate Impact of Electric Vehicles Available online: <https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/publications/TE - draft report v04.pdf>.
2. Messagie, M.; Boureima, F. S.; Coosemans, T.; Macharis, C.; Mierlo, J. Van A range-based vehicle life cycle assessment incorporating variability in the environmental assessment of different vehicle technologies and fuels. *Energies* **2014**, *7*, 1467–1482, doi:10.3390/en7031467.
3. European Commission EU Reference Scenario 2016 - Energy, transport and GHG emissions - Trends to 2050. *Energy, Transp. GHG Emiss. - Trends to 2050* **2016**, *220*, doi:10.2833/9127.
4. [wwwreees El Sistema Eléctrico Español - Infografía \(paginado\)](#);
5. Ministerio de Industria Comercio y Turismo de España. Comisión de Expertos de Transición Energética. Análisis y propuestas para la descarbonización. Available online: <https://www.mincotur.gob.es/es-es/GabinetePrensa/NotasPrensa/2018/Documents/Resumen20180402Veditado.pdf> (accessed on Jan 5, 2019).
6. Moliner, R.; Lázaro, M. J.; Suelves, I. Analysis of the strategies for bridging the gap towards the Hydrogen Economy. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 19500–19508, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.06.202.
7. Züttel, A. Materials for hydrogen storage. *Mater. Today* **2003**, *6*, 24–33, doi:10.1016/S1369-7021(03)00922-2.
8. Hutchinson, T.; Burgess, S.; Herrmann, G. Current hybrid-electric powertrain architectures: Applying empirical design data to life cycle assessment and whole-life cost analysis. *Appl. Energy* **2014**, *119*, 314–329, doi:10.1016/j.apenergy.2014.01.009.
9. International, I. E. A.; Agency, E. Global EV Outlook 2018. **2018**, doi:10.1787/9789264302365-en.
10. International Energy Agency Nordic EV Outlook 2018: Insights from leaders in electric mobility. **2018**, *99*, doi:<https://doi.org/10.1787/9789264293229-en>.
11. Proposal for post-2020 CO2 targets for cars and vans | Climate Action Available online: https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/proposal_en#tab-0-0 (accessed on Nov 22, 2018).
12. Linder, M. The role of Battery Electric Vehicles, Plug-in Hybrids and Fuel Cell Electric Vehicles. *Fuel Cell* **2010**, *68*.
13. Cells, F. Technology Roadmap. *SpringerReference*, doi:10.1007/SpringerReference_7300.
14. Shafiei, A.; Carli, G.; Williamson, S. S. Electric and Plug-In Hybrid Electric Vehicles. In *Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications*; IEA Technology Roadmaps; OECD, 2014; Vol. 9781118634, pp. 387–421 ISBN 9781118755525.
15. International Association of Public Transport. PUBLIC TRANSPORT MOVING EUROPE FORWARD Available online: https://www.uitp.org/sites/default/files/cck-focus-papers-files/PUBLIC_TRANSPORT - MOVING EUROPE FORWARD.pdf (accessed on Oct 17, 2018).

16. Proterra. CATALYST® : 40 FOOT BUS SPECIFICATIONS FC Series XR Series E2 Series Available online: <https://www.proterra.com/wp-content/uploads/2016/08/Proterra-Catalyst-Vehicle-Specs.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
17. Auto., B. K7 Electric Transit Bus. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2018/04/k7m.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
18. BYD Auto. K9s Electric Transit Bus. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2018/04/k9s.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
19. BYD Auto. K9 Electric Transit Bus. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2018/04/k9mc.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
20. BYD Auto. K11 Electric Transit Bus. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2017/06/k11.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
21. BYD Auto. C6 Electric Motor Coach. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2018/04/c6.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
22. BYD Auto. C9 Electric Motor Coach. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2018/04/c9.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
23. BYD Auto. C10 Electric Motor Coach. Available online: <http://en.byd.com/usa/wp-content/uploads/2017/06/c10.pdf> (accessed on Jul 20, 2018).
24. IRIZAR S. Coop. i2e: Autobús urbano de 12m con tracción y climatización 100% eléctrica. Available online: <http://www.irizar.com/wp-content/uploads/2016/02/Caso-Práctico-IHOBE.pdf> (accessed on Jul 18, 2018).
25. DesignLine Corporation. DesignLine Eco-Smart I. Available online: https://cptdb.ca/wiki/index.php?title=DesignLine_Eco-Smart_I (accessed on Jul 16, 2018).
26. EBUSCO®. EBUSCO® ELECTRIC CITYBUS 2.1. Available online: <https://ebusco.eu/electric-buses/#top> (accessed on Jul 10, 2018).
27. Bloch-Rubin, Ted; Gallo, Jean-Baptiste, Tomic, J. *Peak Demand Charges and Electric Transit Buses*; 2014; Vol. 5605;.
28. New Flyer Industries. Xcelsior CHARGE™. Available online: <https://www.newflyer.com/site-content/uploads/2018/03/Xcelsior-CHARGE-compressed.pdf> (accessed on Jul 14, 2018).
29. ZEPS technology Available online: <http://zepsdrive.com/technology/> (accessed on Jul 15, 2018).
30. Nordic Energy Research. Copenhagen trial with 12 m B.Y.D K9 electric buses Available online: <http://www.nordicenergy.org/wp-content/uploads/2018/02/3.-Test-of-large-charged-electric-buses-in-Copenhagen-Victor-Hug.pdf> (accessed on Jul 26, 2018).
31. Baterías de litio para vehículos eléctricos | REVE – Revista Eólica y del Vehículo Eléctrico Available online: <https://www.evwind.com/2013/02/01/baterias-de-litio-para-vehiculos-electricos-2/> (accessed on Nov 22, 2018).
32. Cordier, D. J. Mineral Commodity Summaries. *U.S. Geol. Surv.* **2012**, 196, doi:<http://dx.doi.org/10.3133/70140094>.
33. Tesla.Inc Supercargador TESLA Available online: https://www.tesla.com/es_ES/supercharger

