

Movilidad sostenible en países en desarrollo

Tecnologías y estrategias de transporte multimodal e inteligente

Ricardo Mejía Gutiérrez

Editor académico



Financia



Organiza



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Movilidad sostenible en países en desarrollo Tecnologías y estrategias de transporte multimodal e inteligente

Ricardo Mejía Gutiérrez
Editor académico

Proyecto 03. Movilidad Sostenible: Análisis de la movilidad eléctrica como potencial nodo prosumidor

Colección Energética 2030. Estrategia de transformación del sector energético colombiano en el horizonte de 2030

Movilidad sostenible en países en desarrollo Tecnologías y estrategias de transporte multimodal e inteligente

Ricardo Mejía Gutiérrez
Editor académico



Catalogación en la publicación Universidad Nacional de Colombia

Movilidad sostenible en países en desarrollo : tecnologías y estrategias de transporte multimodal e inteligente / Ricardo Mejía Gutiérrez, editor académico. -- Primera edición. -- Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia ; Energética 2030, 2023 1 CD-ROM (284, páginas) : ilustraciones (principalmente a color), diagramas, fotografías, mapas. -- (Colección Energética 2030. Estrategia de transformación del sector energético colombiano en el horizonte de 2030; Proyecto 03)

Incluye referencias bibliográficas al final de cada capítulo

ISBN 978-958-505-284-0 (e-book)

1. Movilidad sostenible 2. Transporte sostenible -- Países en desarrollo 3. Sistemas de propulsión 4. Propulsión eléctrica solar 5. Transporte multimodal 5. Transporte intermodal -- Países en Desarrollo -- Estudios de casos 6. Vehículos eléctricos -- Aspectos ambientales -- Países en desarrollo -- 2017-2030 -- Proyectos I. Mejía Gutiérrez, Ricardo, editor académico II. Serie

CDD-23 629.204 / 2023

© Universidad Nacional de Colombia
© Energética 2030

Primera edición, 2023
Bogotá D. C., Colombia
ISBN impreso: 978-958-505-283-3
ISBN digital: 978-958-505-284-0

Preparación editorial
Editorial Universidad Nacional de Colombia
Av. El Dorado 44 A 40
Hemeroteca Nacional Universitaria
Bogotá D.C., Colombia
(+57 1) 316 50 00 Ext. 20040
direditorial@unal.edu.co

Coordinación editorial
Angélica María Olaya Murillo

Corrección de estilo
Carlos Eduardo Rodríguez

Diseño de la colección
Juan Carlos Villamil

Diagramación
Diana Abadía

Las investigaciones y resultados documentados en este libro se desarrollaron en el marco del Programa de Investigación Energética 2030, con código 58667 de la iniciativa Colombia Científica, financiada por el Banco Mundial a través de la Convocatoria 778-2017 de Ecosistemas Científicos, administrada por el Ministerio Colombiano de Ciencia, Tecnología e Innovación (Minciencias), a través del Contrato FP44842-210-2018.

Prohibida la reproducción total o parcial por cualquier medio sin la autorización escrita del titular de los derechos patrimoniales.

Impreso y hecho en Bogotá D. C., Colombia, 2023

Autores

Ricardo Mejía Gutiérrez
Andrés Emiro Díez Restrepo
Gabriel Jaime Espitia Mesa
Gilberto Osorio Gómez
Jairo José Espinosa Oviedo
José Alejandro Montoya Echeverri
José Valentín Restrepo Laverde
Juan David Mira Pineda
Mauricio Fernández Montoya
Tatiana Manrique Espíndola
Alejandro Mora
Alejandro Uribe Valencia
Cristian Portilla
Eberto Porto Mass
Edgar Virgilio Rincón Gil
Erick Santiago Gómez Oviedo
Esteban Betancur Valencia
Felipe Gutiérrez Morales
Felipe Mendoza Giraldo
Harvy Correa Herrera
Iván Sarmiento
Javier Emilio Sierra
Juan David Núñez
Jhon Fernando Vargas Jaramillo
Joan Francisco Alvarado
Jorge Hernán Córdoba Morales
Juan Camilo Acosta Salguero
Juan José Zuluaga
Juan Pablo González Alzate
Juliana Acosta
Manuela Montoya Rivera
Pedro Vélez Aristizabal
Samuel Bustamante Castaño
Santiago Bernal del Río
Santiago Echavarría Correa

Instituciones aliadas

Universidad EAFIT
Universidad Pontificia Bolivariana UPB
Universidad ELA
Universidad Nacional de Colombia
Corporación Universitaria del Caribe CECAR
Universidad de Sucre



Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivadas 4.0 Internacional
(CC BY-NC-ND 4.0) <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Contenido

Agradecimientos	15
Capítulo 1. Introducción a la movilidad sostenible.....	17
1.1. Cómo entender la movilidad de manera más sostenible.....	17
1.2. La electrificación de la movilidad y los retos actuales.....	19
1.3. Desarrollos tecnológicos para la movilidad eléctrica no convencional	24
1.4. Conclusiones.....	28
1.5. Referencias.....	29
Parte I. Conceptos básicos de la movilidad sostenible.....	33
Capítulo 2. Introducción a los sistemas de electro-propulsión	35
2.1. Introducción.....	36
2.2. Componentes principales	36
2.2.1. Baterías eléctricas	37
2.2.2. Convertidores de potencia	46
2.2.3. Motor eléctrico	49
2.2.4. Transmisión	56
2.3. Análisis dinámico en movimiento rectilíneo	58
2.4. Vehículos híbridos-eléctricos.....	60
2.4.1. Híbrido serie.....	62
2.4.2. Híbrido paralelo	62

2.5. Estrategias de gestión de la energía	63
2.6. Referencias.....	66
Capítulo 3. Conceptos básicos de la propulsión electro-solar	69
3.1. Generalidades de la energía solar fotovoltaica.....	69
3.2. Celdas fotovoltaicas	70
3.3. Movimiento del Sol	71
3.3.1. Irradiancia terrestre.....	72
3.3.2. Orientación del módulo fotovoltaico.....	73
3.3.3. Irradiancia de plano del módulo (POA)	73
3.4. Características de funcionamiento	74
3.4.1. Transformación energética en un módulo PV	75
3.4.2. Caída de eficiencia por temperatura.....	75
3.5. Aplicaciones fotovoltaicas en movilidad.....	75
3.6. Fabricación de paneles solares	76
3.6.1. Procesos de manufactura convencionales.....	76
3.6.2. Proceso de manufactura usando materiales compuestos.....	77
3.7. Conexión de celdas.....	79
3.7.1. Pérdidas de potencia	79
3.7.2. Topologías fijas de interconexión en arreglos fotovoltaicos..	79
3.7.3. Reconfiguración eléctrica de arreglos fotovoltaicos.....	80
3.7.4. Caso de estudio: interconexión dinámica	81
3.8. Referencias.....	83
Capítulo 4. Fuentes alternativas de energía	85
4.1. Panorama mundial y definición de las energías renovables no convencionales	86
4.2. Clasificación de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)	88
4.3. Descripción general de la red eléctrica de un país.....	90

4.4. Fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER)	93
4.5. Potencial de otros vectores energéticos: el caso del hidrógeno	94
4.6. Análisis de viabilidad y potencial de las diferentes fuentes, según la necesidad	95
4.7. Panorama general de la electrificación del modo fluvial	99
4.8. Referencias	101

Capítulo 5. Modelamiento y dimensionamiento energético de vehículos eléctricos

5.1. Dinámica de cuerpo rígido en una motocicleta	104
5.1.1. Definición de los parámetros del modelo	105
5.1.2. Definición de variables del modelo	106
5.2. Conservación de la energía mecánica de un vehículo de cuatro ruedas	109
5.2.1. Interacciones externas de energía en el vehículo	109
5.2.2. Interacciones internas de energía en el vehículo	110
5.3. Modelos de consumo de energía en sistemas de transporte fluvial ..	111
5.3.1. Modelo energético de una embarcación electrosolar	112
5.3.2. Análisis energético en cuatro etapas	113
5.4. Referencias	120

Parte II. Componentes de la movilidad sostenible multimodal

Capítulo 6. Soluciones de movilidad terrestre particular

6.1. Clasificación de los vehículos terrestres particulares	124
6.1.1. Vehículos a combustión	124
6.1.2. Vehículos eléctricos	124
6.1.3. Vehículos híbridos	125
6.2. Alternativas de movilidad sostenible terrestre particular	125
6.2.1. Micromovilidad	125

6.2.2. Motocicletas	127
6.2.3. Automóviles	129
6.2.4. Análisis	130
6.3. Caso de estudio: kit de hibridación de motocicletas	131
6.3.1. Análisis del contexto: sistema de transporte multimodal en el municipio de Magangué	131
6.3.2. Movilidad terrestre particular: caso de estudio	132
6.3.3. Elección arquitectura de hibridación (requerimiento hibridación)	133
6.4. Implementación kit de hibridación	136
6.4.1. Motor HUB en llanta delantera.....	136
6.4.2. Motor HUB en llanta trasera - versión 1	137
6.4.3. Motor HUB en llanta trasera - versión 2	139
6.4.4. Desempeño de hibridación en motocicletas para un transporte sostenible.....	141
6.5. Referencias.....	143
Capítulo 7. Soluciones de movilidad terrestre colectiva.....	145
7.1. Generalidades y beneficios de un sistema de transporte multimodal.....	146
7.2. Planificación estratégica de la infraestructura para la alimentación de sistemas de transporte multimodales.....	148
7.2.1. Infraestructura eléctrica	149
7.2.2. Infraestructura urbana	151
7.3. Modos de transporte agregados a la red.....	152
7.4. Proyección de la demanda e impacto en la red media tensión.....	154
7.4.1. Construcción de la red de media tensión y flujo de cargas en AC	154
7.4.2. Validación del impacto de la demanda fluctuante en la red de media tensión	155
7.5. Proyección de la demanda para la agregación de nuevos modos	156

7.6. Estructuración de un sistema de transporte multimodal en el municipio de Magangué	157
7.6.1. Alternativa de mejoramiento de un sistema de transporte..	158
7.6.2. Infraestructura de distribución de energía eléctrica	159
7.7. Referencias.....	161
Capítulo 8. Soluciones de movilidad terrestre de carga	163
8.1. Importancia del transporte terrestre en el ahorro de costos logísticos	164
8.2. Transporte de carga nacional: corredores logísticos	166
8.3. Transporte de carga urbano	169
8.4. Transporte eléctrico de carga.....	172
8.5. Referencias.....	175
Capítulo 9. Soluciones de movilidad fluvial sostenible.....	177
9.1. Contexto de aplicación y operación de sistemas de transporte fluvial.....	179
9.2. Diseño conceptual.....	182
9.3. Parámetros geométricos principales	184
9.4. Proceso de diseño del casco y estimación inicial de peso.....	186
9.4.1. Disposición de baterías	187
9.4.2. Estimación de arrastre hidrodinámico	189
9.4.3. Flotación y estabilidad	192
9.5. Dimensionamiento del almacenamiento energético y del sistema de propulsión	194
9.5.1. Arquitecturas y configuraciones.....	196
9.5.2. Comparativo de arquitecturas.....	199
9.5.3. Cálculo	201
9.6. Sistema de control	203
9.7. Techo solar	203

9.8. Telemetría.....	207
9.9. Referencias.....	210
Parte III. Infraestructura, operación y tendencias	215
Capítulo 10. La infraestructura y los sistemas de recarga como elemento esencial de la movilidad sostenible	217
10.1. Estaciones de carga	218
10.2. Componentes de una estación de carga.....	219
10.3. Carga de baterías.....	220
10.3.1. Cargador	220
10.3.2. Telemetría estación de carga.....	223
10.3.3. BMS.....	225
10.4. Tipos de cargadores	226
10.5. Tendencias en operación de estaciones de carga.....	228
10.6. Estación de carga fotovoltaica.....	230
10.7. Referencias.....	236
Capítulo 11. Tendencias del transporte en las ciudades inteligentes	237
11.1. Papel de la movilidad en las ciudades inteligentes	239
11.2. Telemetría y monitoreo en movilidad	239
11.2.1. Componentes involucrados en la telemetría	240
11.2.2. Selección de protocolos de comunicación.....	241
11.2.3. Análisis de redes: caso práctico	245
11.2.4. Almacenamiento de la información	245
11.2.5. Capa de datos	246
11.3. Caso de estudio	247
11.4. Hacia dónde va la movilidad: vehículos autónomos.....	249
11.5. Referencias.....	250

Capítulo 12. Operación de sistemas multimodales	253
12.1. Simulación de la operación de sistemas de transporte	254
12.1.1. Redes de tráfico	255
12.1.2. Modos de transporte y estaciones de carga	256
12.2. Estrategias de localización de estaciones de carga	256
12.2.1. Caso de estudio: motocicletas híbridas	257
12.2.2. Caso de estudio: embarcación electro-solar	257
12.3. Evaluaciones experimentales de los modelos	258
12.3.1. Caso de estudio: motocicletas híbridas	258
12.3.2. Caso de estudio: embarcación electro-solar	260
12.4. Gestión del sistema de transporte multimodal	263
12.4.1. Gestión del transporte	263
12.4.2. Resultados	265
12.5. Referencias	267
Capítulo 13. Contexto de la política y la legislación alrededor del transporte sostenible	269
13.1. Crecimiento de la electromovilidad	269
13.2. Análisis de la legislación y el marco normativo	271
13.2.1. Política y legislación alrededor de la energía	272
13.2.2. Sistemas de recarga	274
13.2.3. Ciudades inteligentes	274
13.3. Operación de sistemas multimodales	275
13.3.1. Movilidad terrestre	275
13.3.2. Movilidad fluvial	276
13.4. Oportunidades y retos alrededor de la apropiación del transporte sostenible	277
13.5. Referencias	279

Agradecimientos

Esta serie de resultados e investigaciones no habría sido posible sin la dedicación y el duro trabajo de muchos aliados del programa de investigación Energética 2030 —desde profesores y consultores, hasta estudiantes de doctorado, maestría y pregrado—, lo cual refleja la interinstitucionalidad, interdisciplinariedad y colaboración de este complejo ecosistema. En particular, un especial agradecimiento a los autores de cada capítulo, quienes han dedicado innumerables horas a este proyecto y cuyos esfuerzos han sido fundamentales para su realización.

Los autores agradecemos fundamentalmente a nuestras instituciones: Universidad EAFIT, Universidad Pontificia Bolivariana, Universidad EIA, Universidad Nacional de Colombia, Universidad de Sucre y Corporación Universitaria del Caribe, por el apoyo y el compromiso con esta alianza. Asimismo, un reconocimiento al Gobierno nacional, por el programa de Ecosistemas Científicos, en el marco de la iniciativa “Colombia Científica”. Una apuesta decidida al financiamiento de grandes alianzas de investigación para el fortalecimiento institucional, a través de recursos del Banco Mundial, gestionados por el Ministerio de Educación y administrados por el Ministerio de Ciencia Tecnología e Innovación.

Introducción a la movilidad sostenible

Ricardo Mejía Gutiérrez¹

Hoy en día, la vida cotidiana del ser humano se ha cuestionado en relación con su impacto como especie sobre el medio ambiente. Toda la cadena productiva requerida para su alimentación, vivienda, esparcimiento, trabajo, desplazamiento, etc. contribuye, directa e indirectamente, a la situación actual mundial, en términos del cambio climático. En ese sentido, el transporte, como necesidad humana para el desplazamiento, ha sido, sin lugar a duda, uno de los elementos clave en la agenda mundial para mitigar los impactos del cambio climático. Es claro que la sociedad ha venido redefiniendo la manera en que se comporta, gracias a la evidencia científica que ha demostrado la huella ambiental del ser humano y sus acciones. Esto ha generado una mayor conciencia entre las nuevas generaciones y, por ello, se han redefinido estrategias más amigables con el medio ambiente en todos los campos, en particular para el transporte. De esta forma, la movilidad sostenible conlleva una serie de acciones, que pueden ir desde no usar ningún tipo de artefacto para desplazarnos, pasando por la búsqueda de otras alternativas de transporte individual o colectiva, hasta llegar a la inevitable mejora de los artefactos en los que nos desplazamos. Este último aspecto es, precisamente, el enfoque del presente libro, pensado como una necesidad de desarrollo tecnológico que permita ofrecer a los usuarios la posibilidad de tomar mejores decisiones de movilidad sostenible.

1.1. Cómo entender la movilidad de manera más sostenible

Los seres humanos día a día toman de manera permanente decisiones con respecto a sus desplazamientos. Por esto, las ciudades se enfrentan al reto de satisfacer una demanda de movilidad cada vez mayor, que

¹ Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT. Carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejiag@eafit.edu.co

implica, también, altos niveles de congestión, un aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) y el deterioro de la calidad del aire. En este contexto, la Agencia Alemana para la Cooperación Internacional (GIZ) retomó para sus proyectos de movilidad un planteamiento inspirado en los principios de la sostenibilidad: evitar–cambiar–mejorar, conocidos como ASI (por sus siglas en inglés *avoid–shift–improve*) (Creutzig *et. al.*, 2018), cuyo desarrollo se dio a principios de los años 90 en un informe de la Comisión de Investigación del Parlamento Alemán (Bongardt *et al.*, 2019). El enfoque ASI busca incentivar la reducción de las emisiones de GEI, disminuir el consumo de energía y la congestión en las ciudades. Para esto, sugiere que las políticas del sector transporte aborden medidas destinadas a: 1) evitar/reducir la necesidad de desplazarse, 2) cambiar/mantener/trasladar los viajes al modo de menores emisiones y, asimismo, 3) mejorar los vehículos para que sean más eficientes energéticamente y, a su vez, que los combustibles sean menos intensivos en carbono. La figura 1.1 muestra las decisiones que los usuarios deben tomar al momento de planear un desplazamiento, de acuerdo con las disponibilidades urbanísticas, modales y tecnológicas.

La primera decisión, *avoid* (evitar), es definir si el desplazamiento es obligatorio o no y, si lo es, qué tan lejos se debe ir. Algunos ejemplos pueden ser si el usuario tiene una reunión de trabajo. En este caso, y según lo demostró la pandemia de la covid-19, es posible planear reuniones virtuales (si el tema y las personas con quienes se va a reunir, lo amerita). Igualmente, si se necesita comprar víveres, para lo cual, probablemente, las tiendas de barrio puedan servir para estas necesidades (siempre y cuando se cuente con las facilidades en el entorno cercano). Por último, para asistir a una cita médica, hay que indagar si se requerirá del desplazamiento.

La segunda decisión es el *shift* (cambiar), en la cual el usuario debe decidir qué modo(s) de transporte necesita. Aunque el recorrido puede hacerse con un solo medio de transporte, es posible que exista una combinación, pues no necesariamente tenga un único modo de transporte, principalmente para largos recorridos. Las alternativas son

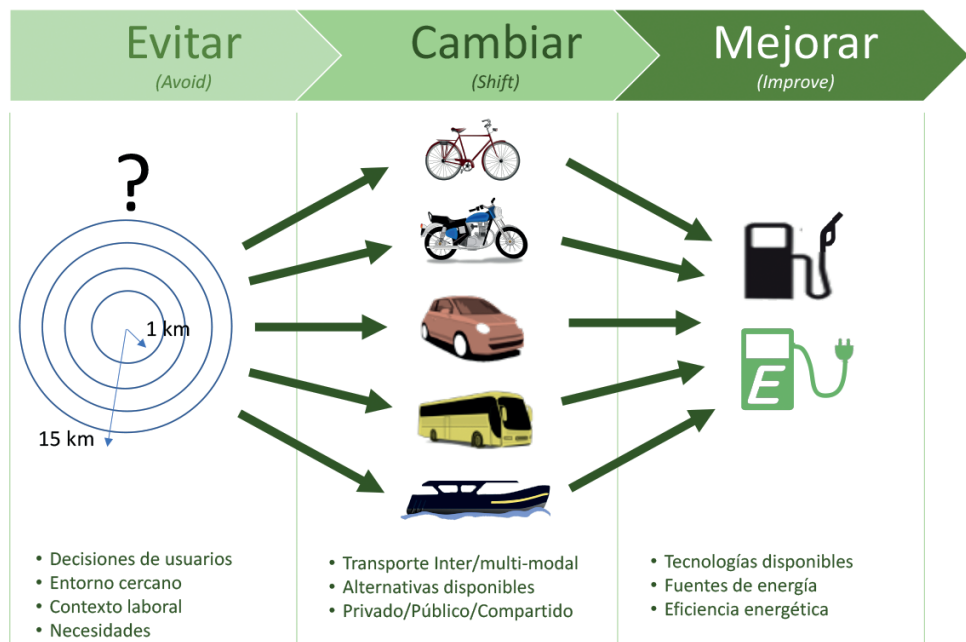


Figura 1.1. Enfoque ASI (*avoid–shif–improve*) para el análisis holístico del transporte sostenible
Fuente: elaboración propia.

variadas (p. ej. bicicleta, patineta, moto, vehículo, bus, bote, tren, etc.) y dependerán de la disponibilidad y condiciones de acceso que el usuario encuentre en el lugar donde se vaya a desarrollar el desplazamiento. Es ahí donde los conceptos de transporte multimodal e intermodal cobran relevancia (Jonuschat *et al.*, 2015) que, si bien se han usado más para transporte de carga (Kubanova y Schmidt, 2016), también pueden aplicar para la movilidad de pasajeros, como se describe a continuación.

- El transporte intermodal (TI) se refiere al uso de dos o más modos de transporte, pero no necesariamente gestionados por un mismo operador. El concepto es utilizado para reducir el uso individual del automóvil y promover la utilización del transporte público. Además, se centra en proporcionar una combinación de un tipo de transporte de mayor velocidad (p. ej. metro, autobuses o tranvías) con otros de menor velocidad (p. ej. patinetas, bicicletas, motos, etc.), que normalmente se usan al inicio o al final del viaje (conocidos también como de última milla). Para el TI, el uso de la movilidad como servicio (MaaS – *Mobility as a Service*) surge cada vez con más fuerza para planificar rutas intermodales; pero hay que tener en cuenta la poca integración de los diferentes modos de transporte que actualmente existen en las ciudades o regiones.
- El transporte multimodal (TM) se utiliza más para el transporte de mercancías que para el de pasajeros. Sin embargo, la principal diferencia con el TI es que la responsabilidad de la carga o pasajeros, desde el origen hasta el final, recae en una sola empresa de transporte. Según este concepto, un proveedor de servicios debe disponer de todos los modos de transporte a través de un contrato/tiquete que cubra todo el trayecto y a través del cual se definen las condiciones de funcionamiento.

Finalmente, la tercera decisión en el enfoque ASI es *improve* (mejorar), en la que se define qué tipo de vehículo se tiene que usar. Se espera que el usuario prefiera modos de transporte más ecológicos. Para tal fin, es importante entender las dinámicas de las emisiones de los sistemas de transporte, pues, a simple vista, la polución generada por los vehículos pareciera ser el único problema (en la sección 1.2. se profundizará en el análisis del ciclo de vida de la energía requerida para propulsar un sistema de transporte). No obstante, esta opción depende de la disponibilidad tecnológica del entorno del usuario. Este enfoque es interesante, en todo caso, para contextualizar el presente libro, dado que en la literatura hay bastantes trabajos alrededor de lo que llamaremos la movilidad sostenible convencional, es decir, vehículos, buses, etc. Aparecen, así, nuevas oportunidades de desarrollo y es precisamente una de las motivaciones que llevaron a la configuración del Proyecto 03: Movilidad Sostenible. Análisis de la movilidad eléctrica como potencial nodo prosumidor (ver Sección 1.3) del programa de investigación Energética 2030.

1.2. La electrificación de la movilidad y los retos actuales

En cuanto al componente *improve* (mejorar) del enfoque ASI, es relevante analizar los sistemas de transporte de manera holística para comprender el verdadero impacto ambiental. En ese orden de ideas, se usará la perspectiva del llamado trilema energético mundial (World Energy Council, 2017), el cual se compone de las 3D: descentralización, digitalización y descarbonización. La conjunción de estos tres factores, tanto en la pro-

ducción como en el consumo de energía, hace parte de una transformación estructural del sector. De manera equivalente, y al ser el transporte uno de los principales sectores que tendrá influencia en el incremento en la demanda de energía, analizaremos las 3D desde la perspectiva del transporte sostenible, teniendo en cuenta el contexto en el que se desarrollan las investigaciones, según se detalla en el capítulo 13, “Contexto de la política y la legislación alrededor del transporte sostenible” del presente libro.

1.2.1. Descarbonización del transporte

Una de las principales estrategias para la descarbonización es la electrificación del transporte (Di Silvestre *et al.*, 2018), en la que la adopción generalizada de los vehículos eléctricos (VE) produciría, simplemente, la reducción de la contaminación en las ciudades; pero, no será tan eficaz teniendo en cuenta las emisiones generadas para obtener la energía eléctrica que consumirán dichos vehículos (Jaramillo y Muller, 2016). Recientemente, la Administración de Información Energética de Estados Unidos (EIA, por sus siglas en inglés) anunció que las emisiones del transporte habían superado las de otros sectores (industrial, residencial y comercial), por lo que la electrificación de la movilidad es prioritaria y produciría grandes beneficios para las ciudades.

El capítulo 2 del presente libro presenta una “Introducción a los sistemas de electropropulsión”, con el fin de entender los conceptos básicos y los sistemas de transporte, para poder mejorar su desempeño e impactos. Complementario a esto, es fundamental identificar los impactos, no solo de los sistemas de transporte, sino de la producción de energía. La figura 1.2 expone las fuentes de generación (a la izquierda), que pueden ser “renovables o no renovables” y “convencionales o no-convencionales”.

Las fuentes de energía no renovables son aquellas que se encuentran en una cantidad limitada en la naturaleza, no se regeneran o lo hacen de manera muy lenta; mientras que las renovables se producen utilizando recursos naturales que se reemplazan constantemente y, de igual modo, no se agotan. Por otro lado, las energías convencionales son las que tradicionalmente se han utilizado, mientras que las no convencionales son de uso poco común, o más recientes, y cuyos costos todavía son una barrera. Encontramos, entonces, las fuentes convencionales de energías no renovables, que corresponden a todas las fuentes fósiles, como el petróleo, el carbón y el gas natural. Por otro lado, si bien la generación hidráulica es una fuente de generación renovable, hay un alto interés en las fuentes no convencionales de energías renovables (FNCR), referidas a las nuevas posibilidades de generación de energía más amigables con el medio ambiente.

La figura 1.2 evidencia cómo las fuentes pasan por procesos de transformación, los cuales tienen altas emisiones, tales como las refinerías y las centrales térmicas. Evidentemente, el combustible es la energía más contaminante, pues implica altas emisiones para su obtención, aunque también la combustión en el motor del vehículo genera igualmente emisiones. Si bien es posible generar electricidad para VE, a partir de fuentes fósiles —evitando las emisiones en el vehículo—, no son una alternativa viable en el largo plazo. Las energías renovables, por su parte, permiten generar electricidad de manera más sostenible e implican, verdaderamente, una solución de electrificación del transporte más amigable con el medio ambiente.

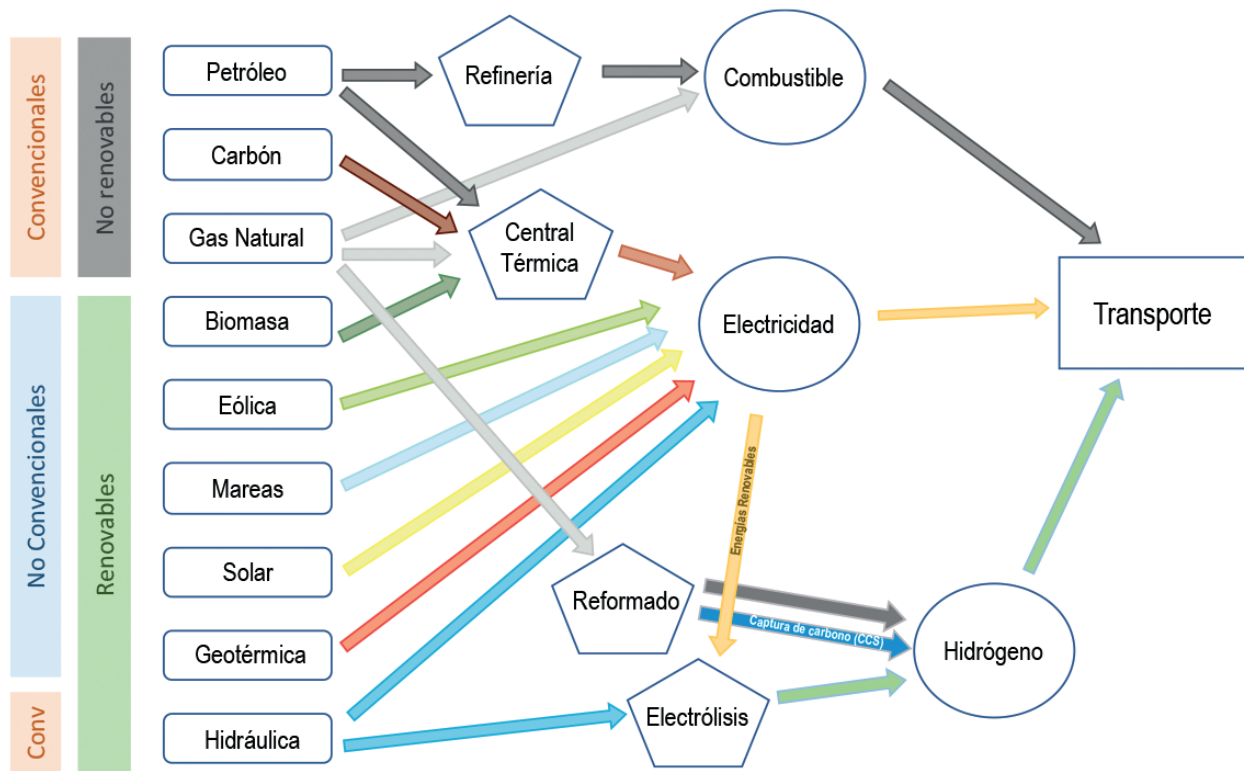


Figura 1.2. Ciclo de la generación de energías

Fuente: elaboración propia.

En este marco, aparece un nuevo vector energético: el hidrógeno. Un elemento que permite pensar su uso como combustible para la movilidad sostenible y una apuesta para los sistemas de transporte de alta demanda energética. El hidrógeno se clasifica en tres colores, según su proceso de obtención, y, en consecuencia, según las emisiones que provoca su producción (Dawood, 2020). Aunque actualmente es el proceso más realizado y el más económico, el hidrógeno gris se obtiene a través del reformado del gas natural, lo cual es altamente contaminante. Por ejemplo, para producir una tonelada de H_2 gris, se pueden emitir entre 9 y 12 toneladas de CO_2 (Monzó, 2021). El hidrógeno azul, un poco más caro que el gris, se genera igual que este, pero cuenta con un sistema de captura, uso y almacenamiento del carbono resultante del proceso de reformado. Por último, el hidrógeno verde es el que se obtiene por la electrólisis del agua, empleando para ello energías renovables o reformación de biogás. Es más costoso pero a largo plazo se prevé una reducción en sus precios, cuando se mejore el costo de los electrolizadores y de las FNCR.

Los vehículos propulsados por electricidad son, por lo general, mucho más eficientes energéticamente que aquellos propulsados por combustibles fósiles. No obstante, la alimentación del transporte con energía eléctrica, obtenida a partir fuentes fósiles, no necesariamente es viable en términos ambientales, principalmente por las emisiones del proceso de obtención de la energía. Por esta razón, la matriz energética de un país es uno de los principales elementos a evaluar para analizar el verdadero impacto de la movilidad eléctrica, porque, inicialmente, se piensa solo en las emisiones del vehículo,

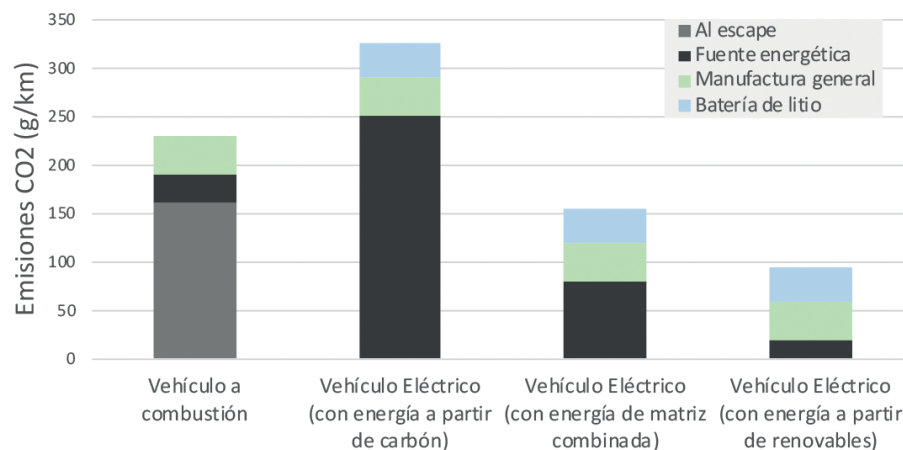


Figura 1.3.
Rango del ciclo de vida de las emisiones de CO₂ según el tipo de vehículo y energía

Fuente: elaboración propia.

pero se deben tener presente todas las emisiones de la cadena de producción de ese combustible. De ese modo, si la movilidad eléctrica, aparentemente una solución enfocada directamente en la supresión de las emisiones en el vehículo, se obtiene a través de fuentes no renovables, entonces no resulta una solución sostenible, por lo que no contribuye a la descarbonización. Por el contrario, en matrices mixtas, o mayoritariamente limpias, cobra bastante relevancia la movilidad eléctrica por las bajas emisiones de la generación de energía a través de energías renovables.

Para ilustrar lo anterior, la figura 1.3 compara las emisiones promedio de un vehículo de combustión con su equivalente de propulsión eléctrica. Se observa cómo la influencia de la matriz energética puede lograr, inclusive en algunos casos, superar las emisiones totales del vehículo de combustión (Hall y Lutsey, 2018). Algunos detractores advierten, también, que las emisiones de la fabricación del vehículo y de la batería son grandes influenciadores en el total de emisiones. Entonces, vemos que la contribución que agrega (en emisiones) la fabricación de la batería no es más importante que la del proceso de generación de energía.

1.2.2. Descentralización

Este concepto se ha trabajado desde el sector eléctrico y parte del principio de “generación de la energía en el lugar donde se consume”. De esta manera, se descentraliza la dependencia hacia grandes plantas de generación y dinamiza, además, las nuevas fuentes, principalmente renovables, tales como PCH (pico centrales hidroeléctricas) o las microrredes de generación híbrida (solar, eólica o biomasa). Aparece, entonces, la idea de prosumidor (Kotler, 2010), que es el usuario que produce y consume al mismo tiempo. Es un concepto que inició en el sector agroalimentario, se extrapólo a lo energético, y empezó a cobrar relevancia para la movilidad. Hoy en día, esto se materializa en soluciones tales como la movilidad híbrida no enchufable (que no necesariamente es renovable, ya que la energía se genera con el motor de combustión interna) o la movilidad electro-solar, es decir, agregar superficies fotovoltaicas en los sistemas de transporte, que, si bien es posible, todavía representa un gran reto tecnológico y de investigación. Esto se aborda en el capítulo 3, “Conceptos básicos de la propulsión elec-

tro-solar”. Esta propuesta tiene bastante potencial, dada la reducción en los costos de las tecnologías fotovoltaicas, las cuales han permitido pensar en estrategias de generación en el vehículo, en las que estos sean generadores de energía y refuercen el concepto de prosumidor en movilidad, un reto para el mediano y largo plazo. Otra apuesta de la descentralización en la movilidad es el transporte de energía en los vehículos eléctricos, los cuales podrían interactuar con la red, dado que son baterías en desplazamiento (energía móvil) y pueden aplicarse en diferentes sistemas de transporte. Un ejemplo de esto es la camioneta Ford F-150 eléctrica, que asegura tener la capacidad de mantener el suministro de energía del hogar hasta por tres días con la funcionalidad potencia de respaldo inteligente (*intelligent backup power*).

Ahora bien, para todo el espectro de diferentes sistemas de movilidad (desde patinetas, motos, vehículos hasta grandes camiones, navieros o trenes), las condiciones de electrificación y su viabilidad pueden variar. Por ello, se puede prever una propulsión por combustión, por electricidad o por hidrógeno, enteramente, o existen también estrategias combinadas, que son las posibles soluciones a corto plazo, tal como la propulsión híbrida o propulsión híbrida enchufable, esta última más preferible para que la energía realmente provenga de energías renovables (de matrices limpias) y no de la combustión dentro del vehículo. Existe, entonces, una alta factibilidad de electrificación total de las bajas potencias (1-50 kW) como patinetas, bicicletas, motos, vehículos livianos; para grandes sistemas de transporte existen alternativas de alta potencia electrificadas como trolebuses, trenes o cables, que pueden ir conectados a la red.

En consecuencia, el alto potencial de descarbonización está en la movilidad de mediana potencia (50-1000 kW), en la que se encuentran estrategias 100 % eléctricas, híbridas o nuevas alternativas de fuentes de energía (como H₂ o nuclear). Esto pasa, necesariamente, por un análisis de las distintas fuentes de energía disponibles (o accesibles) en determinado(s) lugar(es) por donde circulará un sistema de transporte, tema que se trata en el capítulo 4 sobre “Fuentes alternativas de energía”. Además del entorno energético, se requiere un análisis de las condiciones de operación del sistema de transporte y es con herramientas de ingeniería que se logra estimar la mejor manera de propulsar un vehículo. Se deben tener en cuenta variables como el peso (de lo transportado, del vehículo como tal y de las baterías, si aplica), las velocidades, la hidro/aerodinámica, las distancias, la meteorología y la topología, entre otras. Todo lo anterior se aborda con mejor detalle en el capítulo 5 de “Modelamiento y dimensionamiento energético”.

1.2.3. Digitalización

De otra parte, la era digital trae nuevas oportunidades para que el transporte sostenible pueda hacerse de manera más inteligente y poder articular la movilidad en las ciudades del futuro. La ventaja es que un sistema de transporte es igualmente un sistema complejo de alta generación de datos y es una mina de oro al respecto, cuando de información se trata. Esto ha llevado a que muchas empresas estén emergiendo alrededor del transporte compartido (*car sharing*), de la interacción de los vehículos con otros vehículos (V2V – *vehicle to vehicle*) o de los vehículos con la infraestructura (V2I – *vehicle to infrastructure*) o con la red (V2G – *vehicle to grid*); existe incluso una decidida apuesta por los vehículos autónomos, los cuales, a su vez, permitirán ser más eficientes en el

consumo de energía. Esto, dado que la aplicabilidad de la digitalización en movilidad se ha materializado en soluciones alrededor del mantenimiento, seguridad, navegación, *infotainment* (información y entretenimiento), seguros, conducción, recargas, entre otros. El presente libro aborda algunos de esos elementos en el capítulo 11 sobre “Tendencias en el transporte en las ciudades inteligentes”, que evidencia la importancia y materialización de sistemas de telemetría y monitoreo, de cara a ofrecer datos para pensar en sistemas de planeación y optimización, como el presentado en el capítulo 12, “Operación de sistemas multimodales”.

1.3. Desarrollos tecnológicos para la movilidad eléctrica no convencional

En términos de movilidad sostenible y, particularmente, sobre movilidad eléctrica, existe amplia literatura técnica y científica. Así, el origen del vehículo eléctrico (VE) se da, incluso, antes de que predominara la tecnología de motores de combustión interna. Se comercializaba hacia 1900, pero entre 1918 y 1933 fueron desapareciendo del mercado (Chan, 1993). En términos de investigación, el interés por esta tecnología se retomó a causa del impacto ambiental del sector transporte y su contribución a las emisiones de GEI, por lo que los trabajos se retomaron en los años 90 y, a partir de 1992, se evidenció un cambio en las dinámicas investigativas (ver figura 1.4), de cara al desarrollo tecnológico alrededor de la movilidad eléctrica.

Algunas fuentes han documentado la evolución en el estado del arte. Zhao *et al.* (2020) identificaron investigaciones publicadas entre 2000 y 2019 con un énfasis en los siguientes temas: 1) modelos de sostenibilidad y desempeño, 2) impacto ambiental, 3) nuevos combustibles para vehículos, 4) política de transporte, 5) cadena de abastecimiento y 6) comportamiento de viaje. De este modo, aunque el transporte sostenible se puede abordar de diferentes maneras, según lo especificado en la sección 1.1, es innegable que la movilidad eléctrica es el principal componente de las acciones hacia la sostenibilidad del transporte, en cuanto a desarrollo tecnológico se refiere.

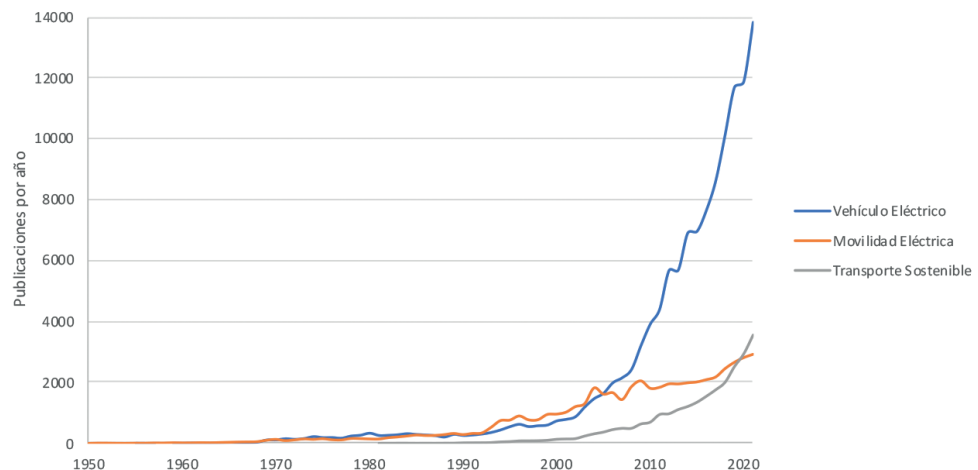


Figura 1.4.
Evolución de las publicaciones científicas

Fuente: elaboración propia con información de SCOPUS®.

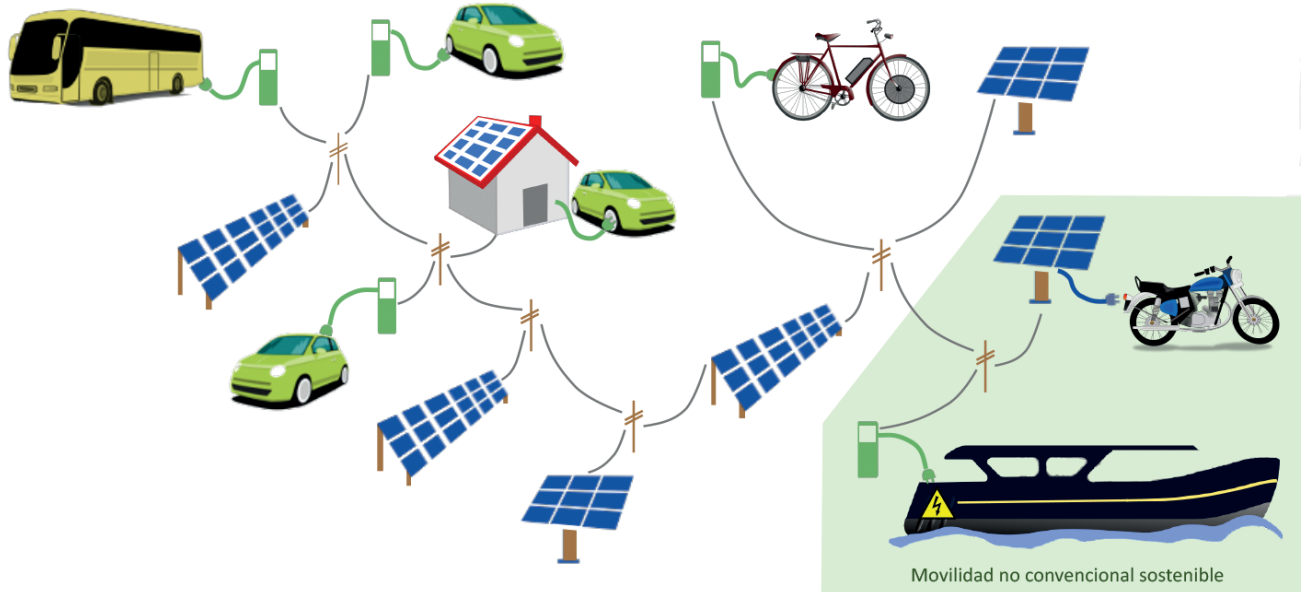


Figura 1.5. Movilidad multimodal sostenible

Fuente: elaboración propia.

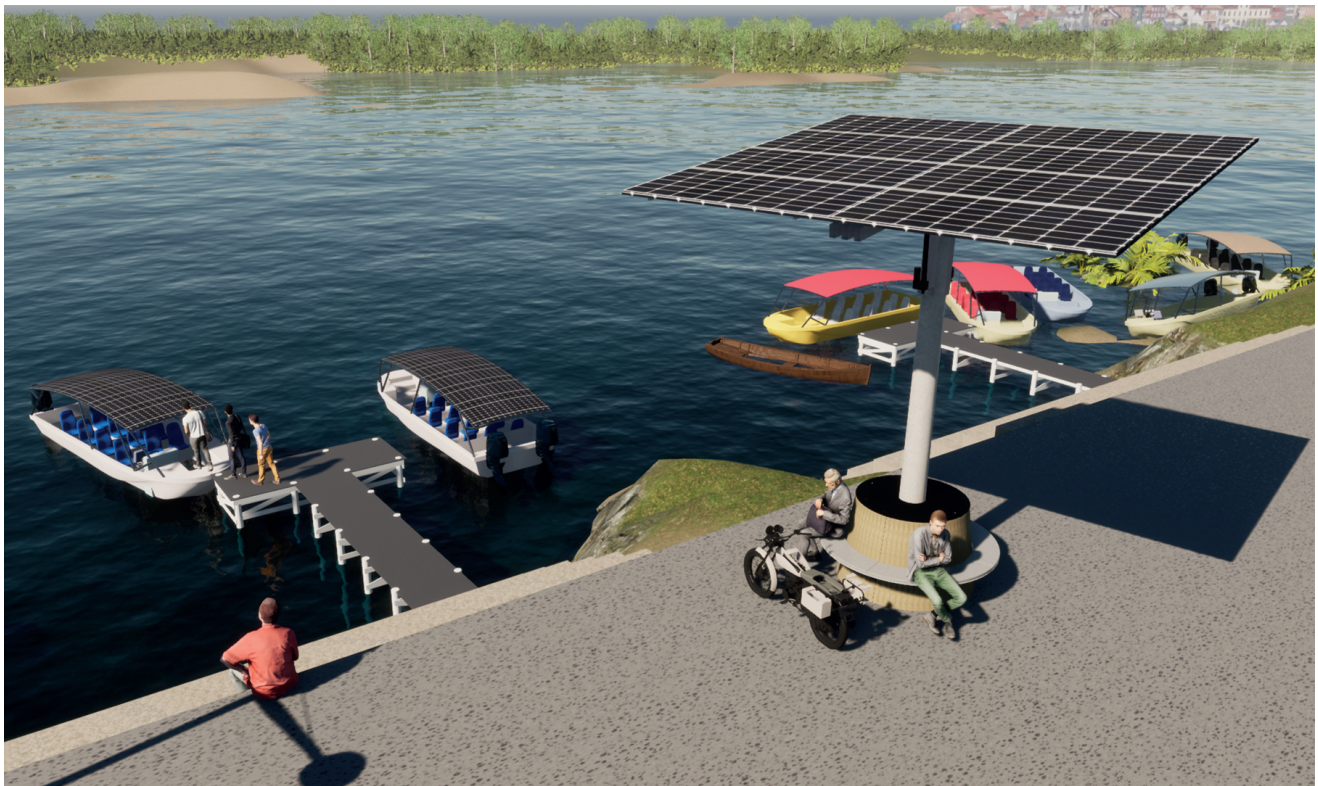


Figura 1.6. Sistema intermodal sostenible para ciudades intermedias (apuesta del Proyecto de Movilidad Sostenible de la alianza Energética 2030)

Fuente: elaboración propia.

No obstante, son muchos los medios de transporte electrificables y las fuentes de energía cobran cada vez mayor relevancia. Existen muchas alternativas de transporte, como se describe en el capítulo 7, “Soluciones de movilidad terrestre colectiva”, y en el capítulo 8, “Soluciones de movilidad terrestre de carga”. Un sistema intermodal ideal es aquel en el cual los modos de transporte funcionan con fuentes de generación de energías renovables, como se puede ver en la figura 1.5, en la que se identifican, tanto unidades de generación (paneles solares, estaciones de recarga solares, techos solares en las viviendas o en los vehículos), así como unidades de consumo (buses, vehículos, bicicletas, motos, botes, etc.). Entre aquellos que puedan tener superficies de generación de energía fotovoltaica se desempeñarían como nodos prosumidores.

En este punto, se identifica, entonces, que hay potencial de desarrollo tecnológico en algunos sistemas poco desarrollados en la literatura. En particular, la hibridación de vehículos, la navegación no terrestre y la generación de energía renovable en los sitios de recarga. A raíz de esto, en regiones de América Latina, un grupo de investigadores sumó esfuerzos para trabajar en lo que se denominó movilidad no convencional sostenible, es decir, soluciones de alto potencial, puesto que en las grandes ciudades el transporte en vehículos, buses y bicicletas es más predominante. Es en este contexto que surge lo que se conoce como ciudades intermedias, lo cual contribuyó a la configuración del Proyecto 03: Movilidad Sostenible. Análisis de la movilidad eléctrica como potencial nodo prosumidor” del programa de investigación Energética 2030.

Este proyecto, en el marco de la transición energética, plantea que la movilidad eléctrica implicará un aumento en la demanda de energía y, en consecuencia, será importante considerarlo en los pronósticos de demanda a futuro, para determinar su interacción inteligente con la red eléctrica. Propone, además, una alternativa de movilidad sostenible intermodal, para el análisis de la movilidad como nodo prosumidor y su interacción con el mercado de energía. Por esto, a lo largo del libro se hará referencia, pero no de forma exclusiva, a los resultados obtenidos en el proyecto de investigación, cuya apuesta se ilustra en la figura 1.6. El planteamiento de un sistema intermodal sostenible para ciudades intermedias se compone de: 1) el desarrollo de una embarcación electro-solar para navegación fluvial, dado el alto potencial de ríos navegables en Latinoamérica; 2) un kit de hibridación de motocicletas de bajo cilindraje, pues este es un medio de transporte altamente utilizado en ciudades intermedias en Colombia; y 3) una estación de recarga con generación fotovoltaica, de cara a la descentralización de la energía y la sostenibilidad en su generación.

En consecuencia, el planteamiento del problema para este proyecto está dividido en varios subproblemas, como se describe a continuación.

- **Movilidad fluvial sostenible:** los avances en movilidad eléctrica terrestre han emigrado a la movilidad acuática, tanto marítima como fluvial. El escenario es más complejo cuando se trata de transporte público de pasajeros, identificado como de alto potencial, según el Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) en Colombia (Benavides, 2015), el cual considera una red vial principal complementada por redes fluviales y férreas. Asimismo, el Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015 (Arcadis BV- Jesyca SAS, 2015) promueve “un sistema de transporte fluvial más competitivo, limpio, seguro y beneficioso para el desarrollo social” (p. 9).

Sin embargo, las soluciones de movilidad acuática que utilizan propulsión eléctrica y almacenamiento en baterías enfrentan el problema del almacenamiento energético para garantizar autonomía en los trayectos, pues se requiere más peso y mucho más volumen, para el almacenamiento de la energía de propulsión. Por otro lado, si la generación de energía se planea descentralizar en el bote como nodo prosumidor, el desafío es la aplicación de superficies fotovoltaicas con instalaciones estacionarias (techos o soportes fijos), lo que genera retos de adecuación dimensional y energética para aplicaciones móviles. Se define, entonces, como embarcación solar aquella embarcación eléctrica que cuenta con un panel solar como fuente energética, ya sea parcial o total. Hay que tener en cuenta, sin embargo, que las aplicaciones fotovoltaicas en embarcaciones reportadas en la literatura tienen como premisa la eficiencia energética y la ligereza, lo que compromete la potencia, la velocidad máxima y la capacidad de carga (Leiner, 2007; Mahmud *et al.*, 2014; Kurniawan, 2016). Ante esto, antecedentes como el desarrollo del vehículo solar colombiano (Serrano *et al.*, 2014; Osorio *et al.*, 2015) permiten un análisis equivalente, en el que las necesidades de consumo energético pueden llevar a soluciones sostenibles (propulsión eléctrica y generación fotovoltaica) para la movilidad fluvial en el contexto colombiano. El Capítulo 9, “Soluciones de movilidad fluvial sostenible”, reporta con mayor detalle esta implementación de tecnologías de electrificación del transporte fluvial electro-solar para ciudades intermedias.

- **Movilidad híbrida para motocicletas:** dado que la movilidad en motocicletas de bajo cilindraje es una opción viable para las familias en ciudades intermedias, el parque automotor existente es bastante elevado y la migración a tecnologías 100 % eléctricas parece distante para este segmento. La crisis ambiental ha acelerado el desarrollo de sistemas de propulsión vehicular alternativos, por un lado, con el reemplazo del combustible por gas natural o hidrogeno (su emisión de gases depende del régimen de funcionamiento) o, por otro, con motores eléctricos o de aire (con bajas densidades energéticas y largos tiempos de recarga). Esto ha impulsado el uso de vehículos híbridos, que buscan obtener los beneficios de cada tipo de sistema de propulsión y, en últimas, aumentar la eficiencia total y la autonomía del vehículo, así como reducir las emisiones contaminantes. Aunque la hibridación ha sido más común en automóviles y vehículos utilitarios, se han encontrado oportunidades de desarrollo en aquellos de dos ruedas como motocicletas, conocidos como motocicletas eléctricas híbridas (HEM, por sus siglas en inglés). El capítulo 6, “Soluciones de movilidad terrestre particular” describe la apuesta por la conversión de motocicletas de combustión a motos híbridas (combustión-eléctrica), de manera que en las ciudades intermedias se pueda electrificar parte de lo que actualmente se mueve con motores de combustión y, así, mitigar el impacto ambiental de ese parque automotor, que difícilmente llegará a ser 100 % eléctrico en el mediano plazo.
- **Estaciones de carga fotovoltaica:** uno de los principales retos para la electromovilidad es la infraestructura de recarga, pues de esto dependerá el suministro de energía necesario para recargar el(los) vehículo(s) que se conecte(n) a ella. Según la demanda de vehículos conectados —o que la estación pueda alimentar, de acuerdo con su diseño—, la necesidad de energía puede ser alta o baja y de ello dependerá su configuración con la red, que, a su vez, puede ser de tres tipos: 1) las estaciones conectadas a la red de energía (llamadas *on-grid*), las cuales acceden a la fuente de energía eléctrica de la red de distribución de energía y cuya instalación debe incluir la compatibilidad

eléctrica y las protecciones requeridas para su correcta operación. 2) Las estaciones desconectadas de la red de energía (llamadas *off-grid*), en la que la fuente de energía no es la red convencional, sino que depende de alguna otra alternativa, acompañada regularmente por un sistema de almacenamiento de energía. El caso más común son paneles solares cargando baterías. 3) Las estaciones que combinan la conexión a la red, pero cuentan con generación de energía en el sitio (regularmente fotovoltaica). Los sistemas autónomos de energía fotovoltaica son ideales para zonas remotas y tienen un diseño robusto y simple que requiere poco mantenimiento.

La mayor ventaja es su uso como sistema independiente para proporcionar salidas de potencia desde microvatios (para pequeños consumos) hasta megavatios (grandes consumos). La exploración de infraestructura de recarga híbrida reducirá la demanda de energía de la red eléctrica convencional, en la medida que la generación *in-situ* sea lo suficientemente robusta como para abastecer los vehículos para los que la estación se diseñe. El capítulo 10, “La infraestructura y los sistemas de recarga como elemento esencial de la movilidad sostenible”, describe los conceptos generales de la infraestructura de carga y busca integrar el componente sostenible, a través de la incorporación de elementos fotovoltaicos, que minimicen la necesidad de consumo energético de la red interconectada. La gran demanda de energía eléctrica que supone la proliferación de la propulsión eléctrica debe compensarse con generación distribuida y sostenible.

- **Planeación de sistemas de transporte:** a pesar de los beneficios de la tecnología de propulsión eléctrica (fluvial o terrestre), estos vehículos presentan restricciones técnicas, como lo son la autonomía de viaje limitada, los largos tiempos de carga y la degradación de la batería. Una de las claves del éxito en la operación de sistemas de transporte eléctricos es contar con herramientas para la toma de decisiones de recarga y administración de las estaciones de carga, que permitan balancear las restricciones técnicas. Adicionalmente, considerando que una misma estación de carga puede prestar servicio a diferentes tipos de vehículos (p. ej. terrestres y fluviales), los sistemas de planeación y gestión deben considerar, no solo las estaciones de carga, sino la interacción con los diferentes tipos de vehículos. Aunque existen investigaciones sobre los problemas de planeación de recarga de los VE, hasta donde se sabe, ningún estudio ha trabajado un problema de planificación de carga, sobre un contexto multimodal (fluvial y terrestre), considerando todas las condiciones de los vehículos eléctricos. Este es el enfoque del capítulo 12, “Operación de sistemas multimodales”, que detalla trabajos hacia la solución de esta problemática. Una de las consideraciones más importantes es la degradación de la batería, que es ahora centro de interés de muchas investigaciones, principalmente, a través del monitoreo remoto de la operación, de cara a obtener información relevante de la degradación y estado de salud de las baterías, como se describe en el capítulo 11, “Tendencias del transporte en las ciudades inteligentes”.

1.4. Conclusiones

Es importante resaltar que las tecnologías de electrificación no son la única alternativa para la mitigación de las emisiones del sector transporte, sino que hay varias estrategias para una movilidad más inteligente que optimice los desplazamientos de las personas y la carga. No obstante, si bien el usuario decide cómo moverse (o mover una carga),

los artefactos que permiten dichos desplazamientos deberían incorporar tecnologías más sostenibles para su operación. Entre los muchos desarrollos en la literatura para el transporte terrestre, las alternativas inter/multimodales que incorporen otros medios (fluviales/marítimos o aéreo) cobran cada vez mayor relevancia. De otra parte, la concentración de los esfuerzos tecnológicos en las grandes ciudades ha rezagado los estudios para pequeñas y medianas urbes, lo que le niega a la población de dichas ciudades la posibilidad de movilizarse de un modo más sostenible e inteligente. Este libro aporta, entonces, elementos generales y particulares para entender la movilidad eléctrica y plantea casos concretos para abordar retos tecnológicos de un transporte sostenible y enfatiza en algunas soluciones específicas para aportar a la literatura con aproximaciones no convencionales. De esta manera, los capítulos ya mencionados se agrupan en tres secciones:

- **Parte I. Conceptos básicos de la movilidad sostenible:** este apartado aborda conceptos teóricos y principios básicos (capítulo 2), de cara a comprender los retos tecnológicos que el transporte sostenible debe afrontar. También, se exploran las posibilidades de las diferentes fuentes de energía (capítulos 3 y 4) y las aproximaciones desde la ingeniería para modelar sistemas de transporte (capítulo 5).
- **Parte II. Componentes de la movilidad sostenible multimodal:** desde una aproximación inter/multimodal, los diferentes medios de transporte aportan cobertura y, a su vez, retos. Estos capítulos agrupan detalles sobre la movilidad terrestre particular (capítulo 6), colectiva (capítulo 7) y de carga (capítulo 8). Lo novedoso de este proyecto se plasma en el marco del contexto fluvial (capítulo 9) de la movilidad sostenible.
- **Parte III. Infraestructura, operación y tendencias:** la comprensión del transporte como un sistema parte de la base de que todos sus elementos integrales aportan beneficios y retos. Más allá de los vehículos como elemento principal, se describe también la infraestructura como componente esencial (capítulo 10), enmarcando el desarrollo de las ideas hacia el contexto de las ciudades inteligentes (capítulo 11), que representan el futuro de nuestra sociedad. La movilidad inteligente comprende el análisis holístico del sistema, cuyas alternativas de operación deben ser optimizadas (capítulo 12) de cara a la eficiencia energética del sistema. Sin embargo, la legislación (capítulo 13) condicionará o impulsará todas estas nuevas tendencias tecnológicas, por lo que es fundamental tener la comprensión de dicho contexto legislativo y de mercado.

En este orden de ideas, el libro desarrolla los elementos del transporte sostenible desde el repaso conceptual de los principios de funcionamiento (parte I), entendiendo los contextos de operación de los sistemas de transporte (parte II) para, de ese modo, analizar de manera óptima la operación de sistemas de transporte más inteligentes y eficientes (parte III).

1.5. Referencias

Arcadis BV- Jesyca SAS. (2015). *Plan maestro fluvial de Colombia 2015*. Ministerio de Transporte de Colombia. [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/PLAN %20MAESTRO %20FLUVIAL %20- %20MINTRANSPORTE.pdf?ver=2020-06-09-165943-830](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/PLAN%20MAESTRO%20FLUVIAL%20-%20MINTRANSPORTE.pdf?ver=2020-06-09-165943-830)

- Benavides, J. (2015). *Plan Maestro de Transporte Intermodal (PMTI) 2015-2035*. Fedesarrollo. <http://hdl.handle.net/11445/2462>
- Bongardt, D., Stiller, L., Swart, A. y Wagner, A. (2019). *Sustainable Urban Transport: Avoid-Shift-Improve (ASI)*. Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ). <https://www.transformative-mobility.org/publications/inua-9-avoid-shift-improve>
- Chan, C. (1993). An overview of electric vehicle technology. *Proceedings of the IEEE*, 81(9), 1202-1213. <https://doi.org/10.1109/5.237530>
- Creutzig, F., Roy, J., Lamb, W., Azevedo, I., De Bruin, W., Dalkmann, H., Edelenbosch, O., Geels, F., Grubler, A., Hepburn, C., Hertwich E., Khosla, R., Mattauch, L., Minx, J., Ramakrishnan, A., Rao, N., Steinberger, J., Tavoni, M. y Ürge, D. (17 more authors). (2018). “Towards demand-side solutions for mitigating climate change”. *Nature Climate Change*, 8(4), 260-263. <https://doi.org/10.1038/s41558-018-0121-1>
- Dawood, F., Anda, M. y Shafiullah, G. (2020). Hydrogen production for energy: An overview. *International Journal of Hydrogen Energy*, 45(7), 3847-3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>
- Di Silvestre, M., Favuzza, S., Sanseverino, E. y Zizzo, G. (2018). How Decarbonization, Digitalization and Decentralization are changing key power infrastructures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 93, 483-498. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.05.068>
- Hall, D. y Lutsey, N. (2018). *Effects of battery manufacturing on electric vehicle life-cycle greenhouse gas emissions*. International Council on Clean Transportation (ICCT). https://theicct.org/sites/default/files/publications/EV-life-cycle-GHG_ICCT-Briefing_09022018_vF.pdf
- Jaramillo, P. y Muller, N. (2016). Air pollution emissions and damages from energy production in the us: 2002–2011. *Energy Policy*, 90, 202-211. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2015.12.035>
- Jonuschat, H., Stephan, K. y Schelewsky, M. (2015). Understanding multimodal and intermodal mobility. *Sustainable Urban Transport*, 7, 149-176. <https://doi.org/10.1108/S2044-994120150000007018>
- Kotler, P. (2010). The Prosumer Movement. En B. Blättel y K. Hellmann (eds.) *Prosumer Revisited. Zur Aktualität einer Debatte* (pp. 51-60). vs Verlag für Sozialwissenschaften https://doi.org/10.1007/978-3-531-91998-0_2
- Kubanová, J. y Schmidt, C. (2016). Multimodal and Intermodal Transportation Systems. *Communications - Scientific letters of the University of Zilina*, 18(2), 104-108. <https://doi.org/10.26552/com.C.2016.2.104-108>
- Kurniawan, A. (2016). A review of solar-powered boat development. *IPTEK The Journal for Technology and Science*, 27(1). <http://dx.doi.org/10.12962/j20882033.v27i1.761>
- Leiner, R. (2007). Research solar power boat-data management and online visualization. *Africon*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/AFRCON.2007.4401548>
- Mahmud, K., Morsalin, S. y Khan, M. (2014). Design and fabrication of an automated solar boat. *International Journal of Advanced Science and Technology*, 64, 31-42. <http://dx.doi.org/10.14257/ijast.2014.64.04>
- Monzó, N. (2021, 12 de febrero). *Los colores del hidrógeno: verde, azul y gris*. Zero Emissions Objective (ZEO). <https://plataformazeo.com/es/colores-hidrogeno-verde-azul-gris>
- Osorio, G., Mejía, R., Suárez, N., Gil, A. y Barrera, J. (2015). Solar array design based on shadow analysis for increasing net energy collection in a competition vehicle. *Journal of Photonics for Energy*, 5(1), 053091. <https://doi.org/10.1117/1.JPE.5.053091>

- Serrano, A., Gaviria, P., Barrera, J., Mejía, R. y Osorio, G. (2014, 26-27 de marzo). Design of a solar competition vehicle strategy with a Cyber Physical System approach. *Proceedings of the Virtual Concept International workshop (vc-iw'14) in Innovation in Product Design and Manufacture*. <http://hdl.handle.net/10784/4572>
- World Energy Council. (2017). *World Energy TRILEMMA. Changing Dynamics – Using Distributed Energy Resources to Meet the Trilemma Challenge*. World Energy Council. https://www.worldenergy.org/assets/downloads/World-Energy-Trilemma-2017_Full-report_WEB.pdf
- Zhao, X., Ke, Y., Zuo, J., Xiong, W. y Wu, P. (2020). Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019. *Journal of Cleaner Production*, 256, 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120404>

Parte I

Conceptos básicos de la movilidad sostenible

Introducción a los sistemas de electro-propulsión

Samuel Bustamante Castaño¹, Felipe Mendoza Giraldo¹, Jhon Vargas¹, Erick Santiago Gómez¹, Edgar Rincón², Juan David Núñez², Tatiana Manrique²

Resumen: en este capítulo se describen los componentes principales de los trenes de potencia que tienen baterías eléctricas como fuente de energía. Se presentan las baterías más utilizadas en sistemas electropropulsados, haciendo énfasis en las baterías de iones de litio (Li-ion), incluyendo sus características eléctricas, el sistema de gestión y se discuten las estrategias para el control de temperatura de las baterías. Luego, se tratan los convertidores de potencia que permiten transmitir de forma eficiente la energía desde la batería al motor eléctrico y controlan su velocidad y torque. Se describen, a continuación, los motores de corriente directa y corriente alterna más utilizados en este contexto, especialmente los de corriente directa sin escobillas (BLDC). La transmisión y los fenómenos dinámicos que experimentan el movimiento efectivo del vehículo en la interfaz final son igualmente tratados. Adicionalmente, se examinan las diferencias entre vehículos eléctricos y los vehículos híbridos-eléctricos, sus arquitecturas y aplicaciones. Finalmente, se tratan estrategias de gestión de energía que pretenden optimizar el uso de la energía disponible en el sistema electro-propulsado, bien sea vehículos eléctricos o híbridos-eléctricos y se discuten, asimismo, consideraciones relacionadas con la instrumentación electrónica y los protocolos de comunicación necesarios para la implementación de dichas estrategias.

-
- 1 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, Carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: sbusta14@eafit.edu.co; fmendoza@eafit.edu.co; jfvargas@eafit.edu.co; esgomez@eafit.edu.co
 - 2 Mechatronics Engineering Program, Universidad EIA, km 2 + 200, vía al Aeropuerto JMC, Envigado, Colombia. Correo electrónico: edgar.rincon@eia.edu.co; juan.nunez@eia.edu.co; dolly.manrique@eia.edu.co

Palabras Clave: vehículos eléctricos; tren de potencia; baterías eléctricas; motor BLDC; vehículos híbridos-eléctricos; estrategias de gestión de la energía.

2.1. Introducción

La movilidad sostenible es el esquema que ofrece a los usuarios medios de transporte seguros, cómodos, con bajos tiempos de transporte, acompañados de una adecuada infraestructura vial, con costos asequibles al usuario y amables con el medio ambiente; sin embargo, ha sido mal entendida como una moda relacionada con el uso de la bicicleta como medio de transporte urbano o de medios de transporte compartidos. Desde hace varios años, la transición a la electromovilidad se ha posicionado como la estrategia más popular en la industria del automóvil para reducir las emisiones nocivas y ofrecer mejores alternativas de transporte. Aunque los vehículos eléctricos datan de mediados del siglo XIX, estos fueron relegados con la masificación de los motores de combustión interna. Para algunos, esta transición inició a finales de los 90 con la oferta de vehículos híbridos eléctricos comerciales a los usuarios. Este capítulo aborda los principios característicos de un sistema electro-propulsado. La propulsión eléctrica es aquella en la que el elemento propulsor es accionado por motores eléctricos, alimentados por baterías o por generadores eléctricos a través de interfaces, denominadas convertidores eléctricos, gobernados por un sistema de control y comunicaciones. El desarrollo de los vehículos eléctricos se ve limitado, en gran medida, por el desarrollo de las baterías. Una alternativa para solucionar este problema es la instalación de una fuente de energía alternativa (eléctrica, solar, hidrógeno, *fuel oil*, etc.). En este apartado se tratan las fuentes de energía eléctrica, a saber, las baterías, prestando especial atención a las baterías de iones de litio, las más utilizadas en aplicaciones de electromovilidad en la actualidad. Se hace énfasis en los motores más usados en electromovilidad, especialmente los BLDC. También, se tratan estrategias de gestión de la energía que pretenden resolver cuestiones relacionadas a cómo debe hacerse uso de la energía disponible.

2.2. Componentes principales

Los sistemas electropropulsados, se conforman por elementos o subsistemas que, en principio, pueden tener características dinámicas y cinemáticas diferentes, incluso dispares; los principales protagonistas en vehículos eléctricos son, típicamente, la batería y el motor eléctrico. En vehículos híbridos-eléctricos, una segunda fuente de energía (p. ej. combustible) es integrada al tren de potencia y también un segundo motor (p. ej. motor de combustión interna). La correcta articulación de la(s) fuente(s) de energía y el(los) motor(es) es la tarea principal de subsistemas intermedios, como los convertidores de potencia DC/DC o los inversores DC/AC y las transmisiones mecánicas. La figura 2.1 presenta la estructura típica de un tren de potencia para un vehículo eléctrico.

En el tren de potencia, los subsistemas intermedios deben conciliar las fuentes de energía y los motores, para garantizar el flujo de energía desde la fuente hasta el movimiento efectivo del sistema electro-propulsado en la interfaz (llanta, propela, etc.). Regiones de operación, eficiencias, costos y restricciones eléctricas y mecánicas son características fundamentales para tener en cuenta. A continuación, se describen las

principales características de los subsistemas que componen los trenes de potencia eléctricos: baterías, BMS, motor eléctrico, convertidores/inversores y la transmisión. Aunque los motores de combustión interna son parte crítica en los vehículos híbridos-eléctricos comerciales, no son tratados a profundidad en este capítulo.

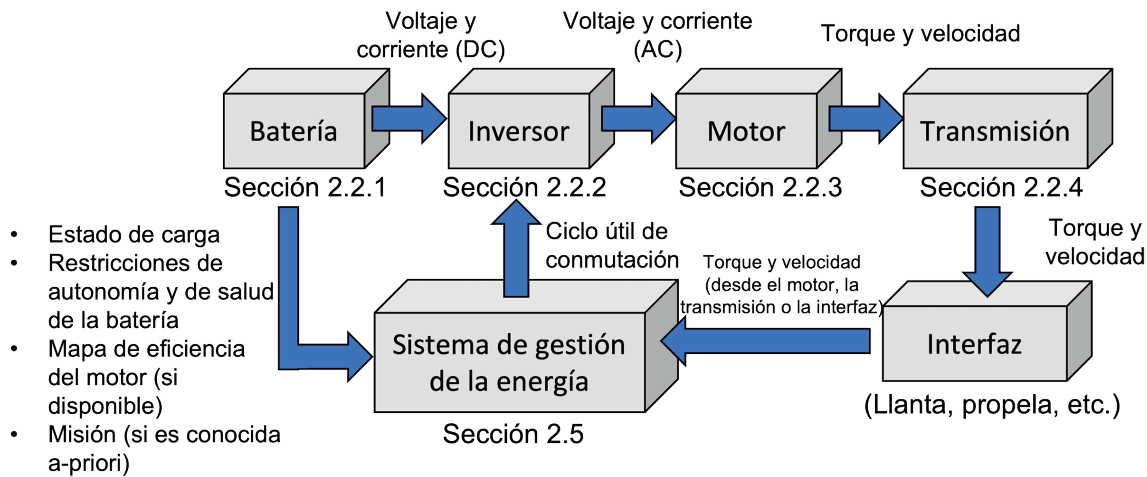


Figura 2.1. Elementos de un tren de potencia eléctrico

Fuente: elaboración propia.

2.2.1. Baterías eléctricas

La función principal del sistema de almacenamiento de energía (baterías eléctricas o simplemente baterías) es guardar energía eléctrica en cualquier forma (electroquímica, eléctrica, etc.), para luego utilizarla en la misma forma en que se recolectó. Sin embargo, existen varias características adicionales que se deben considerar para que este subsistema funcione bajo los requerimientos deseados de seguridad y confiabilidad. En esta sección se describen las principales características de las distintas tecnologías de almacenamiento de energía con baterías que se utilizan en sistemas electropropulsados, y que se traducen en criterios técnicos de referencia para seleccionar la opción más apropiada según los requerimientos de diseño del sistema de propulsión.

Dependiendo de la tecnología de almacenamiento usada, los sistemas de almacenamiento pueden ser categorizados como mecánicos, electroquímicos, químicos y térmicos. Los sistemas electroquímicos, como las baterías, consisten en una o más celdas con un electrodo positivo (ánodo), un electrodo negativo (cátodo) y un electrolito (ver figura 2.2).

Los electrolitos más comunes que son usados en baterías son el sodio-sulfuro (NaS), el níquel-cadmio (NiCd), el ácido-plomo (PbA), el níquel-hidruro metálico (Ni-MH) y el ion de litio (Li-ion). Para las químicas de estos electrolitos, la figura 2.3 relaciona las características de densidad volumétrica de energía [Wh/L], que indica la cantidad de energía almacenada por unidad de volumen en la batería y, también, la densidad específica o gravimétrica de energía [Wh/kg], que muestra la energía almacenada por unidad de masa.

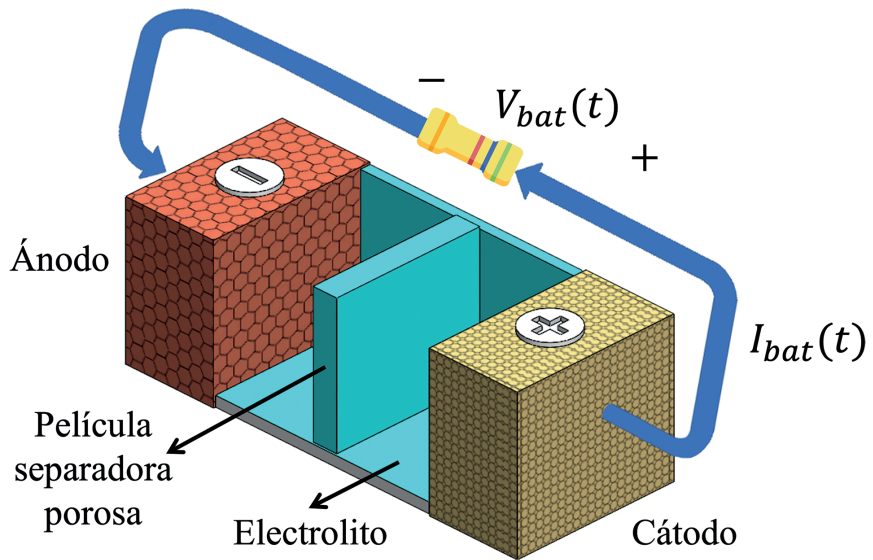


Figura 2.2.
Componentes principales de una batería Li-ion

Fuente: elaboración propia.

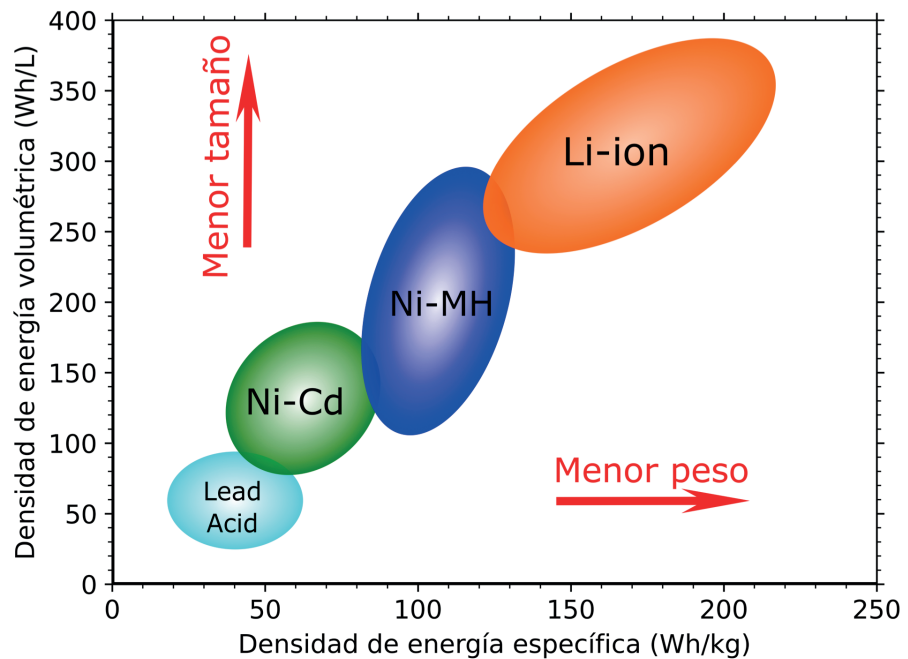


Figura 2.3.
Densidad volumétrica y densidad específica de energía para PbA, níquel-cadmio NiCd, Ni-MH y Li-ion

Fuente: adaptado de Xiong (2011).

La escogencia de la química del electrolito (o simplemente la química de la batería) tiene fuerte dependencia de la aplicación de electromovilidad, según los requerimientos de costo, peso, tamaño, densidad energética y de seguridad. Por ejemplo, el uso de baterías plomo-ácido selladas o SLA (*sealed lead-acid*), que pueden ser de tecnología AGM (*absorbent glass mat*) o de GEL (*gelled electrolite*), históricamente, ha sido generalizado en aplicaciones automotrices que requieren alta densidad de potencia a un bajo costo. No obstante, en aplicaciones de electromovilidad, su densidad gravimétrica promedio (40 Wh/kg - 80 Wh/kg) limita su uso a fuentes de energía secundarias como soporte

de la fuente de energía principal. En cambio, las basadas en Li-ion tienen una alta densidad de energía con densidades gravimétricas promedio entre 100 Wh/kg y 300 Wh/kg, lo que las hace más deseables en aplicaciones de electromovilidad comerciales, pero a un costo superior. Por otra parte, las baterías de níquel-hidruro metálico (Ni-MH), con peso y tamaño comparables, incluso, con Ion-litio, y densidades de energía inferiores a menor costo, siguen siendo el tipo de batería más utilizada en vehículos híbridos-eléctricos no enchufables que no requieren carga de fuentes externas y, por lo tanto, no presentan problemas con la disipación de calor. A continuación, se describen las principales características de las baterías de ion de litio, actualmente las más usadas en vehículos eléctricos.

2.2.1.1. Baterías de ion de litio (Li-ion)

De forma general, y de acuerdo con la composición de los ánodos y cátodos de las celdas, las baterías Li-ion se pueden clasificar, siguiendo a Buchmann *et al.* (2001), como:

- **Óxido de litio-cobalto (LiCoO₂ - LCO):** esta tecnología de baterías es comúnmente aplicada en teléfonos inteligentes, computadores portátiles y cámaras digitales, debido a su alta densidad energética. Sus mayores desventajas son el costo, la corta vida útil y su baja potencia específica.
- **Óxido de litio-manganeso (LiMn₂O₄ - LMO):** generalmente, se usa en taladros, instrumentos médicos y vehículos eléctricos. El uso del óxido de litio-manganeso como material en el cátodo se ve reflejado en una baja resistencia interna, lo que permite cargas rápidas, aunque su vida útil es corta.
- **Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (LiNiMnCoO₂ - NMC):** es utilizado en taladros, bicicletas eléctricas y gran variedad de vehículos eléctricos. Este tipo de tecnologías de celdas puede ser adaptado, ya sea para alto almacenamiento de energía o para altas demandas de potencia.
- **Litio-ferrofosfato (LiFePO₄ - LFP):** se maneja como reemplazo de las baterías de plomo que se emplean como baterías de arranque en vehículos. Las bajas temperaturas deterioran su funcionamiento y altas temperaturas reducen su vida útil.
- **Óxido litio-níquel-cobalto-aluminio (LiNiCoAlO₂ - NCA):** al igual que el NMC, ofrece altas densidades de energía, pero son poco seguras.
- **Óxido de litio-titanato (Li₂TiO₃ - LTO):** puede utilizarse para recargas rápidas y su ciclo de vida es más largo que el de las demás tecnologías de iones de litio. Algunas de sus desventajas son los altos costos y las bajas densidades de energía.

La tabla 2.1 presenta los valores típicos de energía específica (densidad específica de energía), costo, vida útil y tasa de carga de las distintas tecnologías de ion de litio mencionadas. Como se observa en la tabla 2.1, entre todas las baterías de litio, la de LTO cuenta con el menor tiempo de carga y es, al menos cinco veces, más rápida que LFP y 2,5 veces más rápida que NMC, sin embargo, es más costosa. Adicional a las características eléctricas destacadas, la seguridad de la tecnología es, sin lugar a duda, un factor que no se puede subestimar en aplicaciones de electromovilidad. Todos factores se deben tener en cuenta en la escogencia de la química para el sistema de electropropulsión y, asimismo, deben ser considerados de forma ponderada. En la figura 2.4 se exponen diagramas de araña que permiten obtener un panorama más amplio para las

características de las químicas NMC, NCA, LFP y LTO. En la figura se relacionan energía específica [Wh/kg], potencia específica [W/kg], seguridad, desempeño, vida útil y costo de las químicas que, al momento de la publicación de este libro, son las más utilizadas en vehículos eléctricos, especialmente NMC, la más popular.

Tabla 2.1. Características de las tecnologías de iones de litio Li-ion

Tecnología	Energía específica [Wh/kg]	Costo [USD/kWh]	Vida útil (ciclos de carga y descarga)	Tasa de carga
LCO	200	450	1000	1C
LMO	150	900	700	3C
NMC	200	130	1000	2C
LFP	160	90	2500	1C
NCA	200	130	1000	1C
LTO	80	1005	7000	5C

Fuente: elaboración propia.

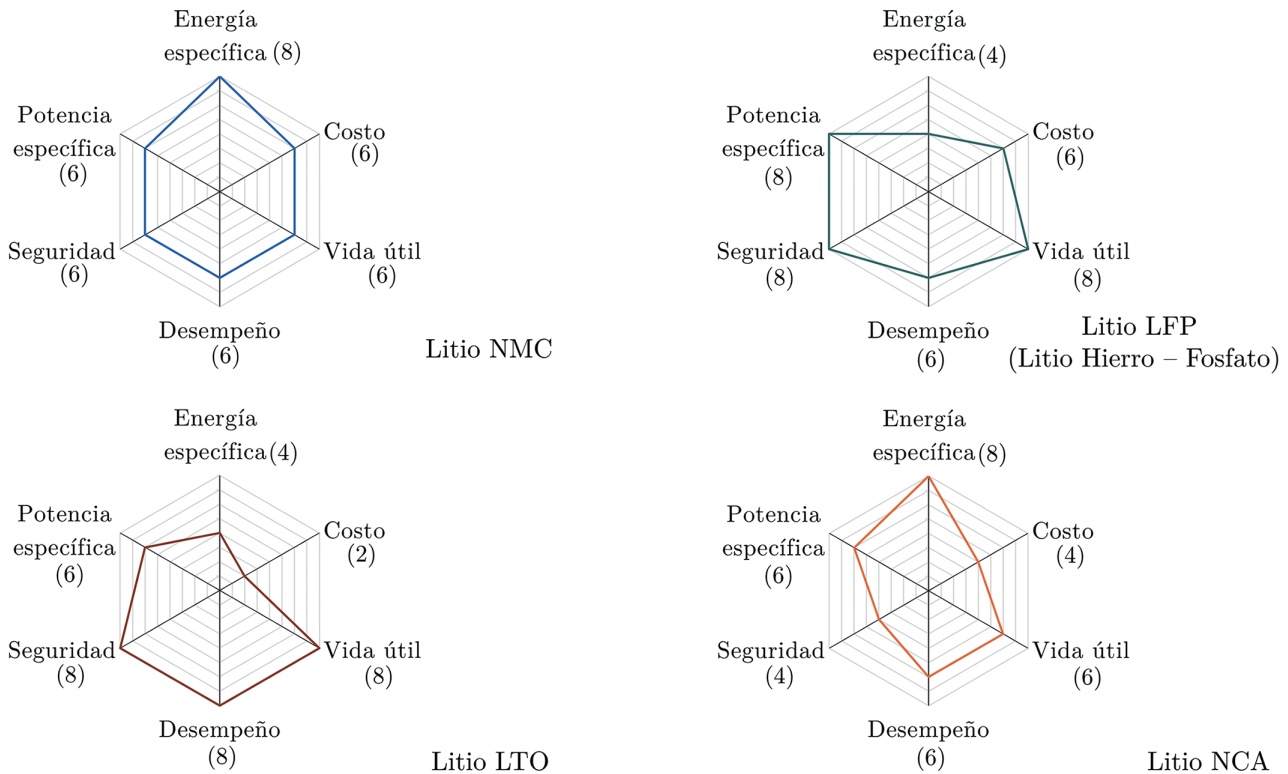


Figura 2.4. Comparación de NMC, NCA, LFP y LTO

Fuente: adaptado de Buchmann, I., 2001.

A partir de la figura 2.4, se evidencia que la elección de la batería es una decisión multifactorial. Cuando se observan las densidades energéticas de los distintos tipos de tecnología, es claro que las tecnologías NCA y NMC presentan una densidad energética mayor al resto, mientras que la de LTO es menor, y es una de las tecnologías más costosas. Por otro lado, cuando se analiza la cantidad de ciclos que duran las distintas tecnologías de baterías, se observa que el LTO, a lo largo del tiempo, es más rentable. De igual modo, la alta tasa de carga admitida por el LTO permite que se realicen cargas de baterías de muy corta duración, lo que las hace aptas para aplicaciones en las que el tiempo de recarga es crítico.

Las características discutidas anteriormente ayudan a escoger la tecnología más apropiada para la aplicación; aunque las consideraciones sobre las baterías para el sistema electropropulsado no deberían terminar aquí. Análisis críticos en sistemas electropropulsados —como la estimación del estado de carga (*SoC*) para evaluación de autonomía, el cálculo de la vida útil, el análisis de disipación térmica, estudios sobre el desgaste de la batería y el diseño riguroso de los sistemas de gestión para las baterías— requieren el uso de un modelo apropiado que permita reproducir su dinámica (Baczynska, 2018; Saldaña, 2019). En la siguiente sección se discuten algunas estrategias para modelar baterías eléctricas implementadas en vehículos eléctricos.

2.2.1.2. Modelo eléctrico de la batería

El modelo de batería más apropiado dependerá del campo de aplicación. Los modelos de las baterías eléctricas pueden ser electroquímicos, eléctricos, térmicos, mecánicos y también los hay estrictamente basados en datos obtenidos mediante técnicas de inteligencia artificial (Saldaña, 2019). Los modelos electroquímicos son los más precisos, pero, igualmente, los más complejos de tratar e implementar. En esta sección se presenta un modelo eléctrico simplificado, que no tiene el nivel de detalle entregado por los modelos electroquímicos, pero es más fácil y rápido de efectuar. Estos modelos permiten reproducir la evolución en el tiempo de sus características eléctricas como corrientes, voltajes y estados de carga y dependerán de las condiciones iniciales de operación. Diversos trabajos han tratado modelos eléctricos para baterías de tecnologías que pueden incluir o no datos experimentales (Saldaña, 2019). Los modelos eléctricos, típicamente, tienen parámetros que son estimados mediante experimentación en la batería. En la figura 2.5 se muestra un modelo eléctrico de una batería Li-ion, basado en el equivalente eléctrico de Thévenin (Baczynska, 2018).

Este modelo se compone por una resistencia R_0 conocida como resistencia interna de la batería. Debido a esta resistencia hay una caída de potencial, casi instantánea, en el voltaje de la batería cuando esta se conecta a una carga. Luego, se tiene en serie el ramal en paralelo del capacitor C_1 y la resistencia R_1 , que tienen un mayor efecto en el cambio transitorio del voltaje de la batería. El voltaje de entrada V_{OC} del equivalente eléctrico dependerá del estado de carga de la batería.

Los parámetros R_0 , R_1 y C_1 pueden ser optimizados a partir de experimentación usando las curvas de carga y descarga (Baczynska, 2018). Para una carga determinada, y según un estado de carga inicial $SoC_{inicial}$, la corriente de la batería $I_{bat}(t)$ y el estado de carga $SoC(t)$ se pueden relacionar, como sugiere Manrique (2020), de la siguiente manera:

$$SoC(t) = SoC_{inicial} - \frac{1}{Q_{max}} \int_0^t I_{bat}(\tau) d\tau \quad (2.1)$$

Con Q_{max} , la capacidad máxima de carga de la batería en [Ah]. Para que el modelo de la figura 2.5 permita la obtención de la corriente de la batería en el tiempo, se requiere obtener una expresión que relacione el voltaje en circuito abierto V_{OC} con el estado de carga SoC de la batería. Usualmente, se usan funciones no lineales que son propias de cada tecnología de baterías. Estas relacionan los ciclos de carga y de descarga al V_{OC} con SoC y se conocen como curvas soc-vco. Zhang (2016) propone una estrategia para hallar una función no lineal generalizada que permite relacionar el estado de carga SoC y el voltaje en circuito abierto V_{OC} en baterías Li-ion:

$$V_{OC}(t) = a + b \cdot (-\ln(SoC(t)))^m + c \cdot SoC(t) + d \cdot e^{n(SoC(t)-1)} \quad (2.2)$$

Los parámetros a , b y c se estiman experimentalmente y los parámetros $m > 0$ y $n > 0$ dependen de la tecnología de la batería (Zhang, 2016). En la ecuación (1.2), el estado de carga cumple $0 \leq SoC \leq 1$. A modo de ejemplo, a continuación, se implementa la metodología descrita para hallar un modelo eléctrico equivalente de una batería NMC de 87 Ah compuesta por cinco celdas en paralelo, cada una de 3,7 V y mostrada en la figura 2.6.

Se usó la curva experimental de descarga con tasa 0,5 C (ver figura 2.7) y se obtuvo una estimación de los parámetros R_0 , R_1 , C_1 , a , b , c , m y n , con un ajuste a los datos experimentales de 0,2676 % de error porcentual medio absoluto (MAPE), el cual, al ser menor a 1 %, confirma que los parámetros obtenidos son adecuados para la implementación dentro del modelo.

Figura 2.5. Modelo eléctrico de una batería Li-NMC

Fuente: basado en el equivalente eléctrico de Thévenin (Baczynska, 2018).