(accessed on Apr 13, 2019).

34. IEA International Energy Agency World: Indicators for 1990. IndicatorsBalances.
35. IEA International Energy Agency World: Indicators for 2015. IndicatorsBalances.
36. IEA (International Energy Agency). Key World Energy Statistics. **2017**, 1–97, doi:10.1787/9789264039537-en.
37. IEA (International Energy Agency). *Energy Policy Review: Spain 2015*; Energy Policies of IEA Countries; OECD Publishing, 2015; ISBN 9789264239241.
38. IEA (International Energy Agency) CO₂ emissions from fuel combustion. *Oecd/lea* **2016**, 1–155, doi:10.1787/co2_fuel-2016-en.
39. Nederhoff, E. *Transport Energy and CO₂ : Moving towards Sustainability - Books - OECD iLibrary*; 2009; ISBN 9789264073166.
40. Ministerio de Agricultura y Pesca; Alimentación y Medio Ambiente. *Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero 1990 - 2016*; 2018;
41. Reay, D.; Sabine, C.; Smith, P.; Hymus, G. Climate change 2007: spring-time for sinks. *Nature* **2007**, 446, 727–8, doi:10.1038/446727a.
42. Red Eléctrica de España. Demanda Peninsular de Energía en tiempo real. Available online: <https://www.ree.es/es> (accessed on Nov 13, 2018).
43. Red Eléctrica de España. El sistema eléctrico Español 2017. Available online: <https://www.ree.es/es> (accessed on Nov 13, 2018).
44. Technology Roadmap: Solar Photovoltaic Energy. **2010**, doi:10.1787/9789264088047-en.
45. Agency, I. E. Solar Photovoltaic Energy. **2015**, 60, doi:<https://doi.org/https://doi.org/10.1787/9789264238817-en>.
46. Linares, P.; Frías, P.; Gómez, T. Evaluación del potencial de las diversas fuentes de energía renovable y de las tecnologías para su aprovechamiento: oportunidades y retos para el sector de la energía. *Nota d'Economia* **2010**, 101.
47. International Energy Agency. *Technology Roadmap: Wind Energy*; IEA Technology Roadmaps; OECD Publishing, 2009; ISBN 9789264088184.
48. Pineda, I.; Pierre Tardieu, W. *Wind in power 2017 European Statistics*; 2018;
49. International Energy Agency. *Technology Roadmap Wind Energy*; IEA Technology Roadmaps; OECD, 2015; ISBN 9789264238831.
50. International Energy Agency. *World Energy Statistics 2017*; OECD, 2017; ISBN 9789264278073.
51. Branker, K.; Pathak, M. J. M.; Pearce, J. M. A review of solar photovoltaic levelized cost of electricity. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, 15, 4470–4482, doi:10.1016/J.RSER.2011.07.104.
52. DOE *Levelized Cost of Energy (LCOE)*. U.S. Department of Energy; 2016;
53. International; Electrotechnical; Commission Electrical energy storage. *Power Eng. J.* **2011**, 12, 177–

181, doi:10.1049/pe:19980412.