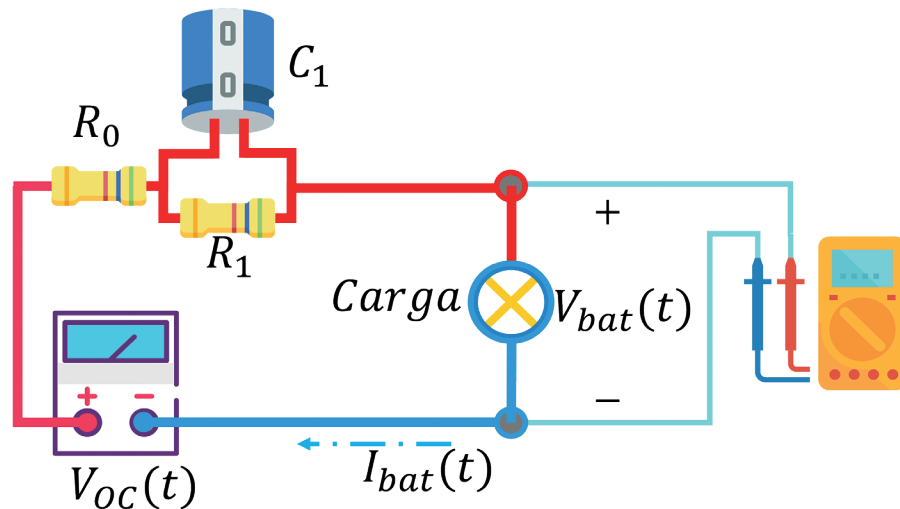




Figura 2.6.
Batería NMC (3.7V - 87Ah)

Fuente: elaboración propia.

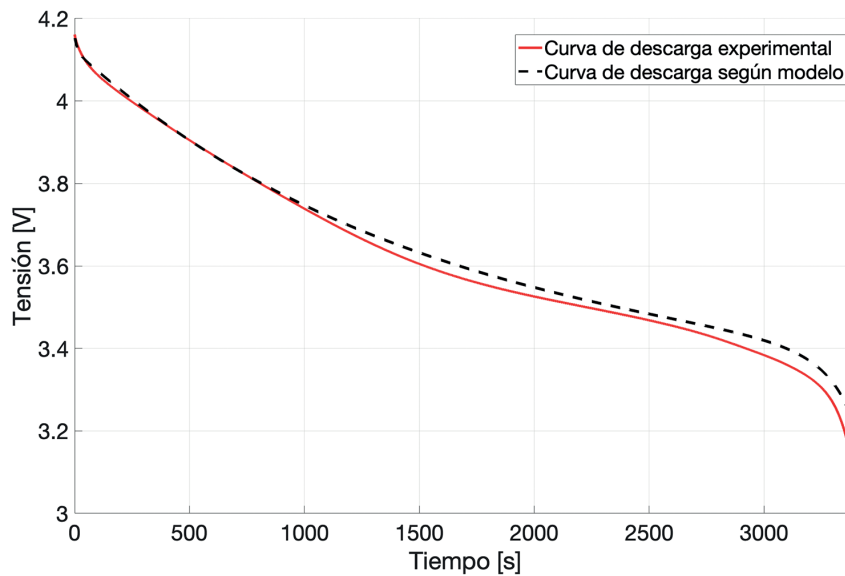


Figura 2.7.
Curva experimental con tasa de descarga 0,5 C y su aproximación no lineal

Fuente: elaboración propia.

Este modelo eléctrico es un modelo matemático paramétrico adaptable a diferentes tecnologías de batería, el cual complementa el estudio previo realizado de los criterios como la seguridad, el peso, las temperaturas y el desempeño de la batería. Igualmente, puede ser integrado a modelos de sistemas de gestión de la batería para derivar estrategias de gestión energética.

La tabla 2.2 presenta los valores estimados a partir de la curva de descarga experimental mostrada en la figura 2.7.

Tabla 2.2. Parámetros obtenidos para el modelo de la batería

Parámetro	Valor
R0	1267e-01 mΩ
R1	1399 mΩ
C1	4736e+01 kF
a	3422
b	-1229e-03
c	4546e-02
d	7446e-01
m	4849
n	2399

Fuente: elaboración propia.

2.2.1.3. Sistema de gestión de baterías (BMS)

El sistema de gestión de baterías (*battery management system* - BMS) es la unidad central de control del arreglo de baterías. Este debe proveer protección ante sobrecargas, sobredescargas, altas y bajas temperaturas, así como cortocircuitos. Además de proveer protección, el BMS debe monitorear el estado del arreglo de baterías, comunicarse con controladores y sistemas, pero también balancear y optimizar el desempeño de las baterías. Existen cuatro topologías básicas de BMS.

- **BMS centralizado:** la tarjeta principal de control junto con las tarjetas de monitoreo de celdas se localizan en una unidad con cableado que se extiende por todo el grupo de celdas. Esto minimiza la cantidad de *hardware*, pero aumenta el cableado en el arreglo.
- **BMS modular:** en esta topología, el BMS se divide en varios módulos. Comúnmente, el primero es el maestro y se comunica con los demás módulos y el exterior. El resto actúa de acuerdo con las órdenes del maestro.
- **BMS maestro-esclavo:** en este tipo de sistemas, el módulo maestro no hace parte de los módulos de medición y balanceo, sino que está encargado únicamente de comunicar los datos de los esclavos con otros sistemas.
- **BMS distribuido:** al igual que en otras topologías, existe un maestro encargado de las comunicaciones y unos esclavos que gestionan la medición y el balanceo. No obstante, los esclavos se encuentran dedicados a cada celda en un bloque de baterías, lo que hace de esta solución más costosa que el resto de las topologías para un lote de baterías de dimensiones considerables.

Una de las principales funciones del BMS es el balanceo de celdas, es decir, mantener las celdas del arreglo con el mismo estado de carga. Este proceso es necesario, pues la habilidad de descarga es limitada por la celda con el menor estado de carga, mientras la carga es limitada por la celda con mayor estado de carga. Existen dos métodos principales de balanceo según el modo de transferencia de potencia.

- **Balanceo pasivo:** implica utilizar un resistor conectado con algunas celdas en paralelo para recoger el exceso de energía y disiparla en forma de calor. Este tipo de equalización es ampliamente utilizado en vehículos eléctricos debido a su simplicidad, confiabilidad y bajo costo. Sin embargo, este método se puede aplicar solamente en condiciones de carga. Por otro lado, tiene varias desventajas como la baja eficiencia, los largos tiempos de balanceo y la alta generación de calor. Existen dos tipos de balanceo pasivo: de resistencia fija y de resistencia conmutable.

- **Balaceo activo:** transfiere la energía de celdas con más energía a aquellas que tienen menos a través de un circuito de ecualización. Este proceso es más eficiente que el método de balanceo pasivo, aunque resulta costoso, complejo y poco confiable. Existen tres tipos de balanceo activo: basado en capacitores, basado en inductores/transformadores y basado en convertidores.

En la mayoría de los distintos tipos de balanceo, la energía debe ser transferida entre las celdas más de una vez o es disipada por elementos que no corresponden al uso final deseado, lo que resulta en baja eficiencia y problemas termodinámicos.

2.2.1.4. Control de temperatura

Las estrategias para controlar la temperatura de la batería involucran el uso de medios como el aire, líquido o refrigerantes, que son forzados a fluir a través del arreglo de baterías para reducir las temperaturas.

Los sistemas que utilizan el aire como medio de refrigeración lo pueden hacer de manera activa (con flujo forzado o artificial de aire) o pasiva (uso de disipadores sin flujo artificial de aire). Las ventajas de los sistemas de refrigeración activa con aire son las siguientes: respuesta rápida a cambios de temperatura, menor peso que un sistema con líquido refrigerante, el aire fluye directamente a través de las celdas; mientras que las desventajas radican en que en estos sistemas el aire no es un medio de enfriamiento tan efectivo como el líquido. Puede haber desequilibrio de temperaturas entre las celdas al inicio del flujo de aire y las celdas al final del flujo de aire. Es “abierto”, por lo tanto alcanzar grados de protección como IP69 no es sencillo.

Otro tipo de refrigeración activa es la refrigeración por líquido. Forzar líquido a través de placas que están montadas junto a las celdas es un método común de gestión activa de la temperatura. Las ventajas de este sistema son, por un lado, que el líquido es un medio efectivo para transferir el calor de las celdas rápidamente. En complemento con un sistema de calentamiento, puede ser utilizado para calentar el sistema de baterías en climas más fríos. Las desventajas es que tiende a ser pesado, hay riesgo de fugas dentro del sistema de baterías y también que el proceso de sellado no es sencillo. A su vez, la refrigeración activa por líquido se puede clasificar en dos métodos. En el primero se implementa una placa que se fija directamente a las celdas y hace fluir el líquido directamente a través de las placas. El segundo consiste en una única placa a través de la cual el líquido fluye, pero en lugar de fijar las celdas directamente a esta placa, una serie de “aletas” se fijan a la placa de intercambio de calor y las celdas se fijan a estas aletas. Los sistemas basados en refrigerantes tienen las mismas ventajas que los sistemas de refrigeración con líquido y, además, previenen las fugas de líquido, aunque son más costosos.

Por otra parte, el control pasivo de temperatura de las celdas se realiza sin forzar flujo de aire o líquido a través de la batería. El método más común es implementar aluminio o carcasas de metal a las que el calor de las celdas es transferido, haciendo que se disperse a través de todo el metal de la batería y sea irradiado al ambiente. Otro método consiste en diseñar la batería de tal forma que el aire fluya a través de ella a medida que el vehículo se mueva.

El uso de materiales de cambio de fase (*phase change material* - PCM) es un método costo-efectivo para el manejo de la temperatura de la batería. Un PCM es un material que va a través de varias fases físicas cuando es calentado, generalmente de sólido a líquido. Cuando las celdas se calientan, este absorbe el calor a través de todo el material y causa que se ablande o se derrita.

Una comparación cualitativa de distintos métodos de control de temperatura de baterías es realizada por Arora (2018). Esta evaluación tiene en cuenta características como facilidad de uso, integración, eficiencia energética, nivel de refrigeración, mantenimiento, costo inicial y estado de desarrollo. Algunos de los sistemas evaluados son presentados en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Comparación cualitativa de los distintos métodos de control de temperatura

	Activo		Pasivo	
	Aire	Líquido	Disipador	PCM
Facilidad de uso	Alta	Moderado	Alta	Alta
Complejidad de integración	Simple	Intermedia	Alta	Simple
Eficiencia energética	Baja	Media	Alta	Alta
Nivel de refrigeración	Bajo	Medio	Medio	Alto
Mantenimiento	Bajo	Medio	Bajo	Bajo
Costo inicial	Bajo	Alto	Moderado	Moderado
Estado de desarrollo	Comercial	Comercial	Comercial	Prototipo

Nota: verde denota cualidad positiva, naranja cualidad intermedia y rojo cualidad desfavorable.

Fuente: elaboración propia.

2.2.2. Convertidores de potencia

Los convertidores de potencia son circuitos electrónicos basados en dispositivos semiconductores (diodos, transistores, tiristores, triodos para corriente alterna, etc.), generalmente utilizados como interruptores para alterar o procesar la naturaleza de una tensión o una corriente. La apertura y cierre, o conmutación, de estos interruptores es realizada por un sistema de control encargado de dirigir la transferencia de energía, de tal forma que satisfaga las necesidades de tensión y corriente de la carga. Esta transferencia sucede entre componentes de corriente directa (DC), componentes de corriente alterna (AC) o, asimismo, mixtos.

Según su topología, los convertidores clasifican en convertidores AC/DC, DC/AC, DC/DC o convertidores AC/AC. En un vehículo eléctrico estos elementos se encuentran presentes en gran parte de los sistemas que lo componen, por ejemplo en el sistema de carga de baterías, el sistema de accionamiento del motor y servicios auxiliares en AC y en DC son fundamentales, porque optimizan la transferencia de energía para el correcto funcionamiento del vehículo (Ponce, 2015).

2.2.2.1. Convertidores con entrada AC / salida DC

Los convertidores AC/DC son rectificadores controlados que, a diferencia de los construidos con puentes de diodos (de media onda o de onda completa), permiten obtener diferentes valores de voltaje DC a la salida y no solo uno. Estos convertidores, que usan típicamente tiristores controlados por fase, se clasifican según el número de fases de la fuente de energía AC (monofásica, trifásica o hexafásica), su nivel de control (semicontrolado o controlado) y en función de su estructura (en puente o en matriz de conversión) (Hart, 2001). En un vehículo eléctrico, este tipo de convertidor se encuentra en el sistema de carga interno del mismo (cargador a bordo). La energía en forma AC es convertida por el cargador en DC, la cual puede ser aprovechada por las baterías del vehículo.

2.2.2.2. Convertidores con entrada DC / salida AC

Estos convertidores, conocidos como inversores, permiten obtener un componente con corriente alterna AC, desde una fuente de corriente directa o DC, típicamente una batería. En la figura 2.8 se presenta el esquema general de un conversor DC/AC.

Los inversores son utilizados para transferir energía a la carga que opera con corriente alterna controlando el voltaje o la fase. En la actualidad, los inversores pueden usar transformadores de toma media o *push-pull*, baterías de toma media, o bien una configuración en puente completo para realizar la transformación DC a AC. Cada uno de estos métodos presenta ventajas y desventajas que deben ser considerados según la aplicación (Gualda y Martínez , 2006). En vehículos eléctricos, los inversores son utilizados para el control de velocidad y torque de motores de inducción o de motores sincrónicos de imanes permanentes, que son los dos tipos de motores AC más utilizados en sistemas electropropulsados.

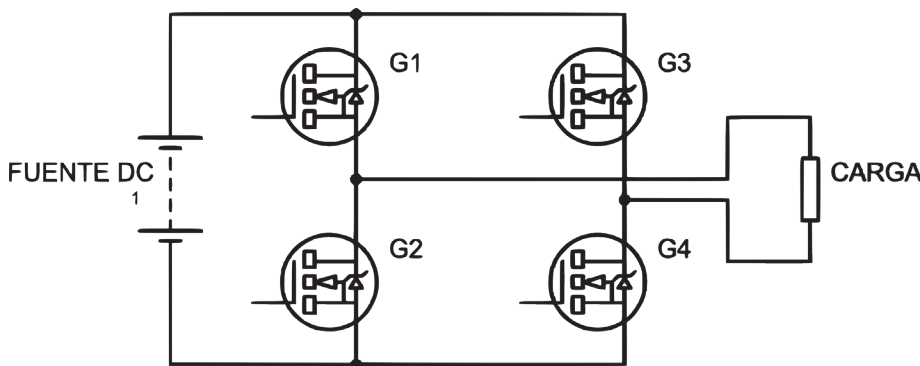


Figura 2.8.
Esquema general del inversor

Fuente: adaptado de Ponce (2015).

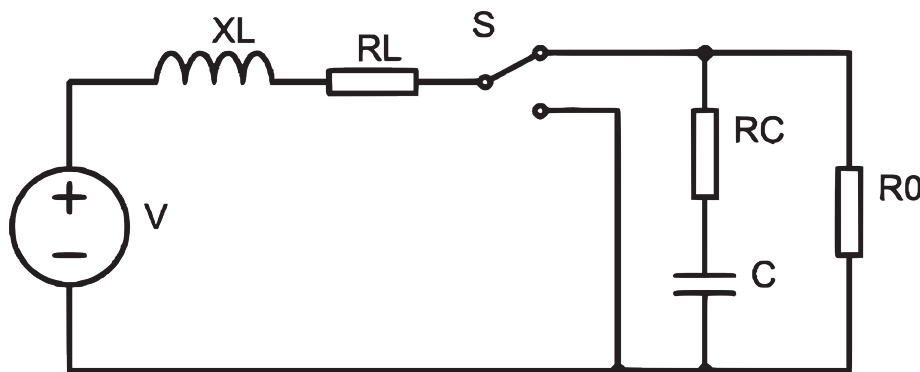


Figura 2.9.
Esquema general de un convertidor DC/DC

Fuente: adaptado de Ponce (2015).

2.2.2.3. Convertidores con entrada DC / salida DC

Los convertidores de potencia DC/DC son dispositivos electrónicos que transforman un voltaje DC de entrada en otros de valores superiores, inferiores o iguales, según su configuración, y son ampliamente utilizados en la industria. Los hay en tres configuraciones: 1) elevadoras o *boost*, para obtener voltajes de salida con valores superiores al valor de entrada; 2) en configuraciones reductoras o *buck*, que obtienen voltajes de valores inferiores; y en configuraciones elevadoras-reductoras o *buck-boost* (o *cúk* si la polaridad del voltaje de salida es inversa a la de entrada), que permiten la excursión desde voltajes inferiores hasta voltajes superiores al valor de entrada. La figura 2.9 muestra tres configuraciones de convertidores DC/DC. La salida del convertidor DC/DC siempre será regulada en los diferentes valores de operación, aunque la entrada no lo sea.

La conversión DC/DC se realiza mediante el control de las señales de conmutación de los interruptores en el convertidor y para cada configuración, el valor de salida dependerá del valor del ciclo útil de conmutación. Estos interruptores, al igual que los interruptores en los inversores, son implementados comúnmente por dispositivos semiconductores, como diodos o MOSFETS. En vehículos eléctricos, los convertidores DC/DC cumplen diversas funciones: se usan para el control del motor DC y como fuente regulada en el sistema de gestión de baterías BMS, manteniendo el voltaje de salida constante a pesar del voltaje en la batería.

2.2.2.4. Convertidores con entrada AC / salida AC

Los convertidores AC/AC, usando tiristores conectados entre la fuente, modifican la amplitud o la frecuencia de una señal de corriente alterna. La conmutación de los tiristores se produce por línea o por ángulo de fase, conectando la carga solo en algunos ciclos del voltaje de entrada o en algunas partes de cada ciclo (Rashid, 2004). La figura 2.10 presenta el esquema general de un convertidor AC/AC.

En vehículos eléctricos, los convertidores AC/AC se usan, por ejemplo, en etapas de transferencia de energía entre embobinados en sistemas de transferencia inalámbrica de potencia o WTP (*wireless power transfer*).

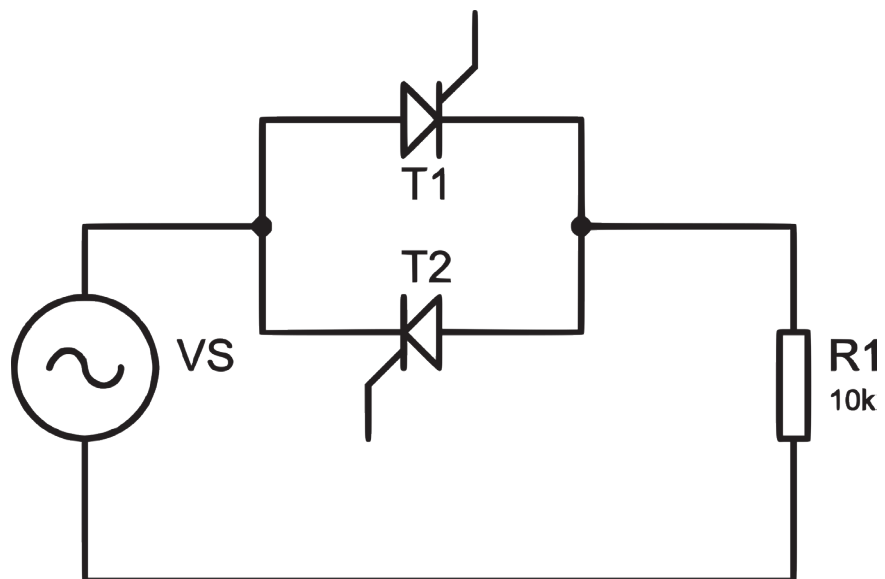


Figura 2.10.
Esquema general de
un convertidor AC/AC
Fuente: Ali (2018).

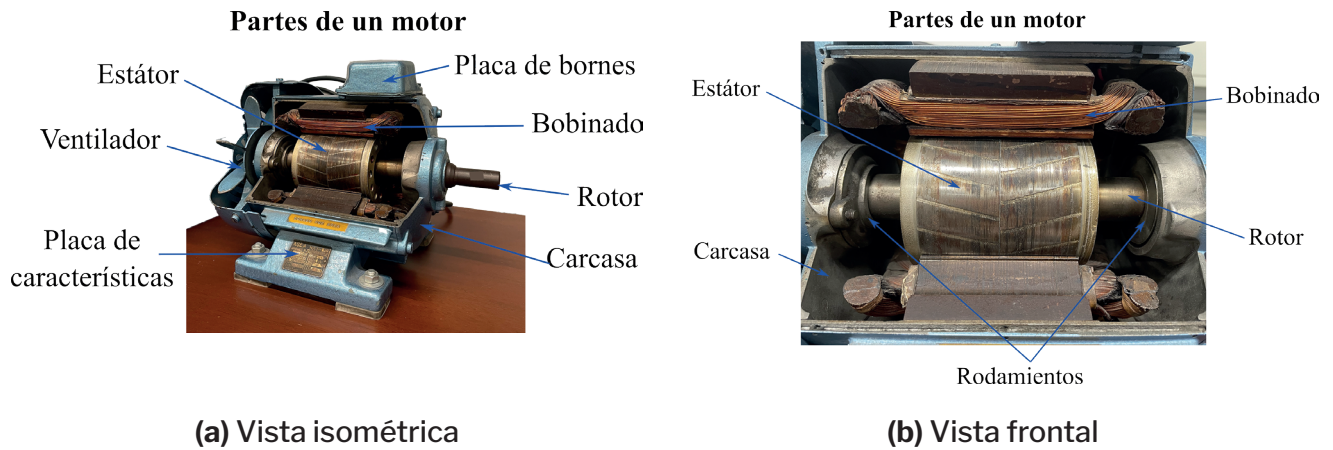


Figura 2.11. Partes de un motor eléctrico. Motor AC jaula de ardilla

Fuente: elaboración propia.

2.2.3. Motor eléctrico

El motor eléctrico es un tipo de máquina que convierte energía eléctrica en mecánica rotativa (Guru *et al.*, 2003). El más usado es el motor de inducción, puesto que ofrece una amplia gama de ventajas, como lo es su bajo costo, facilidad de transporte, limpieza y operación, construcción simple, buen rendimiento y gran versatilidad para adaptarse a diversos tipos de carga (WEG, 2021). Principalmente, el motor está compuesto por el rotor, estator, bobinado y eje (ver figura 2.11).

Los principales elementos constitutivos de un motor son: el rotor, que gira en el motor y existen tres tipos: ranurado, de polos salientes y jaula de ardilla. El estator, que opera como base y está fijo para permitir la rotación del motor. El tercer elemento es el eje del rotor, el cual guiará el movimiento de rotación a los sistemas que sean conectados al motor, extendiendo, así, la rotación del motor (Rega, 2011). A su vez, los motores eléctricos se pueden clasificar en dos tipos: de corriente alterna (AC) y de corriente continua (DC). Ambos convierten algún tipo de energía eléctrica (variable en el tiempo o estable) en energía mecánica rotacional.

Para vehículos eléctricos, los motores AC de inducción y sincrónicos de imanes permanentes, así como los motores DC, también de imanes permanentes, son los más usados. Los de inducción se prefieren en aplicaciones de electromovilidad que requieren un muy alto desempeño, pues tienen menores costos de producción, alcanzan mayores velocidades sin riesgo de desmagnetizarse, su eficiencia promedio puede ser mejor y no sufren tantas pérdidas en aplicaciones de mayor potencia. Por otra parte, los motores AC y DC de imanes permanentes, utilizados en aplicaciones que buscan la máxima eficiencia pico, presentan mayor densidad de torque y potencia y las estrategias de control son más sencillas de implementar que aquellas para los motores de inducción. No obstante, podrían tenerse ejemplares de motores de inducción y de imanes permanente con mapas de eficiencia idénticos y comportamientos casi iguales; ambos son, prácticamente, libres de mantenimiento, porque ninguno de los dos lleva escobillas. Así, al seleccionar un motor para vehículo eléctrico, se deben comparar las características de los modelos en

particular. A continuación, se presentan las principales características de los motores eléctricos más utilizados en sistemas electropropulsados.

2.2.3.1. Motores AC

Se conocen como motores AC, o de corriente alterna, a los motores de inducción que operan mediante en un campo magnético rotativo entre el rotor y el estátor. Estas máquinas se caracterizan por su flexibilidad para el control de su velocidad, aceleración y corriente de arranque. En general, se pueden clasificar en dos grupos: motores sincrónicos y motores asincrónicos o de inducción.

- **Motor sincrónico:** su principal característica radica en que su velocidad permanece constante bajo cargas variables y la velocidad es dependiente de la frecuencia de la red a la que se encuentre conectado el motor. Por lo tanto, es ampliamente utilizado en aplicaciones en las que se requieran posicionamientos de alta precisión en procesos industriales. De acuerdo con su construcción, pueden ser motores de reluctancia variable o motores sincrónicos de imanes permanentes. Los de reluctancia variable tienen un rotor magnético dentado, en un material dúctil, que se acopla al estator, lo que reduce la reluctancia rotor-estator. Estos últimos son usados en aplicaciones que requieran seguir pasos muy pequeños. Los motores de imanes permanentes poseen imanes permanentes en el rotor, con el fin de formar polos salientes. Estos permanecen excitados todo el tiempo, por lo que, ante variaciones de carga, poseen una respuesta muy buena (ver figura 2.12).
- **Motor asincrónico:** conocido como motor de inducción, debido a que la tensión en el rotor es inducida en sus devanados y no a través de conexiones físicas con cables. Por esta razón, para su funcionamiento no es necesaria una corriente de campo. Existen dos tipos de rotor que pueden ser utilizados en motores asincrónicos. Los más utilizados son los de jaula de ardilla y los que son conocidos como de rotor devanado.
 - › **Motores de rotor de jaula de ardilla:** este rotor recibe su nombre por su similitud con una rueda de ejercicios para hámsteres y ardillas. Esta particularidad en la forma se consigue labrando ranuras en la cara del rotor. Una serie de barras en material conductor es dispuesta dentro de estas ranuras y sus extremos son puestos en cortocircuito, por lo que estos motores también reciben el nombre de rotor en cortocircuito (ver figura 2.11).
 - › **Motores de rotor devanado:** su construcción permite que la resistencia total del circuito del rotor pueda ser controlada. Esto facilita variar la característica par-velocidad del motor, lo cual se logra disponiendo un devanado trifásico en las ranuras de rotor. Asimismo, las tres fases de este devanado son conectadas en estrella y el otro extremo es acoplado a los anillos rozantes del rotor.



Figura 2.12. Motor síncrono de imanes permanentes

Fuente: elaboración propia.

2.2.3.2. Motores DC

Los motores DC, o de corriente directa, dependen de las fuerzas producidas por campos magnéticos y pueden ser con escobillas o sin escobillas. Los motores con escobillas poseen ventajas en su implementación, como su fácil instalación, el amplio rango de velocidad, su curva de par lineal y el bajo costo, así como el control, que también es muy simple, todo lo cual los ha hecho populares en aplicaciones domésticas y equipos industriales básicos. Dependiendo de la configuración entre el devanado que genera la autoexcitación (o de campo) y el devanado del rotor, los motores con escobillas se pueden clasificar en *shunt*, serie y compuesto. Sin embargo, los motores con escobillas no han tenido éxito en aplicaciones de electromovilidad, principalmente debido al mantenimiento que requiere el desgaste de las escobillas, su gran tamaño y la baja eficiencia. En la siguiente sección se describen con detalle los motores DC sin escobillas que cuentan con imanes permanentes, los cuales han tenido mayor acogida en aplicaciones de electromovilidad.

2.2.3.3. Motores DC sin escobillas (BLDCM)

Actualmente, el control preciso de velocidad y posición, usando motores de corriente continua sin escobillas o BLDCM (*brush less direct current motor*), es posible gracias a los avances en electrónica de potencia y sistemas de control digital (Guru *et al.*, 2003). Se trata de un tipo de motor trifásico síncrono, similar a un motor trifásico de inducción, cuyo campo inducido se reemplaza por un campo conformado por imanes permanentes. El devanado permanece estático, por lo que su refrigeración se hace casi enteramente por convección o ventilación forzada. El campo, que es giratorio y contiene los imanes (fabricados en neodimio u otros compuestos), es solidario al eje transmisor de potencia (ver figura 2.13). Su uso es muy popular en electromovilidad e hibridación vehicular.

La principal característica de esta clase de motores, respecto de sus pares *brushed* (con escobillas), es la ausencia de los efectos mecánicos y eléctricos (fricción) entre el colector de delgas y las escobillas. Generalmente, las temperaturas de operación de estos dispositivos son inferiores debido a las pocas pérdidas por fricción y gracias a su alta eficiencia eléctrica (más del 85 % en la mayoría de los casos). Por esto, se han vuelto una opción atractiva en aplicaciones diferentes de la electromovilidad, como la robótica, la manufactura, el control numérico computarizado (CNC) y el aeromodelismo.

La relación de torque versus peso en relación con los motores de escobillas es superior, y las interferencias electromagnéticas (EMI) que genera son inferiores, al igual que el ruido durante su operación (Gencer y Gedikpinar, 2006; Hua-bin y He-ping, 2008).

El principal inconveniente de estos motores es que requieren un controlador electrónico de velocidad, o ESC, que genere la secuencia de pulsos necesaria para hacer funcionar el motor en todo el régimen de velocidades. El rango de temperaturas de operación también es estrecho, ya que alcanzar las temperaturas de desmagnetización ocasiona una repentina pérdida de potencia y la subsecuente destrucción del motor, ocasionada por la disminución repentina del BEMF (*back electro motive force*), aumento de corriente y cortocircuito del devanado. Dependiendo del arreglo de su devanado, los motores BLDC pueden clasificarse como delta o estrella, eléctricamente hablando. Esta conexión se hace de igual modo que los motores trifásicos de inducción, utilizados comúnmente en la industria. Dicho esquema de conexión de las fases se observa en la figura 2.14.



Figura 2.13. Motor BLDC en configuración HUB en una motocicleta

Fuente: elaboración propia.

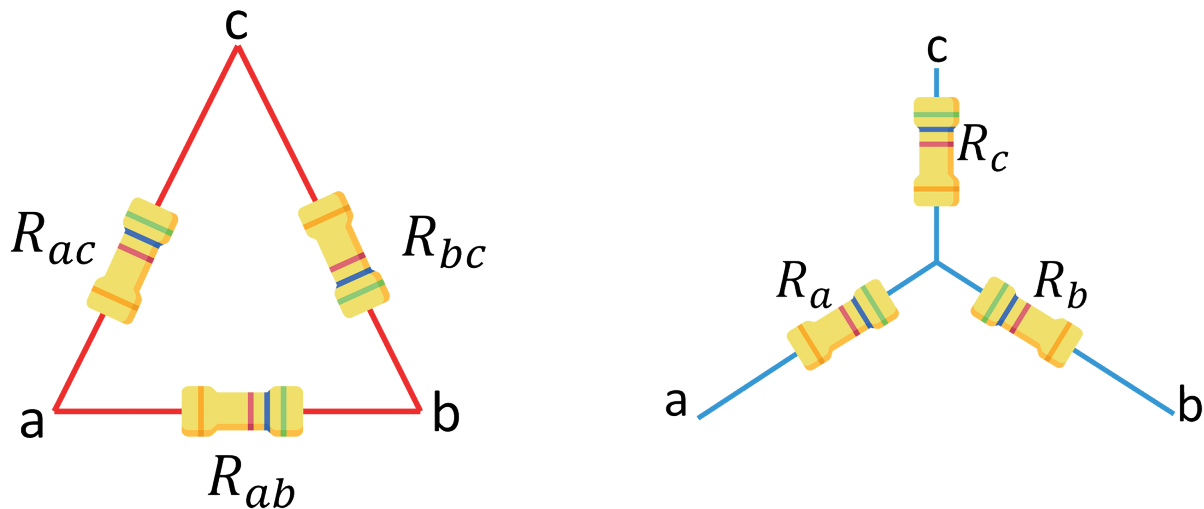


Figura 2.14. Conexión de devanado en delta (izq.). Conexión de devanado en estrella (der.)

Fuente: adaptado de Ali (2018).

En la conexión en delta, el extremo de cada fase se une entre sí con la siguiente. Esto obliga a que la corriente de línea sea tres veces la corriente de fase. Así, el voltaje de fase permanece igual al voltaje de línea. En cambio, en la conexión de devanado en estrella, uno de los extremos de cada fase se une entre sí en un punto llamado común. Esta conexión se caracteriza porque la corriente de línea es igual a la corriente de fase y el voltaje de línea es igual a tres veces el voltaje de fase (dicha relación se conoce como relación línea-fase). El consumo de corriente en la conexión estrella es inferior al requerido en la conexión delta, pues solo se requiere un voltaje de línea superior para poder excitar correctamente las fases en configuración estrella.

Usualmente, en instalaciones de motores trifásicos de gran potencia (refiriéndose a motores de inducción), es necesario cambiar durante la corrida el tipo de conexión del devanado, para permitir un arranque más suave, reduciendo así el consumo de corriente instantáneo de arranque. Para lograrlo, se implementan arrancadores estrella-delta, los cuales llevan el rotor a un estado de movimiento tal que el consumo esté controlado durante el arranque hasta que se alcanza la velocidad nominal. En este punto se hace el cambio (en este caso a delta) y se alcanzan las condiciones de torque y velocidad que requiere la aplicación.

Dependiendo de la construcción, los motores BLDC se clasifican en *outrunners* e *inrunners*. En los primeros, el campo rotatorio se sitúa en el exterior del devanado, encerrándolo alrededor de una campana. Esta es solidaria al eje, mientras que el devanado se fija a través de una brida de montaje externa. Se caracteriza por el torque elevado que puede entregar, generalmente, a velocidades inferiores (sin tener en cuenta los efectos de la constante Kv en la velocidad del motor), ya que el campo envuelve completamente el motor y, por lo tanto, posee una ventaja mecánica más elevada. En la mayoría de los casos, y cuando no se requiere un torque excesivamente elevado, no se instalan mecanismos de reducción. A su vez, en los motores *inrunners*, el campo rotatorio se sitúa en el interior del devanado y es encerrado por este. El campo es solidario al eje, mientras que el devanado se fija a través de la misma carcasa externa del motor (similar a los motores con escobillas de corriente continua). Se caracteriza por las velocidades de rotación elevadas que puede entregar, sacrificando el torque, debido a la poca ventaja mecánica que ofrece el rotor. Generalmente, los motores *inrunners* se acompañan de sistemas de reducción rígidos o flexibles, como bandas, cadenas, piñones, etc.

Por otro lado, dependiendo de la posición relativa del campo al devanado, pueden clasificarse como motores de flujo axial o de flujo radial. Los de flujo radial se disponen de tal forma que las líneas de flujo magnético, que pasan a través del espacio vacío entre campo y devanado (*air gap*), son perpendiculares o radiales al eje del motor, porque el flujo magnético es inferior por la superficie reducida. Estos motores suelen alargarse en la dirección del eje motor para compensar, por lo que tienden a ser más pesados. Los de flujo axial son aquellos dispuestos de tal modo que las líneas de flujo magnético, que pasan a través del espacio vacío entre campo y devanado (*air gap*), son paralelas al eje del motor. Se caracterizan por tener una superficie mayor (mayor flujo magnético), presentan poca inercia en el rotor y, por ende, pueden fabricarse más livianos. Debido a la esbeltez axial que poseen, pueden empotrarse directamente en la carga, por lo que suelen usarse dentro de ruedas de transmisión, al igual que en ruedas de vehículos (no confundir con los motores HUB, que pueden fabricarse tanto de flujo axial como de flujo radial) (Yilmaz, 2009).

2.2.3.4. Modelos eléctricos de los motores y mapas de eficiencias

Respecto a las características eléctricas de un motor, pueden desarrollarse modelos eléctricos apropiados, más o menos simplificados, según la aplicación. Por ejemplo, el motor eléctrico DC puede representarse como un circuito eléctrico simplificado, como se muestra en la figura 2.15.

La ecuación 2.3 se obtiene al aplicar la ley de voltajes de Kirchoff al circuito del motor eléctrico:

$$V_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_a(t) \quad (2.3)$$

En la que V_a es el voltaje de entrada, i_a la corriente del devanado, R_a la resistencia del devanado, L_a la inductancia del devanado y e_a es la fuerza electromotriz (FEM) inducida. De esta manera, las ecuaciones mecánicas y eléctricas del motor están conectadas por el flujo de campo del motor, como se muestra en las ecuaciones 2.4 y 2.5:

$$e_a(t) = K_e \Phi_f \omega_m(t) \quad (2.4)$$

$$T_e(t) = K_T \Phi_f i_a(t) \quad (2.5)$$

Donde K_T es la constante de torque del motor y K_e la constante de FEM. Los valores en este modelo son iguales. Si bien estos modelos eléctricos pueden ofrecer una descripción de la dinámica del motor, más o menos precisa según su complejidad, los rangos de operación en los que los motores deben ser operados se fijan según el mapa de eficiencias del mismo. La eficiencia del motor eléctrico se define como la relación existente entre la potencia mecánica de salida sobre la potencia eléctrica de entrada:

$$Eficiencia_{motor}(t) = \frac{\omega_m(t) T_e(t)}{V_a(t) i_a(t)} \quad (2.6)$$

Típicamente, los motores eléctricos serán más eficientes si operan alrededor del 70 % de la carga nominal, aunque lo pueden hacer hasta el 99 % de esta carga. Pese a esto, los motores no deberían operar con cargas menores al 50 % de la carga nominal, para evitar que la eficiencia se vea gravemente comprometida. Para hallar la curva de funcionamiento de los motores eléctricos se utilizan los datos proporcionados por el fabricante, que son: potencia pico y las máximas rpm sin carga (*no-load speed* o NLS). Con estos datos se obtienen mapas de eficiencia que indican las regiones de operación adecuadas para los motores, como la mostrada en la figura 2.16.

Conociendo la eficiencia global, se determina el punto de operación del motor procurando la operación en la zona de mayor eficiencia. En general, la eficiencia de un motor AC está dada por:

$$E_f = \frac{746HP}{V_{L-N} I \cos(\Phi)} \quad (2.7a)$$

Donde HP indica la potencia en caballos de fuerza, 746 es el factor de conversión de HP a kW, I es la corriente, $\cos\phi$ es el factor de potencia y V_{L-N} el voltaje línea neutro. Por otra parte, la eficiencia de un motor DC es:

$$E_f = \frac{746HP}{VI} \tag{2.7b}$$

Aquí, HP indica, nuevamente, la potencia en caballos de fuerza, 746 es el factor de conversión de HP a kW, V es el voltaje del motor e I, la corriente.

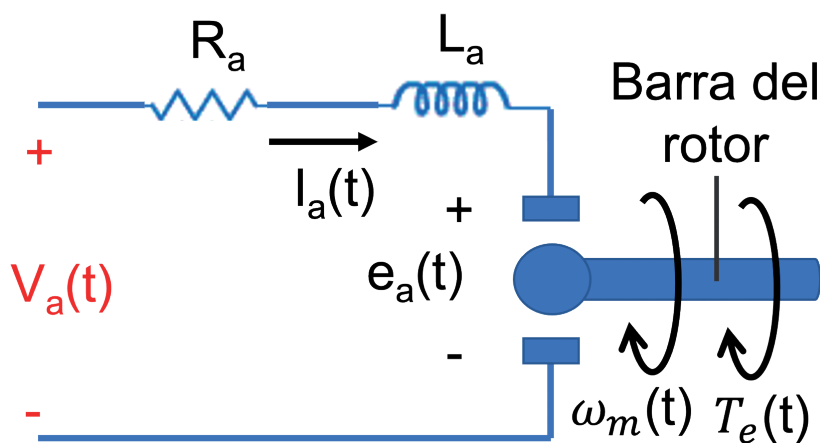


Figura 2.15. Modelo simplificado de un motor DC
Fuente: Kim (2017).

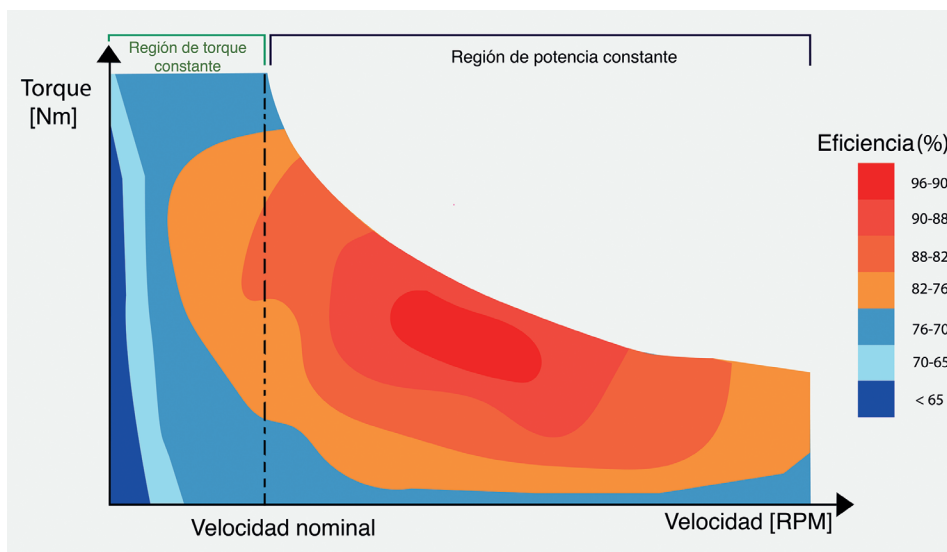


Figura 2.16. Mapa de eficiencias de un motor
Fuente: elaboración propia.

2.2.3.5. Sistema de control para los motores

El sistema de control de motor describe el conjunto de partes que este debe contener para operar adecuadamente y consta de todos los sensores, actuadores y sistemas de potencia necesarios para entregar la potencia adecuada para moverse. Para el control, es importante indicar que la fuente de energía es un grupo de baterías de las que se extrae información de variables de voltaje y corriente, lo que permite determinar los límites de operación de los componentes de potencia. Estas baterías son gestionadas por el BMS descrito anteriormente. Los siguientes componentes deben considerarse al controlar la operación del vehículo.

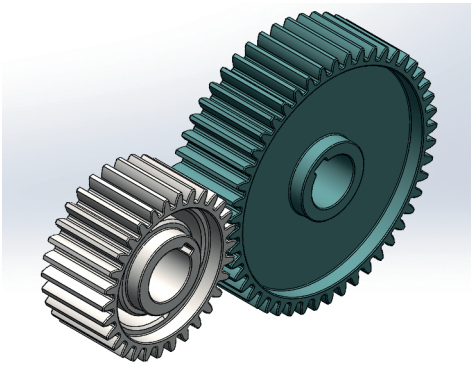
La CPU es un sistema centralizado que recibe las diferentes variables de los sensores y controles de mando del conductor para generar las acciones suficientes de control sobre el inversor. Esta se compone de todos los elementos necesarios para que un procesador, o similar, pueda funcionar. La CPU procesa un conjunto de variables que indican cómo se encuentra la operación del vehículo y cómo están sus fuentes de energía. Por ello, se tiene, al menos, el siguiente conjunto de variables, que se puede incrementar a medida que así lo requiera el diseño de detalle.

- Registrar la temperatura: se miden las temperaturas del motor, inversor y baterías para controlar los límites térmicos de operación.
- Registro del torque: percibir la potencia mecánica en el motor permite evitar el daño en sus componentes mecánicos.
- Registro de las RPM del motor: ayuda a conocer la velocidad de rotación del motor, con el fin de mantener las aceleraciones requeridas en el vehículo.
- Registro de la posición: así se puede determinar la posición del eje del motor para realizar un control óptimo.
- Registro del voltaje: monitorear los voltajes en las baterías, el inversor y el motor ayudan a determinar, junto con la corriente, si el control está aportando la energía y potencia necesaria para su adecuado funcionamiento. También, estimar cuál es la eficiencia de operación del todo el sistema.
- Registro de las corrientes: de igual forma que el voltaje, permite estimar la energía, potencia y eficiencia.

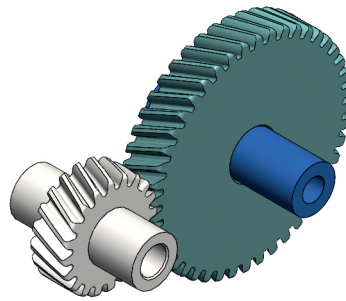
A la CPU se conectan otros elementos que mantienen el control sobre el sistema. Estos son la interfaz del usuario o HMI (*human machine interface*), el control y los mandos. La HMI tiene la función de presentar información de operación del sistema de una forma gráfica y fácil de entender. El control, a su vez, permite programar aspectos funcionales de cada componente del equipo y los mandos, operar el vehículo para variar la dirección y la potencia.

2.2.4. Transmisión

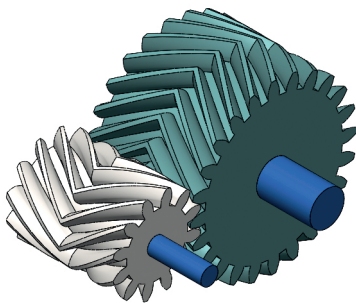
Los sistemas electropropulsados requieren transformar la energía mecánica provista por el motor a la interfaz de movimiento, que se logra acoplando el motor a un subsistema conformado por elementos que buscan optimizar la propulsión. A este conjunto de elementos, que de por sí requieren una disposición espacial específica, se les denomina transmisión. Esta es fundamental, pues de su apropiado diseño o selección dependen las pérdidas del sistema electropropulsado.



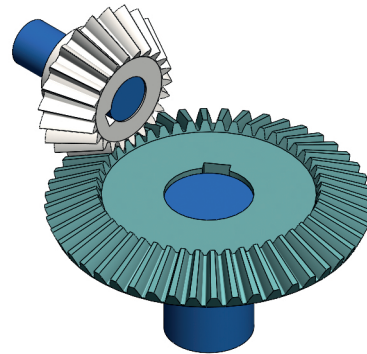
(a) Engranajes de ejes paralelos y dientes rectos



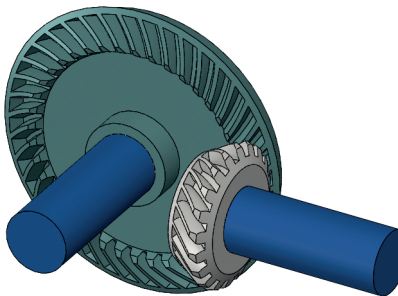
(b) Engranajes de ejes paralelos y dientes helicoidales



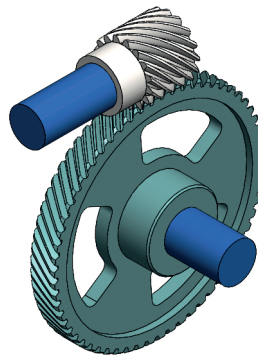
(c) Engranajes de ejes paralelos en configuración Herringbone



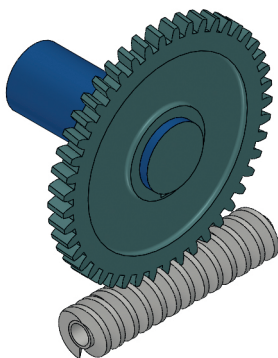
(d) Engranajes cónicos con ejes que se cortan



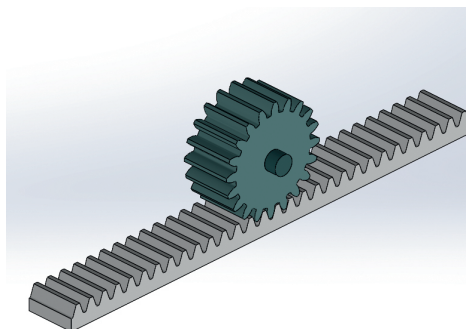
(e) Engranajes con ejes que se cortan y dientes espirales



(f) Helicoidales de ejes cruzados



(g) Configuración sinfín-corona



(h) Configuración piñón-cremallera

Figura 2.17.
Tipos de engranaje
Fuente: Quijorna (2007).

Las transmisiones varían ampliamente según el tipo de transporte. Por ejemplo, en un automóvil la transmisión es el conjunto de mecanismos para obtener mayor velocidad o fuerza, al variar la relación entre el cigüeñal y las ruedas, haciendo uso de los cambios de marcha que posee el vehículo. En cambio, en aplicaciones acuáticas (marinas o fluviales), las marchas actúan como un engranaje marino en lugar de transmisión acuática, propiamente dicha. El tren de engranajes de las embarcaciones se encarga de reducir la velocidad de rotación de la hélice a un valor inferior, según la relación de reducción incorporada en la transmisión. Adicionalmente, las leyes físicas que intervienen en la relación rueda-asfalto y en hélice-agua son diferentes, lo cual permite que la transmisión acuática prescinda de una primera marcha para romper la inercia (Quijorna, 2007).

Por otra parte, aunque la transmisión de movimiento logre con otros subsistemas, como poleas, cadenas, etc., en esta sección solo se mencionan los engranajes, que son los que tienen más eficiencia y están presentes en la gran mayoría de los sistemas de transmisión. Existen diversos tipos de engranajes, cada uno con objetivos y ventajas diferentes, por lo que es útil mencionar los más usados en sistemas de transmisión hoy en día. La figura 2.17 presenta la clasificación de los engranajes según la disposición de sus ejes.

2.3. Análisis dinámico en movimiento rectilíneo

En el análisis dinámico, se evalúa el comportamiento del vehículo electropropulsado cuando se mueve en línea recta, considerando el efecto de fuerzas externas, por ejemplo, el arrastre (F_D) y la resistencia por rodadura (F_r , F_f). Las siguientes ecuaciones describen la sumatoria de fuerzas de acuerdo con la figura 2.18.

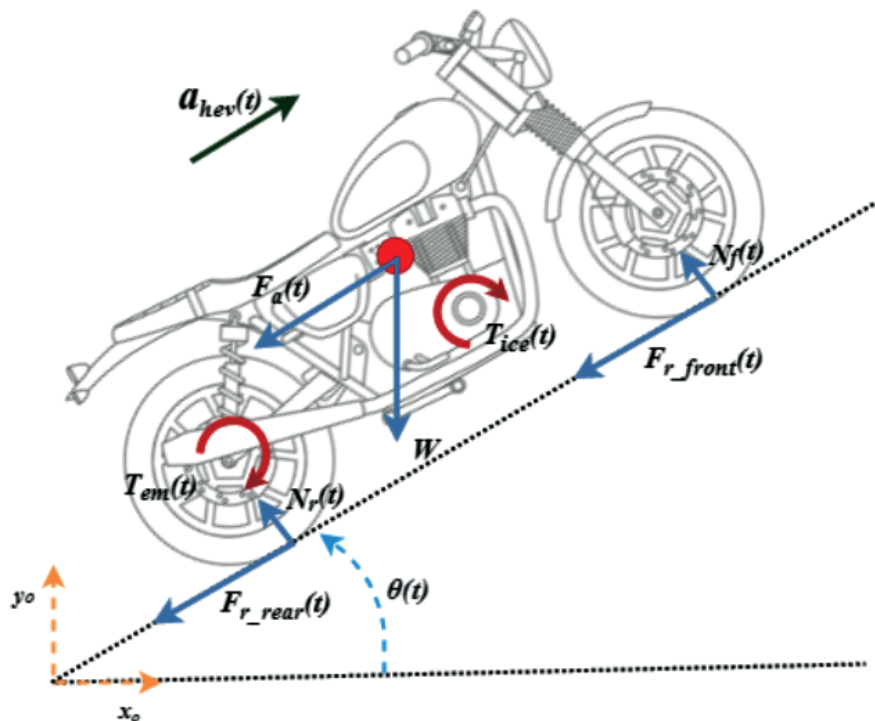


Figura 2.18.
Diagrama de fuerzas del vehículo

Fuente: elaboración propia.

Según el equilibrio de las fuerzas horizontales, se tiene:

$$S - F_r - F_f - F_D = ma \quad (2.8)$$

Según el equilibrio de las fuerzas verticales:

$$mg - N_r - N_f = 0 \quad (2.9)$$

Y según los momentos con respecto a P_f :

$$-N_r(p) + mg(p - b) + F_D(h) = -mah \quad (2.10)$$

Estas ecuaciones permiten determinar los valores desconocidos de máxima tracción y aceleración en los casos más críticos, analizando cómo se ve afectado el rendimiento del vehículo cuando se modifica la arquitectura original. En el caso de la aceleración máxima, se asume que $N_f = 0$ y $N_r = w$, lo que significa que la parte delantera se levanta del suelo. Inicialmente, se calcula la fuerza de arrastre (F_D), para subsecuentemente calcular la aceleración máxima (a) y la reacción vertical (N_r). Véanse las siguientes ecuaciones:

$$s = \frac{wp + whC_r - mg(p - b)}{h} \quad (2.11)$$

$$a = \frac{mg(p - (p - b)) - F_D h}{mh} \quad (2.12)$$

$$N_r = \frac{mah + mg(p - b) + F_D h}{h} \quad (2.13)$$

$$S = \mu_s N_r \quad (2.14)$$

Para la tracción máxima, se asume que $S = \mu_s N_r$, y $F_r, F_n = C_{rr} N$; por ende, la tracción máxima N_r se define, también, como la aceleración (a) requerida para satisfacer la tracción. Entonces:

$$N_r = \frac{mg(p - b) - C_r wh}{p - \mu_s h} \quad (2.15)$$

$$a = \frac{\mu_s N_r - C_r w - F_D}{m} \quad (2.16)$$

$$N_f = mg N_r \quad (2.17)$$

$$S = \mu_s N_r \quad (2.18)$$

2.4. Vehículos híbridos-eléctricos

Hibridación hace referencia a fusionar dos o más elementos para producir uno nuevo con características mixtas (RAE, 2017). Aunque el vehículo híbrido más conocido combina el motor de combustión interna y el eléctrico para su tracción (HEV, por sus siglas en inglés), esta no es la única configuración de hibridación. Dentro de esta categoría se encuentran aquellos vehículos que combinen dos fuentes de poder para su movilidad. Los vehículos HEV son desarrollados con el fin de mejorar la eficiencia de los vehículos a combustión y reducir, con ello, la cantidad de gases contaminantes que liberan al ambiente. Esto es posible al incorporar un motor eléctrico al sistema de tracción de un vehículo de combustión, logrando que se complementen ambos motores al momento de mover el vehículo. Cada motor cuenta con curvas de eficiencia diferentes, por lo que se complementan para aumentar la eficiencia del vehículo en un ciclo de conducción, similar a las relaciones simbióticas que encontramos en la naturaleza. De esta forma, la propulsión del vehículo hace uso del motor a combustión y eléctrico simultáneamente, o bien cada uno en diferentes momentos, según las necesidades (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2005). Si bien el costo de los HEV es más alto que el de un vehículo convencional, el sistema de propulsión es más eficiente que uno eléctrico o a combustión únicamente; además, poseen dos fuentes de energía diferentes: las baterías eléctricas y el combustible usado para el motor a combustión (Acebes, 2017). Su mejora en eficiencia se refleja en un consumo de combustible más bajo, menores costos de operación y de emisiones de gases contaminantes, subproducto de su funcionamiento.

Hoy en día, existen tecnologías que resultan muy interesantes a la hora de implementarlas en sistemas de propulsión para optimizar y mejorar los procesos. El término de hibridación en vehículos a motor ha sido tema de investigación y de implementación en las últimas décadas. Cuando se refiere a hibridación, se trata básicamente de la unión de dos sistemas diferentes en uno solo; en el caso de la hibridación para sistemas de propulsión, se considera la unión de un motor eléctrico y uno de combustión. Algunos beneficios de los sistemas híbridos son:

- Menor consumo de combustible: se logra al combinar diferentes fuentes de energía disponibles en el vehículo, como la energía eléctrica almacenada en baterías, celdas de hidrógeno, super capacitores y el tanque de combustible. Dependiendo del rendimiento del vehículo, se puede utilizar otra fuente de energía que proporcione la potencia necesaria para la tracción, lo que resulta en un menor consumo de combustible. Además, los vehículos híbridos pueden recuperar parte de la energía utilizada en los frenos por medio de sus frenos regenerativos, lo que los hace autosuficientes en situaciones de emergencia.
- Mínima emisión de gases nocivos: debido al apoyo de los motores eléctricos, las emisiones generadas por el combustible no son iguales a las de un vehículo de combustión, lo que ocasiona menor concentración de GEI. De igual modo, es posible operar el motor de combustión en un rango eficiente de combustión para que no se genere material particulado, el cual, en gran parte, es contaminante del ambiente.
- Autonomía: dependiendo del balance del sistema en cuanto al peso, es posible aumentar notoriamente la autonomía del vehículo en un alto porcentaje, ya que se puede jugar con ambos motores para distintas condiciones de operación. Así, en requerimientos de

potencia se pueden operar ambos motores para disminuir la potencia total que tendría solo uno y, para rangos de velocidad de crucero, operar el motor que presenta mejor eficiencia en consumo.

En ciertas ciudades de Colombia, los vehículos híbridos y eléctricos se benefician de exenciones en medidas e impuestos. Por ejemplo, no están sujetos a la medida de “pico y placa”. Además, el costo de la energía eléctrica es más bajo en comparación con el precio de la gasolina. Los vehículos híbridos tienen un arancel de tan solo el 5 %, lo que representa una carga fiscal más baja. Por último, las estaciones de recarga de vehículos eléctricos no están sujetas a impuestos. Todos estos incentivos económicos hacen que la adopción de vehículos híbridos y eléctricos sea cada vez más atractiva en el país. Los vehículos híbridos producen muy poco ruido debido a los materiales y la química utilizados en su construcción. Esta característica resulta en una menor contaminación acústica, lo que significa una reducción del ruido ambiental en comparación con los vehículos tradicionales. Esta propiedad también se aplica a los vehículos eléctricos, los cuales, debido a su motor eléctrico, son aún más silenciosos que los vehículos híbridos. Por lo anterior, tanto los vehículos híbridos como los eléctricos ofrecen una solución efectiva para reducir la contaminación acústica en las ciudades. Pese a estas múltiples ventajas, la hibridación tiene algunas desventajas, las cuales son:

- Potencia de salida más baja: en su mayoría, los vehículos híbridos tienen menor potencia de salida que los vehículos que utilizan solo motores de combustión interna. Para que los motores eléctricos alcancen las tasas de velocidad y autonomía de los motores a combustión, se requiere de un sistema mucho más complejo y pesado, lo cual termina siendo contraproducente.
- Mayor peso: los sistemas de propulsión híbridos necesitan más componentes para ejecutarse, lo que genera un aumento inminente en el peso del vehículo.
- Menor potencia mecánica: los sistemas híbridos se componen de un sistema de potencia eléctrica y un motor de combustión. A menudo, los motores se reducen en potencia para lograr un equilibrio entre los mismos; de ese modo, la potencia mecánica entre ambos sistemas puede ser igual o inferior a la potencia entregada por un vehículo completamente de combustión (Hernández, 2012).
- Altos costos de compra: el mercado de vehículos está contenido en una categoría de producto predominantemente nueva. En esta, los modelos desarrollados por las empresas representan gastos elevados por la baja producción, lo cual representa altos costos de producción y venta para el usuario (Vehiculares, 2018).
- Alto impacto ambiental en el manejo de las baterías: el uso de sustancias como mercurio, cadmio, litio y plomo representa tratamientos altamente exigentes a la hora de la extracción, el reciclaje y el manejo de estas. Muchas de estas sustancias no pueden ser incineradas y su tratamiento inadecuado puede generar GEI.
- Mayor peso del sistema: los componentes del sistema eléctrico, tales como motores, baterías y controladores, representan pesos extras al sistema. Estos generan mayores esfuerzos mecánicos en los componentes estructurales.
- Limitados puntos de recarga: al tratarse de una industria emergente, las infraestructuras de nuestro país no cuentan con muchos puntos habilitados para la carga. Cuando un vehículo no tiene una reserva de energía eléctrica, migra al uso de gasolina para suplir

esta necesidad, lo que ocasiona nuevamente el incremento de emisiones medioambientales.

A lo largo de las décadas, se han implementado configuraciones de hibridación que han permitido obtener diferentes ventajas según las necesidades que se presentan en el contexto para la movilidad. En esta sección se presentan las ventajas y desventajas generales que se tienen con vehículos híbridos y, posteriormente, las distintas configuraciones de hibridación que se han desarrollado; también, se explican sus particularidades frente a qué tan complejo es implementar la arquitectura mostrada y cómo puede favorecer otras en la movilidad sostenible.

2.4.1. Híbrido serie

Los vehículos híbridos en serie se desarrollan al acoplar a un vehículo eléctrico un pequeño motor de combustión interna y un generador. En esta arquitectura, el motor de combustión es usado para generar energía eléctrica que se lleva al almacenamiento de energía, mientras la tracción del vehículo es proporcionada por el motor eléctrico. Entre las ventajas de este modelo se encuentra la simplificación del control de velocidad del vehículo, debido a que solo se debe controlar una fuente de torque (motor eléctrico); las características ideales de velocidad/torque de los motores eléctricos vuelven innecesaria una caja reductora o caja de cambios y el acople estructural de los componentes del tren de potencia se simplifica. No obstante, con esta arquitectura existen algunas desventajas: el motor eléctrico debe ser muy potente, ya que es la única fuente de tracción del vehículo; se requieren dos componentes eléctricos (motor eléctrico y generador); asimismo, realizar tantos procesos de transformación de energía (motor de combustión-generador-motor eléctrico) genera considerables pérdidas de energía. Esta composición normalmente es usada en grandes vehículos (comerciales, militares, buses, locomotoras) debido a que tienen el espacio suficiente para implementar el alternador y el motor de combustión (Ehsani *et al.*, 2007).

Como se explicó, la hibridación consta de dos tipos de motor unido en un solo sistema, pero no necesariamente ambos motores trabajan como salida de potencia. La hibridación en serie se caracteriza, en especial, por el hecho de que la potencia es entregada solo por el motor eléctrico y el motor de combustión interna trabaja como generador de energía para alimentar la batería del motor eléctrico.

2.4.2. Híbrido paralelo

En los híbridos en paralelo, el motor de combustión interna y el motor eléctrico dan potencia directamente a las llantas de la tracción por medio de un acople mecánico. Este puede ser una simple solución como una caja de engranajes, una unidad de correa o de polea, o incluso un solo eje. Este tipo de vehículo híbrido tiene algunas ventajas como, por ejemplo, tanto el motor a combustión como el motor eléctrico suplen torque a las llantas de la tracción y no existe conversión de energía, lo que hace que las pérdidas sean menores. Adicionalmente, es más compacto debido a que no requiere un generador. Una desventaja de este tipo de configuración es el acople mecánico de las dos fuentes de tracción y su control, puesto que, en algunos casos, el motor a combustión

debe desacoplarse del sistema por cuestiones de funcionalidad y eficiencia. Este tipo de hibridación se presenta comúnmente en vehículos pequeños.

En el caso de los motores híbridos en paralelo, se sabe que es la aplicación más encontrada actualmente en los vehículos a motor, principalmente en vehículos acuáticos. Como su nombre lo indica, ambos motores trabajan en paralelo, es decir, de manera independiente sin necesitar el uno del otro. Esta particularidad los hace interesantes desde el punto de vista del consumo y las emisiones.

2.5. Estrategias de gestión de la energía

Uno de los grandes retos que enfrentan los sistemas electropropulsados, bien sean vehículos eléctricos o híbridos vehicular, es hacer viable y eficiente la entrega de energía disponible del vehículo. Lo anterior responde a la pregunta: ¿cómo pueden ser usada(s) la(s) fuente(s) de energía de una manera eficiente? Esto representa un preámbulo a las estrategias de gestión de energía, las cuales enmarcan un objetivo del desempeño, el cual será cumplido a lo largo de un trayecto mediante la entrega controlada de la energía disponible del vehículo.

Siguiendo la literatura, la figura 2.19 muestra un esquema general de las estrategias de gestión de la energía (EMS – *energy management strategy*), las cuales se componen de aquellas basadas en reglas y las otras en objetivos de optimización. Estas estrategias de gestión se efectúan para seguir el desempeño de distintas variables que permiten cuantificar cómo se está desempeñando el vehículo, ya sea en la entrega de potencia, la eficiencia de combustión, el ahorro de combustible, entre otras. Con ello, se espera que la elección de manejo optimice el resultado de estas variables, para lo cual se diseña su controlador; comúnmente, son controles basados en modelos que permiten estimar el desempeño de estas variables por medio de señales del vehículo, y este pueda predecir cómo es operar adecuadamente las distintas fuentes de energía. Algunos de los objetivos de manejo que normalmente se encuentran en vehículos híbridos-eléctricos se describen a continuación.

- Que el EMS trabaje en el punto óptimo de operación: los motores de combustión interna poseen un punto de operación óptimo frente a relación de torque-PM, en términos de consumo específico de combustible y generación de emisiones. Si el motor trabaja en este punto, puede alcanzar el máximo consumo específico, la mínima producción de emisiones o un acuerdo entre ambas. Las variables que deben medirse para implementar este objetivo son torque-RPM.
- Minimizar la dinámica del EMS: la inercia de todos los componentes móviles del motor de combustión interna debe ser vencida para generar energía mecánica en el sistema. Esto se traduce como energía adicional que se consume en el sistema cada vez que se dan cambios en la velocidad de operación del motor. Por esto, la velocidad rotacional del EMS debe permanecer constante, evitando cambios rápidos en su movimiento. La hibridación logra que el motor de combustión opere a velocidad constante, apoyando con el motor eléctrico para cambios de potencia requerida y minimiza la dinámica del EMS. Este objetivo requiere la medición de las variables RPM constantes-eficiencia-potencia-energía-EMS lag-operación EM.

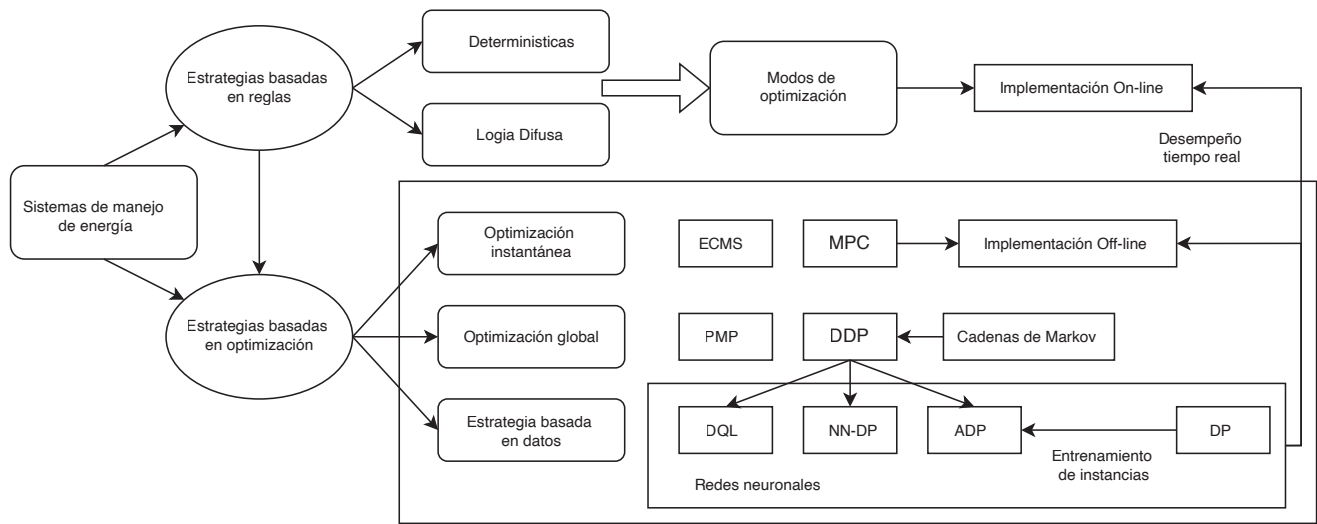


Figura 2.19. Métodos de gestión de energía

Fuente: (Xu, 2019).

- Optimizar la velocidad operacional del EMS: la eficiencia del combustible es baja cuando el motor de combustión interna opera a bajas RPM. La velocidad del motor de combustión puede ser controlada independientemente, según la velocidad del vehículo; el motor de combustión también puede dejar de trabajar cuando su velocidad es baja, para obtener el mayor beneficio de la eficiencia del combustible. Las variables en este caso son: rango de rpm-eficiencia-consumo de combustible-operación EM.
- Minimizar el número de encendido y apagado en la operación de vehículos híbridos, el EMS puede ser encendido o apagado repetitivas veces, según la operación del vehículo. Este número de encendido-apagado puede determinarse óptimamente, con el fin de minimizar el consumo de combustible. Las variables a tener en cuenta son: encendidos y apagados del motor-consumo de combustible-alta inercia EMS.

Respecto a la gestión del motor eléctrico y la batería, hay que considerar los siguientes aspectos para vehículos eléctricos y vehículos híbridos-eléctricos:

- Gestionar de forma óptima el estado de carga (SoC) del sistema de almacenamiento de energía: el estado de carga de la batería debe ser controlado adecuadamente para que sea capaz de proveer suficiente energía a lo largo del perfil de conducción y se maximice su ciclo de utilización. Se puede controlar el estado de carga de la batería jugando con la entrada de operación de cada motor; el motor de combustión entra a operar cuando el estado de carga es bajo y el motor eléctrico cuando es alto. También, se puede mejorar este parámetro de acuerdo al perfil de conducción si se aprovecha el freno regenerativo en condiciones en las que la masa del vehículo ayuda en su movimiento. Las variables serían: SoC de batería-rango de autonomía-EM-EM-freno regenerativo-uso y generación de energía.
- Controlar óptimamente el voltaje de generación: por cuestión de seguridad, los cambios de la potencia de los motores producen un aumento o disminución del voltaje generado para el sistema eléctrico. Con el fin mantener los ciclos de vida de la batería, se debe

controlarse el voltaje entregado para que estas se carguen o descarguen adecuadamente. Para este escenario, las variables son: vida útil baterías-voltaje de carga y descarga.

- Optimizar la distribución de potencia: por la presencia de dos fuentes de potencia (el EMS y el motor eléctrico), uno de los grandes objetivos de control es identificar cómo distribuir la entrega de potencia al vehículo. Lo anterior, basado en el estado de carga del vehículo y el perfil de conducción, con el objetivo de maximizar el consumo de combustible, o la entrega de torque que se pueda brindar por los dos motores. Las variables para este caso son: consumo específico de combustible-torque -SoC de batería-velocidad requerida.
- Seguimiento de norma de cero emisiones: en algunas zonas de movilidad se exige que los vehículos deben operar 100 % eléctrico, ya sea en túneles o lugares cerrados. Las variables serían: SoC de batería-rango de autonomía-distancia o tiempo de operación.
- Controlar óptimamente el sistema de transmisión: por la configuración de los HEV, ya sea según la arquitectura en paralelo o en serie, se requieren dos canales de transmisión para ambos motores; estos, a su vez, se conectan entre sí al eje de potencia de las llantas para brindar el movimiento. La conexión de ambos sistemas de transmisión se logra a través del control de *clutch*, el cual permite acoplar ambos motores para la generación de potencia o también aislarlas, dependiendo del caso de conducción.

La instrumentación electrónica para la implementación de las estrategias de gestión de la energía en vehículos híbridos y vehículos eléctricos se basa en los estándares SAE IEEE. El estándar J1772 fue el primer y único en el mundo en alcanzar el consenso de la industria. Este detalla las características físicas y eléctricas del conector y la entrada eléctrica del vehículo. Permite la carga a 120 o 140 voltios con un conector de dimensión y función estandarizadas para optimizar la facilidad de uso para los consumidores; al mismo tiempo, resuelve el problema que varias interfaces de carga no estandarizadas habrían implicado para los fabricantes de automóviles, sus proveedores y otras partes, incluidos los consumidores.

La comunicación de datos digitales es necesaria SAE J2847-1 para la carga de DC y debe establecerse entre el EVSE y el vehículo antes de la carga. La comunicación digital es opcional en cualquier ciclo de trabajo piloto de control válido para la carga de nivel 1 y 2 de CA.

En resumen, las variables que deben ser medidas en la implementación de las estrategias de gestión de la energía son el voltaje de la batería, la corriente de la batería, la velocidad angular del motor EMS, la posición de la válvula mariposa, el voltaje del convertidor DC/DC, la velocidad angular del motor DC y la velocidad del vehículo. Normalmente, la medición de estas variables, que se realiza implementando los protocolos SAE, permitirá, del mismo modo, la estimación del estado de carga de la batería (SoC), el torque del motor EMS (en el caso de un vehículo híbrido-eléctrico) y el torque del motor eléctrico. Estas variables estimadas intervienen en el cálculo de la señal de control y deben considerarse como una incertidumbre acotada, cuyo dominio debe identificarse de forma experimental, lo que da lugar a la concepción de las estrategias de control robusto que pueden implementarse para gestionar eficientemente la energía en el vehículo.

En síntesis, los elementos constitutivos de la propulsión eléctrica, junto con sus parámetros de diseño dimensionamiento y selección, se presentaron en el presente capítulo. Su conocimiento y correcta caracterización conllevará un alto impacto en las

prestaciones finales (velocidad final, autonomía, etc.) que tendrá cualquier vehículo que haga uso de energía eléctrica para su propulsión, de ahí su importancia.

A continuación, se abordarán los conceptos asociados a la propulsión electro-solar como fuente adicional de energía y mecanismo de mitigación de la necesidad de una infraestructura de recarga para los vehículos.

2.6. Referencias

- Acebes, S. (2017). *Motores*. Novedad 2017. https://books.google.com.co/books?id=_vrIDgAAQBAJ
- Arora, S. (2018). Selection of thermal management system for modular battery packs of electric vehicles: A review of existing and emerging technologies, *Journal of Power Sources*, 400, 621-640. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.08.020>.
- Baczynska, A, Niewiadomski, W., Gonçalves, A., Almeida, P. y Luís, R. (2018). Li-NMC batteries model evaluation with experimental data for electric vehicle applicati. *Batteries*, 4(1), 1-16. <https://doi.org/10.3390/batteries4010011>
- Buchmann, I. (2001). *Batteries in a portable world: a handbook on rechargeable batteries for non-engineers*. Cadex Electronics Richmond.
- Ehsani, M., Gao, Y., & Miller, J. (2007). Hybrid electric vehicles: Architecture and motor drives. *Proceedings of the IEEE*, 95(4), 719-728.
- Gencer, C. y Gedikpinar, M. (2006). Modeling and simulation of BLDCM using Matlab/SIMULINK. *Journal of Applied Sciences*, 6(3), 688–691. <https://docsdrive.com/pdfs/ansinet/jas/2006/688-691.pdf>
- Gualda Gil, J. y Martínez, S (2006). *Electrónica de potencia. Componentes, topologías y equipos: componentes, topologías y equipos*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Guru, B. y Hiziroglu, H. (2003). *Máquinas eléctricas y transformadores*. Oxford University Press.
- Hart, D. (2001). *Electrónica de potencia*. Prentice Hall.
- Hua-bin, W. y He-ping, L. (2008). Novel driving method for BLDCM from standstill to high speeds. *WSEAS Transactions on Systems*, 11(7), 1269-1279.
- Kim, S. (2017). Control of direct current motors. En Kim, S. (ed.), *Electric Motor Control* (39–93). Elsevier.
- Manrique, T. (2020). *Model Predictive controllers for optimal driving strategies in EV: Designed and implemented for an electric vehicle racing prototype*. LAP Lambert.
- Martínez, S. y Gualda, J. (2006). *Electrónica de potencia: componentes, topologías y equipos*. Editorial Paraninfo.
- Rashid, M. (2018). *Power Electronics Handbook* (4.ª ed.). Butterworth-Heinemann.
- Ponce J., Ponce, E., Atuesta, C., Manrique, T. y Patino, D. (2015). Polynomial approximation of the singular control: Application for a Boost DC-DC power converter. *IEEE 2nd Colombian Conference on Automatic Control (CCAC)*, 1-8. doi: 10.1109/CCAC.2015.7345231.
- Rashid, M. (2004). *Electrónica de potencia: circuitos, dispositivos y aplicaciones*. Pearson Educación.
- Rega, P. (2011). *Motores eléctricos*. <https://sites.google.com/site/279motoreselectricos/1-el-motor-el-%C3%A9ctrico?authuser=0>

- Saldaña, G., San Martín, J., Zamora, I., Asensio, F. y Oñederra, O. (2019). Analysis of the current electric battery models for electric vehicle simulation. *Energies* 12(14), 1-27. <https://doi.org/10.3390/en12142750>
- WEG. (2021). *Guía de especificación. Motores eléctricos*. <https://static2.weg.net/medias/downloadcenter/hf9/hcf/WEG-WMO-motores-electricos-guia-de-especificacion-50039910-brochure-spanish-web.pdf>
- Xiong, R., Hongwen, H., Hongqiang, G. y Ding, Y. (2011). Modeling for lithium ion battery used in electric vehicles. *Procedia Engineering*, 15, 2869–2874. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.08.540>
- Xu, N., Kong, Y., Chu, L., Ju, H., Yang, Z., Xu, Z. y Xu, Z. (2019). Towards a smarter energy management system for hybrid vehicles: A comprehensive review of control strategies. *Applied Sciences*, 9(10).
- Yilmaz, K. (2009). *Comparison of axial flux and radial flux brushless dc motor topologies for control moment gyroscope wheel applications*. [Tesis de Maestría, Middle East Technical University]. <https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12610565/index.pdf>
- Zhang, C., Jiang, J., Zhang, L., Liu, S., Wang, L. y Loh, P. (2016). A Generalized SOC-OCV Model for Lithium-Ion Batteries and the SOC Estimation for LNMCO Battery. *Energies*, 9(11), 1-16. <https://doi.org/10.3390/en9110900>

Conceptos básicos de la propulsión electro-solar

Gabriel Jaime Espitia Mesa¹,
Ricardo Mejía Gutiérrez¹, Juan Camilo Acosta
Salguero¹, Santiago Bernal del Río¹,
Mauricio Fernández Montoya¹

Resumen: el objetivo de este capítulo es definir los conceptos básicos relacionados con la energía solar fotovoltaica y cómo se puede aprovechar en sistemas de propulsión, específicamente en vehículos de transporte. Para ello, en primer lugar, se describen las generalidades de la energía solar fotovoltaica, analizando los tipos de celdas solares, sus características de funcionamiento, fabricación y eficiencia, así como su implicación en el desarrollo general del sistema. Luego, se trabajan los sistemas coordinados que explican el movimiento del sol y cómo influye en las características de desempeño de los sistemas fotovoltaicos. A partir de lo anterior, se analizan los usos de la energía solar en los sistemas de transporte terrestre, marítimo, fluvial y aéreo. Este hecho permite explorar los diferentes procesos de manufactura utilizados según el tipo de aplicación. Finalmente, se abordan temáticas relacionadas a estrategias de interconexión de celdas; todo esto enmarcado en problemas de aplicación resueltos por el Grupo de Investigación en Ingeniería de Diseño (GRID) de la Universidad EAFIT. **Palabras clave:** celdas solares; eficiencia energética; geolocalización; geolocalización; VIPV; inter-conexión de celdas.

3.1. Generalidades de la energía solar fotovoltaica

En la actualidad, la tendencia del consumo de energía en el mundo es creciente, debido al aumento de la población mundial y a la invención de dispositivos electrónicos como teléfonos móviles, vehículos, etc. Esta

1 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: gjespitia@eafit.edu.co; rmejiag@eafit.edu.co; jcacostas@eafit.edu.co; sbernal1@eafit.edu.co; mfer-na21@eafit.edu.co

situación ha obligado a los países a utilizar fuentes de energía no convencionales, que cada vez son más accesibles. La energía fotovoltaica puede considerarse como una fuente con gran potencial en el futuro, debido a su capacidad para abastecer la demanda energética mundial (Zobaa y Bansal, 2011). Además, se espera para 2021 su coste sea, incluso, inferior al de la energía eólica, lo que le confiere un gran potencial de uso en las próximas décadas (Hauff *et al.*, 2011). De este modo, representa una gran ventaja para la generación y uso distribuido y democratizado de la energía, ya que se produce en el mismo lugar de consumo, lo que minimiza las pérdidas en la cadena de generación. Este es el llamado concepto de prosumidor, el cual evita el uso de baterías porque no se necesita almacenamiento energético.

Un panel solar está formado por celdas solares, comúnmente de silicio, conectadas entre sí que transforman la energía de la radiación solar en electricidad consumible. La celda solar se ensambla en un arreglo, tipo sándwich, por arriba y por abajo. El material de la parte superior debe tener buenas propiedades ópticas para que la radiación solar pueda ser transmitida con la mayor facilidad posible, mientras que el de la parte inferior, denominado refuerzo, debe garantizar la integridad estructural del arreglo completo. Dicho ensamble permite el aislamiento de las celdas fotovoltaicas del entorno y el flujo de energía dentro del módulo fotovoltaico. Actualmente, el uso de la energía solar fotovoltaica ha aumentado de manera considerable, a partir del desarrollo de nuevos materiales y la facilidad de producción de estos, lo cual ha disminuido, significativamente, los costos de adquisición. La mayoría de los módulos fotovoltaicos están fabricados a partir de placas de refuerzo metálico y láminas de vidrio, lo que limita su uso en superficies irregulares.

3.2. Celdas fotovoltaicas

Las celdas solares fotovoltaicas son los elementos más importantes de un panel solar, pues tienen la capacidad de convertir la luz solar en electricidad aprovechable. Están fabricadas en capas muy finas de diferentes materiales, generalmente semiconductores, con distintas características en eficiencia, tamaño, color y comportamiento mecánico. En este sentido, se presenta a continuación una recopilación de los tipos de celdas solares, analizando sus principales atributos y usos.

- **Multijunction:** este tipo tiene la capacidad de producir energía a diferentes longitudes de onda dentro de la radiación incidental, debido a que tiene múltiples capas, lo que le da una eficiencia de casi el 40 %. Está fabricada con materiales semiconductores, como el fosforo de galio e indio (GaInP), el arseniuro de indio y galio (InGaAs) y el germanio (Ge), los cuales se disponen en capas y responden a diferentes longitudes de onda de la luz (Muniz *et al.*, 2011).
- **Silicio policristalino:** se producen fundiendo el silicio y disponiéndolo en moldes para que adopte su forma definitiva. Debido al crecimiento del grano del silicio enfriado y a las posibles impurezas, la eficiencia de las células solares policristalinas son menores que las monocristalinas (Pereda, 2005).
- **Silicio monocristalino:** estas celdas se obtienen a partir de láminas cortadas de lingotes cilíndricos de silicio en espesores muy reducidos. Como resultado, se obtiene una figura

octagonal al redondear las esquinas, y se logra una eficiencia cercana al 20 %. Esta eficiencia es mayor que la de las celdas policristalinas, debido a la presencia de monocristales. En consecuencia, no existen limitaciones de grano en la zona de la celda, lo que hace que este tipo de celdas sean altamente eficientes.

- **Thin film:** es fabricada mediante la disposición de capas finas, cuyo espesor varía de nanómetros a micrómetros; de ahí el nombre de celdas de película fina (Dimmler, 2014). Se fabrican en diversos materiales como silicio amorfo (a-Si) y silicio de capa fina (TF-Si), pervoskita (CaTiO₃), galio (Ga), telurio de Cadmio (CdTe), cobre indio galio y gselio (CIS o CIGS); estas últimas llegan a alcanzar hasta 21 % de eficiencia (Aberle, 2009).
- **Orgánicas:** tienen tres compuestos, molecular, híbrido y polímero orgánico (los más utilizados) y consiguen eficiencias de hasta el 16 % (Recabal, 2018). Se fabrican a partir de películas de sustrato plástico, como el naftalato de polietileno (PEN) o el tereftalato de polietileno (PET), que se elaboran por deposición de solución líquida, lo cual facilita su producción en masa y reduce los costos de producción (Hu *et al.*, 2020).

3.3. Movimiento del sol

Para analizar el comportamiento energético de las superficies fotovoltaicas, es necesario, antes, conocer el potencial fotovoltaico de la ubicación geográfica de los paneles, ya que puede variar en función de la duración del día y de la intensidad con la que la radiación solar incide en el lugar seleccionado. Así, conocer el movimiento del Sol respecto a un punto geográfico permite determinar su potencial energético, dado que la irradiación puede cambiar según la época del año y la ubicación geográfica del módulo foto voltaico en el planeta. A continuación, se enuncian algunos conceptos básicos para determinar el movimiento solar en función de la ubicación seleccionada de un sistema fotovoltaico, como se observa en la figura 3.1.

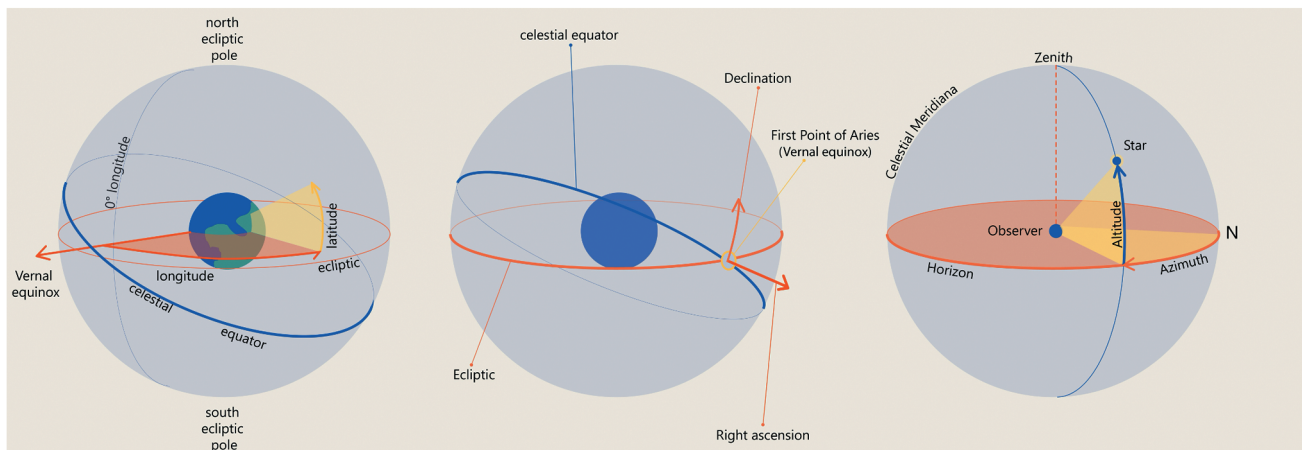


Figura 3.1. Sistemas coordenadas para la ubicación del Sol

Fuente: elaboración propia.

- **Sistemas coordinado eclíptico:** es utilizado para representar las posiciones aparentes, las órbitas y las orientaciones de los polos de los objetos del sistema solar. El origen del sistema puede ser el centro del Sol o de la tierra y la dirección principal es hacia el equinoccio de primavera e igualmente tiene una convención a la derecha.
- **Sistemas coordinado eclíptico:** se usa para especificar posiciones de los objetos celestes. Puede implementarse en coordenadas esféricas o rectangulares. En ambos casos se define por un origen en el centro de la tierra, un plano fundamental, que consiste en la proyección del ecuador terrestres sobre la esfera celeste y una dirección primaria hacia el equinoccio de primavera.
- **Sistemas coordinado ecuatorial:** es un sistema de coordenadas celestes que se refiere al horizonte del observador y a su vertical. Estas coordenadas son locales y dependen del observador, debido a que un astro es visto bajo coordenadas horizontales por diferentes observadores situados en distintos puntos de la tierra.

El sistema coordinado horizontal es el más utilizado en el análisis de geolocalización, por lo que se profundizará en este capítulo. Para su caracterización, y como se observa en la tabla 3.1, se tienen en cuenta las siguientes variables.

Tabla 3.1. Variables más importantes a tener en cuenta en los sistemas coordinados

Descripción de los ángulos del Sol utilizados en el modelo:	
θ_A	Acimut del sol en grados desde el norte. 0° se refiere al norte, 270° se refiere al oeste.
Θ_{El}	Elevación actual, sin tener en cuenta refracción del Sol. 0° se refiere a horizontal, complemento del cenit verdadero θ_Z .
θ_Z	Cenit solar, sin tener en cuenta refracción del Sol en grados complemento vertical del ángulo de elevación.
θ_{Elap}	Elevación del Sol aparente, teniendo en cuenta refracción en grados entre el complemento del cenit aparente.
Θ_{zap}	Cenit aparente, teniendo en cuenta la refracción atmosférica entre el Sol y la vertical.

Fuente: Lamigueiro, 2013.

Como se expone a continuación, al conocer la ubicación del Sol en cualquier ubicación y en diferentes épocas del año, se requiere analizar cómo varía este recurso en función de la irradiancia.

3.3.1. Irradiancia terrestre

La irradiancia en la superficie de la tierra es una medida momentánea de la energía solar sobre un área específica, la unidad en que se mide, generalmente, es W/m^2 . Para la medición práctica de la irradiación, se divide en tres componentes principales: irradiancia normal directa (DNI), irradiancia horizontal difusa (DHI) e irradiancia horizontal global (GHI). La DNI es la radiación recibida por unidad de área en una superficie que está orientada perpendicular o normal a los rayos que vienen en línea recta desde la posición actual del sol. La DHI es el componente de irradiancia que ha sido dispersado o difundido por moléculas y partículas en la atmósfera. El DHI no llega directamente

del Sol sino de todas las direcciones. Los DNI y DHI son componentes de la irradiancia horizontal global (GHI), que es la cantidad total de irradiancia terrestre recibida por una superficie horizontal a la superficie de la tierra. Si no hay datos medidos de GHI disponibles, se pueden calcular a partir de la DNI, la DHI y el ángulo cenital del Sol θ_z usando:

$$GHI = DHI + DNI \cdot \cos(\theta_z).$$

3.3.2. Orientación del módulo fotovoltaico

La orientación del módulo en este modelo sigue la convención del Laboratorio Nacional de Sandia. El ángulo de acimut del módulo $\theta_{A,Array}$ es el vector horizontal normal de la superficie de la matriz. El ángulo acimutal en este modelo se define como grados al este del norte (p. ej. norte se refiere a 0 °, este = 90 °, oeste = 270 °). Por ejemplo, un módulo orientado al sur tiene una orientación azimutal de 180 °. El ángulo de inclinación de la matriz θ_T (también llamado de inclinación de superficie) se define como el ángulo desde la horizontal. Así, un conjunto montado verticalmente tiene un ángulo de inclinación del conjunto de 90 °.

3.3.3. Irradiancia de plano del módulo (POA)

En este paso, los datos de irradiación se transfieren a la irradiancia incidente en el plano del módulo. El plano de irradiación del módulo depende de las siguientes variables: la posición del Sol, la orientación del módulo, los componentes de irradiancia directa y difusa y la irradiancia que se refleja en la superficie del suelo. El plano de irradiancia de matriz E_{POA} se calcula mediante

$$E_{POA} = E_b + E_g + E_d$$

Donde E_b es la componente de radiación directa, E_g la componente de radiación que se refleja en el suelo y rebota al módulo y E_d es la componente de radiación difusa que proviene del cielo. El componente del haz de la irradiancia se calcula mediante la irradiancia normal directa DNI y el ángulo de incidencia AOI con:

$$E_b = DNI \cdot \cos(AOI).$$

El ángulo de incidencia requerido AOI, entre el haz del Sol y el módulo, se calcula con el ángulo acimutal del Sol θ_A , el ángulo cenital θ_z , el ángulo de inclinación del módulo θ_T y el ángulo de acimut del módulo $\theta_{A,matrix}$ por:

$$AOI = \cos^{-1} \cdot [\cos(\theta_z) \cdot \cos(\theta_T) + \sin(\theta_z) \cdot \sin(\theta_T) \cdot \cos(\theta_A - \theta_{A,array})].$$

El componente reflejado en el suelo sobre una superficie inclinada (E_g) se calcula con la irradiancia horizontal global GHI, la reflectividad de la superficie del suelo (albedo) A y el ángulo de inclinación del conjunto θ_T utilizando:

$$E_g = GHI \cdot A \cdot \frac{1 - \cos(\theta_T)}{2}.$$

El componente de radiación difusa en el cielo E_d se calcula con un método semiempírico y consta de tres componentes: isotrópico, difuso circunsolar y de brillo del horizonte. En este modelo, el componente difuso del cielo (E_d) considera el cielo como una fuente uniforme de irradiación difusa. La función necesita la irradiancia horizontal difusa DHI y el ángulo de inclinación del módulo como entrada.

Teniendo en cuenta lo expuesto, es posible definir la mejor orientación del módulo fotovoltaico para maximizar la electricidad generada en función de un adecuado posicionamiento del panel solar. A continuación, se expondrán las condiciones de funcionamiento del sistema fotovoltaico, teniendo en cuenta una ubicación y orientación adecuadas.

3.4. Características de funcionamiento

El funcionamiento general de un arreglo fotovoltaico está dado por su curva característica, también conocida como curva VI y PV o curva de corriente y voltaje y potencia voltaje, respectivamente (ver figura 3.2). En la gráfica se observan los valores correspondientes de corriente para cada voltaje, en el que la corriente máxima es la de cortocircuito (I_{sc}), en ausencia de tensión, y el voltaje máximo es el de circuito abierto (V_{oc}), en ausencia de corriente. El producto de la corriente y el voltaje define la potencia del arreglo y se define, entonces, una curva VP o curva de potencia y voltaje. Se identifican, asimismo, los valores correspondientes de potencia para cada voltaje, en el que el punto de máxima potencia (P_{mp}), ubicado en V_{mp} e I_{mp} es de gran importancia. La función de un regulador MPPT o *maximum power point tracking* es, precisamente, extraer la máxima potencia de los paneles fotovoltaicos al mantener su operación en el punto de máxima potencia.

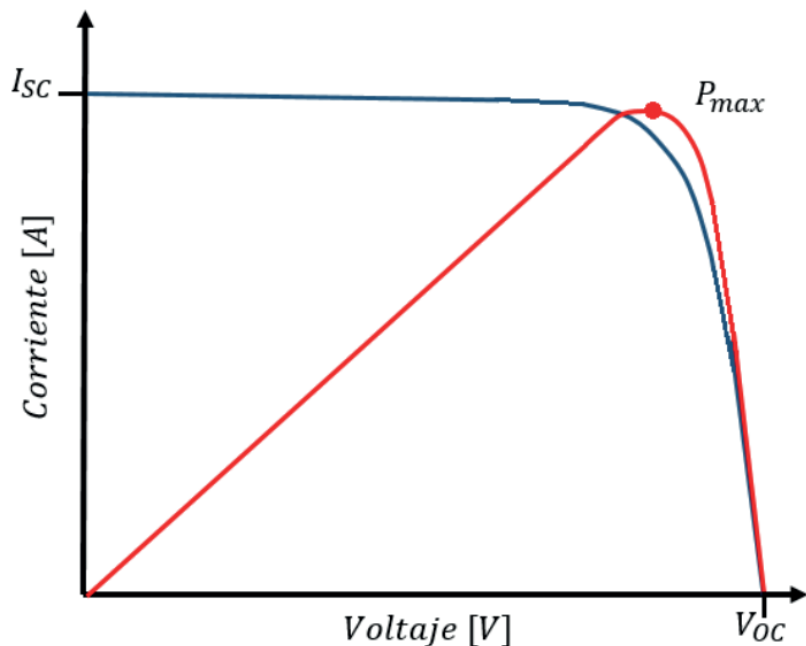


Figura 3.2.
Curvas VI y PV en paneles fotovoltaicos
Fuente: elaboración propia.

En relación con lo anterior, existe una característica intrínseca de cada panel que permite evaluar su funcionamiento: el factor de forma, o *fill factor*, que representa la capacidad del panel solar de entregar energía consumible. Está definido como la relación entre la potencia máxima real del panel ($V_{mp} * I_{mp}$), el producto de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) y el voltaje en circuito abierto (V_{oc}).

3.4.1. Transformación energética en un módulo PV

Dado que el efecto fotoeléctrico de las celdas solares transforma la radiación solar en energía eléctrica consumible y en calor, esto tiene una implicación negativa en la eficiencia global del 75,58 %, mientras que las pérdidas por reflexión son aproximadamente del 6,98 % (Hanifi *et al.*, 2018). Las pérdidas de energía debidas al calor son intrínsecas al panel fotovoltaico y, por tanto, deben reducirse durante el funcionamiento. El comportamiento mecánico del módulo fotovoltaico debe garantizar la resistencia de las células solares, la fácil evacuación del calor del refuerzo en el panel y la fabricación del módulo fotovoltaico con superficies curvas. En cuanto al modelado eléctrico, que se comporta como la variable de salida, permite encontrar la conexión óptima de las células y estimar la energía final generada. Por último, es evidente que la modelización del comportamiento global de un panel solar depende de la integración de los fenómenos implicados (mecánicos, eléctricos, ópticos y térmicos), lo que lo convierte en un modelo multifísico. Se expone, a continuación, uno de los fenómenos multifísicos más importantes de un módulo fotovoltaico: la caída de voltaje por efecto de la temperatura.

3.4.2. Caída de eficiencia por temperatura

La temperatura de la celda (T_{cell}) de los módulos fotovoltaicos debe considerarse, pues su eficiencia disminuye con el aumento de la temperatura y se calcula con la expresión:

$$T_{cell} = T_{air} + \frac{NOCT - 20}{80} \cdot S_{effective}$$

Donde T_{air} es la temperatura del aire en °C, proporcionada por los datos climáticos; NOCT es la temperatura nominal de la celda de operación (NOCT) en °C, que es dada por el fabricante del módulo y $S_{effective}$ es la irradiancia efectiva en mW/cm².

3.5. Aplicaciones fotovoltaicas en movilidad

Con el transcurso del tiempo y a través de la evolución tecnológica, se han venido presentando múltiples desarrollos en cuanto a aplicaciones fotovoltaicas en movilidad. Por esta razón, se analiza este tópico orientado a las diferentes modalidades de transporte.

- **Transporte terrestre:** se cuenta con aplicaciones en vehículos de transporte unipersonal, multipersonal e incluso masivo. Es un hecho que, al incorporar el uso de energía solar, el área pasa a ser un parámetro significativo y, a medida que los vehículos son más pequeños, se dificulta la incorporación de dicha energía. Entre los más destacados está el vehículo solar de largo recorrido Lightyear One de la empresa Lightyear. Este cuenta

con una autonomía superior a los 700 km, a velocidad promedio de 85 km/h, mediante una sola carga de su batería de 60 kWh; su módulo fotovoltaico consta de 5 m² de área solar y le permite operar directamente con la energía transformada por los paneles; sin embargo, tiene conexiones para carga rápida con la red de energía. Igualmente, existen otros vehículos competitivos que aún están en fase de diseño y se espera que pronto sean lanzados de manera oficial al mercado internacional, como el Sono Sion de la compañía Sono Motors y el Toyota Prius PHEV solar de Toyota Motors. Además, existen otros desarrollos de diferente índole en esta categoría, como los vehículos tipo triciclos, motocicletas e incluso bicicletas. Por ejemplo, el Aptera de la empresa Aptera Motors, es un prototipo de un triciclo eléctrico y solar con un alcance estimado de 1600 km con su carga eléctrica completa, y un sistema de captación solar compuesto por 180 células solares que cubren más de 3 m² cuadrados sobre su carrocería.

- **Transporte marítimo y fluvial:** en este sector, se tienen aplicaciones a dimensiones considerablemente mayores. En consecuencia, la materialización de la fotovoltaica es más sencilla en términos de manufactura y ensamble. Un ejemplo es el Turanor, un barco solar que dio la vuelta al mundo navegando, impulsado solo por energía solar proveniente de sus 29.124 celdas que cubren aproximadamente 512 m² de su superficie y que alimentan su bloque de baterías de litio con capacidad total de 1130 kWh.
- **Transporte aéreo:** en esta modalidad de transporte, las aplicaciones se reducen por la complejidad que representa tener un sistema de captación solar en un vehículo, en el cual la variable limitante es el pesimismo del vehículo. No obstante, hay desarrollos importantes como el Skydweller (Solar Impulse, como se le conocía). Es un prototipo que cuenta con 17.248 celdas fotovoltaicas instaladas sobre sus alas, fuselaje y cola, conformando un área solar total de 269,5 m², que le permite funcionar en el aire durante el día, cargando a la vez sus baterías, y estas le permiten volar durante la noche, de modo que su autonomía es, teóricamente, ilimitada.

3.6. Fabricación de paneles solares

Las células fotovoltaicas, al ser materiales conductores de la electricidad, no pueden funcionar correctamente si no están aisladas del entorno, porque pueden sufrir un cortocircuito. Del mismo modo, si hay un gran número de células interconectadas, esto puede provocar descargas eléctricas a las personas que las manipulan, por no hablar de que pueden deteriorarse al estar expuestas al medio ambiente. Asimismo, la manipulación de las células es muy compleja al no haber medios físicos para ensamblarlas y colocarlas en una pieza completa. Por este motivo, se han desarrollado técnicas de fabricación para aislar las células del entorno mediante procesos de encapsulado, que se abordan, a continuación, para las diferentes configuraciones geométricas de los paneles solares.

3.6.1. Procesos de manufactura convencionales

La fabricación de un panel solar rígido se realiza a partir de un marco de aluminio en el que se coloca una lámina de vidrio templado. Luego, las células solares se encapsulan entre dos láminas de EVA, que es un material fabricado con un tipo de plástico ligero y poroso.

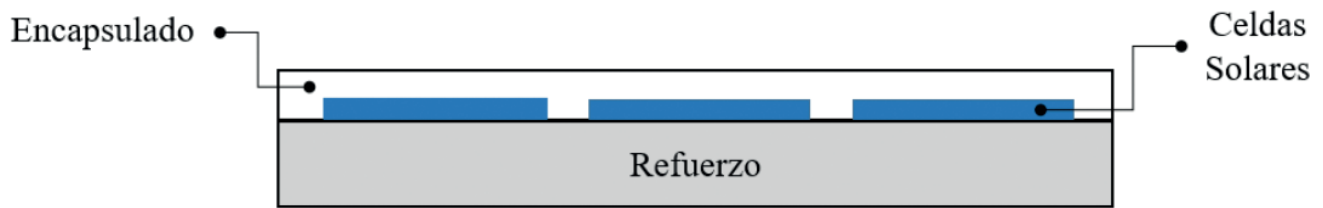


Figura 3.3. Arreglo general de capas en un módulo PV

Fuente: elaboración propia.

En la parte inferior del encapsulado se coloca un refuerzo, que en la mayoría de casos es una lámina de aluminio. Los paneles solares flexibles se fabrican según el principio de montaje en sándwich. Se componen de una lámina de etileno tetrafluoroetileno (ETFE), un material utilizado como alternativa ecológica al vidrio y que, también, mejora el rendimiento energético. Posteriormente, las células solares se colocan entre dos láminas de EVA y una de tedlar poliéster (TPT) como refuerzo. La fabricación de módulos PV, sean rígidos o flexibles, está dado por la configuración general mostrada en la figura 3.3, en la que el refuerzo y el encapsulado se componen por los materiales mencionados.

A partir de lo anterior, se expone un proceso de manufactura de módulos fotovoltaicos con el uso de materiales compuestos, el cual es ampliamente aplicado alrededor del mundo.

3.6.2. Proceso de manufactura usando materiales compuestos

Adicional a los procesos mostrados, se describe un método alternativo de fabricación de módulos fotovoltaicos por medio de materiales compuestos, que presentan gran disponibilidad en el mercado. De igual modo, no se necesitan equipos sofisticados para llevar a cabo su fabricación, por lo que se exponen los pasos necesarios para llevarlo a cabo.

- **Selección de los materiales de encapsulado y refuerzo:** los materiales usados para encapsular las celdas fotovoltaicas deben tener la capacidad de soportar cargas de operación, condiciones de intemperie, ser aislantes eléctricos y conductores térmicos; asimismo, deben ofrecer propiedades ópticas adecuadas para disminuir las pérdidas asociadas a fenómenos como la reflexión y la absorción. Para este fin, se buscan materiales que cumplan estos requerimientos y tengan disponibilidad comercial, lo cual define a las resinas epóxicas como el material más idóneo para esta aplicación. También, para la fabricación del refuerzo del panel se disponen de tejidos de materiales compuestos que, en combinación con la resina, logran materiales de excelentes propiedades mecánicas, porque este debe soportar cargas de operación y mantener la integridad estructural de la celda fotovoltaica; para este caso se utilizará fibra de vidrio.
- **Proceso de interconexión de celdas:** este puede hacerse de forma paralela mientras se selecciona el material de encapsulado. La interconexión de las celdas es un proceso muy importante, ya que permite recolectar toda la energía eléctrica generada por cada una de ellas y tenerla en su totalidad en la salida del módulo fotovoltaico. La conexión entre ellas puede variar según el tipo de celda fotovoltaica. Para este ejemplo, se hará dicha

interconexión con celdas SunPowerC60, en las cuales se usan los *busbar* o *dog bones*. Normalmente, los paneles solares están conformados por varias filas y columnas de celdas fotovoltaicas, por lo que, para garantizar la calidad del posicionamiento de las celdas, es recomendable utilizar un *jig* o plantilla, que permita ubicarlas adecuadamente para su interconexión (ver figura 3.4).

De esta forma, el proceso de interconexión comienza con el adecuado posicionamiento de las celdas fotovoltaicas en el *jig* o plantilla. Se debe garantizar que los polos de la celda estén bien configurados, es decir, positivo con negativo y viceversa. Posteriormente, debe pasarse un lápiz fundente por el área de conexión para garantizar limpieza en el sitio de la unión. Después, con la adecuada posición del *dog bone* en el sitio de unión, se efectúa la soldadura de estaño, cuidando de no dejar grumos o relieves en el sitio de interconexión, dado que estos pueden comportarse como concentradores de esfuerzo al realizar el encapsulado. Finalmente, se realiza este mismo proceso para cada una de las celdas, con lo cual se obtiene el arreglo conectado en seco.

- **Ensanduchado de celdas solares:** teniendo las celdas previamente conectadas, es necesario preparar el sitio donde se hará el laminado de las celdas solares, materializando, así, el panel solar completo. Dicha fabricación se realizará a partir del proceso de laminado de materiales compuestos en bolsa de vacío, el cual requiere una adecuada preparación previa que asegura la limpieza del sitio de trabajo. El esquema del proceso es mostrado en la figura 3.5.



Figura 3.4. Interconexión de celdas fotovoltaicas

Fuente: elaboración propia.



Figura 3.5. Fabricación panel solar

Fuente: elaboración propia.

Con este proceso se garantiza la limpieza del sitio de trabajo y la aplicación de suficiente desmoldante en la superficie de laminación. Luego, se impregnan los tejidos de refuerzo con resina epóxica, que deben ser cortados previamente a la medida. La cantidad de estos tejidos dependerá, directamente, de las condiciones de operación a las cuales estará sometido el panel solar; por eso, a mayor cantidad de tejidos, mayor espesor de refuerzo y, por ende, la resistencia mecánica de la celda aumenta. Después, las celdas solares, previamente interconectadas, se posicionan en el área de laminado. Esto debe hacerse con mucho cuidado, puesto que son bastante frágiles y un mal manejo de ellas puede provocar una fractura que obligaría al reemplazo de la celda. Por último, se vierte suficiente resina epóxica por encima de las celdas para garantizar el encapsulado y aislamiento de estas con el exterior; se sella con bolsa de vacío y se aplica vacío por, mínimo, 24 horas. Al finalizar este tiempo, con mucho cuidado, se desmolda el panel solar, se corrigen imperfecciones finales, lo cual deja el módulo fotovoltaico listo para su operación.

3.7. Conexión de celdas

Las celdas fotovoltaicas, usualmente, son conectadas en serie para conformar los módulos fotovoltaicos. Estos, a su vez, pueden ser interconectados mediante dos estrategias principales en pro de aumentar el rendimiento energético de la instalación: definiendo una topología fija y, la segunda, reconfigurando el arreglo dando un algoritmo. Adicionalmente, se utilizan técnicas basadas en el uso de reguladores MPPT para maximizar la potencia generada, aunque también son comunes las aplicaciones basadas en el uso de diodos baipás, con el fin de habilitar y deshabilitar regiones en módulos fotovoltaicos dependiendo de las condiciones de irradiancia.

3.7.1. Pérdidas de potencia

En un arreglo de módulos fotovoltaicos se presentan pérdidas energéticas por dos motivos principales. Se dan pérdidas internas debido a la imperfecciones intrínsecas de los materiales y los procesos de manufactura y de producción; también, se tienen pérdidas externas, por la suciedad, la degradación de los materiales y las sombras, totales o parciales; estas últimas muy peligrosas, porque, cuando se sombrea una parte de una cadena fotovoltaica de conexión en serie, las células sombreadas impiden el paso de la corriente producida por las que no están sombreadas. Estas diferencias en las características eléctricas de las células se traducen finalmente en pérdidas (Mäki y Valkealahti, 2011) y en puntos calientes que, incluso, pueden llegar a deteriorar físicamente a las celdas.

3.7.2. Topologías fijas de interconexión en arreglos fotovoltaicos

Villa *et al.* (2012) definen una topología como un conjunto de vías alternativas por las cuales la corriente producida puede fluir a través del arreglo fotovoltaico. En la literatura, se encuentra que las estrategias de interconexión más utilizadas son series-paralelos (SP), *total cross tied* (TCT), *bridge-link* (BL) y *honeycomb* (HC) (ver figura 3.6). Estas tres

últimas topologías se desempeñan mejor en condiciones de sombreado dinámico o parcial, puesto que permiten distribuir las sombras en el arreglo de modo que la potencia final no se vea tan afectada; la configuración TCT es la que, usualmente, cuenta con un desempeño superior en cuanto potencia máxima de salida y disipación de pérdidas por sombreado, debido a su mayor número de conexiones internas, que proporcionan más opciones en caminos para la corriente (Mohammadnejad *et al.*, 2016). Estas topologías se denominan fijas, debido a que, una vez instaladas, la conexión se mantiene siempre igual.

3.7.3. Reconfiguración eléctrica de arreglos fotovoltaicos

Bajo condiciones de sombreado parcial, la conexión de todos los módulos en paralelo garantiza la mayor potencia generada, pero, al estar todos en paralelo, la corriente total es la suma de todas las corrientes, lo cual representa un problema, pues el manejo de grandes corrientes implica mayores pérdidas en conversiones posteriores y el cableado es más costoso (La Manna *et al.*, 2014). A diferencia de la metodología explicada en la sección anterior, esta se basa en una topología reconfigurable, en la que un algoritmo determina el estado de suiches y estos, a su vez, establecen la topología del arreglo fotovoltaico encada momento. La literatura menciona diferentes tipos de algoritmos que se han propuesto para mejorar el comportamiento de los módulos fotovoltaicos. En ese orden de ideas, Velasco *et al.* (2009), Romano *et al.* (2013) y Storey *et al.* (2012) proponen algoritmos de control, bajo estrategias de reconfiguración, basadas en ecualización de la irradiancia. Nguyen y Lehman (2008) plantean una estrategia de reconfiguración mediante un banco adaptativo. Alahmad *et al.* (2012) sugieren una estrategia denominada estructura fotovoltaica elástica, en la que, aparte de una matriz de suiches que es común en casi todas las estrategias, se tiene también un convertidor DC/DC adicional. Asimismo, Patnaik *et al.* (2012) exponen una estrategia de reconfiguración basada en las categorías de los niveles de irradiación solar, utilizando diodos baipás. Por último, Dos Santos *et al.* (2011) proponen una estrategia, basada en reglas lógicas simplificadas, para seleccionar la configuración óptima de los interruptores.

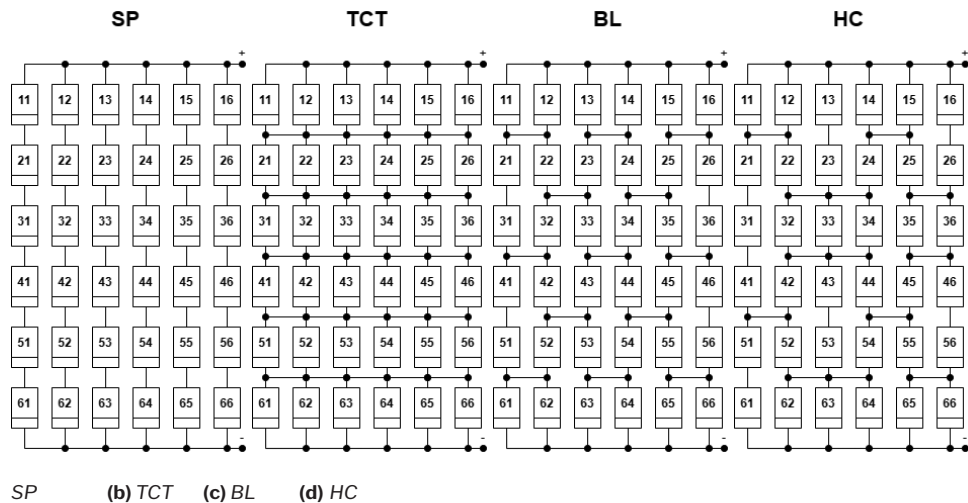


Figura 3.6.
Topologías tradicionales de interconexión fija en arreglos fotovoltaicos

Fuente: elaboración propia.

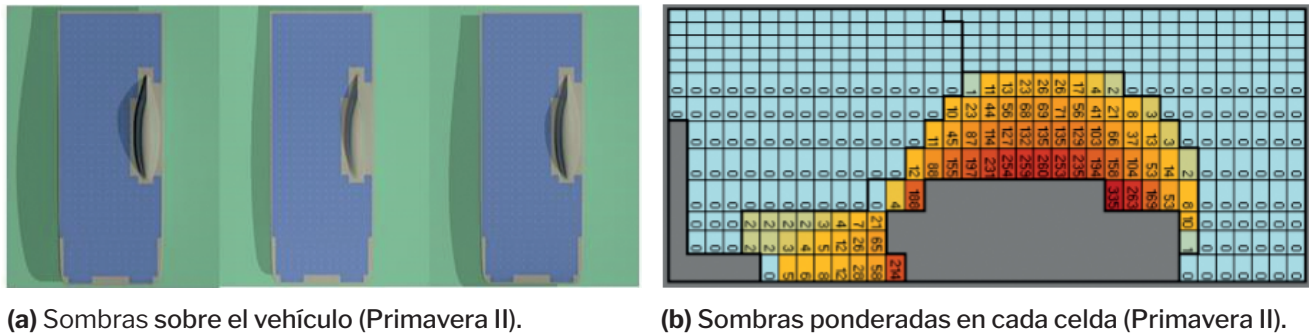


Figura 3.7. Análisis de sombras sobre el vehículo solar (Primavera II)

Fuente: Paz (2016).

3.7.4. Caso de estudio: interconexión dinámica

En el proyecto Primavera II, vehículo solar terrestre, desarrollado en la Universidad EAFIT por el GRID, se debía diseñar un vehículo solar de competencia con una cúpula ubicada a su izquierda. En este caso, había que analizar e incluir en el diseño un estudio de los posibles eventos de sombras incidentes sobre los paneles del vehículo en el transcurso de la carrera e implementar una estrategia para contrarrestar su efecto. Al simular los escenarios de incidencia de sombras sobre el vehículo, se obtuvo un mapa de zonas de peligro por mayor importancia o posibilidad de sombras durante el recorrido a través de las tres ciudades en las que el vehículo transitaría (ver figura 3.7).

Se puede apreciar que las celdas solares más afectadas por las sombras generadas por la cúpula están alrededor de la misma, especialmente en la parte media y trasera de esta. De igual modo, se notó que en la nariz del vehículo hay sombras en ciertas situaciones de carrera por el mismo radio de curvatura de la geometría de la carrocería. Al tener un modelo detallado de las sombras que se presentan, y transcribiéndolo a cada celda solar del panel, se procedió a delimitar los módulos y submódulos. La topología propuesta consistía en dividir el panel solar en tres partes (como se observa en la figura 3.8). El criterio de división de los módulos se estableció con base en las características de los MPPT, que contaban con una eficiencia cercana al 99 % cuando la potencia de entrada fuese de aproximadamente 400 W. Así, los módulos se dividieron teniendo en cuenta la aproximación a esta potencia de entrada al medio día.

También, debido a que en el módulo del medio (que rodea la cúpula) hay una variabilidad considerable en las celdas sombreadas a través del tiempo, se consideró que la mejor opción era dividir este componente en submódulos, que se reconectarían activamente por medio de suiches y están dictaminados por las sombras analizadas. Por ello, los submódulos más cercanos a la cúpula son más pequeños y van creciendo a medida que se acercan a zonas libres de sombras. Esto implica menores pérdidas de eficiencia y un mejor rendimiento. Se iteró con el número de celdas buscando las mejores relaciones de conversión de voltaje (*boost up*), enfatizando en el voltaje mínimo de funcionamiento del vehículo, para evitar desconexiones de porciones de submódulo o MPPT racer v4.0. Además, debido a la existencia de submódulos con potencia, proporcionalmente menor a otros, es necesario usar controladores MPPT de voltajes y corrientes de operación menores, de modo que sean compatibles con los datos de operación de los submódulos más pequeños.

Figura 3.8.
Topología con 3
módulos solares
(Primavera II)

Fuente: Paz (2016).

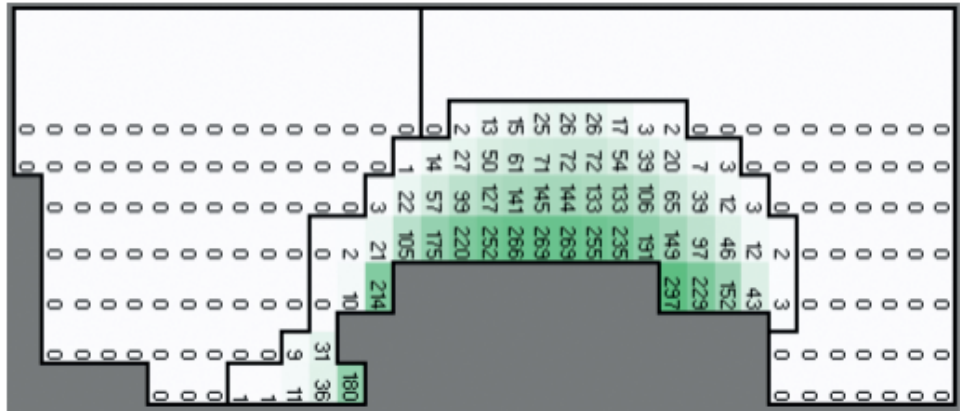
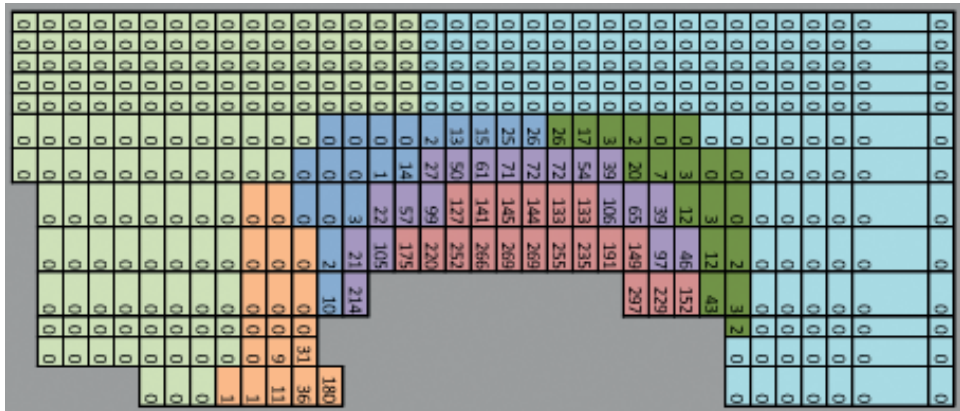


Figura 3.9.
Esquemático
submódulos panel
solar (Primavera II)

Fuente: Paz (2016).



Finalmente, la división se realizó por agrupación de celdas de perfil de sombras similares, tanto en probabilidad de sufrir el evento como en hora de ocurrencia, considerando también la capacidad de los reguladores MPPT. En la figura 3.9 se encuentran diferenciados los submódulos por colores. El módulo del medio fue dividido en cinco submódulos, cada uno con 19 celdas. Este es un arreglo reconfigurable en tiempo real, considerando los escenarios simulados de sombras previamente. En este caso, la topología propuesta, combinada con la estrategia de reconfiguración establecida, permitió obtener, aproximadamente, 15 % más de potencia total en momentos del día donde se presenciaban sombras.

A partir de las temáticas expuestas, se tiene una comprensión general de los sistemas propulsión electro-solar. Este análisis inició con un reconocimiento de los diferentes tipos de celdas solares desarrolladas desde el ámbito investigativo y con disponibilidad comercial. Luego, se abordó el concepto de recurso solar, partiendo del análisis del movimiento del sol e irradiancia disponible para unas coordenadas dadas. A partir de lo anterior, se expusieron aspectos relacionados al funcionamiento eléctrico de los módulos PV, comenzando con la curva VI y PV, lo cual permitió abordar los tipos interconexión para sombreados; dicha temática se expone de manera práctica dentro del caso de estudio Primavera II, en el cual se implementó interconexión dinámica de celdas solares para los patrones de sombra dados. Para terminar, se mostró el proceso de fabricación utilizado en los proyectos mencionados, que incluye la interconexión de las celdas, la preparación de la superficie y, finalmente, el laminado de módulos PV usando materiales compuestos.

3.8. Referencias

- Aberle, A. (2009). Thin-film solar cells. *Thin solid films*, 517(17), 4706-4710. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2009.03.056>
- Alahmad, M., Amer, M., Lau, S., Shi, J. y Neal, J. (2012). An adaptive utility interactive photovoltaic system based on a flexible switch matrix to optimize performance in real-time. *Solar Energy*, 86(3), 951-963, <https://doi-org.ezproxy.uniandes.edu.co/10.1016/j.solener.2011.12.028>
- Dimmler, B. (2014). Overview of thin-film solar cell technologies. *Semiconductors and Semimetals*, 90, 121-136. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-388417-6.00004-0>
- Dos Santos, P, Vicente, E. y Ribeiro, E. (2011). Reconfiguration methodology of shaded photovoltaic panels to maximize the produced energy. *XI Brazilian power electronics conference*, 700-706. doi:10.1109/COBEP.2011.6085266
- Hanifi, H., Pfau, C., Turek M. y Schneider, J. (2018). A practical optical and electrical model to estimate the power losses and quantification of different heat sources in silicon based PV modules. *Renewable Energy*, 127, 602-612. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.060>
- Hauff, J., Verdonck, M., Derveaux, H., Dumarest, L., Alberich, J., Malherbe, J., Gammal A., Llamas, P., Masson, G. y Macias, E. (2011). *Unlocking the sunbelt potential of photovoltaics*. European Photovoltaic Industry Association.
- Hu, Z., Wang, J., Ma, X., Gao, J., Xu, C., Yang, K., Wang, Z., Zhang, J. y Zhang F. (2020). A critical review on semitransparent organic solar cells. *Nano Energy*, 78, 105376. <https://doi.org/10.1016/j.nanoen.2020.105376>
- Betancur, J., Peláez. (2016). *Lecciones aprendidas sobre el desarrollo del proyecto Primavera II del Equipo EAFIT-EPM Solar Car Team*. Universidad EAFIT.
- La Manna, D., Li Vigni, V., Riva, E., Di Dio, V. y Romano, P. (2014). Reconfigurable electrical interconnection strategies for photovoltaic arrays: A review. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 33, 412-426, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.070>
- Lamigueiro, O. (2013). *Energía solar fotovoltaica*. Creative Commons Ebook.
- Mäki, A. y Valkealahti, S. (2011). Power losses in long string and parallel-connected short strings of series-connected silicon-based photovoltaic modules due to partial shading conditions. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 27(1), 173-183. doi: 10.1109/TEC.2011.2175928
- Mohammadnejad, S., Khalafi, A. y Ahmadi, M. (2016). Mathematical analysis of total-cross-tied photovoltaic array under partial shading condition and its comparison with other configurations. *Solar Energy*, 133, 501-511. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.03.058>
- Muniz, H., De Castro, O. y Fraidenraich, N. (2011). Performance analysis of a multijunction solar cell operating under natural conditions and various concentration rates. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, 15, 105-112. <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/101609>
- Nguyen, D. y Lehman, B. (2008). An adaptive solar photovoltaic array using model-based reconfiguration algorithm. *IEEE Transactions on industrial Electronics*, 55(7):2644-2654. doi: 10.1109/TIE.2008.924169
- Patnaik, B., Mohod, J. y Duttagupta, S. (2012). Distributed multisensor network for real time monitoring of illumination states for a reconfigurable solar photovoltaic array. *1st Inter-*

national Symposium on Physics and Technology of Sensors (ISPTS-1), 106-109. <https://doi.org/10.1109/TIE.2008.924169>

- Pereda, I. (2005). *Celdas fotovoltaicas en generación distribuida*. [Memoria de tesis, Universidad Católica de Chile]. <https://docplayer.es/2033817-Celdas-fotovoltaicas-en-generacion-distribuida.html>
- Recabal, F. (2018). *Estudio de eficiencia de celdas solares orgánicas*. [Tesis doctoral, Universidad Santiago de Chile]. <http://fherreralab.com/assets/resources/thesis-frecabal.pdf>
- Romano, P., Candela, R., Cardinale M., Li Vigni, V., Musso, D. y Riva, E. (2013). Optimization of photovoltaic energy production through an efficient switching matrix. *Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems*, 1(3), 227–236. <http://dx.doi.org/10.13044/j.sdewes.2013.01.0017>
- Sander, M., Dietrich, S., Pander, M., Ebert, M. y Bagdah, J. (2013). Systematic investigation of cracks in encapsulated solar cells after mechanical loading. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 111, 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2012.12.031>
- Storey, J., Wilson, P. y Bagnall, D. (2012). optimization strategy for irradiance equalization in dynamic photovoltaic arrays. *IEEE Transactions On Power Electronics*, 28(6), 2946-2956. doi: 10.1109/TPEL.2012.2221481
- Velasco, G., Guinjoan, F., Piqué, R., Román, M. y Conesa, A. (2009). Electrical PV array re-configuration strategy for energy extraction improvement in grid-connected PV Systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 56(11), 4319-4331. <https://doi.org/10.1109/TIE.2009.2024664>
- Villa, L., Picault, D., Raison, B., Bacha, S. y Labonne, A. (2012). Maximizing the power output of partially shaded photovoltaic plants through optimization of the interconnections among its modules. *IEEE Journal of Photovoltaics*, 2(2), 154-163. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2012.2185040>
- Zobaa, A. y Bansal, R. (2011). *Handbook of renewable energy technology*. World Scientific. https://www.academia.edu/31378077/Handbook_of_Renewable_Energy_Technology_GearTeam

Fuentes alternativas de energía

Andrés Emiro Diez Restrepo¹, Juliana Carolina Acosta Jacome¹, Santiago Bernal del Río²

Resumen: teniendo como referencia a Colombia en el panorama 2030, el objetivo de este capítulo es explorar el uso de fuentes alternativas de energía para el sector transporte. A nivel mundial, este sector tiene una canasta energética con mayor dependencia de los combustibles fósiles no renovables (más del 98 %) y adicionalmente es el causante de casi la cuarta parte de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La única participación de recursos renovables se logra a través de la incipiente contribución de la energía eléctrica (1 %), y, aun así, no todo lo aportado es de fuente renovable. A pesar del esfuerzo mancomunado por incorporar fuentes renovables, su participación en la matriz global solo ha alcanzado el 25 %. Añadiendo el 10 % que aporta la energía nuclear, solo un 35 % de la energía eléctrica mundial podría considerarse de baja emisión de GEI, situación contraria a la matriz de generación de energía eléctrica en Colombia. Se espera que la descarbonización del sector transporte sea, principalmente, a través de dos mecanismos. El primero, la racionalización de modos en los que viajes en vehículo particular motorizado son sustituidos por viajes en modos no motorizados (peatones, bicicletas) o por viajes en transporte público (vehículos de mayor capacidad, con menor consumo de energía y menor impacto ambiental). El segundo mecanismo, por el cambio tecnológico de los vehículos mismos, sustituyendo los motores de combustión interna por máquinas eléctricas rotativas.

Palabras clave: energías renovables; transporte; baterías; hidrógeno; demanda energética; generación; electrificación.

1 Transmission and Distribution Research Group (TyD), Universidad Pontificia Bolivariana, Circular 1 70-01, Medellín, Colombia. Correo electrónico: andres.diez@upb.edu.co

2 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, Carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejiag@eafit.edu.co

4.1. Panorama mundial y definición de las energías renovables no convencionales

A continuación, se presenta una breve descripción de las energías renovables no convencionales y se analizará la manera en que son percibidas en distintos países.

- **Energía solar:** es obtenida mediante la captación de luz y el calor emitido por el sol. Esto se da gracias a un fenómeno conocido como efecto fotoeléctrico, el cual consiste en convertir la luz en electricidad. Este proceso se da por medio de materiales semiconductores que tienen la propiedad de absorber fotones y generar baja resistencia para permitir el flujo de corriente. La radiación solar se aprovecha a través del calor que esta produce, como también la absorción de la radiación, por ejemplo, en dispositivos ópticos.
- **Energía termosolar:** aprovecha la energía térmica en forma de calor proveniente de los rayos del sol. Tiene dos alternativas: tradicional y concentrada. La termosolar tradicional recoge la energía directamente desde los colectores (placas que recogen la radiación solar), mientras que la concentrada utiliza espejos para reflejar y concentrar la luz solar en un solo punto, en el cual se encuentra el receptor, lo que permite obtener una mayor cantidad de energía y hacer a esta tecnología más eficiente. Además de ser una fuente de energía verde y renovable, que puede contribuir a la reducción de emisiones de CO₂, una planta termosolar, o de energía solar concentrada (CSP), puede ser integrada con el almacenamiento de energía térmica o tener operación híbrida, lo cual le permite operar continuamente durante la noche y en días nublados. Esto la convierte en una tecnología de alta eficiencia energética, que se prevé produzca un aporte de energía eléctrica del 7 % en 2030 y del 25 % para 2050 (Islam *et al.*, 2018).
- **Energía eólica:** es la energía disponible en las corrientes de viento. Para generar energía eléctrica a partir de esta, se utilizan grandes generadores, ya sean horizontales (HAWT) o verticales (VAWT), que utilizan la energía del viento para transformarla en energía eléctrica.
- **Energía hidroeléctrica:** actualmente, se divide en dos categorías diferenciadas por el tipo de aprovechamiento del recurso: con embalse y de paso en río (filo de agua), es decir, que no requiere embalse o tiene uno muy pequeño (Kaunda *et al.*, 2012). En el caso de embalses o pantanos (el agua posee energía potencial gravitatoria en virtud de su posición), el agua circula hasta un nivel inferior en los generadores y se transforma en energía cinética y posteriormente en energía eléctrica. Por más de 80 años, la hidroelectricidad fue la única fuente renovable de energía eléctrica en el mundo —aún hoy, sigue siendo la principal—, aunque rápidamente la solar y la eólica ganan participación. En Colombia, es la principal fuente de energía eléctrica, principalmente con embalses, con un crecimiento paulatino de centrales de filo de agua. Como se explicará, esto tiene como consecuencia que la red eléctrica mantenga un bajo factor de emisión de GEI, en comparación con los Estados Unidos, la Unión Europea (UE) y China, donde todavía predominan los combustibles fósiles. Gracias a este bajo factor de emisión de la red eléctrica, los proyectos de electrificación del sector transporte en el país ofrecen mejores márgenes de reducciones de carbono que los desarrollos en los referentes mencionados; de manera similar, el hidrógeno producido a partir del uso del Sistema Interconectado Nacional (SIN) puede considerarse mayoritariamente verde, o susceptible a ser completamente verde, si vía contrato se compromete la fuente renovable para su electrólisis.

- **Energía geotérmica:** se obtiene al aprovechar el calor que irradia el centro de la tierra y sube a la superficie a través de las grietas de la corteza terrestre. Al subir en forma de calor, interactúa con las capas freáticas (capas de agua subterránea), las rocas y el suelo, y alcanza altas temperaturas a una determinada profundidad, que varía dependiendo de la zona. La energía geotérmica es considerada la fuente de energía renovable más estable y confiable, ya que es casi independiente de las condiciones ambientales o climáticas, asimismo, es inagotable y puede encontrarse en cualquier geografía. Puede utilizarse en gran variedad de aplicaciones, como calefacción, refrigeración, el almacenamiento y la generación de energía. Por consiguiente, puede ser clave para el objetivo de descarbonización, si se consideran previsiones que indican que esta tecnología puede eliminar más de mil millones de toneladas de CO₂ para 2050.
- **Energía mareomotriz:** se produce a partir de los océanos, por lo que también es llamada energía oceánica. Existen cuatro formas de generarla; la primera y la más usada, es la energía de las mareas o mareomotriz, la cual se obtiene al aprovechar el ascenso y descenso de las aguas marinas, fenómeno que se produce por la acción gravitatoria del sol y la luna. Las mareas ocasionan un cambio de nivel, cuya energía puede aprovecharse para generar energía eléctrica (Quintero y Quintero, 2015b). Otra forma es la energía cinética producida por las corrientes marinas, la cual es llamada energía de las corrientes. La energía olamotriz o undimotriz funciona de manera similar, pero aprovecha la energía mecánica causada por el movimiento de las olas. Por último, la energía maremotérmica o del gradiente térmico aprovecha la diferencia de temperatura entre las aguas profundas y las aguas de la superficie, lo cual es energía térmica que puede transformarse en electricidad. Las cuatro formas de energía mareomotriz tienen un gran potencial, son renovables, su recurso es inagotable y su transformación energética no produce GEI ni subproductos contaminantes. Sin embargo, factores ambientales, estéticos y económicos que conlleva la instalación de una central mareomotriz hacen que hoy en día tenga un pequeño porcentaje de participación en el total de energía renovable producida en el mundo.
- **Energía biomasa:** es un tipo de energía renovable, resultado de un proceso biológico natural o provocado artificialmente, que se obtiene a partir de la transformación de materia orgánica producto de actividades agrícolas o forestales, bien sea de origen animal o vegetal. Otras formas de materia orgánica que suelen usarse para la producción de energía son la fracción orgánica de los residuos sólidos urbanos (FORSU), las aguas residuales y otros residuos derivados de la industria. La materia orgánica se convierte en energía aprovechable al someterse a procesos químicos, como la combustión, la gasificación, la digestión anaerobia y la pirolisis. La energía de la biomasa corresponde al 9,1 % del 19,3 % que aportan las energías renovables al total de energía primaria en el mundo, según un reporte realizado por la Agencia Internacional de las Energías Renovables (IRENA, 2018). No obstante, un 64,5 % de la biomasa utilizada a nivel global corresponde a materiales de uso tradicional (leña, residuos de cosechas y estiércol de animales), a los cuales se les aplican procesos de combustión ineficientes que generan impactos negativos al medio ambiente. El 35,5 % restante de la biomasa se emplea para la bioenergía moderna, es especial en zonas apartadas, donde la instalación, operación y mantenimiento de la red convencional conlleva a altos costos.

4.2. Clasificación de las fuentes no convencionales de energía renovable (FNCER)

A nivel global, no está bien definido qué fuentes de generación pueden considerarse FNCER. Aunque se tiene claridad sobre cuáles son las fuentes renovables, el requerimiento de ser no convencional puede variar en cada país, según su matriz energética y las fuentes de energía que tengan poca participación en ella. La tabla 4.1 presenta las tecnologías consideradas FNCER en varios países y algunas de sus denominaciones alternativas. Como se evidencia, existe un consenso más o menos estándar de las fuentes no convencionales.

Tabla 4.1. Clasificación de las FNCER

País o región	FNCER (MW)	Denominación alternativa
Colombia	Energía solar Energía termosolar Energía geotérmica Energía nuclear Energía eólica Energía mareomotriz*1 Energía hidroeléctrica filo de agua*2 Energía por biomasa*3	1. Energía de las mareas o de los océanos. 2. Pequeños aprovechamientos hidráulicos o pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH) (capacidad menor a 20 MW). 3. Biomásica.
Chile	Energía solar*1 Energía termosolar Energía geotérmica Energía nuclear Energía eólica Energía mareomotriz Energía hidroeléctrica de poca potencia*2 Energía por biomasa Energía por biogás	1. Fotovoltaica. 2. Minihidro o minihidro de pasada (capacidad menor a 20 MW).
Brasil	Energía solar*1 Energía termosolar*2 Energía geotérmica Energía por biogás Energía por biometano Energía eólica Energía mareomotriz Energía hidroeléctrica de poca potencia*3 Energía por biomasa	1. Solar fotovoltaica. 2. Solar concentrada o <i>concentred solar power</i> (CSP). 3. Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).
EE. UU.	Energía solar*1 Energía termosolar Energía geotérmica Bioenergía*2 Energía eólica Energía mareo motriz*3 Energía hidroeléctrica de poca potencia*4	1. Solar fotovoltaica. 2. Engloba energía por biomasa, biogás y biometano. 3. Energía de las mareas. 4. Pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH).

País o región	FNCER (MW)	Denominación alternativa
Europa	Energía solar*1 Energía termosolar Energía geotérmica Energía por biomasa Energía eólica Energía mareomotriz*2 Energía hidroeléctrica Energía nuclear	1. Solar fotovoltaica. 2. Engloba la energía mareomotriz dinámica, mareomotriz undimotriz, mareomotriz mareomotérmica y la energía mareomotriz osmótica.

Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2021); Energía abierta (2021).

Tabla 4.2. Intensidad energética de las principales centrales hidroeléctricas en Colombia

Central hidroeléctrica	Potencia (mw)	Área inundada (km ²)	intensidad eléctrica (W/m ²)
Hidroituango	2400	38	63,16
Sogamoso	820	70	11,71
El Guavio	1213	15	80,86
Porce II	405	8,9	45,50
Porce III	660	5,75	114,78
El Quimbo	400	82,5	4,84
Salvajina	285	21,24	13,42
Chivor	1000	12,6	79,36
*Cadena Guatapé	7857	380	20,67

* La Cadena Guatapé está conformada por cuatro centrales de generación de energía: Guatapé, Playas, San Carlos y Jaguas. Cada una cuenta con un embalse propio, pero el agua embalsada en Guatapé llega a los embalses asociados de las centrales mencionadas.

Fuente: EPM.

Una de las principales preocupaciones asociadas al uso de la hidroelectricidad es que los grandes embalses, eventualmente, se conviertan en emisores de GEI. Esto tiende a ocurrir cuando el área embalsada es muy grande en relación con la potencia generada, relación que denominaremos densidad de potencia. En este sentido, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) clasificó en tres categorías las centrales hidroeléctricas:

En primer lugar, aquellas con densidades de potencia (capacidad de generación de energía instalada dividida por la superficie inundada) menores o iguales a 4 W/m² no serían candidatas a beneficios por mecanismos de desarrollo sostenible, al menos bajo las metodologías estándar; las centrales hidroeléctricas con densidades de potencia mayores a 4 W/m², pero menores o iguales a 10 W/m², pueden utilizar las metodologías actualmente aprobadas, con un factor de emisión de 90 gCO₂ eq/kWh para las emisiones del embalse del proyecto; finalmente, las que tienen densidades de potencia superiores a 10 W/m² pueden utilizar las metodologías actuales aprobadas y las emisiones del embalse del proyecto pueden despreciarse. Para tener una visión general del uso de la hidroelectricidad con embalses en Colombia, la tabla 4.2 presenta las densidades de potencia de los embalses más relevantes. Como se observa, puede concluirse que, en todos los casos, las emisiones del embalse podrían despreciarse, salvo para el caso

de El Quimbo, proyecto hidroeléctrico localizado al sur del departamento del Huila, inaugurado en 2015. También, que en general los aprovechamientos de cadenas hidroeléctricas en Colombia representan excelentes casos de densidad de potencia, por lo que es importante considerar que el embalsamiento responsable haga parte del futuro energético del país, tal como se ha venido haciendo históricamente.

4.3. Descripción general de la red eléctrica de un país

Históricamente, los sistemas eléctricos se han subdividido en tres componentes fundamentales: la generación, la transmisión y la distribución. Esta segmentación y ordenación también ha servido para sugerir una secuencia o proceso, que marca el inicio o entrada del sistema en la generación y el final en la distribución, teniendo la transmisión subsistema como intermedio. Presentado como lineal y unidireccional, el esquema tradicional —en adelante modelo red (MR)— se ha convertido en el arquetipo de lo que debe ser superado, y muchas veces sustituido, por nuevos arquetipos basados en esquemas descentralizados y en generación distribuida y microrredes (en adelante arquetipo mR); pero, definitivamente, el arquetipo de la red futura será un complemento de ambos modelos.

En el arquetipo MR enormes cantidades de energía primaria son transformadas en electricidad en centrales de generación de gran capacidad, de manera localizada. Generalmente, en el sitio hay un yacimiento de la materia prima (p. ej. un combustible fósil) o la posibilidad del aprovechamiento masivo de un recurso renovable, como la conjunción de altos caudales de agua y diferencias de nivel; para el caso de la hidroelectricidad, un volcán o un campo geotérmico, un desierto con alta radiación solar o un litoral con vientos fuertes la mayor parte del año. Uno de los argumentos contra este arquetipo es que los sitios de generación alejados de los de consumos implican ineficiencias por el transporte de energía a largas distancias; no obstante, las pérdidas de los sistemas de transmisión de electricidad son muy bajas (típicamente menores al 3 %); pero aún más notable, la generación en mayor escala puede hacerse con eficiencias mayores a aquella que es distribuida, no solo por las características de los equipos utilizados, sino por la facilidad de controlar un único proceso manteniendo las mejores condiciones, en vez de hacerlo en múltiples equipos distribuidos.

Asimismo, la generación localizada tiene impactos ambientales y sociales más limitados y mitigables en sus áreas de influencia. Esto es especialmente cierto en procesos que involucran combustibles fósiles. Por ejemplo, si el diésel y el gas natural consumido por la flota del sistema de Buses de Tránsito Rápido de Bogotá (Transmilenio) se convirtieran en electricidad, de forma localizada y en condiciones especiales, podría moverse el doble de la flota. Para este fin, se usaría una central térmica de ciclo combinado, ubicada en un municipio de baja altitud como Girardot o Melgar, que están cerca de la sabana, pero por debajo de los 400 m s.n.m. (mientras los motores se enfrentan a 2600 m s.n.m.). La energía se transportaría, con pérdidas mínimas, para su uso en trolebuses de carga en movimiento, vehículos eléctricos, alimentados directamente por la red (con baterías para operar parcialmente de manera autónoma). Todas las emisiones, además, estarían lejos de la gran cantidad de ciudadanos que se aglomeran diariamente en los buses y estaciones del sistema, y de la ciudad misma. Lógicamente,

es mejor si la fuente primaria de estos sistemas de movilidad de mediana capacidad es la electricidad de una MR como la colombiana, con predominio de hidroelectricidad y un importante crecimiento de FNCER, como la solar y la eólica.

El arquetipo mR, presentado a veces como sustituto del MR, se ofrece como una alternativa más eficiente en virtud de que los recursos de generación quedan localizados cerca a los centros de consumos, lo que no es necesariamente cierto, por lo explicado anteriormente. El aprovechamiento de recursos renovables distribuidos es fundamental cuando se sustituye la generación con recursos no renovables y cuando complementa la generación renovable convencional, máxime si esta depende de fenómenos climáticos, como los ciclos hidrológicos. Y, aunque ya se señaló la alta eficiencia en los procesos de transmisión y distribución de energía eléctrica, de todas maneras, es deseable reducir los transportes de electricidad, especialmente cuando se pueden liberar las redes para incrementar su capacidad de atención a otros nuevos usuarios.

Los prosumidores (usuarios que consumen y producen a la vez) no solo serán importantes por abastecer parte de su demanda y reducir su costo de energía, sino porque su relacionamiento con el sistema puede ser sinérgico, favoreciendo su crecimiento, confiabilidad y seguridad. En esta línea, los operadores de red no verían al prosumidor como un competidor, sino como un socio aliado, que puede satisfacer una gran cantidad de servicios inherentes a la red de la cuarta revolución industrial: compensación de energía activa, reactiva, armónica, e incluso de fluctuaciones de tensión y *flicker*. Estos servicios son cada vez más relevantes, porque la capacidad de almacenamiento de energía eléctrica incrementa en los sistemas, tanto en el arquetipo MR, en forma de sistemas de almacenamiento de gran capacidad, como en el mR, en forma de almacenamiento distribuido. Gracias al desarrollo que han logrado los sistemas de almacenamiento, ya no puede hablarse de sistema eléctrico de potencia, en el que la energía generada debe ser consumida instantáneamente por la imposibilidad de almacenar; ahora las baterías y vectores energéticos como el hidrógeno amplían la dimensión temporal y los sistemas de potencia han mutado a sistemas de energía. Aunque ya existían sistemas de almacenamiento de energía como soporte a la red eléctrica, como volantes de inercia, almacenamiento hidráulico por gravedad, entre otros, el desarrollo de las baterías de litio y de las celdas de combustible se supone que causarán un incremento disruptivo en la capacidad de energía que se almacena para la operación de las redes eléctricas.

Para evaluar el nivel de penetración que tendrá el almacenamiento a nivel mundial, se propone cruzar la proyección del crecimiento de la capacidad instalada en la generación de electricidad con la de almacenamiento de energía en baterías de un escenario optimista, como el de “emisiones netas cero” de la Agencia Internacional de Energía (Stanley, 2021). Según este contraste, para 2025, la capacidad de potencia para almacenamiento en batería será de 148 GW, lo que representa cerca del 1,78 % de los 8601 GW de capacidad de generación proyectada; y, para 2030, la proporción aumentará al 6 % (585 GW respecto a 9579 GW). Se podrá argumentar que, por tratarse de almacenamiento de energía, la mejor comparación sería en términos energéticos y no de potencia, pero este análisis se plantea para trabajos futuros. Esto quiere decir que el arquetipo MR seguirá siendo, primordialmente, un sistema de potencia, mientras que el concepto de sistema energético se hace relevante a la escala mR, en tanto el almacenamiento da viabilidad técnica en muchos casos.

A nivel mundial, los sistemas eléctricos de potencia están experimentando una fuerte penetración de energía renovable, tanto a nivel de grandes plantas como a nivel distribuido. Se busca, con ello, el cierre progresivo de las centrales de generación a partir de combustible fósil, especialmente de carbón, que han tenido una participación preponderante. Históricamente, las redes eléctricas de los países desarrollados son responsables de importantes emisiones de GEI y de gases que afectan la salud pública. Las principales centrales de baja emisión han sido las hidroeléctricas, que además es renovable, y las nucleares. Comenzando este siglo, el mundo se ha volcado a reemplazar el carbón por el gas natural, bajo la premisa de la mayor limpieza de combustión, tanto en términos de efecto invernadero como de salud pública.

En 2012, ocurrió el accidente en la central japonesa Fukushima I y en países como Alemania y España, la vorágine de sustitución de carbón por gas se trasladó a eliminar la energía nuclear, impulsada por el temor y la explotación de este, políticamente hablando. Creció el movimiento antinuclear del panorama de las energías eólicas y solar, y se generaron planes de eliminación gradual de las centrales nucleares. Precisamente, en 2022, Alemania terminó su plan de cierre de sus centrales nucleares, en medio de la crisis europea del gas natural, por la dependencia a Rusia, justamente cuando se da la invasión a gran escala. La situación actual en Alemania ha llevado, incluso, a que se pongan en operación centrales de carbón cerradas, a pocos meses del cierre de las últimas nucleares. Sin embargo, la percepción de la energía nuclear comenzó a cambiar en Europa, al concretarse en un cambio de planes a favor del desarrollo masivo de nuevos proyectos nucleares, como en Reino Unido, Francia y el grupo de Visegrado, constituido por seis países de Europa del este (Chequia, Polonia, Eslovaquia, Hungría, Rumania y Eslovenia), los cuales han reclamado a la Comisión Europea mayor apoyo a sus desarrollos nucleares como alternativa a la descarbonización. Pero, la necesidad de multiplicación rápida de la energía nuclear también es compartida por China y Estados Unidos. La situación geopolítica actual favorece que las centrales de carbón sean sustituidas gradualmente por centrales nucleares, para aprovechar los sistemas de transmisión de energía existentes. En este escenario, el arquetipo MR se posiciona con fortaleza de cara al escenario energético posterior a la fecha de referencia de este ejercicio prospectivo.

En favor de esta visión, está el revisionismo de la condición del gas natural como energético favorable para la lucha contra el cambio climático. Estimaciones recientes han demostrado que basta un 3 % de fugas de metano para que la generación con gas natural sea equivalente, en términos de cambio climático, a la generación con carbón y, desafortunadamente, esa parece ser la regla. Nadie discute los beneficios del uso del gas natural en relación con la calidad del aire, pero su papel en la descarbonización está francamente en entredicho.

El rol de la energía nuclear contra un eventual papel protagónico del gas natural es fundamental para entender el impacto ambiental de la red eléctrica en los países desarrollados a futuro. Por un lado, debe reconocerse que la energía nuclear presenta indiscutibles ventajas en cuanto a huella de carbono, huella ecológica y, contrario a la creencia popular, seguridad. Adicionalmente, aunque frívolo, el indicador de muertes asociadas por unidad de energía generada presenta a la energía nuclear como una tecnología, al menos, un orden de magnitud menor respecto a las alternativas fósiles,

e incluso frente a renovables como la solar, la hidroeléctrica y la eólica. Según Brook y Bradshaw (2015), la fatalidad, estimada como muertes derivadas de accidentes, excluyendo problemas crónicos de salud, de la energía nuclear es de apenas 0,04 por cada teravatio/hora generado, respecto a 161 del carbón, 12 de la biomasa, 4 del gas natural, 1,4 de la hidroelectricidad, 0,15 de la eólica en tierra y 0,44 de la solar fotovoltaica. Markandya y Wilkinson (2007) reportaron, en el caso del gas natural que, solo por efectos en la calidad del aire, eran atribuibles a la generación con carbón 24,5 muertos por cada teravatio/hora generado y de 225 casos de enfermedad grave. La mortalidad por calidad del aire sería de 2,8 y los casos de enfermedad grave, 30. Para la energía nuclear, los muertos asociados serían 0,052, incluyendo las muertes asociadas al cáncer y los enfermos graves serían 0,22, incluyendo todas las patologías hereditarias y cáncer no fatal.

4.4. Fuentes no convencionales de energías renovables (FNCER)

La legislación colombiana, con la Ley 1715 de 2014 definió las FNCER como: “recursos de energía renovables disponibles mundial y ambientalmente sostenibles, pero que en el país no son utilizadas o son usadas de manera marginal y no se comercializan ampliamente”. Inicialmente, esta Ley consideró como FNCER la biomasa, las pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), la eólica, la geotérmica, la solar y la mareomotriz. Posteriormente, la Ley de transición energética (Ley 2099 de 2021) incluyó al hidrógeno verde (obtenido a partir de FNCER definidas en la Ley 1715) en este listado. La inclusión del hidrógeno como fuente de energía es un poco desconcertante, en la medida en que debe considerarse un vector energético y no una fuente como tal.

El uso de este tipo de energía tiene un impacto positivo en la disminución de las emisiones de carbono asociadas al proceso de generación de energía eléctrica, pues con ellas se dejan de utilizar fuentes provenientes de hidrocarburos. La tabla 4.3 muestra la generación de energía eléctrica según tipo de fuente empleada durante un periodo de tres años (2019, 2020 y 2021). Como puede verse, el factor de emisión de la red eléctrica, presentado en la última columna, es altamente dependiente de la participación de la energía hidráulica contra las fósiles (ver demanda total). Por eso, en años de buen recurso hídrico, el factor de emisión es considerablemente menor.

A pesar de que la matriz energética colombiana sea bastante limpia, los combustibles fósiles y la energía térmica siguen cumpliendo un papel importante en ella. Esto se evidencia en la tabla 4.4 que indica el porcentaje de participación de las diferentes fuentes de energía a nivel nacional.

Cabe anotar que durante 2021 hubo un aumento del 21,50 % en la generación de energía eléctrica mediante fuentes renovables y una disminución del 33,94 % en la generación con fuentes no renovables de energía, respecto al año anterior. Estos datos muestran que en la generación de energía eléctrica se utiliza, principalmente, fuentes limpias, pero su implementación no está extendida en el sector transporte, ya que en este se utiliza como fuente principal los productos energéticos derivados de los hidrocarburos, según las cifras de la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME, 2021). A continuación en la tabla 4.5, puede verse las cifras de consumo de energía por combustible para el sector transporte en Colombia en 2021.

Tabla 4.3. Matriz energética de Colombia en los últimos tres años

Año	Hidráulica (GWh)	Solar (GWh)	Eólica (GWh)	Biomasa (GWh)	Combustible fósil y energía térmica (GWh)	Demanda (GWh)	Factor de emisión (gco ₂ /kWh)
2019	54.437,10	132,10	63,30	701,80	14.780,50	71.925,02	164,38
2020	49.837,40	190,80	60,10	724,40	18.560,90	70.422,13	203.353
2021	60.496,00	323	60,50	792,60	12.261,50	74.116,91	126.378

Fuente: XM (2021).

Tabla 4.4. Porcentaje de participación de cada fuente de generación en Colombia en los últimos tres años

Año	Hidráulica (%)	Solar (%)	Eólica (%)	Biomasa (%)	Combustible fósil y energía térmica (%)	Total (%)
2019	77,64	0,19	0,09	1,00	21,10	100
2020	71,89	0,28	0,01	1,05	26,80	100
2021	81,82	0,44	0,08	1,07	16,60	100

Fuente: XM (2021).

Tabla 4.5. Consumo de energía sector transporte 2021

Fuente	Consumo (petajulios - PJ)	Participación nacional (%)
Diesel	188	45,3
Gas natural	12	2,9
Gasolina	215	51,8
Total	415	100

Fuente: UPME (2021).

El uso de vehículos con impulsión eléctrica, en lugar de aquellos con motores de combustión interna a base de hidrocarburos, trae consigo ventajas y beneficios a nivel medioambiental: disminuye la contaminación auditiva, los niveles de percepción de ruido y las emisiones de GEI a la atmósfera. Con la implementación de vehículos eléctricos estas emisiones se reducirían mucho más en Colombia, puesto que su matriz energética eléctrica se compone, en su mayoría, de fuentes limpias de energía (hidroeléctricas) y las FNCER han incrementado su participación en los últimos años, según las cifras mostradas.

4.5. Potencial de otros vectores energéticos: el caso del hidrógeno

El uso del hidrógeno para la movilidad ha despertado expectativas por más de 20 años y, aunque en el segmento vehicular el uso de las baterías de litio está dominando el mercado de la electrificación, en el segmento de transporte de carga y rangos extendidos de operación, este presenta ventajas respecto a la batería, por la mayor densidad

gravimétrica lograda con el sistema de almacenamiento de hidrógeno comprimido y la celda de combustible, respecto a la batería.

La densidad gravimétrica de energía en un sistema de almacenamiento con hidrógeno ideal sería de 33,3 kWh/Kg, contra apenas 200 Wh/kg que ofrecen las mejores baterías del mercado. Casualmente, la energía en un kg de hidrógeno es similar a la de un galón de gasolina (36,6 kWh), que pesa cerca de 3 kg, por lo que se puede considerar que la densidad gravimétrica del primero triplica la de la gasolina. Este debe ser almacenado en tanques de alta presión, cuyo peso reduce la densidad gravimétrica del conjunto tanque-hidrógeno a 1500 Wh/kg; y la celda de combustible tiene una densidad reducida gravimétrica de potencia (debe entregar lentamente la energía), del orden de 1,6 kW/kg, muy inferior al que ofrece una batería de litio, cercano a 5 kW/kg. Por esto, en muchas aplicaciones de tracción, la celda de combustible debe estar respaldada por una batería, que, además, almacena los frenados recuperativos, en la medida que las celdas de combustible no son reversibles. Una preocupación adicional es la baja eficiencia neta, desde la producción del hidrógeno hasta la rueda (cercana al 33 %, proyectada al 45 % en 2050), por la pérdida de energía en los procesos de electrólisis, compresión, almacenamiento y utilización en la celda.

Para aumentar la competitividad de esta tecnología, es fundamental mejorar la eficiencia energética de los procesos del hidrógeno para que sean competitivos. Invertir y financiar la innovación a través de una serie de iniciativas reglamentarias y el apoyo a la investigación. Mejorar las condiciones del mercado mediante uno interno más sólido y la aplicación coherente de la normatividad inteligente.

4.6. Análisis de viabilidad y potencial de las diferentes fuentes, según la necesidad

A continuación, se presenta el panorama general de los estudios para aplicación de selección de alternativas de electrificación ferroviaria y de redes multimodales de transporte.

- **Electrificación con líneas aéreas de contacto y tercer riel:** la electrificación tradicional de los sistemas ferroviarios se hace a través de líneas aéreas de contacto o con rieles adicionales, lo que alimenta, directamente desde la red eléctrica, el sistema de tracción de las locomotoras. Las tecnologías utilizadas tienen un alto nivel de madurez y el proceso de alimentación permite una operación de alta eficiencia energética, desde la subestación de alimentación hasta la rueda, cercana al 80 %.

El tercer riel ha sido usado en algunos sistemas de transporte de pasajeros urbanos, evitando el uso de líneas de contacto, principalmente, por razones estéticas; pero, al tener como limitante el nivel de tensión a 1200 VDC (recientemente algunos sistemas de la línea 16 del metro de Shangai en China están incorporando sistemas de tercer riel a 1500 VDC), la capacidad de transporte se ve limitado y, por tanto, no se puede utilizar en sistemas metro de alta capacidad, ni mucho menos en ferrocarriles de carga o de alta velocidad. En la práctica, se considera que una capacidad de 30.000 pasajeros-hora-sentido es el límite para considerar un incremento de tensión de 750 VDC a 1500 VDC. Para ferrocarriles de larga distancia, de carga o pasajeros, se prefiere utilizar alimentaciones a mayor tensión y en corriente alterna; se destacan los sistemas de 25 kVAC y 2*25 kVAC, en los que la alimentación del sistema se hace a 50 kVAC, aunque el material rodante se alimenta a una tensión

de 25 kVAC, utilizando una derivación central; así, reparte convenientemente el retorno de corriente entre las dos líneas extremas del transformador, utilizando transformadores intermedios tipo *booster*.

Elevar la tensión ayuda a prolongar las distancias entre las subestaciones de tracción, que son las encargadas de adecuar el voltaje al material rodante. Como distancias conservativas entre subestaciones de tracción, los sistemas de 750 VDC requieren una alimentación cada kilómetro y medio, los de 1500 VDC cada 3 km, los sistemas de 25 kVAC cada 40 km y los sistemas de 2*25 kVAC, cada 80 km. Evidentemente, el costo de la electrificación está asociado a la longitud de la infraestructura, la cantidad y características de las subestaciones de tracción, así como de la conexión con el sistema interconectado nacional (SIN), el cual necesita las subestaciones de alimentación y las redes de media o alta tensión para la conexión de redes multimodales de transporte. En consecuencia, la electrificación de corredores ferroviarios como La Dorada-Chiriguaná del ferrocarril central, de cerca de 522 km, en los que apenas se reactiva la operación, difícilmente pueden ser electrificados de modo inmediato usando solo la electrificación tradicional, pero en combinación con otras tecnologías, es posible contemplar soluciones factibles, que son evaluadas en este proyecto.

Las oportunidades que abre la aplicación de tecnologías emergentes, especialmente en almacenamiento de energía, como las baterías y las celdas de combustible, han motivado estudios para reevaluar las mejores prácticas de electrificación. Algunos de estos estudios se presentan con detalle en esta sección.

Sobre la electrificación tradicional, diversos trabajos han abordado el problema de la integración con los sistemas de potencia de los sistemas de electrificación en corriente alterna, así como el desarrollo de métodos y dispositivos para su compensación, tanto para los desequilibrios como para la distorsión armónica de tensión. Los convertidores de potencia ferroviarios ofrecen oportunidades para ser fabricados localmente, y como referencia está el sistema de compensación en DC desarrollado por la UPB y el Metro de Medellín para el aprovechamiento del frenado regenerativo de los trenes (Killer *et al.*, 2012; Figueroa *et al.*, 2017). La adecuada gestión de la energía regenerativa es fundamental para reducir los costos de electrificación y de operación (Díez *et al.* 2015) y, en este sentido, sistemas de compensación como el descrito serán tenidos en cuenta en las modelaciones. Otros autores han identificado estas oportunidades y retos, especialmente en el desarrollo de convertidores multinivel (Ronanki y Williamson, 2018), ya que estos tienen una ganancia importante en las aplicaciones del transporte eléctrico, incluyendo los EV, estaciones de carga, tracción de trenes y embarcaciones eléctricas.

- **Electrificación con trenes híbridos conectables para carga de depósito:** este tipo de locomotoras se basa en las híbridas diésel-eléctricas, pero en este caso la batería es de mayor capacidad y puede ser recargada en los terminales o depósitos, mientras el tren se encuentra detenido. A diferencia de las locomotoras híbridas no conectables, la fuente primaria de la energía no es solo el combustible fósil, porque parte de la energía es tomada de la red eléctrica, lo cual logra desplazar parte del combustible. El motor diésel acoplado a un generador eléctrico mantiene la carga de la batería una vez llega a un estado de carga definido, usualmente del 20 %, asumiendo también la generación de electricidad para la tracción. En el caso ideal, si está equipada con un pantógrafo y un convertidor que le permita operar conectada a una línea de contacto, podría aprovechar tramos electrificados,

tanto para tracción como para recarga de la batería. Los beneficios que pueden lograrse con esta tecnología dependen de la cantidad de almacenamiento de las baterías con relación a la distancia a operar, dado que la locomotora opera la primera parte del recorrido solo con electricidad y el resto como locomotora híbrida; incluso, pueden definirse tramos en los que, por requerimientos ambientales, no se puede operar con diésel.

- **Electrificación con trenes diésel-eléctrico-catenaria:** este tipo de locomotoras está permitiendo la electrificación gradual de sistemas en Norteamérica, Europa y China, al dejar que el tren opere con diésel en los corredores no electrificados y con catenaria en los tramos que se ha instalado. Inclusive, admiten la opción de conexión a dos tipos de voltaje de alimentación, como 750 VDC o 1500 VDC en los trayectos urbanos y 25 kVAC en las rutas de larga distancia.
- **Electrificación con trenes de hidrógeno:** la implementación del hidrógeno en la movilidad ha traído consigo algunas ventajas, incluso si se compara con las baterías de litio en el mercado de la electrificación. El propio tren puede transportar el hidrógeno renovable en tanques y de ahí pasa a unas celdas de combustible que lo transforman en agua y electricidad, lo que lo convierte en una gran alternativa para mayores distancias a recorrer.
- **Electrificación con trenes de batería:** actualmente, Siemens Mobility, la división de movilidad de Siemens, se encuentra fabricando una flota de trenes eléctricos por parte de la compañía pública de ferrocarriles de Baden-Wurtemberg, el Bundesland más al suroeste de Alemania (López, 2020). Se trata de un pedido de 20 trenes eléctricos Mireo Plus B, un modelo que abandona cualquier tipo de motores diésel y se alimenta, en toda circunstancia, de electricidad. Estos trenes disponen de una autonomía de hasta 80 km con funcionamiento de la batería en condiciones reales. Las baterías se pueden cargar mediante una línea aérea mientras continúa en funcionamiento normal; otra forma es mediante el frenado regenerativo. Las baterías con las que estos trenes están dotados son de iones de litio, las cuales se encuentran montadas en el suelo del tren.

Los sistemas de almacenamiento son fundamentales a la hora de electrificar vehículos, sean de carga o de pasajeros. En la actualidad, se emplean diferentes tecnologías de almacenamiento y se clasifican según la construcción de las celdas electroquímicas; las de plomo ácido, ion-litio y níquel metal hidruro son las más empleadas en este tipo de aplicaciones. Las características más importantes son la capacidad de almacenamiento, el voltaje nominal de sus celdas, la densidad de energía que almacenan, el peso, costo y capacidad de entregar y recibir, rápidamente, gran cantidad de energía. Los requerimientos de las baterías de uso automotriz dependen de las funciones que deban cumplir en el medio de transporte. A continuación, siguiendo a Cueva *et al.* (2018), se describen algunas de estas tecnologías:

- › **Baterías de ion litio:** representan la mejor opción para alimentar los sistemas eléctricos y electrónicos de los sistemas de transporte. Es la tecnología que ha permitido el desarrollo de los vehículos eléctricos, así como también el campo de almacenamiento de energía renovable. Esto se debe a que poseen más densidad de energía y de potencia que otro tipo de baterías. La desventaja que poseen es que su material de construcción es más costoso y se debe mantener un continuo monitoreo mediante un BMS (*battery management system*). Esto implica la instalación de sensores como amperímetros, voltímetros y actuadores que integran el sistema de refrigeración del paquete de baterías (Peña, 2011).

Las baterías varían su rendimiento dependiendo de la combinación de materiales empleados en la construcción del ánodo y cátodo; en especial, el voltaje nominal y el número de ciclos de carga determinan la vida útil de la misma. En el cátodo se utilizan LFP (LiFePO_4), LiMn_2O_4 (LMO), $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Mn}_{1-x-y}\text{O}_2$ (NCM) y $\text{LiNi}_x\text{Co}_y\text{Al}_z\text{O}_2$ (NCA), mientras que para el ánodo se emplean, principalmente, grafito y $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO). Según la combinación del ánodo y cátodo, el voltaje nominal de operación varía las combinaciones entre NCM, NCA, NCM y LMO con grafito, LFP con grafito y LTO con LMO. La autonomía que alcanza la batería está limitada por su capacidad; al aumentar la capacidad, esta aumenta el peso; de ahí que sea necesario buscar la mejor combinación de materiales y de procesos de construcción de la batería para asegurar mayor capacidad de densidad de energía y de potencia.

- › **Baterías de níquel metal hidruro:** las baterías de níquel/hidruro metálico (Ni/MH) son ampliamente utilizadas en electrónica portátil de consumo, almacenamiento de energía estacionaria, vehículos pesados y trenes. China es el país que más baterías de Ni/MH producen por tipo de consumidor (más del 70 %) para el mundo, desde el cambio de siglo; también produce baterías para aplicaciones automotrices en transporte pesado del tipo de muy alta potencia. Igualmente, las baterías de Ni/MH tienen una densidad de energía relativamente alta (Wh/l) que va entre 140 y 300 Wh/l, pero una energía específica bastante baja (Wh), en comparación con la batería de iones de litio; además, mantiene acumuladas potencias entre 2 kW y 2 MW, en función de los módulos de trabajo para la aplicación en los que se usará el módulo de baterías. El número de ciclos de vida para este tipo de tecnología es alrededor de menos de 2000. En la actualidad evidencia un incremento estimado gracias a la densidad de energía, la estabilidad del ciclo en la descarga (más de 3000) y otras características como la construcción robusta, la capacidad de ser cargada rápidamente y que es amigable con el medio ambiente. Finalmente, el almacenamiento de energía está en un rango 0,5 MWh-50 MWh en las baterías Ni/MH, y el costo estimado es de 200-400 USD/kWh, lo que representa una desventaja para la aplicación en vehículos.
- › **Baterías de plomo ácido:** están diseñadas para un desempeño óptimo en aplicaciones con gran capacidad de potencia o cantidad de energía, pero no ambas (García, 2010). Son comúnmente empleadas para el arranque de los motores de combustión interna que suministran alta densidad de energía en un tiempo limitado, aunque no están hechas para resistir descargas mayores al 10 %-20 %; también, se han creado baterías de ciclo profundo o de tracción que se han instalado en botes y sistemas de iluminación. Este tipo de baterías entregan una menor y estable potencia por un periodo mayor, en comparación con la batería de arranque, pero compensan esos aspectos negativos con su bajo precio. Respecto a trenes de batería, estudios como el de Cipek *et al.* (2019) han evaluado algunas arquitecturas híbridas con batería y locomotoras diésel eléctricas en rutas de alta pendiente, característica presente en muchas de las rutas del país. En el mismo sentido, Spiriyagin *et al.* (2018) han analizado diferentes sistemas de almacenamiento de energía para trenes como volantes de inercia y sistemas de batería, para trenes de carga pesada. Encontraron que se pueden alcanzar

ahorros de energía de hasta el 20,65 %, en el caso de baterías, aunque se reduzca la velocidad de operación en un 9,2 %. Con volante de inercia, los resultados no fueron tan buenos: se dio una pérdida de velocidad del 13,26 % y ahorro de energía del 12-4 %.

- **Electrificación con trenes de carga dinámica, batería-catenaria:** los trenes dotados con baterías tienen una autonomía limitada a la capacidad de almacenamiento y su vida útil puede reducirse por efecto de la ruta (Zamora, 2015). Para reducir la restricción que implica tener una energía almacenada, Estévez *et al.* (2012) plantearon utilizar la catenaria, que permite realizar la carga de las baterías de forma dinámica, mientras el tren continúa su movimiento de forma normal. Cuando se tiene esta forma de alimentación dual, se aprovechan las ventajas de ambos métodos. En tramos no electrificados, en los que no se dispone de la catenaria, la batería tiene la capacidad de suplir la energía necesaria y, cuando el tren se desplaza por zonas electrificadas, las baterías pueden recuperar su carga y permitir que este continúe sin detenerse para realizar la carga de la batería.

4.7. Panorama general de la electrificación del modo fluvial

Hoy en día, se han desarrollado e implementado políticas públicas para mejorar la movilidad y la electrificación de zonas rurales de forma independiente. Las embarcaciones eléctricas que usan el potencial fotovoltaico para recargar las baterías de las canoas representan una oportunidad para avanzar y crear posibilidades en la inserción e integración social y económica de las comunidades y regiones rurales (Jaimurzina *et al.*, 2017). En Colombia, la combinación de estrategias de electrificación y movilidad pueden ser complementarias, lo que resuelve diversas problemáticas en zonas periféricas y pobres, empleando sistemas de energía sostenible y altamente innovadoras, como la instalación de sistemas solares individuales o a través de microrredes con generación centralizada en cada comunidad y una mejora de la movilidad y accesibilidad en la región. Por ejemplo, en la Amazonía se planteó una iniciativa en la que se reemplazan motores tradicionales, que utilizan combustibles fósiles, por motores eléctricos en los cuales la fuente energética de propulsión es la energía a partir de baterías. Los sistemas de recarga para estas baterías serían un problema por la falta de energía eléctrica convencional en zonas aisladas sin electrificación. En este contexto, juegan un papel muy relevante las empresas de distribución eléctrica, que por ley deben proveer del servicio eléctrico a viviendas y familias de su área de servicio.

El proyecto en la Amazonía ecuatoriana, Movilidad Eléctrica Solar Fluvial, se ha venido realizando con la empresa Eléctrica Quito (EEQ) y el apoyo de la Corporación Nacional de Electricidad (CNEK), con el objetivo de dotar con el servicio eléctrico a comunidades aisladas y descentralizadas mediante la instalación de sistemas solares individuales en las viviendas. Hay una población que consta de varias casas, zonas comunes, escuelas, donde se instalarán sistemas de generación híbrida (solar-térmica) y microrredes de distribución que permiten cargar las baterías.

- **Embarcaciones de batería:** actualmente, en el Putumayo se ejecutan estudios que comparan el rendimiento de dos tipos de canoas: una movida por un motor de gasolina y la otra con baterías. Se determinó que, dadas las características del río Putumayo, se necesita

un motor eléctrico de 4 kW para la propulsión. Este es equivalente a un motor de gasolina de 20 HP. Cuando se instaló, recorrió una distancia de 60 km en 3 horas y 40 minutos, a una velocidad promedio de 16,3 km/h, el cual es competitivo. Los datos técnicos son los siguientes: motor eléctrico 4 kW Torqueado Cruise 4.0 RS/RL y baterías power 26-104: 2.685 Wh con un peso de 25 kg. La recarga de las baterías se realizó con cargadores Torqueado de 120/220 V @60 Hz y una red eléctrica normal, cuyo tiempo máximo de recarga es de 11 horas, para ir del 0 % hasta el 100 % de capacidad de la batería.

- **Embarcaciones híbridas diésel eléctricas conectables:** para este tipo de embarcaciones, hay dos tipos de propulsión híbrida: en serie y paralelo. En la configuración propulsión híbrida serie se puede generar electricidad mediante todos los recursos posibles: paneles solares, molinos eólicos, grupos electrógenos o cualquier combinación de ellas. Un controlador de cargas almacena debidamente la electricidad generada en los bancos de baterías, las cuales son conectadas, a su vez, a los motores propulsores eléctricos accionados a través del controlador. Este sistema hace énfasis al motor eléctrico, debido a que los motores diésel no tienen un consumo de combustible óptimo hasta alcanzar el tramo de potencia máxima. A su vez, en la configuración propulsión híbrida paralelo, existe un motor diésel que actúa como impulsor principal. Este tiene acoplado al eje propulsor un motor eléctrico y el acople se puede dar en la caja de transmisión en el cojinete de empuje externo. Las maneras de alimentar el motor eléctrico son las mismas que las de la propulsión híbrida, pero, en este caso, se tiene respaldo de propulsión, ya que, si una de las dos tecnologías falla, la otra alternativa puede seguir propulsando la embarcación.
- **Embarcaciones de hidrógeno:** la integración del hidrógeno como forma de combustible para la propulsión y alimentación de servicios auxiliares ha estado bajo estudio. Balbona *et al.* (2014) presentaron una embarcación que puede ser propulsada por un motor diésel o por un motor eléctrico, a la cual se le incorporó una pila de combustible con tecnología de hidrógeno de baja temperatura PEM (membrana polimérica de intercambiador de protones). En conjunto, dos paneles fotovoltaicos y un alternador acoplado al motor diésel generan la energía eléctrica necesaria para la propulsión eléctrica y alimentación de los equipos auxiliares de la embarcación. Otro prototipo se presentó en 2003 en Suiza: un catamarán, Hydroxy 3000, desarrollado por el Instituto de Energía y Sistemas Eléctricos (IESE) de Suiza, el cual dispone de una pila de combustible PEM de 3 kW que funciona en paralelo con baterías. La pila está alimentada por hidrógeno procedente de una botella de 76 litros a 200 bar. Un compresor proporciona el aire del que la pila extrae el oxígeno. El sistema se refrigera con un circuito de agua desionizada que se enfría en un intercambiador de calor con agua de lago. Este catamarán pesa 1500 kg y tiene una capacidad para siete personas, su autonomía es de 12 horas y alcanza velocidades comprendidas entre 5 y 8 nudos.

Para terminar, el presente capítulo de fuentes alternativas de energía busca llamar la atención sobre la necesidad de elevar el nivel de conocimiento medio que la sociedad civil tiene sobre la energía. Esto, aunado a la necesidad que surge de implementar nuevas tecnologías de movilidad sostenible en el país, permite pensar en preguntas como: ¿qué aspectos implicaría la construcción de una embarcación que funcione en su totalidad a partir de energía solar?, ¿cuáles serían los aspectos fundamentales para implementar cambios a energías renovables (energía solar) en sistemas de transporte público masivo,

como el Metro de Medellín? o ¿cuál es el papel que jugará el hidrógeno en las próximas generaciones de la movilidad sostenible, no solo en Colombia sino en el mundo? Estas y otras preguntas están encaminadas en indagar y proyectar el nivel que pueda alcanzar la movilidad sostenible, a partir de fuentes variadas de energía, que promuevan e incentiven el cuidado del medio ambiente y la apropiación social del conocimiento.

4.8. Referencias

- Balbona, L. (2014). *Propulsión eléctrica marina con cero emisiones mediante el empleo de una pila de combustible de hidrógeno tipo PEM (membrana de intercambio de protones)*. [Tesis doctoral, Universidad de Oviedo]. Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo. <http://hdl.handle.net/10651/29126>
- Brook, B. y Bradshaw, C. (2015). Key role for nuclear energy in global biodiversity conservation. *Conservation Biology*, 29(3), 702-712. <https://doi.org/10.1111/cobi.12433>
- Cipek, M., Pavkovic', D., Kljaic', Z. y Mlinaric', T. (2019). Assessment of battery-hybrid diesel-electric locomotive fuel savings and emission reduction potentials based on a realistic mountainous rail route. *Energy (Oxford)*, 173, 1154-1171. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.02.144>
- Cueva, E., Lucero, J., Guzmán A., Rocha, J. y Espinoza, L. (2018). Revisión del estado del arte de baterías para aplicaciones automotrices. *Enfoque UTE*, 9(1), 166-176.
- Díez, A., Álzate, P., Restrepo, J., Castrillón, L., Manrique, E. y Figueroa, M. (2015). DC compensation systems and their implications on the planning of expansions in Metro systems: A case study of Medellín. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 195, 281-291. <https://doi.org/10.2495/ESUS150241>
- Energía abierta. (2021). *Balance Nacional de Energía Chile*. <http://energiaabierta.cl/visualizaciones/balance-de-energia/>
- Estévez, P., Varela, M. y Iturriza, E. (2012). *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles. https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/M4-ElecRail_Sistemas_acumulaci%C3%B3n.pdf
- Figueroa, M., Díez, A., Castrillón, L. y Manrique, E. (2017). Simulación, implementación y pruebas de un sistema de compensación en corriente directa basado en ultra capacitores, para sistemas ferroviarios. *Información tecnológica*, 28(1), 179-188. <https://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642017000100018>
- García, E. (2010). *Desarrollo de Baterías Plomo-ácido reguladas por válvula para nuevas aplicaciones de automoción*. [Tesis doctoral, Universidad Autónoma de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10486/5354>
- Islam, M., Huda, N., Abdullah, A. y Saidur, R. (2018). A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (CSP) technologies: Current status and research trends. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 91, 987-1018. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.097>
- Jaimurzina, A., Wilmsmeier, G. y Montiel, D. (2017). Eficiencia energética y movilidad eléctrica fluvial: soluciones sostenibles para la Amazonía. *Boletín FAL*, 353(1), 1-11. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/41137/S1700160_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kaunda, C., Kimambo, C. y Nielsen, T. (2012). Hydropower in the context of sustainable

- energy supply: a review of technologies and challenges. *International Scholarly Research Notices*, 2012, 1-15. <https://doi.org/10.5402/2012/730631>
- Killer, A., Armstorfer, A., Diez, A. y Biechl, H. (2012). Ultracapacitor assisted regenerative braking in metropolitan railway systems. *IEEE Colombian Intelligent Transportation Systems Symposium (CITSS)*, 1-6. <https://doi.org/10.1109/CITSS.2012.6336687>
- Lanz, A., Clapper, B., Anderson, B., Messer, C., Byrne, D., Bustillo, H., Dempsey, J., Heffel, J., Williams, J., Adams, K., Davis, P., Anderson, R. y Tomas, E. (2001). *Hydrogen fuel cell engines and related technologies*. College of the Desert. <https://www.energy.gov/sites/default/files/2014/03/f9/fcm00r0.pdf>
- López, B. (2020). *Mireo Plus B: el tren 100 % eléctrico a baterías de Siemens Mobility*. Movilidad Eléctrica. <https://movilidadelectrica.com/mireo-plus-b-siemens-mobility/>
- Markandya, A. y Wilkinson, P. (2007). Electricity generation and health. *Lancet London*, 370(9591), 979-990. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(07\)61253-7](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(07)61253-7)
- Méndez, L. y Molina, D. (2020). *Estudio preliminar de la energía mareomotriz en el municipio de Pizarro-Chocó*. [Tesis de pregrado, Universidad del Bosque]. Repositorio Universidad del Bosque. <http://hdl.handle.net/20.500.12495/8845>
- Ministerio de Energía y Minas (2021). Fuentes de energía no convencionales - FNCER. <https://www.minenergia.gov.co/es/misional/fuentes-no-convencionales-de-energ%C3%A1a-Da-renovable-fncer/>
- Peña, C. (2011). *Estudio de baterías para vehículos eléctricos*. [Tesis de licenciatura, Universidad Carlos III de Madrid]. <http://hdl.handle.net/10016/11805>
- Quintero, J. y Quintero, L. (2015b). Energía mareomotriz: potencial energético y medio ambiente. *Gestión y ambiente*, 18(2), 121-134. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/gestion/article/view/46511>
- Ronanki, D. y Williamson, S. Modular multilevel converters for transportation electrification: Challenges and opportunities. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 4(2), 399-407, 2018. <https://doi.org/10.1109/TTE.2018.2792330>
- Stanley A (2021). Cero emisiones netas para 2050, descarbonización en el sector de la energía en tres décadas. Agencia Internacional de Energía (AIE).
- Spiryagin, M., Wu, Q., Wolfs, P., Sun, Y. y Cole, C. (2018). Comparison of locomotive energy storage systems for heavy-haul operation. *International Journal of Rail Transportation*, 6(1),1-15. <https://doi.org/10.1080/23248378.2017.1325719>
- Torqueedo. (s. f.). Cruise motors - Outboards with 6 to 25 HP. <https://www.torqueedo.com/en/products/outboards/cruise>.
- UPME. (2021). *Comportamiento 2021: Economía y Energía. Perspectivas a corto y mediano plazo*. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia#:~:text=En%202021%2C%20el%20consumo%20fue,19%2C88%25%20de%202020>.
- XM (2021). *Reporte integral de sostenibilidad, operación y mercado 2020*. <https://informeannual.xm.com.co/2020/informe/pages/xm/24-generacion-del-sin.html>
- Zamora, G. (2015). *Efecto de la topología del tren de potencia en la vida de las baterías*. [Tesis de maestría, Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica]. Repositorio IPICYT. <http://hdl.handle.net/11627/2852>

Modelamiento y dimensionamiento energético de vehículos eléctricos

Mauricio Fernández Montoya¹, Juan-David Mira¹,
Valentin Raymund Ernst², Juan Pablo González
Alzate³, Felipe Mendoza Giraldo¹,
Alejandro Uribe Valencia¹

Resumen: para que un vehículo se desplace, independientemente de su fuente principal de energía, se efectúan transformaciones sucesivas de energía, lo cual converge, al final, en un torque aplicado a las ruedas o al dispositivo encargado de llevar propulsión. Este torque debe oponerse a las fuerzas y movimientos del entorno que mantienen detenido el vehículo. Aunque parece complejo, si se aborda el problema de modelamiento físico, a partir de un modelo matemático sencillo, es posible solucionar el problema de dimensionamiento energético. Primero, hay que conocer las condiciones de movimiento del vehículo a través de un análisis cinemático; pero, este no indica qué fuerzas internas y externas lo están ocasionando (realizando un trabajo y consumiendo energía). Por ello, es preciso efectuar un análisis dinámico que muestre las interacciones directas entre las fuerzas y los movimientos, descritas por Newton como las tres leyes del movimiento en su libro de 1687, *Principios matemáticos de la filosofía natural*. También, es posible determinar las condiciones de energía neta del vehículo, ya que se asume que existen constantes transformaciones de energía (química en mecánica lineal, mecánica lineal a rotacional, eléctrica a mecánica, etc.) y que buena parte de esta se conserva y otra se disipa en forma de pérdida de calor

- 1 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: mferna21@eafit.edu.co; fmendozag@eafit.edu.co; auribev1@eafit.edu.co
- 2 Technische Universität, Wien. Correo electrónico: valentin.ernst@aon.at
- 3 Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL), Universidad Nacional de Colombia, carrera 65 n.º 59 A-110, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jpgonzaleza@unal.edu.co

y ruido. Este capítulo presenta estrategias para abordar el problema de análisis energético en vehículos de diferentes tipos, a partir del examen dinámico de cuerpo rígido, conservación de la energía mecánica y evaluación del consumo energético, partiendo de métodos computacionales y modelos analíticos simplificados.

Palabras clave: modelo matemático; neto energético; potencia; velocidad; ruta.