54. IEA International Energy Agency *Technology Roadmap of Energy Storage*; Springer US, 2014;
55. Moura, S. J.; Siegel, J. B.; Siegel, D. J.; Fathy, H. K.; Stefanopoulou, A. G. Education on vehicle electrification: Battery systems, fuel cells, and hydrogen. In *2010 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2010*; IEEE, 2010; pp. 1–6.
56. Miller, J. M. Energy storage system technology challenges facing strong hybrid, plug-in and battery electric vehicles. *2009 IEEE Veh. Power Propuls. Conf.* **2009**, 4–10, doi:10.1109/VPPC.2009.5289879.
57. Mahmoudzadeh Andwari, A.; Pesiridis, A.; Rajoo, S.; Martinez-Botas, R.; Esfahanian, V. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *78*, 414–430, doi:10.1016/j.rser.2017.03.138.
58. Ehsani, M.; Gao, Y.; Emadi, A. *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*; CRC press, 2017; ISBN 1420054007.
59. Burke, A.; Jungers, B.; ... C. Y.-D. (CA): U. D.; 2007, undefined Battery Electric Vehicles: An Assessment of the Technology and Factors Influencing Market Readiness, Advanced Energy Pathways (AEP) Project, Task 4.1. *samersanaat.com*.
60. Dixon, J.; Nakashima, I.; Arcos, E. F.; Ortúzar, M. Electric vehicle using a combination of ultracapacitors and ZEBRA battery. *IEEE Trans. Ind. Electron.* **2010**, *57*, 943–949, doi:10.1109/TIE.2009.2027920.
61. Mahmoudzadeh Andwari, A.; Pesiridis, A.; Rajoo, S.; Martinez-Botas, R.; Esfahanian, V. A review of Battery Electric Vehicle technology and readiness levels. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *78*, 414–430, doi:10.1016/j.rser.2017.03.138.
62. López Martínez, J. M. *Vehículos híbridos y eléctricos*; Dextra, Ed.; 2nd ed.; Dextra: Madrid, 2016; ISBN 978-84-16277-42-1.
63. Burke, A.; Jungers, B.; Yang, C.; Ogden, J. No Title.
64. Morante, J. R. *El almacenamiento de electricidad*; 2014; ISBN 9788469598979.
65. Hannan, M. A.; Hoque, M. M.; Mohamed, A.; Ayob, A. Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *69*, 771–789, doi:10.1016/j.rser.2016.11.171.
66. Chau, K. T.; Wong, Y. S.; Chan, C. C. Overview of energy sources for electric vehicles. *Energy Convers. Manag.* **1999**, *40*, 1021–1039, doi:10.1016/S0196-8904(99)00021-7.
67. Sudworth, J. The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. *J. Power Sources* **2001**, *100*, 149–163, doi:10.1016/S0378-7753(01)00891-6.
68. Ouyang, L.; Huang, J.; Wang, H.; Liu, J.; Zhu, M. Progress of hydrogen storage alloys for Ni-MH rechargeable power batteries in electric vehicles: A review. *Mater. Chem. Phys.* **2017**, *200*, 164–178, doi:10.1016/j.matchemphys.2017.07.002.
69. Mazloomi, K.; Gomes, C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 3024–3033, doi:10.1016/j.rser.2012.02.028.
70. Reyes, C.; Andrade, J. Los isótopos estables del hidrógeno y el oxígeno en los estudios ecofisiológicos

de plantas. *Boletín la Soc. Botánica México* **2007**, 19–28.

71. Fayaz, H.; Saidur, R.; Razali, N.; Anuar, F. S.; Saleman, A. R.; Islam, M. R. An overview of hydrogen as a vehicle fuel. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 5511–5528, doi:10.1016/j.rser.2012.06.012.
72. Nikolaidis, P.; Poullikkas, A. A comparative overview of hydrogen production processes. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *67*, 597–611, doi:10.1016/j.rser.2016.09.044.
73. Astbury, G. R. A review of the properties and hazards of some alternative fuels. *Process Saf. Environ. Prot.* **2008**, *86*, 397–414, doi:10.1016/j.psep.2008.05.001.
74. Mazloomi, K.; Gomes, C. Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, *16*, 3024–3033, doi:10.1016/j.rser.2012.02.028.
75. Cengel, Y.; Boles, M. *Termodinámica*; MCGRAW HILL, Ed.; 8th ed.; Mcgraw Hill: Mexico, 2015; ISBN 978-607-15-1281-9.
76. Dincer, I.; Acar, C. Review and evaluation of hydrogen production methods for better sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy* **2015**, *40*, 11094–11111, doi:10.1016/j.ijhydene.2014.12.035.
77. World Nuclear Association Transport and the Hydrogen Economy - World Nuclear Association Available online: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/transport-and-the-hydrogen-economy.aspx> (accessed on Jan 29, 2019).
78. Midilli, A.; Dincer, I. Key strategies of hydrogen energy systems for sustainability. *Int. J. Hydrogen Energy* **2007**, *32*, 511–524, doi:10.1016/j.ijhydene.2006.06.050.
79. Sharma, S.; Ghoshal, S. K. Hydrogen the future transportation fuel: From production to applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *43*, 1151–1158, doi:10.1016/j.rser.2014.11.093.
80. Zeng, K.; Zhang, D. Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2010**, *36*, 307–326, doi:10.1016/j.pecs.2009.11.002.
81. Bakenne, A.; Nuttall, W.; Kazantzis, N. Sankey-Diagram-based insights into the hydrogen economy of today. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 7744–7753, doi:10.1016/j.ijhydene.2015.12.216.
82. World Nuclear Association Transport and the Hydrogen Economy Available online: <http://www.world-nuclear.org/information-library/non-power-nuclear-applications/transport/transport-and-the-hydrogen-economy.aspx>.
83. Ren, J.; Musyoka, N. M.; Langmi, H. W.; Mathe, M.; Liao, S. Current research trends and perspectives on materials-based hydrogen storage solutions: A critical review. *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 289–311, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.11.195.
84. SAKINTUNA, B.; LAMARIDARKRIM, F.; HIRSCHER, M. Metal hydride materials for solid hydrogen storage: A review☆. *Int. J. Hydrogen Energy* **2007**, *32*, 1121–1140, doi:10.1016/j.ijhydene.2006.11.022.
85. Aparicio, F.; Vera, C.; Díaz, V. *Teoría de los Vehículos Automóviles*; Dextra, Ed.; 2nd ed.; Dextra: Madrid, 2001; ISBN 9788474841466.
86. Hurtado, J. I. L.; Soria, B. Y. M. *El hidrógeno y la energía*;
87. Zhou, L. Progress and problems in hydrogen storage methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2005**, *9*, 395–408, doi:10.1016/j.rser.2004.05.005.