5.1. Dinámica de cuerpo rígido en una motocicleta

Partiendo de la reducción dinámica de Newton (1987), es posible analizar todo vehículo terrestre (de dos, tres o cuatro ruedas) aplicando las mismas restricciones dinámicas. Así, y buscando simplificar el proceso, se muestra el análisis dinámico, de partícula, para el caso de una motocicleta, considerando que es un cuerpo infinitamente rígido, unidimensional e infinitesimal. Sus principales interacciones están dadas por el comportamiento aerodinámico, la interacción de las ruedas con el suelo, la pendiente del terreno sobre el que se desplaza, así como la fuerza necesaria para que se pueda mover (ver figura 5.1). Bajo este supuesto, como describe la ecuación 5.1, se puede hallar la potencia (W) requerida para que la partícula se comporte como una motocicleta.

$$P_{out} = \frac{\vec{V}}{n} \left[m \cdot a + m \cdot g \cdot \text{sen}(\text{atan}(G)) + m \cdot g \cdot \text{cos}(\text{atan}(G)) \cdot Crr + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot Cd \cdot A \cdot (Vf - Vi)^2 \right] \quad (5.1)$$

Donde V es la velocidad (m/s), n , la eficiencia del motor (%), m , la masa de la motocicleta (kg), a , la aceleración de la motocicleta (m/s^2), g , la aceleración por gravedad (m/s^2), G , la pendiente en porcentaje (%), Crr , el coeficiente de resistencia a la rodadura, ρ es la densidad del aire (kg/m^3), Cd , el coeficiente de arrastre de aire, A , el área frontal (m^2), Vf , la velocidad final (m/s) y Vi es la velocidad inicial (m/s).

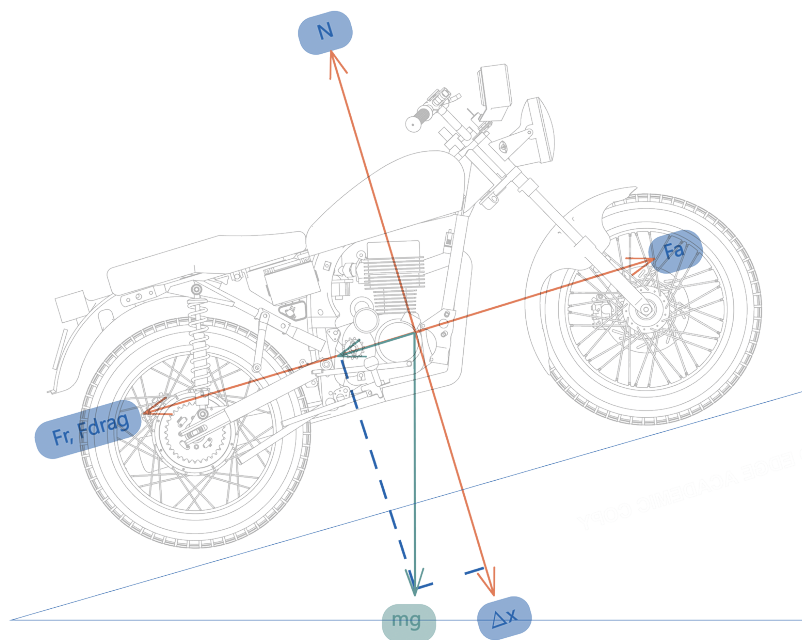


Figura 5.1. Diagrama de cuerpo libre de las interacciones de una motocicleta con su entorno

Fuente: elaboración propia.

Ahora bien, los factores que determinan el consumo de potencia, y que pueden utilizarse como variables de entrada, son la velocidad de la motocicleta y la pendiente del terreno. Los valores que dependen de propiedades intrínsecas de la motocicleta (como el coeficiente de rodadura de las ruedas, la masa, el coeficiente de arrastre y área frontal de la moto) pueden declararse parámetros que cambian entre modelos de motocicleta. En ese sentido, el modelo dinámico de partícula permite obtener valores aproximados de potencia y consumo de energía, de forma analítica y con información relativamente fácil de obtener.

5.1.1. Definición de los parámetros del modelo

Con el propósito de validar el procedimiento de cálculo energético presentado, se llevaron a cabo recorridos de prueba en la ciudad de Medellín en una motocicleta AKT RTX150 (ver figura 5.2). Pese a que la cilindrada es superior a la Boxer, esta hace parte del segmento *sport* y tiene características similares a las encontradas en el análisis de mercado. Para las pruebas se obtuvieron diez mediciones válidas y se realizó con el conductor, sin carga y sin pasajero. Los parámetros de la motocicleta, incluidos como entradas al modelo energético, se pueden observar en la tabla 5.1.

Tabla 5.1. Parámetros de la motocicleta AKT RTX150, aplicados al modelo de consumo energético en las rutas

Parámetro	Valor	Unidad
Peso	229,19	kg
Crr	0,03	
Cd	0,7	
A	0,6	m ²
p	1,2	kg/m ³
g	9,8	m/s ²
Radio trasero	0,2667	m
Radio delantero	0,2635	m
Capacidad combustible	16,276	Litros
Potencia teórica	9,321	kW
Capacidad de carga	150	Kg
Multiplicación primaria	3,35	
Transmisión primaria 1°	3,0769	
Transmisión primaria 2°	1,7895	
Transmisión primaria 3°	1,3043	
Transmisión primaria 4°	1,0909	
Transmisión primaria 5°	0,9286	OVERDRIVE
Reducción secundaria	2,9333	

Fuente: elaboración propia.

5.1.2. Definición de variables del modelo

La captura de información de la ruta se realiza a través de aplicaciones de rastreo móvil, como *GPSTracker*, la cual permite trazar rutas a partir de la ubicación del celular del usuario y exportarlas para un análisis posterior. Los periodos de muestreo de las mediciones dependen mucho de las aplicaciones, pero valores entre 0.2 Hz y 1 Hz son adecuados, que pueden variar según las características del celular, calidad de la red y la velocidad del mismo vehículo. A mayor velocidad, mayor debe ser el periodo de muestreo de la ruta. Desde las aplicaciones, se obtiene normalmente la siguiente información: latitud y longitud, altitud *heading* (posición del vehículo en relación con el norte geográfico, y, asimismo, la velocidad. En el caso de estudio teórico que se presenta de las pruebas en Medellín, las rutas con datos limpios corresponden a los siguientes trayectos: Caribe-La Macarena, estación metro Poblado-estación metro estrella, San Dieg-CAI Chacaltaya, La Macarena-centro comercial Punto de la Oriental, estación metro Madera-puente de la Madre Laura, estación metro Madera-San Diego, centro comercial Punto de la Oriental-estación Metro Industriales y, por último, Tablaza.

A partir de los *datasets*, se hace un procesamiento de las tramas, adicionando información de interés, como intervalos de tiempo y de distancia recorrida o aceleración entre mediciones. Además, a través de aplicaciones especializadas como *GPSvisualizer* (Schneider, 2019), se realiza la corrección de los datos incompletos de altitud utilizando información del DEM (*digital elevation model*). Para Sudamérica, los datos DEM disponibles provienen del *NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 3* o SRTM3, que entrega información dentro de los tres arco-segundo de resolución horizontal de la superficie terrestre (o alrededor de 90 m a la redonda de un punto determinado) (Kobrick y Crippen, 2020).

Para cada ruta, y partiendo del modelo analítico de la ecuación 1.1, se calcula la potencia consumida por la motocicleta. En el ejemplo se empleó el *software* de cálculo Matlab®. Para las variables de entrada: velocidad e inclinación del terreno o pendiente, la variable de salida: potencia; se obtienen diagramas de cajas y bigotes (como recurso estadístico), con los que se pueden encontrar y remover *outliers* (valores atípicos) que generen ruido en el análisis. Una forma común para hacerlo es utilizando el método de las medianas (elementos definidos tres veces por encima de la desviación absoluta de la mediana - MAD). Finalmente, el cálculo de energía consumida se ejecuta a través del método de integración por la regla del trapecio, debido a que se tratan de mediciones en tiempo discreto, a intervalos regulares. El resultado de cada una de las rutas estudiadas se puede presentar como se muestra en la figura 5.2.

A partir de herramientas de visualización estadística (como los diagramas de cajas y bigotes) de las mediciones de pendiente y velocidad, determinó de forma gráfica qué tan homogéneas son las características de las rutas de entrada, de modo que se pueda generalizar el comportamiento de la motocicleta a cierto nivel de pendiente o velocidad promedio. Para las mediciones de la prueba de ruta en Medellín, que se observan en la figura 5.3, se encuentran valores medios de pendiente entre -0,4 % y 10 %, con valores de entre -15 % y 35 %. Con respecto a las velocidades del recorrido, se hallaron valores promedio en los recorridos de entre 9 m/s y 15 m/s (28 km/h y 45 km/h respectivamente), y con valores pico de hasta 21 m/s (75km/h).

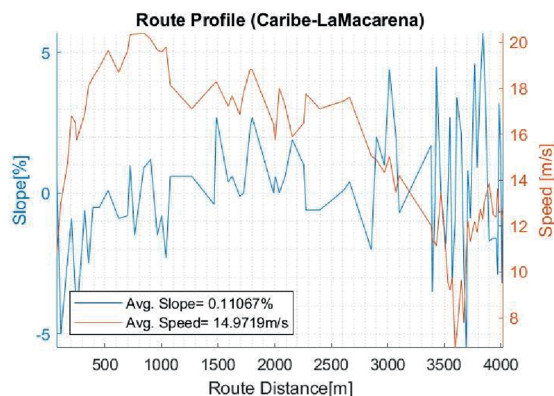
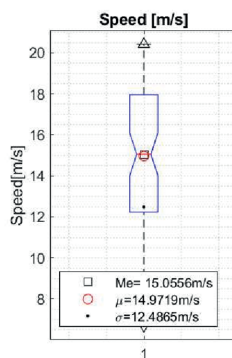
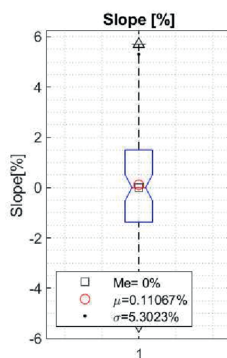
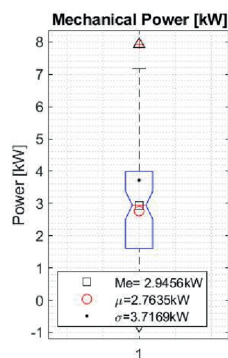
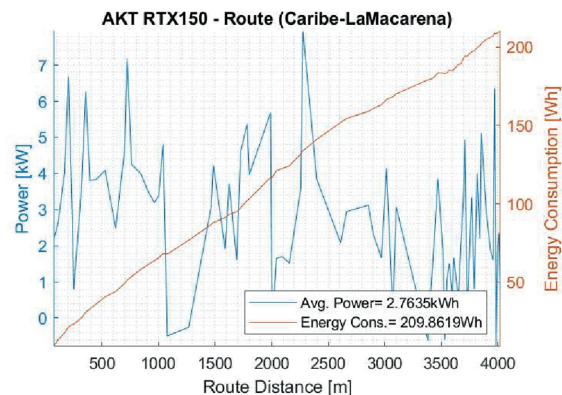
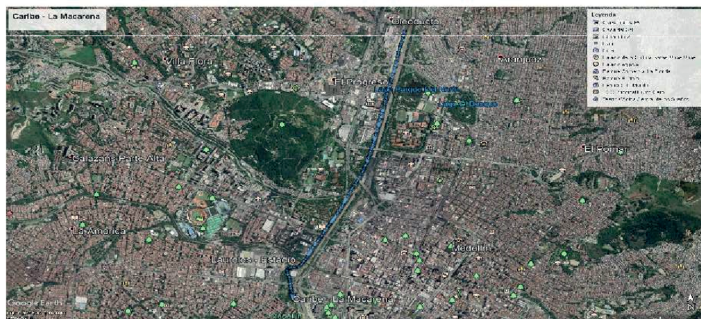


Figura 5.2. Prueba de ruta Caribe - La Macarena, AKT RTX150, en Medellín

Fuente: elaboración propia.

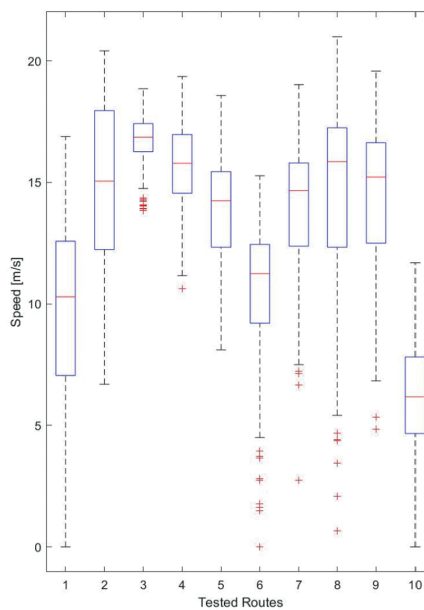
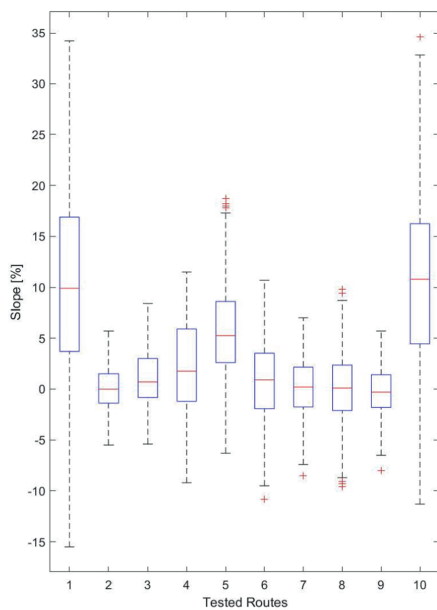
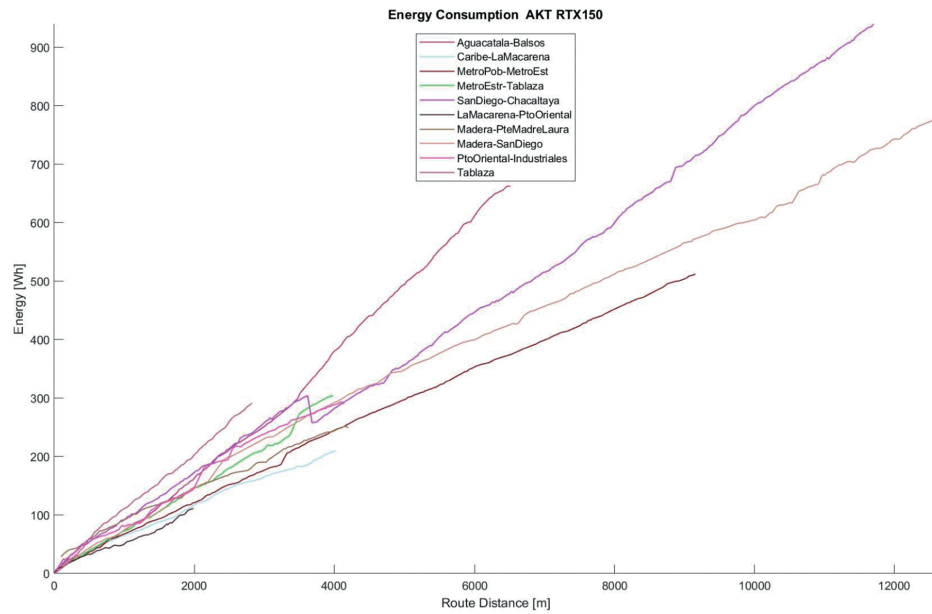


Figura 5.3. Diagrama de caja de bigotes para pendiente de ruta y velocidad, pruebas de ruta en Medellín

Fuente: elaboración propia.

Figura 5.4.
Tendencia de
consumo energético
en pruebas de ruta,
Medellín

Fuente: elaboración propia.



Con el fin de establecer si los recorridos no presentan entre sí diferencias significativas de pendiente o de velocidad, se determinó si las varianzas de las rutas son homogéneas, con lo que se comprobó los supuestos de normalidad de los datos. Gráficamente, y a través de un esquema cuantil-cuantil de las pendientes (izquierda) y velocidades (derecha), se encontró que, tanto los valores de pendiente como de velocidad, presentan colas que no se ajustan a una distribución normal. Esto, ya que las distribuciones de pendientes y velocidades no muestran una distribución normal, por lo que hay que acudir a métodos de análisis de homogeneidad de varianzas en poblaciones no normales, como la prueba de Bartlett. Para el *dataset* de pendientes de las rutas, existe un valor-P del estadístico de Bartlett de 0, lo cual reafirma que la distribución de pendientes no es normal. Por esta razón, se debe buscar otra prueba de homogeneidad de varianzas menos sensible a la normalidad, como la prueba de Levene.

Para el *dataset* se encontró que las varianzas en las velocidades de las pruebas de ruta no son iguales, con un valor $-P=0,0$. En el caso de las varianzas en las pendientes, también son distintas (valor $-P=0$ en el estadístico de Levene). De forma gráfica, en términos de pendientes, se evidencian dos grupos (ruta1 y ruta 10) (ruta 2 a ruta 8). Dichos grupos distintos se expresan igualmente en los valores de velocidad. En este caso, se realizará un análisis individual a las rutas para agruparlas e identificar sus características distintivas.

Con relación a las tendencias de consumo energético para las rutas, se identificó una tendencia de consumo de entre 80 Wh/km y 120 Wh/km, como se observa en la figura 5.4. Teniendo en cuenta que existen dos variaciones significativas en el consumo, debido a la variabilidad de las pendientes de la ruta, se requiere hacer una clasificación de dichas rutas, con el propósito de determinar el valor promedio más aproximado de consumo energético.

5.2. Conservación de la energía mecánica de un vehículo de cuatro ruedas

Como se mostró, un vehículo de cuatro ruedas puede analizarse como un cuerpo infinitamente rígido que es sometido a condiciones dinámicas. En este apartado, no obstante, se explora el análisis energético de un vehículo a partir de la ley de la conservación de la energía mecánica. Este método puede aplicarse a vehículos tan variados como automóviles, vehículos de carga e incluso de transporte de pasajeros. Considerando que para cada uno los parámetros de diseño los modelos cambian, dependiendo de la morfología, masa, etc., se presenta un ejemplo para un vehículo de transporte público con un análisis de consumo energético. En primer lugar, se presenta la ecuación de conservación de energía para un vehículo eléctrico genérico y, posteriormente, se muestra la respectiva simulación del consumo energético en un trayecto entre dos puntos de su ruta. El cálculo está basado en el trabajo de implementación de un modelo de cálculo de energía de un vehículo y su interacción con infraestructura de carga presentados por Kurczveil *et al.*, (2013).

5.2.1. Interacciones externas de energía en el vehículo

La energía de un vehículo eléctrico se describe en la ecuación 5.2, que tiene cuenta la energía cinética E_{kin} , la energía potencial E_{pot} , y la energía rotacional $E_{rot,int}$ del vehículo eléctrico en un instante de tiempo (k) discreto. Se define la ecuación en tiempo discreto, porque la naturaleza de obtención de los datos de ruta se realiza a partir de muestras o puntos que recolectan a través de un *software* especializado (aplicaciones de celular que cuenten con un GPS). La ecuación 5.3 permite calcular la energía del vehículo teniendo en cuenta su masa m , su velocidad v , su altura h , su momento de inercia J_{int} y la aceleración gravitatoria g . En este caso, los parámetros pueden variar en función del tipo de vehículo que se evalúe.

$$E_{veh}(k) = E_{kin}(k) + E_{pot}(k) + E_{rot,int}(k) \quad (5.2)$$

$$E_{veh}(k) = \frac{m}{2} \cdot v^2(k) + m \cdot g \cdot h(k) + \frac{J_{int}}{2} \cdot v^2(k) \quad (5.3)$$

El cambio de la ganancia neta de energía del vehículo (condición de energía total en cualquier tiempo) se puede describir como la energía neta en el instante de tiempo ($k+1$); a esto se resta la energía en el instante anterior (k) y el cambio de las pérdidas energéticas, como se muestra en la ecuación 5.4. Igualmente, se aprecia en la ecuación 5.5 que existen componentes físicos de energía que no son conservativos y que van disipando parte de la energía del vehículo en forma de ruido y calor. Estas fuerzas no conservativas son la fuerza de arrastre aerodinámico, la fuerza de rodadura de las ruedas, así como pérdidas inherentes a la operación del vehículo eléctrico (como es el accionamiento de sistemas vitales como la ECU y la electrónica de control potencia, asociada a la batería para realizar la regulación de potencia y encendido del mismo) (Kurczveil *et al.*, 2013).

$$\Delta E_{gain}(k) = E_{veh}(k+1) - E_{veh}(k) - \Delta E_{loss}(k) \quad (5.4)$$

$$\Delta E_{loss}(k) = \Delta E_{air}(k) + \Delta E_{roll}(k) + \Delta E_{curve}(k) + \Delta E_{const}(k) \quad (5.5)$$

Las ecuaciones 5.6, 5.7, 5.8 y 5.9 describen las pérdidas relacionadas a la resistencia del aire, a la resistencia a la rodadura, a la curva de resistencia y a la energía constante. Estas pérdidas dependen de varios elementos: la densidad del aire ρ_{air} , el área frontal del vehículo eléctrico A_{vch} , el coeficiente de resistencia aerodinámica c_w , la velocidad del vehículo v , el cambio de la distancia recorrida por el vehículo eléctrico s , el coeficiente de rodadura c_{roll} , la masa del vehículo m , la aceleración gravitatoria g , el coeficiente de resistencia de la curva c_{rad} , el radio de curva r y la potencia constante por el cambio en el tiempo $P_{const} \cdot \Delta t$ (Kurczveil *et al.*, 2013).

$$\Delta E_{air}(k) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot A_{vch} \cdot c_w \cdot v^2(k) \cdot |\Delta s(k)| \quad (5.6)$$

$$\Delta E_{roll}(k) = c_{roll} \cdot m \cdot g \cdot |\Delta s(k)| \quad (5.7)$$

$$\Delta E_{curve}(k) = c_{rad} \cdot \frac{m \cdot v^2(k)}{r(k)} \cdot |\Delta s(k)| \quad (5.8)$$

$$\Delta E_{const}(k) = P_{const} \cdot \Delta t \quad (5.9)$$

5.2.2. Interacciones internas de energía en el vehículo

En la ecuación 5.10, la dinámica de la energía en la batería en el siguiente instante de muestreo varía según el instante actual de la energía en la batería, sumado al cambio de la ganancia energética del vehículo en el instante actual por la eficiencia de recuperación η_{recup} ; esto representa el sistema regenerativo de energía en la batería. En la ecuación 5.11, la dinámica de la energía de la batería en el siguiente instante de muestreo también depende de los instantes actuales de la energía en la batería, sumado al cambio de la ganancia energética del vehículo en el instante actual por el inverso de la eficiencia de propulsión η_{prop}^{-1} , que representa la energía en la batería debido a la propulsión. Se tiene en cuenta que si $\Delta E_{gain}(k)$ es positivo, significa que se está recuperando energía, pero, si $\Delta E_{gain}(k)$ es negativo, se está consumiendo energía (Kurczveil *et al.*, 2013).

$$E_{Bat}(k+1) = E_{Bat}(k) + \Delta E_{gain}(k) \cdot \eta_{recup} \quad (5.10)$$

$$E_{Bat}(k+1) = E_{Bat}(k) + \Delta E_{gain}(k) \cdot \eta_{prop}^{-1} \quad (5.11)$$

Por último, el modelo de carga del vehículo eléctrico en el siguiente instante de muestreo se define en las ecuaciones 5.12 y 5.13, que dependerá de la energía de la batería en el instante actual sumado a la potencia de carga P_{chrg} , por la eficiencia de carga η_{chrg} , por un diferencial de tiempo Δt , en el que la energía de la batería tiene condición de no negatividad y no puede superar el máximo nivel de energía permitido (Kurczveil *et al.*, 2013).

$$E_{Bat}(k+1) = E_{Bat}(k) + P_{chrg} \cdot \eta_{chrg} \cdot \Delta t \quad (5.12)$$

$$0 \leq E_{Bat} \leq E_{Bat,max} \quad (5.13)$$

La tabla 5.2 describe los valores de los parámetros respecto a: el coeficiente de rodadura y el de resistencia de la curva, la masa de vehículo, el área frontal del vehículo, el coeficiente de resistencia aerodinámica, la densidad del aire, el momento de inercia y las eficiencias de propulsión y recuperación. Vale la pena resaltar que estos parámetros cambian según la modalidad del vehículo que se analiza (Kurczveil *et al.*, 2013). Bajo estos parámetros y un perfil de velocidad adquirido de SUMO^o (*software* de simulación urbana de vehículos basado en modelos microscópicos y macroscópicos, que se analiza en la tercera parte del capítulo 3), se ejecuta la simulación del modelo de consumo energético del vehículo eléctrico.

Tabla 5.2. Parámetros del vehículo

Parámetros	Valor	Unidades
croll	0,01	-
crad	0,5	-
m	10000	kg
Avch	5	m
cw	0,5	-
ρair	1,29	kg/m ³
Jint	0,01	Kg*m ²
ηprop	0,9	-
ηrecup	0,9	-

Fuente: elaboración propia.

5.3. Modelos de consumo de energía en sistemas de transporte fluvial

Este apartado determina el alcance del modelo energético y las influencias físicas en el barco, el cual pretende ser una base para representar la realidad lo mejor posible. Los objetivos del modelo son la predicción de la resistencia hidrodinámica total del barco, la potencia de propulsión requerida, la generación de energía solar en el techo de la embarcación, así como el cálculo de la capacidad energética de las baterías para una velocidad predeterminada y una ruta específica. La información de cómo se pueden obtener estos modelos hidrodinámicos se encuentra de forma consolidada en el libro *Ship Resistance and Propulsion* de Molland *et al.* (2011), el cual presenta información sobre los métodos de diseño naval y cálculo de resistencia de la embarcación. Además, muestra en detalle algunas de las ecuaciones que se presentan en este acápite.

Dado que algunas especificaciones aún deben ser definidas y se necesita más información, por ejemplo, las dimensiones del barco, el modelo se mantiene lo más general posible. Su objetivo principal es el cálculo de producción de energía solar y el cálculo de la ruta, por lo que se ha dividido en una parte estática, que calcula la resistencia del barco en aguas tranquilas y la potencia necesaria del motor (consumo de energía) a diferentes niveles de velocidad; y una parte dinámica en Matlab^o, en la que se realizan los cálculos fotovoltaicos con ayuda de la herramienta *PVLIB* del National Technology and Engineering Solutions of Sandia (PV Performance Modeling Collaborative, 2018) y de la ruta. Esto, pues existen métodos que ofrecen resultados diferentes para la predicción de la resistencia en aguas tranquilas y la potencia de propulsión, que se han implementado en varios programas informáticos industriales y no conducen al resultado deseado:

programar estos métodos en Matlab[®]. En su lugar, la potencia dependiente de la velocidad, que puede calcularse con métodos en Maxsurf[®], se integró como entrada en el modelo de Matlab[®]. Para comparar muchos métodos, algunos de ellos se han ejecutado en sus propias funciones de Matlab[®]. o en Excel[®]. Teniendo en cuenta que el modelo no puede representar completamente la realidad, las incertidumbres se identifican cualitativa y cuantitativamente para estimar su influencia en el modelo energético. Para verificar los resultados del modelo y estimar la precisión de la simulación, deben compararse con los datos de los proyectos de buques existentes.

5.3.1. Modelo energético de una embarcación electrosolar

Como se observa en la figura 5.5, las variables que afectan el consumo energético de la embarcación se pueden dividir en externas e internas (cuya convergencia se da en el límite de la embarcación; los puntos de interacción del barco con el entorno). Dentro de las variables internas se consideran: la potencia de propulsión, la generación de energía eléctrica con los paneles solares y el almacenamiento de energía (en este caso, baterías). Las externas (también ambientales) son la resistencia del agua, la corriente del río y la radiación solar. La resistencia del aire no se tendrá en cuenta en el presente análisis, puesto que la velocidad del barco es muy baja y, comparada con el efecto de arrastre del casco en el agua, es insignificante.

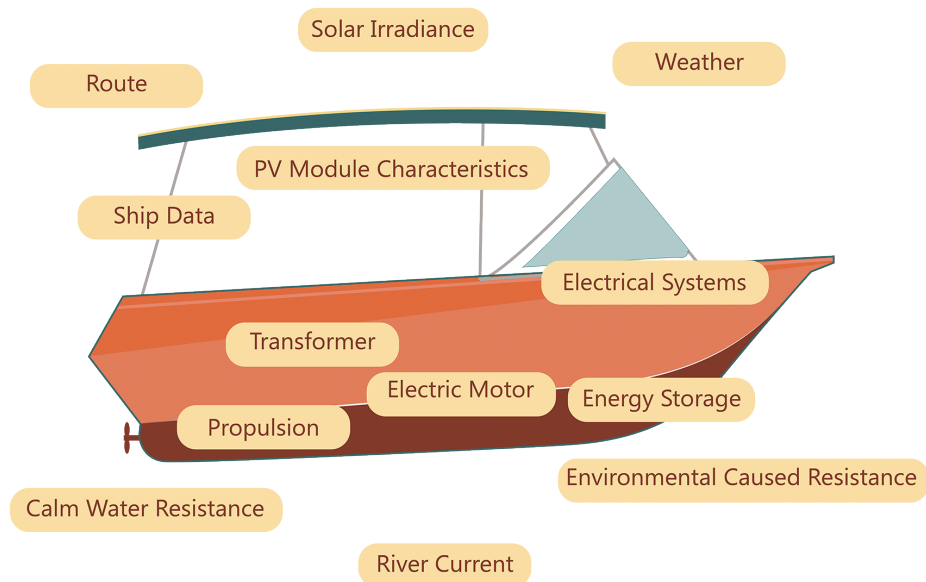


Figura 5.5. Variables relevantes en el análisis energético de una embarcación electrosolar

Fuente: elaboración propia.

5.3.2. Análisis energético en cuatro etapas

Partiendo de un diseño nuevo de embarcación, en el que solo se conocen las dimensiones, el peso (capacidad de carga útil) y algunos otros factores, es posible dividir el problema de diseño energético en cuatro fases.

- **Fase 1. Preliminares:** en este punto solo se dispone de las principales dimensiones del barco, las condiciones básicas del río, la ruta, la carga transportada y algunos datos de la radiación solar. La resistencia del barco y la potencia del motor se calculan con métodos teóricos (como se muestra más adelante).
- **Fase 2. Diseño del casco terminado:** este se utiliza para calcular la resistencia total y la potencia del motor, utilizando métodos numéricos (y computacionales, como el análisis de elementos finitos para fluidos).
- **Fase 3. Pruebas del modelo del casco:** se prueba un modelo del casco en condiciones de aguas tranquilas, para determinar la resistencia y la potencia de propulsión, y los resultados se incluyen en el modelo energético.
- **Fase 4. Diseño del bote terminado:** se completa el diseño y se amplía el modelo energético con los datos existentes, como la información de generación fotovoltaica.

Con el objetivo de simplificar el análisis energético de la embarcación, el cálculo de la resistencia hidrodinámica y la potencia motriz requerida se hace utilizando métodos numéricos, cuyos resultados pueden presentarse como una función de fuerza de arrastre (polinomio), dependiente de la velocidad del barco. El modelo se puede abordar en dos partes: un análisis estático (modelo para calcular la potencia de propulsión necesaria, partiendo de condiciones de navegabilidad fijas); y una parte dinámica, para simular el consumo de energía a lo largo de una ruta específica y la generación de energía fotovoltaica. Estas condiciones de consumo energético en ruta se explorarán con más detalle en el capítulo 3.

Luego, los resultados del modelo pueden usarse de forma iterativa para mejorar el diseño del barco y compararse con proyectos ya existentes, de modo que el diseño energético de embarcaciones puede considerarse, incluso, un problema estadístico. La figura 5.6 expone los componentes de análisis estáticos y dinámicos. La parte estática predice la resistencia del barco en aguas tranquilas y la potencia total del motor eléctrico a diferentes niveles de velocidad y, por tanto, calcula los datos de entrada para la simulación. Los resultados de la simulación pueden servir para mejorar el diseño. La parte estática se calcula mediante diferentes métodos en Maxsurf y otros métodos programados y la dinámica se programa en Matlab®.

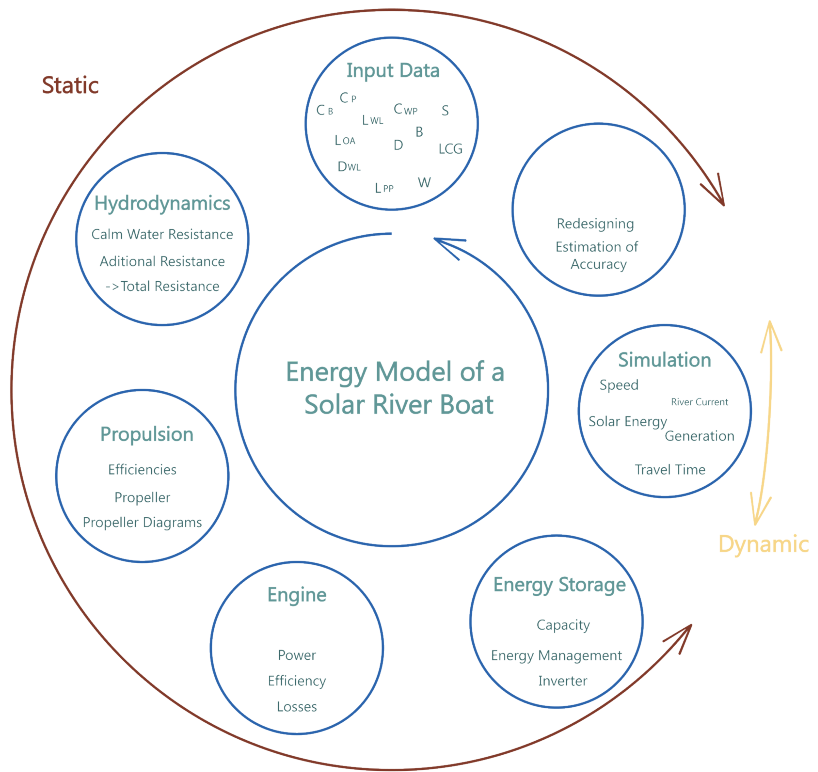


Figura 5.6.
Fases de análisis
dinámicos y estáticos
de una embarcación
electro-solar

Fuente: elaboración propia.

5.3.2.1. Fase 1 y Fase 2. Flujo de propulsión en embarcaciones eléctricas
Para describir el consumo energético de la embarcación eléctrica se tiene en cuenta la distribución del flujo de propulsión del sistema, compuesto por el convertidor de potencia, el motor eléctrico, la transmisión y la hélice, con sus respectivas eficiencias y pérdidas (ver figura 5.7). Esta distribución permite especificar la potencia eléctrica y el consumo energético de la embarcación. Inicialmente, se plantea la potencia mecánica efectiva del bote (como se muestra en la ecuación 5.14), la cual depende de la curva de resistencia hidrodinámica en función de la velocidad del bote, obtenidas en la fase 1 de análisis, a partir de información general de la forma de la embarcación. En la ecuación 5.15, los coeficientes del polinomio son el resultado del análisis hidrodinámico del casco, que integra las componentes de flujos energéticos de los componentes de potencia. Este polinomio representa un modelo numérico de caja negra.

$$P_m(k) = F_a(k) \cdot v(k) \quad (5.14)$$

$$F_a(k) = Av(k)^3 - Bv(k)^2 + Cv(k) + D \quad (5.15)$$

Como se muestra en la ecuación 5.16, reemplazando la ecuación 5.15 de resistencia hidrodinámica en la ecuación 5.14 de potencia mecánica efectiva, se obtiene la potencia efectiva en función de la velocidad del bote. Esta representa la cantidad de energía consumida al superar las fuerzas mecánicas externas de la embarcación eléctrica.

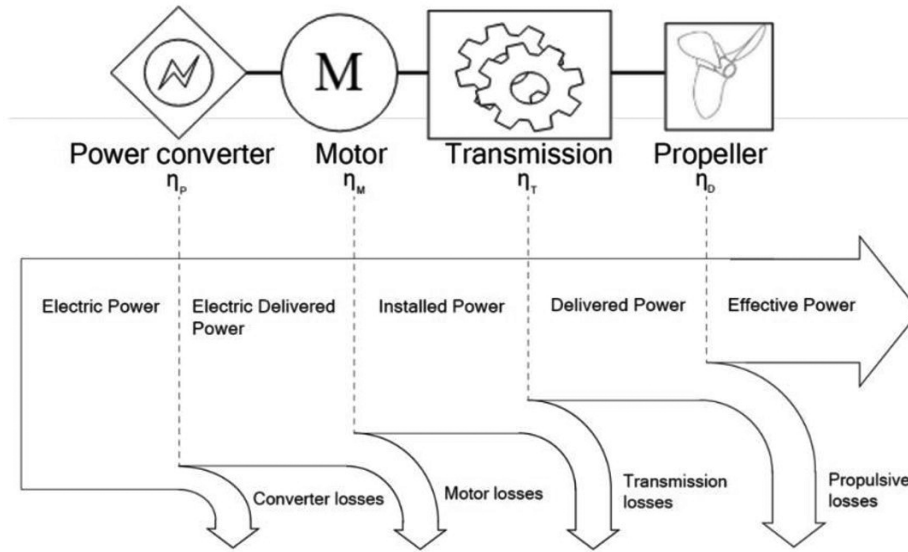


Figura 5.7. Flujo de propulsión para el análisis energético de la embarcación

Fuente: elaboración propia.

$$P_m(k) = v(k) \cdot (Av(k)^3 - Bv(k)^2 + Cv(k) + D) \quad (5.16)$$

De igual modo, se describe la potencia eléctrica como la cantidad de energía por unidad de tiempo a la cual opera la embarcación; como el inverso de las eficiencias del convertidor de potencia del motor eléctrico, de la transmisión y multiplicado por la razón entre la potencia mecánica efectiva y eficiencia de la hélice de la embarcación, como se observa en la ecuación 5.17.

$$P_e(k) = \frac{P_m(k)}{\eta_D} \cdot \frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{1}{\eta_T} \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad (5.17)$$

Al reemplazar la ecuación 5.16 en la ecuación 5.17, y realizando operaciones algebraicas necesarias, el resultado es la potencia eléctrica en función de la velocidad del bote y las eficiencias del sistema descrita en la ecuación 5.18.

$$P_e(k) = \frac{Av(k)^4 - Bv(k)^3 + Cv(k)^2 + Dv(k)}{\eta_D \cdot \eta_m \cdot \eta_T \cdot \eta_p} \quad (5.18)$$

Así, se representa el consumo energético de la embarcación eléctrica como la razón del producto de la potencia eléctrica por la distancia recorrida $P_e(k) \cdot d(k)$; entre la suma de la velocidad de la embarcación y el producto de la velocidad y el flujo del río, como se muestra en la ecuación 5.19.

$$E(k) = \frac{P_e(k) \cdot d(k)}{v(k)} \quad (5.19)$$

Reemplazando 5.18 en 5.19 se obtiene la dinámica del consumo energético de la embarcación eléctrica en función de las velocidades de la embarcación, de la distancia recorrida y de las eficiencias del sistema de flujo de propulsión, como se evidencia en la ecuación 5.20.

$$E(k) = \frac{[Av(k)^4 - Bv(k)^3 + Cv(k)^2 + Dv(k)] \cdot d(k)}{\eta_D \cdot \eta_m \cdot \eta_T \cdot \eta_p \cdot [v(k)]} \quad (5.20)$$

A continuación, en la tabla 5.3 se describen los parámetros respecto a las eficiencias del convertidor, del motor, de la transmisión y de la hélice. Bajo estos parámetros y un perfil de velocidad adquirido de SUMO, se ejecuta la simulación del modelo de consumo energético de la embarcación eléctrica.

Tabla 5.3 Parámetros de diseño de la embarcación

Parámetros	Valor
η_D	0,75
η_m	0,95
η_T	0,931
η_p	0,98
η_{recup}	0,9

Fuente: elaboración propia.

5.3.2.2. Fase 3. Cálculos de ruta

Las rutas se incluyen como una secuencia de coordenadas geográficas en el modelo. Entre estas, la posición actual se interpola por la velocidad y la dirección de la embarcación. Por lo tanto, es necesario conocer la distancia entre los puntos GPS seleccionados y la dirección. Los datos de ruta se requieren para que el modelo calcule el ángulo de acimut de la matriz. Adicionalmente, en el futuro será más fácil incluir la velocidad del flujo del río en el modelo. El cálculo de la distancia entre dos coordenadas en el modelo de energía se realiza con la fórmula de Haversine (5.21) (Robusto, 1957). Esta determina la distancia del gran círculo entre dos puntos en una esfera, dadas sus longitudes y latitudes: ϕ_1 es la latitud del punto 1, ϕ_2 la latitud del punto 2, λ_1 es la longitud del punto 1 y λ_2 la longitud del punto 2. La distancia d viene dada por

$$d = 2 \cdot r \cdot \arcsin \cdot \left(\sqrt{\sin^2 \cdot \left(\frac{\phi_2 - \phi_1}{2} \right) + \cos(\phi_1) \cdot \cos(\phi_2) \cdot \sin^2 \cdot \left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2} \right)} \right) \quad (5.21)$$

con un radio de la tierra de $r = 6371000$ m.

El ángulo de rumbo α (dirección del barco), visto desde el punto inicial con respecto al punto final, se calcula mediante:

$$\alpha = \arccos \cdot \left(\frac{\cos(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) - \cos(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \sin(\varphi_1)}{\sqrt{1 - (\cos(\lambda_1 - \lambda_2) \cdot \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) + \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2))^2}} \right).$$

Es importante tener en cuenta que el ángulo del curso α es 0° en el norte verdadero, 90° en el este verdadero, 180° en el sur verdadero y 270° en el oeste verdadero. La explicación de la distancia d y el ángulo del curso α se puede ver en la figura 5.8. Del mismo modo, es necesario resaltar que el ángulo del curso α está en el modelo de energía del ángulo de acimut del módulo.



Figura 5.8. Explicación de la distancia d y el ángulo del curso α de la fórmula de Haversine

Fuente: Robusto (1957).

5.3.2.3. Fase 3. Cálculos de velocidad de flujo del río

Dependiendo de la dirección del flujo del río, el bote tendrá una resistencia, mayor o menor, en el agua, pero, al no haber datos precisos disponibles, el cálculo es aproximado. La descarga promedio, máxima y mínima, del río Magdalena es de 7.2 m³/s. En el curso del río, la amplitud y la profundidad varían mucho, lo que genera dificultades para calcular una velocidad de flujo precisa. La amplitud podría medirse fácilmente en Google Earth[®], pero aun así faltaría determinar de forma más exacta la profundidad del río en ese punto. Para calcular la velocidad del flujo, se utilizó la fórmula de flujo empírico de Gauckler-Manning-Strickler (5.23) que permite calcular la velocidad en m/s y nudos (Venutelli, 2005). La fórmula, con las variables de la tabla 5.2, es:

$$V_{flow} = k_{st} \cdot R_h^{\frac{2}{3}} \cdot I_o^{\frac{1}{2}} \quad (5.23)$$

El radio hidráulico se calcula mediante:

$$R_h = A \cdot U$$

Donde A es el flujo a través de la sección transversal en m² y U , el perímetro mojado en m. Se observa que el radio hidráulico R_h en aguas muy anchas y poco profundas puede aproximarse por la profundidad del agua. En la tabla 5.3 se muestran valores de ejemplo del coeficiente de rugosidad, según Strickler de la rugosidad del canal para diferentes casos.

Para calcular I_o , la elevación de la ubicación inicial y final es necesaria como entrada de la función. La tasa de flujo del río se determinó como entrada al modelo de energía. Por ejemplo, para la ruta Magangué-Achí, la fórmula calcula una velocidad de flujo de $V_{flow} = 2,12$ nudos con los valores dados en la tabla 5.4, suponiendo un radio hidráulico de 8 m (profundidad promedio del Magdalena, el río tiene entre 6 y 8 m).

Sin embargo, dado que esta fórmula es aproximada y no tiene en cuenta los cambios de amplitud y profundidad del río, se recomienda ejecutar mediciones a futuro, para tener valores de velocidad de flujo más precisos. Esto mejoraría el modelo, ya que la potencia del motor depende, en gran medida, de la velocidad del barco a través del agua y, asimismo, la velocidad de este depende de la velocidad del flujo del río. El modelo de consumo energético de la embarcación eléctrica se simula en SUMO[®] (en el capítulo 3, se muestran en detalle los resultados de la simulación), donde previamente se diseñó el modelo de la red de tráfico y la red hídrica de Magangué. Para este desarrollo se tiene en cuenta un tiempo de simulación de 700 segundos y se programa la embarcación de modo tal que pueda realizar una trayectoria a lo largo de la red hídrica modelada.

La figura 5.9 describe la velocidad y el consumo energético de la embarcación eléctrica a lo largo de un trayecto por la red hídrica. Entre los 0 y 20 segundos, ingresó a la estación de carga para recoger a los pasajeros y transportarlos por el río. A partir de los 20 hasta los 180 segundos, la embarcación aún no ha dado inicio a su partida; por esta razón, en este intervalo de tiempo la velocidad es igual a 0 m/s. A los 180 segundos, la embarcación eléctrica emprende su trayecto por el río hasta el tiempo de simulación con una velocidad de 12.5 m/s. Asimismo, puesto que el consumo energético corresponde

a la velocidad aplicada a lo largo de la red hídrica, se considera que a partir de los 180 segundos, momento en que la embarcación empezó su recorrido, el consumo va aumentando con la misma tasa a medida que la velocidad permanece constante en 12.5 m/s.

Tabla 5.2. Variables de la fórmula Gauckler-Manning-Strickler

Variable	Descripción
V _{flow}	Velocidad de flujo promedio [m/s]
R _h	Radio hidráulico [m]
I _o	Gradiente de flujo (altura por longitud) [m/m]
k _{St}	Coefficiente de rugosidad según Strickler de la rugosidad del canal en [m ^{1/3} /s]

Fuente: Venutelli (2005).

Tabla 5.3. Valores para el coeficiente de rugosidad k_{St} para diferentes casos

Caso	k _{St} [m ^{1/3} /s]
Beton liso	100
Flujo de aguas poco profundas (río)	30-40
Lecho del río con vegetación del suelo	20-30
Torrente con material de desprendimiento	10-20

Fuente: Jirka y Lang (2009, p. 23).

Tabla 5.4. Valores para el cálculo de la velocidad de flujo entre Magangué y Achí

Descripción	Valor
Elevación de Magangué	14 m
Elevación de Achí	19 m
Distancia	107640 m
k _{St}	40 m ^{1/3} /s
R _h	8 m

Fuente: elaboración propia.

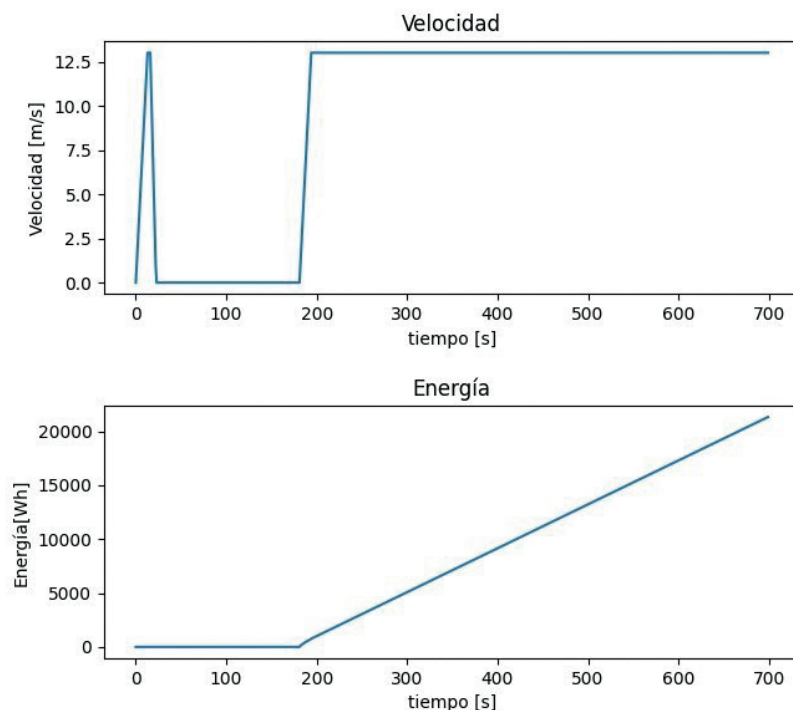


Figura 5.9. Energía de la embarcación eléctrica

Fuente: elaboración propia.

5.3.2.4. Fase 4. Producción de energía solar en el barco

En esta sección se explican los conceptos básicos físicos de la producción de energía solar tal como se calcula en el modelo. Tenga en cuenta que los cálculos fotovoltaicos siguen y utilizan las funciones de Matlab® del National Technology and Engineering Solutions of Sandia (PV Performance Modeling Collaborative, 2018) . La librería *PVLIB* de Sandia Laboratories ofrece funciones para calcular GHI, DHI y DNI, pero estas no consideran los cambios en la insolación causados por los cambios climáticos, por ejemplo, la cobertura de nubes. Por este motivo, se emplean los datos meteorológicos más precisos de TMY (año meteorológico típico) disponibles para la región de Magangué. El desarrollo teórico de cómo se calcula la posición del sol, así como del cálculo de irradiancia, se desarrolla en el capítulo 2, en la primera sección.

5.4. Referencias

- Jirka, G. y Lang, C. (2009). *Einführung in die Gerinnehydraulik*. Universitätsverlag Karlsruhe.
- Kobrick, M. y Crippen, R. (2020). *Srtmgl3 v003*. <https://lpdaac.usgs.gov/products/srtmgl3v003/>
- Kurczveil, T., López, P. y Schnieder, E. (2013). *Implementation of an energy model and a charging infrastructure in SUMO*. International Conference on Simulation of Urban Mobility. doi: 10.1007/978-3-662-45079-6_3
- Molland, A., Turnock, S., Hudson. A. (2011). *Ship Resistance and Propulsion. Practical estimation of ship propulsive power*. Cambridge University Press.
- Newton, I. (1987). *Principios matemáticos de la filosofía natural*. Alianza Editorial.
- PV Performance Modeling Collaborative. (2018). *PV_LIB Toolbox for Matlab Function Documentation and Help*. https://pvpmc.sandia.gov/PVLIB_Matlab_Help/
- Robusto, C. (1957). The cosine-haversine formula. *The American Mathematical Monthly*, 64(1), 38-40. <https://doi.org/10.2307/2309088>
- Schneider, A. (2019). *GPS visualizer: Do-it-yourself mapping*. <https://www.gpsvisualizer.com/>
- Venutelli, M. (2005). A constitutive explanation of manning's formula. Mecc

Parte II

Componentes de la movilidad sostenible multimodal

Soluciones de movilidad terrestre particular

Gilberto Osorio Gómez¹, Mauricio Fernández Montoya¹, Jhon Fernando Vargas Jaramillo¹, Felipe Gutiérrez Morales¹, Tatiana Manrique², Jorge Hernán Córdoba Morales³

Resumen: dentro del sector transporte, uno de los componentes de mayor uso e impacto sobre el ambiente y la movilidad es el de los vehículos particulares. Con un crecimiento progresivo en los últimos años, para 2021 es más del 90 % de la flota vehicular en Colombia; de ahí surge la necesidad de plantear alternativas de movilidad sostenible. El objetivo de este capítulo es presentar la integración de los conceptos básicos de movilidad sostenible en sus aplicaciones terrestres, con una breve introducción a los tipos de vehículos existentes y sus características, así como diferentes alternativas para la modificación y adaptación de estos tipos de vehículos con tecnologías más limpias, en cuestión de consumo y generación de gases contaminantes. Por último, se muestra el desarrollo e implementación de un equipo de hibridación para motocicletas bajo el marco de la Alianza Energética 2030; se explica el porqué de su relevancia y posibles aplicaciones, teniendo en cuenta las necesidades de los usuarios para un caso de estudio, seguido de la selección y consideraciones de diseño para las motocicletas a hibridar. Por último, se explica el desarrollo y evolución del prototipo del equipo de hibridación, en conjunto con pruebas y resultados. **Palabras clave:** hibridación; conversión; motocicleta; terrestre; movilidad; sostenible.

- 1 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, Carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejiag@eafit.edu.co
- 2 Mechatronics Engineering Program, Universidad EIA, km 2 + 200 Vía al Aeropuerto JMC, Envigado, Colombia. Correo electrónico: dolly.manrique@eia.edu.co
- 3 Mechanical Engineering Program, Universidad EIA, km 2 + 200 Vía al Aeropuerto JMC, Envigado, Colombia. Correo electrónico: jorge.cordoba94@eia.edu.co

6.1. Clasificación de los vehículos terrestres particulares

El desarrollo de la civilización humana fue posible gracias a la ayuda de diferentes herramientas, entre ellas los vehículos, utilizados para el transporte de personas, materiales y mercancías. La tecnología de estos ha evolucionado con el paso del tiempo y ha logrado que diferentes fuentes energéticas (vapor, carbón, combustibles derivados del petróleo y electricidad) sean utilizadas para satisfacer la necesidad de movilidad y lograr, con ello, mayor eficiencia en el uso de los recursos disponibles (Oviedo *et al.*, 2015). Desde la crisis del petróleo en 1973, se hizo especial énfasis en encontrar energías alternativas, con el fin de sustituir la materia prima que desde hace varias décadas “mueve” al mundo. En consecuencia, se evidenció un crecimiento en el uso de energías renovables en la movilidad, dando especial importancia a los vehículos como automóviles y motocicletas, ya que estos representan los medios de transporte más populares a nivel mundial.

6.1.1. Vehículos a combustión

Gracias a sus ventajas mecánicas, confiabilidad y autonomía los motores a combustión interna han sido ampliamente usados desde la Revolución industrial, posicionándose por encima de los de vapor y los eléctricos, por lo que se convirtieron en el motor predilecto para la mayoría de los vehículos hasta el día de hoy. Estos motores utilizan derivados del petróleo combinados con aire, para luego ser comprimidos, lo cual genera una combustión confinada que mueve los componentes internos del motor, transformando esta combustión en energía cinética. Sin embargo, estos no son capaces de aprovechar en su totalidad el resultado de la combustión y disipan gran cantidad de energía en forma de calor y, a su vez, generan emisiones resultantes de la combustión, que son nocivas para el medio ambiente y la salud humana. Este es uno de los principales motivos por los que las grandes ciudades poseen altos niveles de contaminación y cada vez se presentan más casos de enfermedades relacionadas con la calidad del aire. Como respuesta a esta problemática, las restricciones impuestas a los vehículos a combustión son cada vez más rigurosas y los fabricantes se ven obligados a cumplir con los estándares, mejorando constantemente sus motores.

6.1.2. Vehículos eléctricos

Mover un vehículo por medio de motores eléctricos, alimentados con energía almacenada en baterías recargables, no es un concepto nuevo. De hecho, las primeras apariciones con esta configuración se remontan a mediados del siglo XIX, aunque las bajas prestaciones (autonomía, velocidad y capacidad) alcanzadas por estos limitaron su desarrollo y los mantuvo aislados del mercado. En la actualidad, gracias a los avances tecnológicos de los motores eléctricos y las baterías, estos vehículos han hecho una reaparición que toma cada vez más fuerza (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía [IDAE], 2005). El sistema de tracción de un vehículo eléctrico consta de: un motor eléctrico, encargado de transformar la energía eléctrica en energía cinética; un controlador, que regula la potencia que se debe entregar al motor; y un sistema de

almacenamiento energético, compuesto por baterías químicas recargables en su caso más frecuente. Al prescindir de la combustión para obtener energía cinemática, estos vehículos se definen como cero emisiones y amigables con el medio ambiente, por lo menos durante su estado de operación.

6.1.3. Vehículos híbridos

Hibridación hace referencia a fusionar dos o más elementos para producir uno nuevo con características mixtas. Si bien el vehículo híbrido más conocido combina el motor de combustión interna y el eléctrico para su tracción (HEV, por sus siglas en inglés), esta no es la única configuración de hibridación posible; dentro de esta categoría se encuentran aquellos vehículos que armonizan dos fuentes de poder para su movilidad. Los HEV se desarrollan para mejorar la eficiencia de los vehículos a combustión, reduciendo así la cantidad de gases contaminantes que liberan al ambiente. Esto se consigue al incorporar un motor eléctrico al sistema de tracción de un vehículo de combustión, logrando que se complementen ambos motores a la hora de moverlo. Cada motor cuenta con curvas de eficiencia diferentes, por lo que se integran para aumentar la eficiencia del vehículo en un ciclo de conducción, similar a las relaciones simbióticas que encontramos en la naturaleza. Así, la propulsión del vehículo hace uso del motor a combustión y eléctrico simultáneamente, o bien cada uno en diferentes momentos, según las necesidades (IDEA, 2005). Aunque el costo de los HEV es más alto que el de uno convencional, el sistema de propulsión es más eficiente que uno eléctrico o a combustión únicamente. Además, poseen dos fuentes de energía diferentes: las baterías eléctricas y el combustible usado para el motor a combustión. Su mejora en eficiencia se ve reflejada en un menor consumo de combustible, bajos costos de operación y menos emisiones de gases contaminantes, como subproducto de su funcionamiento.

6.2. Alternativas de movilidad sostenible terrestre particular

6.2.1. Micromovilidad

Dentro de la movilidad, existe la micromovilidad, una opción de modalidad terrestre por medio de vehículos ligeros, con propulsión humana o eléctrica. Estos vehículos son, en su mayoría, de uso unipersonal, no alcanzan altas velocidades (30-45 km/h en promedio) y se enfocan al transporte urbano de alta densidad, para realizar desplazamientos de corta y mediana distancia (hasta 10 km, aproximadamente) con rutas predefinidas dentro del rango de autonomía del vehículo; adicionalmente, propician iniciativas por parte del sector público o privado para prestar el servicio de venta o alquiler de este tipo de vehículos con la infraestructura necesaria, como puntos de acopio ubicados en puntos estratégicos de la ciudad (p. ej. las estaciones de transporte colectivo), lo que facilita al usuario el uso de un sistema integral de transporte. Algunos vehículos que se acogen a esta categoría son:

- **Patineta/scooter eléctrica:** usada en una posición de pie, con un pequeño motor HUB, instalado en la llanta delantera o trasera, como fuente de propulsión. En su diseño cuenta

con una plataforma central que da soporte al conductor y la instalación de las baterías. Entre las opciones comerciales se encuentran marcas como Migo, Inokim, Ion, Segway.

- **Monociclo eléctrico:** vehículo unipersonal de autobalanceo que funciona con sensores como acelerómetro y giroscopios, el cual consta de una sola rueda. El conductor controla la velocidad a través de la inclinación delantera y trasera y la dirección por medio de la inclinación lateral. Entre los fabricantes más importantes se encuentran Inmotion, Begode, Kingsong.
- **Bicicletas eléctricas:** cuentan con un motor eléctrico, en la posición central (pedales) o en la llanta trasera con un motor HUB. Asisten la acción de pedaleo del usuario o incluyen un manillar de aceleración para el accionamiento del motor; en ambos casos es posible desplazarse en la bicicleta solo con la acción humana. En el mercado se encuentran ofertas de fabricantes como Auteco, Mobility, АКТ Electric y Treck. También, se dispone de kits para realizar la conversión de una bicicleta tradicional a su versión eléctrica como se muestra en la tabla 6.1.

Tabla 6.1. Opciones comerciales kits de electrificación para bicicletas

Producto	Origen	Motor	Baterías	Precio (usd)
Ebike CC Línea de kit de conversión Envo	Canadá	- Voltaje: 36 V - Potencia: 350-500 W - Corriente: 17 A - Max RPM: 80-130	Incluidas, para instalación en parrilla o asiento. Batería de Li-ion 36 V, 10,4-12,8 – 13-16 Ah	975-1500
Ebike CC Línea de kits de conversión de motor central	Canadá	- Voltaje: 36 V - Potencia: 500 W - Corriente: 17 A - Max RPM: 110-130	Incluidas, para instalación en parrilla o asiento. Batería de Li-ion 36 V, 10,4-12,8 – 13-16 Ah	1500
Voilamart Línea de kit de conversión en rueda	Australia	- Voltaje: 48 V - Potencia: 250 W - Corriente: 17 A - Max RPM: 80-100	No incluidas	180-210
GNG Electric Línea de kits de conversión de motor central	China	· Voltaje: 36-48 V Potencia: 250 – 350 – 450 Corriente: 17 A Max RPM: 80-100	No incluidas	170-500
Ebikeling Línea de kit de conversión en rueda.	Estados Unidos	- Voltaje: 24-36 – 48 V - Potencia: 500 – 750 – 1200 – 1500 W - Corriente: 17 A - Max RPM: 150-560	Incluidas, para instalación en parrilla o asiento. Batería de Li-ion 24 – 36 – 48 V, 12,8-16 – 21 Ah	700-1200
Bafang Línea de kits de conversión de motor central y rueda.	China	- Voltaje: 24 -36 - 48 V - Potencia: 250 – 250 – 500 W - Corriente: 18 A - Max RPM: 120-450	Incluidas, para instalación en parrilla o asiento. Batería de Li-ion 43 V, 9,5 – 14,3 Ah	500-1200

Fuente: elaboración propia.

6.2.2. Motocicletas

Motocicletas eléctricas: las preocupaciones acerca de los impactos ambientales de los vehículos automotores ha dado paso a un acelerado crecimiento del mercado de las motocicletas eléctricas. Estas prometen ser una potencial solución para el problema con cero emisiones, un bajo nivel de ruido, alta eficiencia energética y autonomía. En cuanto a la adopción de esta tecnología en el mercado, los consumidores, durante mucho tiempo, han preferido a las motocicletas de combustión por su mayor potencia, velocidad y autonomía. No obstante, el precio del combustible se incrementó y las motocicletas eléctricas se posicionaron mejor en el mercado, pues la electricidad para su funcionamiento es más económica. Igualmente, los consumidores se han motivado con los bajos impuestos, comparados con los de las motocicletas de gasolina (Jones *et al.*, 2013).

Los diseñadores de motocicletas eléctricas han encontrado mayores desafíos en comparación con el diseño de motocicletas convencionales. Por ejemplo, la densidad energética y potencia específica de las baterías es menor que la del combustible convencional, lo que disminuye la autonomía y la velocidad de desplazamiento del vehículo. Frente a esto, un gran porcentaje del peso y volumen de la motocicleta es destinado a las baterías. Por otro lado, el funcionamiento de las baterías y de los componentes eléctricos genera gran cantidad de calor; de ahí que los diseñadores tengan en cuenta un mecanismo eficiente de disipación de calor para proteger las celdas de la batería (Marazzi, 2013). En cuanto a la distribución de peso, debido a que la batería y el motor son robustos, la batería es ubicada frecuentemente cerca del reposapiés para alcanzar un centro de gravedad bajo. Asimismo, es fundamental asegurar una buena distribución del peso en cuanto a las direcciones laterales, para no generar desbalances que perjudiquen la maniobrabilidad (Nishiura *et al.*, 2009). A continuación, se muestran algunas de las motocicletas eléctricas en el mercado colombiano y sus principales características.

- **BMW C Evolution:** este *scooter* de la marca alemana cuenta con un diseño futurista y una autonomía de largo alcance de aproximadamente 169 km, con una potencia de 19 kW (26 CV) y alcanza una velocidad máxima de 129 km/h.
- **Energy Motion - Scooters:** esta marca ofrece tres motocicletas tipo *scooter*, que se adaptan a variadas necesidades. Estas contienen baterías de ion de litio con tiempos de carga entre 7 y 9 horas, y su autonomía oscila entre los 40 y 75 km. Son motocicletas pequeñas para uso en contextos urbanos que cuentan con motores HUB en la rueda trasera. La marca ofrece diseños innovadores y vanguardistas que le agregan valor a sus productos.
- **Energy Motion-Street:** la marca Energy Motion ofrece motocicletas eléctricas tipo *street*, las cuales tienen una batería de ion de litio con tiempos de carga entre 7 y 9 horas y una autonomía que oscila entre los 60 y 80 km. Son motocicletas urbanas, cómodas para recorrer la ciudad con diseños futuristas. Cuentan con potentes motores HUB en la rueda trasera que les permiten tener altas capacidades de carga.
- **Scooters Stärker:** las motocicletas tipo *scooter* de la marca Stärker son pequeñas y económicas, pensadas para realizar recorridos en la ciudad. Estas tienen diferentes tipos de baterías, la Avanti 2.0 y Skuty Led cuentan con baterías de Pb-plomo ácido de 2,3 KWh y 0,96 KWh de capacidad, respectivamente. La E3 contiene una batería de ion de litio con 1,4 KWh de capacidad.

- **Motocicletas Stärker:** esta marca ofrece gran variedad de motocicletas eléctricas para distintos terrenos y capacidades adquisitivas de los clientes. Estas cuentan con diseños innovadores y aerodinámicos que les dan valor a sus productos. Las baterías de la Super Soco y TC Max son de ion de litio, con capacidad de 1,8 kWh, mientras que la Trotter cuenta con una batería de Pb-plomo ácido con 2,1 kWh de capacidad.

De otra parte, además de las opciones disponibles en el mercado, existen formas de modificar la motocicleta por medio de kits para:

- **Electrificación:** este tipo de productos se caracterizan por reemplazar el motor de combustión interna por uno eléctrico como fuente de propulsión. El espacio disponible del EMS se usa para instalar las baterías, el controlador y el motor central, el cual se acopla a una transmisión cadena o banda con un *sprocket* de mayor tamaño al de la transmisión por combustión, para lograr un torque en la rueda, similar a la versión original de la motocicleta. De igual modo, se puede instalar un motor tipo HUB en la llanta trasera o delantera, así como baterías de mayor tamaño.
- **Hibridación:** en esta categoría se mantiene el EMS y se instala un motor eléctrico adicional como apoyo a la propulsión, de manera central (ensamblado en la sección del EMS) o como un motor HUB en la llanta delantera o trasera. Cuenta, además, con baterías de menor tamaño al ser instaladas en otras secciones de la motocicleta que no interfieran con el usuario. La tabla 6.2 identifica algunas de las opciones comerciales para la conversión en motocicletas. Cabe destacar que, en general, las opciones de electrificación son más populares, dado que el cambio de propulsión del vehículo representa un grado de dificultad menor en comparación a la hibridación, la cual implica más variables a tener en cuenta y modificaciones a la motocicleta.

Tabla 6.2. Opciones comerciales kit conversión para motocicletas

Producto	Tipo	Origen	Motor	Baterías	Precio
Thunderstruck Curtis/IPM System	Electrificación	Estados Unidos	- Voltaje: 72-96 V - Potencia: 13 kW - Corriente: 900 A - Max RPM: 8000	No incluidas	\$ 3420
Thunderstruck Budget Screamer	Electrificación	Estados Unidos	- Voltaje: 72 V - Potencia: 11,5 kW - Corriente: 200 A - Max RPM: 8000	No incluidas	\$ 1550
GOGOA1 – Kit 1	Electrificación	India	- Voltaje: 72 V - Potencia: 3 kW - Corriente: 65 A - Max RPM: 650	Incluidas Batería de litio 72 V 18 Ah (LiFe-PO4)	\$ 422
GOGOA1 – Kit 2	Electrificación	India	- Voltaje: 72 V - Potencia: 2 kW - Corriente: 65 A - Max RPM: 650	Incluidas Batería de litio 72 V 18 Ah (LiFe-PO4)	\$ 400

Producto	Tipo	Origen	Motor	Baterías	Precio
MIRO MAX <i>E-motorcycle</i>	Electrificación	Lituania	- Voltaje: 72 V - Potencia: 5 kW - Corriente: 88 A - Max RPM: 4500	No incluidas	\$720
Bijleebike Kit de conversion para <i>scooter</i>	Hibridación	India	- Voltaje: 42-60 V - Potencia: 1,5 kW - Corriente: 55 A - Max RPM: 600	No incluidas	\$250

Fuente: elaboración propia.

6.2.3. Automóviles

Automóviles eléctricos: en los vehículos particulares de cuatro ruedas, comúnmente, se han utilizado motores a combustión como fuente de generación de movimiento por sus características de relación a potencia y peso; también, por las cualidades como métodos de almacenamiento de energía, lo que representa una ventaja por parte de combustibles líquidos que cuentan con autonomía en poco espacio de almacenamiento. Sin embargo, estos motores presentan deficiencias de combustión por los regímenes de operación de velocidades, frente a la carga de manejo que pueden desempeñar distintos usuarios en el sector de movilidad particular, lo cual implica una alta generación de contaminación, producto de la combustión, que impacta al ambiente. Grandes desarrollos tecnológicos se han producido en pro de una movilidad sostenible, como el uso de energía eléctrica, que genera motores eléctricos de altas prestaciones para su uso en vehículos de cuatro ruedas; no obstante, falta también una infraestructura que permita realizar la carga de estos vehículos para el suministro de energía. A continuación, se presentan distintas opciones de automóviles eléctricos en el mercado colombiano.

- **Renault Twizy:** es un vehículo que, por su diseño compacto y de bajo peso, tiene buenas condiciones de autonomía para un segmento de personas que puede transportarse en el sector urbano. Cuenta con buenas prestaciones de entrega de torque de 57 Nm en relación con su peso, lo que representa una autonomía de 80 km con carga completa.
- **Renault Zoe:** exhibe un diseño amplio en su interior para capacidad de varios pasajeros en su interior y un gran motor de 245 Nm, que brinda autonomía de manejo de 380 km.
- **JAC E10X:** este modelo, importado por Auteco Mobility, tiene un diseño para el transporte eléctrico urbano, que tiene autonomía de manejo de 360 km a velocidades crucero de 70 km/hr; cuenta con motor eléctrico de 150 Nm y baterías de litio-fosfato de gran capacidad de almacenamiento eléctrico de 31,4 kW/hr.
- **Changan E-Star:** es un vehículo chino diseñado para el transporte particular de carga de pasajeros. Presta una autonomía de 300 km, la cual es dada por un motor eléctrico de 170 Nm.

Automóviles híbridos: son vehículos de cuatro llantas que representan una transición al transporte sostenible, sin perder las bondades que puede brindar un motor de combustión. Lo anterior, dadas las desventajas que conlleva tener un vehículo eléctrico para la infraestructura actualmente establecida de movilidad, así como por la falta de estaciones de carga y redes de potencia que garanticen la energía necesaria para los

tiempos de carga de los vehículos eléctricos. No obstante, son opciones comerciales para vehículos de alta gama; y la mayoría de cuatro llantas, estilo SUV, pueden ser opciones costosas. Entre ellas están los siguientes vehículos: Hyundai Kona, Toyota Rav4, Toyota Corolla, Toyota Yaris Cross y Ford Escape Híbrida.

Existen, también, dispositivos comerciales que permiten realizar conversiones híbridas a automóviles, diseñados con elementos que pueden sacrificar espacio en el vehículo, pero permiten realizar una transición energética que mitigue el impacto ambiental que se presenta en vehículos de una gama más baja. Entre estos se encuentran:

- **EPC-Corporation:** kit de conversión producido y comercializado por Enterprise Power Conversion Corporation de Estados Unidos. Es capaz de lograr condiciones de autopista, alcanzando 35 hp continuos y 150 hp en su pico. Tiene un costo USD 5545,00.
- **Thunderstruck Motors 14 kW:** esta compañía ofrece este kit que puede implementarse, tanto en motocicletas como en pequeños vehículos de cuatro ruedas como los go-karts. Su precio es de USD 1100 y contiene los siguientes elementos: Motenergy ME0909, motor de escobillas. Alltrax SR 48300, controlador (24-48 V 300 amps peak) y resistor precargado y diodo.
- **Thunderstruck Motors 16 kW:** esta empresa norteamericana también ofrece un kit de 16 kW con un motor de más potencia por un precio de USD 1520. Los componentes del kit son: Motenergy ME1718, motor Curtis 1232E o SE controlador Magura o PB-8 acelerador Tyco contactor sellado Wiring Harness.
- **High efficiency dual 8000 W 273 50H V3:** es un kit de conversión a vehículo eléctrico por medio de motores HUB en las llantas de 8000 W de potencia. Este cuenta con la posibilidad de brindar tracción a las dos llantas con torques pico de 350 Nm; también, hay opciones para tener tracción completa a las cuatro llantas, dependiendo de la configuración que se desee. Tiene un costo de USD 2314 y el proveedor es Taizhou Quanshun. Este kit viene con controladores APT96600, un pedal de acelerador, un velocímetro X8-E y un sistema de freno hidráulico.

6.2.4. Análisis

La exploración de los diferentes kits que actualmente hay en el mercado evidencia el alto número de ejemplares disponibles para la hibridación de bicicletas. Estos, a su vez, se dividen en tres subgrupos: motor en rueda delantera, motor central en pedaliar y motor en rueda trasera. El segmento de bicicletas posee una amplia gama de precios y calidades al momento de escoger un kit de hibridación; algunas son marcas reconocidas como Bosch y Yamaha, cuyos productos se posicionan en el tope de la gama. A nivel comercial, los kits de hibridación para automóviles no son tan populares, por lo que es difícil encontrar variedad en dichos productos. Pese a esto, es posible encontrar información sobre avances en este sector con desarrollos que aún no salen al mercado. Mientras esto sucede, prevalecen los vehículos híbridos desde fábrica y las conversiones a vehículos eléctricos a partir de automóviles de combustión interna.

En el segmento de las motocicletas, hay varias soluciones comerciales, entre ellas, motores HUB que pueden instalarse, tanto en la rueda frontal como en la trasera, o motores complementarios que impulsan el vehículo utilizando un sistema de transmisión de potencia de la motocicleta. Por otra parte, se observó cómo las soluciones presen-

tes en el mercado apuntan, en su mayoría, a ser kits de conversión eléctrica, es decir, que reemplazan el sistema de combustión interna por un motor eléctrico que supla su funcionamiento. La mayoría de kits consultados consisten en un motor eléctrico, un controlador y un acelerador, según el vehículo. Estos son los componentes base y los encontramos en kits universales, así como en aquellos más especializados; la diferencia radica en los complementos con los que están acompañados y qué tan específicas sean sus aplicaciones. Por este motivo, se encuentran kits que incluyen sistemas de freno, pantalla digital, soportes para la instalación, tornillería, entre otros accesorios. En cuanto a las baterías, los kits dejan abierta la posibilidad de escoger sus prestaciones y características, pues no incluyen baterías, pero dan la información necesaria para que el usuario determine la mejor opción para su proyecto.

6.3. Caso de estudio: kit de hibridación de motocicletas

En esta sección se presenta un caso de estudio como una solución de movilidad sostenible, en el que se tiene en cuenta el contexto de movilidad de una ciudad intermedia y los requerimientos de diseño, de gran importancia al alcance de objetivos de movilidad. A continuación, se expone el análisis contextual de la ciudad en la que se ubica el caso exclusivamente a movilidad particular, porque el desarrollo tecnológico se plantea para motocicletas de un segmento particular. Se evalúan, además, las opciones de implementación de movilidad eléctrica como las arquitecturas y tipos de elementos para la conversión híbrida de movilidad.

6.3.1. Análisis del contexto: sistema de transporte multimodal en el municipio de Magangué

Dentro del objetivo de la Alianza Energética 2030, en el desarrollo de soluciones de transporte multimodal ajustadas al entorno y las necesidades locales, se decidió ejecutar un caso de estudio en Magangué. Este municipio del departamento de Bolívar cuenta con una posición geográfica muy conveniente y estratégica: está ubicado a orillas del río Grande de la Magdalena, donde además confluyen los ríos San Jorge, Cauca y Cesar, lo que lo comunica con la mayoría de municipios al sur de Bolívar, Sucre, Córdoba, Magdalena y norte de Antioquia. Esto convierte a Magangué en un punto de gran relevancia para transacciones y relaciones comerciales para muchos municipios que transportan sus productos al resto del país a través del puerto fluvial de Magangué. Asimismo, está conectado por tierra con vías nacionales que lo comunican con ciudades principales de Colombia como Barranquilla, Cartagena, Medellín y Sincelejo.

Gracias a estas características, la base económica de Magangué es el comercio y el transporte fluvial su principal fuerte. No obstante, el municipio presenta problemas y deficiencias con los diferentes modos de transporte debido a factores políticos, económicos, sociales y estructurales, que dificultan las actividades de movilización de mercancía y de la mano de obra desde y hacia los barrios, municipios, corregimientos y ciudades. El transporte es fundamental para dinamizar la actividad comercial y social en cualquier ciudad, algún problema relacionado al sistema de transporte afecta la comercialización y genera pérdidas en el desarrollo social y económico para toda la comunidad. Este es

el caso de Magangué que, a su vez, impacta en Bolívar, pues es una ciudad de gran valor comercial y económico para el departamento.

A nivel terrestre, las deficiencias comienzan con el deterioro de las vías, especialmente las redes que se encuentra a cargo del departamento y los municipios, es decir, las vías que conectan a Magangué con los corregimientos aledaños y la zona urbana, así como las que comunican los barrios de la ciudad. Los mantenimientos de estas vías son casi nulos y algunas no están pavimentadas, lo que las hace intransitables en épocas de invierno y poco aptas en verano. Esto afecta el transporte de carga y de las personas hacia el centro de la ciudad y el puerto fluvial. De otra parte, aunque el transporte fluvial cuenta con un gran potencial, no ha sido completamente aprovechado por la desorganización que se evidencia en el puerto, donde no se especifican puntos de embarque y desembarque, ni tampoco hay una coordinación entre las empresas de transporte de pasajeros o de carga. Adicionalmente, algunos pasajeros consideran molesto usar los modos de transporte fluviales debido a la adecuación de las sillas.

Respecto al transporte público, cabe resaltar que es un servicio de gran influencia en el desarrollo social y económico del municipio. Es necesario para que las personas que viven en corregimientos, zonas aledañas y hasta dentro de la ciudad puedan movilizarse al casco urbano a trabajar, vender sus productos, acudir a los centros educativos y asistir a las actividades deportivas, sociales y culturales de la vida cotidiana. Magangué ha experimentado un crecimiento urbanístico y poblacional, lo cual hace urgente un mejoramiento del servicio de transporte, cuya oferta es menor a la demanda y que, además, carece de comodidades por una mala prestación del servicio y la falta modernización de los vehículos (microbús, buseta y taxi). En consecuencia, han surgido fenómenos de transporte como mototaxis y vehículos “pirata”, que configuran un sistema ilegal que genera problemas sociales, económicos, de movilidad y seguridad, pero que suplen la necesidad de transporte para la población.

Por último, la movilidad terrestre particular se caracteriza por la circulación diaria de aproximadamente 25.000 motocicletas, lo cual, sumado al trabajo desorganizado de vehículos de carga, al uso de vehículos de tracción animal que no son aptos en un casco urbano, y las demás deficiencias mencionadas, genera caos en la movilidad, hacen intransitables las vías y frenan el desarrollo del municipio. Esta información refleja la situación actual de la actividad de transporte y la necesidad de mejorar las estrategias y la planificación del sistema de transporte de carga y pasajeros en los diferentes modos de Magangué.

6.3.2. Movilidad terrestre particular: caso de estudio

Empezando en el municipio de Magangué, desde la movilidad terrestre particular, se plantea una propuesta de un kit para hibridizar motocicletas asignándoles una tracción eléctrica complementaria a la convencional con el motor de combustión. Para trazar los requerimientos y necesidades del kit, fue necesario incluir la experiencia de los usuarios que hacen uso del transporte terrestre y brindan información sobre temas como frecuencia, razón, equipaje/carga, costo, percepción de transporte, posibles mejoras y temas adicionales. Se desarrolló un protocolo de recolección de información sobre el contexto, enfocado en la comuna 2 de Magangué, que presenta mayor flujo de transporte

terrestre, específicamente en los puertos principales (terminal fluvial de Magangué y puerto de Magangué) y el Parque de las Américas, que además es un punto focal de personas y desarrollo de actividades. En estos tres puntos se recolectó información respecto a los usuarios, actividades realizadas, tipo de mercancías transportadas y un énfasis particular sobre los modelos de motocicletas utilizadas, el número de motos que transitan, considerando que este es el medio de transporte más usado, con aproximadamente 20.000 automotores de este tipo. El estudio contextual se documentó con herramientas de observación en los puntos de enfoque, entrevistas para analizar las actividades realizadas y, por último, una encuesta hacia los usuarios de la motocicleta como medio y transporte, su experiencia en este medio, sus miedos, posibles mejoras y aprovechamiento en el futuro.

Una vez realizado el trabajo de medición, se tuvo una muestra total de 737 motocicletas, con la mayor concentración en el Parque de los Estudiantes, el cual se encuentra rodeado de zonas recreativas y educativas que, además, se ubica cerca al puerto de Magangué y diferentes establecimientos comerciales. Bajo esta misma muestra, un segundo hallazgo fue que los modelos más usados de motocicletas son Boxer, Platino, Discover, Crypton y BWS. Las características en común entre estos son: el bajo cilindraje, repuestos comunes, mantenimiento sencillo, bajo consumo de combustible y bajo costo.

En cuanto a las entrevistas, se encuestaron a 50 usuarios del transporte terrestre de Magangué y se recaudaron datos con relación a conceptos generales como: mantenimiento, velocidad, consumo de combustible y costo del servicio. Igualmente, se tuvo en cuenta la percepción del tema de la contaminación de estos medios de transporte. Las motos son el medio de transporte más común debido a que, aparte de ser asequibles, son una herramienta de trabajo. El 88 % de los encuestados utilizan la motocicleta siete días a la semana para el mototaxismo, una de sus principales fuentes de empleo. A pesar de que el 81 % de los encuestados conoce sobre la contaminación que generan las motocicletas, se evidenció que no tenían claridad por qué este vehículo era un medio de transporte contaminante. Finalmente, se determinó que los entrevistados están dispuestos a realizar el cambio de moto a combustión a una que genere menos contaminación, aunque muchos expresaron que les gustaría que realizar este cambio trajera beneficios adicionales como la disminución en el cobro de la energía. Las respuestas negativas se justificaron con que no era necesario, porque, aunque la moto contaminara, esto no era representativo.

6.3.3. Elección arquitectura de hibridación (requerimiento hibridación)

Considerando los resultados obtenidos en Magangué respecto a la movilidad terrestre, específicamente en el uso de motocicletas, se extendió la investigación para encontrar una relación con todo el parque automotor del país, a partir de la información publicada por las entidades Fenalco y Andemos Colombia. Se encontró que el 67 % de las motos matriculadas están dentro del rango de cilindraje de 0-135 cm³ y en los demás rangos el aporte es menor al 12,2 %; por esto, el primer rango es el más significativo y con el mayor aporte en el parque automotor. Además, se clasificó por segmento de motocicletas y se identificó que el 74 % pertenecen al *street*, definido por la Asociación Nacional de

Empresarios de Colombia (ANDI) como motocicletas adaptadas para la calle y el trabajo, lo cual reafirma los hallazgos del estudio previo realizado en Magangué. Por último, se analizaron los datos de ventas de motocicletas en Colombia y como resultado se identificó que, de las diez referencias más vendidas, el 63 % pertenecen al segmento *street*.

Con esta información, se decidió que el kit de hibridación sería implementado sobre cuatro motocicletas: la Boxer CT100, AKT NKD 125, Honda CBF125 y Bajaj Discover 125, debido a su impacto sobre el parque automotor. Del mismo modo, se efectuó una caracterización mecánica y dimensional de los cuatro modelos, como se muestra a continuación:

- Mecánica:
 - › Motor a combustión de cuatro motos, con un rango de par mecánico entre 8 N.m y 10,8 N.m, y un rango de potencia entre 8,09 HP y 12,8 HP.
 - › El peso del vehículo en seco está entre 95 kg y 128 kg.
 - › La configuración de la suspensión delantera y el sistema de frenado en ambas llantas coincide en las cuatro motocicletas. La única diferencia se presenta en la suspensión trasera de la Discover 125, que es de tipo *monoshock*.
 - › Capacidad de carga entre 130 kg y 170 kg
- Dimensional:
 - › Largo total: rango entre modelos de 1900 mm a 2035 mm.
 - › Altura total: rango entre modelos de 800 mm a 1078 mm.
 - › Ancho total: rango entre modelos de 714 mm a 770 mm.
 - › Distancia entre ejes: rango entre modelos de 1235 mm a 1310 mm.

Estos son datos importantes por su incidencia en la morfología del diseño del kit y en el ensamble de los componentes en las motocicletas, al estar relacionados con el consumo de combustible y los efectos en el comportamiento del vehículo. En general, se puede afirmar que las motocicletas son similares en lo técnico

Después de determinar las características principales de las motocicletas a hibridar, se escogió el tipo de configuración que tendría el vehículo en su versión híbrido, considerando, también, que la implementación de un tren motriz híbrido implica realizar un conjunto de modificaciones, puesto que se tienen dos motores de características totalmente diferentes entre sí. La tabla 6.3 muestra las ventajas y desventajas de las arquitecturas de hibridación.

Como se muestra en la tabla 6.4, estas configuraciones determinan, en gran medida, las modificaciones necesarias en el tren motriz original del vehículo.

Con estas consideraciones, se decidió que el kit de hibridación debe tener una configuración en paralelo, ya que implica la menor cantidad de modificaciones y con menor grado de invasión a la arquitectura original de la motocicleta.

Tabla 6.3. Arquitecturas hibridación: ventajas y desventajas

Configuración	Ventajas	Desventajas
Hibrido paralelo	<ul style="list-style-type: none"> - Motor eléctrico y baterías de menor tamaño en comparación a las demás configuraciones. - Tanto el motor de combustión interna (EMS) y el motor eléctrico operan como propulsores. - Eficiente en altas velocidades. 	<ul style="list-style-type: none"> - El desempeño del EMS depende de las condiciones de manejo y presenta varios rangos de ineficiencias.
Hibrido en serie	<ul style="list-style-type: none"> - El EMS opera en un rango de mayor eficiencia. - Es más eficiente en tráfico de ciudad. 	<ul style="list-style-type: none"> - Motor eléctrico y baterías de mayor tamaño en comparación a las demás configuraciones. - Menor rango de autonomía. - EMS no es propulsor.
Hibrido en serie/paralelo	<ul style="list-style-type: none"> - Tanto el EMS como el motor eléctrico operan como propulsores. - Mayor eficiencia que las demás configuraciones. 	<ul style="list-style-type: none"> - Para un funcionamiento óptimo, se deben diseñar estrategias de control exigentes. - Necesidad de una interfaz para el acople mecánico compleja. - Baterías más grandes en comparación con las demás configuraciones.

Fuente: elaboración propia.

Tabla 6.4. Opciones y configuraciones: hibridación motocicleta

Configuración	Alternativa	Modificaciones necesarias	Consideraciones
Paralelo	Motor HUB en llanta trasera	Diseño de rueda trasera (que incluya el motor HUB), control del motor eléctrico, acople para el ensamble del freno trasero y el <i>sprocket</i> de la transmisión original.	La relación de transmisión secundaria, un diseño de transmisión secundaria, un embrague o acople de rueda trasera y un control del motor de combustión.
	Motor HUB en llanta delantera	Diseño de rueda delantera (que incluya el motor HUB), control del motor eléctrico.	Alteración en el modo de conducción con el peso agregado del motor eléctrico.
Serie	Motor HUB en llanta trasera	Diseño de rueda trasera (que incluya el motor HUB), un control adicional para el motor eléctrico, la eliminación de transmisión primara y agregar un generador eléctrico. Cambio del motor de combustión (uno más pequeño para que sea eficiente en la generación de energía).	Necesidad de un acople del motor de combustión al generador eléctrico, un sistema de control del motor de combustión y un sistema de freno trasero.
	Motor eléctrico central	Cambio del motor de combustión por uno más pequeño, para que sea eficiente en la generación de energía y disponer de mayor espacio; la implementación de un generador y la instalación de un motor eléctrico como principal fuente de propulsión.	Sistema de control para el motor de combustión y el motor eléctrico; un acople de transmisión entre el motor de combustión, motor eléctrico y generador, así como el diseño de la transmisión secundaria.

Fuente: elaboración propia.

6.4. Implementación kit de hibridación

Teniendo los requerimientos de diseño para el kit de hibridación, se planteó la ejecución de un proceso iterativo de ejecución de prototipos, seguido de su implementación acorde a la configuración de hibridación escogida. Este trabajo se realiza sobre una motocicleta NKD 125 ST, que hace parte del conjunto de motocicletas a intervenir. Se explican, a continuación, los prototipos ejecutados para el kit de hibridación.

6.4.1. Motor HUB en llanta delantera

Se creó una disposición geométrica aproximada del producto, ubicando los grupos principales de subsistemas en la arquitectura original de la motocicleta, como se observa en la figura 6.1. El uso del motor HUB eléctrico se definió por su alta eficiencia y facilidad de montaje; y se decidió ubicarlo en la rueda delantera, ya que el nivel de intervención es mínimo. Por otro lado, para compensar el peso agregado a la parte delantera, se ubicó la batería en la parte trasera simulando una carcasa superior, y el sistema de control cerca del manillar, puesto que el cableado eléctrico de la motocicleta se encuentra, principalmente, en la luz delantera. El *hardware* y *software* necesario para esta arquitectura considera los elementos que se describen a continuación.

- **Motor eléctrico/transmisión:** se dimensiona un motor eléctrico HUB de 1000 W, el cual requiere modificarse para aumentar el diámetro de la perforación para el eje en la horquilla; además se necesita la instalación del freno de disco sobre el chasis del motor eléctrico.
- **Almacenamiento energético:** se dimensiona un paquete de baterías comerciales de 48 V 35 A para la alimentación del motor eléctrico, que garantiza una autonomía de 40 km. Para su ensamble, se instaló un soporte de tipo deslizante y un conector de carga rápida, que permite el montaje y desmontaje de la batería.
- **Sistema eléctrico:** consta de un microcontrolador Arduino Mega 2560, una PCB de diseño propio, con las protecciones necesarias (sobre voltaje, sobre corriente); también, una pantalla LCD a modo de interfaz de usuario y un botón para la selección del modo de funcionamiento. Como actuador, se propone un acelerador doble para enviar señales independientes al motor eléctrico, así como al de combustión.
- **Control:** se desarrolla un sistema basado en una máquina de estados finitos, considerando el estado de carga de la batería (SoC) y tres modos de conducción diferentes (híbrido, combustión y de frenado regenerativo) que el usuario escoge a juicio propio.

Así, se integraron todos los elementos para tener el primer prototipo funcional del kit de hibridación de la arquitectura con motor HUB en la llanta delantera, como se ve en la figura 6.1. Sin embargo, este presenta algunas limitaciones, principalmente en el apartado de control, donde se evidencia la necesidad que este sea capaz de tomar decisiones de manera autónoma en cuanto al aporte del motor eléctrico. Segundo, la instalación del motor en la llanta delantera, en términos de instalación, disminuye el factor de facilidad al tener que desmontar la suspensión. Pero, el mayor problema se presenta en la estabilidad del vehículo al conducir, puesto que el peso agregado en la horquilla es la interfaz del usuario para la maniobrabilidad. Esto dificulta la capacidad de girar y, por ende, aumenta el riesgo de un accidente.

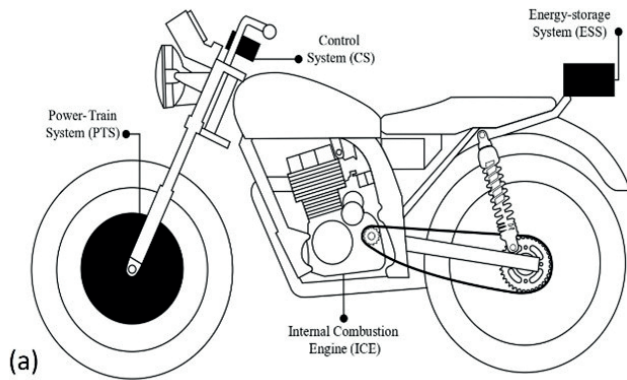


Figura 6.1. (a) Esquema arquitectura 1. (b) Prototipo arquitectura 1

Fuente: elaboración propia.

6.4.2. Motor HUB en llanta trasera - versión 1

Considerando los problemas presentados en la primera iteración del prototipo, se cambió la arquitectura del motor HUB en la llanta trasera de la motocicleta, como se muestra en la figura 6.2. Con esta disposición, los elementos se dimensionan de un mayor tamaño, lo que incrementa las prestaciones del kit. El *hardware* y *software* necesarios para esta arquitectura considera:

- **Motor eléctrico/transmisión:** se dimensiona un motor eléctrico HUB de 3000W a 72V con características adaptables a la tijera de la motocicleta. Sin embargo, la instalación del motor requiere de una serie de modificaciones listadas a continuación: 1) es necesario realizar un corte en la parte posterior de la tijera que permita el montaje y desmontaje del conjunto motor/llanta, ya que el eje del motor eléctrico es fijo a este y no se puede remover sin desarmar completamente el motor eléctrico; 2) el sistema de frenado migra de freno de tambor a freno de disco, ya que el motor eléctrico viene con esta configuración y en su versión de freno de tambor excede el ancho disponible en la tijera de la motocicleta. Esta debe ser adecuada para este sistema de frenado, por lo que se instala el reservorio, bomba y mordaza de freno mediante soportes acoplados a puntos de ensamblaje existentes en la motocicleta; 3) con el corte realizado en la tijera para el ensamblaje del motor eléctrico, es necesario diseñar un mecanismo para el ajuste de tensión de la cadena y alineación de la llanta trasera; 4) la carcasa del motor eléctrico se modifica: es necesario diseñar la tapa izquierda de la unidad, para poder ensamblar el *sprocket* al motor eléctrico y generar la interfaz para la transmisión del motor de combustión.
- **Almacenamiento energético:** se escoge un paquete de batería de iones de litio de 72V20Ah capaz de alimentar el motor eléctrico. Dado el tamaño de las baterías, se diseña una caja tipo *top-case*, la cual almacena tanto las baterías y el controlador. El conjunto se ensambla a la motocicleta a modo de parrilla trasera haciendo uso de puntos existentes en el chasis de la motocicleta.
- **Sistema eléctrico:** se selecciona un voltaje de 72v debido a la estandarización de esta medida en las motocicletas eléctricas disponibles en el mercado. El motor eléctrico y el

pack de baterías se integran mediante un controlador, el cual cumple las funciones de manejar el estado de carga de las baterías y el desempeño del motor eléctrico.

- **Control:** se busca automatizar la operación del kit eléctrico y mejorar la experiencia del usuario mediante una arquitectura híbrida paralela, donde ambas fuentes de propulsión intervienen en la tracción del vehículo. Para esto, la operación debe ser similar a la funcionalidad del automóvil, donde el sistema eléctrico se convierte en un soporte para el motor de combustión. En este caso, el controlador analiza permanentemente las señales del entorno, la motocicleta y la batería del kit para determinar los aportes del motor eléctrico.

Se ejecuta la integración para el segundo prototipo funcional del kit de hibridación con la arquitectura de motor HUB en la llanta trasera, como se ve en la figura 6.2. El concepto presenta mejoras en la maniobrabilidad, que, a pesar de tener un peso agregado en la sección de la parrilla, se tiene un impacto similar al que genera el peso ejercido por un *top-case* o cargas que un usuario disponga en esta sección de la motocicleta; sin embargo, dado el tamaño y peso del conjunto baterías-controlador-caja de almacenamiento, hace que el centro de masa de la motocicleta tenga una variación hacia la sección trasera. Para el control, se plantea que ambas fuentes de propulsión funcionen en configuración paralela y puedan aportar de manera independiente, pero el diseño de la tapa izquierda del motor eléctrico mantiene acoplado el *sprocket* ambas fuentes de propulsión al mismo tiempo por lo que se pueden generar arrastres entre ellas. Esto, además, dificulta la operación en paralela, ya que se debe tener certeza del torque generado por el motor eléctrico; si en algún punto de operación este supera el generado en el motor de combustión, puede producir daños en la caja de cambios.

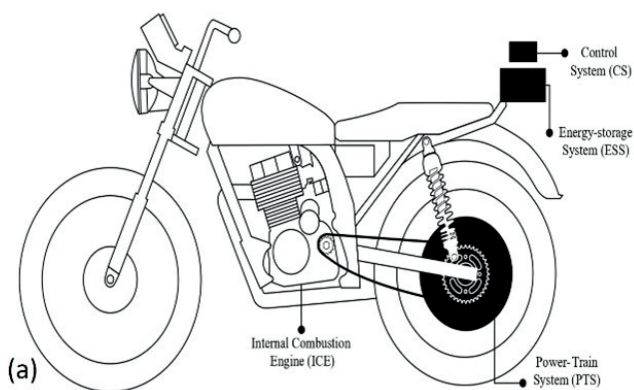


Figura 6.2. (a) Esquema Arquitectura 2. (b) Prototipo Arquitectura 2

Fuente: elaboración propia.

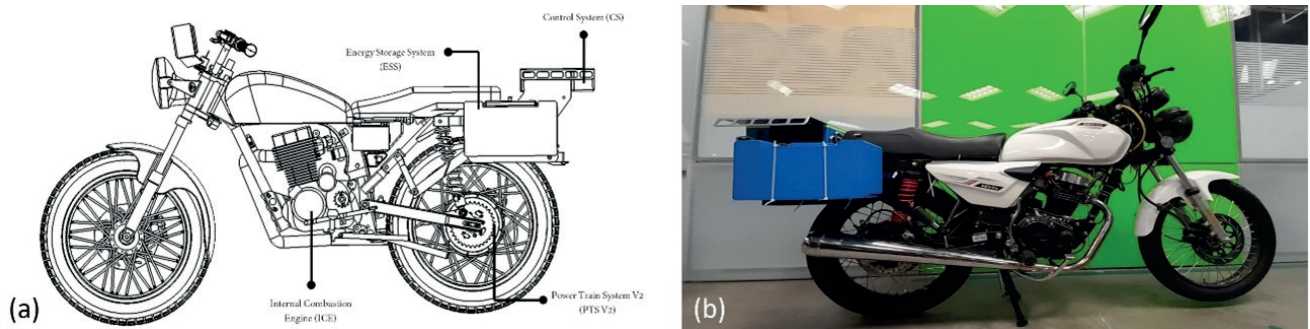


Figura 6.3. (a) Esquema arquitectura 3. (b) Prototipo arquitectura 3

Fuente: elaboración propia.

6.4.3. Motor HUB en llanta trasera - versión 2

Se realizaron modificaciones finales a la arquitectura del kit, considerando la posibilidad de que cada fuente de propulsión pueda hacer aportes independientes, así como la redistribución de los componentes de control y almacenamiento electrónica, como se describe en la figura 6.3.

El *hardware* y *software* requeridos para esta arquitectura considera:

- **Motor eléctrico/transmisión:** se mantiene el motor eléctrico HUB de 3000 W a 72, y se diseñó una interfaz entre este y la transmisión por cadena, compuesta por una tapa modificada y un elemento portasp ro cket, que permite el giro de cada fuente de propulsión sin generar arrastres.
- **Almacenamiento eléctrico:** el montaje de las baterías y electrónico se traslada a una arquitectura de sistema portante, tipo parrilla y portaalforjas, en el cual el controlador se sigue ubicando en la parrilla de la motocicleta, y las baterías se ensamblan en los laterales de esta.
- **Sistema eléctrico:** el paquete de baterías se divide en dos unidades de menores dimensiones. Se mantiene la implementación del controlador, para monitorear la carga de las baterías y los comandos de activación del motor eléctrico.

6.4.3.1. Implementación de controlador

El algoritmo de control permite generar un orden al proceso de cómputo del embebido que se requiere generar. Para esto, se muestra, primero, cómo va a operar la motocicleta por medio de una arquitectura de conducción, con el objetivo de entender el flujo del controlador; luego, se exponen los dos esquemas propuestos de control: un PID y MPC, diseñados para la implementación correspondiente a los resultados de simulación de la motocicleta en híbrido.

Arquitectura de conducción: el planteamiento del algoritmo de control es entender de qué manera se debe de conducir la motocicleta. Para esto, se propone una arquitectura de conducción, basada en que el usuario perciba el control del motor de combustión directamente y que el controlador actúe con base en las decisiones de control para apoyar con el motor eléctrico.

Figura 6.4.
Diagrama de opción de manejo para el control del kit

Fuente: elaboración propia.

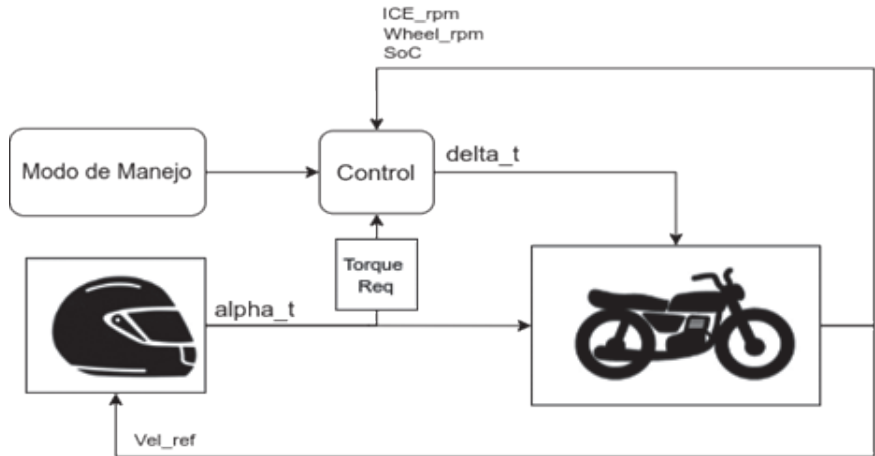
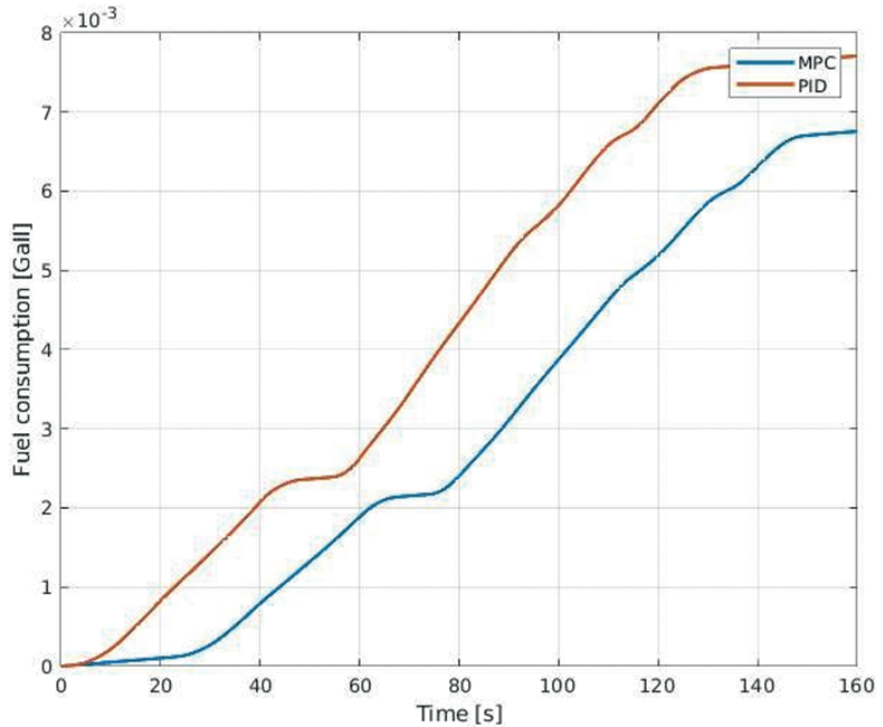


Figura 6.5.
Comparación de consumo de combustible para los controladores

Fuente: elaboración propia.



La figura 6.4 expone la arquitectura generalizada del esquema de conducción y cómo interviene el controlado. Se observa que no aumentan los grados de controlabilidad para el conductor y se manejan las variables, como la aceleración del manillar, el cambio de marcha y los accionamientos del freno y el embrague, las cuales entran directamente al motor de combustión. Se planteó la inclusión de un indicador, para que el usuario pueda seleccionar entre los distintos modos de manejo, pero esta segunda fase de implementación se establece mediante un código. Estas variables de control se extraen para ser ingresadas al controlador, el cual, por medio del mapeo del desempeño de los motores y la velocidad rotacional que se esté generando en la llanta, decide cuánta contribución

de motor eléctrico generar para apoyar el motor de combustión; se genera, entonces, una percepción de fuerza y velocidad que el usuario actúa sobre ella.

Comparación controladores implementados: se presenta una comparación del desempeño de los controladores implementados, con las ventajas y desventajas al momento de ser generados para embeber en un microcontrolador. En la figura 6.5 se presenta la comparación del gasto del consumo de combustible para ejecutar el perfil de velocidad de los dos tipos de controladores implementados, en los que ambas curvas cumplen con la misma tendencia de operación del motor de combustión; así, presenta un mejor desempeño el control MPC frente al control PID.

El análisis evidencia que la respuesta del MPC es más adecuada en términos del manejo de energía, pues, internamente, se optimiza su distribución, dependiendo de la operación, impartida por el conductor, que se requiera realizar. El control PID es conveniente siempre y cuando se acoten las restricciones de almacenamiento de energía, tanto de la rama eléctrica como de combustión, de una manera en que permita extender el rango de autonomía de la motocicleta. Cabe recalcar que no es posible realizar un seguimiento adecuado de la estrategia de manejo de energía, para el caso del control PID, ya que está basado en análisis al comportamiento del control directo del motor de combustión. El tiempo de cómputo del controlador PID es relativamente bajo y puede permitir una implementación en tiempo real de la rutina de programación elaborada para la simulación, mientras que para una implementación en tiempo real del controlador MPC debe haber un equilibrio frente al tiempo de respuesta del algoritmo de optimización y el horizonte de control que se imparta; si se cuenta con un microcontrolador con bastante capacidad para encontrar un mínimo, lo suficientemente ágil para implementarse en tiempo real, se puede ampliar el horizonte de predicción de la rutina de control, lo que hace al sistema robusto frente a incertidumbres.

6.4.4. Desempeño de hibridación en motocicletas para un transporte sostenible

La evaluación del desempeño se hizo mediante pruebas en ambiente controlado, en las que se obtuvo información de la motocicleta operando en modo combustión, eléctrico e híbrido, con el fin de comparar el desempeño de variables que dan indicación al manejo de energía y a la autonomía del vehículo. Para lograrlo, se realizó un ciclo de velocidad, el cual tiene aceleraciones y desaceleraciones típicas en un sector urbano concurrido; para la operación de la motocicleta en eléctrico y combustión, la señal de control del motor es directamente la actuación del manillar del conductor; para el caso en híbrido, se implementó una estrategia de manejo que genera un aporte a la contribución del motor eléctrico, dependiente de las variables de estado de carga, la velocidad angular del motor de combustión y la activación del manillar por parte del conductor.

En la figura 6.6 se sintetiza la ruta recorrida por la motocicleta, así como los resultados de la prueba para los distintos modos de operación. El color azul es el desempeño de la motocicleta en modo eléctrico, rojo en modo combustión y verde en modo híbrido con la estrategia de manejo impartida en el controlador. Queda patente que en el modo de conducción solo eléctrico, la alta demanda de energía que se suministra de la batería, dada la alta carga que impone las arrancadas del vehículo cuando desempeña una

velocidad constante, disminuye, lo cual estabiliza los picos de corrientes de las baterías. Este fenómeno sucede, igualmente, en el modo de conducción solo en combustión, pero con la carga de aceleración angular de este tipo de motor, lo que implica un gasto de combustible proporcional a esta carga energética. También, se evidencia una activación del manillar menor en el modo eléctrico, lo que explica cómo es el tiempo de entrega de potencia de ambos motores. Así, el motor de combustión es más eficiente para los arranques y el eléctrico lo es para velocidades constantes con menores cargas, porque implica en el de combustión un gasto de combustible más significativo que el gasto de energía eléctrica de la batería para esta condición.

Los resultados obtenidos para el modo de conducción híbrido, con la estrategia de manejo presentada, muestran cómo entre ambos motores se distribuye la energía, dependiendo de las condiciones desarrolladas de la operación; también, en este caso, por la condición de la arquitectura de manejo de la motocicleta, no se puede generar un control directo sobre el motor de combustión. Lo que se evidencia es que en la operación del motor eléctrico se produce una percepción del usuario de generación de potencia, lo que implica una corrección de la activación del manillar para realizar las correcciones a su velocidad deseada de manejo. Del mismo modo, por la capacidad de entrega rápida de potencia del motor de combustión, no se presentan grandes picos de corrientes del motor eléctrico frente a las arrancadas, dado que el motor de combustión asume la entrega de potencia, lo cual resulta en una conservación de energía eléctrica en las baterías y, para velocidades constantes, una disminución de la entrega de energía de combustión. Esto significa un ahorro de combustible importante en comparación con la operación de la motocicleta, únicamente, en modo de combustión.

En este capítulo se presentaron los conceptos básicos de tipos de tecnologías existentes y desarrollos enfocados para vehículos de uso particular. Comúnmente, los vehículos de combustión son los más empleados en la actualidad por el nivel de desarrollo tecnológico, en comparación con vehículos eléctricos o híbridos. No obstante, estos últimos muestran un gran panorama en cuanto a soluciones de mitigación de la problemática ambiental, sin dejar de lado el desempeño de operatividad del vehículo.

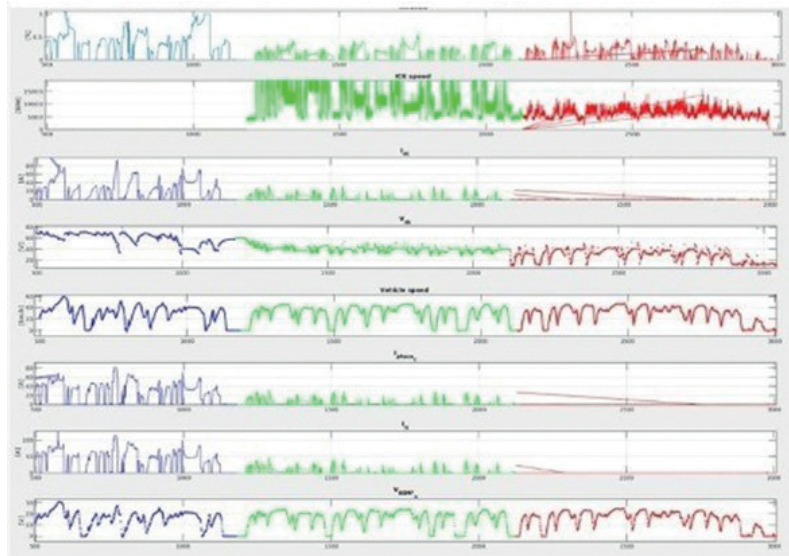


Figura 6.6.
Desempeño en pruebas de ruta para distintos modos de manejo de motocicleta híbrida

Fuente: elaboración propia.

De otra parte, comercialmente, los sistemas de conversión a vehículos eléctricos o híbridos no presentan un procedimiento detallado de instalación, lo que dificulta al usuario querer realizar una implementación electrónica al vehículo. Esto genera más demanda al mercado del vehículo, ya implementado eléctrico o híbrido, pero, al mismo tiempo, produce un problema con el mercado automotor actual. Para el caso de estudio, resulta una ayuda a la transición energética de manera económica y viable de incrementar la autonomía del vehículo, disminuir la huella de carbono generada por el proceso de combustión e incrementar, entonces, las opciones de desempeño del vehículo en cuanto a la entrega de potencia.

Del diseño planteado, se destaca que es posible un manejo eficiente de energía, siempre y cuando se tenga un estudio enfocado en los requisitos de operación del vehículo. Estos pueden plantearse como vehículos que tengan un rango de autonomía sostenible como instrumento de mitigación de emisiones. Lo anterior debe acompañarse de una instrumentación adecuada que habilite entradas para la decisión de operación de las distintas fuentes de energía, así como un balance adecuado del peso del vehículo, debido a que esto es un factor altamente sensible al desempeño, tanto de manejo como de operación del mismo. Cabe subrayar que el contenido enfocado es relevante para la movilidad terrestre de uso particular, pues los planteamientos tienen un enfoque para vehículos diseñados, explícitamente, de uso de pocos pasajeros y que la cantidad de consumo energético por persona desplazada es poco eficiente.

En el siguiente capítulo se detallan los conceptos e investigaciones relacionadas con la movilidad terrestre colectiva. Allí, se exponen las diferentes alternativas de vehículos terrestres y se valida, por medio de un caso de estudio, la posibilidad de realizar adaptaciones a estos integrando tecnologías limpias, que, sumadas a los sistemas originales, conlleven a desarrollos de transición hacia la movilidad 100 % eléctrica y las convierta en un puente fundamental, en tanto la sustitución de las tecnologías de transporte se logra por reemplazo natural. Asimismo, se presentarán las diferentes soluciones de movilidad terrestre colectiva y de transporte público que pueden ser efectuadas en los sistemas integrados de transporte de las ciudades y que permiten cubrir la demanda incremental de movilidad de las personas de una manera más limpia bajo un contexto de transporte multimodal.

6.5. Referencias

- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2005). *Combustibles y vehículos alternativos: combustibles y nuevas tecnologías de vehículos que reducen las emisiones de gases de efecto invernadero y de contaminantes*. <https://www.idae.es/publicaciones/combustibles-y-vehiculos-alternativos-combustibles-y-nuevas-tecnologias-de-vehiculos>
- Jones, L., Cherry, C., Vu, T. y Nguyen Q. (2013). The effect of incentives and technology on the adoption of electric motorcycles: A stated choice experiment in Vietnam. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 57, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.tra.2013.09.003>
- Larminie, J. y Lowry, J. (2012). *Electric vehicle technology explained*. Wiley.
- Marazzi, L. (2013). Electric motorcycle (patente de Estados Unidos, US 2013/0299265 A1). <https://patents.google.com/patent/US20130299265>

- Nishiura, H., Furuta, S., Hasegawa, M. y Takato, W. (2009). Electric motorcycle (patente de Estados Unidos, US 8,002,067 B2). <https://patents.google.com/patent/US8002067B2/en>
- Oviedo J., Badii, M., Guillen, A. y Lugo, O. (2015). Historia y uso de energías renovables. *Daena: International Journal of Good Conscience*, 10(1), 1-18. <http://www.spentamexico.org/v10-n1/A1.10%281%291-18.pdf>
- Real Academia Española. (s.f.). Hibridación: Diccionario de la lengua española. <https://dle.rae.es/hibridaci%C3%B3n>
- Sanz, S. (2017). *Vehículos híbridos y eléctricos (Motores)*. Ciclos Formativos. Editorial Editex.

Soluciones de movilidad terrestre colectiva

Andrés Emiro Diez Restrepo¹, Juliana Carolina Acosta Jacome¹, Alejandro Mora Chica², Juan José Zuluaga Valencia²

Resumen: actualmente, las sociedades modernas cuentan con un sistema de transporte que permite a sus miembros desplazarse dentro del panorama geográfico que comprende la región que habitan; es una necesidad básica que los gobiernos deben suplir para mantener un flujo constante en todos los ámbitos de la organización social. Esta demanda se encuentra en constante aumento, de forma tal que cada año es necesario fortalecer las capacidades de los Sistemas de Transporte Públicos Masivos (STPM). En los últimos años, ha crecido el interés por alimentar estos sistemas de transporte con energía eléctrica, pues un incremento del uso de combustibles fósiles acrecentaría la contaminación emitida por dichos sistemas. Además, esto se debe a la ineficiencia de los motores de combustión, considerando desde que se obtiene el petróleo del pozo hasta que se mueve la rueda del vehículo: 15 %, aproximadamente, es menor la eficiencia de los vehículos livianos utilizados para el transporte de una carga útil menor. Este capítulo se enfoca en la planificación estratégica de la infraestructura requerida para la implementación un sistema multimodal, así como las características de cada uno de los modos de transporte agregados a la red, con el propósito de determinar la demanda energética proyectada y el impacto en la red eléctrica.

Palabras clave: sistema multimodal; infraestructura; movilidad sostenible; demanda energética; red de media tensión; subestaciones de alimentación; subestaciones de tracción.

1 Transmission and Distribution Research Group, Universidad Pontificia Bolivariana, circular 1 70-01, Medellín, Colombia. Correo electrónico: andres.diez@upb.edu.co

2 Microelectronics Research Group, Universidad Pontificia Bolivariana, circular 1 70-01, Medellín, Colombia. Correo electrónico: josev.restrepo@upb.edu.co

7.1. Generalidades y beneficios de un sistema de transporte multimodal

Los Sistemas de Transporte Públicos Masivos (STPM) son implementados con el objetivo de atender las demandas de desplazamiento de una población en diferentes entornos, urbanos o regionales, y están diseñados para que las personas paguen una tarifa determinada para su uso. Estos sistemas suelen operar sobre carriles específicos o, en algunos casos, carriles exclusivos, con horarios establecidos y a través de rutas designadas con paradas específicas; también, son concebidos bajo la premisa de que deben mover grandes cantidades de pasajeros. Desde el ámbito eléctrico, se encuentran dos tipos de vehículos en un STPM: aquellos que no están conectados a la red, y utilizan tecnologías de almacenamiento de energía, y los que dependen de una conexión directa a la red para poder contar con la alimentación necesaria para su funcionamiento. Entre los modos de transporte que pueden conformar el STPM se encuentran:

- **Metro:** este término es usado internacionalmente para referirse al transporte público de tren pesado, subterráneo o elevado. Son sistemas de alto rendimiento, con vagones alimentados con energía eléctrica, que operan con derechos de vía exclusivos, generalmente sin pasos a nivel y con estaciones de plataforma altas. Son el modo de transporte más caro por kilómetro, pero, en contraste, cuenta con la mayor capacidad teórica y, a su vez, es el modo de transporte más rápido de todos los STPM, con una velocidad promedio entre 40-50 km/h. Su integración es recomendada para recorridos de grandes longitudes, que no tengan grandes pendientes, debido a que se tiene un vehículo movido sobre rieles; generalmente, la característica reversible de los motores eléctricos, hace que presenten un frenado regenerativo y, por lo tanto, pueden ser implementados sistemas para el aprovechamiento de dicha energía. Desde el suministro eléctrico, un tren es una carga de demanda variable que requiere una alta carga de potencia para superar la alta inercia y la fricción estática durante el arranque. Cuando el vehículo frena, el flujo de potencia se revierte gracias al frenado regenerativo, condición especial de los motores eléctricos, momento en el cual el vehículo puede entregar energía a la red.
- **Tren de cercanías:** conocido como sistema de trenes para transportarse al trabajo o tren suburbano, moviliza pasajeros dentro de áreas urbanas o entre estas. A diferencia del metro, los vagones de pasajeros suelen ser más pesados y las operaciones son efectuadas en vías que son parte del sistema ferroviario; son operados, en su mayoría, por compañías generales de trenes, por lo que comparten rieles con el transporte de carga y de larga distancia en algunos tramos.
- **Transporte público de tren ligero (LRT):** sistema de tren eléctrico metropolitano; su característica fundamental es la habilidad para operar vagones únicos o trenes cortos a lo largo de vías exclusivas, que pueden estar a nivel del suelo, con estructuras aéreas o en subterráneos. Este modo de transporte incluye tranvías; aunque una diferencia principal es que los tranvías, a menudo, operan sin un derecho exclusivo de vía, en tráfico mixto. Estos sistemas son definidos por la Asociación Americana de Transporte Público (American Public Transportation Association, 2011), como:
 - sistemas ferroviarios de bajo peso para pasajeros que operan por separado (o en trenes cortos, usualmente de dos vagones) en rieles fijos y en vías que no están separadas de otros medios de transporte en la mayoría de los recorridos.

Los trenes ligeros son movidos generalmente por electricidad captada de líneas aéreas a través de los pantógrafos.

- **Sistema de bus rápido (BRT):** transporte público orientado al consumidor que combina la implementación de estaciones, dotación de vehículos apropiados, planificación y elementos inteligentes de sistemas de transporte en un sistema integral. Generalmente, cuenta con corredores de vías de autobuses en carriles segregados, que pueden ser a nivel o desnivel. Sin embargo, aparte de las vías de autobuses segregadas, los sistemas BRT incluyen comúnmente: abordaje y descenso rápido, eficiente recolección de tarifas, estaciones cómodas, tecnologías más limpias para los autobuses. Debido a que operan con combustibles más limpios y cuentan con integración modal para suplir las necesidades de transporte por corredores diferentes a las troncales, pueden ser flotas alimentadas con energía eléctrica de forma parcial o total.
- **Buses eléctricos (trolebuses):** es un vehículo tipo bus traccionado con energía eléctrica, mediante la conexión a un circuito de líneas aéreas de corriente directa por medio de un sistema de captación conocido como “trole”. El trole está en contacto a las líneas aéreas, inclusive cuando el vehículo se encuentra en movimiento. Igualmente, está conectado al sistema de alimentación de energía eléctrica y, por lo general, no requiere un carril exclusivo para circular.
- **Cable:** este es un tipo de transporte que no es común en los STPM. Es conocido como cable aéreo, debido a que es un conjunto de cables y cabina que circulan para movilizar pasajeros. Usualmente, se confunde con el sistema teleférico, pero en este sistema se emplea un solo cable para la sustentación y la tracción, lo que permite la instalación de un gran número de cabinas por tramo. Son destinados, principalmente, para el turismo en zonas montañosas; no obstante, en Antioquia se construyó el primer transporte público de pasajeros bajo esta modalidad, conformado por 90 cabinas tiradas por cable, integrándose al sistema operado por la Empresa de Transporte Masivo del Valle de Aburrá (Metro). Este modo de transporte ha permitido la transformación de barrios deprimidos en diferentes comunas de la ciudad de Medellín y ha cambiado el modo en que las personas de dichas zonas se movilizan, mejorando con ello su calidad en la movilidad, factores de seguridad e impacto social medido en diferentes estudios.
- **Sistema de transporte multimodal:** es aquel sistema dedicado al movimiento de pasajeros, que cuenta, como mínimo, con dos de los medios mencionados. A este medio se le puede entender como un STPM, el cual se conforma de manera estructurada luego de un estudio metodológico de la empresa operadora del sistema de transporte, que busca optimizar los recursos disponibles para la demanda y mantener un correcto balance, no solo en la capacidad de un medio, sino en los diferentes medios que implemente.

Los sistemas de transporte eléctricos suelen ser similares a los sistemas de distribución de energía eléctrica. Esto, debido a que ambos deben cumplir con la demanda de forma continua, con calidad del suministro, con capacidad de atención de demanda máxima y presentan similitudes en la distribución de las subestaciones y transformadores; se diferencian en situaciones como la interacción directa con el usuario y la cantidad de conexiones a una misma red. Aun con estas desviaciones, la planeación de un sistema multimodal eléctrico es posible de realizar, ya que, en esencia, es muy similar a la de

un sistema de consumo eléctrico, lo cual permite una planeación eficiente y sin tantas desviaciones respecto a naturaleza de los conceptos base.

A partir de los conceptos básicos sobre un STPM, o sistema multimodal, su implementación bajo un régimen eléctrico contrarresta un gran número de dificultades. La principal es la contaminación que generan los vehículos de combustión y, por otro lado, los precios del petróleo frente a la electricidad, desde un ámbito económico. La polución auditiva, así como el frenado regenerativo que pueden tener los motores eléctricos son otros puntos clave a tener en cuenta al momento de listar la movilidad eléctrica como superior sobre la de combustión. Estas razones a gran escala son suficientes para tomar una decisión acertada al momento de definir la alimentación de un STPM.

Cabe resaltar que un sistema multimodal en una ciudad no depende solo de la administración o la empresa encargada, es fundamental que la comunidad que hará uso de este servicio lo trate como algo valioso; que cuide sus indumentarias y equipos, así como las instalaciones en general, con un sentido de pertenencia que asegure la integridad general del sistema desde el usuario final, lo cual reduce costos de mantenimiento y renovación de equipos. Esto se logra, principalmente, por medio de campañas sociales que induzcan a la pertenencia de la comunidad con el STPM y se apropien de este utilizándolo con responsabilidad y conciencia.

7.2. Planificación estratégica de la infraestructura para la alimentación de sistemas de transporte multimodales

Las redes de transporte de las ciudades están sometidas a un crecimiento constante, de forma que la capacidad de estas incrementará al igual que la demanda energética para poder mantener dicho sistema funcional. En este sentido, es pertinente incrementar las fuentes energéticas que apoyen el funcionamiento de los STPM y, con ello, avanzar en la búsqueda de nuevas tecnologías que, además de cubrir el requerimiento energético, sean cada vez más eficientes, baratas y funcionales, características que, en su mayoría, han cumplido las energías renovables. Por esta razón, la movilidad eléctrica se ha establecido globalmente como una de las principales alternativas para impulsar los STPM en varios lugares del mundo. Esto permite, no solo cubrir la demanda que estos lugares tenían, sino generar grandes beneficios como la reducción de contaminación, de los costos operativos y de implementación, entre otros; además, poder brindar posibilidades de expansión mucho más accesibles y manejables debido a su integración con el sistema y la infraestructura eléctrica de las ciudades y gobernaciones.

Las expansiones de los STPM deben considerarse desde dos frentes principales. El primero desde la infraestructura eléctrica, que es la fuente de vida de todo el sistema, la razón de movimiento y constante operación. El segundo, la infraestructura civil, porque para lograr que el suministro eléctrico sea distribuido correctamente, es importante que los equipos necesarios para esta tarea estén ubicados en los lugares idóneos, haya espacio para el paso de los vehículos de transporte y que la integridad urbana civil no se afecte con la implementación de estas tecnologías; más bien, que trabaje al unísono para optimizar y potenciar los resultados de estas.

7.2.1 Infraestructura eléctrica

Para establecer una infraestructura eléctrica capaz de atender la demanda de un sistema dedicado a la movilidad, es necesario un diagnóstico claro del sistema de potencia al que se integrará dicho sistema, de tal forma que pueda conocerse no solo la carga que se integrará al sistema, sino su respuesta ante este cambio. Dentro de los elementos principales que hacen parte de los sistemas de tracción se encuentran:

- **Subestaciones de alimentación:** son la parte del sistema de tracción que realiza la transformación de corriente eléctrica, voltajes y cambios en la frecuencia, desde los niveles de la red trifásica del operador de red. Esto para hacer la distribución de potencia al material rodante que cuenta con equipos de tracción y servicios auxiliares
- **Subestaciones de tracción:** alimentan los vehículos a través de la catenaria y cierra el circuito de alimentación a través de los carriles. Para alimentar los diferentes modos de transporte, estas subestaciones operan bajo distintos valores. Para aplicaciones ferroviarias, los niveles de tensión más comunes son: 750 Vcc, 3000 Vcc, 25 kVca para líneas de alta velocidad, 1200 y 1500 Vcc, normalmente para sistemas tipo metro. Se denominan también subestaciones de tracción-recarga; cuando en el vehículo se incorpora un sistema de almacenamiento de energía, además de recibir la energía para la tracción, hace lo mismo para su almacenamiento. La última aplicación descrita tiene una amplia difusión en los sistemas de trolebuses de carga en movimiento y son resaltables los casos de Beijing, Shangai y Jinan en China; Lyon, Ginebra, Zurich, Praga, Berna, Lausana y San Petesburgo, en Europa; Dayton, Vancouver, Seattle y Ciudad de México, en América. Esta tecnología (tracción-recarga, catenaria-batería) está siendo utilizada para la alimentación de líneas ferroviarias secundarias en Alemania.

Para la infraestructura eléctrica, se proponen tres etapas de planeación e implementación para elegir las tecnologías de forma eficiente y funcional en los territorios en los que se planea hacerlo. Esta metodología puede aplicarse a cualquier sistema de transporte multimodal y se espera obtener la validación de la topología de la red de distribución, la capacidad y especificación de los equipos de suministro de energía, como transformadores, rectificadores y alimentadores. Asimismo, permite analizar la capacidad del sistema para atender la entrada de nuevos modos de transporte, con estaciones de carga o subestaciones fijas e inclusive el crecimiento de mayor demanda de pasajeros.

7.2.1.1. Etapa uno

La primera etapa de la metodología tiene como objetivo determinar detalladamente las necesidades de tracción para cada vehículo que se quiera conectar a la red, teniendo en cuenta el dimensionamiento del sistema de tracción, el tren de potencia o las posibilidades de almacenamiento que pueda tener. Para comenzar, se particulariza cada modo de transporte de la red multimodal y, luego, se busca la curva de consumo de potencia de cada vehículo. Estos consumos se agregan, según la cantidad de vehículos que sean alimentados en la subestación de tracción (SET) o en la estación de carga, por vehículos y por modo (tren, cable, tranvía, entre otros). En los casos que cuentan con información por medidas realizadas en las estaciones de carga, se podrán tomar estos valores; de lo

contrario, se obtienen mediante simulaciones. El resultado de esta etapa es la demanda agregada en la SET o estación de carga que alimenta los vehículos.

7.2.1.2. Etapa dos

El propósito de la siguiente fase es definir la red de suministro de energía. Esta debe estar concebida para que, a pesar de las limitaciones que existan respecto a la capacidad instalada en los equipos, en el sitio o demás, haya un adecuado funcionamiento de los sistemas de tracción y que esto se realice con la menor inversión posible. Lo anterior se logra con adecuadas interacciones entre el vehículo y la red. El resultado de esta etapa son las curvas de demanda para las subestaciones de tracción, lo cual es fundamental para el dimensionamiento de la infraestructura y para determinar si, con la red que se encuentre disponible, el sistema multimodal puede o no operar. Además, según el modo que se quiera conectar, es preciso aplicar pruebas de concordancia, para obtener datos estadísticos del consumo del sistema de tracción, debido a que cada día y cada periodo de tiempo pueden presentarse demandas de energía diferentes.

7.2.1.3. Etapa tres

Finalmente, conociendo los requerimientos en tracción del modo de transporte, el interés se centra en la interacción con la red de media tensión. Esta es la etapa más importante de la metodología, pues determinará la capacidad de la infraestructura, para lo que se requiere conocer la topología de la red y, en lo posible, contar con inyecciones de energía distribuida. El propósito es hacer uso de la red de media tensión existente, en mayor medida, para aprovechar el recurso disponible. El punto de partida es identificar si en el lugar físico existen aportes de generación distribuida (p. ej. fotovoltaica) en los puntos de carga o subestaciones de alimentación y conocer, así, la demanda neta que atenderá la red de media tensión para la red multimodal. En este punto, se recogen aportes puntuales en las subestaciones; por ejemplo, se puede tener un vehículo conectado a la red con frenado regenerativo, conectado a una subestación reversible aportando energía a la red.

El propósito en esta etapa se centra, entonces, en verificar que la red en cuestión cumpla con los elementos necesarios para suministrar la energía demandada. Así, se verifican los niveles de tensión exigidos por la normativa internacional (a nivel de tracción y carga, así como de media tensión), específicamente, los requerimientos de la Comisión Internacional de Electrotécnica (CEI) y, de ese modo, asegurar el correcto funcionamiento del sistema en sí y también de la relación de este con la red eléctrica a la que será conectado, para contar con un suministro que entregar. El resultado de la etapa y de la metodología es estimar el consumo de energía que representará la conexión del sistema de transporte, el cual puede ser una nueva flota de un modo de transporte o la ampliación de una existente. Esta evaluación de la demanda de energía es tan relevante como los estudios de demanda energética de las redes de distribución y se observa, así, que se mantiene el símil planteado entre los dos sistemas y que su tratamiento es bastante parecido.

7.2.2. Infraestructura urbana

Todo tipo de implementación civil conlleva una planeación urbana, de modo que los componentes eléctricos, mecánicos, civiles y sociales puedan unificarse u operar en armonía, una vez el proyecto entero vaya a ser inaugurado. Es fundamental considerar todos estos aspectos de forma paralela al momento de la planeación y desarrollo, para que los montajes eléctricos puedan estar asegurados y en las ubicaciones correctas, los caminos designados del transporte sean eficientes y no invasivos; en este mismo sentido, que el diseño de rutas sea óptimo y que beneficie a la mayor cantidad de usuarios y, por último, que las estaciones o puntos de referencia del sistema estén bien construidos.

La importancia de una unidad eficiente, en los distintos ámbitos de un proyecto, es clave del éxito de los STPM, de modo que el funcionamiento de los equipos, estaciones, elementos varios e incluso la comunicación con el usuario permitan una cobertura completa de la demanda y busquen mejorar y hacer más eficiente el sistema. En general, desde la perspectiva urbana, para ser considerado exitoso, un STPM debe cumplir y satisfacer los siguientes objetivos: 1) garantizar un buen desplazamiento de las personas, 2) disminuir la congestión de tráfico y la contaminación ambiental (con una transición de combustibles fósiles al uso de energías limpias y de motores eléctricos, 3) reducir la cantidad de accidentes viales, 4) promover la igualdad social y de oportunidades, 5) aumentar la productividad de la sociedad, 6) contribuir a la disminución de la inseguridad pública, 7) fomentar el turismo y, finalmente, 8) maximizar los combustibles y transporte de más pasajeros por kilómetro. Esto resume el impacto que debe generar un STPM, no solo en el ámbito de movilidad, sino que, como parte integral y central de la sociedad que habita una zona urbana, su aporte debe ir más allá de cumplir su tarea principal, permitiendo un crecimiento social y, en ese sentido, ser un aporte valioso para la comunidad.

Es importante señalar que el acceso a vehículos privados se impuso, e incluso banalizó, en los países desarrollados, los cuales impulsaron esta tendencia con acciones y con sus prácticas económicas. Esto llevó a los países en vía de desarrollo a adoptar gastos similares, sin apoyar su infraestructura para soportar los incrementos en los parques automotores. En respuesta, muchos gobiernos aumentaron las capacidades de sus sistemas de transporte público, pero no realizaron planeaciones correctas respecto a cantidades y tipos de transporte a implementar, lo que dejó de lado la evidente necesidad de ampliar la infraestructura vial para responder a este aumento de vehículos. Así pues, no debe existir una forma homogeneizada sino asequible para las personas que recurran al transporte público y acceder a los diferentes puntos de la ciudad. Se requiere, entonces, de una tarifación dividida que cubra todos los rangos de ingresos y se acomode a las capacidades económicas de cada sector. Por otro lado, en los procesos de planeación de cada uno de estos sistemas, es imperativo considerar los distintos medios de transporte que lo conformarán, para optimizar las cualidades de cada uno, según las zonas geográficas que se vayan a incluir en el alcance del sistema. Estos medios integrados requieren, igualmente, una infraestructura de acceso y movilidad a pie y para personas discapacitadas, con limpieza, iluminación y una correcta administración por parte de la empresa encargada de la administración del STPM.

7.3. Modos de transporte agregados a la red

Con relación a la infraestructura eléctrica y urbana, se avanza hacia la caracterización de los diferentes modos de transporte que se pueden agregar a la red. Para el interés de este trabajo, se toman los modos de transporte alimentados con energía eléctrica. En este punto, se consideran dos tipos de vehículos: los que se conectan directamente a la red eléctrica vía catenaria y los que son alimentados a través de sistemas de almacenamiento. Estos últimos forman parte de todo el sistema de transporte multimodal, vinculados a partir de las estaciones de recarga correspondientes, las cuales se conectan a las SET respectivas y estas, a su vez, a la red de media tensión.

Para los nuevos modos de transporte que se quieran conectar al sistema, se debe levantar información con datos primarios de otros operadores, en otras partes del mundo. Para cada modo de transporte se establecen sus características de tracción, vías de circulación, demanda estimada de energía, capacidad de transporte, condiciones topográficas para la vía de circulación, demanda estimada de pasajeros, entre otros factores relevantes. Esta indagación permitirá conocer la curva de consumo de potencia de cada vehículo alimentado en los puntos de carga o SET. Asimismo, facilitará el dimensionamiento adecuado de la red de suministro de energía eléctrica, su capacidad de crecimiento, por incremento de nuevas flotas o nuevos modos, y su respuesta ante posibles contingencias presentadas. Por otra parte, se toma el modo de transporte embarcación y motocicleta, como actores significativos dentro de los vehículos alimentados a través de sistemas de almacenamiento, pero que interactúan con todo el sistema de transporte multimodal mediante la conexión a las estaciones de carga y SET.

A continuación, se describen los diferentes modos de transporte y el impacto que tienen a nivel eléctrico y urbano para su agregación a la red multimodal. Agregar cada uno de estos modos a la red eléctrica implica un análisis de la demanda de potencia de cada vehículo, porque esto influye en el factor de cargabilidad de las SET y en la calidad de la potencia a nivel AC para media tensión. El análisis contribuye a inferir si se requiere, o no, modificar la infraestructura eléctrica existente o si, por el contrario, esta tiene la capacidad de suplir todos los modos de transporte.

- **Modo tren:** permite la interconexión en una ciudad o entre ciudades y es una alternativa para viajes medianos rápidos, pues alcanza altas velocidades y transporta una gran cantidad de peso, ya sea de material o de pasajeros. El tren representa una carga con demanda variable debido a la continua frecuencia de arranques y paradas del sistema. La red eléctrica debe suplir la demanda del sistema de trenes y de los demás modos de transporte; también, soportar la reversión de flujos de potencia, producto del frenado regenerativo de los vehículos, provocado por la actuación de los motores eléctricos. En un sistema convencional de trenes de 1500 VDC, el frenado regenerativo de los motores eléctricos puede ocasionar que la tensión se eleve. Para contrarrestarlo, el sistema disipa esa potencia a través de resistencias, para garantizar los niveles de tensión adecuados. No obstante, este proceso se puede intercambiar por un sistema de almacenamiento, a través de ultracapacitores o baterías, que permita utilizar la energía almacenada en momentos en los que se tenga una alta demanda de trenes en operación.
- **Modo tranvía:** cuenta con una menor capacidad para transporte de pasajeros, respecto al modo tren, sin embargo, es muy buena alternativa para corredores en la ciudad que

cuentan con demanda intermedia de usuarios. Una ventaja radica en que las personas se pueden transportar con las mismas condiciones de un tren elevado o subterráneo, pero, en este caso, sobre rieles a nivel del suelo. Similar a los trenes, el tranvía, al utilizar motores eléctricos y tener una flota de vehículos en constante frenado y arranque, presenta un frenado regenerativo que puede causar problemas de tensión en la red. Para estos casos, resulta mucho más favorable incrementar la cantidad de vehículos en la flota de tranvías que no cuente con sistema de almacenamiento. Por ejemplo, una flota de siete tranvías es menos viable que una de doce para una SET, debido que, al tener más vehículos, se puede aprovechar con mayor probabilidad el frenado regenerativo de unos para el arranque de otros al mismo tiempo. Este modo de transporte representa una de las principales opciones al interior de una ciudad, en especial para recorridos cortos y que no requieren grandes pendientes en el trayecto. Puede ser, incluso, el punto de partida para cualquier pueblo o ciudad que aún no cuente con interconexión en sus modos de transporte, lo cual impacta positivamente a nivel eléctrico, cultural, social y ambiental.

- **Modo cable aéreo:** es uno de los principales sistemas para conectar comunas y zonas apartadas en urbes que presentan dificultades de transporte. Por la topografía de muchas ciudades, en especial con zonas montañosas, este tipo de sistemas resuelve, en gran medida, la movilidad de las personas y, además, genera un impacto positivo en los niveles de seguridad y de cultura social. Las líneas del cable aéreo son arrastradas por un solo motor de tracción. En este caso, la demanda de potencia es muy constante y cambia únicamente con la carga de personas. Mover pasajeros en topografías quebradas requiere subir y bajar individuos desde zonas montañosas, lo cual impacta la demanda de energía por la forma en que se movilizan los usuarios. En general, en la mañana, las personas descienden hacia la ciudad para trabajar y la energía consumida por el sistema es para frenar el motor que tracciona el cable que sostiene las cabinas, debido a la descompensación causada por estas que ascienden con poco peso y las que descienden llenas de personas. En la tarde, el consumo de energía es mayor, porque el motor de tracción realiza el trabajo de mover el cable subiendo pasajeros y superando la pendiente de la montaña. Debido a que no es un modo de transporte con alta carga variable, el frenado regenerativo de los motores causa menor impacto en la tensión, en comparación con los modos de tren y tranvía; sin embargo, también tiene la posibilidad de utilizar sistemas de almacenamiento.
- **Modo bus-trolebús:** es un tipo de transporte urbano empleado para trasladar a numerosos pasajeros simultáneamente, que realiza un recorrido fijo desde los barrios hacia la ciudad y viceversa. Se puede implementar a través de los conocidos trolebuses, conectados directamente a una línea de alimentación, similar al modo tren o tranvía. Al ser un sistema de transporte masivo, es más eficiente utilizar sistemas de alimentación conectados a la red eléctrica, en lugar de buses con sistema de almacenamiento con batería. Adicionalmente, representa una de las principales alternativas para contribuir a la mejora ambiental en la ciudad, porque, al transportar una gran cantidad de personas, disminuye el uso de vehículos convencionales de combustión. El trolebús no requiere vías especiales o carriles en la calzada, como sí lo hace el tranvía, por lo cual se considera un sistema más flexible y con mayor versatilidad para los trayectos. De igual modo, tiene la ventaja de que se puede implementar en paralelo con un sistema de almacenamiento y pasar a ser usado en tramos en los cuales no se puede instalar la catenaria.

- **Modo embarcación:** se puede considerar como un sistema de transporte masivo y, en algunas ocasiones, un sistema particular. El uso de embarcaciones eléctricas se basa en desplazamientos cortos y medianos, dentro de un sistema relativamente pequeño, para transporte de carga o de pasajeros. Si bien los modos mencionados (tren, tranvía, cable aéreo y bus) corresponden a sistemas conectados directamente a la red eléctrica, la embarcación es un modo de transporte que se incluye dentro de todo el sistema multimodal, pero que emplea otra fuente de alimentación, basada en sistemas con baterías, para poder movilizarse y hacer su recorrido convencional en el agua. Para este caso, se debe planear de forma cuidadosa la distribución de las estaciones de recarga, teniendo en cuenta los trayectos realizados por cada vehículo de la flota y la información de la batería, con el fin de analizar la viabilidad de los recorridos a realizar. Este análisis permite inferir si con la infraestructura eléctrica existente se puede realizar la carga de toda la flota de vehículos o si, por el contrario, se debe hacer cada una en periodos diferentes.
- **Modo motocicleta:** corresponde a un sistema particular para el transporte de una o dos personas o, en algunas circunstancias, para cargas pequeñas (motocarros). En general, representa una alternativa ligera y rápida, de fácil uso y manejo alrededor de una ciudad o entre ciudades. Integrar motocicletas eléctricas o híbridas al sistema de transporte multimodal tiene características similares a las descritas en el modo embarcación, dado que no está conectado directamente al sistema eléctrico y, en su lugar, utiliza sistemas de almacenamiento con baterías. Por ello, se debe tener un planeamiento estratégico de las estaciones de recarga, puesto que para las motocicletas se usan baterías de menor tamaño, en comparación con una embarcación eléctrica. Es posible tener métodos de carga (lenta) de manera residencial, por lo que se debe analizar la viabilidad de la agregación de más vehículos y de las SET correspondientes, para determinar su impacto en la red de media tensión. Este se puede considerar como uno de los modos de transporte agregados con mayor número de vehículos en la flota, pues, al ser de menor tamaño, se pueden transportar fácilmente y, en la mayoría de los casos, por cualquier recorrido.

7.4. Proyección de la demanda e impacto en la red media tensión

La proyección de la demanda de los modos agregados a la red busca encontrar el nivel de impacto de los sistemas en la red de media tensión sobre la cual se instalarán todas las subestaciones de alimentación (SEA) y subestaciones de tracción (SET). Por esto, es indispensable analizar el flujo de cargas dentro del sistema eléctrico propuesto para determinar la viabilidad de la proyección.

7.4.1. Construcción de la red de media tensión y flujo de cargas en AC

En esta etapa, se identifica la topología de la red de alimentación del sistema de transporte, se conoce la frontera comercial con el operador o comercializador de red y cómo será o está distribuida esta red a lo largo del sistema. Para este fin, se diseñan mediciones cuando es una red existente, con el propósito de conocer su estado actual.

Con esta información, se detalla la red de media tensión y la topología de alimentación; es importante tener en cuenta que este diseño solo se puede realizar en sistemas ya existentes; cuando se habla de nuevos modos o sistemas, es necesario afinar un modelo de simulación que pueda ser comparado con sistemas similares ya operativos.

Para hacer la agregación, segundo a segundo se adicionan los datos de demanda de cada uno de los modos de transporte. Este proceso debe efectuarse a través de herramientas de simulación, porque se debe conocer el flujo de potencia en todas las cargas hacia la red y viceversa. Este modelo representa la red de media tensión del sistema multimodal, conformado por todas las subestaciones de alimentación y todos los equipos de conexión. El análisis permite conocer la capacidad actual de cada sistema y su posible proyección para ampliar nuevos modos o flotas con modos existentes.

Teniendo en cuenta que las SEA se construyen con la capacidad de alimentar el material rodante del sistema de transporte multimodal, se debe estimar la demanda de energía que estas deben suministrar para todos los modos mencionados: tren, tranvía, cable aéreo, trolebús; y las SET correspondiente para las estaciones de carga de los modos embarcación y motocicleta. Las SEA deben soportar la suma de las potencias máximas demandadas por cada sistema en transporte en las SET. No obstante, los picos de demanda de cada uno de los modos no se presentan de manera simultánea en el tiempo, es decir, es poco probable que sucedan las máximas demandas de potencia de los sistemas de transporte al mismo instante.

7.4.2. Validación del impacto de la demanda fluctuante en la red de media tensión

Gracias a la simulación detallada, a nivel de vehículo, y teniendo en cuenta los despachos y rutinas de recarga reales, es posible tener la demanda instantánea de potencia a nivel de los nodos de tracción y carga. Utilizando flujos de carga, que pueden ser en DC o AC, dependiendo del tipo de alimentación y las características del sistema de alimentación, se obtienen los perfiles detallados de tensión en cada uno de los nodos. Esto permite validar el cumplimiento de los requerimientos del estándar que los rige sobre “Tensiones de alimentación de las redes de tracción”, los cuales deben cumplirse para operación en condición normal y para la condición degradada que sea establecida, según los requerimientos de confiabilidad que sean solicitados. La condición degradada supone que una subestación de tracción debe asumir, parcialmente, la demanda de una subestación aledaña, de manera que se presentan niveles de severidad más altos.

A partir de las inyecciones de potencia que se dan desde los nodos de tracción hacia los nodos de media tensión, se obtienen los perfiles de tensión de la red. El análisis particular de cada nodo de conexión, asumiendo que la emisión de perturbaciones desde las otras SET es nula, se puede contrastar con los requerimientos de la etapa 1, de la sección “Planeación estratégica de la infraestructura para la alimentación de sistemas de transporte multimodales”, de evaluación de la normativa, ya mencionada, de compatibilidad electromagnética. En este momento, solo se requiere verificar que la fuente sea capaz de asumir la potencia a ser maniobrada, lo cual puede hacerse de manera simplificada, asumiendo que el cambio relativo de tensión es aproximadamente igual a la relación entre el delta de potencia aparente y la potencia aparente de cortocircuito de la fuente.

A partir de esto, el estándar mencionado define los límites de emisión de perturbaciones, según la magnitud de los cambios de tensión y la frecuencia en que son producidos.

Con las curvas de tensión obtenidas para cada nodo, es posible medir la profundidad de los cambios relativos de tensión, así como la frecuencia con la que se presentan y, con ello, validar el cumplimiento de los requerimientos del estándar. Sin embargo, de manera general, estos cambios, producidos por la operación de los trenes, tienen comportamientos que podrían considerarse casi periódicos, tanto en magnitud como en frecuencia de ocurrencia. En consecuencia, una mejor estimación del impacto de la operación de la SET, en el nodo de media tensión, debe hacerse utilizando una medición de los indicadores de severidad de *flicker*, como lo son los de percepción de corto plazo PST y de largo plazo PLT, los cuales se calculan por medio de un análisis estadístico del nivel instantáneo de *flicker* (IFL).

El algoritmo, condiciones y especificaciones de medida de los indicadores de severidad de *flicker*, a partir de la estimación del IFL, está estandarizado por la normativa respecto a compatibilidad electromagnética. El PST evalúa el IFL en períodos de diez minutos, lo que es apropiado para SET, en los que las frecuencias son de hasta tres minutos, sin contar los efectos de las subestaciones vecinas. Se resalta que, para una evaluación global del sistema multimodal, debe usarse el PLT que evalúa períodos de dos horas. Las fluctuaciones de tensión con un periodo menor a un segundo, que pueden tener origen en la operación de los convertidores de potencia como la *chopper* de los trenes, son eliminadas por transformadores de las subestaciones de alimentación y no aparecerán en el nivel de media tensión. Cuando en la simulación en el nivel de AC son tenidas en cuenta las inyecciones de todas las subestaciones de tracción en toda la red multimodal, se considera que se cumple con los requisitos de la etapa 2 del estándar de compatibilidad electromagnética, sobre la evaluación global de las perturbaciones.

Este proceso de análisis de fluctuaciones para la red de media tensión permite identificar los nodos débiles dentro de la red o aquellos donde se presentan las mayores fluctuaciones. Además, se debe verificar que dichas fluctuaciones se encuentren dentro de los valores permisibles por la normativa. Con este análisis, después de obtenidas las curvas de carga y su estado, se valida que las capacidades de la red de suministro de energía cumplan con la normativa pertinente y, de esta forma, se da por validada la metodología propuesta.

7.5. Proyección de la demanda para la agregación de nuevos modos

La proyección de la demanda de energía es de vital importancia, ya que brinda a la empresa de transporte una señal de cómo crecerá su consumo de energía a lo largo del tiempo y qué acciones tendrá que realizar para atender dicha demanda. Existen dos metodologías principales para esto. Las series de tiempo que estima la demanda futura a partir de los valores históricos y asume que los factores que afectaron la demanda en el pasado se repetirán en el futuro. Se emplea en sistemas en los que la densidad de carga permite una infraestructura compuesta de una sola fuente de alimentación para atender la demanda. En Antioquia se aplica en el caso de los sistemas regionales. La segunda, la proyección espacial de la demanda, es una estimación de demanda futura a nivel geográfico.

Es utilizada en sistemas en los cuales la densidad de carga requiere de una infraestructura compuesta de múltiples fuentes de alimentación para atender la demanda. En Antioquia se puede aplicar en el casco urbano de los municipios del Valle de Aburrá, aunque no existe un modelo o método que permita realizar una tendencia fiel de la variable.

Para el caso de la planificación del crecimiento de los sistemas de transporte públicos de pasajeros, esta proyección está asociada a los cambios del entorno urbano y al desarrollo de las políticas territoriales, como son los planes de ordenamiento territorial (POT). Para el caso de los países en desarrollo exigen, generalmente, una ampliación de la oferta de transporte público que garantice cobertura y promueva el desarrollo urbano y social. Este incremento de la oferta exige lo mismo para la capacidad de las líneas de transporte existentes, así como la incorporación de otras tecnologías de transporte, para constituir, de manera ordenada, un sistema de transporte multimodal, como una red articulada e integrada por diferentes tecnologías de transporte.

El consumo de energía está directamente relacionado con la cantidad de pasajeros que se puedan mover en el sistema de transporte. Por esta razón, el insumo principal para la proyección de la demanda que verá el sistema serán las directrices tomadas desde las alcaldías de la ciudad, pues estas determinarán las entradas de los nuevos proyectos que se conectarán a la red multimodal y los corredores que aportarán nuevos pasajeros a la red de transporte. La operación interconectada de vehículos y modos con demandas altamente fluctuantes y regenerativas, característicos de la tracción eléctrica, permite aprovechar la diversificación de la demanda. De esta manera, la capacidad instalada del sistema, por pasajero transportado, es supremamente baja en comparación con sistemas basados en baterías o modos aislados entre sí.

La proyección de la demanda está directamente ligada con el crecimiento y la interconexión de todo el sistema de transporte multimodal, a partir de todos los modos agregados a la red, ya que cada uno de ellos conlleva un gran número de beneficios sociales, ambientales y culturales. Teniendo en cuenta la planificación estratégica de la infraestructura eléctrica y urbana de toda la red multimodal, es mucho más fácil la implementación de nuevos proyectos de expansión, cambios de modos existentes, agregación de nuevas flotas o de nuevos modos, siempre analizando el impacto en las SET y en el flujo de potencia, desde las cargas hacia la red de media tensión. La metodología propuesta en la sección de “Planeación estratégica de la infraestructura para la alimentación de sistemas de transporte multimodales” permite analizar, paso a paso, todos los proyectos de expansión o agregación en las redes de transporte existentes, con el objetivo de analizar y garantizar la viabilidad técnica y urbana en el sistema eléctrico.

7.6. Estructuración de un sistema de transporte multimodal en el municipio de Magangué

Aplicando los conceptos de la metodología propuesta para agregar nuevos modos de transporte a la red, se estableció un caso de estudio para la estructuración de un sistema de transporte multimodal en el municipio de Magangué, Bolívar (zona de injerencia del proyecto Energética 2030). Este, por su infraestructura y sistema, es un foco para integrar nuevos modos y rutas de transporte que permitan interconectar cada vez más a las personas que habitan allí.

7.6.1. Alternativa de mejoramiento de un sistema de transporte

Una red multimodal en el municipio de Magangué, sumado a la apropiación y correcta gestión de entidades como la Secretaria de Planeación, las empresas de transporte, el fondo y la inspección municipal de tránsito y transporte, así como las entidades municipales y gubernamentales, pueden solucionar los problemas de transporte que existen actualmente en este municipio y potenciar, así, su desarrollo. Esto, aprovechando que allí pueden desarrollarse tres modos de transporte de manera fructífera, bajo una buena planeación, pues, como se mencionó, Magangué tiene una ubicación geográfica estratégica a nivel fluvial y terrestre y también cuenta con un aeropuerto, que empezó una remodelación en 2020, pero que actualmente desarrolla actividades; así que el modo aéreo sería una opción que podría hacer parte del sistema multimodal.

Para 2030, la dirección de planeación afirmó que Magangué será reconocido en Colombia como un municipio organizado, seguro y pujante, sin pobreza absoluta y en paz, desde el punto de vista social, así como el principal puerto fluvial intermodal de transporte de carga y de pasajeros del país. Lo anterior se ajusta bien a los beneficios que brindaría la implementación del sistema de transporte multimodal, entre ellos: ser una alternativa de transporte urbano seguro, confiable, eficaz y asequible a toda la población; lograr una organización de la ciudad que trae consigo el mejoramiento estético y el atractivo turístico; una disminución de la accidentalidad y la inseguridad al suplir las actividades del transporte ilegal; una reducción de la contaminación, al incluir vehículos de transporte eléctricos; hacer más fácil la comunicación intermunicipal y, por supuesto, desarrollar la economía a través del transporte de carga y demás actividades comerciales.



Figura 7.1.
Propuesta para
ruta de tranvía en
Magangué

Fuente: elaboración propia.

Al identificar los principales problemas y ventajas de Magangué, puede plantearse qué tipo de vehículos representarían un impacto positivo y, de esa manera, ser más viables para una versión inicial de un sistema multimodal. Para el modo fluvial, está la incorporación de embarcaciones para pasajeros, cómodas y adaptadas a este fin, así como para el transporte de mercancía, pero con la particularidad de ser de tipo eléctrico y, por qué no, que haga uso de la energía fotovoltaica, un recurso muy potente en la región. Para el modo terrestre, serían de utilidad diferentes vehículos, uno de ellos es el tranvía, el cual podría atravesar los corredores más importantes de la ciudad, como el malecón al río, por ejemplo, y ser un modo de transporte ágil y seguro para la comunidad; de manera similar, podría llegar a ser un atractivo turístico, que les permite a viajeros recorrerla y observarla cómodamente. En la figura 7.1 se muestra una propuesta de la ruta que podría tomar el tranvía, sus posibles estaciones y los datos de la misma. De la mano del tranvía, podrían incorporarse buses eléctricos como reemplazo de los buses y microbuses a combustión, que circulan actualmente en mal estado por la ciudad. Los buses eléctricos tendrían rutas establecidas que cubrirían todo el casco urbano, comunicando el centro de la ciudad con los diferentes barrios.

Aunque las necesidades de transporte de la población se cubrirían con el tranvía y los buses eléctricos, no puede menospreciarse la importancia que han tomado los vehículos motorizados para movilizar personal y pasajeros en el municipio; de ahí que su completa eliminación sería difícil y probablemente no contaría con el apoyo de los habitantes. Resultaría más factible una alternativa que haga parte del sistema de transporte multimodal y que cumpla con las características de los vehículos motorizados, pero con la particularidad de ser motocicletas híbridas, es decir, que utilizan un sistema de propulsión híbrido, combinando un motor de combustión interna y un motor híbrido, lo cual reduciría la contaminación que generan estos vehículos. Las motos y sus estaciones de carga estarían a las afueras de la ciudad, con el fin de que no causen congestión y los problemas de transporte que causan las motos actualmente. El punto donde se integran todos los subsistemas es en la estación de carga, allí se da la interacción con la red de energía y los subsistemas susceptibles a ser alimentados con energía eléctrica.

Por último, estaría el tren de cercanías, una iniciativa que se propuso hace varios años y que pareció tener una buena acogida por parte de los gobiernos departamentales y el Gobierno nacional, por los beneficios comerciales que aportaría para la zona Caribe y todo el país. Lo anterior, al permitir el transporte desde y hacia la zona portuaria, de cargas de diferentes productos agrícolas, agroindustriales y de otros sectores, además del transporte de pasajeros.

7.6.2. Infraestructura de distribución de energía eléctrica

La implementación de un sistema de transporte multimodal alimentado eléctricamente, sin embargo, necesita que la red eléctrica tenga la capacidad y garantice el suministro de energía, puesto que los sistemas de tracción y las estaciones de carga demandan altas potencias de la red en periodos de tiempo específicos (Diez *et al.*, 2017). Por consiguiente, se requiere analizar las condiciones de la red de media tensión del municipio, al igual que la demanda de energía. Este es un elemento en constante crecimiento ligado al crecimiento poblacional, por lo que la demanda debe ser correctamente pronosticada

para conocer en qué medida se debe aumentar la generación y logre ser atendida. Con este estudio, se busca reducir el riesgo de fallas en las redes y los tiempos en los que no se pueda atender la demanda, previniendo sobrecargas y evitando fallas de los equipos o apagones que implican grandes pérdidas. A partir de esta predicción, se pueden determinar las intervenciones a la infraestructura eléctrica a realizarse, como la construcción de nuevos circuitos o subestaciones o, si se existe una infraestructura holgada que pueda aprovecharse por nuevas tecnologías, como el almacenamiento de energía.

El estado de la red de distribución de energía eléctrica en la región de estudio no parece favorable. La información es poca, pero los indicadores de confiabilidad de una red de energía SAIFI (frecuencia media de interrupción por usuario en un periodo determinado) y SAIDI (tiempo total promedio de interrupción por usuario en un periodo determinado) revelan el estado crítico de la calidad del servicio. Esto se corrobora con los reportes en medios de comunicación sobre esta problemática, así como las encuestas y grupos focales, en los que se preguntó a los usuarios de la red sobre la percepción de la calidad del servicio prestado; las respuestas revelaron el inconformismo de los usuarios, quienes manifiestan sufrir frecuentes y continuos cortes de energía que perjudican sus actividades diarias. Esto dificultaría la implementación de un sistema de transporte multimodal alimentado eléctricamente, además de que deben considerarse las características técnicas de la red. No obstante, en 2020, la región cambió de operador de red: de Electricaribe a Afinia, empresa que promete una mejora gradual y significativa del servicio de energía para hacerlo más confiable en los próximos años. Además de las malas condiciones operativas de la red eléctrica, existen otras dificultades como la adaptación de las zonas urbanas, que incluye el mejoramiento de las vías terrestres para los vehículos y la adecuación de la infraestructura urbana para la instalación de estaciones de carga y de los carriles y estaciones del tranvía y el tren. También, se debe tener en cuenta el fenómeno de piratería, que sería un impedimento para la buena acogida del sistema multimodal por parte de la población.

El sistema de transporte público de Magangué demanda una mejora efectiva y con buena planeación, que corrija las deficiencias actuales y supla las necesidades de la población del municipio, a la vez que potencia el desarrollo comercial, económico, turístico y social de la región y el país. Esto puede lograrse implementando un sistema de transporte multimodal con tres tipos de transporte (terrestre, aéreo y fluvial), una cualidad difícil de conseguir en otra región y que representa un gran potencial comercial, sumado a su conveniente posición geográfica. No obstante, lograr un sistema de transporte multimodal alimentado eléctricamente implica mejorar la infraestructura eléctrica, que, no solo debe tener la capacidad de ofrecer un servicio de energía de calidad para la demanda actual, si no, asimismo, garantizar el suministro de la energía requerida por los nuevos vehículos que se alimentarían de la red. Un factor que ayudaría a la red sería la integración de energías renovables, como la solar, un buen recurso en la región. Además, se debe realizar una adaptación de la infraestructura urbana y, como una opción no fundamental pero sí válida, realizar capacitaciones a la población para que entiendan los beneficios que pueden recibir con este desarrollo, lo acojan y se apropien de él para sacarle el mayor provecho.

En general, la implementación de un sistema de transporte multimodal trae consigo un gran número de cuestionamientos, desde su factibilidad técnica hasta económica.

Esto debido, en gran parte, a la falta de apropiación de conocimiento sobre la energía y la movilidad eléctrica, lo que lleva a pensar en el gran reto de promover cada vez más la movilidad sostenible en el país como objetivo principal de la descarbonización y de la formación académica y social. Cualquier sistema de transporte público masivo, junto con modos allegados de transporte, son susceptibles de agruparse en sistemas de transporte multimodal, que integre la infraestructura urbana y social actual e igualmente favorezca la movilidad entre diferentes puntos de forma óptima. El principal reto se basa en el análisis del entorno de cada municipio, ciudad o región, con el propósito de encontrar los modos de transporte que mejor se adaptan a las necesidades sociales, algo que se ve afectado directamente por movilidad de personas, movilidad de transporte de carga, viajes intermunicipales, trayectos cortos marítimos o terrestres, etc.

7.7. Referencias

- American Public Transportation Association (2011). Light Rail Vehicle Procurement Request for Proposal (RFP). <https://www.apta.com/research-technical-resources/standards/procurement/apta-rt-lrt-gl-001-11/>
- Diez, A., Rodríguez, M., Arroyave D., Múnera, D., Restrepo, J. y Castrillón, L. (2017). A planning method for electric infrastructure to supply multimodal transportation systems. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 224, 213-224. <https://doi.org/10.2495/ESUS170201>

Soluciones de movilidad terrestre de carga

Christian Roviro Portilla Caicedo¹, Juan Pablo González Alzate¹, Iván Reinaldo Sarmiento Ordosgoitia², Jairo José Espinosa Oviedo¹

Resumen: el transporte de carga constituye uno de los pilares fundamentales del desarrollo económico de un país, conectando los bienes de consumo y los servicios con los clientes finales. En la actualidad, existen diferentes modos de transporte que prestan el servicio de carga, los cuales están altamente correlacionados con las necesidades comerciales y la topografía de las regiones. Así, pues, comprender las relaciones socioeconómicas, demográficas y geográficas de un espacio permite establecer un panorama del estado actual y futuro del transporte de carga y de su sostenibilidad ambiental y financiera. Este capítulo se divide en cuatro apartados: el primero es un contexto logístico en el que se enmarca el transporte; luego, se aborda el transporte de carga en el marco nacional en Colombia; la tercera parte se centra en el transporte de carga a nivel urbano, particularizando el caso del área metropolitana de Medellín; y, finalmente, se plantean las perspectivas del transporte de carga con impulsión eléctrica, enfatizando en el caso colombiano.

Palabras clave: transporte de carga; logística; sostenibilidad; última milla; electromovilidad.

1 Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL), Universidad Nacional de Colombia, carrera 65 n.º 59 A - 110, Medellín, Colombia. Correo electrónico: crportil@unal.edu.co; jpgonzaleza@unal.edu.co; jespinov@unal.edu.co

2 Grupo de Vías y Transporte (VITRA), Universidad Nacional de Colombia, carrera 65 n.º 59 A - 110, Medellín, Colombia. Correo electrónico: irsarmie@unal.edu.co

8.1. Importancia del transporte terrestre en el ahorro de costos logísticos

La cadena de suministro se encarga de las operaciones necesarias para que un producto llegue al cliente final, es decir, gestiona los procesos desde el almacenamiento y distribución hasta los proveedores y clientes. Dentro de esta cadena, el transporte desempeña un papel fundamental, pues moviliza las materias primas a los centros de producción (fábricas), los productos a los centros de distribución (almacenes) o, también, los bienes y servicios directamente a los clientes finales. Particularmente, la logística, como parte de este proceso, es responsable de que el producto final llegue a tiempo y en buenas condiciones al cliente.

Con el fin de medir la eficiencia logística de un país, el Banco Mundial propuso el Índice de Desempeño Logístico (LPI, por sus siglas en inglés) para evaluar, entre otras cosas, el proceso de despacho de aduanas, la infraestructura del comercio y el transporte, la competitividad de los precios, la calidad de la logística, el rastreo y los tiempos de entrega de los envíos. El LPI evalúa la competitividad logística de 160 países en una escala de 1 (peor) a 5 (mejor). La figura 8.1 muestra la comparación del LPI a nivel mundial en el año 2018 (último estudio realizado). En esta, Colombia tiene una puntuación de 2,94 sobre 5, con un valor cercano a países como Ecuador (2,88), Brasil (2,99) y México (3,05). Además, en esta medición, Colombia ocupó el puesto 58, entre 160 países y se ubicó en el mismo intervalo que la mayor parte de Suramérica, Rusia y Egipto.

Esta medición ha sido realizada desde 2007, lo que permite evaluar la evolución histórica del desempeño logístico de Colombia. La figura 8.2 destaca los datos históricos del LPI para el país (en línea azul y eje de la izquierda) comparado con el valor medio de los países de América Latina y el Caribe (en línea verde, eje izquierdo). Como es evidente, el último año medido (2018) representó la mejor ubicación en el listado (en línea amarilla y eje de la derecha) y el mejor LPI (5,6 % por encima de la media de Latinoamérica y el Caribe). Debido a la pandemia de la covid-19, los datos no han sido actualizados para 2020 y 2022. Sin embargo, un nuevo informe dará cuenta de la efectividad de las medidas de reactivación económica de cada nación.

De otra parte, el proceso logístico tiene un costo asociado a actividades como transporte, almacenamiento, administrativos e inventarios. En Colombia, este supera el 12 %, mientras que en países desarrollados es de un solo dígito. No obstante, los mayores costos están asociados al transporte, almacenamiento y los inventarios. En la última Encuesta Nacional Logística (ENL), la participación de estos tres últimos superó el 73,9 % del coste logístico total (Departamento Nacional de Planeación [DNP], 2020). En particular, el transporte tiene un peso importante en el precio final de los productos. Esto se evidencia en la figura 8.3, que presenta los datos históricos de la participación del transporte (barra azul) y del costo logístico (barra verde) respecto al costo sobre las ventas para la ENL (DNP, 2008, 2015, 2018, 2020). En cuanto al costo logístico total, es claro que, desde 2008 a 2020, se ha reducido en más de tres puntos porcentuales, pasando de 15,7 % a 12,5 %; en tanto el costo de transporte se redujo en dos puntos, pasando del 6 al 4 %. Cabe notar que, en 2008, el costo de transporte representaba el 37 % del total; para 2020, fue solo del 30,7 %.

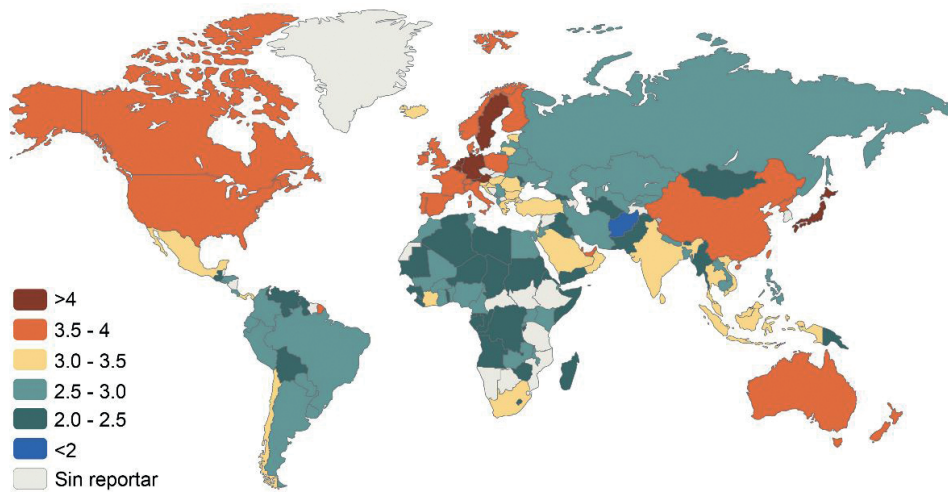


Figura 8.1.
Comparación del Índice de Desempeño Logístico (LPI) en el 2018

Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (2018).

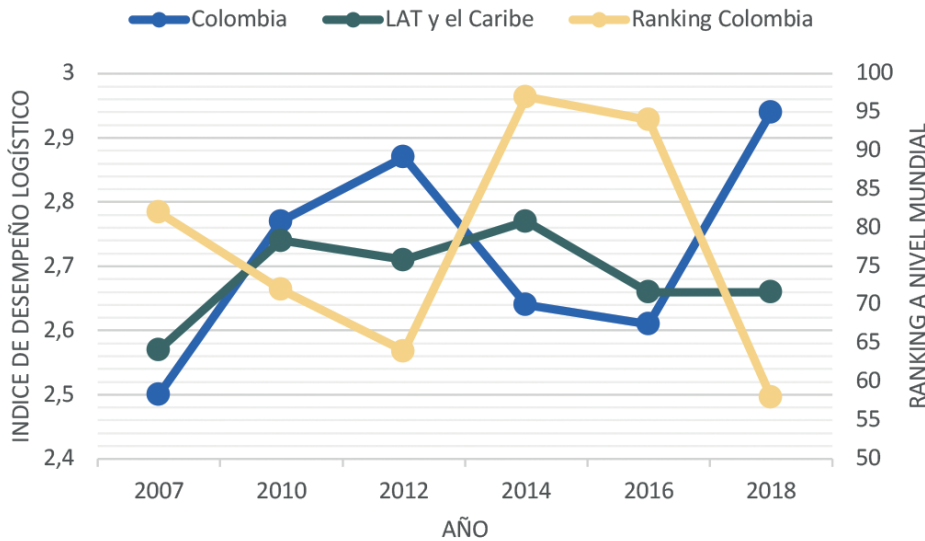


Figura 8.2.
Histórico comparativo del Índice de Desempeño Logístico (LPI) para Colombia, Latinoamérica y el Caribe entre 160 países

Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial (2018).

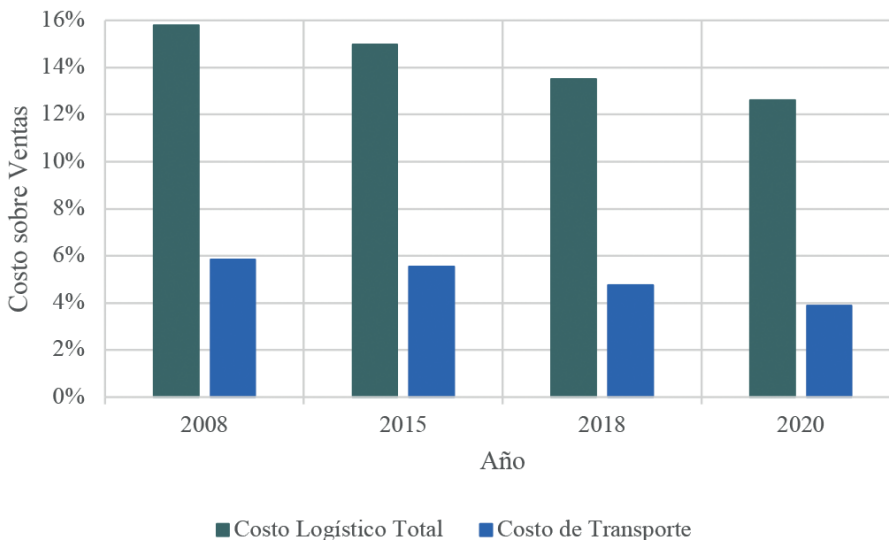


Figura 8.3.
Histórico comparativo del costo logístico total y el costo de transporte

Fuente: elaboración propia a partir de datos de DNP (2008, 2015, 2018, 2020).

La escogencia del modo de transporte adecuado (aéreo, marítimo, terrestre o fluvial) para ejecutar las tareas logísticas dependerá, en cada caso, de la distancia entre el origen y el destino inicial, así como de la oferta disponible y el destino final del transporte. Sin embargo, según la ENL de 2020 (DNP, 2020), para el caso colombiano, el servicio de transporte terrestre fue considerado por el 87 % de las empresas como el de mayor nivel de necesidad para sus operaciones de carga; en consecuencia, sigue siendo imprescindible en el país. Esto implica un compromiso efectivo con el medio ambiente que permita la sostenibilidad de las regiones, del país y del planeta.

Debido a la necesidad de cuidar el planeta, desde la ENL de 2018 se identificó la logística verde dentro de la prospectiva de los servicios y se plantearon seis acciones que generarían un impacto positivo en el medio ambiente. Una de ellas era el uso de vehículos alternativos (eléctricos, bicicletas, etc.). Para 2018, el 51 % de las empresas aseguraron haber implementado alguna de las acciones y, particularmente, el 25,1 % lo hicieron sobre el uso de vehículos alternativos, con una participación mayoritaria del 25,9 % de las microempresas. En la ENL 2020, el 51,9 % de las empresas realizó alguna medida de logística verde, pero esto solo representa 0,9 puntos más que la encuesta anterior. Por otro lado, el uso de vehículos alternativos bajó al 7 % (18,1 % menos que en 2018) y pasó de ser la tercera acción más importante a la quinta. La siguiente sección desarrolla el tema del transporte terrestre de carga a nivel nacional a través de sus corredores logísticos.

8.2. Transporte de carga nacional: corredores logísticos

Con el fin de superar los retos con los que cuenta el transporte de carga en Colombia, los esfuerzos se han encaminado a la construcción de una red logística intermodal que aproveche las ventajas de transporte que ofrece cada región. En este sentido, según el Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes, 2020), se busca modernizar la infraestructura de transporte terrestre, en especial, el modo carretero (concesiones viales de cuarta generación y vías terciarias), el mejoramiento y rehabilitación de la infraestructura fluvial y férrea, así como la renovación de puertos y aeropuertos. En ese orden de ideas, a pesar de que el modo carretero es versátil en cuanto al tipo de producto a transportar y fomenta la conectividad entre orígenes y destinos, este es mucho más costoso que el férreo o el fluvial, como puede apreciarse en la tabla 8.1.

A principios del siglo xx, se terminó la construcción de una red de ferrocarriles en Colombia, la cual permitió movilizar productos desde y hacia los puertos marítimos y fluviales del país. Así, se consolidaron los ferrocarriles del Pacífico (desde Cali a Buenaventura), Antioquia (de Medellín a Puerto Berrío), Magdalena Medio y el de Bogotá. Con la construcción de la red férrea del Atlántico en 1954, se conectó a todo el país en una red ferroviaria de más de 3400 km. No obstante, en la actualidad solo operan 1266 km, con 184 de ellos operados por privados (Mintransporte, 2020). Por otro lado, Colombia cuenta con una red fluvial de 24.725 km, de los cuales el 74 % (18.296 km) es navegable (Mintransporte, 2020). Entonces, y considerando la información consignada en la tabla 8.1, es clara la necesidad de reactivar las líneas férreas y, asimismo, fomentar la apropiación de las redes fluviales del país para consolidar un sistema logístico intermodal competitivo.

Tabla 8.1. Ventajas del transporte de carga fluvial y férreo

Para transportar 1600 toneladas se requiere:		Distancia para transportar una tonelada de carga con un litro de combustible	
Fluvial	1 barcaza	Barcaza	251 km
Férreo	40 vagones de 40 t	Tren	101 km
Carretero	80 camiones de 20 t	Camión	29 km

Fuente: (Conpes, 2020).

La figura 8.4 muestra el comportamiento histórico de los recursos presupuestales por modo de transporte. Para 2020, el 80 % se enfocaron en el modo carretero, que, para ese año, tuvo una participación del 84 % (DNP, 2020). Como se puede ver en la figura 8.4, para 2018, la asignación presupuestal del sector transporte apenas superaba los 4 billones de pesos, mientras que en 2020 este valor alcanzó los 6,9 billones, muy cerca del valor promedio de los últimos 10 años (7 billones). Por otro lado, los datos históricos del porcentaje de participación de los modos terrestre, férreo y fluvial en el transporte de carga del país, muestran que el terrestre es dominante, pero, cabe resaltar que el modo férreo, antes de 2013, tenía una participación cercana al 30 % (Mintransporte, 2020).

El Ministerio de Transporte, por medio del Decreto 1478 de 2014, estableció algunos lineamientos para la conformación de los corredores logísticos de importancia estratégica para Colombia. Estos incluyen, además del transporte terrestre carretero, ejes fluviales, así como redes férreas y aéreas. Dentro del modo carretero, la Resolución número 202203040002435 del 19 de enero de 2022, generada por la misma entidad, estableció siete corredores diferentes (ver figura 8.5): 1) Bogotá - Buenaventura - Ipiales, 2) Cali - Medellín - Cartagena, 3) Bogotá - Barranquilla, 4) Bogotá - Cúcuta, 5) Medellín - Bucaramanga, 6) Bogotá - Cali y 7) Bogotá - Puerto Asís. Es evidente que los siete corredores logísticos están conectados entre sí y permiten la entrada y salida de productos por los principales puertos del país: el de Buenaventura y Tumaco en el Pacífico, los de Cartagena y Santa Marta, y el de Barranquilla en el río Magdalena. Aunque en la figura 8.5 se detallan los modos carreteros, estos corredores también incluyen ejes fluviales sobre los ríos Cauca, Magdalena, Sinú, Nechí, San Jorge, Putumayo, Caquetá y Amazonas. Además, se pretende aprovechar algunos corredores férreos activos.

El movimiento de carga en Colombia tiene unos lugares de origen y de destino definidos. La tabla 8.2 expone las toneladas y el número de viajes considerando los departamentos de origen y de destino para el 2021. Este año, el Ministerio de Transporte reportó un total de 123,7 millones de toneladas movilizadas en 8,8 millones de viajes. Si se detalla la tabla, se observa que en los primeros cinco departamentos (Valle del Cauca, Cundinamarca, Antioquia, Atlántico y Bolívar) se origina más del 60 % de la carga de todo el país, en tanto los 10 departamentos reportados en la tabla originaron casi el 84 % del total. Cabe resaltar que en el departamento del Valle del Cauca se originó el 20,45 % de la carga y de esta el 48,25 % salió del puerto de Buenaventura (9,87 % del total del país). En cuanto al destino de la carga, el orden de aquellos que más reciben cambia un poco: los departamentos con ciudades principales (Valle del Cauca, Antioquia, Cundinamarca y Atlántico), con mayor población y consumo de productos, se sitúan a en los primeros lugares. Cabe aclarar que el destino de esta carga en algunos departamentos pudo haber sido movilizada con fines de exportación.

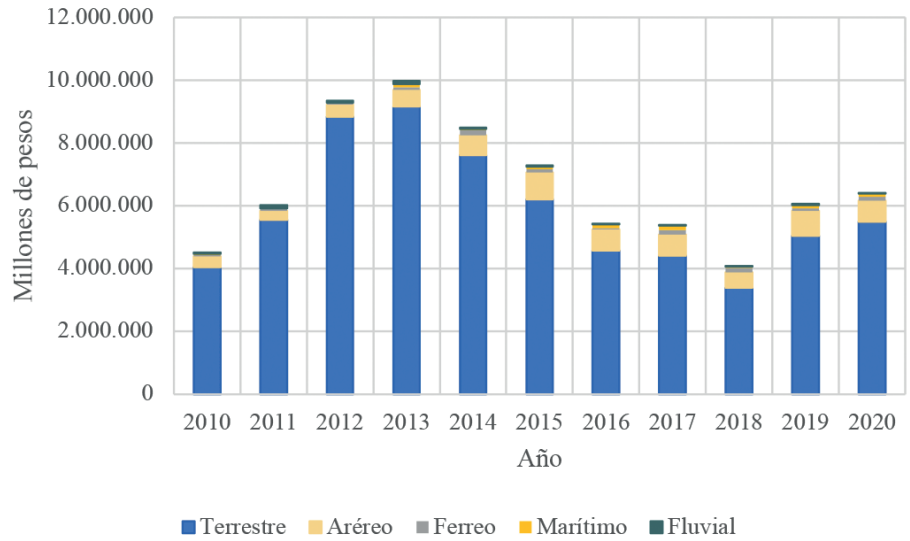


Figura 8.4.
Histórico comparativo de los recursos presupuestales comprometidos en el sector por modo de transporte

Fuente: elaboración propia a partir de datos de DNP (2020).



Figura 8.5.
Corredores logísticos en Colombia

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Resolución n.º 202203040002435 (Ministerio de Transporte, 2021).

- | | |
|---|--|
| ■ 1. Bogotá - Buenaventura - Ipiales | ■ 5. Medellín - Bucaramanga |
| ■ 2. Cali - Medellín - Cartagena | ■ 6. Bogotá - Yopal |
| ■ 3. Bogotá - Barranquilla | ■ 7. Bogotá - Puerto Asís |
| ■ 4. Bogotá - Cúcuta | |

Tabla 8.2. Toneladas y viajes realizados en 2021 por departamento, origen y destino

	Origen			Destino		
	Departamento	% Toneladas	% Viajes	Departamento	% Toneladas	% Viajes
1	Valle del Cauca	20,45	17,32	Valle del Cauca	15,47	14,06
2	Cundinamarca	14,57	17,13	Antioquia	13,95	14,41
3	Antioquia	10,80	13,45	Cundinamarca	12,03	12,07
4	Atlántico	8,01	8,33	Bogotá D.C.	9,40	11,65
5	Bolívar	7,47	5,64	Atlántico	7,90	6,45
6	Boyacá	5,13	2,75	Santander	5,68	5,93
7	Bogotá D.C.	5,04	9,80	Bolívar	4,78	4,73
8	Santander	4,79	5,40	Magdalena	3,44	2,59
9	Magdalena	4,19	2,26	Boyacá	2,78	2,55
10	Norte de Santander	3,22	1,94	Norte de Santander	2,24	2,24

Fuente: Mintransporte (2021).

En resumen, los corredores logísticos permiten conectar diferentes zonas del país con intereses económicos particulares, porque existen territorios en que se origina más carga que en otros, debido a las importaciones (puertos) o a la generación de bienes de consumo. Por otro lado, debido al número de habitantes de las grandes ciudades, estas se han convertido en uno de los principales destinos de la carga, al ser importantes centros de consumo. Finalmente, es claro que predomina el transporte carretero para movilizar carga; pese a esto, otros modos de transporte, como el fluvial y el férreo, están siendo explorados y recuperados, para construir una red de transporte de carga multimodal, que permita pagar los costos del transporte e impulse la competitividad del país. La siguiente sección desarrolla los principales retos y propuestas del transporte urbano.