88. Pyle, D. S.; Gray, E. M.; Webb, C. J. Hydrogen storage in carbon nanostructures via spillover. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 19098–19113, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.08.061.
89. Schlapbach, L.; Züttel, A. Hydrogen-storage materials for mobile applications. *Nature* **2001**, *414*, 353.
90. Cheng, S.; Xu, L.; Li, J.; Fang, C.; Hu, J.; Ouyang, M. Development of a PEM fuel cell city bus with a hierarchical control system. *Energies* **2016**, *9*, doi:10.3390/en9060417.
91. Yang, J.; Sudik, A.; Wolverton, C.; Siegel, D. J. High capacity hydrogen storage materials: attributes for automotive applications and techniques for materials discovery. *Chem. Soc. Rev.* **2010**, *39*, 656–675, doi:10.1039/B802882F.
92. Department of Energy DOE Hydrogen and Fuel Cells Program Available online: https://www.hydrogen.energy.gov/h2a_production.html (accessed on Feb 6, 2019).
93. Lattin, W. C.; Utgikar, V. P. Transition to hydrogen economy in the United States: A 2006 status report. *Int. J. Hydrogen Energy* **2007**, *32*, 3230–3237, doi:10.1016/J.IJHYDENE.2007.02.004.
94. Abbas, H. F.; Wan Daud, W. M. A. Hydrogen production by methane decomposition: A review. *Int. J. Hydrogen Energy* **2010**, *35*, 1160–1190, doi:10.1016/j.ijhydene.2009.11.036.
95. Penner, S. S. Steps toward the hydrogen economy. *Energy* **2006**, *31*, 33–43, doi:10.1016/j.energy.2004.04.060.
96. Bartels, J. R.; Pate, M. B.; Olson, N. K. An economic survey of hydrogen production from conventional and alternative energy sources. *Int. J. Hydrogen Energy* **2010**, *35*, 8371–8384, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.04.035.
97. Holladay, J. D.; Hu, J.; King, D. L.; Wang, Y. An overview of hydrogen production technologies. *Catal. Today* **2009**, *139*, 244–260, doi:10.1016/J.CATTOD.2008.08.039.
98. National Energy Technology Laboratory Hydrogen from Coal Program 2008.
99. Damen, K.; Troost, M. van; Faaij, A.; Turkenburg, W. A comparison of electricity and hydrogen production systems with CO₂ capture and storage. Part A: Review and selection of promising conversion and capture technologies. *Prog. Energy Combust. Sci.* **2006**, *32*, 215–246, doi:10.1016/J.PECS.2005.11.005.
100. Myers, D. B.; Ariff, G. D.; James, B. D.; Lettow, J. S.; Thomas, C. E. S.; Kuhn, R. C. Cost and Performance Comparison Of Stationary Hydrogen Fueling Appliances. *Rev. Lit. Arts Am.* **2002**, 1–8.
101. Ni, M.; Leung, D. Y. C.; Leung, M. K. H.; Sumathy, K. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Process. Technol.* **2006**, *87*, 461–472.
102. Glatzmaier, G.; Blake, D.; Jalil, A.; Ost, A.; Showalter, S.; 'Illit--•, --- *Assessment of M Hydrogen Produc Concentrated Sola ods for n Using Energy --- •. ...1~=- MASTER*; 1998;
103. Mostafaeipour, A.; Khayyami, M.; Sedaghat, A.; Mohammadi, K.; Shamshirband, S.; Sehati, M.-A.; Gorakifard, E. Evaluating the wind energy potential for hydrogen production: A case study. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 6200–6210, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.03.038.
104. Posso, F.; Sánchez, J.; Espinoza, J. L.; Siguencia, J. Preliminary estimation of electrolytic hydrogen production potential from renewable energies in Ecuador. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, *41*, 2326–2344, doi:10.1016/j.ijhydene.2015.11.155.

105. Levene, J.; Kroposki, B.; Sverdrup, G. Wind Energy and Production of Hydrogen and Electricity — Opportunities for Renewable Hydrogen. *Natl. Renew. Energy Lab.* **2006**, 1–18, doi:10.1007/s12199-014-0398-2.
106. Bamberger, C. E.; Richardson, D. M. Hydrogen production from water by thermochemical cycles. *Cryogenics (Guildf)*. **1976**, 16, 197–208, doi:10.1016/0011-2275(76)90260-5.
107. Charvin, P.; Stéphane, A.; Florent, L.; Gilles, F. Analysis of solar chemical processes for hydrogen production from water splitting thermochemical cycles. *Energy Convers. Manag.* **2008**, 49, 1547–1556, doi:10.1016/j.enconman.2007.12.011.
108. ORHAN, M.; DINCER, I.; NATERER, G. Cost analysis of a thermochemical Cu–Cl pilot plant for nuclear-based hydrogen production. *Int. J. Hydrogen Energy* **2008**, 33, 6006–6020, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.05.038.
109. Schultz, K. R. Use of the modular helium reactor for hydrogen production. *World Nucl. Assoc. Annu. Symp.* **2003**, 1, 1–9.
110. Kothari, R.; Buddhi, D.; Sawhney, R. L. Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2008**, 12, 553–563, doi:10.1016/j.rser.2006.07.012.
111. Deutsch, T. G.; Turner, J. A. Semiconductor Materials for Photoelectrolysis Available online: https://www.hydrogen.energy.gov/pdfs/review14/pd035_deutsch_2014_o.pdf (accessed on Feb 8, 2019).
112. Tredici, M. R.; Zittelli, G. C.; Benemann, J. R. A Tubular Integral Gas Exchange Photobioreactor for Biological Hydrogen Production. In *BioHydrogen*; Springer US: Boston, MA, 1998; pp. 391–401 ISBN 978-0-306-46057-9.
113. Hallenbeck, P. C.; Benemann, J. R. Biological hydrogen production; fundamentals and limiting processes. *Int. J. Hydrogen Energy* **2002**, 27, 1185–1193, doi:10.1016/S0360-3199(02)00131-3.
114. Bolton, J. R. *Solar photoproduction of hydrogen. IEA technical report of the IEA Agreement of the Production and Utilization of Hydrogen*; Oak Ridge, TN, 1996; Vol. 57;.
115. Urbaniec, K.; Grabarczyk, R. Hydrogen production from sugar beet molasses – a techno-economic study. *J. Clean. Prod.* **2014**, 65, 324–329, doi:10.1016/J.JCLEPRO.2013.08.027.
116. Lee, D.-J.; Show, K.-Y.; Su, A. Dark fermentation on biohydrogen production: Pure culture. *Bioresour. Technol.* **2011**, 102, 8393–402, doi:10.1016/j.biortech.2011.03.041.
117. Padro, C. E. G.; Putsche, V. *Survey of the Economics of Hydrogen Technologies*; 1999;
118. Nasir Uddin, M.; Daud, W. M. A. W.; Abbas, H. F. Potential hydrogen and non-condensable gases production from biomass pyrolysis: Insights into the process variables. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, 27, 204–224, doi:10.1016/j.rser.2013.06.031.
119. Glatzmaier, G.; Blake, D.; Jal2, A.; Ost, •; Showalter, S.; 'Illlt--•, --- *Assessment of Methods for Hydrogen Production Using Concetrated Solar Energy*; 1998;
120. Richards, M.; Shenoy, A.; Schultz, K.; Brown, L.; Atomics, G. H₂-MHR Conceptual Designs Based on the SI Process and HTE H₂-MHR Conceptual Designs are Being Developed. **2005**.
121. James, B. D.; Baum, G. N.; Perez, J.; Baum, K. N. *Technoeconomic Analysis of Photoelectrochemical*

(PEC) Hydrogen Production; 2009;

122. Peighambardoust, S. J.; Rowshanzamir, S.; Amjadi, M. Review of the proton exchange membranes for fuel cell applications. *Int. J. Hydrogen Energy* **2010**, *35*, 9349–9384, doi:10.1016/j.ijhydene.2010.05.017.
123. Sharaf, O. Z.; Orhan, M. F. An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, *32*, 810–853, doi:10.1016/j.rser.2014.01.012.
124. von Spakovsky, M. R.; Olsommer, B. Fuel cell systems and system modeling and analysis perspectives for fuel cell development. *Energy Convers. Manag.* **2002**, *43*, 1249–1257, doi:10.1016/S0196-8904(02)00011-0.
125. Asensio, J. A.; Peña, J.; Pérez-coll, D.; Ruiz-, J. C.; Marrero-lopez, D.; Nuñez, P.; Ballesteros, B.; Borrós, S.; Investigación, C. De; Csic-icn, C. I. N.; Uab, C.; Barcelona, B. Pila de combustible de membrana polimérica. **2011**, 246–258.
126. Agila Gálvez, W.; Guinea, D.; María, D.; García-Alegre Sánchez, C.; Balaguer, C.; De Quirós, B. Detección y control del estado de una pila PEM para funcionamiento óptimo: Arquitectura de agentes de percepción y control Autor, 2013.
127. Wang, Y.; Chen, K. S.; Mishler, J.; Cho, S. C.; Adroher, X. C. A review of polymer electrolyte membrane fuel cells: Technology, applications, and needs on fundamental research. *Appl. Energy* **2011**, *88*, 981–1007, doi:10.1016/j.apenergy.2010.09.030.
128. Mayandía Aguirre, A. Descripción y modelado de una pila de combustible de membrana de intercambio protónico 2009.
129. Barreras, F.; Lozano, A. Hidrógeno. Pilas de combustibles de tipo PEM. *Año Int. la energía Sosten. para todos* **2012**, 6.
130. Das, H. S.; Tan, C. W.; Yatim, A. H. M. Fuel cell hybrid electric vehicles: A review on power conditioning units and topologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, *76*, 268–291, doi:10.1016/j.rser.2017.03.056.
131. Ribau, J. P.; Silva, C. M.; Sousa, J. M. C. Efficiency, cost and life cycle CO₂ optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. *Appl. Energy* **2014**, *129*, 320–335, doi:10.1016/j.apenergy.2014.05.015.
132. de Miranda, P. E. V.; Carreira, E. S.; Icardi, U. A.; Nunes, G. S. Brazilian hybrid electric-hydrogen fuel cell bus: Improved on-board energy management system. *Int. J. Hydrogen Energy* **2017**, *42*, 13949–13959, doi:10.1016/j.ijhydene.2016.12.155.
133. Kellogg, E. C.; Jr, J. A.; Cromie, R.; Smith, J. W. Energy Efficiency in Electric Golf Carts. **2009**, 1279–1285.
134. Alam, M. S.; Member, S.; Gao, D. W.; Member, S. Conversion of a Golf car into a Hybrid Fuel Cell Li-ion Battery Vehicle and Validation of the Vehicle Model for the 2006 GEM eL Golf car Using PSAT strtg are optimied tmaimie fue conom , wile In theprpecifiEd el performan constraints . **2006**, 1224–1229.
135. Liang, J.; Jian, Q. Simulation and Test of a Fuel Cell Hybrid Golf Cart. *J. Electr. Comput. Eng.* **2014**, *2014*, 1–8, doi:10.1155/2014/568906.