8.3. Transporte de carga urbano

La caracterización del transporte de carga a nivel urbano depende del contexto socioeconómico, el nivel de desarrollo y las políticas públicas vigentes. Entonces, es preciso realizar un estudio de transporte de carga en cada región que permita identificar los viajes y la cantidad de carga transportada entre orígenes y destinos. Dentro de las ciudades, los distribuidores deben superar algunos retos como las zonas restringidas para la carga y descarga en ciertos horarios y demoras en sus tiempos de entrega debido a la congestión. Cabe anotar que, a pesar de que el transporte de carga impulsa la economía de las regiones, en sí mismo genera externalidades como congestión, contaminación, cambio climático, ruido, accidentalidad y desgaste de la infraestructura, lo cual va en detrimento de la calidad de vida de los ciudadanos (Ranieri *et al.*, 2018).

Estos estudios de transporte de carga generan evidencias para la toma de decisiones. Por ejemplo, en 2012, se efectuó una encuesta origen-destino para el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA, 2012) y dentro de los hallazgos importantes se encuentra: la falta de zonas de parqueo para las actividades de cargue y descargue, restricciones de circulación, falta de zonas de consolidación y desfragmentación de carga en la periferia del Área Metropolitana. Asimismo, falta de patios de contenedores en el norte del Valle, creciente congestión y falta de acuerdos para entregas nocturnas. Se propone,

para ello, horarios nocturnos para cargue y descargue, así como más eficiente y menor interferencia con los demás actores de la movilidad.

Sin embargo, para encontrar hallazgos como estos, un estudio de transporte de carga debería involucrar, como mínimo, los siguientes componentes:

- **Parqueo:** se deben gestionar las zonas y horarios de parqueo. Como punto de partida, un estudio de este tipo deberá identificar, al menos, los siguientes factores (Universidad Nacional y AMVA, 2017): zonas de estacionamiento regulado por cobro mediante parquímetro, cuantificación, caracterización y autorización de prestación del servicio de parqueadero público por privados y, por último, definición de zonas de prohibición de parqueo.
- **Caracterización de generación y atracción de carga:** se deben determinar las actividades que generan y atraen mayor carga: establecimientos comerciales (bares, restaurantes, centros comerciales, almacenes de cadena, etc.), grandes establecimientos (hospitales, centros educativos, universidades, etc.), plazas de mercado (mayoristas y minoristas), construcciones, canteras y escombreras o actividades de servicios y ventas en línea (*e-commerce*).
- **Inventario de vehículos:** se requiere construir un listado de los tipos de vehículos involucrados en el transporte de carga, para evaluar el aporte de estos a las emisiones móviles en cada ciudad.
- **Programación:** es necesario caracterizar los horarios de cargue y descargue, así como los tiempos promedio de ejecución (manual o automática) y el número de paradas. Esto, con el fin de gestionar adecuadamente las celdas de parqueo y los horarios permitidos.

Considerando estos puntos, es posible evaluar el estado del transporte de carga de una ciudad y realizar algunas recomendaciones que permitan estandarizar las buenas prácticas de transporte y mejorar la calidad y eficiencia del servicio. Un ejemplo es el estudio de transporte de carga realizado por la Universidad Nacional de Colombia, sede Medellín, y el Área Metropolitana del Valle Aburrá (Universidad Nacional y AMVA, 2017), el cual dejó algunas recomendaciones que incluso podrían ser aplicadas en otras ciudades. Entre ellas se encuentran: todos los edificios y empresas deben contar con zonas de cargue y descargue al interior de sus instalaciones; estos horarios deben estar por fuera de las horas pico (en la madrugada, a media mañana, media tarde y noche); la información de la flota vehicular debe estar completa y disponible; legislar sobre temas como vida útil y chatarrización de vehículos de carga; creación de centros y corredores logísticos dentro de un plan de movilidad de carga y logística; y, por último, establecer zonas de estacionamiento regulado para la carga.

Con las ventas en línea han aumentado, considerablemente, los viajes de carga de última milla, que es la etapa menos eficiente de la cadena de suministro y puede costar hasta un 28 % del total de la entrega (Ranieri *et al.*, 2018). Desde la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2015) se ha impulsado la idea de un transporte de carga urbano multimodal, que integre modos no motorizados, como las bicicletas de carga, sobre todo para solucionar los retos logísticos de la última milla de la cadena de abastecimiento. Entonces, una bicicleta estándar puede cargar hasta 25 kg, pero una modificada podría transportar entre 50 y 500 kg, dependiendo de la distancia y las condiciones del terreno, es decir, de la vía y la pendiente. Una de las principales ventajas del uso de la bicicleta radica en la facilidad de parqueo, el arribo a zonas de

difícil acceso, sus bajos costos de adquisición y mantenimiento y, sobre todo, que es un modo no motorizado que produce cero emisiones.

Además del uso de la bicicleta, la CEPAL estableció algunas recomendaciones para mejorar la sostenibilidad económica y medioambiental de la logística, entre estas: incluir la planificación de la logística urbana en la planificación a largo plazo de cada ciudad. Generar estudios sobre el transporte urbano de mercancías en términos del número de vehículos, repartos, características específicas de las entregas, etc; favorecer la interacción entre las esferas públicas y privadas, incluyendo a los académicos, para generar discusiones con todas las partes interesadas; financiar pruebas piloto para probar soluciones alternativas; mejorar la infraestructura logística; e incentivar a las empresas a que promuevan un tipo de logística sostenible.

En cuanto al transporte de carga en la última milla, se han reportado en la literatura varias alternativas que pueden ser clasificadas en cinco categorías (Ranieri *et al.*, 2018):

1. **Vehículos innovadores:** vehículos autónomos, eléctricos (incluyendo bicicletas, motocicletas y drones) e híbridos que reducen la emisión de gases contaminantes y de material particulado.
2. **Puntos o estaciones de proximidad:** depósitos que puedan almacenar la mercancía cuando el cliente no está en casa, lo cual reduce la insatisfacción y las distancias recorridas por los vehículos. Igualmente, estos pueden dejar la mercancía en dichos puntos durante horarios nocturnos, cuando el flujo de tráfico es menor.
3. **Logística colaborativa y cooperativa:** la idea es compartir los recursos, como vehículos e infraestructura, entre compañías, con el fin de reducir los viajes de última milla y sus externalidades. Con esta alternativa se genera un ahorro en los costos de inversión y de gestión que pueden ser aprovechados en otras etapas de la cadena logística. El reto de esta opción radica en la coordinación de las operaciones entre las empresas cooperantes.
4. **Optimización de la gestión de tráfico y ruteo:** con la implementación de nuevos sistemas de monitoreo usando Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS, por sus siglas en inglés) y el Internet de las Cosas (IoT, por sus siglas en inglés), es posible mejorar el desempeño de los procesos logísticos. Con la información disponible sobre la ubicación de los vehículos en tiempo real, es posible implementar algoritmos de ruteo variables, gestión de flota, así como seguimiento y control. También, si se cuenta con sistemas para el monitoreo del consumo de combustible, desgaste de neumáticos y frenos, entre otros, se pueden programar esquemas de mantenimiento correctivo y preventivo que ayuden a reducir costos operativos y alargar la vida útil de los vehículos.
5. **Innovaciones en políticas públicas e infraestructura:** es importante incluir ITS que mejoren las condiciones de tráfico y ayuden a reducir los tiempos de entrega de los bienes y las externalidades relacionadas con la congestión. Por consiguiente, las señales de tráfico requieren una gestión adecuada que se ajuste a la demanda variable por medio de sensores (cámaras de video, *bluetooth*, etc.), para generar efectos olas verdes sobre los corredores más demandados.

En conclusión, el transporte urbano de carga contribuye a los actuales problemas de contaminación y congestión de las ciudades. A su vez, la congestión impacta en la

calidad de los procesos logísticos, como demoras en la entrega; sin embargo, existen algunas alternativas para mitigar los impactos negativos de la congestión y hacia el medio ambiente y que, además, permitan mejorar la calidad del servicio. Estas alternativas incluyen: las Tecnologías de la Información y Comunicación (TIC), los ITS; también, por medio de la Industria 4.0 con el IoT, los vehículos eléctricos o no motorizados, la gestión inteligente de restricciones horarias y zonales, así como la regulación del parqueo y los acuerdos de cooperación. Lo más importante, no obstante, es contar con información sobre el escenario de la carga urbana en cada territorio, proveniente de un estudio de carga completo, con el fin de tomar las mejores decisiones. Para terminar, en la siguiente sección se presenta una descripción sobre el transporte eléctrico de carga y su panorama futuro.

8.4. Transporte eléctrico de carga

El transporte de carga urbano es esencial en el desarrollo económico y social de las ciudades; pero, es necesario poner en marcha cambios fundamentales en las políticas públicas y en la sociedad para gestionar de mejor manera el consumo de energía, la emisión de GEI y otras externalidades que ponen en riesgo la habitabilidad de las ciudades (CEPAL, 2015). En la actualidad, el material particulado con una dimensión inferior a las 2,5 micras (PM 2,5) es uno de los agentes contaminantes más nocivos para la salud humana (Kim *et al.*, 2015) y, por ello, es uno de los principales indicadores para medir la calidad del aire de un territorio. En Colombia, existe una regulación sobre la emisión de gases contaminantes, a través de las Normas Técnicas NTC 6218 y 6282 para vehículos, las cuales se aplican mediante la Revisión Técnico-Mecánica y de Emisiones Contaminantes (RTMYEC), que realizan en los Centros de Diagnóstico Automotor (CDA), bajo las directrices de la Resolución 6589 de 2019 del Ministerio de Transporte. En 2021, según la organización IQAir, que monitorea la calidad del aire de las principales ciudades del mundo, ciudades como Cota y Bogotá (Cundinamarca) superaron entre dos y tres veces los límites del PM 2,5, recomendados por la Organización Mundial de la Salud (OMS). Esto las sitúa en alerta amarilla, aunque el caso más preocupante se observó en Medellín, donde este valor fue superado entre 3 y 5 veces, por lo cual se le otorgó una alerta naranja.

Durante mucho tiempo, se consideró que la generación de PM 2.5 se debía, principalmente, al resultado de la combustión; sin embargo, recientes estudios, como el inventario de contaminantes de Bogotá publicado por la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, 2020), evidencian que las fuentes móviles no son el mayor aportante del PM 2,5. En este informe se muestra, por ejemplo, que las fuentes móviles aportan el 23 % del total, en tanto el material resuspendido, producto del polvo desprendido de calles sin pavimentar, de las llantas o de los frenos, constituye un 67 %. A pesar de esto, el transporte de carga en Bogotá generó el 42 % del total de contaminantes de las fuentes móviles, lo cual requiere especial atención.

En este contexto, los vehículos eléctricos de carga son una alternativa que ayuda a mitigar algunos de los problemas asociados al consumo de combustibles fósiles y aportar al Objetivo de Desarrollo Sostenible (ODS), relacionado con las ciudades y comunidades sostenibles. No obstante, estos no solucionan todos los problemas relacionados con la

congestión vehicular, como las demoras y el ruido, pero sí aportan positivamente a la disminución de las emisiones de material particulado y de gases contaminantes. Además, existen múltiples obstáculos de los vehículos eléctricos de carga que aún no han sido solucionados (Ranieri *et al.*, 2018), por ejemplo: mayor costo de adquisición, la autonomía y la disposición final de las baterías, los tiempos de carga, el acceso a estaciones de carga en carretera y el remplazo y disposición final de baterías.

Si bien el costo de adquisición es mayor que los camiones convencionales a diésel, el de mantenimiento es mucho menor (Davis y Figliozzi, 2013), lo que representa una oportunidad para el crecimiento del parque automotor eléctrico. Para cuantificar los costos operativos que los vehículos deben asumir en el transporte de carga por carretera, la tabla 8.3 compara la variación del Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC), por grupos de subgrupos de costos anuales publicados por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, 2021), con la variación anual del Índice de Precios al Consumidor (IPC). Dado que el IPC es un indicador de la inflación, se usó para comparar de mejor manera en cada componente del costo de transporte. Para cada año de la tabla 8.3, la variación de los subgrupos de costos que fueron iguales o menores al IPC están coloreados en verde, en tanto, las variaciones mayores que el IPC están en rojo. Las variaciones en cada subgrupo de costos han sido etiquetadas del 1 al 12 y corresponden a: VC1 – combustibles, VC2- servicios de estación, lubricantes, filtros y parqueadero, VC3 – llantas, VC4 - impuestos y revisiones, seguros y mano de obra (conductor (es) y ayudante(s)), VC5 - costo del vehículo y su apalancamiento, VC6 - peajes, VC7 partes y piezas del motor, caja, embrague y dirección, VC8 - partes y piezas del diferencial, rodamientos y retenedores, VC9 - partes y piezas de los frenos, VC10 - partes y piezas del sistema eléctrico e inyección, VC11 - partes y piezas de la suspensión y el tráiler y, por último, VC12w - servicios de mantenimiento y reparación. En ese orden de ideas, la migración al transporte eléctrico de carga es atractiva para las empresas, pues algunos costos como los combustibles, los mantenimientos referentes al motor, embrague y sistema de inyección (los cuales se encontraban en rojo para 2021) podrían ser eliminados o reducidos.

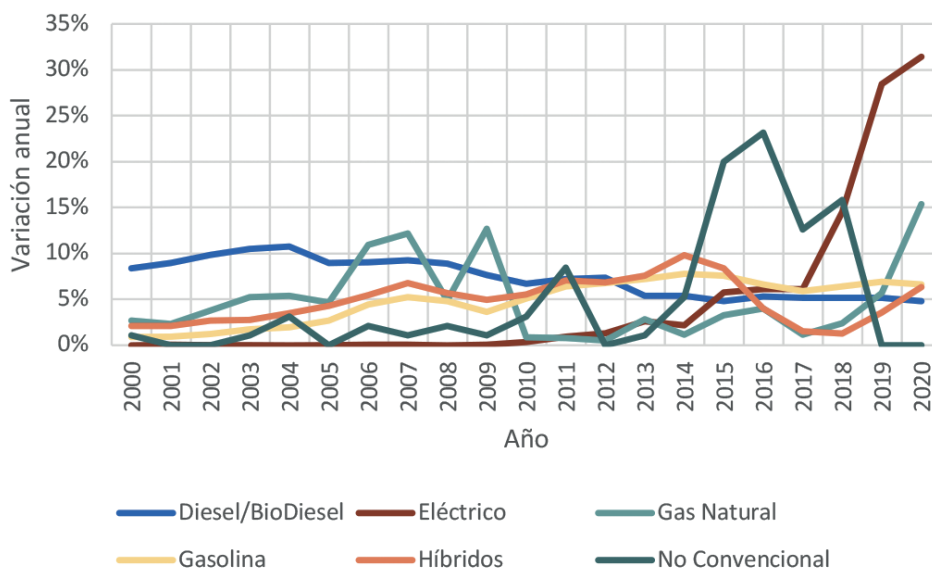


Figura 8.6. Variación anual del nuevo parque automotor por tipo de combustible

Fuente: elaboración propia a partir de datos de Mintransporte (2020).

Tabla 8.3. Comparación histórica del Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC) para diferentes subgrupos de costos

Año	vc1	vc2	vc3	vc4	vc5	vc6	vc7	vc8	vc9	vc10	vc11	vc12	Variación IPC
2016	0,22	3,72	3,25	2,91	-1,98	6,40	5,62	3,90	6,06	4,91	6,63	1,96	5,75
2017	7,96	4,33	6,15	3,20	-4,26	7,21	2,58	4,15	3,52	4,52	5,76	2,60	4,09
2018	8,82	2,02	1,34	3,71	2,76	4,92	1,54	2,38	1,77	2,80	3,25	1,07	3,18
2019	5,02	2,64	2,54	3,61	2,78	3,47	5,28	4,22	4,41	4,20	4,58	1,38	3,80
2020	-11	2,94	4,71	2,93	-3,73	6,66	6,64	5,36	4,97	6,12	3,83	1,46	1,61
2021	9,11	9,56	15,40	3,15	9,99	2,48	8,85	7,87	10,01	7,66	12,58	2,45	5,62

Fuente: elaboración propia a partir de datos de DANE (2021).

En los motivos mencionados, los vehículos eléctricos son considerados cada vez más una alternativa, no solo para el transporte de carga sino, para la movilidad en general. Esto es evidente en la figura 8.6 que muestra la variación anual del nuevo parque automotor desde el 2000 hasta el 2020 para vehículos con diferentes tipos de combustible: diésel/biodiésel, gasolina, híbridos, gas natural, no convencional y eléctricos. Para el caso del diésel/biodiésel, en el 2019 se compraron el 8 % de los vehículos con esta tecnología de los últimos 20 años, mientras que en el 2020 se adquirió el 5 %. Aunque para 2020, solo el 0,04 % del total del nuevo parque automotor fue eléctrico, es claro en la figura 8.6 que para este año se compró el 31 % de todos los vehículos eléctricos de los últimos 20 años. La tendencia a comprar más vehículos eléctricos podría continuar en alza debido al alto costo de los combustibles fósiles y a algunas ventajas dictaminadas por el Gobierno para promover su compra como la reducción del IVA o las exenciones de las restricciones a la movilidad como el pico y placa o el día sin carro. Esta última medida tiene un impacto financiero importante en los vehículos de carga dentro de las ciudades, puesto que las empresas de logística deben ampliar su flota para contrarrestar la medida.

Hoy en día, se están liderando esfuerzos para actualizar el sector del transporte hacia la electromovilidad, especialmente en el transporte público colectivo, en el que a la fecha hay registrados casi 973 buses eléctricos (868 en Bogotá). En 2021, la alianza entre Renting Colombia, P4G, Bavaria y Fundación Bavaria demostró la factibilidad de implementar el transporte eléctrico de carga en Colombia. Para este año, Bavaria inauguró su primera flota eléctrica con 200 camiones en la modalidad de *renting*, con el fin de iniciar un proceso que permita reducir en un 25 % las emisiones de carbono para 2025. Con la implementación de este proyecto se pudo: 1) probar que los camiones pesados eléctricos son viables en el mercado colombiano, 2) capacitar a las empresas para incorporar camiones de carga eléctrica a su flota y 3) fomentar un entorno propicio para ampliar la movilidad de carga eléctrica. Asimismo, se seleccionaron 20 empresas de Medellín y Bogotá para realizar la instalación gratuita de un punto de carga, con el objetivo de impulsar la implementación de, al menos, 10 vehículos en cada empresa.

En conclusión, se puede afirmar que el mercado de vehículos eléctricos de carga está cerrando las brechas con respecto a los vehículos de carga a combustión interna en cuanto al balance entre la inversión inicial y los costos de mantenimiento y operación. Pese a esto, aún existen algunas limitaciones que deben ser subsanadas para que su implementación sea masiva, sobre todo en temas de autonomía, tiempos de recarga y acceso a estaciones. También, es necesario evaluar en el contexto colombiano el

impacto ambiental que los vehículos eléctricos de carga generan en su construcción, en la disposición de sus baterías y en la generación de la energía consumida con respecto a las emisiones de los vehículos tradicionales. Finalmente, es preciso evaluar el impacto ambiental, el diseño y el desarrollo de sistemas de transporte fluvial, que generen soluciones eficientes y respetuosas con el medio ambiente. En el siguiente capítulo se presentan las soluciones de movilidad fluvial sostenible.

8.5. Referencias

- Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2012). *Encuesta origen destino de carga para el Valle de Aburrá*. Reporte técnico. <https://www.metropol.gov.co/observatorio/Paginas/encuestaorigendestino.aspx>
- Banco Mundial. (2018). *Encuestas sobre Índice de Desempeño Logístico*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/LP.LPI.OVRL.XQ>
- Gordon, W., Johansson, L. y Jallow, D. (2015). El complejo rompecabezas del transporte urbano de mercancías. *Boletín FAL*, 340, 1-13. <https://hdl.handle.net/11362/39299>
- Departamento Nacional de Planeación. (2012, 31 de enero). *Política Nacional de Espacio Público* (Documento Conpes, 3718). DNP. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Conpes-3718-de-2012.pdf>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (2021, 21 de mayo). *Índice de Costos del Transporte de Carga por Carretera (ICTC)*. https://www.dane.gov.co/files/investigaciones/boletines/ictc/bol_ICTC_2021_abril.pdf
- Davis, B. y Figliozzi, M. (2013). A methodology to evaluate the competitiveness of electric delivery trucks. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 49(1), 8-23. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2012.07.003>.
- Departamento Nacional de Planeación. (2008). *Encuesta Nacional Logística*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/News/informeEncuesta%20Nacional%20Logistica%202008.pdf>
- Departamento Nacional de Planeación. (2015). <https://planeacionnacional.sharepoint.com/:b:/s/PlataformaDIES2/EZuK06lyXh1PtCVUa82cj6ABMsm5CQPvIW7e4eeOTc-Nkkw?e=S1dtrv>
- Departamento Nacional de Planeación. (2018). *Encuesta Nacional Logística*. DNP-Puntoaparte. <https://planeacionnacional.sharepoint.com/:b:/s/PlataformaDIES2/ETQKOYH-dOotNlyf0ZC-EcCQB4OO7sbNCRBSeL8PAEtR-dg?e=mrhVnt>
- Departamento Nacional de Planeación. (2020). *Encuesta Nacional Logística*. DNP-Puntoaparte. <https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/News/Encuesta%20Nacional%20Logi%CC%81stica%202020.pdf?ver=2021-09-24-211753-007>, 2020.
- Ministerio de Transporte. (2014, 5 de agosto). Decreto 1428 de 2014. *Por medio del cual se fijan lineamientos para el establecimiento de corredores logísticos de importancia estratégica para el país y para la articulación de los actores que convergen sobre estos, y se dictan otras disposiciones*. 5 agosto del 2014. D.O. No. 49.234. <https://web.mintransporte.gov.co/jspui/bitstream/001/300/1/DECRETO%201478%20DE%202014.pdf>
- Ministerio de Transporte de Colombia. (2020). *Transporte en cifras. Estadísticas 2020*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/Transporte%20en%20Cifras%202021%20Version%2030%20Dic.pdf?ver=2021-12-30-175937-487>

- Ministerio de Transporte de Colombia. (2021). *Viajes y toneladas movilizadas durante el 2021*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Estad%C3%ADsticas/Carga-Modo-Terrestre/Carga-Movilizada-Carretera-RNDC/Toneladas-y-viajes-2021>
- Ministerio de Transporte. (2022). Resolución 20223040002435 de 2022. *Por medio de la cual se establecen los corredores logísticos de importancia estratégica para el país*. 19 enero de 2022. D.O. No. 51923. https://xperta.legis.co/visor/legcol/legcol_ecae433999d747c4a24c-4491fac5e922/coleccion-de-legislacion-colombiana/resolucion-20223040002435-de-enero-19-de-2022
- Ranieri, L., Digiesi, S., Silvestri, B. y Roccotelli, M. (2018). A review of last mile logistics innovations in an externalities cost reduction vision. *Sustainability*, 10(3), 2071-1050. <http://dx.doi.org/10.3390/su10030782>
- Secretaría Distrital de Ambiente. (2020). *Inventario de emisiones de Bogotá, contaminantes atmosféricos*. <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/397082/Inventario+de+Emisiones+de+Bogota+portal+nuevo.pdf/972994eb-7f58-42c2-a801-0f8579937919>
- Universidad Nacional de Colombia y Área Metropolitana del Valle de Aburrá. (2017). *Estudio de transporte de carga en el área metropolitana del Valle de Aburrá*. <https://www.metropol.gov.co/movilidad/Documents/Estudio-de-transporte-de-carga-en-el-Area-Metropolitana-del-Valle-de-Aburra.pdf>

Soluciones de movilidad fluvial sostenible

Erick Santiago Giraldo Pérez¹, Manuela Montoya Rivera¹, Gabriel Jaime Espitia Mesa¹, Santiago Bernal del Rio¹, Juan David Mira Pineda¹, Luis Fernando Sierra¹, Esteban Betancur Valencia¹, Gilberto Osorio Gómez¹, Ricardo Mejía Gutiérrez¹

Resumen: la movilidad fluvial sostenible es una de las nuevas alternativas de transporte que facilitan la multimodalidad. En los últimos años, se ha evidenciado el potencial de implementación para Latinoamérica y el Caribe, una de las regiones con mayor densidad de ríos navegables en el mundo. Este tipo de movilidad no solo facilita la transición hacia el uso de energías más limpias en el sector transporte, sino que promueve la creación de nuevos tipos de carga, reduce los fletes ya existentes y brinda soluciones a las poblaciones riverenas, cuyo único medio acceso son las vías fluviales. El uso eficiente de la energía disponible en una embarcación que haga uso de fuentes de energías más limpias es clave cuando se desea desarrollar este tipo de transporte y es un aspecto clave para lograr su viabilidad y obtener un beneficio equiparable con el que brindan las embarcaciones a combustión. Este capítulo presenta los conceptos relacionados al diseño y desarrollo de embarcaciones eléctricas como soluciones de movilidad fluvial sostenible y los principios básicos para el dimensionamiento de sus diferentes sistemas. Se aborda desde un contexto de aplicación en países en vía de desarrollo, con especial énfasis en la región de Latinoamérica y el Caribe, y se hace hincapié en los sistemas de arquitectura y diseño naval, electro-propulsión, dimensionamiento, almacenamiento energético y diseño hidrodinámico.

Palabras clave: hidrodinámica; eficiencia energética; embarcaciones eléctricas; movilidad fluvial.

¹ Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejiag@eafit.edu.co

Durante los últimos años, la necesidad de una transición energética en los diversos ámbitos de la economía ha originado una serie de retos técnicos, tecnológicos y regulatorios que deben identificarse, analizarse y superarse para hacer realidad las nuevas oportunidades para el sector energético y sus distintos actores. Diferentes naciones a nivel mundial, en especial los países latinoamericanos, han venido trabajando de manera proactiva en sus políticas en torno al sector transporte, para desarrollar estrategias alineadas con la tendencia mundial de migrar hacia la movilidad eléctrica, impulsadas por la incertidumbre sobre la disponibilidad de los combustibles fósiles, su variabilidad en el tiempo, así como los efectos en la calidad del aire y la salud de las personas. Estas estrategias no solo se centran en el transporte terrestre y aéreo, sino también fluvial, y se traducen en políticas públicas que buscan acelerar la incorporación de medios de transporte de cero y bajas emisiones, entre las que se encuentra la movilidad fluvial.

Con respecto al terrestre y aéreo, el transporte fluvial es uno de los más antiguos y ecológicos del mundo debido a que usa vías naturales, como ríos, canales y mares, sin afectarlas en gran medida y permite el transporte de mercancías y alimentos de un lugar a otro entre poblaciones ribereñas. El hecho de que las alternativas de movilidad fluvial sostenible cobren protagonismo en las políticas públicas obedece, en gran medida, a la riqueza hídrica, el crecimiento y desarrollo tecnológico de las embarcaciones eléctricas en los últimos años y a los beneficios ambientales que se pueden obtener del uso de tecnologías consideradas como de cero o bajas emisiones.

El uso de las vías navegables como medio de transporte es una opción que resulta más amigable con el medio ambiente y con un mayor nivel de eficiencia en comparación con el transporte terrestre por carretera o ferrocarril. Esto, considerando que el consumo de energía por kilómetro/tonelada de mercancía transportada es solo el 17 % del transporte por carretera y el 50 % del transporte ferroviario. Desde el punto de vista de potencia requerida para mover la carga, las embarcaciones pueden empujar hasta ocho veces más que un medio de transporte ferroviario que posea igual potencia instalada (Figuerola *et al.*, 2020). Este medio de transporte ha sido implementado con éxito en Europa; un ejemplo es el río Danubio, el cual hace parte integral de la Red de Transporte Trans-Europeo (TEN-T, por sus siglas en inglés), que pasa por diez países y conecta regiones importantes como Rotterdam (Países Bajos) con el mar Negro (Rusia del este). Gracias a la inversión de la Unión Europea, su utilización para el transporte de carga y pasajeros ha crecido en las últimas dos décadas. Este ejemplo podría trasladarse a Suramérica, donde la movilidad fluvial permite la integración de los países de la subregión que tienen afluentes en común y que no solo cruzan las fronteras, sino que pueden servir como vías para el transporte y aprovisionamiento al interior de cada nación (Bara *et al.*, 2006), lo que reduciría el costo asociado al transporte de carga, induciría nuevos tipos de carga y facilitaría la multimodalidad. La movilidad fluvial se diferencia según su aplicación, alcance, actividad y tipo de propulsión. En cuanto al tipo, puede ser para el transporte de carga o pasajeros. Las actividades se centran en aplicaciones comerciales de transporte de carga y pasajeros, así como recreativas individuales o de turismo. Por último, entre los tipos de propulsión se encuentran los típicos motores a combustión, alternativos como gas y, finalmente, los eléctricos.

9.1. Contexto de aplicación y operación de sistemas de transporte fluvial

Respecto a la riqueza hídrica, Latinoamérica cuenta con un promedio de recursos hídricos muy superior, comparado con el resto del planeta, con un volumen promedio de agua dulce por habitante de más de 20.000 m³/habitante para 2020. Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 1985), la región alberga casi un tercio de los recursos mundiales, englobados en tres sistemas hidrológicos principales clasificados según su tamaño: los grandes sistemas que fluyen hacia el Atlántico, los ríos cortos y caudalosos concentrados en la cuenca del pacífico y los pequeños ríos que desaguan en las zonas internas; a lo anterior se suman los ríos de las islas del Caribe. El común denominador de estos sistemas hídricos es su variabilidad de caudal en el tiempo: presentan intermitencias por las épocas lluviosas, lo cual, como se verá más adelante, representa un reto en cuanto a la navegabilidad de los ríos, lo que se traduce en restricciones de la capacidad y tamaño que pueden tener las embarcaciones.

A mediados de los 80, gran parte de las actividades económicas de la región se concentraban en las zonas costeras, lo cual conllevaba un escaso desarrollo de la navegación fluvial. Con el transcurrir de los años, esto ha cambiado por el aumento de la población alrededor de las riberas de los ríos, la integración e inclusión de poblaciones indígenas, las políticas de desarrollo equitativo de las regiones y el carácter estratégico de los medios de transporte fluviales como soporte para el desarrollo productivo, comercial, de provisión de servicios y movilización de personas en las regiones. En países como Colombia, la navegación interior es una de las más importantes alternativas de transporte: los ríos Cauca, Atrato, Sinú, León y Magdalena mueven alrededor de tres millones de personas al año (Arcadis BV- Jesyca SAS, 2015); este último el más importante, pues alcanza a mover, al menos, siete millones de toneladas en carga (Arcadis BV- Jesyca SAS, 2015). El país cuenta con más de 18.000 km de vías fluviales; el 60 % del territorio nacional son regiones ricas en este recurso (Unidad De Planeación Minero Energética [UPME], 2015). La red fluvial navegable se divide en cuatro cuencas: región pacífica y cuenca del Atrato, Magdalena, Orinoquía y Amazonía. La cuenca del río Magdalena tiene un caudal de agua significativo y atraviesa lugares con alta concentración de población, lo cual la convierte en la principal vía fluvial de Colombia; las otras cuencas son de movimiento bajo y sirven para apoyar las localidades cercanas a ellas y que están aisladas del resto del país (Quintero *et al.*, 2020).

En cuanto al crecimiento tecnológico desarrollado en torno a las embarcaciones, los primeros botes se construyeron hace más de 8000 años. El primer informe de una embarcación eléctrica apareció a mediados del siglo XIX y, desde principios de 1900, se ha hecho uso de motores AC y DC para propulsión de barcos. Al igual que los primeros vehículos eléctricos terrestres, existía gran potencial de difusión de este tipo de propulsión, gracias a la construcción relativamente sencilla de los motores eléctricos de corriente continua, a su eficacia y facilidad para controlar su rotación y su sentido de giro; sin embargo, esto no ocurrió, por el problema de la escasa capacidad de las baterías en relación con las expectativas. Después de 1908, los vehículos fueron dominados por el motor de combustión debido a Henry Ford, quien introdujo el motor de combustión interna en sus coches, lo que produjo, al mismo tiempo, que el sistema de combustión

se generalizara en las embarcaciones, no solo como motores estacionarios intrabordas, sino que también se produjeron motores de combustión fuera de borda para pequeñas embarcaciones (Lapko, 2019).

Con el paso de los años, los motores eléctricos han ganado protagonismo: en 1994, Borman *et al.* (1994) presentaron una primera aproximación para barcos eléctricos de pasajeros; por su parte Doyle *et al.* (1997) mostraron la propulsión eléctrica aplicada a barcos militares, mientras que McCoy (2002) y Hansen y Wendt (2015) publicaron estudios acerca de la propulsión eléctrica aplicada a grandes embarcaciones marítimas, con potencias de motor entre 5 y 25 MW (6700-33.000 HP). Estos grandes navíos no almacenan la energía en baterías, sino que convierten la salida de un motor de combustión en energía eléctrica mediante un generador y validan que el motor de combustión conectado al generador se mantiene en un punto de operación de alta eficiencia, lo que justifica así la conversión a propulsión eléctrica.

En Japón, en 2010, se planteó un sistema híbrido para pequeñas embarcaciones (Minami *et al.* 2010) y, tres años después, Minami *et al.* (2013) presentaron una nueva embarcación con mejores prestaciones y ventajas de la propulsión eléctrica en uso en conjunto con un motor de combustión para garantizar más autonomía del barco. Como validación realizan un prototipo en un barco de 6,5 metros de largo y obtienen una solución de transporte fluvial con menos vibraciones, ruido y bajas emisiones de CO₂. Algunos de los trabajos científicos elaborados a la fecha por investigadores, como Dewagan *et al.* (2018) y Campillo *et al.* (2019), han tratado de hallar alternativas de transporte con menos emisiones contaminantes, identificando oportunidades para el transporte sostenible en botes. Bennabi *et al.* (2017) y Bolvashenkov *et al.* (2014) aumentaron la eficiencia de los botes usando sistemas de propulsión eléctrica, mientras que Obaid y Hamid (2019) y Hemdana *et al.* (2018) diseñaron sistemas de potencia híbridos. Spagnolo *et al.* (2012) construyeron un bote propulsado eléctricamente usado en el transporte público, en el que el consumo de energía es recuperado a través de una planta fotovoltaica; también, Lutful *et al.* (2016) desarrollaron un ferry solar para el área rural de Bangladesh.

Algunos estudios, como los de Nykvist y Nilsson (2015) y *The Economist* (2017) revelaron el aumento en el uso de todo tipo de vehículos eléctricos, comercialmente competitivos, debido al coste decreciente de las baterías y su mayor capacidad de almacenamiento y entrega de energía. Se evidencia que los costes están bajando y que las baterías de iones de litio están dominando el mercado. Según Nykvist y Nilsson (2015), el coste ha ido disminuyendo un 14 % anualmente entre 2007 y 2014, con un coste actual de 410 USD por kWh y un aumento de la capacidad de las baterías de 100 Wh/kg a 400 Wh/kg para 2022. Diferentes investigaciones han sido, y siguen siendo, desarrolladas para mejorar la capacidad de la batería y aumentar la eficiencia energética y la velocidad de carga de la batería. Estas ventajas competitivas han hecho que la penetración e implementación de las energías renovables en el transporte acuático en muchos países esté alcanzado porcentajes de hasta dos dígitos, pero, como con el transporte terrestre, la penetración de energías renovables aún se encuentra en niveles introductorios (Østergaard *et al.* 2020).

Los principales factores tecnológicos que han favorecido el desarrollo de los barcos eléctricos se pueden resumir en los siguientes siete aspectos (Pestana, 2015; Łapko, 2019; Yang *et al.*, 2016): el desarrollo de la electrónica de potencia DC/AC, una mayor

autonomía-desarrollo de baterías (litio 200-400 Wh/kg), versatilidad y simplicidad de los motores eléctricos, la introducción de la propulsión eléctrica *podded* (sistemas híbridos), altos niveles de maniobrabilidad, movimientos del precio del petróleo, así como una cantidad reducida de contaminantes emitidos a la atmósfera y un bajo nivel de ruido generado y sin vibraciones.

En Suramérica, se han implementado algunas embarcaciones eléctricas para el transporte de pasajeros y actividades turísticas, pero, en el mejor de los casos, estas apenas alcanzan una velocidad de 5 m/s y 50 km de autonomía (De Castro y Rössling, 2012; Gudiño y Hermosillo, 2015; Jara *et al.*, 2013; Pitt, 2018). Estas características no representan ninguna ventaja frente a los buques con motor de combustión, aparte de ser más amigables con el medio ambiente y, sin duda alguna, se requieren desarrollos que apunten a equiparar las características y desempeño de aquellas a combustión, lo que representa un gran reto.

En promedio, la movilidad fluvial, a la fecha, es la responsable del 6 % de las emisiones de CO₂ en el mundo, solo después del modo carretero que, sin duda, es el mayor emisor por su alta masificación. Por esto, el principal beneficio sobre el medio ambiente que brinda el desarrollo de la tecnología es la reducción de emisión de los gases contaminantes que generan las embarcaciones tradicionales que hacen uso de motores de combustión interna. Según la U.S. Environmental Protection Agency (EPA), un motor fuera de borda, de uso típico en embarcaciones menores, con una potencia de 150 HP, genera un promedio de 794 g/kW-hr de CO₂ y 4.79 g/kW-hr de NOX (Stuhldreher *et al.*, 2021). Al realizar un cálculo con los valores publicados por la EPA, y teniendo en cuenta tiempos de operación de cuatro horas/día, se obtiene un estimado de la cantidad de gases GEI (CO₂ y NOX) que se dejan de emitir a la atmósfera al hacer uso de una motorización eléctrica. El resultado arroja un total de 356 kg CO₂/día y 2 kg NOX/día, lo que al año equivale a 130 Ton CO₂/año y 0,7 Ton NOX/año. En síntesis, es un momento económica y técnicamente viable para el uso de embarcaciones de propulsión eléctrica a escala creciente. Las cifras de crecimiento de la flota de embarcaciones eléctricas en los últimos diez años son una prueba de ello.

Por esta razón, el desarrollo de las embarcaciones eléctricas, bajo un contexto de políticas públicas decididas y determinantes hacia el uso de diferentes tipos de movilidad, se proyecta como una de las alternativas que conforman las soluciones sostenibles en el presente y futuro cercano, para la reducción de las emisiones contaminantes de este tipo de vehículos. No obstante, estas aún tienen retos que superar, incluso más difíciles que en los eléctricos terrestres. Así, lograr un rendimiento adecuado para satisfacer las demandas solicitadas dependerá del uso eficiente de la energía disponible en las baterías, lo que se convierte en un aspecto clave en el proceso de diseño de los subsistemas de la embarcación. En conclusión, el transporte por agua sigue siendo un medio muy importante para diversas aplicaciones, ya que tiene la mayor capacidad de carga y es el más adecuado para transportar mercancías voluminosas y personas a largas distancias y a velocidades moderadas. En función de esto, es sumamente importante seguir invirtiendo en el desarrollo de tecnología que permita su sinergia con las necesidades sociales y medioambientales actuales, de modo que se puedan disminuir las emisiones contaminantes y se cumplan con los requerimientos comerciales exigidos.

9.2. Diseño conceptual

El desarrollo de embarcaciones eléctricas con el mismo rendimiento y resistencia que las de combustión representa una tarea difícil debido a la resistencia hidrodinámica, incluso combinado con la densidad de potencia relativamente baja de las tecnologías de almacenamiento de energía de vanguardia. Igualmente, como las baterías son mucho más pesadas que el combustible, su instalación aumenta el peso total de la embarcación. Esto, a su vez, afecta a la resistencia de la nave, por lo que la estimación del consumo de energía se convierte en un proceso iterativo. Dada la complejidad y el carácter multidisciplinario del diseño, se establece una división en siete subsistemas o módulos; cada uno con un proceso de diseño independiente, teniendo en cuenta su interacción con el resto para no sacrificar la cohesión ni la integralidad en el diseño del vehículo. Los módulos considerados son (ver figura 9.1): arquitectura naval, hidrodinámica, usabilidad, telemetría y control, propulsión, almacenamiento energético y fotovoltaico.

En las etapas de diseño preliminar de una embarcación electro-solar se utilizan diferentes herramientas de diseño conceptual que facilitan el proceso de ideación de los diferentes sistemas y componentes de la embarcación y de las interacciones que se presentan entre los requerimientos, especificaciones y subsistemas. El QFD (*quality function deployment*) junto con el PDS (*product design specification*) son herramientas de planificación claves, las cuales permiten a los ingenieros comprender sistemáticamente las necesidades de los clientes y compararlas con variables técnicas para determinar cómo se van a satisfacer con el producto (Dieter *et al.*, 2009) y, además, facilitan la comunicación entre el cliente y el equipo de diseño, así como entre los miembros del equipo.

En la fase de diseño preliminar, se desarrolla el QFD, herramienta cuyo objetivo es obtener los requerimientos del cliente (CRs) y encontrar las características de ingeniería (ECs) del producto. Este sistema fue desarrollado en Japón en 1970 e introducido a los Estados Unidos en 1980. Luego, el QFD identifica la relación entre los CR y los CE, su importancia y su valor objetivo; los CR se obtienen con un análisis del contexto de aplicación de la embarcación y el sitio de operación de esta, por lo que se recomienda elaborar un grupo focal y entrevistas a personas que utilizan o trabajan en el transporte fluvial. El análisis técnico se hace mediante la evaluación de los EC, la cual se efectúa teniendo en cuenta embarcaciones similares o sustitutos, tanto a nivel nacional como internacional. Usar este método toma tiempo: alrededor de una tercera parte del total del proyecto se gasta en esta actividad, pero ahorra horas de trabajo posteriores. Finalmente, se plantea el PDS con el fin de obtener las restricciones técnicas para el diseño de la embarcación en el contexto definido. Su relevancia radica en que expone requisitos ocultos o percibidos como obvios por el cliente y que no son verbalizados o expresados de otro modo; asimismo, ayuda a clarificar requisitos ambiguos o suplir la falta de consideración de los aspectos del ciclo de vida completo.

Los EC se evalúan con base en qué satisface la mayor cantidad de CR; las decisiones sobre el proceso de diseño pueden tener en cuenta la ponderación de estos CE. De igual modo, se establecen los valores objetivo a tener en cuenta en el diseño de cada EC, los cuales se determinaron teniendo en cuenta los valores obtenidos de la competencia (botes similares), las leyes de navegación fluvial y las limitaciones técnicas. A estas variables

técnicas se suman las características de ingeniería y las percepciones del usuario, para luego ser trabajadas por el equipo de diseño teniendo en cuenta la mayor importancia en términos de toma de decisiones.

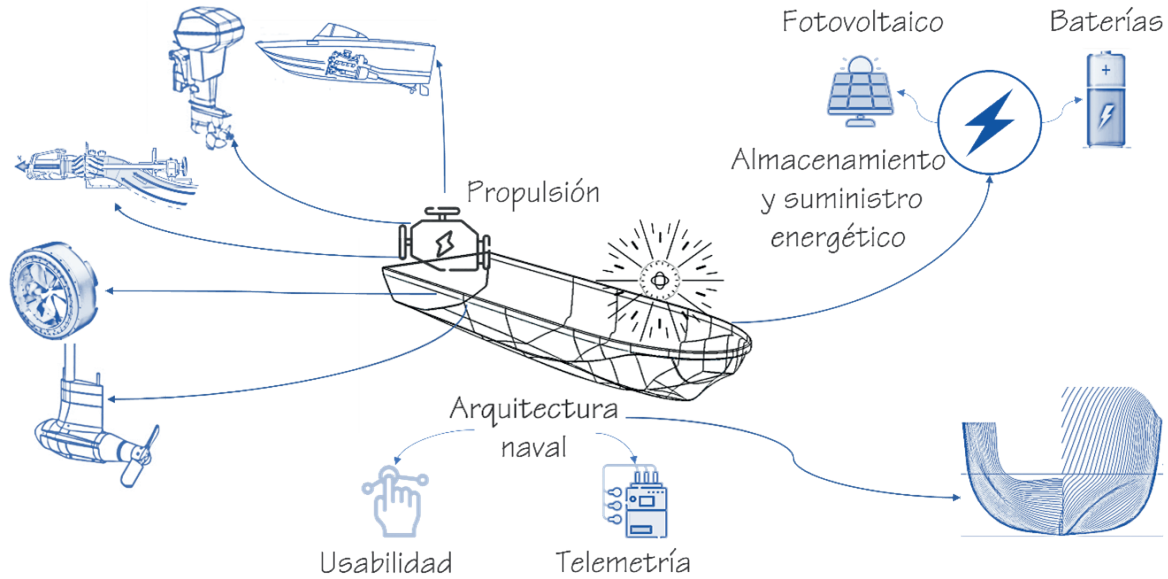


Figura 9.1. Subsistemas embarcación electro-solar

Fuente: elaboración propia.

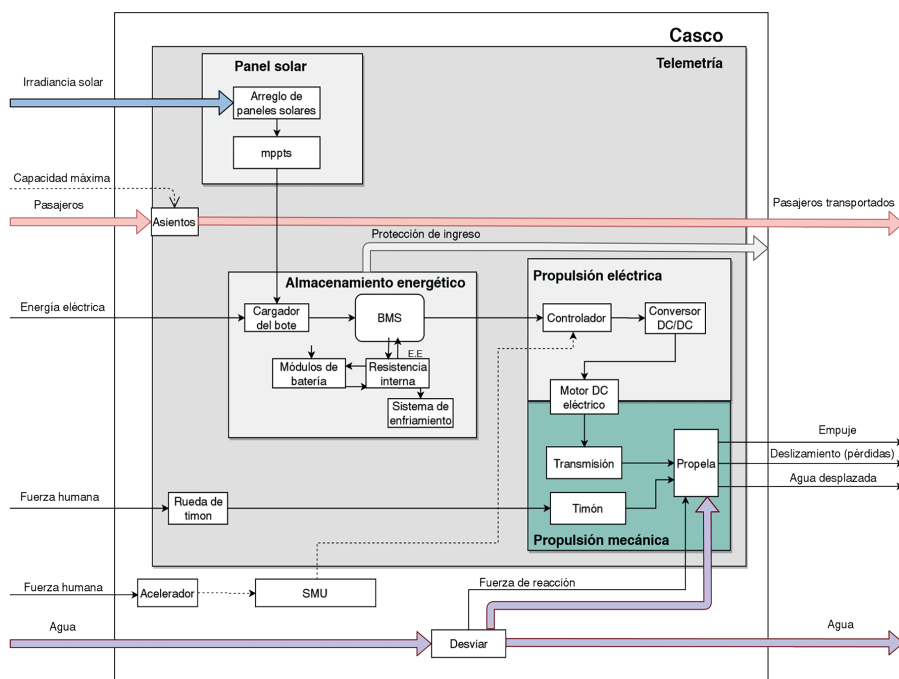


Figura 9.2. Arquitectura funcional (caja transparente) general de una embarcación eléctrica

Fuente: elaboración propia.

Con respecto a las características principales de la embarcación, se debe partir de la premisa de asemejar las prestaciones de las embarcaciones actuales que funcionan a partir de combustión. Se recomienda complementar estos análisis conceptuales con una revisión de la literatura y vigilancia tecnológica de lo desarrollado respecto a embarcaciones eléctricas (análisis de *benchmarking*). Para un estudio extensivo de las herramientas aquí presentadas para el desarrollo de la etapa preliminar del diseño conceptual, se recomienda consultar Mira *et al.* (2020).

Análisis funcional: a través de la arquitectura funcional, se identifican cada una de las entradas y salidas principales que presentan los componentes en los diferentes subsistemas y se determinan las relaciones y funciones de cada uno de estos. La figura 9.2 presenta la caja transparente de una embarcación eléctrica, la cual se divide en cinco subsistemas compuestos: panel solar, almacenamiento energético, propulsión eléctrica, propulsión mecánica y telemetría. Cada subsistema se encarga de transformar diferentes entradas de materia, energía o señales, según los requerimientos de la embarcación, con el fin de mover el bote y transportar los pasajeros. El subsistema de arquitectura naval se encarga de diseñar el casco que contendrán el resto de los subsistemas, los pasajeros, mientras el de manufactura, de la fabricación del casco, principalmente; por esta razón, no se ven representados como unidades en la caja transparente.

Los flujos principales de la embarcación son los siguientes: en el subsistema de panel solar se transforma la energía solar en energía eléctrica y se transporta hasta el subsistema de almacenamiento energético, encargado de almacenar la energía recolectada a través de los paneles solares y del cargador del bote en los módulos de batería; esta energía se transporta hasta el subsistema de propulsión eléctrica, que envía energía al motor y controla su velocidad utilizando las señales de entrada del usuario. El motor transforma esta energía eléctrica en movimiento que es utilizada por el sistema de propulsión mecánico para transmitir el movimiento hasta la propela y generar un desplazamiento de agua que produce una fuerza de empuje para empujar el bote.

9.3. Parámetros geométricos principales

Como punto de partida, para el diseño de una embarcación se definen las características principales de la misma con base en los requerimientos de diseño, las cuales son: la cantidad de pasajeros a transportar, el volumen sumergido, la velocidad y el trayecto de operación, que determinan las necesidades de autonomía. Posteriormente, se precisan los parámetros geométricos principales: eslora, manga, puntal, calado, ángulo de *deadrise*, ángulo de *half entrance* y, para embarcaciones tipo catamarán, el espaciamiento entre los cascos y la altura del túnel. Sin embargo, los fenómenos hidrodinámicos en estudios realizados obedecen en su mayoría, más que a dimensiones por sí solas, a relaciones geométricas de la embarcación. La importancia de estas relaciones depende de varios factores: el tipo (monocasco o multicasco) y el régimen de operación. La tabla 9.1 expone las relaciones geométricas más importantes que se identificaron para embarcaciones de planeo tipo monocasco y catamarán (Savitsky y Brown, 1976; Savitsky, 1964; Yun *et al.*, 2018; Lewis, 1988).

Tabla 9.1. Parámetros geométricos principales identificados para monocascos y catamaranes de planeo

Parámetro geométrico	Nombre
$LWL/(\nabla/3)$	Relación de esbeltez
∇/B^3	Coefficiente de carga estática
L/B	Relación eslora-manga
$C_s = \frac{B}{2b}$	Espaciamiento de los semicascos
ie	Ángulo de entrada al nivel del agua
LCG/L	Ubicación del centro de gravedad en relación con la longitud del bote
β	Ángulo de deadrise
$C_b = \nabla / LBD$	Coefficiente de bloque
$C_f = WL \text{ área} / LB$	Coefficiente de fineza

Fuente: elaboración propia.

Se observa que la relación de esbeltez y el coeficiente de carga estática afecta una distancia con el volumen desplazado de la embarcación. Esta relación indica el volumen desplazado por unidad de longitud y, entre más alto sea, menor calado tiene la embarcación y, por tanto, menor arrastre. El coeficiente de carga estática muestra el volumen sumergido por metro de manga: entre más baja sea, la embarcación es más ancha y hay mayor superficie disponible para generar sustentación hidrodinámica. La relación eslora-manga es otro modo de medir la esbeltez de la embarcación, pues entre más alta sea, menor arrastre. El espaciamiento de los semicascos es un factor clave en el caso de los catamaranes, pero tiene menos preponderancia para aquellos con semicascos asimétricos y paredes internas planas por la poca resistencia por interferencia (Yun *et al.*, 2018).

El ángulo de entrada al nivel agua determina el área enfrentada con la que la embarcación penetra la superficie; entre más bajo sea, con más suavidad penetra el casco. La ubicación del centro de gravedad con respecto a la longitud del barco influye en la estabilidad estática y dinámica, además de la hidrodinámica. Para embarcaciones de planeo, lo normal es que se ubique entre un 30-40 % medido desde la proa. El ángulo de *deadrise* determina qué tan grande es el componente de sustentación del casco en modo planeo, debido a las presiones formadas sobre el mismo y, entre más pequeño, más plano es, por lo que el bote planea con mayor facilidad. Para el método Savitsky se evalúan ángulos de *deadrise* entre 10 y 30 grados (Savitsky *et al.*, 1964). Finalmente, el coeficiente de bloque y de fineza definen qué tan parecido a un cubo es la parte de la embarcación por debajo del agua y qué tan delgado es este en la zona donde corta la superficie, respectivamente. En general, las embarcaciones de planeo tienen coeficientes de bloque de alrededor de 0,7-0,8 y altos coeficientes de fineza (Yun *et al.*, 2018).

Estas relaciones geométricas no se pueden elegir arbitrariamente, por lo que si se apunta al diseño de una embarcación hidrodinámicamente eficiente, es recomendable, según, los libros de diseño, extraer estas relaciones de embarcaciones con configuraciones similares mediante estudios estadísticos o de mercado. Al realizar el estudio de estadístico de las dimensiones comúnmente utilizadas, se sugiere realizar una tabla

resumen de los valores de las variables. Posteriormente, se pueden extraer los valores promedio para los parámetros geométricos con sus desviaciones estándar. Con estas, se construye un rango de variación para la media de cada parámetro geométrico. Las dimensiones principales se eligen al principio para que las relaciones geométricas de la embarcación diseñada estén dentro de estos rangos. Se debe tener en cuenta que un catamarán de planeo posee, generalmente, un muy bajo espaciamiento entre los pontones, porque esto ayuda a la generación de sustentación adicional. En consecuencia, el coeficiente de bloque para un catamarán de planeo es un poco más alto que para un *hysucat*, a diferencia para el espaciamiento entre cascos (Cs), que es más pequeño para un catamarán de planeo. Una vez estimados los valores iniciales para el diseño de la embarcación, se procede al diseño del casco.

9.4. Proceso de diseño del casco y estimación inicial de peso

El diseño del casco se hace de manera iterativa hasta llegar a una geometría que cumpla con los requisitos de diseño. Después de generar las distintas geometrías y asignarles la capacidad deseada de transporte de pasajeros, el siguiente paso es calcular el peso total para cada embarcación. Este depende de la cantidad de pasajeros, la potencia requerida para viajar a la velocidad de diseño, de esta velocidad de diseño y de la distancia del recorrido.

La primera parte de la embarcación a tener en cuenta es el casco, pues es el equivalente al chasis de un automóvil. Este componente sostiene y contiene a los pasajeros, equipajes y diferentes subsistemas necesarios para el funcionamiento de la embarcación. Para el diseño, se puede partir del peso estimado de un casco comercial en los materiales más utilizados, como lo son el aluminio y la fibra de vidrio. De la referencia comercial seleccionada, se podría conocer el área externa del casco y dividir el peso del casco por esta área; de esta manera se obtiene el peso por metro cuadrado de la embarcación. Haciendo uso del peso por unidad de área estimado con la referencia comercial, se calcula el área externa de las propuestas del casco que se desarrollen multiplicando este factor de referencia por el área superficial de las iteraciones; así se obtiene un primer acercamiento del peso de cada casco. En este valor del peso se contemplan apéndices del casco como hidroalas, aletas de trimado, etc.

Luego, se procede con la asignación del peso al componente de los pasajeros de acuerdo con los requerimientos de diseño y al número que se desee transportar. Este componente corresponde a un peso establecido por persona junto la cantidad de equipaje que se asigne a cada pasajero. Se debe tener en cuenta que existirá una limitante de peso dada por la batería, lo que evidencia la necesidad de un ciclo iterativo en el proceso de desarrollo de una embarcación eléctrica. Después, se estima el peso del motor eléctrico, la transmisión y sistema mecánico de acuerdo con el análisis de potencia requerida a ser instalada. Por último, se incluyen los pesos para el resto de las componentes: techo, sistema de comunicaciones, sistema de control, sistema eléctrico y los accesorios como bombas de achique, remos, extintores, luces, etc. La suma de estos componentes da como resultado el peso del bote sin baterías. Este valor se utiliza para determinar el arrastre hidrodinámico y, a su vez, la potencia requerida para desplazar la embarcación a la velocidad deseada. La potencia instalada junto con la velocidad de

desplazamiento y autonomía deseada determinará la capacidad energética en baterías con la que debe contar la embarcación. Finalmente, el peso de la batería, más el peso de los ítems descritos, da como resultado el peso final.

9.4.1. Disposición de baterías

Parte del diseño conceptual consiste dimensionar y posicionar las baterías y el motor que, después de la carga paga y el casco, representan uno de los componentes más voluminosos y pesados de la embarcación. El dimensionamiento depende, principalmente, de la cantidad de energía necesaria para que la nave cumpla con su trayecto a la velocidad de diseño. El posicionamiento, por otro lado, tiene en cuenta la estabilidad de la embarcación y asegurar la temperatura recomendada de funcionamiento de la batería, como algo fundamental. En la etapa de diseño preliminar, tener una idea del consumo energético al realizar cada trayecto es fundamental a la hora de determinar el tipo de batería que se usará. Para las etapas previas de diseño, se puede estimar un valor energético demandado haciendo un símil con una embarcación de características similares que opere a combustión. Se define, luego, una química de baterías de uso comercial que en la actualidad poseen mayor densidad energética por unidad de peso disponible: litio-titanato (LTO), LiFePO_4 (litio-fosfato ferroso) o LiNiMnCo (litio NMC) (ver tabla 9.2).

Una vez se obtiene este dato, se determina el número de celdas necesarias de acuerdo con el consumo por trayecto. Posteriormente, se efectúa el cálculo del volumen que tendrá cada batería, así como su dimensionamiento (alto, largo, ancho) y posicionamiento (definición de coordenadas), según los requerimientos para la embarcación.

Existen dos tipos de arquitectura para ubicar la batería en el casco: una en la que el componente se pone bajo los asientos de los pasajeros y queda por encima de la cubierta; y la segunda, que ubica las baterías bajo la cubierta. Para la ubicación de las baterías bajo cubierta, se deben tener en cuenta los siguientes criterios, fundamentales a la hora de garantizar un buen funcionamiento con respecto a los criterios de diseño y las regulaciones (DNV, 2021):

- Es necesario contar con un fácil acceso a este componente, para cualquier tipo de reparaciones o mantenimiento que sea requerido.
- La temperatura de las baterías, para que operen en su punto óptimo, debe oscilar entre los 10 y 35 °C. Su límite máximo es de 60 °C, ya que, una vez superado este valor, comienzan a disminuir la vida útil de la batería.
- Es necesario evitar el aumento drástico de temperatura, evitando toda exposición directa a la luz solar y controlando las distancias de cada batería a elementos como los motores. De esta forma, se minimiza la transferencia de calor que pueda darse entre ambos componentes.
- Entre cada celda que compone la batería, el espacio mínimo requerido es de 2 mm en todas las direcciones, para evitar el contacto entre ellas.
- Los demás componentes de la instalación (páneles, inversores, MPPT, buitrones) deben encontrarse cerca; esto incluye la accesibilidad para conexión.
- Las baterías no deben estar expuesta directamente al contacto con las personas.

- Como es el componente que más afecta el centro de gravedad, dada la magnitud de su peso, hay que ubicarla lo más bajo posible en el bote para reducir la altura del centro de gravedad medida desde la quilla; al tiempo, hay que controlar que el centro de gravedad longitudinal de la embarcación quede alrededor del 40 % respecto a la longitud total medida desde popa.
- La ubicación de las baterías no debe afectar los compartimientos del casco para prevenir el hundimiento completo del bote, pues estas deben hacer parte de la embarcación por regulación.

Las figuras 9.3 y 9.4 resumen posibles opciones de ubicación de baterías dentro de una embarcación de tipo monocasco y de tipo catamarán. Sin duda, estas ubicaciones deben ser validadas por medio de un análisis de estabilidad, tanto estática como dinámica de la nave diseñada.

Tabla 9.2. Densidad energética por Wh/kg

Tipo de batería	DGE (Wh/kg)
LFP	80
NMC	118
LTO	51.3

Fuente: elaboración propia.

Figura 9.3.
Ubicación de baterías en embarcación monocasco

Fuente: elaboración propia.

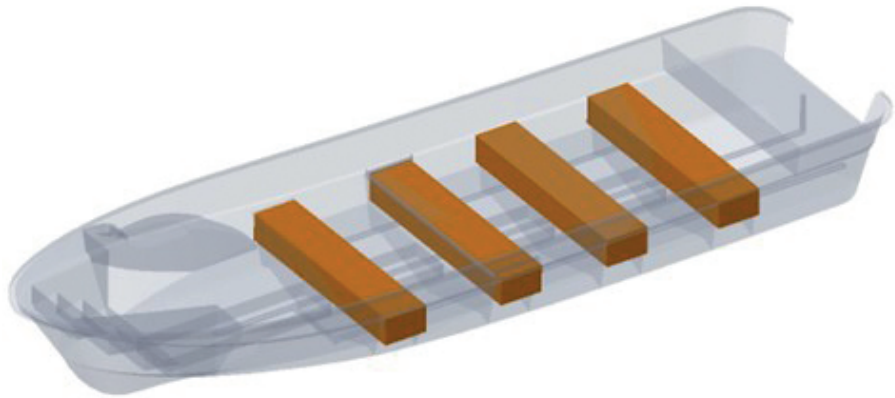
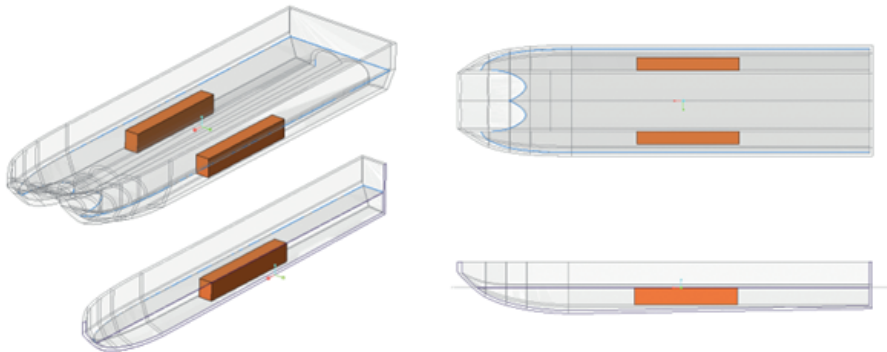


Figura 9.4.
Ubicación de baterías en embarcación catamarán

Fuente: elaboración propia.



9.4.2. Estimación de arrastre hidrodinámico

Las embarcaciones eléctricas son una solución sostenible para la movilidad fluvial; sin embargo, la demanda de energía es mucho mayor en comparación con un vehículo terrestre, por lo que es obligatorio aumentar la eficiencia hidrodinámica. Estimar el arrastre hidrodinámico y, por lo tanto, la potencia requerida para impulsar la embarcación a cierta velocidad es el principal paso en el diseño de una embarcación. Esto, ya que, de los resultados obtenidos, se dimensionan otros subsistemas como el de propulsión y baterías, en este caso. Se sabe que es de vital importancia asegurar que esta potencia requerida sea la mínima por términos de eficiencia y sostenibilidad. Esta premisa toma mayor relevancia en la implementación de embarcaciones eléctricas, dada la gran limitante en densidad energética que tienen las baterías en comparación con los combustibles.

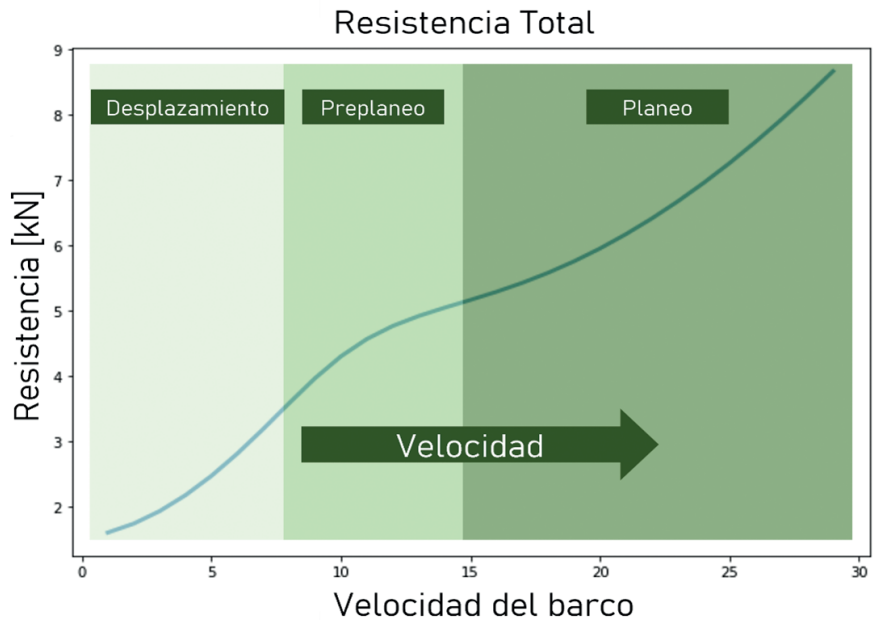
Una embarcación de alrededor de 8 m de eslora consume hasta 18 veces más que un vehículo familiar; y la densidad energética de la batería más compacta puede ser decenas de veces menor que la de la gasolina (Candela, 2018). A esto se le agrega el gran costo de la batería, que llega a representar alrededor de un 30 % o incluso más del costo total de la embarcación. Por esto, realizar un correcto diseño del casco, de manera que se maximice su eficiencia hidrodinámica, puede significar que los propósitos del proyecto se cumplan o no. El objetivo de este cálculo es determinar el arrastre hidrodinámico de los cascos, desarrollados en el paso anterior, con el fin de establecer cuál embarcación tiene una mejor eficiencia relacionando el arrastre y la potencia instalada requerida con el posible número de pasajeros a transportar. Este cálculo ayuda, además, a fijar los pesos de las baterías que permiten el desarrollo del proceso iterativo de diseño, puesto que las demás variables son estrechamente dependientes de este valor.

Principalmente, la resistencia total se divide en cuatro componentes: resistencia al agua viscosa, a las olas, a las pulverizaciones y resistencia al aire. Estas dependen de parámetros geométricos del casco, como la longitud, la manga, el calado y el volumen sumergido; también del cuadrado de la velocidad del buque, la zona húmeda y la que se encuentra frente al flujo. El componente de la resistencia del aire es el más pequeño, comparado con los otros tres, con hasta un 8 % de la resistencia total (Faltinsen, 2005). La evaluación hidrodinámica se puede hacer de tres maneras: por métodos estadísticos, por simulaciones numéricas y mediante experimentos. Aunque el método más adecuado es el experimental, debido a su alto acercamiento con la realidad, es el que más consume recursos en términos en tiempo y dinero (Yousefi *et al.*, 2013). La de simulaciones numéricas es una alternativa con consumo de recursos y acercamiento a la realidad menor que el método experimental, pero mucho mayor que los estadísticos y su consumo computacional aumenta para el caso específico de embarcaciones de planeo, en las que se tiene que usar mallas dinámicas (Sukas *et al.*, 2017; Frisk y Tegehall, 2015). Los métodos estadísticos, por su parte, son la opción que menos recursos computacionales consume, pero su gran limitante son las aproximaciones que deben realizarse en cascos que no corresponden a las familias que se evaluaron para desarrollar los métodos estadísticos.

Los regímenes típicos de operación de una embarcación se clasifican de acuerdo a su velocidad de desplazamiento y la curva de arrastre hidrodinámico tiene la forma mostrada en la figura 9.5.

Figura 9.5.
Regímenes de desplazamiento de una embarcación

Fuente: elaboración propia.



9.4.2.1. Métodos estadísticos y numéricos

Como se mencionó, los métodos estadísticos son los que menos recursos consumen en términos de tiempo, dinero y esfuerzo computacional y, a pesar de las aproximaciones e inexactitudes derivadas de sus análisis, constituyen una herramienta muy útil y práctica en la etapa de diseño conceptual. Esto, debido a que agrupan todos los modelos y ecuaciones matemáticas que tienen como objetivo relacionar los parámetros del barco y sus variables de operación con las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas, como la resistencia y la elevación. Varios autores han propuesto diversas ecuaciones para calcular la potencia requerida de una embarcación para viajar a cierta velocidad. Los más reconocidos son: Crouch (Sponberg, 2011), Wyman (1998) y Blount y Fox (1976), pero el método más usado es el de Savitsky *et al.* (1964), debido a su alta precisión para evaluar el desempeño de botes en regímenes de preplano y plano.

El enfoque numérico CFD utiliza la simulación computacional de la dinámica de fluidos para describir detalladamente el comportamiento del agua y del aire que se mueve alrededor del barco. Este enfoque requiere mallas deformables transitorias para capturar el movimiento del barco, el comportamiento de la superficie libre y las fuerzas de arrastre, que hacen que el cálculo sea muy costoso en términos de recursos informáticos. Se recomienda posicionar la embarcación asumiendo la posición calculada por los métodos estadísticos y ejecutar los estudios en *software* especializados como Ansys-Fluent®. Para el análisis CFD, el tamaño del dominio que contiene el barco debe estar tan lejos como sea posible, para asegurar que no existan interferencias en los límites del cálculo. Este tamaño está limitado por los recursos computacionales disponibles. Es recomendable analizar la mitad del dominio para reducir el costo de los cálculos, aprovechando el eje de simetría que poseen las embarcaciones en dirección longitudinal. De acuerdo con esto, se deben establecer cuatro condiciones de límites: 1) una entrada de presión con velocidad de entrada y superficie libre, así como ubicaciones

de fondo. La ubicación del fondo se fijó a una distancia por debajo de la superficie libre para representar un calado medio del cuerpo de agua; 2) una salida de presión con una superficie libre y una ubicación en el fondo; 3) establecer una condición de límite de simetría para las paredes ubicadas en el plano de simetría medio, arriba, abajo y a babor del dominio; 4) el barco mismo se establece como un límite de pared sin condición de deslizamiento.

Se recomienda evaluar, como mínimo, cuatro velocidades debido al alto costo de los cálculos. A estas velocidades, la posición del barco puede ser determinada por los métodos estadísticos, que permiten calcular el ángulo de ajuste y el hundimiento a las velocidades definidas. El dominio se puede dividir en dos zonas: el dominio externo y un dominio más pequeño que rodea el barco. Esto, con el fin de tener un mejor control local de la malla alrededor del barco y reducir la cantidad total de celdas. Se establecieron iteraciones prestando atención a la estabilización de la presión y las fuerzas desarrolladas sobre el casco y los residuos para las ecuaciones del fluido.

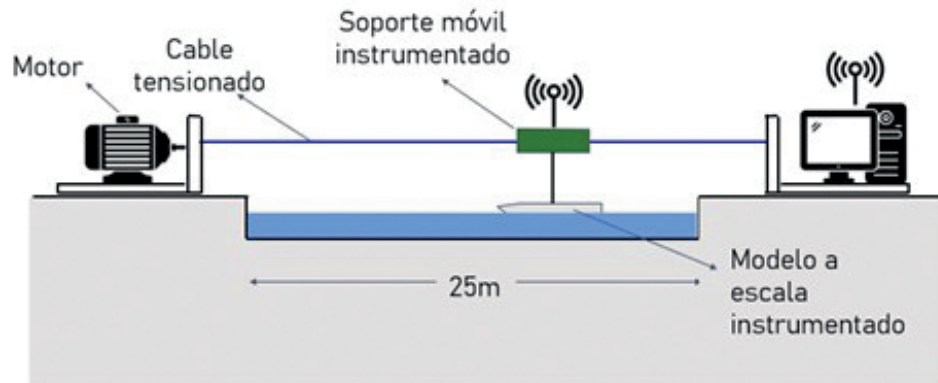
9.4.2.2. Métodos experimentales

Son experimentos a escala real y reducida con barcos en aguas abiertas, canales de agua en circulación o tanques de remolque. Aunque sirven como una técnica de validación, de los tres métodos para estudiar el comportamiento hidrodinámico de una embarcación, son los más costosos en tiempo y dinero, dado que se requiere un montaje experimental denominado *towing tank test*. La ITTC (International Towing Tank Conference) de 1987 indica parámetros y lineamientos para proceder con las pruebas de modelo a escala y ofrece correlaciones para predecir la resistencia del barco real. Pese al difícil acceso y alto costo, son los que producen resultados más cercanos a la realidad, siempre y cuando se siga un buen diseño experimental, lo que hace a la experimentación la herramienta más aceptada científicamente. Un diseñador que esté desarrollando una embarcación eléctrica y no cuente con acceso a un *towing tank test*, puede reemplazar esta prueba por un montaje experimental, como se muestra a continuación, para el cual existen dos opciones (la figura 9.6 muestra la opción 1), que demandan recursos significativamente menores y producen resultados equiparables y significativos para tomar decisiones de diseño.

Las opciones consisten en emular un *towing tank test*, pero a una escala más pequeña, de modo que pueda realizarse en un cuerpo de agua mediano, como un lago o el represamiento de agua de un embalse de generación. En la opción 1, la embarcación se lastra desde su centro de gravedad con una barra vertical que la conecta al carro de pruebas, el cual, a su vez, es lastrado por un motor a lo largo de un par de guayas que cruzan de extremo a extremo el cuerpo de agua. En el carro van dispuestos unos sensores para medir velocidad, hundimiento, ángulo de *trim* y arrastre. Como la embarcación cambia su orientación, con respecto a la superficie del agua a lo largo del tiempo, debido al fenómeno de planeo, la toma de datos o su procesamiento debe hacerse en el intervalo en que la embarcación alcance su posición más estable. La figura 9.6 muestra un esquema de la configuración del experimento.

Figura 9.6.
Esquema de montaje experimental.
Opción 1

Fuente: elaboración propia.



Por su parte, la opción 2 simula el movimiento horizontal de la embarcación, lo que permite medir variables como fuerza de arrastre, velocidad y actitud del bote. Se ejecuta un montaje que hala la embarcación desde un banco que está fijo a tierra y cuya tracción se genera por un motor eléctrico y un rin que envuelve una cuerda de alta resistencia (nylon), que va pegado a la embarcación. Esta tensión se transmite por un sistema de poleas, dispuesto de tal forma que esta tensión puede medirse en una celda de carga y la velocidad de rotación del rin con un *encoder*. Otras variables que describen la posición del bote son monitoreadas con un sensor de medida inercial que va dentro del bote y mediante la grabación de videos de la embarcación desde tierra. De este modo, se puede generar un diseño experimental que permita realizar diferentes pruebas.

9.4.3. Flotación y estabilidad

En el diseño de embarcaciones, uno de los factores que más influyen en la toma de decisiones es la flotación y la estabilidad del casco, por lo que para el desarrollo del diseño de detalle de una embarcación eléctrica se debe poner especial cuidado a estos aspectos. Existen *softwares* especializados como Maxsurf Stability, desarrollado por Bentley, que permiten efectuar estudios de diseño y comportamiento de las embarcaciones. En estos se pueden realizar simulaciones de flotabilidad y estabilidad al casco de la embarcación para poder determinar así el posicionamiento de los principales componentes en su interior. En las diferentes situaciones de uso debe considerarse, tanto navegando, la velocidad de operación, como a velocidades mayores o menores, cuando la embarcación se encuentra vacía, con el cupo medio, lleno e incluso un poco más de este, considerando un factor de seguridad apropiado. El uso de esta herramienta permite al diseñador agilizar el proceso de pruebas e iteraciones en cuanto a la distribución de los componentes y las condiciones a las que se podría enfrentar la embarcación.

Las simulaciones de equilibrio buscan representar el comportamiento del casco en estado de equilibrio, cuando está quieto sobre el agua, con o sin oleaje. En este análisis, que arroja diferentes variables, se toman principalmente: el ángulo *trim* ($^{\circ}$), el ángulo *heel* ($^{\circ}$), el francobordo (m), el calado (m), la longitud de la línea de agua (LWL en m) y el área mojada (m^2). Se toma el peso y la posición de todos los componentes en el bote, con lo cual se calcula un centro de gravedad general. En este escenario se busca que las embarcaciones cumplan con el francobordo mínimo requerido por la norma (0,30 m),

que el ángulo de *trim* esté cerca de 0° al igual que el de *heel*; finalmente, que el centro de gravedad esté posicionado longitudinalmente a un 40 % de la eslora, medido desde el punto de referencia. Para afirmar que la embarcación es estable, se deben cumplir distintos parámetros que exige la normatividad. En países como Colombia, la normativa vigente es la Norma Técnica Colombiana (NTC 4737), el Red Ensign Yacht Code y las pautas de la International Maritime Organization (IMO), que se usan como base para encontrar estos parámetros.

La figura 9.7 presenta la ubicación y medición del francobordo de una embarcación tipo catamarán. El área mojada se representa en color azul, el resto de la embarcación se muestra en líneas negras y la línea de flotación se señala como una línea horizontal azul, que indica la altura del calado resultante con los pesos asignados.

También, se debe tener en cuenta el ángulo de escora de la embarcación, que se evidencia en la figura 9.8 para el caso de un monocasco. Con este se determina el ángulo al cual entra agua a la cubierta de la embarcación y es determinado en la prueba de *large angle stability* del *software* Maxsurf. Los otros parámetros que se miden en esta prueba son los criterios de evaluación del Red Ensign Yacht Code. Estos criterios son medidos automáticamente por el *software* utilizando las diferentes áreas bajo la curva de GZ (brazo de enderezamiento o *righting arm*). Esta curva es ampliamente utilizada en la industria para la medición de la estabilidad de las embarcaciones.

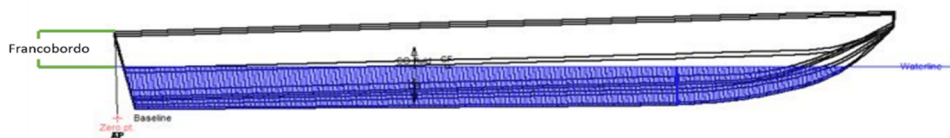


Figura 9.7.
Medida francobordo

Nota: imagen generada a partir del *software* Maxsurf.

Fuente: elaboración propia.

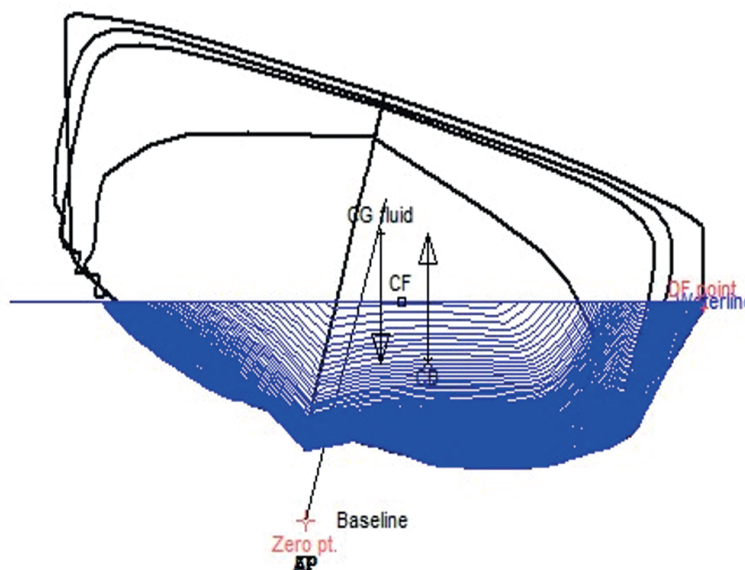


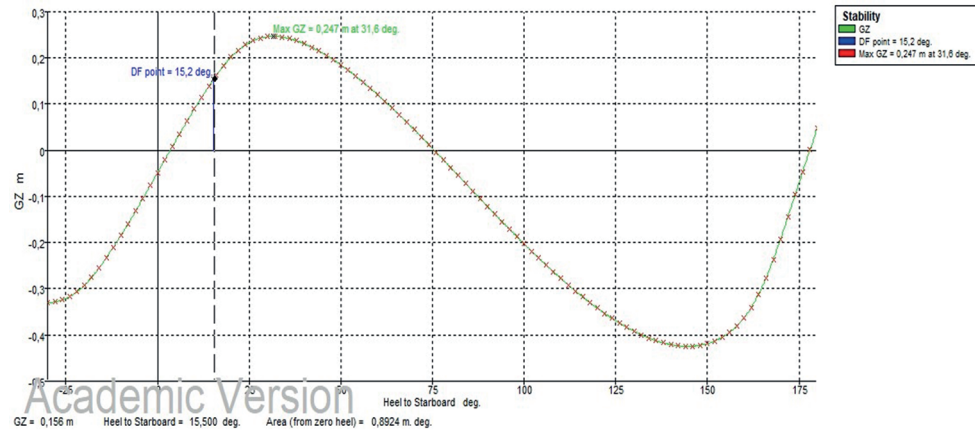
Figura 9.8.
Ángulo de *heel* para la entrada de agua a la borda

Nota: imagen generada a partir del *software* Maxsurf.

Fuente: elaboración propia.

Figura 9.9.
Curva de estabilidad
para un monocasco

Fuente: elaboración
propia.



Después de comprobar que la embarcación efectivamente flota con el margen de seguridad recomendado por las normas, y tiene ángulos de inclinación seguros en varios escenarios de carga, es necesario analizar la estabilidad en escoramento y evaluar el brazo restaurador en este sentido de giro, el cual es el más sensible a cambios de carga y a perturbaciones externas, dado que es la dimensión más pequeña del bote. Para esto, se toman los resultados de equilibrio y se complementa haciendo la valoración de estos resultados en varios ángulos de escoramento. De esta manera, se traza la curva de GZ vs ángulo de escoramento. Así, se obtiene información acerca el ángulo en que ingresa el agua por la borda y qué tan fuerte es el brazo restaurador de la nave, pues una perturbación en alabeo posiblemente pueda lograr que la embarcación se vuelque.

La figura 9.9 expone el comportamiento del momento estabilizador de una embarcación. Dado que el brazo de adrizamiento GZ es positivo, se genera un momento de estabilidad positivo en una parte muy amplia del *heel*, desde alrededor de 5° hasta 75°. Esto significa que la embarcación trata de volver a su posición original debido al momento que genera la fuerza de flotación sobre el centro de gravedad, asumiendo que no hay manera de que el agua entre por la borda a la embarcación. A partir de 75° de *heel*, esta estabilidad se vuelve negativa y la fuerza de flotación ejerce un momento sobre el centro de gravedad de la embarcación tal que termina por voltearla. Sin embargo, 75°, o incluso los 15° a los que el agua sobrepasa la cubierta, son ángulos muy alejados del régimen de operación normal, por lo que la embarcación es bastante segura en este aspecto.

9.5. Dimensionamiento del almacenamiento energético y del sistema de propulsión

Una de las consideraciones más importantes al momento de construir una embarcación naval es el requerimiento de energía. Una vez escogida la forma del casco, es necesario determinar la potencia que debe ser entregada para que cumpla sus requisitos operativos y alcanzar la velocidad deseada en las rutas que va a recorrer. Conocer la potencia necesaria para propulsar un barco permite estimar: la masa de la maquinaria que es función de la potencia instalada, el consumo específico de energía; asimismo, diseñar o seleccionar una planta de propulsión y, por último, refinar la estimación del centro de gravedad del barco (Molland *et al.*, 2011). Los requisitos de la nave dan lugar a una serie de equipos y sistemas para proporcionar las capacidades requeridas. El tamaño y

la capacidad de potencia instalada tienen una relación directa con el peso y la velocidad de desplazamiento deseada de la embarcación (Tupper, 2013).

La eficiencia de los procesos de transformación energética, llevados a cabo en el interior del sistema de propulsión, es determinante para estimar la potencia a instalar y las pérdidas generadas. Estas se traducen en: 1) disminución de la autonomía y 2) necesidad de un aumento de la capacidad instalada (baterías, paneles solares o una combinación de estos), lo que significa que hay que cubrir esas pérdidas para conseguir el rendimiento deseado. El aumento de la capacidad instalada supone una pérdida de espacio disponible en el interior del buque, un aumento de peso y un sobre coste por la necesidad de adquirir más elementos de suministro de energía eléctrica. Esta cascada de efectos podría llevar a un resultado técnicamente inviable o exigir una reducción significativa de ciertas prestaciones. A su vez, esto conlleva a que estos condicionantes hagan que el uso óptimo y la transformación eficiente de la energía en cada punto de la cadena cinemática de la embarcación eléctrica sea considerado como el principal hito del proceso de diseño. Es evidente que las pérdidas de energía pueden alcanzar un valor de hasta el 30 % cuando se trata de barcos eléctricos.

Lo anterior evidencia que los retos en el desarrollo de una embarcación eléctrica son el aprovechamiento y uso eficiente de la energía, lo cual se logra optimizando el proceso de transformación que se lleva a cabo en cada uno de los componentes. Integrar estos componentes en un diseño global y lograr modelar y estimar su comportamiento previo a la fabricación permite a los diseñadores predecir características de desempeño e identificar los puntos para ser mejorados y, así, alcanzar el performance deseado. Existen tres factores determinantes en el desempeño de una embarcación.

El primero es la fuente de energía, la cual, para el caso de las embarcaciones eléctricas, será un conjunto de baterías que proveerán la potencia necesaria para operar la unidad de propulsión. Para este componente se debe optimizar la densidad energética del *pack* de baterías (energía/unidad de masa), para lograr el menor peso y disminuir la cantidad de masa a ser desplazada. Este componente tiene una fuerte influencia en el peso final de la embarcación. El segundo factor es la geometría del bote, que debe, entre otras cosas, ser estática y dinámicamente estable; debe comportarse de forma segura para los ocupantes en las diferentes situaciones de movimiento del barco y albergar todos los componentes que irán dentro del mismo; además, su diseño hidrodinámico debe permitir que el barco ejerza la menor resistencia al desplazamiento. En este punto, el diseño de esta geometría es determinante para el consumo energético y donde el diseñador realiza una mayor intervención. Finalmente, está la unidad de propulsión, encargada de convertir la energía eléctrica suministrada por las baterías en empuje efectivo. Este proceso es clave para estimar la cantidad de energía requerida y la potencia a ser instalada para lograr la velocidad deseada. Para un diseño previo de una embarcación eléctrica, predecir el comportamiento de las variables de ingeniería implícitas en cada uno de los componentes indicados permite validar en una etapa temprana (antes de la fabricación del prototipo final) que el comportamiento es el esperado por el equipo de diseño; también identificar puntos críticos, propiedades físicas a ser cambiadas o atributos que no están llegando a su valor deseado y poder así intervenirlos, para satisfacer las necesidades y los requerimientos que fueron establecidos en las etapas del diseño conceptual.

Entonces, es clara una correlación en el proceso de diseño de cada uno de los componentes que conforman el sistema de propulsión, la cual, si se establece correctamente, conducirá a un uso eficiente de la energía, pues existe un bucle cerrado entre las diferentes variables decisivas de rendimiento. Cada variable influye en los parámetros de diseño de la siguiente, por lo que su definición errónea puede tener implicaciones en el rendimiento de todo el sistema. Para mejorar la eficiencia energética, el diseño del sistema de propulsión puede abordarse 1) individualmente (seleccionando un punto de funcionamiento adecuado de la hélice o el motor); o 2) mejorando todo el sistema simultáneamente (entendiendo el buque y la propulsión como un sistema integrado).

9.5.1. Arquitecturas y configuraciones

A continuación, se expone una descripción de las arquitecturas disponibles para configurar la unidad de propulsión de la embarcación eléctrica. Igualmente, el análisis de cadena de eficiencias desarrollado para las arquitecturas del tipo intraborda, fuera de borda y WaterJet, las unidades más comúnmente utilizadas en las embarcaciones.

9.5.1.1. Intraborda

Un motor intraborda está instalado en el interior de la embarcación, de manera fija y cuya transmisión también se encuentra alojada al interior de esta. En este tipo de transmisiones, la dirección de propulsión está dada por el timón, instalado de modo autónomo a la instalación del motor, algo que las diferencia de las transmisiones dentro-fueraborda y fueraborda. Las embarcaciones que están equipadas con esta arquitectura son muy diversas: desde embarcaciones de madera convencionales, utilizadas por los pescadores durante décadas, hasta las más modernas para la práctica de deportes náuticos como el esquí, pasando por los lujosos yates y grandes buques mercantes. Como se puede deducir, este es el tipo de transmisión más frecuente y que abarca una amplia gama de posibles naves en las que puede ser instalada. Precisamente, existen múltiples variantes dependiendo de la embarcación en la que se encuentre. Estas diferencias surgen principalmente entre la hélice y el acoplamiento que une la inversora al eje (Lorido *et al.*, 2014).

Un análisis de la cadena de eficiencias implícita en este tipo de arquitectura de propulsión identifica tres puntos de conversión energética: motor, transmisión —que puede ser del tipo eje lineal o eje-engranajes cuando se requiere de la instalación de una caja reductora—, y la hélice o propulsor. Cinco potencias características del sistema pueden ser asociadas: al freno o potencia entregada por el motor; la de eje transmitida por el sistema de reducción; la potencia entregada al propulsor, el cual, típicamente, es una hélice de tornillo; la de empuje entregada por el propulsor; y, finalmente, la potencia efectiva, que expone cuánta potencia de empuje final es convertida en empuje efectivo de la embarcación. Los parámetros de eficiencia y potencia son determinantes para caracterizar la solución final para la embarcación, ya que permitirán analizar los valores y tipos de pérdidas asociadas y la identificación de puntos de conversión energética, con el fin de disminuir al máximo, desde la concepción del diseño, los valores de estas pérdidas.

9.5.1.2. Fuera de borda

Los motores fuera de borda son la opción más indicada para botes de pesca y las embarcaciones comerciales de medio y liviano peso. Estos se montan en el exterior de la embarcación, en la parte alta del espejo de popa y pueden inclinarse completamente fuera del agua, lo que hace que sea muy fácil realizar el mantenimiento y, si es necesario, reemplazarlo. Con atributos positivos, los fuerabordas están limitados a ciertos rangos de potencia 50-250 HP. Para obtener o igualar la potencia que produce un motor intraborda, debe haber varios motores externos montados en el espejo de popa. Para dirigir un fueraborda, se debe mover todo el motor en botes más pequeños. Esto, a menudo, se hace usando una caña de timón manual, mientras que en fuerabordas más grandes un volante ajusta la dirección del motor.

Un análisis de la cadena de eficiencias implícita en este tipo de arquitectura de propulsión se realizó lo mismo que para la arquitectura intraborda y se encontró similitud en los puntos de conversión energética y potencias implicadas en la caracterización de la unidad. Existe una diferencia importante y es que el sistema de transmisión en este tipo de arquitectura se basa en el uso de engranajes cónicos de dientes helicoidales, que permiten la transmisión de movimiento a 90°, ya sea para configuraciones en L o L-Drive o geometrías en Z o Z-Drive.

9.5.1.3. WaterJet

La propulsión por chorro de agua se ha vuelto común en los últimos años para botes de alta velocidad y se elige en vez de las hélices convencionales para embarcaciones que requieren: altas velocidades, operación en aguas poco profundas, propulsión protegida, alta maniobrabilidad a todas las velocidades, bajas emisiones de ruido y baja vibración. El agua es atraída hacia la nave y luego empujada hacia afuera a la popa para desarrollar el empuje. La unidad de expulsión puede ser dirigida para dar dirección, por lo que permite el empuje vectorizado. Es llamativo para embarcaciones para las que no se desea contar con partes móviles fuera del casco. El chorro de agua puede ser descargado por encima o por debajo del agua (Tupper, 2013). El uso poco frecuente de los WaterJet, en comparación con la hélice de tornillo, se debió a que, generalmente, la hélice se consideraba como un elemento de propulsión más simple, más ligero y eficaz; no obstante, la introducción de bombas más eficientes y el aumento de la demanda comercial de naves de mayor velocidad son las principales razones de su rápido crecimiento.

La propulsión por chorro de agua tiene ventajas de rendimiento superiores sobre la propulsión de la hélice para embarcaciones de alta velocidad, de más de 30 nudos, debido a su alta eficiencia y buenas características de maniobrabilidad. A diferencia de una hélice que transmite la fuerza de su pala al casco a través del eje, el principio de generación y transmisión de empuje para una unidad de chorro de agua es diferente. El empuje no solo se transmite a través del eje, también se genera en el canal de conducción y se transmite directamente al cuerpo del casco (Brown y Li, 2015).