136. Tolj, I.; Lototsky, M. V.; Davids, M. W.; Pasupathi, S.; Swart, G.; Pollet, B. G. Fuel cell-battery hybrid powered light electric vehicle (golf cart): Influence of fuel cell on the driving performance. *Int. J. Hydrogen Energy* **2013**, *38*, 10630–10639, doi:10.1016/j.ijhydene.2013.06.072.
137. Herianto Majlan, E. PROTON EXCHANGE MEMBRANE FUEL CELL/SUPERCAPASITOR HYBRID POWER MANAGEMENT SYSTEM FOR A GOLF CART. *Malaysian J. Anal. Sci.* **2016**, *20*, 931–945, doi:10.17576/mjas-2016-2004-29.
138. Seluga, K. J.; Baker, L. L.; Ojalvo, I. U. A parametric study of golf car and personal transport vehicle braking stability and their deficiencies. *Accid. Anal. Prev.* **2009**, *41*, 839–848, doi:10.1016/j.aap.2009.04.017.
139. Oliveira, M. L. M. De Experimental Study and Numerical Simulation of NOx Selective Catalytic Reduction Applied to Diesel Vehicles. **2009**, 173.
140. Giakoumis, E. G. *Driving and Engine Cycles*; Springer International Publishing: Cham, 2017; ISBN 978-3-319-49033-5.
141. Coroller, P.; Plassat, G. Comparative Study on Exhaust Emissions From Diesel and Cng Urban Buses. **2003**, 1–12.
142. García, A.; Monsalve-Serrano, J.; Rückert Roso, V.; Santos Martins, M. E. Evaluating the emissions and performance of two dual-mode RCCI combustion strategies under the World Harmonized Vehicle Cycle (WHVC). *Energy Convers. Manag.* **2017**, *149*, 263–274, doi:10.1016/j.enconman.2017.07.034.
143. Oliveira, M. L. M. de; Silva, C. M.; Moreno-Tost, R.; Farias, T. L.; Jiménez-López, A.; Rodríguez-Castellón, E. A study of copper-exchanged mordenite natural and ZSM-5 zeolites as SCR–NOx catalysts for diesel road vehicles: Simulation by neural networks approach. *Appl. Catal. B Environ.* **2009**, *88*, 420–429, doi:10.1016/J.APCATB.2008.10.015.
144. Kivekäs, K.; Lajunen, A.; Vepsäläinen, J.; Tammi, K. City bus powertrain comparison: Driving cycle variation and passenger load sensitivity analysis. *Energies* **2018**, *11*, doi:10.3390/en11071755.
145. Vepsäläinen, J.; Kivekäs, K.; Otto, K.; Lajunen, A.; Tammi, K. Development and validation of energy demand uncertainty model for electric city buses. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *63*, 347–361, doi:10.1016/j.trd.2018.06.004.
146. Immonen, P.; Lindh, P.; Niemela, H.; Pyrhonen, J.; Sinkko, S.; Kasurinen, M. Energy saving by hybridization of a city bus. In *2014 16th European Conference on Power Electronics and Applications*; IEEE, 2014; pp. 1–8.
147. EMT-Madrid-Informe-de-Gestion-2017.
148. García Sánchez, J. A.; López Martínez, J. M.; Lumbreras Martín, J.; Flores Holgado, M. N.; Aguilar Morales, H. Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008-2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System. *Energy Convers. Manag.* **2013**, *74*, 332–343, doi:10.1016/j.enconman.2013.05.023.
149. Notter, D. A.; Gauch, M.; Widmer, R.; Wäger, P.; Stamp, A.; Zah, R.; Althaus, H.-J. Contribution of Li-Ion Batteries to the Environmental Impact of Electric Vehicles. *Environ. Sci. Technol.* **2010**, *44*, 6550–6556, doi:10.1021/es903729a.

150. Leuenberger, M.; Büsser, S. Life Cycle Assessment of Battery Electric Vehicles and Concept Cars Authors. **2010**, 2.
151. Faria, R.; Marques, P.; Moura, P.; Freire, F.; Delgado, J.; de Almeida, A. T. Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2013**, 24, 271–287, doi:10.1016/J.RSER.2013.03.063.
152. Ally, J.; Pryor, T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. *J. Power Sources* **2007**, 170, 401–411, doi:10.1016/j.jpowsour.2007.04.036.
153. Grijalva, E.; López Martínez, J.; Flores, M.; del Pozo, V. Design and Simulation of a Powertrain System for a Fuel Cell Extended Range Electric Golf Car. *Energies* **2018**, 11, 1766, doi:10.3390/en11071766.
154. Commission of the European Communities. *Implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for electric motors (Text with EEA relevance)*; 2009;
155. Gao, Z.; Lin, Z.; LaClair, T. J.; Liu, C.; Li, J. M.; Birky, A. K.; Ward, J. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy* **2017**, 122, 588–600, doi:10.1016/j.energy.2017.01.101.
156. Alvarez, R.; López, A.; De La Torre, N. Evaluating the effect of a driver's behaviour on the range of a battery electric vehicle. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part D J. Automob. Eng.* **2015**, 229, 1379–1391, doi:10.1177/0954407014561483.
157. Montenegro, D.; Rodríguez, S.; Fuelagán, J. R.; Jimenez, J. B. An estimation method of state of charge and lifetime for lead-acid batteries in smart grid scenario. *2015 IEEE PES Innov. Smart Grid Technol. Lat. Am. ISGT LATAM 2015* **2016**, 564–569, doi:10.1109/ISGT-LA.2015.7381216.
158. Yong, J. Y.; Ramachandaramurthy, V. K.; Tan, K. M.; Mithulananthan, N. A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, 49, 365–385.
159. Smith, W. J. Can EV (electric vehicles) address Ireland's CO₂ emissions from transport? *Energy* **2010**, 35, 4514–4521, doi:10.1016/j.energy.2010.07.029.
160. Rahman, A.; Mohiuddin, A. K. M.; Ihsan, S. I. A study on automated traction control system of an electrical golf car. *Int. J. Electr. Hybrid Veh.* **2011**, 3, 47, doi:10.1504/IJEHV.2011.040472.
161. Vasebi, A.; Bathaee, S. M. T.; Partovibakhsh, M. Predicting state of charge of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles by extended Kalman filter. *Energy Convers. Manag.* **2008**, 49, 75–82, doi:10.1016/j.enconman.2007.05.017.
162. Manual, U. H-200 Fuel Cell Stack User Manual Available online: <https://www.horizonfuelcell.com/h-series-stacks> (accessed on Jul 6, 2017).
163. Khanungkhid, P.; Piumsomboon, P. 200W PEM Fuel Cell Stack with Online Model-Based Monitoring System. *Eng. J.* **2014**, 18, 13–26, doi:10.4186/ej.2014.18.4.13.
164. Kulikovskiy, A. A. A Physically-Based Analytical Polarization Curve of a PEM Fuel Cell. *J. Electrochem. Soc.* **2014**, 161, F263–F270, doi:10.1149/2.028403jes.
165. Gao, D.; Jin, Z.; Zhang, J.; Li, J.; Ouyang, M. Development and performance analysis of a hybrid fuel cell/battery bus with an axle integrated electric motor drive system. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**,

41, 1161–1169, doi:10.1016/j.ijhydene.2015.10.046.