Los chorros de agua instalados en las embarcaciones de casco múltiple se ubican en el compartimento junto al espejo de popa y comprenden un conducto de entrada poco profundo y de forma cónica, curvado a una sección de la bomba y el estator, que lleva a una boquilla. La geometría del conducto es fija, aunque algunas naves de alta velocidad han tenido un labio inferior móvil para la toma, lo que mejora el rendimiento a baja

velocidad de la nave. La toma está diseñada para recibir el agua de la parte inferior del recipiente y entregarla a la bomba de tal forma que, al entrar en el rotor de la bomba, se evite la cavitación. La bomba, entonces, acelera el agua para proporcionar el empuje. Dependiendo de la velocidad y el tamaño del buque, esta puede ser de flujo axial, de flujo mixto; o, cuando las velocidades superan los 50 nudos, una bomba de dos etapas, en la que el rotor de la primera es un inductor helicoidal para elevar la altura de presión estática del rotor principal. A diferencia de una hélice libre, un chorro de agua funciona dentro de un conducto fijo como una bomba. El conducto de entrada aspira el agua del flujo bajo el casco y la dirige hacia el impulsor de la bomba; allí se añade energía de forma similar a una hélice libre, excepto que las puntas de las palas no pueden generar vórtices libres, por lo que la lámina actúa más como un ala con una envergadura infinita (Yun *et al.*, 2018).

Un análisis de la cadena de eficiencias implícita en este tipo de arquitectura de propulsión se presenta también para la arquitectura intraborda y fuera de borda; la principal diferencia es un nuevo punto de pérdidas de energía que es el ducto que da forma al Jet. Debido a su presencia, y el paso obligado del agua por este canal, existirán pérdidas asociadas al paso del fluido, razón por la que debe incluirse un nuevo término de eficiencias en los cálculos denominado eficiencia del Jet. Adicionalmente, el tipo de propulsor varía de *propeller a impeller*, por lo que la forma de calcular las eficiencias asociadas a estos varía, pues ya no se buscan datos sobre eficiencias de series de hélices operando en aguas abiertas, sino de bombas operando bajo condiciones de flujo uniforme.

9.5.1.4. *Azimuth-podded*

Son hélices montadas en una carcasa o cápsula, que pueden rotar 360° sobre su propio eje para dar empuje en cualquier dirección. Las primeras aplicaciones se limitaban a remolcadores que requieren una buena maniobrabilidad. Hoy en día, un número de grandes barcos, incluyendo los cruceros, están equipados con propulsión eléctrica *azimuth*. Estos se alimentan de energía que, haciendo uso de motores diésel conectados a un generador, brinda la posibilidad de montar grandes cápsulas que son, esencialmente, motores eléctricos sumergidos bajo una ojiva de empaquetamiento y que impulsan una hélice conectada sobre el eje central del motor. Las unidades que transmiten 5-8 MW de potencia son típicas, pero se han instalado algunas de 15 MW en grandes cruceros. Los grandes buques portacontenedores rápidos también son candidatos para el uso de unidades *azimuth-podded*. Como se explicó, la hélice está montada en el rotor y, en algunas ocasiones, se instalan dos hélices en el mismo eje, una hacia adelante y una hacia atrás de la cápsula, lo que permite una mayor área de palas. Existe otra configuración en la que las dos hélices son montados independientemente, usando dos motores *azimuth-podded* (Tupper, 2013).

9.5.1.5. *Rim-thruster*

El propulsor tipo *rim* es un novedoso sistema integrado de propulsión, también llamado propulsor de llanta sin eje. Es una hélice marina que no requiere un eje o una caja de engranajes para la transmisión del par motor. En este sistema, un propulsor del tipo hélice está estructuralmente integrado en un sistema eléctrico motor; el estator del motor está montado en el conducto, mientras que el rotor forma un anillo alrededor

del borde de la hélice (ver figura 9.1). El rotor y el estator son recubiertos con material epóxico y sellados por una lata metálica, respectivamente, a prueba de agua. Toda la unidad funciona sumergida y solo los cables eléctricos pasan a través del casco de la nave. Como un nuevo tipo de propulsión eléctrica, la hélice y el motor eléctrico integrados en el *rim-thruster* hacen de este un sistema revolucionario y de gran innovación, el cual puede ser diseñado como fijo, retráctil o azimutante (Yan *et al.*, 2017). No requiere un sistema de refrigeración del motor y, en consecuencia, la energía no es necesaria; utiliza cojinetes lubricados por agua en lugar de aceite y, por ende, el consumo de energía de los sistemas de lubricación de la nave se reduce. Este tipo de arquitectura es utilizada mayormente en propulsores de empuje lateral para embarcaciones, porque brindan altos valores de torque (Yan *et al.*, 2017).

Otras ventajas de este sistema son: diseño compacto, que ahorra espacio dentro del casco y brinda mayor flexibilidad en la instalación y disposición, así como mayor eficiencia del motor (Blarcom *et al.*, 2002). El rotor del motor que, por lo general es de la configuración de imanes permanentes, está montado en el borde alrededor de la hélice, lo que permite que el motor produzca un par mayor y pueda operar a bajas revoluciones. Las bajas RPM resultan en una baja velocidad relativa sobre las cuchillas, lo que contribuye a una buena eficiencia y a la mitigación de los fenómenos de cavitación. Igualmente, hay mayor eficiencia hidrodinámica cuando se realizan comparaciones de escala con otros modelos (Lea *et al.*, 2003). Por último, en un *rim-thruster* se da la máxima eficiencia en aguas abiertas y es de 67,2 % (Yan *et al.*, 2017).

9.5.2. Comparativo de arquitecturas

Cada tipo de motor de propulsión y de propulsor tiene sus ventajas y desventajas, posibilidad de aplicaciones y también limitaciones, incluidos atributos fundamentales como el tamaño, el costo y la eficiencia. Todas las opciones de propulsión mencionadas (intraborda, fuera de borda, *rim-thruster*, *azimuth-podded* y WaterJet) están en uso actualmente y la elección de un motor de propulsión y un propulsor en particular dependerá del tipo de embarcación, geometría del casco, espacio disponible, además de sus requisitos de diseño y funcionamiento (Mollan *et al.*, 2011). Con el objetivo de sintetizar las diferentes características que califican en términos de ventajas y desventajas a las diferentes arquitecturas, se presenta un cuadro comparativo para las diferentes alternativas descritas. Este constituye una de las principales herramientas para la selección y calificación por parte del equipo de diseño (ver tabla 9.3).

Tabla 9.3. Cuadro comparativo de arquitecturas

Arquitecturas Unidad de Propulsión					
	Outboard	Inboard	Azimuth-podded	WaterJet	Rim-thruster
Ventajas	Fácil acceso a la unidad motriz (M-T-H)	Posibilidad de incorporar motores grandes	Brinda una alta maniobrabilidad a bajas velocidades (empuje vectorizado 360°-giros)	Operación en aguas poco profundas	Diseñado para transmitir alto torque (mayor empuje, menor propulsión)
	Empuje vectorizado	Alto rangos de potencia		Elemento propulsor (<i>impeler</i>) protegido	
	Posibilidad de elevarse completamente fuera del agua	Sirven como lastre de la embarcación (CM)		Alta maniobrabilidad a bajas velocidades	Disminución de pérdidas de energía por menor número de elementos mecánicos
	Simplicidad de actividades de servicio (Mtto)	Mejor distribución del peso y control sobre sus efectos de esta fuerza en la estabilidad	Refrigeración por agua (no requiere de subsistemas de bombeo)	Ausencia de apéndices sumergidos, lo cual reduce la resistencia de la embarcación	Portabilidad de unidad (recambio)
	Liberación de espacio dentro de la embarcación		Disminución de pérdidas de energía por menor número de elementos mecánicos	Bajos niveles de ruido	
	Portabilidad de unidad (recambio)	Incorpora hélices a mayor profundidad, lo cual disminuye el riesgo de cavitación	El menor espacio requerido dentro del casco principal	Seguridad para personas sumergidas alrededor de la embarcación	Refrigeración por agua (no requiere de subsistemas de bombeo)
	Bajo calado (calado superficial)		Mayor libertad para situar la hélice y desarrollar la forma del casco y obtener así una mayor eficiencia.	Menor número de partes móviles	
Desventajas	Las dimensiones y el grosor del espejo de popa de un barco limitarán el tamaño del fueraborda que se puede conectar	Baja portabilidad (recambio)	Alto calado	Dificultad de acceso a la unidad	Alto costo de adquisición y reparación
		Mayor dificultad para actividades de servicio (Mtto)	Mayor dificultad de acceso a la unidad motriz	Alto costo de adquisición y reparación	Rango de potencia comerciales limitado
		Factor de riesgo de incendio	Componente indispensable de la embarcación expuesto a un alto riesgo de deterioros	Perdida de eficiencia a bajas velocidades (<30 nudos)	Dificultad de acceso a la unidad motriz
	Afectación de la distribución del peso	Disminución del espacio disponible dentro de la embarcación		Posibilidad de obstrucción a causa de desechos fluviales o marinos	Complejidad de actividades de servicio (Mtto)

Arquitecturas Unidad de Propulsión					
	Outboard	Inboard	Azimuth-podded	WaterJet	Rim-thruster
Desventajas	Rangos de potencia limitados	Maniobrabilidad limitada (requiere timón)	Complejidad de actividades de servicio (Mtto) y altos costos de intervención	Normalmente tienden a ser más pesados que los sistemas convencionales basados en hélices	Componente indispensable de la embarcación expuesto a un alto riesgo de deterioros
	Hélices más cerca de la superficie, lo cual aumenta el riesgo de cavitación	Necesidad de calado más profundo			

Fuente: elaboración propia.

9.5.3. Cálculo

La potencia requerida por una embarcación se define como la energía necesaria para remolcar la nave a cierta velocidad. Su relación se define en la siguiente ecuación:

$$PE = R_t \times V_s$$

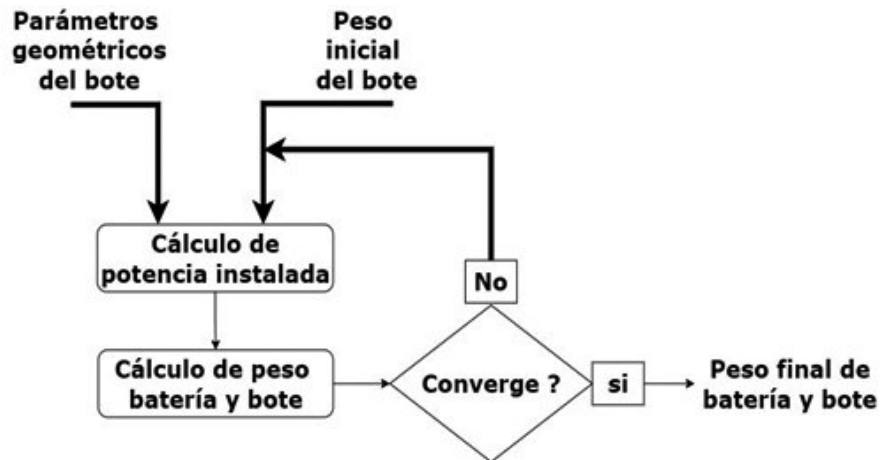
Donde PE es la potencia efectiva, R_p la resistencia total de la embarcación y V_s es la velocidad de desplazamiento del barco. La potencia total para ser instalada excederá la potencia entregada por el sistema de propulsión debido a las pérdidas. Estas corresponden en el sistema de transmisión (pérdidas en el eje o en los engranajes) en el motor, en la hélice o el componente hidrodinámico y por un margen de potencia adicional de diseño que tiene en cuenta fenómenos aleatorios como el clima, viento, aguas poco profundas y mareas. Este margen adicional, generalmente, oscila entre 15-30 % (Molland *et al.*, 2011). La eficiencia de la hélice se conoce como coeficiente cuasipropulsivo η_D . La relación global de eficiencias para un sistema de propulsión eléctrico se presenta a continuación.

$$\text{Potencia instalada (PI)} = \frac{\text{Potencia efectiva (PE)}}{\eta_D} \times \frac{1}{\eta_M} \times \frac{1}{\eta_T} \times \frac{1}{\eta_P} + \text{márgenes adicionales}$$

$$\eta_D = \frac{\text{Potencia efectiva (PE)}}{\text{Potencia entregada (PD)}}$$

Donde η_M es la eficiencia del motor, η_T , la eficiencia de la transmisión y η_P es la eficiencia del convertidor de potencia.

Figura 9.10.
Proceso iterativo para el consumo de energía y estimación del peso de la batería



Fuente: elaboración propia.

Tabla 9.4. Parámetros para calculo PE

Parámetros
Eslora total del barco
Manga total del barco
Calado del barco
Desplazamiento del barco
η_M
η_T
η_D
Velocidad crucero

Fuente: elaboración propia.

Como se ha mencionado a lo largo de este capítulo, el cálculo de la cantidad y peso de las baterías depende de los valores de energía requerida. En ese sentido, su peso puede ser calculado con los valores de potencia a ser instalada P_I según demande la embarcación diseñada. Esto permite encontrar el requerimiento de energía neta para cubrir una ruta definida a una velocidad dada. El nuevo peso de la batería aumenta el peso total del barco, lo que a su vez aumenta la resistencia total del mismo, lo que lleva, entonces, a un proceso iterativo. La figura 9.10 resume el proceso que debe ser llevado a cabo estableciendo un criterio de convergencia en el cual se evalúe el residuo calculado con el tamaño de la batería actual versus el anterior. El valor final se alcanza cuando el residuo se vuelve más pequeño que una tolerancia dada ϵ .

Para estimar la potencia efectiva P_E se requiere de los datos presentados en la tabla 9.4.

La potencia efectiva a una velocidad determinada se calcula utilizando los modelos estadísticos listados, los cuales corresponden a Crouch, Wyman (1998), Savitsky (1964) y Blount y Fox (1976). En el caso de los dos últimos, la resistencia calculada conduce a la potencia efectiva (P_E) a ser entregada por la hélice. Por el contrario, Crouch relaciona las condiciones de funcionamiento con la potencia entregada y Wyman, a su vez, utiliza la potencia instalada (P_I). Una vez se calcula la potencia a diferentes velocidades, haciendo

uso de los métodos estadísticos (pueden ser complementados con análisis CFD y métodos experimentales como se presentó en la sección 1.5), la estimación del tamaño de la batería iterativa se realiza con un valor de peso inicial establecido para la embarcación (sin considerar las baterías), la velocidad de diseño y la distancia de viaje. Adicional a esto, se debe seleccionar una química y especificación de batería con el objetivo de integrar los valores de capacidad energética entregada en amperios-hora (Ah) al cálculo.

Los métodos Wyman, Savistky y Blount y Fox son más adecuados para representar el comportamiento de la embarcación en las velocidades de preplaneo y planeo, puesto que sus coeficientes para la estimación de la potencia se determinan con los datos de rendimiento de una amplia variedad de barcos —para el caso de Wyman (1998)— y los experimentos de diferentes series de barcos de planeo —en el de Savistky *et al.* (1964)— el método de Blount y Fox es una variación de Savitsky (Blount y Fox, 1976). Por otro lado, el método Crouch calcula la potencia a la velocidad requerida con un coeficiente más simple, dependiendo del tipo de barco que puede no representar el comportamiento de planeo, así como los otros métodos Skene (1973). Con la selección del modelo estadístico que mejor describa el caso específico, el proceso iterativo puede converger fácilmente en una estimación inicial de las necesidades energéticas de una embarcación eléctrica, acción de extrema importancia en la etapa del diseño conceptual.

9.6. Sistema de control

Es el conjunto de partes que debe contener para operar adecuadamente el motor de la embarcación: son todos los sensores, actuadores y sistemas de potencia necesarios para entregar la potencia adecuada y generar, de este modo, movimiento. Para el control, es preciso indicar que la fuente de energía es un grupo de baterías de las que se extrae información de variables de voltaje y corriente, lo que permite determinar los límites de operación de los componentes de potencia. Estas baterías son gestionadas por un cargador y por un BMS (*battery management system*). Para mayor detalle acerca de este tema, remitirse a la *sección 2.2.3.4. Sistema de control para los motores*.

9.7. Techo solar

Uno de los sistemas relevantes en la conceptualización del bote electro-solar es su techo fotovoltaico. Su principal función es proveer una parte de la energía eléctrica que alimenta el sistema de propulsión del bote. Además, es un sistema indispensable para proteger a los usuarios que se encuentran dentro del vehículo contra el impacto de objetos, la lluvia, el agua del río, el sol, la fauna y flora, entre otros. Una propuesta viable requiere de un análisis detallado, tanto formal como funcionalmente hablando, de un sistema costo-eficiente que mejore las prestaciones de la embarcación y, así, la calidad de prestación del servicio de transporte. El techo de la embarcación tiene una relación significativa con los demás subsistemas, por lo que es preciso identificar las necesidades provenientes de ellos y analizar cómo estos requerimientos pueden ser solucionados desde el techo de la embarcación. La figura 9.11 muestra un diagrama de interferencias que expone las distintas incidencias que tiene el techo con los demás subsistemas de una embarcación.

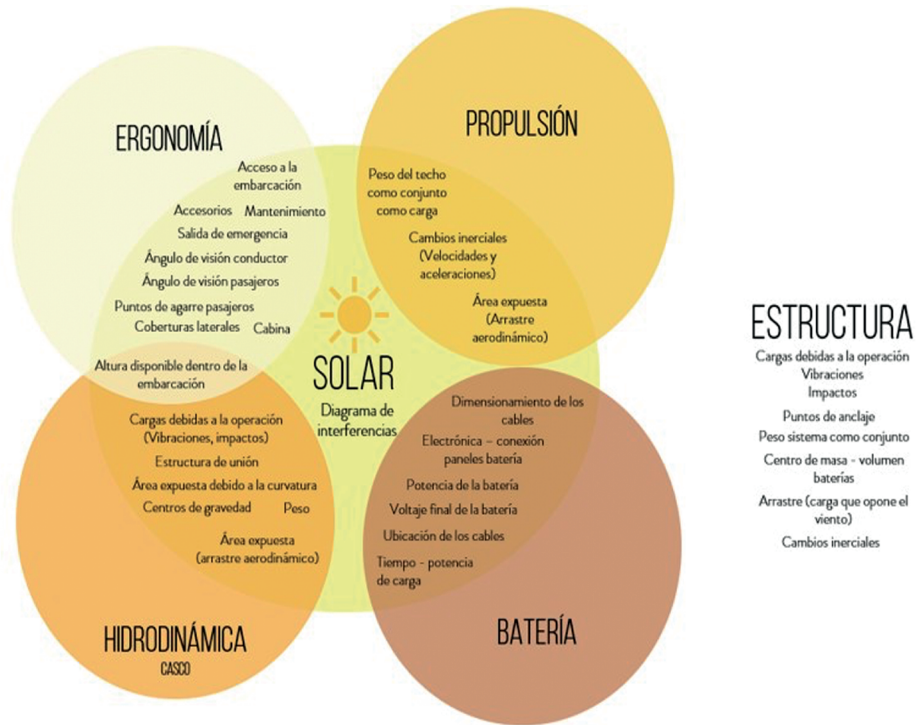


Figura 9.11.
Diagrama de interferencias

Fuente: elaboración propia.

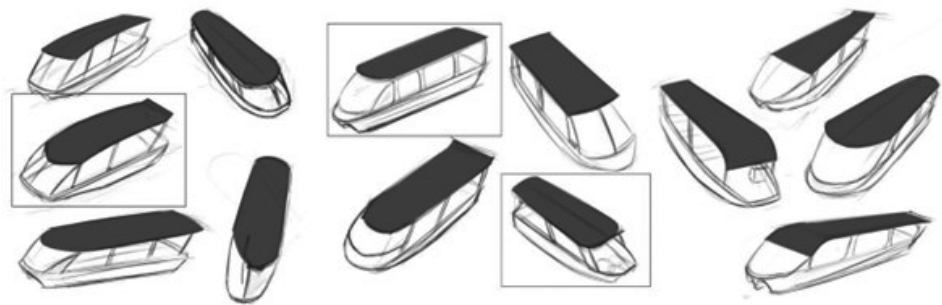


Figura 9.12.
Geometrías para techo de embarcación electro solar

Fuente: elaboración propia.

Así, las características que pueden impactar en la forma del techo son: la ergonomía, es decir, las consideraciones necesarias para que los usuarios (desde el conductor hasta los pasajeros) tengan una buena experiencia en la relación con el ambiente interno de la embarcación; la hidrodinámica, referida a las interacciones físicas que tiene el casco de la embarcación con el agua y el movimiento mismo, que puede afectar el funcionamiento adecuado del techo; la propulsión, la cual considera los efectos que tiene el techo sobre la embarcación en función de la capacidad propulsada y de la resistencia con el aire; y la batería, que son las características eléctricas necesarias para el funcionamiento del panel y el transporte de la energía generada a una unidad de almacenamiento.

Una vez identificados estos criterios de diseño, se procede con la exploración formal que integre las funciones establecidas desde el proceso de diseño conceptual y las inci-

dencias con los demás subsistemas de la embarcación que fueron listadas. Comúnmente, la mayoría de las formas utilizadas tienen grandes relaciones de esbeltez, es decir, son más largas que anchas, la cual es una característica de las embarcaciones y, por lo tanto, la estructura del techo. La figura 9.12 presenta algunas geometrías comunes de techos para embarcaciones eléctricas.

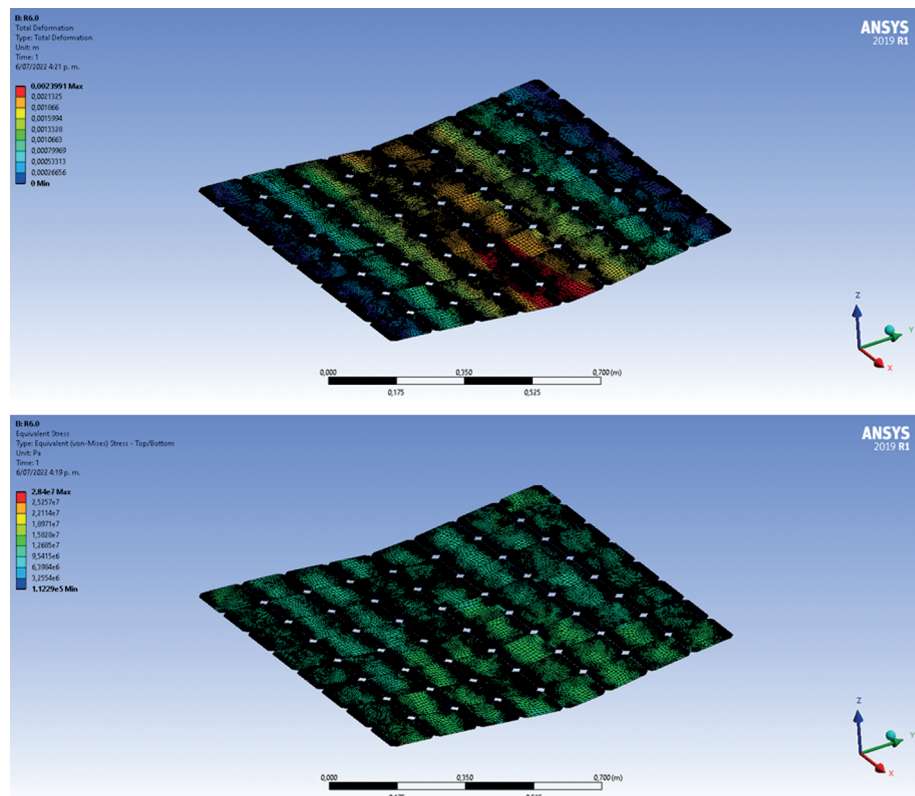
En el diseño del techo solar de una embarcación eléctrica, debe asegurarse que el conductor tenga un adecuado ángulo de visión para facilitar la maniobrabilidad y que, además, las columnas de soporte del techo estén dispuestas de forma adecuada, para permitir la visibilidad de los pasajeros, garantizando el espacio suficiente para las entradas y salidas laterales. La altura del techo también debe pensarse lo más cómoda posible, procurando que la altura del centro de masa sea baja, para disminuir al máximo los momentos flectores generados por los efectos inerciales de la embarcación cuando se encuentra en condiciones dinámicas. Para transporte, la estructura del techo debe tener la suficiente capacidad para soportar equipaje o carga, por lo cual, se fabrica de diversas capas en un laminado compuesto con materiales como *core mat*, *honey comb* y láminas de espuma de poliuretano para aumentar el momento de inercia.

Lo anterior, aunque ofrece buenas características estructurales, conlleva, sin embargo, a un aumento considerable del peso. Respecto a la estructura portante, las opciones comerciales más utilizadas consisten en materiales como aceros estructurales y algunas aleaciones de aluminio; igualmente, se consideran aleaciones de níquel, pero esto acarrea un alto costo. La alta resistencia específica del aluminio y su maleabilidad lo hacen un candidato a ser utilizado en la estructura. Al pandeo, la propiedad mecánica más importante es el módulo de elasticidad, por lo que cualquier aleación de aluminio podría funcionar, pues este parámetro no varía con los componentes de aleación. Para el acero, si bien es posible pintarlo o tratarlo de manera superficial para otorgarle propiedades de resistencia a la corrosión, estos recubrimientos tienen la desventaja de que, bajo algún impacto, pueden desprenderse de la estructura, lo que origina un inicio de corrosión, que es degenerativo en el tiempo. Este es un efecto indeseado, ya que se desprenden pequeñas masas corroídas, lo que disminuye sustancialmente la resistencia estructural con el paso del tiempo. De igual manera, la alta densidad dificulta operaciones de montaje e instalación de los operarios.

Respecto a los paneles solares, se pueden implementar ejemplares comerciales que adopten las geometrías típicamente curvas del techo. Es posible ejecutar procedimientos de laminado de paneles solares curvos que se adapten, en mejor medida, al techo. Para esto, los materiales del laminado del refuerzo del panel solar deben garantizar la integridad de la celda, por lo cual requieren una alta tenacidad, poca deformación elástica bajo las cargas, lo que significa un alto límite elástico. Los materiales de mayor disponibilidad comercial son, básicamente, tejidos a base de fibras de carbono y de vidrio, en los que los últimos son de mayor uso en estructuras de embarcaciones. Dado que el techo de una embarcación electro-solar tiene condiciones de operaciones asociadas al casco de la embarcación y al sistema completo, es necesario efectuar un análisis de integridad estructural de los módulos fotovoltaicos, teniendo en cuenta la alta fragilidad que presentan las celdas fotovoltaicas.

Figura 9.13.
Esfuerzos y deformaciones en el módulo PV

Fuente: elaboración propia.



Para establecer las cargas asociadas a un análisis mecánico de esfuerzos, se precisa identificar la condición más crítica asociada a la operación de la embarcación. La primera surge por la posibilidad de impactar con objetos flotantes en el río, como troncos u otros, lo cual implica cargas asociadas a la parte inferior del casco y, por lo tanto, de la estructura del techo, que, se supuso, actúan con una aceleración crítica de 3G en la dirección z. Asimismo, y teniendo en cuenta las velocidades finales de la embarcación y los tiempos de frenada, se deben incluir las fuerzas inerciales asociadas a la desaceleración. La figura 9.13 muestra un análisis de esfuerzos y deformaciones para una embarcación, cuya velocidad máxima es de 60 km/h y un tiempo de frenado de 10 segundos a partir de esa velocidad.

Respecto a la operación de los paneles solares ubicados en el techo y en referencia a los ciclos de operación de la embarcación electro-solar, estos tienen las siguientes tres etapas operativas. La primera, la etapa en movimiento: debido a los altos consumos energéticos del bote, en comparación con la generación esperada de los paneles, no es necesario realizar períodos de desconexión de dichos paneles buscando proteger la batería. Es decir, mientras la nave esté en movimiento, los paneles fotovoltaicos siempre estarán entregando energía. Segundo, la etapa de carga, en la que el bote realiza las operaciones de carga necesarias, tanto en medio de una ruta y otra como durante una misma ruta. Durante la etapa de recarga, los paneles fotovoltaicos entregan energía al cargador del bote. Finalmente, la etapa de atracado en el puerto se presenta en los momentos entre una ruta y otra (o en su defecto un día y otro), en los cuales el bote no se esté realizando operaciones de recarga de energía. En esta fase se definen dos estados

operativos; uno cuando se está usando la generación de los paneles del techo y otro cuando no se está haciendo uso de esta generación.

9.8. Telemetría

Este sistema tiene como finalidad recolectar, almacenar y tratar adecuadamente los datos provistos por la embarcación, para lo cual se emplean diferentes sensores y elementos. Los sensores deben capturar los datos de las variables más cruciales como velocidad, temperatura, posición, voltaje, corriente, entre otras. Se requiere incluir, asimismo, dispositivos de almacenamiento temporal capaces de almacenar los datos recibidos desde los sensores de forma ordenada y segura. También, un dispositivo de comunicaciones que permita enviar los datos desde el vehículo hasta el sitio de almacenamiento final. El diseño del sistema de instrumentación y telemetría de la embarcación debe tener en cuenta las diferentes tecnologías disponibles para ser implementadas en las ciudades del futuro, teniendo como referente siempre la interoperabilidad, la seguridad, las facilidades de implementación y los requerimientos del usuario final.

La generación de información en un sistema de transporte solar puede ser variada, incluyendo la fuente directa de la generación de datos y las fuentes externas, que incluyen componentes o sensores que adquieren datos en tiempo real. Por medio de algún dispositivo envían la información al sistema de almacenamiento de información (local o en la nube), para ser procesada y analizada y generar valor agregado al sistema. Esta debe tener valor para optimizar el sistema y, con ello, mejorar los recursos disponibles en la configuración de este.

Algunos de los sensores y componentes más importantes del sistema de telemetría de una embarcación electro-solar son:

- Medidor de voltaje: se encarga de monitorear el nivel de carga de la batería, es decir, analiza el voltaje que contiene la batería para recortárselo al usuario.
- Medidor de salud de las baterías: es el sensor que vigila el estado de cada una de las baterías que tiene el diseño. Este dispositivo se conoce como BMS.
- Medidor de corriente: mide la corriente que demanda el motor de acuerdo con el estado de operación en que se encuentre. Esto para prevenir situaciones que pongan en riesgo el motor y todo el sistema, tanto eléctrico como electrónico, que conformen el vehículo. Otro medidor de corriente se encarga de medir la corriente que entra y sale de las baterías.
- Medidor de revoluciones: este módulo determina la velocidad a la que se encuentra girando el motor.
- Medidor de temperatura: se encarga de estimar el nivel de calor al que se encuentra sometido el motor debido a un determinado estado de operación.
- Medidor de humedad: ayuda a conocer qué tanta humedad puede haber dentro del sistema eléctrico o dentro del motor, con el propósito de prevenir posibles daños por oxidación o cualquiera que pueda ocasionar la humedad.
- Georreferenciación: se encarga de entregar la posición geográfica de cada dato.
- Medidor de aceleración: este módulo registra los diferentes cambios en la aceleración a los que se somete el vehículo.
- Medidores de carga: inspecciona las tensiones en puntos críticos de los cascos o chasis.

- Almacenamiento o memoria: es un conjunto de dispositivos que permiten mantener una información invariante durante un periodo de tiempo, bajo unas condiciones mínimas de operación. Usualmente, es una memoria con capacidad de almacenar los registros por un tiempo lo suficientemente largo que evite la pérdida de información en caso de no poder ser transmitida al sistema central de almacenamiento.
- Procesador: es la unidad encargada de administrar todos los sistemas de sensores, comunicaciones y almacenamiento adheridos al vehículo. Por lo general, se desarrolla con un elemento programable que contiene diferentes interfaces de comunicación e intercambio de datos, por ejemplo, un controlador, un minicomputador, entre otros.
- Comunicaciones: después de recolectar los datos, estos tienen que ser enviados desde la ubicación de los vehículos hasta un lugar donde puedan ser almacenados y tratados. Para la transmisión se debe tener en cuenta la distancia, el canal por el cual se puede transmitir, según el Ministerio de Comunicaciones, y qué tecnología utilizar. Teniendo en cuenta que la distancia es el factor más considerable, se opta por una tecnología de transmisión celular.

El primer proceso en la telemetría de una embarcación electro-solar es la adecuación de las variables a medir. Las energías que ingresan al vehículo son: la energía eléctrica, la irradiación solar y la interacción humana para acelerar y dirigir. El sistema de monitoreo registra algunas de estas, así como su interacción con los diferentes subsistemas y componentes del bote eléctrico a través de un sistema de sensores, que se integran a componentes internos del vehículo, mientras que otros deben ser instalados por separado. En algunos casos, las mediciones son directas y en otras indirectas; en estas últimas, es necesario hacer una adecuación de tipo eléctrica, mecánica, química u otra; a estas señales se les puede conectar el sensor respectivo. Luego, periódicamente, el programa en la unidad de procesamiento debe registrar los diferentes valores desde los sensores. La periodicidad del registro se define desde el *software* para cada uno de los sensores; luego, hay que adecuar los datos según el tipo de variable y el sistema de registro; después, los datos se llevan al sistema de almacenamiento en la memoria junto con las referencias adecuadas y, por otro lado, son almacenados en registros que pueden ser observados desde una interfaz HMI (*human machine interface* o interfaz hombre máquina) disponible en el vehículo. Igualmente, y cuando se tiene disponibilidad, se transmiten a través de una comunicación inalámbrica celular a la base de datos principal.

Los principales aspectos para ser monitoreados en el bote son:

- Sistema de propulsión: mide las potencias mecánicas entregadas por el sistema de transmisión y el motor, así como el voltaje y la corriente de este último.
- Sistema de almacenamiento de energía: busca monitorear variables como la cantidad de energía que es cargada a la batería, que es entregada al motor y el nivel de carga. También, se encarga de registrar variables relacionadas al estado de salud de la batería, como su temperatura o la degradación estimada que haya sufrido.
- Estructura del bote: es necesario que la nave mantenga la estabilidad en todo momento, lo cual hace indispensable monitorear las inclinaciones, rotaciones y aceleraciones a las que se someta el vehículo durante su operación, así como su calado. Adicionalmente, se

requiere registrar la ubicación del bote con el fin, por ejemplo, de estimar la cantidad de energía requerida para llegar al siguiente destino.

- Cantidad de pasajeros: el peso que esté transportando el bote es crucial para los cálculos de los consumos de energía. Una manera de aproximar el peso variable en el bote es llevar un registro de la cantidad de personas con cierta estimación de peso por pasajero.
- Recarga de energía: se busca examinar la cantidad de energía recargada en estaciones, así como la que se obtiene a través de la generación fotovoltaica de los paneles en el techo de la embarcación.
- Variables climáticas: se desea, también, monitorear variables como la irradiancia solar, la temperatura ambiente y la del agua.

Para la localización y velocidad de la embarcación se puede usar un GPS, el cual entrega la localización de manera directa y la velocidad a partir de la diferencia en el tiempo entre dos registros consecutivos. Para estimar el número de pasajeros y, de esta manera, el peso de la embarcación, se puede calcular un peso aproximado por cada uno de estos. Una opción para conocer la cantidad es un sensor de asiento: el sensor detecta presión en el asiento a irradiancia, se mide con un piranómetro y la energía eléctrica generada por los paneles solares con la implementación de un MPPT (*maximum power point tracker*). Las inclinaciones y rotaciones, aceleración y *jerk* del bote son medidas directamente por una unidad de medición inercial (IMU, por sus siglas en inglés).

Como cierre del presente capítulo se presenta el resultado final del prototipo de embarcación desarrollado en el proyecto de investigación Energética 2030 (ver figura 9.14). Se obtiene una embarcación electro-solar denominada Serena (*sustainable energy for river electric navigation*) para uso en el transporte rápido de pasajeros por vías fluviales y navegación en cuerpos de agua interiores, con una capacidad de transporte de doce personas y una potencia nominal instalada de 150 HP (110kW) (potencia pico de 295 HP (220kW)). Esta posee un conjunto de catorce paneles solares, que juntos conforman un área solar de 13,7 m². Asimismo, cuenta con una capacidad de almacenamiento en batería de 117 kW/h expandible a 176 kW/h. Por último, integra dentro de sus sistemas un algoritmo de control que busca hacer uso eficiente de la energía disponible en las baterías, para llegar con éxito al destino estipulado y, finalmente, su arquitectura interna está especialmente diseñada para albergar los componentes eléctricos propios de este tipo de embarcaciones.

Los capítulos subsiguientes, correspondientes a la tercera parte de este libro, presentan soluciones alrededor de los retos que conlleva la implementación de la movilidad eléctrica en las ciudades, pasando por la infraestructura de recarga y su integración en las ciudades inteligentes, hasta las políticas desarrolladas alrededor de estas nuevas tecnologías. Estos aspectos son un factor clave para la viabilidad y posibilidad de implementación de este tipo de tecnologías.

Figura 9.14.
Embarcación electro solar Serena

Fuente: elaboración propia.



9.9. Referencias

- Arcadis BV- Jesyca SAS. (2015). *Plan maestro fluvial de Colombia 2015*. Ministerio de Transporte de Colombia. [https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/PLAN %20MAESTRO %20FLUVIAL %20- %20MINTRANSPORTE.pdf?ver=2020-06-09-165943-830](https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/PLAN%20MAESTRO%20FLUVIAL%20-%20MINTRANSPORTE.pdf?ver=2020-06-09-165943-830)
- Bara, P., Sánchez, R. y Wilmsmeier, G. (2006). *Hacia un desarrollo sustentable e integrado de la Amazonía: los corredores de transporte en la cuenca amazónica central-occidental y sus afluentes principales en Brasil, Colombia, Ecuador y Perú*. CEPAL.
- Bennabi, N., Menana, H., Charpentier, J., Billard, J. y Nottelet, B. (2017). Improving efficiency and emissions of small ships by the use of hybrid electrical propulsion. *Journal of Power Supply*.
- Blarcom, B., Hanhinen, J. y Mewis, F. (2005). The commercial rim-driven permanent magnet motor propulsor pod. *Ship Production Symposium, Boston*. <https://www.friedrich-mewis.de/publications/pod-drives-rim-drives.html?file=files/odd/img/Mewis/Publications/Download%20Publication%20No.%2022.pdf&cid=1495>
- Blount, D. y Fox, D. (1976). Small-craft power prediction. *Marine Technology*, 13, 14-45. <http://dx.doi.org/10.5957/mt1.1976.13.1.14>
- Bolvashenkov, I., Herzog, H., Rubinraut, A. y Romanovskiy, V. (2014). Possible ways to improve the efficiency and competitiveness of modern ships with electric propulsion systems. *IEEE Conference on Vehicle Power and Propulsion (VPPC)*. (pp. 1-9). IEEE.
- Borman, J., Sharman, B., Smith, K., Mann, D. y Slee R. (1995). Electric propulsion of passenger ships and other vessels. discussion. *Transactions-Institute of Marine Engineers*, 106, 77-104.
- Brown, M. y Li, D. (2015). Advanced tools for waterjet performance prediction. *SSPA Highlights*, 60, 12-13.
- Campillo, J., Domínguez, J. y Cabrera, J. (2019). Sustainable boat transportation throughout electrification of propulsion systems: challenges and opportunities. *2nd Latin American*

- Conference on Intelligent Transportation Systems (ITS LATAM)*. <http://dx.doi.org/10.1109/ITSLATAM.2019.8721330>
- Candela. (2018). *Candela: the journey*. <https://candelaspeedboat.com/company/>
- Candela. (s. f.). *Technology*. <https://candela.com/technology/>
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (1985). Los recursos hídricos de América Latina y el Caribe y su aprovechamiento. *Estudios e Informes de la CEPAL*, 53. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/8494/S8500028_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- De Castro, J. y Rössling, A. (2012). Development of solar powered boat for maximum energy efficiency. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'12)*. *European Association for the Development of Renewable Energies, Environment and Power Quality (EA4EPQ)*.
- Dewangan, A., Panigrahi, I. y Paramguru, R. (2018). Development of energy efficient and aquatic friendly solar electric boat. *International Conference on Recent Innovations in Electrical, Electronics & Communication Engineering (ICRIEECE)*, Bhubaneswar, India, 469-472. doi: 10.1109/ICRIEECE44171.2018.9008454.
- Dieter, G. y Schmidt, L. (2009). *Engineering design*. McGraw-Hill.
- DNV. (2021). *Rules for Classification of Ships, July 2021 Edition*. <https://www.dnv.com/news/rules-for-classification-of-ships-july-2021-edition-203529>
- Doyle, T., Stevens, H. y Robey, H. (1997). An historical overview of navy electric drive. *Naval Symposium on Electric Machines*, 137-148.
- Faltinsen, O. (2005). *Hydrodynamics of high-speed marine vehicles*. Cambridge University Press.
- Figuroa, A. (2020). *Transporte marítimo fluvial: vías navegables interiores*. [Tesis de grado en Náutica y Transporte Marítimo, Universidad de La Laguna]. Repositorio Universidad de La Laguna. <https://riull.ull.es/xmlui/bitstream/handle/915/20439/Transporte%20Maritimo%20Fluvial%20Vias%20Navegables%20Interiores%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Frisk, D. y Tegehall, L. (2015). *Prediction of high-speed planing hull resistance and running attitude - A numerical study using computational fluid dynamics*. [Tesis de maestría, University of Technology Chalmers]. <https://publications.lib.chalmers.se/records/full-text/220759/220759.pdf>
- Gudiño, D. y Hermosillo, J. (2015). *Estudio del desempeño hidrodinámico y energético de una embarcación solar demostrativa*. xxxix Semana Nacional de Energía Solar, Campeche, México. Asociación Nacional de Energía Solar. <http://hdl.handle.net/11117/5321>
- Hansen, J. y Wendt, F. (2015). History and state of the art in commercial electric ship propulsion, integrated power systems, and future trends. *Proceedings of the IEEE*, 103(12), 2229-2242. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2458990>
- Hemdana, I., Habib, D., Bouaicha, H., Zaoui, C. y Nejim, S. (2018). Hybrid electrical power supply for an electric propelled boat. *International Conference on Advanced Systems and Electric Technologies (IC_ASET)*, Hammamet, Tunisia, 319-326. <http://dx.doi.org/10.1109/ASET.2018.8379876>
- Jara, J., Pastor, H., Garcia, J., Casafont, M., Araujo, E. y Calderón, E. (2013). Embarcaciones solares, una evolución al transporte marino en las islas Galápagos, Ecuador. *1st International congress and scientific expo ISEREE*, 1-8.

- Kabir, S., Alam, I., Khan, M., Hossain, M., Rahman, K., y Amin, N. (2016, November). Solar powered ferry boat for the rural area of Bangladesh. In 2016 International Conference on Advances in Electrical, Electronic and Systems Engineering (ICAEEES) (pp. 38-42). IEEE
- Łapko, A. (2019). Is it time for motorboat e-mobility? *Transportation Research Procedia*, 39, 280–289. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.06.030>
- Lea, M., Thompson, D., Blarcom, B., Eaton, J., Friesch, J. y Richards, J. (2003). Scale model testing of a commercial rim-driven propulsor pod. *Journal of ship production*, 19(2), 121-130. <http://dx.doi.org/10.5957/jsp.2003.19.2.121>
- Lewis, E. (1988). Principles of naval architecture: Resistance, propulsion and vibration (volume 2). *Society of Naval Architects and Marine Engineers*.
- Lorido, D., Rodríguez, D. y Fernández, J. (2014). *La transmisión en motores marinos; interior, dentro-fueraborda, fueraborda*. [Tesis de grado, Universidade da Coruña].
- McCoy, T. (2002). Trends in ship electric propulsion. *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 1. 343-346. <https://doi.org/10.1109/PESS.2002.1043247>
- Minami, S., Toki, T., Yoshikawa, N., Hanada, T., Ashida, M., Kitada, S. y Tsukuda, K. (2010). A newly developed plug-in hybrid electric boat (PHEB). *Journal of Asian Electric Vehicles*, 8(1), 1385-1392. <https://doi.org/10.4130/jaev.8.1385>
- Minami, S., Hanada, T., Matsuda, N., Ishizu, K., Nishi, J. y Fujiwara, T. (2013). Performance of a newly developed plug-in hybrid boat. *Journal of Asian Electric Vehicles*, 11(2), 1653-1657. <https://doi.org/10.1109/EVS.2013.6914716>
- Ministerio de Transporte. (2018). Código de navegación fluvial. <https://www.armada.mil.co/sites/default/files/normograma{ }arc/88.Ley1242de2008.pdf>
- Mira, J., Valderrama, S., Londoño, M., Giraldo, E., Betancur, E., Osorio, G. y Mejía, R. (2020). Preliminary design tools applied to a solar powered vessel design: a South American river analysis. *Fifteenth International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)*, 1-9. doi: 10.1109/EVER48776.2020.9242537.
- Molland, A. (2011). *The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7506-8987-8.X0001-7>
- Molland, A., Turnock, S. y Hudson, D. (2011). *Ship resistance and propulsion: practical estimation of ship propulsive power*. Cambridge University Press.
- Nykvist, B. y Nilsson, M. (2015). Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature climate change*, 5(4), 329-332. <https://doi.org/10.1038/nclimate2564>
- Obaid, W. y Hamid, A. (2019). Wind-fuel-cell-solar hybrid electric boat power design with mppt system. *8th International Conference on Modeling Simulation and Applied Optimization (ICMSAO)*, 1-5. <https://doi.org/10.1109/ICMSAO.2019.8880330>
- Østergaard, P., Duic, N., Noorollahi, Y., Mikulcic, H. y Kalogirou, S. (2020). Sustainable development using renewable energy technology. *Renewable energy*, 2430-2437. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.094>
- Parekh, R. (2004). VF control of 3-phases Induction motors Using PIC16F7X7 microcontrollers. *Microchip*. <http://http://ww1.microchip.com/downloads/cn/AppNotes/cn012129.pdf>
- Pestana, H. (2015). Future trends of electrical propulsion and implications to ship design. *Maritime Technology and Engineering - Proceedings of MARTECH 2014: 2nd International Conference on Maritime Technology and Engineering*, 79-806. doi: 10.1201/b17494-105

- Plitt, L. (2018). La ingeniosa canoa solar con la que se puede viajar sin petróleo por la selva ecuatoriana. *BBC Mundo*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-43142227>
- Postiglione, C., Collier, D., Dupczak, B., Heldwein, M. y Perin, A. (2012). Propulsion system for an all electric passenger boat employing permanent magnet synchronous motors and modern power electronics. *2012 Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion*. 1-6. IEEE. <https://doi.org/10.1109/ESARS.2012.6387441>
- Quintero, J., Ramírez, Y. y Cortázar, A. (2020). Transporte fluvial en Colombia: operación, infraestructura, ambiente, normativa y potencial de desarrollo. *Revista ciudades, estados y política* 7(1), 49-68. <http://www.scielo.org.co/pdf/cep/v7n1/2389-8437-cep-7-01-49.pdf>
- Unidad De Planeación Minero Energética. (2015). *Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050*. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/bitstream/handle/123456789/2679/6395.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Savitsky, D. (1964). Hydrodynamic design of planing hulls. *Marine Technology and SNAME News*, 1(1). 71-95. <https://www.boatdesign.net/attachments/hydrodynamic-design-of-planing-hulls-savitsky-1964-pdf.89527/>
- Savitsky, D y Brown, P. (1976). Procedures for hydrodynamic evaluation of planing hulls in smooth and rough water. *Marine Technology*, 13(4), 381-400. <https://doi.org/10.5957/mt1.1976.13.4.381>
- Skene, N. (1973). *Skene's elements of yacht design* (8.^a ed.). Dodd, Mead & co.
- Spagnolo, G., Papalillo, D., Martocchia, A. y Makary, G. (2012). Solar-electric boat. *Journal of Transportation Technologies*, 2(2), 144–149. <http://dx.doi.org/10.4236/jtts.2012.22015>
- Sponberg, E. (2011). The design ratios. *A naval architect's dozen (or thereabouts)*. Sponberg Yacht Design Inc. <https://docplayer.net/65447188-The-design-ratios-a-naval-architect-s-dozen-or-thereabouts.html>
- Stuhldreher, M., Kargul, J. y Moskalik, A. (2021). Emission screening test for marine outboard engines. *Journal of Marine Engineering & Technology*, 20(4), 198-208. <https://doi.org/10.1080/20464177.2021.1971353>
- Sukas, O., Kinaci, O., Cakici, F. y Gokce, M. (2017). Hydrodynamic assessment of planing hulls using overset grids. *Applied Ocean Research*, 65, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.apor.2017.02.002>
- The Economist*. (2017). After electric cars, what more will it take for batteries to change the face of energy. <https://www.economist.com/briefing/2017/08/12/after-electric-cars-what-more-will-it-take-for-batteries-to-change-the-face-of-energy>
- Tupper, E. (2013). *Introduction to naval architecture* (5.^a ed.). Butterworth-Heinemann.
- Utama, I., Santosa, P., Chao, R. y Nasiruddin, A. (2013). New concept of solar-powered catamaran fishing vessel. *Journal of Marine Engineering and Technology*, 12(1), 54-61. <https://doi.org/10.1080/20464177.2013.11013072>
- Wyman, D. (1998). Wyman's Formula. <https://pbbackissues.advanced-pub.com/?issueID=54&pageID=99>
- Yan, X., Liang, X., Ouyang, W., Liu, Z., Liu, B. y Lan, J. (2017). A review of progress and applications of ship shaft-less rim-driven thrusters. *Ocean Engineering*, 144, 142-156. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2017.08.045>
- Yang, T., Cox, T., Degano, M., Bozhko, S. y Gerada, C. (2016). *History and recent advancements of electric propulsion and integrated electrical power systems for commercial & naval vessels*. <https://nottingham-repository.worktribe.com/output/836783>

- Yousefi, R., Shafaghat, R. y Shakeri, M. (2013). Hydrodynamic analysis techniques for high-speed planing hulls. *Applied Ocean Research*, 42, 105-113. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apor.2013.05.004>.
- Yun, L., Bliault, A. y Rong, H. (2018). *High Speed Catamarans and Multihulls: Technology, Performance, and Applications*. Springer.

Parte III

Infraestructura, operación y tendencias

La infraestructura y los sistemas de recarga como elemento esencial de la movilidad sostenible

**José Valentín Restrepo Laverde¹, Andrés Emiro Diez²,
Alejandro Mora Chica¹, Joan Francisco Alvarado³,
Pedro Vélez Aristizabal³, Luis Fernando
Sierra Zuluaga³, Harvy Correa Herrera³**

Resumen: en el marco de la operación vehicular moderna y de las ciudades inteligentes, es relevante hablar de los sistemas de recarga como un elemento esencial de la movilidad sostenible. Estos promueven e incentivan la expansión de la movilidad eléctrica en las regiones y garantizan el acceso, público o privado, a la energía. Sin embargo, se han convertido en uno de los principales retos a nivel global y local para los vehículos eléctricos, ya que, no tener una adecuada infraestructura de recarga, dificulta la obtención o agregación de nuevos vehículos al mercado y, además, retrasa el aumento de la movilidad sostenible como estrategia ambiental contra los fenómenos del cambio climático. En este capítulo se abordan los principios fundamentales para las estaciones de carga y las diferentes tecnologías utilizadas en la actualidad, sus componentes eléctricos y electrónicos; también, la infraestructura eléctrica y urbana necesaria que conlleva la carga de baterías, los tipos de cargadores disponibles en el contexto global de la movilidad, así como los estándares de gestión bajo los cuales se rigen

- 1 Microelectronics Research Group, Universidad Pontificia Bolivariana, circular 1 70-01, Medellín, Colombia. Correo electrónico: josev.restrepo@upb.edu.co; alejandro.morac@upb.edu.co
- 2 Transmission and Distribution Research Group, Universidad Pontificia Bolivariana, circular 1 70-01, Medellín, Colombia. Correo electrónico: andres.diez@upb.edu.co
- 3 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jfalvaradm@eafit.edu.co; pveleza@eafit.edu.co; lsierraz@eafit.edu.co; hcorrea1@eafit.edu.co

las estaciones de carga y las tendencias actuales y futuras en el diseño de sistemas de recarga. Por último, aplicando el concepto de fuentes de energía renovables, se muestra el diseño, la selección de componentes y el dimensionamiento de una estación de carga basada en la operación de paneles solares y un sistema de almacenamiento de energía con baterías, con el fin de comprender el análisis funcional de los sistemas eléctricos.

Palabras clave: movilidad sostenible; recarga de vehículos; infraestructura.

10.1. Estaciones de carga

Las estaciones de carga son un componente estratégico en la masificación de los vehículos eléctricos. Disponer de lugares en los que se pueda realizar la carga facilita que sus usuarios puedan desplazarse sin temor a quedarse sin energía; a su vez, incentiva la adición de nuevos sistemas de movilidad y elementos a la infraestructura, dada la disponibilidad en la oferta de servicios. Pese a esto, la adición de estaciones supone retos a la infraestructura en cualquier región. Lo primero es la disponibilidad de potencia y energía en los diferentes puntos de conexión que podrían ser habilitados, a lo que se agrega la demanda de energía a los sistemas de generación y distribución actuales y los nuevos que se requieren; lo segundo, la infraestructura física, que, en principio, demanda nuevos espacios de parqueo que son ocupados por tiempos más largos en la actualidad. También, deben tenerse en cuenta los equipos requeridos para cargar los vehículos, los cuales necesitan ser fabricados, instalados, operados y mantenidos. Las mangueras y conectores deben ser reemplazados cada número de ciclos para garantizar una operación eficiente.

Tecnología de los sistemas de recarga: para una estación de carga existen dos clasificaciones. Las primeras son las estaciones conectadas (*on-grid*), que acceden a la fuente de energía eléctrica de la red convencional de transporte de energía; su instalación incluye la compatibilidad eléctrica y las protecciones para su correcta operación. La segunda corresponde a estaciones desconectadas (*off-grid*), en las que la fuente no es la red convencional, es decir, depende de alguna fuente alternativa acompañada, en la mayoría de casos, por un sistema de almacenamiento de energía. Un caso común de esta configuración es el que usa paneles solares cargando baterías. La estación debe controlar el nivel máximo de potencia que se puede suministrar desde la fuente y debe proteger a todos los componentes y elementos que la constituyen de sobredemanda (sobrepotencia), según sus tolerancias. Debe incluir, para ello, una instalación específica, determinada por la compañía prestadora del servicio de energía o por el fabricante de la estación de carga. Esta información suele estar disponible en los manuales y permisos necesarios; generalmente, se incluyen interruptores, protecciones y aislamiento o transformadores. Finalmente, la estación de carga debe indicar cuál es su resistencia a la intemperie y las normas IP indican qué tan resistente es el cargador al entorno. En el estándar IP (xm), x indica la resistencia al polvo y m, la resistencia al agua. Una estación IP55 no aguanta ni polvo ni agua, por lo que debe ser instalada en ambientes cerrados y cubiertos, mientras que la IP68 es resistente a polvo del ambiente y soporta chorros de agua desde cierto ángulo, pero no sumergirse.

Una estación de carga es un gabinete que hace de interfaz entre el usuario de un vehículo eléctrico, el cargador de baterías y la fuente de energía. La estación se

compone de: una acometida, un interruptor principal, una generación de señalización, unos sensores, un contador, una salida y, en algunos casos, un sistema de comunicación de datos. El gabinete se puede instalar de dos formas: una, colocándolo sobre piso; estos incluyen su base, la estación y, en ocasiones, unos techos. La otra, hacer esto sobre pedestal, diseñadas para ser amarradas a un poste o a una pared. Para operar una estación, usualmente, se incluye una pantalla, unos botones o teclado y unos lectores de tarjeta sin contacto. El procedimiento, desde que el usuario llega a operar hasta que el vehículo está cargando, varía según el fabricante, pero suele incluir un proceso de validación de la persona, otro de identificación del vehículo y los parámetros de carga de este y, por último, una activación de la carga (y cobro si es necesario). Finalmente, se termina el proceso de carga que permite la desconexión del vehículo y la cuantificación final de la energía utilizada.

10.2. Componentes de una estación de carga

La estructura de una estación de carga se puede observar en la figura 10.1 y se compone de los siguientes elementos:

- **Acometida:** entrada de energía desde la fuente de alimentación, que puede ser en CD o en CA.
- **Protecciones y acoples:** todos los elementos que permiten la operación segura del cargador en caso de fallas.
- **Interruptor principal:** habilita conectar o desconectar el cargador de la batería de la acometida.
- **Salida y conectores:** toda la infraestructura interna que permite conectar el cable del cargador a los elementos.
- **Salida al cargador:** es el cable que conecta la estación de la carga con el cargador en el vehículo.
- **Convertidor de voltaje:** es un regulador de voltaje que convierte la entrada en una tensión adecuada para la operación del cargador. Se puede asumir como una fuente.
- **Señalización y comunicaciones:** conjunto de señales que sirven para controlar el proceso de carga. Usualmente, es una comunicación que está entre la estación de carga y el cargador en el vehículo y, opcionalmente, entre la estación de carga y un servidor de datos en la nube.
- **Sensores v.i.:** grupo de sensores utilizados para medir la corriente y el voltaje que se está entregando al vehículo, para así calcular la potencia transferida.
- **CPU:** sistema de control central encargado de controlar cada uno de los componentes del cargador.
- **HMI:** todos los componentes que permiten la interacción entre el cargador y el usuario. Por lo general, es una pantalla, un teclado y un lector de tarjetas.

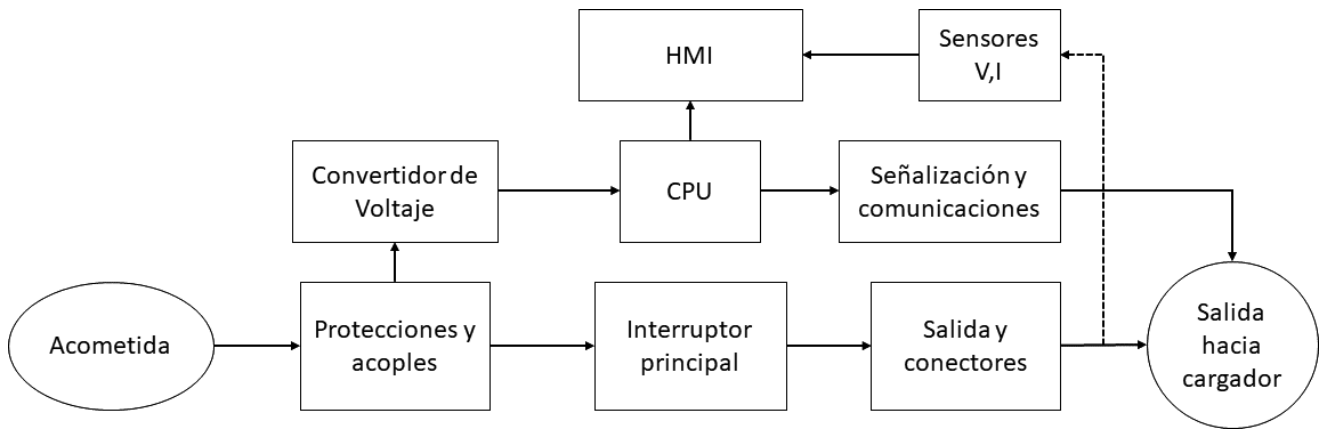


Figura 10.1. Cargador de batería

Fuente: elaboración propia.

10.3. Carga de baterías

Para la carga de una batería se requiere de un conjunto de elementos que permiten gestionar el paso de energía desde una fuente o punto de conexión hasta la batería. Se busca garantizar que el proceso sea seguro para las personas, además de controlado y adecuado para las baterías y, asimismo, que las condiciones de carga estén dentro de parámetros seguros y cuantificables. Como se observa en la figura 10.2, para la carga de baterías, específicamente en vehículos, existen dos componentes principales: el primero es la estación de carga, conectada a una fuente de energía y el segundo, el circuito de gestión de batería que incluye, al menos, un cargador y un sistema de administración de batería (BMS). La estación de carga, específicamente, provee toda la interfaz para que el usuario opere el proceso de carga del vehículo; de igual modo, contiene todas las formas e interfaces que controlan el flujo de energía desde la fuente o red eléctrica hasta el cargador. El interfaz de vehículos debe estar atento a los procesos de carga y descarga de la batería, para evitar daños en su estructura química, proceso que es independiente de la fuente de energía.

10.3.1. Cargador

Se presenta el diseño preliminar del cargador de baterías en la estación de carga para un escenario en el cual se tenga capacidad suficiente para implementar el sistema de carga (ver figura 10.3). Para el diseño se tienen en cuenta dos elementos: el que incorpora las fuentes de energía y el que se refiere al control de la carga de la batería. Ambos se encuentran en un componente conocido como el DC BUS. El primero trata de todos los métodos o fuentes de energía de las cuales se va a proveer el cargador para cumplir su función. El segundo se refiere a todos los circuitos y elementos que se necesitan para que los convertidores y controladores de carga puedan operar satisfactoriamente.

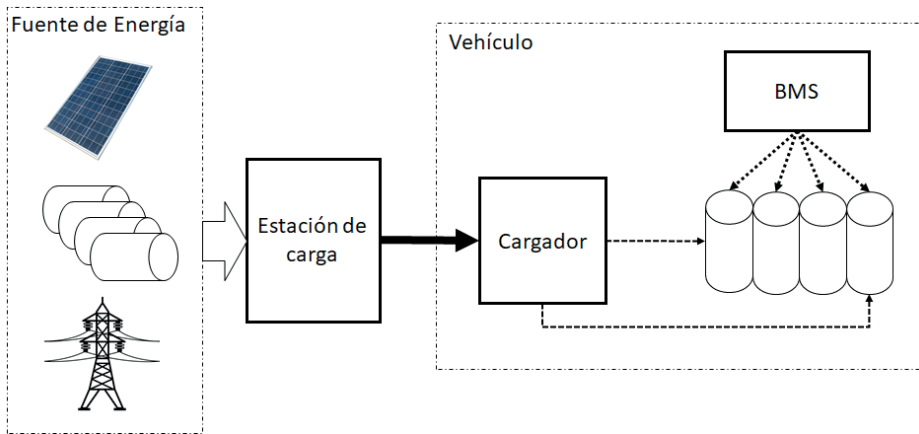


Figura 10.2.
Esquema de carga

Fuente: elaboración propia.

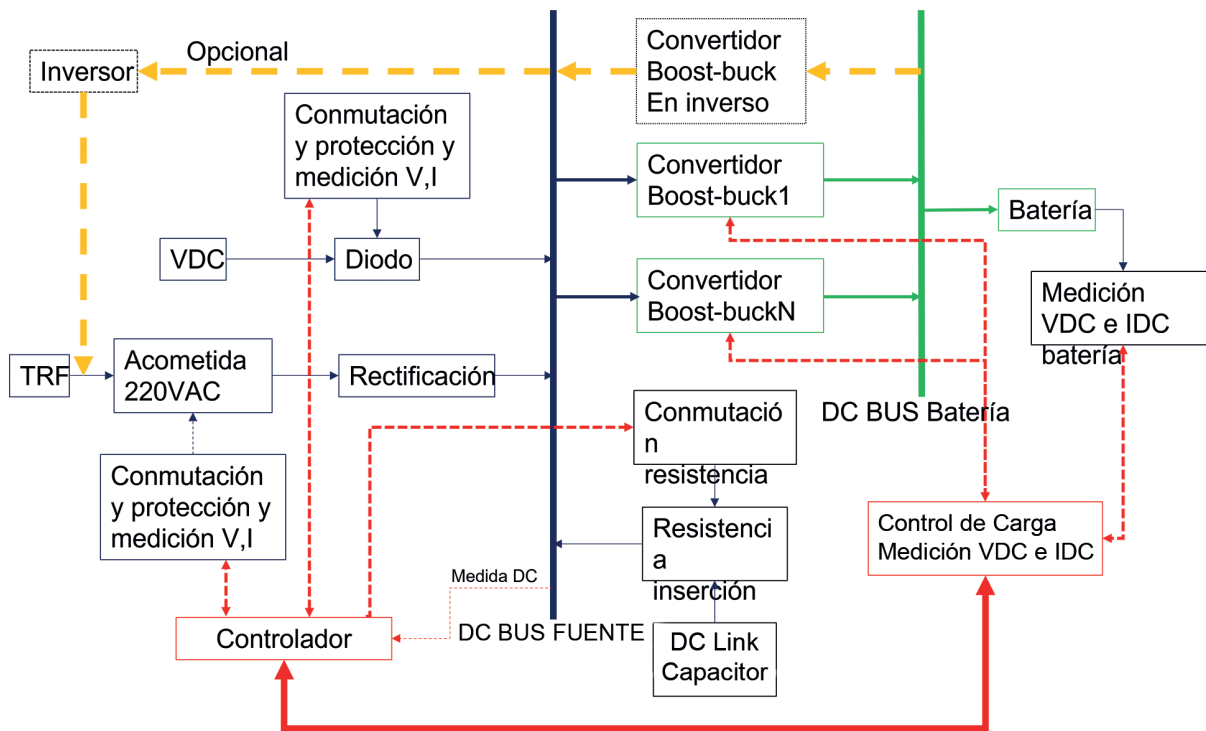


Figura 10.3. Diagrama de bloques cargador

Fuente: elaboración propia.

- **Sección de fuentes:** se compone de las posibles entradas de energía de las que dispone el equipo. Para el diseño se consideran varias fuentes disponibles. Entre ellas, las de energía alternativas por medio de paneles fotovoltaicos, la fuente de energía de la red de distribución convencional y un posible banco de baterías.
- **TRF:** es el transformador de la acometida de la red de distribución. Su función es entregar, después de rectificada, una tensión a la salida suficiente para que el cargador pueda operar. El transformador debe soportar una potencia nominal de, al menos, 225 kVA, para

que la embarcación cargue al régimen máximo estimado. La conexión debe ser trifásica, siempre y cuando la compañía de energía permita su operación; también, contener una salida en configuración estrella-delta con desfase de 30° para una mejor rectificación en la siguiente etapa.

- **Rectificación:** corresponde al circuito rectificador de 12 pulsos. Estos rectificadores reducen el rizado en la señal de DC y reducen el THD en el quinto y séptimo armónico.
- **VDC:** son todas las fuentes que entregan alimentación en DC directamente, sin necesidad de rectificación; por ejemplo, un conjunto de paneles solares sin inversor o un conjunto de baterías. Su incorporación depende de los requerimientos y aprovechamientos energéticos que deriven del análisis de las fuentes alternativas y el almacenamiento de energía en la estación.
- **Conmutación, protección y medición VI:** para la correcta manipulación del equipo, la medición de los parámetros de operación y mantener la seguridad en la operación, es preciso establecer ciertos elementos para registrar y generar acciones seguras que protejan a la gente y a los equipos. Entre estos están interruptores de alta corriente servoasistidos y termoprotegidos, CT y PT, para las mediciones de las variables voltiampéricas y los indicadores requeridos para mostrar el estado del sistema.
- **Controladora:** se encarga de coordinar la operación de la fuente para que se encuentre dentro de los parámetros aceptados en la ley y en los equipos incorporados; a su vez, asume las operaciones de captura de datos y la entrega de datos a los equipos de telemetría y registro.
- **Inversor:** es una opción que recaptura la energía de las baterías o del bote y la reinserta en una línea de distribución para el consumo por otros y el aprovechamiento energético.

Adicionalmente, la sección de carga es la responsable de los elementos y equipos necesarios para realizar de forma adecuada la carga de las baterías en el bote. El sistema opera a partir de un bus de DC que tiene una tensión dentro de un intervalo de operación adecuado para los diferentes equipos. Dentro del cargador se tienen los siguientes componentes.

- **Convertidor *boost-buck*:** es un circuito que consta de dos etapas. La primera es un elevador de voltaje a partir de una configuración *boost*, que toma la energía almacenada en un inductor y la transfiere a un componente con una tensión más alta, aprovechando un dispositivo de conmutación. La segunda, un convertidor *buck*, capaz de transferir una energía de una tensión superior a una inferior acumulándola en un inductor. Para ello, aprovecha un dispositivo de conmutación, pero en un arreglo diferente al *boost*. La tensión en ambas configuraciones se controla con un PWM. Para el caso del *boost*, transferencia se calcula con la ecuación (10.1):

$$V_{out} = (N * V_{in})/D \tag{10.1}$$

Donde V_{out} es el voltaje de salida del convertidor *boost*, V_{in} , el voltaje mínimo esperado en la entrada, N es la eficiencia del convertidor, que puede ser el 80 % y D es el porcentaje de *duty cycle* que debe tener el PWM. N es una variable que reconoce la eficiencia de la

conversión y sirve para diseñar los inductores necesarios en el equipo. Para el caso del *buck*, la ecuación general que lo rige es (10.2):

$$V_{out} = D * N * V_{in} \quad (10.2)$$

Donde V_{out} es el voltaje de salida del convertidor *buck*, V_{in} el voltaje máximo a la entrada del conversor, N es la eficiencia del convertidor; dicha variable puede ser el 90 %, y D es el porcentaje de *duty cycle* que debe tener el PWM. En ambos casos, la variable de la que depende la operación es D. Según su valor, pueden establecerse los valores máximos y mínimos de operación de cada circuito y el comportamiento de los elementos necesarios para cada uno de ellos. La ecuación y expresiones auxiliares serán incorporadas en el diseño de detalle.

- **Resistencia de inserción:** para el arranque de un equipo con estas características de potencia, se debe agregar un limitante a la corriente en los elementos con comportamientos capacitivos. Estos disminuyen la corriente de entrada en la condición inicial $t=0$, en el cual dichos elementos están descargados y se pueden comportar como un cortocircuito. La resistencia de inserción solo está presente durante los primeros segundos de operación del equipo; luego debe retirarse para permitir que la acción de los elementos capacitivos se desarrolle como se espera.
- **Control de carga y medición:** este circuito realiza el control del proceso de carga de los convertidores *buck-boost* midiendo las variables voltiampéricas en la batería y respetando sus curvas de carga para mantener su salud. Este circuito también verifica que no se presente ningún comportamiento errático en el proceso de carga que amerite su suspensión, por ejemplo, falta de tensión en la entrada o un fallo de un componente.
- **Convertidor *buck boost* en inverso:** es un circuito opcional que cumple la función reversible de sacar la energía de la batería para entregarla a un inversor o a una batería de almacenamiento en tierra.

10.3.2. Telemetría estación de carga

En la figura 10.4 se presenta el diagrama de bloques para telemetría en la estación de carga.

- **Detalle diseño conceptual:** para la fabricación del dispositivo de telemetría que va a recoger la información de los vehículos se tienen en cuenta varios elementos: 1) el tipo de variables a registrar, 2) el medio de conexión por el cual se van a intercambiar datos, 3) la capacidad de almacenamiento y retención de información pendiente por transmitir, 4) el sistema de alimentación y, por último, 5) el procesamiento de los datos.
- **Tipo de variables:** estas dependen del equipo al que se instala el sistema de telemetría, para lo cual se define, desde un concepto general, el grupo de sensores. Uno de estos corresponde a los sensores necesarios para desarrollar la navegación, que permiten la ubicación del dispositivo, ya sea moto o barco, en el espacio; además, se registra la altimetría, velocidad, profundidad del agua, etc. Otro grupo corresponde a variables ambientales, cuya función es registrar datos como temperatura, humedad, presión atmosférica, velocidad del viento, etc. Un tercer grupo anota variables eléctricas, como voltaje y corriente en el motor y las baterías, en los inversores y otros elementos de los vehículos. El último corresponde

a los registros de utilización como pasajeros, distancias, número de usuarios, etc. Así, para una aplicación se define un grupo de sensores necesario; por ejemplo, la estación de carga depende de valores ambientales y eléctricos; pero, para el bote pueden ser más relevantes las variables eléctricas y de navegación. Por lo anterior, los sensores utilizados deben contener características comunes y de conexión para reutilizar un diseño base en todos los equipos que se van a vigilar. Por ello, se deben especificar los protocolos de conexión de los sensores digitales y los rangos de medida de los sensores analógicos que se utilizan. Por ejemplo, permitir solo sensores digitales con protocolo I2C y sensores analógicos con rangos 0V-10V.

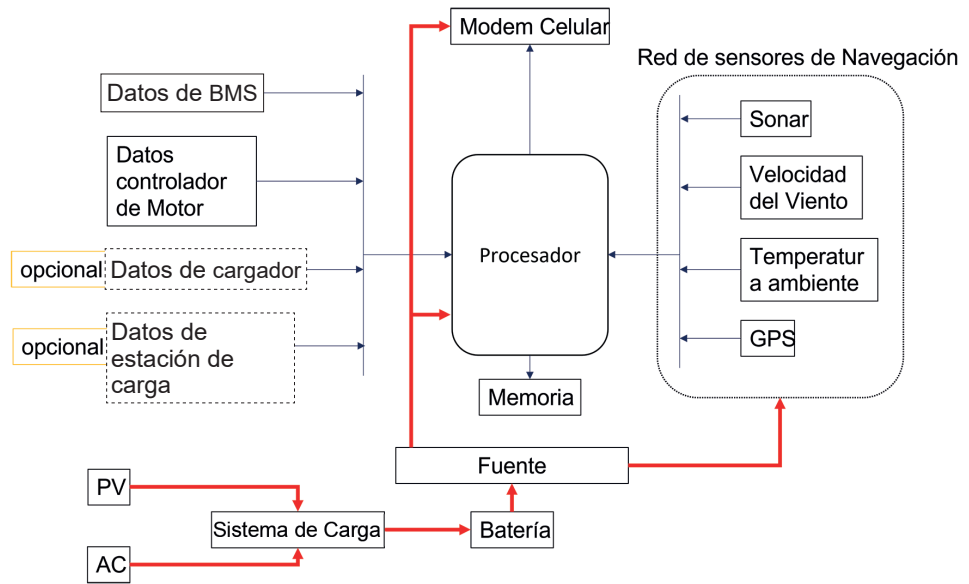


Figura 10.4. Diagrama de bloques telemetría

Fuente: elaboración propia.

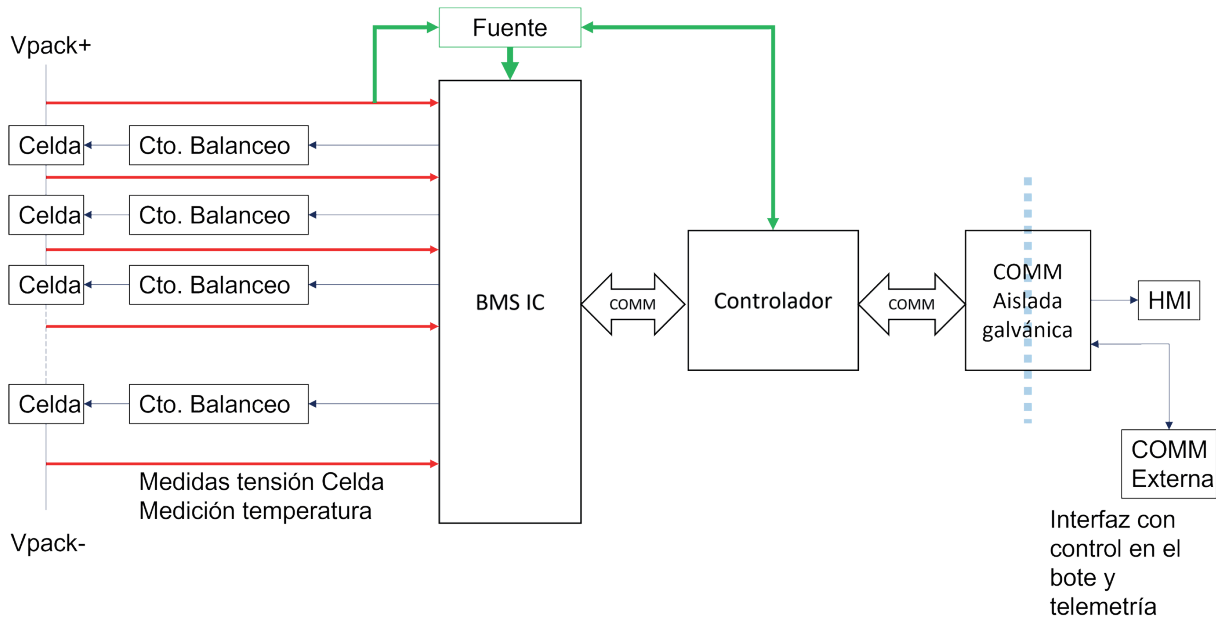


Figura 10.5. Diagrama de bloques para el BMS

Fuente: elaboración propia.

- **Almacenamiento y retención de datos:** el dispositivo debe contar con un sistema de retención y almacenamiento de datos por los posibles eventos a los que se enfrenta el equipo de telemetría. El primero es la baja cobertura en las redes, por ende, los datos registrados deben ser guardados indefinidamente hasta que el vehículo se encuentre en una zona con cobertura y pueda transmitirlos. La segunda son las fallas energéticas que pueden darse por la ausencia de energía, causada por un evento fortuito, en los vehículos o en la estación de carga (por ejemplo, un mantenimiento). El sistema debe identificar si hay datos pendientes para transmitir antes del evento. El tercero es tener un sistema de respaldo, donde se puedan descargar los datos utilizando un computador. Puede suceder que la información no se pueda transmitir por problemas en los sistemas propios o externos. Entonces, debe existir una forma de retirar la información directamente sin depender de un sistema de transmisión inalámbrico: una memoria que se pueda retirar, la cual debe estar protegida contra el ambiente; pero debe tener un punto de acceso como una escotilla o compuerta que permita el acceso a ella.
- **Sistema de alimentación:** el equipo va a operar en entornos donde pueden ocurrir ausencias de tensión; por ello, debe incorporar mecanismos de alimentación alternativos como baterías de respaldo, fuentes con paneles solares y conexión a la red eléctrica. Así, se intenta asegurar que el dispositivo de registro se desempeñe y opere por el mayor tiempo posible de forma autónoma.
- **Sistema de procesamiento:** el módulo debe ser capaz de procesar diferentes señales simultáneamente y registrarlas en los términos que se definan en la aplicación final. Para lograrlo, el procesador debe tener la capacidad de memoria, velocidad y confiabilidad suficientes para desarrollar dichas tareas.

10.3.3. BMS

En la figura 10.5 puede verse el diagrama de bloques que se propone como diseño conceptual para la implementación del BMS.

- **Medición de tensión:** se realiza en varios niveles: medición total de tensión en el banco de baterías, por cada uno de los módulos y de cada celda. Esta última es indispensable.
- **Medición de corriente:** se realiza en dos niveles. El primero corresponde a la medición de la corriente total de todo el banco de baterías; el segundo, de cada uno de los módulos en paralelo. En ambos casos, el BMS mide la corriente de carga y de descarga de la batería.
- **Medición de temperatura:** esta se realiza en varios niveles: medición de la temperatura exterior (temperatura ambiente); de líquido refrigerante de entrada y salida (si se tiene); y medición de temperatura por celda independiente. Esta última es indispensable.
- **Circuito de balanceo:** es uno de los principales componentes del BMS, porque se encarga de mantener estable y constante la tensión de cada una de las celdas que conforman un banco de baterías. Para su correcta operación, es clave que todas las celdas comprendan un mismo nivel de tensión, ya que estas se pueden ver altamente afectadas si sucede lo contrario. El balanceo de las celdas se realiza a partir de balanceo pasivo: con resistencias en paralelo; o a través de un balanceo activo: mediante convertidores DC-DC. En los dos casos, el circuito se encarga de cargar o descargar cada celda de manera independiente, con base en el nivel de tensión que tengan las demás.

- **Circuito integrado BMS (IC):** este elemento se constituye como el chip BMS, el cual recibe la tensión de cada una de las celdas que conforman el banco de baterías y se encarga de controlar el circuito de balanceo. Además, realiza un control de temperatura a partir de la medición. El circuito se comunica directamente con el controlador de la tarjeta, comunicación que comúnmente se realiza a partir de pines SDA y SCL de I2C.
- **Controlador:** el microcontrolador de la tarjeta recibe las variables que le envía el BMS IC y realiza el control de todos los demás periféricos; recibir comunicaciones adicionales (CAN, USB, serial, etc.), activar pines I/O, enviar alertas, etc.
- **COMM aislada galvánica:** corresponde a una sección del circuito que se encuentra aislada galvánicamente para recibir conexiones externas; es decir, los planos de tierra de cada componente externo no se comparten de forma eléctrica con el plano de tierra de la tarjeta del BMS, con el fin de proteger ambas partes.

10.4. Tipos de cargadores

Los cargadores eléctricos son dispositivos que suministran la energía eléctrica necesaria para la carga de la batería, con el objetivo de recuperar la energía que esta ha perdido durante su operación. Estos realizan diferentes conversiones de energía, dependiendo de la infraestructura de cada vehículo y, por esto, se clasifican en los siguientes tipos:

Doméstico o *schuko*: es el mismo cargador utilizado para enchufar el ordenador, la televisión o la tostadora, es decir, el típico enchufe. No genera energía suficiente para la carga de la mayoría de los automóviles eléctricos, a no ser que no requiera demasiada para funcionar. Posee una intensidad de 16 amperios (A) de intensidad y una potencia de 1,4 kW. **Yazaki SAE J1772 o tipo 1:** garantiza dos tomas de energía: dos de corriente, una de tierra y otros dos extras, de detección de proximidad y otro de comunicación con la red eléctrica para una recarga sin cables. Cuenta con una intensidad de 34 A de intensidad en cargas monofásicas y una potencia de 7,4 kW. **Mennekes IEC 62196-2 o tipo 2:** la toma de corriente de este cargador es continua; por ello, será necesario un cable junto al conector para vincularlo a la fuente eléctrica; posee una intensidad máxima de 16 A en cargas monofásicas y de 63 A en trifásicas, al igual que una potencia de entre 3,7 kW a 44 kW. **Único combinado CCS o IEC 62196-3:** este cargador combinado permite recargas rápidas y lentas gracias a su conector AC tipo 2 y otro DC con dos terminales. Está compuesto por cinco *bornes* para toma a corriente, a tierra y a red; además, cuenta con una intensidad máxima de hasta 32 A de intensidad en el conector AC y 125 A en el DC y una potencia de 43 kW en el conector AC y 50 kW en el DC. **Scame o tipo 3:** tiene salida tanto para conector Yazaki (tipo 1) como Mennekes (tipo 2). Permite cargas monofásicas y trifásicas y, además, tiene una máxima intensidad de 16 A de intensidad en cargas monofásicas, 32 A en trifásicas y una potencia de hasta 22 kW; **CHAdEMO:** realiza las cargas de corriente continua más rápidas. El conector cuenta con 10 *bornes* para toma a tierra y a red; cuenta con una intensidad máxima de 125 A de corriente continua, reducidos con la carga, o 200 A para recargas ultrarrápidas, así como una potencia de 65 kW.

Los cargadores de vehículos se encuentran a partir de dos tecnologías diferentes, ya sea para corriente directa (CD) o para corriente alterna (CA):

- **Tecnologías en CD:** hacen la rectificación de la tensión por fuera del vehículo, por lo que pueden utilizar equipos de alta potencia. Esto se traduce en mayor energía transferida entre las líneas de tensión y la batería del vehículo. Asimismo, operan en tensiones superiores a los 350 VCD y se componen de un rectificador, un controlador e interruptor y el cable de conexión al vehículo. Por trabajar en corriente directa, los equipos de conexión y desconexión son usualmente más costosos
- **Tecnologías en CA:** son aquellas que solo facilitan el acceso del vehículo a la red eléctrica en CA. En este caso, los equipos de rectificación y control están dentro del vehículo, lo que implica que sean de menor tamaño y, por ende, de menor potencia. Las tecnologías en CA operan en tensiones que no superan los 240 VAC y están constituidas solamente de un interruptor y un transformador, que en este caso es solo de aislamiento. Estos equipos son económicos, pero implican un tiempo de carga mucho más extenso.

En la operación de los cargadores de vehículos, es indispensable tener clara la infraestructura pública y privada, los estándares de gestión y la carga de oportunidad:

- **Infraestructura pública y privada:** los cargadores se pueden clasificar, también, según el servicio que prestan. Algunos están situados en la vía pública, en estaciones de servicio, parques o centros comerciales; otros, en las casas u oficinas de propietarios de vehículos eléctricos. Los primeros son accesibles para cualquier persona sin ninguna restricción; los segundos son propiedad privada y su acceso es limitado. Entonces, aquellos con acceso público se denominan de **carga pública**. Estos, además de proveer la energía, incorporan sistemas de cobro o control de carga para gestionar quién accede a su servicio. Este tipo de equipos posee una infraestructura adicional de control de la carga por medio de sistemas de identificación de los usuarios. Los otros cargadores de **carga privada** no presentan restricciones de uso, ya que, con solo conectar cualquier vehículo, se puede iniciar un proceso de carga sin restricciones, excepto por aquellas de tensión o potencia. Este tipo de equipos son sencillos y carecen de tecnología de gestión de usuarios; sin embargo, algunos implementan elementos de control de carga, mediciones y tiempos para el beneficio de sus propietarios.
- **Estándares de gestión:** la gestión de las estaciones de carga es un proceso que permite administrar su uso, recaudo y el estado de funcionamiento. Por esta razón, las estaciones deben seguir unos estándares, algunos propuestos y otros en curso, que facilitan el intercambio de datos con los sistemas de gestión. En la actualidad, hay dos estándares que cumplen con esta función: uno es propuesto como un sistema abierto, el otro es una implementación de las normas ISO. Hasta la fecha, OCPP es el estándar más utilizado para estaciones de carga. Se compone de un protocolo y unas estructuras de datos que llevan el registro de las actividades de cada cargador hacia un sistema centralizado de información. Fue propuesto por la fundación de Países Bajos, ELaadNL y luego adoptado por la Open Charge Alliance, una organización que agrupa diferentes fabricantes que pertenecen a la cadena de valor de los vehículos eléctricos.
- **Carga de oportunidad y estrategias combinadas:** la implementación de vehículos eléctricos en lugar de los convencionales requiere adoptar nuevos modos de manejo. Por consiguiente, la modificación del combustible, la reposición de carga o cambiar de forma repentina de medio de transporte, al momento de no disponer de carga en la batería, son actividades que, al tener un impacto social, deben ser ajustadas con el

tiempo. Para el desarrollo de energías renovables, los desafíos están enfocados en tres aspectos: la aceptación social o política dentro del marco institucional, para crear condiciones favorables o impedir su crecimiento; la aceptación que tenga la comunidad y su mercado (Khan *et al.*, 2018). Con el ingreso en el mercado de más vehículos eléctricos y la creación de estaciones de carga para este medio, existe la mejora del modelo de negocio.

10.5. Tendencias en operación de estaciones de carga

Hoy en día, las estaciones de carga cuentan con muchas variantes, gracias al avance las tecnologías modernas y al desarrollo de la electrónica de potencia. Esto ha traído grandes beneficios, como el uso de la batería del vehículo como suministro de energía eléctrica para otras cargas, las cargas rápidas y ultrarrápidas en los sistemas de alta velocidad, la innovación en las tecnologías inalámbricas y la carga en movimiento.

- **Tecnologías bidireccionales v2G:** la tecnología de red v2G (*vehicle to grid*) permite configurar el sentido en el que se usa la electricidad: de la red a un vehículo eléctrico o en sentido contrario, según la elección del usuario. No obstante, al igual que otras tecnologías, debe seguir mejorando para ser incorporada sin problemas a la red, pues en su estado actual podría causar efectos negativos, como fluctuaciones de voltajes, disturbios, desequilibrios, parpadeos y armónicos, que aumentarían el costo del sistema y su complejidad, arruinando la eficiencia de la red. No obstante, la tecnología de red v2G, apoyada en sistemas de almacenamiento de energía con baterías, almacena la energía eléctrica cuando hay exceso de producción, cuando su precio es menor o cuando se tienen incorporadas energías renovables. Así, es posible retornar esa energía a la red cuando no esté en uso y generar beneficios económicos, en especial cuando el precio de la electricidad es alto. Por consiguiente, las investigaciones sobre esta tecnología deben centrarse en mejorar la electrónica de potencia, para hacerla factible y poder sacar provecho a sus beneficios sin causar efectos negativos.
- **Cargadores modulares:** el tiempo que demoran en cargarse las baterías de un vehículo eléctrico es una desventaja con respecto a lo que tardan los de combustión interna en reabastecerse por completo. Esto ha hecho necesario desarrollar tecnologías en las que el tiempo de carga de las baterías deje de ser una amenaza. Por ejemplo, cargadores modulares o tecnología de intercambio de baterías, que funcionan con una arquitectura de baterías modulares y adaptables a los vehículos eléctricos existentes; gracias a que están divididas en módulos, pueden ser cambiadas al momento de estar descargadas por unas completamente cargadas, haciendo uso de una estación de intercambio. De esta manera, pueden ser cargadas de forma lenta y con ello incrementar su vida útil, la cual se reduce con la carga rápida; además, se generarían ingresos para los propietarios de flotas y estaciones de carga a largo plazo, que pueden integrarse con la red o RESS (*renewable energy storage system*). No obstante, el intercambio de baterías solo puede adoptarse por pocos kWh, debido al peso de la tecnología de embalaje, sin contar otras desventajas como la estandarización de los parámetros de las baterías por parte de los diferentes fabricantes y el requerimiento de una alta inversión para contar con un *stock* de baterías en las estaciones de carga que, además, necesitan una infraestructura para realizar eficientemente su intercambio. En caso que los fabricantes no estén dispuestos a estandarizar los módulos

de baterías, sería necesaria una red de estaciones de intercambio para cada compañía con equipos de intercambio de batería separados para los diferentes modelos y tamaños de los vehículos, lo cual no sería viable económicamente, pero la estandarización tampoco es una opción atractiva para los fabricantes, pues los diseños de los sistemas de baterías son un valor patentado clave que, junto con el motor, es la base para el diseño automotriz.

- **Tecnologías de alta velocidad:** el aumento de vehículos eléctricos en el mercado ha implicado el desarrollo de las estaciones de carga para diferentes modos (privada, pública y el modo de carga rápida) que, a su vez, operan a distintos niveles. El Instituto de Investigación de Energía Eléctrica (EPRI) y la Sociedad de Ingenieros de Automotores (SAE) clasifican estos en tres: nivel 1 (carga lenta), nivel 2 (carga media) con corriente alterna (CA) y nivel 3 (carga rápida) con corriente continua, el cual es considerado el más eficiente (la carga del 80 % de una batería tarda de 10-15 minutos). Los cargadores rápidos de DC son utilizados en espacios públicos y comerciales, requieren 480 V o mayor capacidad de los circuitos trifásicos y, comúnmente, usan 24, 50, 100 o 120 kW de potencia, pero algunas estaciones pueden ofrecer hasta 350 o 400 kW. Su valor es significativamente más alto con respecto a los niveles 1 y 2, debido a que los equipos de carga rápida DC son más costosos, implican mejoras en el transformador y los circuitos eléctricos, entre otras; además, los cargadores nivel 3 difieren según el tipo de estación de carga y el patrón de uso, pues se han desarrollado estándares en países o regiones que funcionan con diferentes infraestructuras y son compatibles con determinados puertos de carga, lo que ocasiona que los vehículos eléctricos deban estar equipados con los puertos de carga establecidos. La tecnología de carga rápida ha tomado mucha fuerza y ha alcanzado importantes avances. Un ejemplo son los supercargadores Tesla y los megacargadores que Tesla pronostica poner a disposición pronto para los camiones Tesla Semi; estos podrían alcanzar 1 MW y cargar los camiones en solo 30 minutos.
- **Tecnologías inalámbricas:** los cargadores inalámbricos existen desde 1990, pero no son muy comunes hoy en día, a pesar de que ofrecen ventajas como la facilidad de uso, el ahorro de tiempo y hasta una buena estética. Su poco éxito puede deberse a su costo, algo elevado, y a que la eficiencia de carga no es tan buena ni tan rápida. Los cargadores inalámbricos disponibles en la actualidad pueden transferir potencias entre 3 y 22kW, equivalente a un nivel de carga 2, que no es de carga rápida como el 3, por lo que algunos usuarios consideran que no vale la pena su precio. No obstante, algunos analistas pronostican que esta tecnología puede llegar a generalizarse y varios fabricantes de vehículos eléctricos han anunciado que ofrecerán cargadores inalámbricos como una opción para futuros vehículos eléctricos. Además, a pesar de las desventajas mencionadas, estos pueden ser una tecnología atractiva para vehículos con rutas definidas, como los buses públicos y para carriles de autopistas eléctricas.
- **Tecnologías de carga en movimiento:** son vehículos eléctricos que utilizan baterías de segunda vida reacondicionadas. Algunas compañías que han experimentado con asistencia de carga móvil utilizan unidades del tamaño típico de un vehículo de reparto de tres ruedas que están disponibles para carga en situaciones de emergencia. Entre sus ventajas está que no se necesitan plazas de aparcamiento ni una infraestructura o estación de carga, lo cual implicaría abrir zanjas, costos de construcción y necesidad de permisos; además, permite a los conductores desconectarse cuando la carga este completa, sin esperar un tiempo establecido, y los dueños de las unidades pueden

venderlas si su utilización es baja. Sin embargo, sus beneficios no parecen ser suficientes al considerar algunas desventajas, como que las unidades de carga móviles requieren de un asistente en el sitio para reposicionarse cada vez que realizan una carga y por la energía que se pierde conduciendo hacia y desde el cliente o vehículo a cargar. Por tanto, estas unidades parecen adecuarse mejor a grandes estacionamientos o flotas que requieren carga cuando los conductores no están cerca; también, debe tenerse en cuenta que, aunque las baterías de segunda vida que utilizan las unidades móviles actuales pueden ser útiles en los picos de demanda, implican pérdidas de energía que puede llevar a aumentos en el costo de suministro otorgado por las unidades de carga móviles. En síntesis, esta tecnología no resulta atractiva, menos aún con la caída en los precios de las baterías nuevas, que hace desfavorable en términos económicos el reacondicionamiento de baterías de segunda vida. Otro punto a tener en cuenta es que los conductores pueden desconfiar de la disponibilidad de las unidades de carga móviles y pueden preferir una ubicación fija y una experiencia de carga más confiable. En conclusión, es poco probable que los modelos de carga de vehículos eléctricos móviles logren posicionarse; su mayor uso podría ser en situaciones de emergencia o rescate.