166. Gao, D.; Jin, Z.; Zhang, J.; Li, J.; Ouyang, M. Comparative study of two different powertrains for a fuel cell hybrid bus. *J. Power Sources* **2016**, *319*, 9–18, doi:10.1016/J.JPOWSOUR.2016.04.046.
167. Gao, Z.; Daw, C. S.; Smith, D. E.; LaClair, T. J.; Parks, J. E.; Jones, P. T. Comparison of Parallel and Series Hybrid Power Trains for Transit Bus Applications. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2016**, *2570*, 97–106, doi:10.3141/2570-11.
168. Göhlich, D.; Kunith, A.; Ly, T. Technology assessment of an electric urban bus system for berlin. *WIT Trans. Built Environ.* **2014**, *138*, 137–149, doi:10.2495/UT140121.
169. Varga, B. O. Electric vehicles, primary energy sources and CO2 emissions: Romanian case study. *Energy* **2013**, *49*, 61–70, doi:10.1016/J.ENERGY.2012.10.036.
170. Teixeira, A. C. R.; Sodré, J. R. Impacts of replacement of engine powered vehicles by electric vehicles on energy consumption and CO2 emissions. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2018**, *59*, 375–384, doi:10.1016/J.TRD.2018.01.004.
171. Nájera, J.; Moreno-Torres, P.; Lafoz, M.; de Castro, R.; R. Arribas, J.; Nájera, J.; Moreno-Torres, P.; Lafoz, M.; de Castro, R. M.; R. Arribas, J. Approach to Hybrid Energy Storage Systems Dimensioning for Urban Electric Buses Regarding Efficiency and Battery Aging. *Energies* **2017**, *10*, 1708, doi:10.3390/en10111708.
172. Eikerling, M.; Kulikovskiy, A. *Polymer Electrolyte Fuel Cells: Physical Principles of Materials and Operation*; 2014; ISBN 9781439854068.
173. Wu, Y.; Zhang, L. Can the development of electric vehicles reduce the emission of air pollutants and greenhouse gases in developing countries? *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2017**, *51*, 129–145, doi:10.1016/j.trd.2016.12.007.
174. Faria, R.; Moura, P.; Delgado, J.; de Almeida, A. T. A sustainability assessment of electric vehicles as a personal mobility system. *Energy Convers. Manag.* **2012**, *61*, 19–30, doi:10.1016/J.ENCONMAN.2012.02.023.
175. Centro de Investigaciones Energéticas - Medioambientales y Tecnológicas. Informe de transición del sector eléctrico horizonte 2030. Available online: <http://www.ciemat.es/cargarAplicacionAgenda.do?jsessionid=DC42B2026385A53B0FAFC1F286AC8D20?identificador=2920> (accessed on Jan 8, 2019).
176. Pradas, I. G. Propuesta de equilibrio del sistema eléctrico español para 2030 y su impacto global. **2017**, 64–73, doi:10.23800/8867.
177. Comisión Nacional de los Mercados y la Competencia. Informe de supervisión del mercado peninsular de producción de energía eléctrica. Available online: https://www.cnmc.es/listado/sucesos_energia_mercado_electrico_informes_de_supervision_del_mercado_mayorista_spot/block/250 (accessed on Jan 8, 2019).
178. Antonio García Sánchez, J.; María López Martínez, J.; Lumbreras Martín, J.; Nuria, M.; Holgado, F. Comparison of Life Cycle energy consumption and GHG emissions of natural gas, biodiesel and diesel buses of the Madrid transportation system. *Energy* **2012**, *47*, 174–198, doi:10.1016/j.energy.2012.09.052.
179. Antonio Garcia-Sanchez, J.; Maria Lopez-Martinez, J.; Flores-Holgado, N.; Arenas-Ramirez, B. Life

Cycle Analysis of Euro IV urban buses. *Dyna* **2012**, 87, 45–57, doi:10.6036/4280.

180. Grijalva, E. R.; López Martínez, J. M. Analysis of the Reduction of CO₂ Emissions in Urban Environments by Replacing Conventional City Buses by Electric Bus Fleets: Spain Case Study. *Energies* **2019**, 12, 525, doi:10.3390/en12030525.
181. Natural, T. U. R. G. a S. INFORME DE PRECIOS ENERGÉTICOS REGULADOS Available online: https://www.idae.es/sites/default/files/estudios_informes_y_estadisticas/tarifas_reguladas_ene_2019.pdf (accessed on Apr 5, 2019).
182. Harrison, K. W.; Hernández-Pacheco, E.; Mann, M.; Salehfar, H. Semiempirical Model for Determining PEM Electrolyzer Stack Characteristics. *J. Fuel Cell Sci. Technol.* **2006**, 3, 220, doi:10.1115/1.2174072.
183. Barbir, F. PEM electrolysis for production of hydrogen from renewable energy sources. *Sol. Energy* **2005**, 78, 661–669, doi:10.1016/j.solener.2004.09.003.
184. Dale, N. V.; Mann, M. D.; Salehfar, H. Semiempirical model based on thermodynamic principles for determining 6 kW proton exchange membrane electrolyzer stack characteristics. *J. Power Sources* **2008**, 185, 1348–1353, doi:10.1016/j.jpowsour.2008.08.054.
185. Biaku, C. Y.; Dale, N. V.; Mann, M. D.; Salehfar, H.; Peters, A. J.; Han, T. A semiempirical study of the temperature dependence of the anode charge transfer coefficient of a 6 kW PEM electrolyzer. *Int. J. Hydrogen Energy* **2008**, 33, 4247–4254, doi:10.1016/j.ijhydene.2008.06.006.
186. Norregaard, K.; Johnsen, B.; Hedegaard Gravesen, C. Battery degradation in electric buses Available online: [https://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/06 Kollektiv trafik/Forsogsordningen/2013/Elbusser/Battery degradation in electric buses - final.pdf](https://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/06%20Kollektiv%20trafik/Forsogsordningen/2013/Elbusser/Battery%20degradation%20in%20electric%20buses%20-%20final.pdf) (accessed on Sep 20, 2018).
187. López-Martínez, J. M.; Jiménez, F.; Páez-Ayuso, F. J.; Flores-Holgado, M. N.; Arenas, A. N.; Arenas-Ramírez, B.; Aparicio-Izquierdo, F. Modelling the fuel consumption and pollutant emissions of the urban bus fleet of the city of Madrid. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2017**, 52, 112–127, doi:10.1016/j.trd.2017.02.016.
188. García-sánchez, J. A.; Flores-holgado, N.; Arenas-ramírez, B. Análisis de Ciclo de Vida de autobuses urbanos Euro IV.: Localizador. **2012**, 87, 45–57.