10.6. Estación de carga fotovoltaica

Los sistemas eléctricos solares o sistemas fotovoltaicos convierten la energía solar en electricidad. Este fenómeno se denomina efecto fotovoltaico y se genera a partir de incidir luz solar (fotones) sobre materiales semiconductores, lo que provoca un movimiento de electrones dentro del material. Un panel fotovoltaico está conformado por celdas solares con la capacidad de producir de 1 a 2 W de potencia, aproximadamente, acorde al tipo de material; la conexión de un número de celdas forma un módulo fotovoltaico con el fin de generar más potencia. Este tipo de sistemas permiten ser escalados a arreglos fotovoltaicos, conectando el conjunto de módulos para incrementar la potencia de generación fotovoltaica. Asimismo, están compuestos por controladores de carga de batería, MPPT (*maximum power point tracking*), inversores de voltaje y baterías para el almacenamiento de energía. La integración de estos elementos ayuda a convertir las señales de corriente directa de los módulos fotovoltaicos a señales de corriente alterna para ser integrados a la red eléctrica. Por último, el sistema de cableado, interruptores, elementos de protección eléctrica y sistemas de puesta a tierra son cruciales para poner en funcionamiento los elementos de control y conversión integrados a una estación de carga.

Las estaciones de carga fotovoltaica se clasifican en tres grupos. Los sistemas desconectados de la red eléctrica, que cuentan con un arreglo de paneles, un MPPT, un inversor de corriente y un banco de almacenamiento de energía a través de baterías y se usan en zonas no interconectadas. Los conectados a la red, que no requieren almacenamiento, y su objetivo es inyectar energía a la red eléctrica. Finalmente, los sistemas híbridos, conformados por un arreglo de paneles, MPPT, sistemas de almacenamiento e inversores (encargados de inyectar energía a la red). La figura 10.6 representa una estación de carga fotovoltaica conectada a la red, encargada de suministrar energía a motocicletas

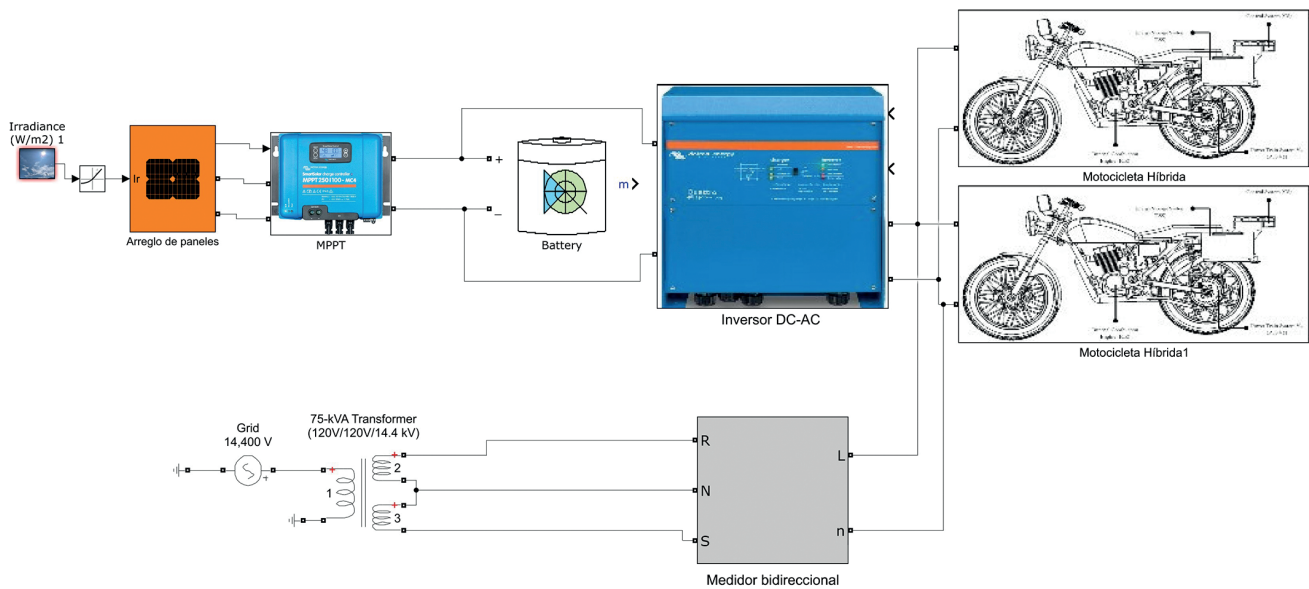


Figura 10.6. Estación de carga fotovoltaica híbrida

Fuente: elaboración propia.

híbridas y eléctricas para un sistema de transporte multimodal. El esquema describe la energía solar captada por el arreglo de paneles solares, un sistema de MPPT para obtener el punto de potencia máxima de los paneles, un sistema de almacenamiento de energía a través de baterías, un inversor híbrido de corriente directa suministrada por el MPPT y el sistema de baterías a corriente alterna compatible con la red eléctrica.

Para integrar estos elementos, dimensionar y poner en marcha la estación, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones: definir el número de paneles para conformar el arreglo fotovoltaico a partir de la energía que se desea generar; dimensionar el MPPT; precisar la capacidad del inversor a partir de los elementos que estarán conectados; por último, dimensionar los elementos de protección e interconexión mencionados previamente.

- **Arreglo de paneles fotovoltaicos:** para aumentar la capacidad de energía instalada, la estación de carga cuenta con ocho paneles solares, cada uno de ellos conformado por 144 celdas de tecnología mono-cristalina.

Tabla 10.1. Características mecánicas y eléctricas del panel solar

Características mecánicas y eléctricas			
Peso [kg]	25	Vmp [V]	43,18
Largo [mm]	2205	Imp [A]	10,77
Ancho [mm]	1032	Voc [V]	51,92
Alto [mm]	35	Isc [A]	11,59

Fuente: elaboración propia.

A partir de las características mecánicas y eléctricas de la estación, se plantea el siguiente esquema de conexión de los paneles solares, conformado por cuatro series y dos paralelos. En su totalidad, el arreglo de paneles cuenta con generación de voltaje $V_{mp} = 172,72$ v, una corriente $I_{mp} = 21,54$ con una capacidad de potencia instalada de $P_{mp} = 3,7$ kWp. El arreglo de paneles fotovoltaicos estima una producción de energía de 13,4 kWh, según la ecuación 10.3 y considerando pérdidas en los conductores.

$$E_{paneles} = 465 \text{ Wp} * 8 * 0.8 * 4.5h = 13.4 \text{ kWh} \quad (10.3)$$

Considerando las características mecánicas de los paneles solares, el arreglo para la estación de carga abarca un área de $= 18,2 \text{ m}^2$, (ver expresiones (10.4) y (10.5). Además, la tabla 10.1 especifica el peso de cada panel, para determinar la cantidad que puede aguantar el bastidor (sistema donde se instalara el arreglo de paneles), el cual debe soportar un peso de 200 kg.

$$Area = Largo * Ancho * n_{paneles} \quad (10.4)$$

$$2.205m * 1.032m * 8 = 18.2m^2 \quad (10.5)$$

- **Selección del inversor:** para la selección se plantean los siguientes escenarios energéticos que la estación de carga pueda tener (ver tabla 10.2).

La tabla 10.3 muestra que el total de potencia correspondiente a las cargas conectadas que tendrá la estación es de 4,09 kW. Esto indica que el inversor de la estación, como mínimo, debe ser de 5 kW. Según tabla 10.3, el aporte de los paneles solares instalados actualmente con una potencia es de 1,5 kWh y los que se plantean para el nuevo diseño, 3,7 kWh.

Tabla 10.2. Estimación de cargas eléctricas de la estación

Escenarios energéticos estación					
Carga	Volt [V]	Corriente [A]	Pot [W]	Cant.	Ptotal [kW]
Baterías	100	10	1000	2	2
Iluminación	110	0,5	55	6	0,33
Laptop	110	2	220	2	0,44
Toma corriente	110	15	1650	1	1,65

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10.3. Aporte potencia arreglo paneles 465 W

Aporte de paneles estación				
Panel solar	Cantidad	Pmax [W]	Ptot [kW]	Pmax [kWh]
Panel Solar	8	465	3,7	13,4

Fuente: elaboración propia.

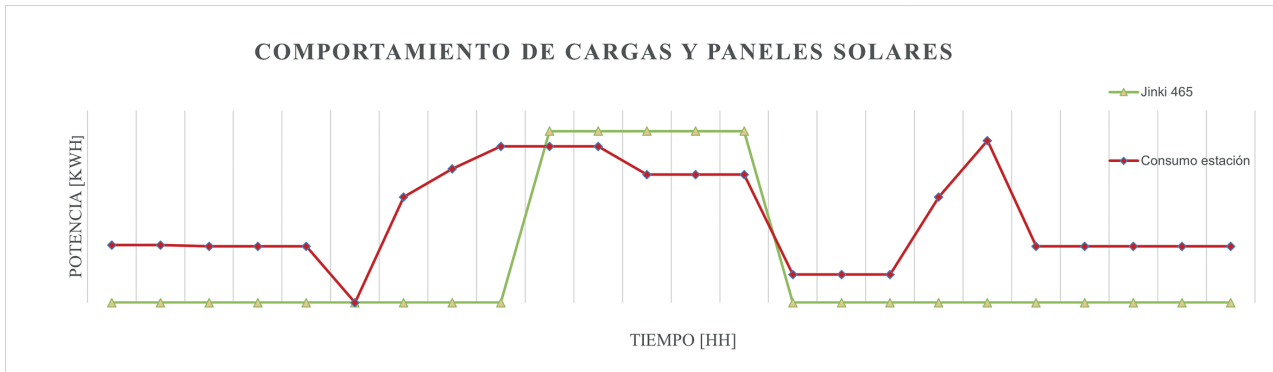


Figura 10.7. Comportamiento estación de carga

Fuente: elaboración propia.

- **Interacción del inversor y paneles solares con la red eléctrica:** el arreglo está conformado por ocho paneles, cada uno de 465 Wp, el cual aporta, aproximadamente, el 50 % de la energía total que consumiría la estación. Para elegir el inversor, se opta por uno híbrido trifásico que permita trabajar conectado/desconectado a la red. La figura 10.7 ilustra el comportamiento de dispositivos electrónicos conectados al inversor, los cuales están representados por la línea café; las líneas de color amarillo y azul simbolizan el aporte del arreglo de paneles. La azul representa un arreglo de ocho paneles cada uno de 250 Wp y la naranja, uno de ocho paneles, cada uno de 465 Wp, el cual es seleccionado para este análisis. Finalmente, estimando la cantidad de dispositivos conectados al inversor, en este caso una carga total de 4,09 kW, se obtiene el valor de potencia para la selección del inversor de la estación carga (ver ecuaciones 10.6 y 10.7).

$$Potencia\ inversor = Potencia\ Total * factor\ de\ cobertura \quad (10.6)$$

$$4.09kW * 1.2 = 4.91kW \quad (10.7)$$

- **Dimensionamiento de baterías:** a partir de los escenarios energéticos planteados, se realiza el cálculo para dimensionar la capacidad de almacenamiento del sistema de baterías para un día de autonomía; la potencia total de la estación es 4,09 kW. Entonces, considerando un voltaje de carga DC del inversor de 48 VDC para las baterías, la ecuación 10.8 permite estimar la cantidad de amperios horas del sistema a partir de la potencia total y eficiencia del inversor.

$$Amp - hora = (Pot_{total}/n_{inversor})/Volt_{DC} \quad (10.8)$$

Considerando las cargas conectadas al inversor, se estima un valor promedio de 95 AH amperios hora por día (ver ecuación 10.9).

$$(4.09kWh/0.9)/48VDC = 95AH \quad (10.9)$$

Para una batería de 12 VDC y 250 AH, el sistema de almacenamiento se calcula para una autonomía de un día y una profundidad de descarga (0,5). Por esta razón,

se define la cantidad de baterías que deben ir conectadas en paralelo (ver expresiones 10.10 y 10.11).

$$Bateria_{paralelo} = (A - H * dia_{autonomia}) / DOD / Capacidad_{AH} \quad (10.10)$$

$$(95AH * 1d) / 0.5 / 250AH = 1 \quad (10.11)$$

El inversor seleccionado dispone de un sistema de carga de 48 VDC. En este sentido, al seleccionar la batería de 12 VDC, el sistema de almacenamiento de la estación cuenta con un total de cuatro baterías conectadas en serie, como se especifica en la ecuación 10.12.

$$Bateria_{serie} = 4 = Volt_{inversorDC} / Volt_{bateriaDC} \quad (10.12)$$

La capacidad de la estación de carga es de 12 KVA, conformadas por cuatro baterías de 12 V 250 AH conectadas en serie. El sistema de almacenamiento cuenta con una autonomía de un día en caso de una desconexión de la red de suministro eléctrico (ver ecuación 10.13).

$$Bateria_{serie} * Bateria_{paralelo} = Total_{baterias} \quad (10.13)$$

- **Conductores y cables de la estación de carga:** el dimensionamiento y selección de conductores se hace a través del sistema estandarizado *American wire gauge*. Para arreglos fotovoltaicos, se usa el tipo de cable USE-2 Y PV wire; para baterías, cable tipo THW. Por consiguiente, la National Electric Code define la máxima corriente de circuito como la corriente de corto circuito del panel fotovoltaico por 12% (ver ecuación 10.14).

$$I_{max} = I_{sc} * 1.25 \quad (10.14)$$

Como se muestra en la ecuación 10.15, en un sistema de arreglos fotovoltaicos conectados en paralelo, se multiplica por la cantidad de módulos conectados en paralelo

$$I_{max} = n_{paralelos} * I_{sc} * 1.25 \quad (10.15)$$

La salida del inversor está definida por la potencia del inversor dividido por el voltaje de operación (ver ecuación 10.16).

$$I_{max} = P_{inversor} / V_{AC} \quad (10.16)$$

La corriente en los sistemas fotovoltaicos es continua, pues es estos tienen una operación de trabajo de 4-5 horas. En las expresiones 10.14 y 10.15 se aplica un factor adicional de 1,25.

- **Elementos de protección eléctrica de la estación de carga:** las protecciones de los módulos fotovoltaicos se dan a partir del valor total de la corriente en corto circuito del arreglo paneles, según la norma NEC (NEC, 2017) (ver ecuación 10.17). $I_{OCDP} = 33,7A$.

$$I_{OCDP} = n_{\text{paneles}} * I_{sc} * 1.25 * 1.25 \quad (10.17)$$

Tabla 10.4. Valores requeridos de conductores y protecciones

Protecciones y conductores módulos fotovoltaicos		
Máxima corriente paneles	Protección mínima	calibre cable
22 A	37,7 A	10 AWG

Fuente: elaboración propia.

Requerimiento de conductores para batería y protecciones.

Tabla 10.5. Valores requeridos de conductores y protecciones en baterías

Protecciones y conductores baterías		
Máxima corriente	Protección mínima	Calibre cable
180 A	180 A	250 AWG

Fuente: elaboración propia.

Tabla 10.6. Valores requeridos de conductores y protecciones

Protecciones y conductores inversor		
Máxima corriente inversor	Protección mínima	calibre cable
40 A	50 A	8 AWG

Fuente: elaboración propia.

Para resumir, la tabla 10.4 y 10.5 presentan los calibres de los conductores a partir de la cantidad de corriente que circulará a través de ellos.

Las protecciones del inversor no deben exceder el 125 %. El valor de la corriente para una operación de trabajo de 120 VAC es de $I_{max} = 40A$, con una corriente mínima de protección de $I_{OCDP} = 50 A$ (ver ecuación (10.18)).

$$I_{OCDP} = I_{max} * 1.25 \quad (10.18)$$

Finalmente, la tabla 10.6 muestra, a partir de las características del inversor, la corriente máxima de salida. Este valor ayuda a calcular y estimar los elementos de protección (*breaker*), que deben ser de 50 A; adicionalmente, la corriente de protección mínima también permite la selección del conductor que debe ir conectado a la salida del inversor.

- **Puesta a tierra:** para la puesta a tierra, según la NTC 2050, en la sección 250-5, el calibre del conductor debe ser 8 AWG en cobre o 6 AWG en aluminio. La NTC 2050 define que todo circuito con valores de tensión entre 50 y 1000 voltios de corriente alterna deben tener puesta a tierra. De acuerdo con los calibres de cable de fase, se define el calibre del conductor de puesta a tierra (NTC 2050, 1998).

La infraestructura de carga es crucial en la construcción de la movilidad eléctrica, sin importar el modo de transporte. Cargadores y baterías tienen un papel clave por varios motivos. Entre ellos, la estandarización a partir de características, esenciales y comunes, de los sistemas de baterías requeridos en cada modo de transporte y la necesidad y disponibilidad de potencia energética para la carga de las primeras. Esto es posible gracias a otros subsistemas que acompañan a la batería para garantizar una operación correcta. Igualmente, es necesario incorporar fuentes alternativas renovables de energía en este proceso, para acercar esta tecnología a los requerimientos de las comunidades en el siglo XXI, como indican los objetivos de desarrollo sostenible.

Para terminar, esta sección ha especificado de manera general: el funcionamiento de una estación de carga fotovoltaica para vehículos eléctricos; el proceso de generación fotovoltaica a partir de los paneles solares; el desempeño máximo de los paneles a partir de los módulos MPPT; el almacenamiento energético por medio de baterías; el uso de inversores para la conversión de corriente directa generada por los paneles a corriente alterna compatible con la red; y los elementos de protección e interconexión que garantizan el óptimo funcionamiento de la estación de carga. El uso apropiado de cada uno de los elementos descritos brindan una guía para comprender el análisis funcional de los sistemas eléctricos de una estación de carga.

Lo anterior abre la posibilidad de crear una matriz sostenible en todos los sistemas de transporte en las ciudades. Esto implica el cambio de tecnologías dependientes del carbono a otras que utilicen o almacenen energía de forma eficiente en baterías, acumuladores o capacitores. Asimismo, estas fuentes de energía son renovables y amigables con el entorno donde operan. Todo esto se ve reflejado en las tendencias de transporte que se observan en las ciudades y comunidades alrededor del mundo.

10.7. Referencias

Khan, S., Ahmad, A., Ahmad, F., Shafaati, M., Saad, M. y Khateeb, S. (2018). A comprehensive review on solar powered electric vehicle charging system. *Smart Science*, 6(1), 54-79. <https://doi.org/10.1080/23080477.2017.1419054>

Tendencias del transporte en las ciudades inteligentes

Alejandro Uribe Valencia¹, Erick Santiago Gómez Oviedo¹, Javier Emilio Sierra Carrillo², Boris Alexander Medina Salgado², José Luis López Prado², Eberto Dario Porto Mass³

Resumen: los vehículos eléctricos y la infraestructura de carga, mostrados en anteriores capítulos, facilitan la incursión en la movilidad sostenible y dan un paso adelante hacia la transición energética. A partir de tecnologías de la información y de la implementación de telemetría se podrán recolectar datos, tomar decisiones y proponer soluciones que encaminen el desarrollo tecnológico hacia las ciudades inteligentes. En este capítulo se hablará sobre las ciudades inteligentes, los protocolos de comunicación, las capas presentes en un sistema de telemetría y el monitoreo; se hace especial énfasis en las decisiones tomadas para el caso de estudio y, finalmente, se mencionará hacia dónde se dirigen los esfuerzos actuales en materia de movilidad.

Palabras clave: ciudad inteligente; comunicaciones; sistemas inteligentes de transporte; vehículos autónomos; IoT.

La tendencia de las personas a habitar cada vez más en espacios urbanos evidencia la importancia de las ciudades en el desarrollo de los países (figura 11.1). Por ejemplo, para 1960, casi la mitad de la población colombiana habitaba entornos rurales, mientras que para 2022, un

-
- 1 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: auribe1@eafit.edu.co; esgomezo@eafit.edu.co
 - 2 Facultad de Ingeniería, Universidad de Sucre, Colombia. Correo electrónico: javier.sierra@unisucra.edu.co; boris.medina@unisucra.edu.co; jose.lopez@unisucra.edu.co
 - 3 Facultad de Ingeniería, Corporación Universitaria del Caribe CECAR, Colombia. Correo electrónico: eberto.porto@cecar.edu.co

poco más del 80 % de las personas vive en entornos urbanos y esta tendencia parece mantenerse (ver figura 11.2). Este aumento de la población en las ciudades genera grandes retos para las mismas: niveles altos de tráfico, el tratamiento de aguas, los tiempos de espera en trámites, el aprovisionamiento de energía, así como problemas medioambientales y de salud.

Como respuesta a los retos que representa el crecimiento de la población urbana, surge el concepto de ciudad inteligente (*smart city*). Son espacios que usan tecnologías de la información y las comunicaciones (TIC) para: crear, adquirir, procesar, estudiar y utilizar los datos de un sistema interconectado, con el fin de contribuir al desarrollo sostenible, el incremento de la calidad de vida, el uso eficaz de los recursos disponibles, la gestión de la movilidad y el uso racional de la energía.



Figura 11.1.
Ciudades inteligentes

Fuente: elaboración propia.

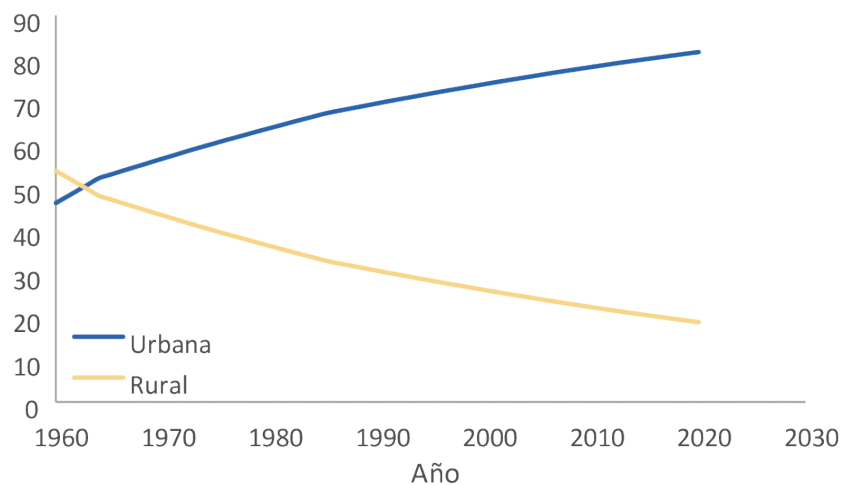


Figura 11.2.
Porcentaje de la población urbana y rural en Colombia desde 1960 a 2020

Fuente: elaboración propia.

11.1. Papel de la movilidad en las ciudades inteligentes

Hacer frente al aumento poblacional implica estrategias para mejorar la forma en que los ciudadanos se desplazan a los distintos puntos de las ciudades. El sistema de transporte es central en el desarrollo de las ciudades. Por esto, se han llevado a cabo varios esfuerzos para mitigar el impacto medioambiental a través del uso de tecnologías más eficientes y mejorar la seguridad de los pasajeros, utilizando materiales más ligeros y resistentes para la construcción de vehículos.

Aunque desarrollar vehículos de combustión interna más eficientes podría reducir a corto plazo las emisiones, la tendencia es la descarbonización a gran escala. Este proceso requiere minimizar el uso de vehículos y los restantes convertirlos en una flota de vehículos eléctricos. De ese modo, es posible lograr un transporte libre de emisiones e implementar tecnologías de integración con la red y la transmisión de datos. Por lo tanto, las TIC se pueden utilizar para la gestión inteligente del tráfico vehicular y, con ello, mitigar del impacto ambiental, reducir accidentes de tránsito, aumentar la eficiencia de transporte y aumentar la productividad de las empresas de transporte.

Los sistemas inteligentes de transporte (TIS) son el resultado del uso de las TIC para la gestión de tráfico. La implementación de estos sistemas se hace a través de redes Vanet (*vehicular ad-hoc networks*, por sus siglas en inglés), que poseen nodos estáticos y nodos móviles (los vehículos son de este último tipo). Ambos nodos son capaces de recibir, enviar y reenviar mensajes entre ellos. Las Vanet pueden ser de distintas naturalezas. A continuación, se mencionan algunas de estas.

- **Comunicación vehículo a vehículo (v2v: *vehicle to vehicle*):** está conformada por una red inalámbrica en la que los vehículos o nodos móviles intercambian información, como ubicación, velocidad, estabilidad, distancia recorrida, dirección, etc.
- **Comunicación vehículo a infraestructura (v2i: *vehicle to infrastructure*):** los vehículos intercambian datos con componentes fijos de la infraestructura de la carretera. Son estaciones ubicadas estratégicamente en semáforos, paradas o gasolineras y transmiten información como avisos de accidente o cálculo de tráfico. Esto resulta muy útil para la utilización eficiente de las intersecciones y carreteras.
- **Comunicación vehículo a peatón (v2p: *vehicle to pedestrian*):** permite la comunicación entre un vehículo y los peatones que se encuentran a sus alrededores. Esto, con el fin de mejorar su seguridad y evitar las lesiones y muertes en carretera intercambiando mensajes avanzados de advertencia entre conductores y peatones.
- **Comunicación vehículo a la red (v2n: *vehicle to network*):** es la comunicación existente entre el vehículo y un proveedor de red que ofrece conectividad al vehículo. Es posible intercambiar información como la congestión en la vía, además de servicios basados en la nube que pueden mejorar la experiencia de los pasajeros.

11.2. Telemetría y monitoreo en movilidad

La telemetría se entiende como la tecnología que permite monitorear en tiempo real magnitudes físicas (humedad, temperatura, conductividad eléctrica, consumos eléctricos y parámetros de estaciones meteorológicas, como viento, lluvia, humedad ambiente, radiación, presión atmosférica, entre otras), para su posterior envío al operador o

gestor del sistema (Tel, 2009). Con la telemetría se puede efectuar un control preciso de las métricas relacionadas con un vehículo y hoy, gracias a la disponibilidad de múltiples recursos tecnológicos, es posible generar información valiosa para los sistemas de transporte en el marco de las ciudades sostenibles e inteligentes. En la figura 11.3 puede verse un esquema de un sistema de telemetría y sus componentes se abordan en las siguientes secciones.

11.2.1. Componentes involucrados en la telemetría

Para diseñar un sistema de telemetría se debe conocer la distribución física de todos los componentes participantes en el contexto de la red inteligente. Esto incluye actores del sistema, aplicaciones, equipos de sistemas de alimentación (ubicados generalmente a nivel de proceso y de campo), dispositivos de protección y telecontrol, infraestructura de red (conexiones de comunicación cableadas e inalámbricas, enrutadores, conmutadores, servidores) y cualquier tipo de computadoras.

Para evaluar si un sistema de instrumentación y telemetría es adecuado, se deben analizar las siguientes características: 1) el número de variables del proceso que se necesita monitorear es alto; 2) el proceso está geográficamente distribuido; 3) la información se necesita en el momento en que los cambios se producen o, en otras palabras, la información se requiere en tiempo real; 4) la necesidad de optimizar y facilitar las operaciones del vehículo, así como la toma de decisiones, tanto estratégicas como operativas; 5) los beneficios obtenidos en el proceso justifican la inversión en la telemetría y pueden reflejarse en el aumento de la efectividad, los niveles de seguridad, etc.



Figura 11.3. Esquema de telemetría

Fuente: elaboración propia.

Es necesario tener en cuenta los estándares de instrumentación para implementar un sistema de telemetría, que se refieren a dispositivos y artefactos, así como a procedimientos, instrumentos, sistemas y protocolos, utilizados para definir unidades de medidas o de los cuales depende una medición. Dichos estándares especifican unidades y escalas para comparar medidas hechas en diferentes lugares y momentos. Organismos como ISO (Organización Internacional de Normalización) y ANSI/ISA (American National Standards Institute) tienen a disposición diferentes normas que pueden ser empleadas en el desarrollo de la telemetría para sistemas multimodales de movilidad, entre las que se hallan: ISO 3511, ISO 14617, ANSI/ISA-S5.1-1984(R1992), ANSI/ISA-S5.2-1976(R1992), ANSI/ISA-S5.3-1983. Es importante tener presente que, dependiendo de la instrumentación y la telemetría que se requiera emplear, se debe analizar puntualmente la norma o estándar que se tendrá en cuenta.

Dada la naturaleza de un proyecto, hay que priorizar las variables que más impacto tengan en el funcionamiento del sistema. A medida que se vuelven más complejos, el flujo de información entre subsistemas o dispositivos aumenta, enmascarando cualquier comportamiento del que los usuarios deban ser conscientes. Fernández *et al.* (2017) hacen una propuesta de matriz en función de datos (FDM, por sus siglas en inglés). Por medio de esta herramienta, los usuarios pueden decidir si una variable tiene impacto en una o más funciones del sistema y su relevancia se basa en el Indicador de Relevancia de la Variable (VRI), el Indicador de Relevancia de la Función (FRI) y, finalmente, seleccionar los instrumentos para medir estas variables.

Esta aproximación considera cuatro pasos: 1) se comienza analizando el interior de un sistema técnico, utilizando documentación como hojas de datos, planos mecánicos y eléctricos y *software*; luego, 2) se definen los portadores de funciones generales mediante métodos de ingeniería inversa; a su vez, 3) se requiere un análisis de la misión del sistema, que parte de un enunciado y se complementa con documentación adicional, como especificaciones de diseño de producto (PDS), reglamentos o manuales para, finalmente, 4) crear el FDM.

11.2.2. Selección de protocolos de comunicación

Es importante conocer los protocolos y mecanismos para el intercambio de información entre los componentes. Dado el contexto de movilidad y los requerimientos de las motos híbridas y embarcaciones electro-solares descritos, la comunicación en el sistema de telemetría debe darse a través de tecnologías inalámbricas. En el sistema puede requerirse comunicación entre dispositivos en el mismo vehículo, así como con equipos de comunicación externos en estaciones de carga. De este modo, para la gestión de la información, debe garantizarse que los datos estén disponibles, ya sea de forma síncrona o asíncrona en el sistema de gestión y monitoreo. A continuación, se describen las tecnologías inalámbricas disponibles.

11.2.2.1. Tecnologías inalámbricas

Mediante la tecnología inalámbrica, sin usar cables, las personas y otros dispositivos pueden comunicarse a diferentes distancias; también incluye ondas de radio frecuencia (RF) e infrarrojos (IR). Las redes inalámbricas, básicamente, se clasifican en cuatro tipos

dependiendo del alcance que logre cada una y se rigen bajo normas y estándares, las cuales fueron establecidas por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos (IEEE) como se menciona en (EcuRed, s.f.).

Redes de área personal inalámbricas (WPAN, por sus siglas en inglés): son redes que permiten la conectividad de dispositivos personales o de sensores en un área de aproximadamente 10 metros, empleadas ampliamente en domótica y sensorica. Estas se dividen de la siguiente manera:

- Asociación de Datos Infra-rojos (IrDA): define un estándar físico en la forma de transmisión y recepción de datos por rayos luminosos que se mueven en el espectro infrarrojo. Los estándares IrDA soportan una amplia gama de dispositivos eléctricos, informáticos y de comunicaciones y, además, permiten la comunicación bidireccional entre dos extremos a velocidades que oscilan entre los 9600 bit/s y los 4 Mbit/s.
- Bluetooth: es una tecnología de red inalámbrica de corto alcance y los dispositivos bluetooth no necesitan una línea de visualización directa para comunicarse. Esto hace que su uso sea más flexible, lo cual permite la comunicación entre habitaciones en espacios pequeños. Está definido en el estándar IEEE 802.15.
- ZigBee o Z-Wave: es el nombre de la especificación de un conjunto de protocolos de alto nivel de comunicación inalámbrica, el cual utiliza radiodifusión digital de bajo consumo y está basada en el estándar IEEE 802.15.4 de redes inalámbricas de área personal (*wireless personal area network*, WPAN). Se implementa para aplicaciones que requieren comunicaciones seguras con baja tasa de envío de datos.

Redes de área local inalámbricas (WLAN, por sus siglas en inglés): permiten a los usuarios de un área local, como un campus universitario o una biblioteca, formar una red u obtener acceso a internet. Un pequeño número de usuarios puede formar una red temporal sin tener un punto de acceso, dado que no necesitan de los recursos de la red. Estas se pueden dividir del siguiente modo:

- Wifi: permite la interconexión inalámbrica de dispositivos electrónicos (computadores personales, teléfonos, televisores, videoconsolas, reproductores de música, etc.), los cuales pueden conectarse entre sí o a internet a través de un punto de acceso de red inalámbrica. El estándar de wifi es el IEEE 802.11, que define y gobierna las redes de área local inalámbricas WLAN que operan en el espectro de los 2,4 GHz.
- HiperLAN2: desarrollada por el proyecto Broadband Radio Access Networks (BRAN) del Instituto Europeo de Estandarización de las Telecomunicaciones (ETSI), es muy similar al estándar IEEE 802.11a, ya que ambas usan la banda de los 5 GHz y, también, el método OFDM para obtener velocidades de hasta 54 Mbps. Actualmente, el IEEE 802.11a no ofrece diversidad de canales con QoS variables, por lo que se le compara con un *wireless Ethernet*, mientras que la HiperLAN2 es más parecida a un ATM inalámbrico.

Redes de área metropolitana inalámbricas (WMAN, por sus siglas en inglés): permite la conexión de múltiples redes en un área metropolitana o rural, como edificios en una ciudad, lo que puede ser una alternativa o respaldo al tendido de cableado de cobre o fibra. El ejemplo más característico de esta variedad de red es la Interoperabilidad Mundial para Acceso por Microondas, mejor conocida por sus siglas, WiMax. Esta norma de transmisión de datos utiliza ondas de radio en frecuencias de 2,5 a 5,8 GHz,

y puede tener una cobertura de hasta 70 km. El estándar que define esta tecnología es el IEEE 802.16 MAN y se destaca por proveer servicios de banda ancha en zonas donde el despliegue de cable o fibra, por la baja densidad de población, presenta unos costos por usuario muy elevados. Este escenario se presenta, en mayor medida, en zonas rurales.

Redes de área extendida inalámbricas (wwan, por sus siglas en inglés): este tipo de redes puede mantenerse en grandes áreas, como ciudades o países, a través de múltiples sistemas de satélites o sitios de antenas atendidos por un ISP. Su evolución ha dado paso al desarrollo de las siguientes tecnologías:

- Sistema global de comunicaciones móviles (GSM, por sus siglas en inglés): se denomina estándar de segunda generación (2G) porque las comunicaciones se producen de un modo completamente digital (Gu y Peng, 2010). El estándar GSM usa las bandas de frecuencia de 900 y 1800 MHz; sin embargo, en Estados Unidos se emplea la banda de frecuencia de 1900 MHz. Igualmente, permite un rendimiento máximo de 9,6 kbps, para transmisiones de voz y de datos digitales de volumen bajo, por ejemplo, mensajes de texto (SMS) o mensajes multimedia (MMS). Es la tecnología móvil digital más desplegada en el mundo y está disponible en una gran variedad de teléfonos (según los datos oficiales de la Asociación GSM, en un 82 % de las terminales mundiales) (Blasco, 2016) y diferentes equipos para interconexión con sensores.
- Servicio general de paquetes vía radio (GPRS, por sus siglas en inglés): este sistema de comunicación móvil se creó en la década de los 80 para complementar el sistema GSM y se convirtió en una extensión del mismo, lo cual posibilitó múltiples servicios y la incorporación de aplicaciones nuevas (Levesque, 2011).
- Sistema Universal de Telecomunicaciones Móviles (UMTS, por sus siglas en inglés): también conocido como 3G, entre sus características principales está: facilitar la mensajería instantánea, los servicios de mensajes cortos (SMS), multimedia (MMS) y de correo electrónico (Datta y Kaushal, 2014). A su vez, proporciona una cobertura inalámbrica completa y velocidades de transferencia que oscilan entre 56 y 114 kbps. El principal avance ofrecido por los sistemas UMTS es la tecnología de acceso múltiple por división de código de banda ancha (WCDMA, por sus siglas en inglés), heredada de la tecnología militar. Su principal ventaja consiste en que la señal se expande en frecuencia gracias a un código que solo conocen el emisor y el receptor.
- 4G - LTE: responde a las siglas *long term evolution* y se refiere a la tecnología de banda ancha inalámbrica que sirve para la transmisión de datos, con el propósito de dar acceso a internet a los dispositivos móviles (Datta y Kaushal, 2014). Por ende, este estándar de comunicaciones se emplea para la subida y bajada de datos desde la red a una alta velocidad. La principal ventaja que aportó fue el incremento de la velocidad de navegación. En concreto, el LTE permite una velocidad máxima de 170 Mbps con dos antenas base y dos en el dispositivo, o de 300 Mbps con cuatro antenas base y cuatro en el equipo.
- 5G: es la próxima generación de tecnología celular que promete mejorar la velocidad, cobertura y capacidad de respuesta de las redes inalámbricas (Hannaidh *et al.*, 2018). Utiliza un espectro de súper alta frecuencia que tiene un rango más corto, pero con mayor capacidad. No obstante, debido a los problemas de rango y de interferencia, los operadores están empezando a explorar un espectro de menor frecuencia (que se usa en las redes actuales) para ayudar a llevar la tecnología 5G a distancias mayores, a través de paredes y otros obstáculos.

- Sigfox: es un servicio que aporta solución al mundo de la comunicación de máquina a máquina (M2M), presentando una oferta de conectividad pensada y dedicada a las comunicaciones a baja velocidad. Reinventa la manera como se transmite la información, pensando en reducir el consumo de energía y el coste de los dispositivos conectados.

11.2.2.2. Modelos de comunicación en IoT

Internet de las cosas (*Internet of Things* – IoT) es un paradigma de comunicación reciente que prevé un futuro cercano en el que los objetos de la vida cotidiana estarán equipados con microcontroladores, sensores y transceptores para la comunicación digital; asimismo, es un conjunto de protocolos que habilitan la comunicación entre sí y con los usuarios, convirtiéndose en una parte integral de Internet (Whitmore *et al.*, 2015). IoT, básicamente, es la convergencia de dos tecnologías: el Internet y las redes de sensores; esto permite nuevas posibilidades como la comunicación directa máquina-máquina sobre la red de internet. El paradigma ha ayudado a que investigadores hagan nuevas propuestas sostenibles en las ciudades inteligentes (como redes y servicios). Así, es posible el acceso fácil e interacción de una amplia variedad de dispositivos (electrodomésticos, cámaras de vigilancia, sensores, actuadores, pantallas, vehículos, etc.), lo que genera una cantidad de información (Schaffers *et al.*, 2011). Desde una perspectiva operativa, es útil pensar cómo los dispositivos IoT se conectan y comunican en términos de sus modelos de comunicación técnica (Kulkarni and Kulkarni, 2017).

- El modelo de comunicación de dispositivo a dispositivo representa dos o más terminales que se conectan y comunican directamente entre sí, en lugar de hacerlo a través de un servidor de aplicaciones intermediario. Estos lo hacen a través de muchos tipos de redes, incluidas las redes IP o internet; pero, a menudo, utilizan protocolos como bluetooth, Z-Wave o ZigBee para establecer comunicaciones directas de dispositivo a dispositivo.
- En un modelo de comunicación de dispositivo a nube, este se conecta directamente a un servicio en la nube de internet como un proveedor de servicios de aplicaciones para intercambiar datos y controlar el tráfico de mensajes. Con frecuencia, este enfoque aprovecha los mecanismos de comunicación existentes, como conexiones por cable tradicionales de Ethernet o wifi, para conectar el dispositivo y la red IP, que, finalmente, se conecta al servicio en la nube.
- En el modelo de dispositivo a puerta de enlace —también conocido como de dispositivo a capa de aplicación (ALG)—, el instrumento IoT se conecta a través de un servicio ALG como un conducto para llegar a un servicio en la nube. En otras palabras, hay un *software* de aplicación que opera en un dispositivo de puerta de enlace local, actuando como intermediario entre este y el servicio en la nube. Además, proporciona seguridad y otras funciones, como la traducción de datos o protocolos. Varias formas de este modelo se encuentran en dispositivos de consumo. En muchos casos, el dispositivo de puerta de enlace local es un teléfono inteligente, el cual ejecuta una aplicación para comunicarse con otro dispositivo y transmitir datos a un servicio en la nube.
- El modelo de intercambio de datos de fondo se refiere a una arquitectura de comunicación que permite a los usuarios exportar y analizar datos de objetos inteligentes, desde un servicio en la nube en combinación con datos de otras fuentes. Esta arquitectura es compatible con el deseo de otorgar acceso a los datos del sensor cargados a terceros. Una arquitectura de intercambio de *back-end* hace que los datos recopilados de flujos

de información de dispositivos IoT individuales se agreguen y analicen, para sugerir un enfoque de servicios federados, o interfaces de programador de aplicaciones en la nube (API). De este modo, se logra la interoperabilidad de los datos de dispositivos inteligentes alojados en ella. Al permitir que el usuario obtenga un mejor acceso a un dispositivo IoT y sus datos, el valor general del dispositivo se amplifica claramente; sin embargo, estos beneficios en red vienen con compensaciones. Se debe prestar atención a las cargas de costos adicionales por conectarse a recursos de la nube cuando se considera una arquitectura de las mencionadas, especialmente en regiones donde los costos de conectividad del usuario son altos.

11.2.3. Análisis de redes: caso práctico

Como se expuso en capítulos anteriores, la aplicación práctica de lo propuesto en el proyecto es Magangué, que, como se ha explicado, cuenta con un sistema de movilidad terrestre y fluvial. La red GSM se elige para el envío de información; por lo tanto, se debe evaluar la cobertura que presentan los operadores presentes en la ciudad y sus alrededores. Para este caso, se analizaron las coberturas de las empresas Tigo, Movistar y Claro, así como de SigFOX en el municipio. Estas empresas prestan buen servicio pero, es crucial una cobertura a lo largo de la trayectoria del río, por lo que Claro resulta la mejor opción. Para el caso de SigFOX, no se cuenta con cobertura en Magangué o sus alrededores. En el casco urbano, los tres operadores de la red GSM analizados pueden ser seleccionados, aunque, dependiendo de la localización, la señal puede variar en lo rural. Una alternativa es adquirir una tarjeta sim IoT que permita el intercambio entre operadores para obtener los beneficios de cada uno en zonas con baja señal.

11.2.4. Almacenamiento de la información

La capa de información es una de las más importantes del sistema, ya que debe permitir la gestión y el almacenamiento de los datos generados, tanto por los sensores ubicados en la embarcación como de fuentes externas. Dadas las características de los vehículos desarrollados y mencionados en el libro, es importante determinar el motor de almacenamiento de información. Este debe ser afín al crecimiento del sistema de transporte intermodal y estar enmarcado, también, en principios de IoT. Actualmente, existen dos tipos de sistemas de almacenamiento de información.

- Relacional - SQL: una base de datos relacional almacena y proporciona acceso a puntos de datos relacionados entre sí. Estas se basan en el modelo relacional, una forma intuitiva y directa de representar datos en tablas. En una base de datos de este tipo, cada fila de la tabla es un registro con un ID único llamado clave. Las columnas de la tabla contienen atributos de los datos y cada registro, generalmente, tiene un valor para cada atributo, lo que facilita el establecimiento de las relaciones entre los puntos de datos (Oracle, s.f.).
- No relacional - NoSQL: estas bases de datos están diseñadas para modelos de datos específicos y tienen esquemas flexibles para crear aplicaciones modernas. Son reconocidas, porque son fáciles de desarrollar, por su funcionalidad y el rendimiento a escala (Amazon Web Services, s.f.). Estas bases utilizan una variedad de modelos para administrar datos y están optimizadas para aplicaciones que requieren grandes volúmenes de información,

baja latencia y modelos flexibles. Como se mencionó, IoT, en esencia, es una colección de sensores estrechamente unidos que ha elevado el énfasis de grandes cantidades de datos; así, se espera que se genere y recopile gran cantidad de datos de ubicaciones variadas rápidamente. Las preocupaciones por características como el almacenamiento y los factores de rendimiento están obligando a las bases de datos a superarse a sí mismas. Las bases de datos relacionales tradicionales han demostrado que son eficientes; no obstante, se afirma que NoSQL y, más recientemente las bases de datos NewsQL que ha ganado impulso, funcionan mejor que la contraparte clásica de SQL.

Fatima y Wasnik (2016) efectuaron un estudio comparativo sobre el rendimiento de tres bases de datos, cada una estructurada en dichas tecnologías: SQL (MySQL), NoSQL (MongoDB) y NewsQL (VoltDB), respectivamente, para lecturas de sensores. Los datos de los sensores manejan gran tamaño (MB a GB) y se prueban contra operaciones de escritura única, lectura simple, eliminación simple y escritura múltiple. Los resultados muestran, en operaciones intensivas de escritura, que NewsQL (VoltDB) y NoSQL (MongoDB) presentan buenos resultados con respecto al rendimiento de escritura; mientras que MySQL relacional quedó rezagado. Al comprobar la lectura intensiva, VoltDB funciona muy bien, seguido por MySQL y MongoDB es el último. Sin embargo, a medida que aumenta el tamaño de los datos y el número de clientes, hay una caída considerable en el rendimiento de MySQL y un progreso considerable de MongoDB. El resultado de la consulta de eliminación en términos de rendimiento es casi igual al de las operaciones de lectura intensiva. Actualmente, SQL tiene gran despliegue por su reconocimiento y empleo en diferentes sistemas de información, pero MongoDB experimenta gran crecimiento por sus facilidades de uso, que le permite ser flexible en la construcción del sistema de información.

11.2.5. Capa de datos

Un sistema de monitoreo desplegado, que incluya las consideraciones sugeridas, puede aprovechar la recolección de información para la toma de decisiones. Por ejemplo, se podría visualizar el estado de las variables medidas en el vehículo para enviar alarmas por mensaje de texto en tiempo real. Los datos recolectados tienen un papel fundamental en la detección temprana de causas de fallo, para realizar mantenimientos preventivos en los componentes del vehículo y, así, evitar accidentes, lo que aumenta la vida útil de los vehículos (Liu *et al.*, 2014). Por otra parte, entender el comportamiento del vehículo facilita plantear estrategias de gestión energética y hacer un uso inteligente de la energía para mejorar su desempeño (Brandstetter *et al.*, 2014). Este tipo de análisis también ayuda a estimar el impacto de las tecnologías de vehículos eléctricos sobre la red y sobre el medio ambiente (Alves *et al.*, 2016). Los datos capturados obtienen información interna y externa del vehículo; con tecnologías de monitoreo es posible entender diversas situaciones de tráfico y entorno. A partir de esto, se pueden encontrar aproximaciones a la detección de conductas de manejo, optimización, tanto de vehículos como de rutas, energía y cantidad de conductores, gestión de tráfico dinámico, detección de accidentes, pronósticos de consumo energético, entre otras aplicaciones (Perișoară *et al.*, 2019). A continuación, en la figura 11.4, se muestran algunos usos que se le pueden dar a los datos dependiendo de su origen.

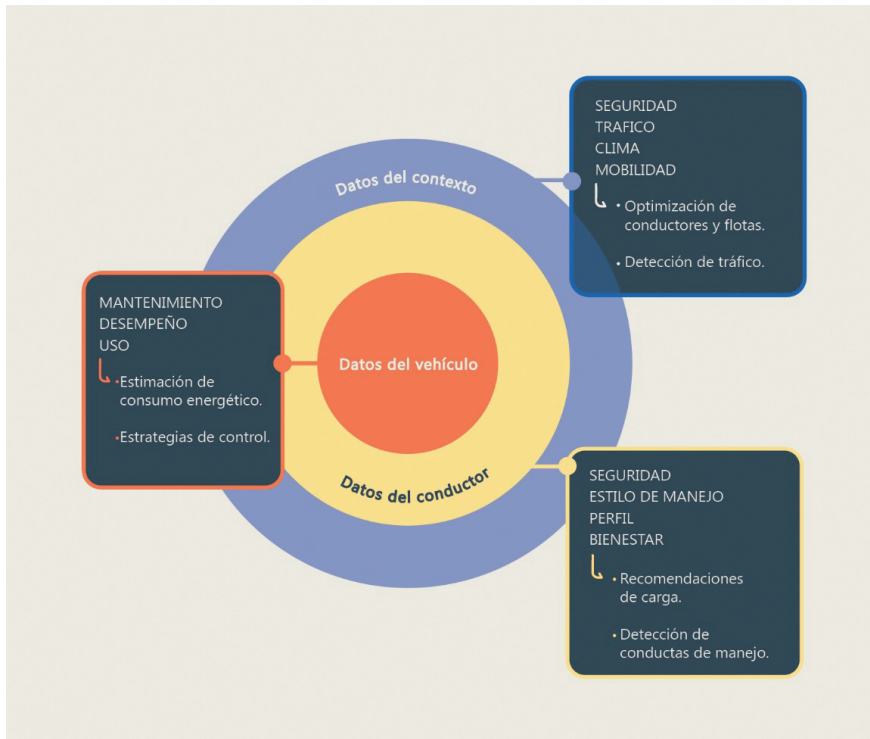


Figura 11.4.
Aplicaciones de monitoreo de vehículos

Fuente: elaboración propia.

11.3. Caso de estudio

Para el caso del proyecto Energética 2030, se diseñó un sistema de telemetría y monitoreo flexible, escalable y configurable, dependiendo de los requerimientos que vayan surgiendo en cada subsistema perteneciente al sistema multimodal (ver figura 11.5).

Algunas características del sistema de monitoreo son: primero, el almacenamiento centralizado de datos de telemetría es un aspecto crítico, pues los *datalogger* equipados en cada vehículo y estaciones de carga serán un flujo constante de información correspondiente a las mediciones de los sensores instalados. De hecho, se espera un crecimiento exponencial de datos una vez se masifique su uso. Esta situación implica determinar cuál sistema de base de datos satisface mejor los requerimientos para el monitoreo. Así, los criterios de decisión son: capacidad de manejar grandes volúmenes de datos, idoneidad para la integración con el *software* de analítica Grafana, suficiencia en el uso del lenguaje de consulta para la construcción de nuevos reportes y facilidad para la agregación de nuevos subsistemas y sensores, sin necesidad de efectuar mayores cambios en el sistema de información. Segundo, para la interacción entre el sistema de monitoreo con los vehículos y la estación de carga, se cuenta con un servicio web de desarrollo interno llamado DataCollector, al cual los *dataloggers* reportan información de los sensores vía HTTP; toda la telemetría se guarda en las bases de datos para su posterior uso. Para el almacenamiento de información es posible realizar una separación de los datos en diferentes motores: los datos de gestión del sistema en MongoDB y los de los sensores (*time-series*) a InfluxDB. Tercero, para la visualización de información y análisis de datos se cuenta con el *software* Grafana, que muestra los cuadros de mando, gráficos de serie temporal y estadísticos para la toma de decisiones. Un ejemplo de

tablero diseñado para el monitoreo de una estación de carga se puede observar en la figura 11.6. Además, el sistema cuenta con un portal de monitoreo que gestiona toda la información de control del sistema de monitoreo, como el registro de datos de usuarios, perfiles, credenciales, sensores, entre otros y, asimismo, sirve de punto de acceso al *software* de Grafana.

Figura 11.5.
Telemetría y
monitoreo Energética
2030

Fuente: elaboración propia.

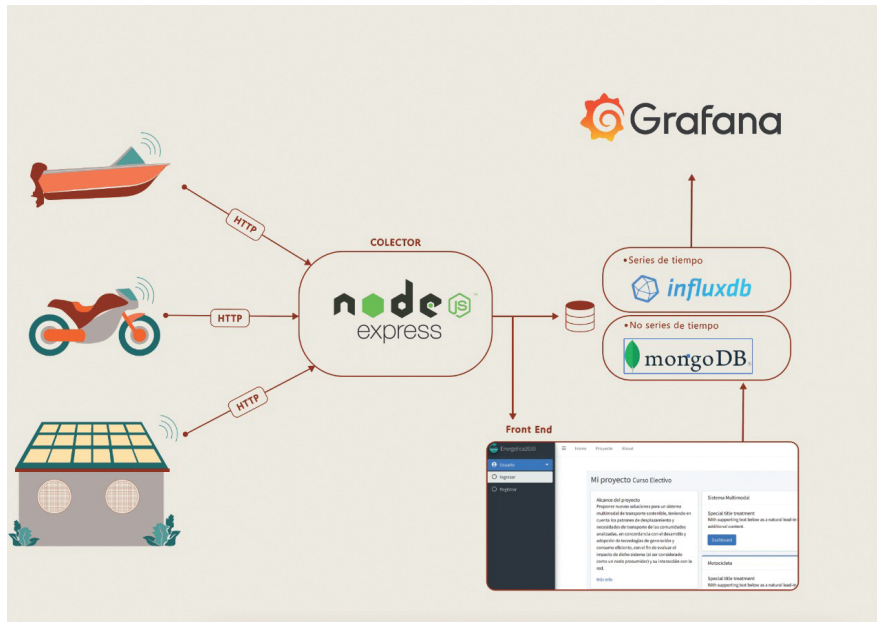


Figura 11.6.
Tablero para estación
de carga

Fuente: elaboración propia.

11.4. Hacia dónde va la movilidad: vehículos autónomos

Los vehículos autónomos son una de las tecnologías que surgen a partir de las iniciativas de movilidad urbana para una ciudad inteligente y sostenible. El concepto de movilidad autónoma tiene el potencial de proveer soluciones prácticas que apunten a abordar los retos, centrándose en la mejora de la seguridad vial y la eficiencia del tráfico. Estos vehículos tienen la capacidad de comunicarse y aprender del entorno (de vehículos vecinos, así como de la infraestructura y de las carreteras) y, por consiguiente, transmitir la información a la flota de vehículos y al operador. En consecuencia, los vehículos y la infraestructura que actúan como parte del ecosistema vehicular hacen que las comunicaciones vehículo a vehículo (V2V), vehículo a infraestructura (V2I) y vehículo a nube (V2N) sean esenciales. Para aprovechar el verdadero potencial de la conducción automatizada se necesita una red móvil fiable, robusta y omnipresente, es decir, soluciones 5G o superiores (Khan *et al.*, 2022).

Esta tecnología puede influir positivamente en el medio ambiente, sin embargo, aún se encuentra en desarrollo. Se considera que el beneficio máximo se alcanzará en el nivel 5 de automatización, que surge de la norma SAE J3016, que describe a la tecnología en términos del rol del conductor, el sistema y los niveles de automatización del vehículo (Shuttleworth, 2019). Este estándar considera seis niveles de automatización, que van desde el nivel 0 hasta el 5, con los que cualquier vehículo podría operar en cualquier condición ambiental o estado de infraestructura. Algunos investigadores estiman que la disponibilidad y consolidación de esta tecnología apunta como horizonte al año 2030.

La figura 11.7 describe cada uno de los niveles de automatización. A continuación, se profundizan las características acerca de los niveles superiores al 1. Para comprender el nivel de asistencia, se debe entender que las tareas de conducción dinámica son los procedimientos en tiempo real para mantener intactas las funciones operativas mientras se conduce el vehículo (Khan *et al.*, 2022).

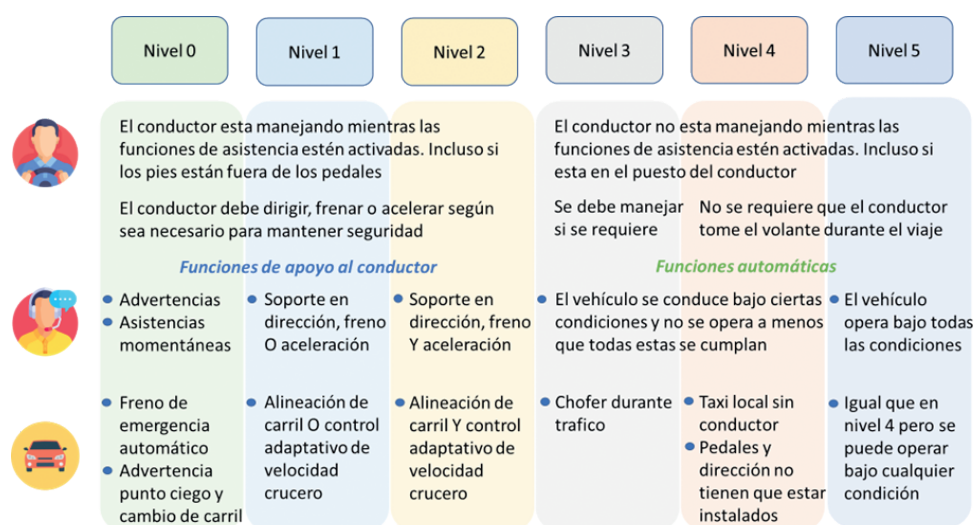


Figura 11.7.
Niveles de automatización SAE J3016

Fuente: elaboración propia.

- Nivel 1: el conductor humano debe estar presente y realizar las tareas de conducción dinámica todo el tiempo. Las funciones de asistencia a la conducción automatizada en este nivel ayudan a controlar cualquier degradación del rendimiento de la conducción dinámica.
- Nivel 2: la presencia de un conductor humano es obligatoria. Al igual que en el nivel 1, en caso de cualquier fallo de la función de conducción automatizada, el conductor lo identifica y toma el control del vehículo para lograr el rendimiento requerido de la conducción dinámica. No obstante, la diferencia entre el nivel 1 y 2 es que el sistema es totalmente responsable del movimiento lateral y longitudinal del vehículo en un dominio de diseño operativo limitado.
- Nivel 3: el sistema podría solicitar la reanudación de la intervención humana en caso de fallo del sistema avanzado de apoyo a la conducción. El vehículo automatizado en este nivel puede realizar tareas de conducción dinámica en una zona de tráfico intenso o en autopistas, pero no puede hacer el mismo procedimiento en caso de accidente o colisión.
- Nivel 4: el apoyo a la conducción avanzada o vehículo autónomo es responsable de cualquier movimiento lateral o longitudinal del vehículo. Se encarga de detectar, supervisar y responder a los eventos, aunque, el apoyo a la conducción avanzada puede solicitar la intervención de los pasajeros y realizar la conducción dinámica.
- Nivel 5: el alcance de la conducción dinámica es ilimitado. Esto significa que, en cualquier condición, el apoyo a la conducción avanzada o vehículo autónomo es responsable de la realización de la conducción dinámica y lleva a cabo el procedimiento de caída de la conducción dinámica si es necesario.

En síntesis, este capítulo nos permitió conocer las consideraciones para transitar hacia la movilidad sostenible en una ciudad inteligente, las decisiones para el caso de estudio y la perspectiva tecnológica en términos de movilidad. Es importante considerar que uno de los factores críticos que determinan el éxito en el despliegue de estas tecnologías es la correcta planeación de operación del sistema multimodal. Esto se abordará en el siguiente capítulo.

11.5. Referencias

- Alves, J., Baptista, P., Gonçalves, G. y Duarte, G. (2016). Indirect methodologies to estimate energy use in vehicles: Application to battery electric vehicles. *Energy Conversion and Management*, 124, 116-129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.07.014>
- Amazon Web Services. ¿Qué son las bases de datos NoSQL? <https://aws.amazon.com/es/nosql/>.
- Blasco, L. (2016, 5 de septiembre). Cuáles son las diferencias entre E, GPRS, 3G, 4G, 5G y esas otras redes a las que se conecta tu celular (y cómo te afectan tu conexión a internet). *BBC News*. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-37247130>
- Brandstetter, P., Vanek, J. y Verner, T. (2014). Electric vehicle energy consumption monitoring. *Proceedings of the 2014 15th International Scientific Conference on Electric Power Engineering, EPE*, 589-592. <https://doi.org/10.1109/EPE.2014.6839444>

- Datta, P. y Kaushal, S. (2014). Exploration and comparison of different 4G technologies implementations: A survey. *Recent Advances in Engineering and Computational Sciences, RA ECS*, 6-8. doi: 10.1109/RA ECS.2014.6799517.
- EcuRed. (s.f.) *Estándares Inalámbricos*. https://www.ecured.cu/Est%C3%A1ndares_Inal%C3%A1mbricos#:~:text=Es%20un%20sistema%20propietario%20dise%C3%B1ado,for-man%20parte%20del%20est%C3%A1ndar%2011g.
- Fatima, H. y Wasnik, K. (2016). Comparison of SQL, NoSQL and NewsQL databases for internet of things. *IEEE Bombay Section Symposium*, 1-6. doi: 10.1109/IBSS.2016.7940198.
- Fernández, M., Mejía, R. y Osorio, G. (2017). A function to data matrix (FDM) approach for mission variables consideration. *MATEC Web of Conferences*, 108, 1-5. doi: 10.1051/matec-conf/201710810008.
- Gu, G. y Peng, G. (2010). The survey of GSM wireless communication system. *International Conference on Computer and Information Application ICCIA*, 121-124. doi: 10.1109/IC-CIA.2010.6141552.
- Hannaidh, B., Fitzgerald, P., Berney, H., Lakshmanan, R., Coburn, N., Geary, S. y Mulvey, B. (2018). Devices and Sensors Applicable to 5G System Implementations. *IEEE International Microwave Workshop Series on 5G Hardware and System Technologies, IMWS-5G*, 2018-2020. doi: 10.1109/IMWS-5G.2018.8484316
- Khan, M., El Sayed, H., Malik, S., Zia, M., Alkaabi, N. y Khan, J. (2022). A journey towards fully autonomous driving - fueled by a smart communication system. *Vehicular Communications*, 36. 100476. doi: 10.1016/j.vehcom.2022.100476
- Kulkarni, S. y Kulkarni, S. (2017). Communication models in internet of things: A survey. *International Journal For Science Technology And Engineering*, 3(11), 87-91. <http://www.ijste.org/articles/IJSTEV3I11049.pdf>
- Levesque, A. (2011). General Packet Radio Service. *Handbook of Computer Networks*, 2, 658-674.
- Liu, Z., Tao, W., Jiang, L. y Zhu, C. (2014). Design and application on electric vehicle real-time condition monitoring system by Internet of things technology. *IEEE International Conference on Software Engineering and Service Sciences, ICSESS*, 744-747, doi: 10.1109/ICSESS.2014.6933674.
- Oracle. *Qué es una base de datos relacional*. <https://www.oracle.com/co/database/what-is-a-relational-database/>
- Perișoară, L., Stamati, E., Chitu, L. y Săcăleanu, D. (2019). Pilot Platform for Remote Monitoring of an Electric Vehicle. *IEEE 24th International Symposium for Design and Technology in Electronic Packaging, SIITME*, 394-397. doi: 10.1109/SIITME.2018.8599280.
- Schaffers, H., Komninos, N., Pallot, M., Trousse, B., Nilsson, M. y Oliveira, A. (2011). Smart cities and the future internet: Towards cooperation frameworks for open innovation. En F. Álvarez, F. Cleary, P. Daras, J. Domingue, A. Galis, A. Garcia, A. Gavras, S. Karnourkos, S. Krco, M. Li, V. Lotz, H. Müller, E. Salvadori, A. Sassen, H. Schaffers, B. Stiller, G. Tselentis, P. Turkama y T. Zahariadis (eds). *The Future Internet. Future Internet Assembly 2013: Validated Results and New Horizons* (431-446). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-20898-0_31
- Shuttleworth, J. (2019). *SAE J3016 automated-driving graphic*. <https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic>

- Tel. (2009). Telemetry - an overview. <https://www.sciencedirect.com/topics/nursing-and-health-professions/telemetry>
- Whitmore, A., Agarwal, A. y Xu, L. (2015). The Internet of things—A survey of topics and trends. *Information Systems Frontiers*, 17(2), 261-274. <https://doi.org/10.1007/s10796-014-9489-2>

Operación de sistemas multimodales

Juan Pablo González Alzate¹, Christian Roviro Portilla Caicedo¹, Alejandro Uribe Valencia², Mauricio Fernández Montoya², Valentín Raimund Ernst³, Jairo José Espinosa Oviedo¹

Resumen: los sistemas de transporte se modelan mediante la relación entre oferta y demanda. La primera se caracteriza por la infraestructura, especialmente, las vías que tienen diferentes capacidades. A su vez, la demanda es modelada mediante los viajes que realizan los usuarios del transporte. En este sentido, los sistemas de transporte multimodal pueden ser analizados a partir la interacción entre los modos de transporte dentro de las vías y, asimismo, desde la relación de los usuarios con estos modos de transporte disponibles. Adicionalmente, en el marco de la electromovilidad, es necesario incluir las dinámicas de las estaciones de carga y de los vehículos eléctricos. En este capítulo se presenta la descripción de la simulación de movilidad urbana multimodal, las investigaciones de las estrategias de localización, las evaluaciones experimentales de los modelos y la gestión óptima del sistema de transporte multimodal.

Palabras clave: transporte multimodal; electromovilidad; simulación urbana; gestión de transporte; optimización.

- 1 Grupo de Automática de la Universidad Nacional (GAUNAL), Universidad Nacional de Colombia, carrera 65 n.º 59 A-110, Medellín, Colombia. Correo electrónico: jespinov@unal.edu.co; cocrpotil@unal.edu.co; jpgonzaleza@unal.edu.co
- 2 Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejag, auribev1@eafit.edu.co
- 3 Technische Universität, Wien. Correo electrónico: valentin.ernst@aon.at

12.1. Simulación de la operación de sistemas de transporte

Esta sección aborda los modelos de las redes de tráfico de los escenarios de las ciudades intermedias, Magangué y Sincelejo. También, expone la aplicación de los modelos dinámicos de la motocicleta híbrida y la embarcación electro-solar. Finalmente, se describe la gestión del sistema de transporte multimodal en relación con la gestión de puntos de carga y la minimización de los tiempos de espera en estaciones de carga. El *software* de simulación seleccionado considera parámetros relacionados con la movilidad (velocidades, trayectorias, ubicaciones en el mapa de la red de tráfico simulado) y características intrínsecas de los vehículos.

Para el modelado del sistema de movilidad urbano, es necesario contar con los mapas de las redes de tráfico de los casos de estudio y la ubicación de los puntos de acopio de los vehículos y estaciones de carga. Además, se debe tener, con alto nivel de detalle: las características de las vías (longitud, número de carriles, sentidos de giro, etc.), la demanda de viajes en la zona y las características intrínsecas de cada vehículo, bien sea motocicletas híbridas o embarcaciones electro-solares. En este sentido, para llevar a cabo este modelado, se requiere de una herramienta computacional flexible que permita la integración de todos los componentes del sistema multimodal. En la literatura existen diversas herramientas computacionales de código abierto para la modelación de tráfico vehicular como STRAW, CityMob, VanetMobiSim, SUMO (Simulation of Urban Mobility), las cuales permiten crear simulaciones precisas (Cumbal, 2017). Muchas de estas herramientas trabajan bajo simulación microscópica de movilidad urbana, lo cual refleja un alto nivel de detalle respecto a la movilidad y la creación de escenarios de simulación.

Un problema de aproximación a las dinámicas reales del tráfico urbano requiere una herramienta de computación con alto nivel de detalle. Algunas herramientas pueden simular la dinámica de vehículos y sus particularidades, terrestres y fluviales, personas o usuarios ingresando, hasta simulaciones de accidentes. También, permiten construir escenarios, carreteras, cruces viales, intersecciones, glorietas o la implementación semaforizada de una zona determinada (ver tabla 12.1). Sin embargo, la que más se adapta es SUMO, debido a su énfasis en el modelado y simulación microscópica de tráfico e interacción en tiempo de ejecución desde un *software* externo (Eclipse Foundation, 2021). Aparte de esto, incluye las dinámicas de diferentes modos de transporte, por ejemplo, embarcaciones, trenes, peatones, motocicletas, trenes eléctricos, etc. Incluso permite simular los mapas de las redes de tráfico de ciudades intermedias como lo son Magangué y Sincelejo, las estaciones de carga, los puntos de acopio y sus respectivas ubicaciones en los mapas.

Los modelos microscópicos de tráfico representan el comportamiento individual de los vehículos en un escenario de movilidad urbana. Algunas variables microscópicas son: la velocidad, la aceleración, la longitud, el espacio existente entre vehículos, el avance, entre otras. Estas se aproximan con alto nivel de detalle a un comportamiento real de un sistema de tráfico urbano.

Tabla 12.1. Herramientas de computación

SUMO	Permite hacer una simulación microscópica, macroscópica y mesoscópica de la movilidad urbana; es compatible con Python y es de distribución libre.
STRAW	Permite efectuar la simulación vehicular de mapas de Estados Unidos; igualmente, no permite crear nuevas vías y es de distribución libre.
CityMob	Permite llevar a cabo la simulación y el modelado de accidentes vehiculares; puede cambiar el número de nodos simulados y dañados y es de distribución libre.
VANETMobiSim	Permite la simulación microscópica y macroscópica de redes de tráfico y es de distribución libre.

Fuente: (Cumbal, 2017).

12.1.1. Redes de tráfico

SUMO es un *software* de simulación de tráfico de código abierto y gratuito con el que se pueden modelar sistemas de transporte multimodal (vehículos de carretera, transporte público y peatones). Este permite caracterizar cada calle en relación con su longitud, número de carriles, prioridad en la intersección (señales semafóricas, pares o ceda el paso). Cuenta, asimismo, con una herramienta llamada OSM.Web.Wizard, la cual permite importar (en un archivo .xml) los mapas de las redes de tráfico de todo el planeta desarrollados en Open Street Maps. De igual modo, la herramienta Netedit permite editar algunas características de la red de tráfico como: parámetros de las vías, semaforización, adición y sustracción de vías alternas para diferentes tipos de vehículos, entre otras opciones; de este modo, es posible construir todo un entorno de tráfico urbano en cualquier zona del mundo. Con el uso de SUMO y sus herramientas OSM.Web.Wizard y Netedit se pueden modelar las redes de tráfico de las ciudades intermedias de forma relativamente sencilla.



Figura 12.1. Redes de tráfico de Magangué y Sincelejo modeladas en SUMO

Fuente: elaboración propia.

En la figura 12.1 se muestran las redes de tráfico de las ciudades Magangué y Sincelejo modeladas en SUMO. El mapa detalla las características específicas de las calles, acceso desde otros municipios, la conexión con el río Magdalena y, asimismo, señala las vías principales de cada municipio. De esta forma, se describe un entorno de simulación urbana de tráfico, con el que se puede aproximar la integración de diferentes modos de transporte para la implementación y evaluación de un sistema de transporte multimodal sostenible.

12.1.2. Modos de transporte y estaciones de carga

SUMO posibilita integrar diferentes modos de transporte para la simulación de tráfico y la movilidad urbana. Por medio de la herramienta Netedit, se pueden editar los escenarios de simulación de las ciudades intermedias modelados en SUMO, lo cual posibilita modificar las características de las vías y modos de transporte. El objetivo del sistema multimodal consiste en integrar los modos de transporte (motocicletas híbridas y embarcaciones electro-solares), pero, también pueden integrarse a este entorno otros modos como buses, trenes, bicicletas, etc.

Los puntos de acopio o de encuentro para los vehículos eléctricos y las estaciones de carga son modelados como parqueaderos en SUMO, en el cual la librería TraCI (Traffic Control Interface) permite compartir información y correr comandos desde Python (modificar rutas, extraer información de los vehículos, etc.) en tiempo de ejecución. Así, los vehículos permanecen en los centros de acopio a la espera de una petición del servicio de transporte entre un origen y un destino. Las motocicletas y las embarcaciones consumen la energía de sus baterías durante los trayectos y deberán ser recargadas en las estaciones de carga; la tasa de carga de las baterías en las estaciones dependerá del tipo de conector en el punto y de la batería del vehículo. Las estaciones de carga y los puntos de acopio están modelados y ubicados a lo largo de las redes de tráfico de las ciudades de Magangué y Sincelejo, mientras que las de las embarcaciones se encuentran en las instancias del río Magdalena, donde se realiza el trayecto Magangué – Pinillos. Para las embarcaciones, al igual que en el caso de las motocicletas, son representadas en SUMO como parqueaderos. Dentro de la simulación, es posible variar parámetros como el ancho y el caudal del río. Respecto a las embarcaciones, se pueden caracterizar variables como el peso, cantidad de pasajeros, capacidad de carga eléctrica, etc. Igualmente, se puede coordinar la entrada, la salida de las embarcaciones y la cantidad de energía que se les puede suministrar por hora en las estaciones de carga.

12.2. Estrategias de localización de estaciones de carga

Para localizar la infraestructura de las estaciones de carga de un sistema multimodal de transporte, se requiere entender el modo de transporte para el que se diseña y el contexto de este en la región. En esta sección se describen los resultados relacionados con el diseño de la infraestructura necesaria para una operación de motocicletas híbridas y las embarcaciones electro-solares.

12.2.1. Caso de estudio: motocicletas híbridas

El objetivo es decidir dónde localizar las estaciones de carga y la capacidad de cada una, en términos del número de puntos y de paneles solares. Estas decisiones se toman de modo que se minimice el costo total, descrito como la suma del costo de inversión más el costo anualizado de la energía que se debe comprar a la red. Entre las restricciones está la cantidad de cargadores que se pueden asignar a cada estación y la cantidad de energía a comprar de la red durante cada momento del día. Pero, hay restricciones al asignar un punto de concentración que no pueda atender la demanda; verificar que se atienda el número mínimo de motos relacionado con el nivel de servicio; y que se limita el área de paneles solares que se pueden instalar. Además, se debe respetar la capacidad de atención de cada estación en relación con la cantidad de cargadores que posee.

La formulación lineal entera mixta (MILP) fue implementada en Python utilizando la herramienta PuLP, con la que se resolvieron problemas en los escenarios de las ciudades estudiadas. En los resultados obtenidos para el escenario de Magangué, se instalaron cuatro estaciones de carga, cada una de las cuales tiene nueve o diez puntos de carga y 22 paneles solares. El costo total de esta solución es de 80.397,89 USD. De manera análoga, para Sincelejo, se instalaron cuatro estaciones de carga, las cuales cuentan con la misma capacidad de las estaciones de Magangué. El costo de esta solución es de 81.658 USD, lo cual es levemente superior al del otro escenario, debido a la diferencia en la cantidad de energía comprada de la red. Los resultados muestran que no es necesario instalar estaciones en todos los puntos candidatos para las demandas dadas y que la inversión en sistemas solares fotovoltaicos es favorable económicamente.

12.2.2. Caso de estudio: embarcación electro-solar

Vélez y Montoya (2012) hacen un análisis similar al caso de estudio de las motocicletas en el municipio de Magangué, pero para barcos eléctricos (EBS, por sus siglas en inglés). En el problema se toman decisiones sobre la capacidad de la batería, la infraestructura de carga a instalar y la programación de cada viaje de ida y vuelta, denominado el problema de diseño de una operación de transporte fluvial con un barco eléctrico. El objetivo que plantean es minimizar el costo de inversión en la operación y el de la energía a comprar a la red durante un periodo de tiempo; para dar solución a este problema de optimización, los autores proponen un algoritmo de ramificación y poda de dos etapas, basado en simulación. El método resuelve un escenario base en tiempos de cálculo razonables para un problema estratégico. Adicionalmente, cada solución candidata que supera todas las reglas de poda se evalúa mediante una simulación Monte Carlo durante un número determinado de años. Esta aborda la factibilidad de la solución y estima el costo de la energía que se compraría a la red. Los resultados muestran que el uso de las estaciones de carga fotovoltaicas ayuda a reducir el costo de la operación. Esto se debe a que, aunque el 83,04 % de la inversión total se destinó a las estaciones de carga fotovoltaicas, la cantidad de energía de la red que estas ahorran compensa su costo. Igualmente, se instaló una estación de carga fotovoltaica en cada uno de los nodos candidatos como respuesta a la limitada densidad energética de la batería del EB.

12.3. Evaluaciones experimentales de los modelos

En esta sección se presentan las aplicaciones de los modelos energéticos representativos de la motocicleta híbrida y la embarcación electro-solar descritos en el capítulo 5.

12.3.1. Caso de estudio: motocicletas híbridas

Con el fin de validar el modelo energético de la motocicleta en la ciudad de Magangué, se tomaron los parámetros que se observan en la tabla 12.2 y se relacionaron con los datos de ubicación, velocidad y altura de rutas interurbanas típicas del centro de Magangué. La información de las rutas fue recogida durante la visita a la región. El recorrido seleccionado para generar información de consumo comprende un viaje en mototaxi desde el Éxito de Magangué hasta la Parroquia San Alberto Magno, en la zona norte de la ciudad. El recorrido de esta ruta se observa en la figura 12.2, que se obtiene por la superposición de los puntos de GPS sobre el mapa de la plataforma de Google Maps y complementado con información estadística obtenida del *software* Matlab®.

El recorrido completo, que muestra las velocidades y las pendientes del terreno, así como el consumo de potencia eléctrico suponiendo una eficiencia en el motor del 75 %, se muestra en la figura 12.2. La aproximación al conteo de energía estimado de la motocicleta se realizó a través de un algoritmo de integración numérica basado en el método trapezoidal, porque el periodo de muestreo fue de alrededor de cinco segundos. Esto induce a errores de precisión al modelo, que serán corregidos al mejorar el método de recolección de datos de GPS.

Tabla 12.2. Resultados de simulación de ruta Éxito de Magangué – Parroquia San Alberto Magno

Ítem	Valor
Distancia Recorrido (km)	1,58
Velocidad máxima (km/h)	50
Mayor pendiente registrada (%)	30,1
Pico de Potencia (kW)	11,07
Energía mecánica consumida (kWh)	174,82

Fuente: elaboración propia.

A partir del procedimiento expuesto, se analizó la información de otros recorridos obtenidos en la visita de 2018 a la ciudad de Magangué, Bolívar. Esta fue obtenida a partir de recorridos solicitados a mototaxistas, partiendo desde puntos de interés de la ciudad (como iglesias, hospitales, terminales de transporte y fluvial, etc.). La captura de información se hizo a través de aplicaciones de rastreo móvil, como GPSTracker.

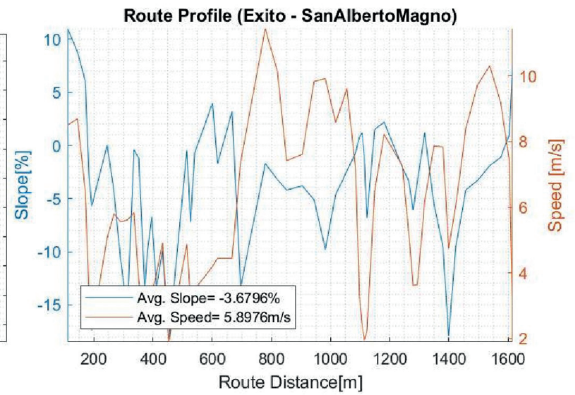
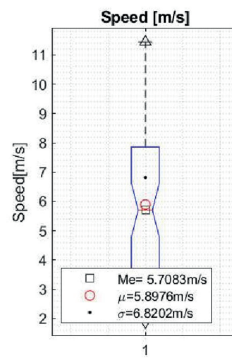
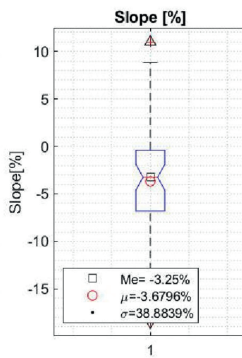
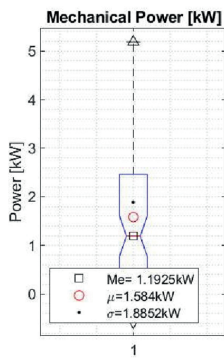
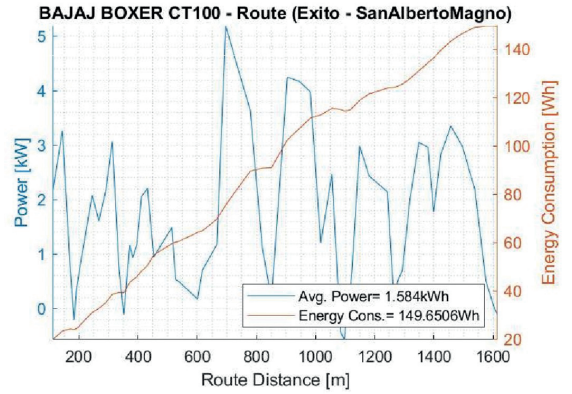
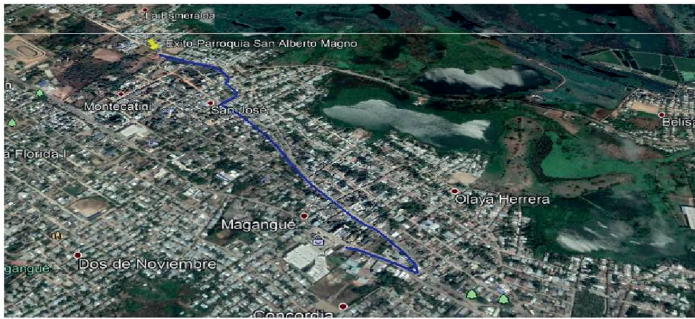


Figura 12.2. Prueba de ruta Éxito Magangué - Capilla San Alberto Magno, Auteco Boxer CT100

Fuente: elaboración propia.

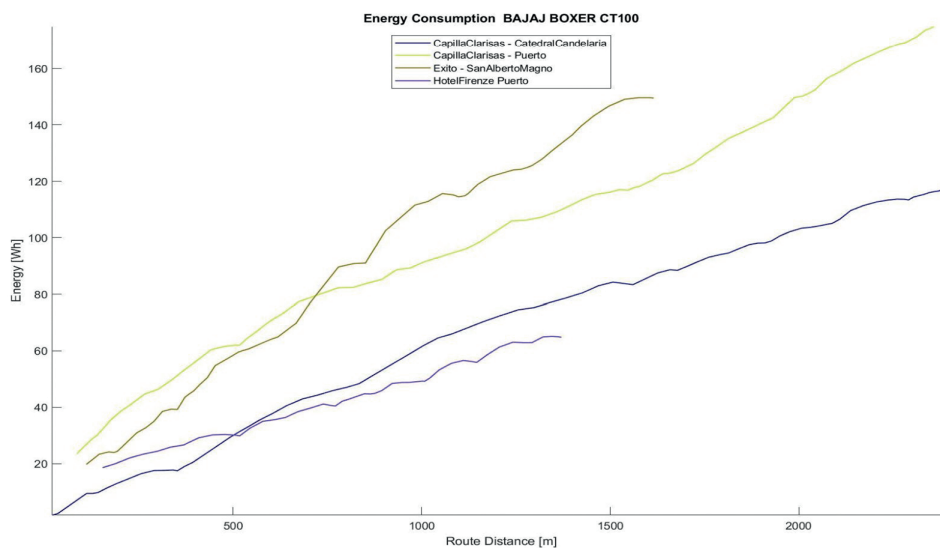


Figura 12.3. Tendencia de consumo energético en pruebas de ruta, Magangué 2018

Fuente: elaboración propia.

De la primera visita a Magangué en 2018, se obtuvieron catorce mediciones de ruta. Luego del postprocesamiento, se encontraron errores de muestreo significativos en al menos diez de las muestras, por lo que se desecharon y se recuperaron las cuatro mediciones restantes. Para cada conjunto de datos, se realizó el cálculo de la potencia consumida por la motocicleta, a partir de la ecuación de consumo energético en la motocicleta en el *software* de cálculo Matlab®. Como resultado, cada una de las rutas estudiadas se presenta como se muestra en la figura 12.3.

Con el fin de encontrar las condiciones promedio sobre las que se puede generalizar el modelo para un recorrido en Magangué, se parte de la hipótesis de que los recorridos entre sí no presentan diferencias significativas de pendiente o de velocidad. Como primera medida, y para determinar si las varianzas de las rutas son homogéneas, se comprobaron los supuestos de normalidad de los datos a través de procedimientos estadísticos inferenciales. Aplicando una prueba de homogeneidad, menos sensible a la distribución de la población (Levene), se encuentra que las varianzas en las velocidades de las pruebas de ruta son iguales, con un valor- $P=0,62$. En cambio, las varianzas en las pendientes son distintas (Valor- $P=0$ en el estadístico de Levene).

Respecto a las tendencias de consumo energético para las rutas, se encontraron dos de entre 50 y 100 Wh/km (ver figura 12.3), teniendo en cuenta que existen dos variaciones significativas en el consumo. Debido a la variabilidad de las pendientes de la ruta, se espera hacer una clasificación con el fin de determinar el valor promedio más aproximado de consumo energético.

12.3.2. Caso de estudio: embarcación electro-solar

En este apartado se describe el caso de estudio de la embarcación y se discuten los resultados del modelo energético propuesto, teniendo en cuenta la resistencia en el agua, la potencia del motor instalada y las posibles rutas.

13.3.2.1. Estimación de la resistencia y potencia de la embarcación

Las estimaciones de la resistencia en el agua y la potencia necesaria de la embarcación están basadas en datos y se realizaron con Maxsurf® y funciones específicas de Matlab® y Excel®. Como se puede ver en la figura 12.4, los resultados de los diferentes métodos implementados son variables; sin embargo, se puede detectar una tendencia y, en el rango de una velocidad de alrededor de 10 nudos, las diferencias son aceptables.

Con los datos de resistencia de la embarcación, se calcula la potencia del motor instalada necesaria para su funcionamiento. La figura 12.5 muestra la potencia del motor a diferentes niveles de velocidad, con el uso de métodos de Savitsky, Slender, Holtrop, etc. Entre los nudos 5 y 7,5, los métodos convergen con una misma tendencia; a excepción del método de Van Oortmerssen, que tiende a divergir a partir de los 7,5 nudos.

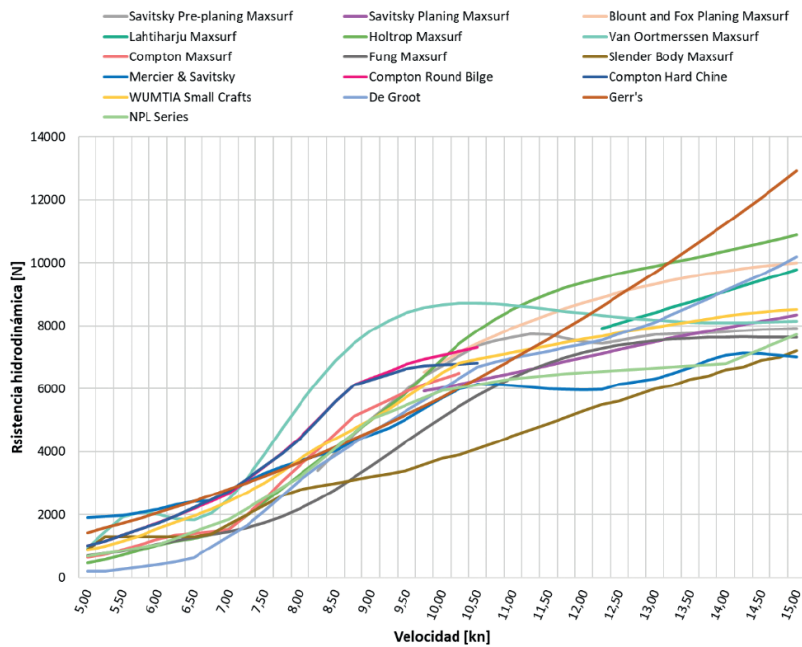


Figura 12.4. Resistencia del barco ejemplo a diferentes velocidades, calculado con diferentes métodos de predicción

Fuente: elaboración propia.

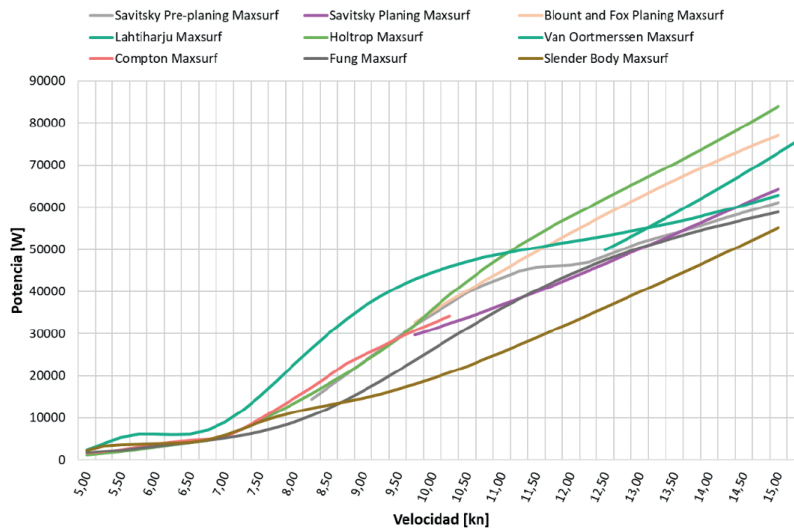


Figura 12.5. Potencia del barco ejemplo a diferentes velocidades, calculado con diferentes métodos de predicción

Fuente: elaboración propia.

13.3.2.2. Cálculo de rutas

En esta sección se consideró una ruta fluvial entre Magangué y Pinillos, aunque, por motivos de tiempo, no se tuvieron en cuenta paradas a lo largo del trayecto. El viaje tuvo lugar el 31 de julio de 2018 y comenzó a las 9:30 a.m. Generalmente, las rutas se calculan con diferentes entradas de datos de potencia (método Holtrop, Fung y Slender Body), que representan los datos de alta potencia a baja potencia. Dentro de las características de la embarcación, la densidad gravimétrica específica de la batería se supone de 220 Wh/kg, el área fotovoltaica, 22m², y el módulo fotovoltaico “SunPower SPR-X21-255”, suponiendo el *trim* del bote en 10 grados. Se parte de que la velocidad del flujo del río es de 2 nudos, que son aproximadamente 3,7 km/h. En este modelo, la velocidad del flujo del río se suma o resta de la velocidad del bote, dependiendo de que este se esté conduciendo contra o en la dirección del flujo. Los cálculos se realizaron a tres velocidades sobre el nivel del suelo: 8, 10 y 12 nudos. Se debe tener en cuenta que el cálculo de la ruta Magangué-Mompóx-El Banco tuvo que dividirse en dos partes a medida que la dirección del flujo del río cambia de río abajo a río arriba al ingresar al Brazo de Mompox.

Se encontró un consumo de energía significativo por las largas distancias de estas rutas, lo que implica una capacidad de batería muy alta y, por lo tanto, un gran peso de la batería. Asimismo, el tiempo de viaje es muy alto debido a la baja velocidad, lo que podría hacer que la embarcación no sea aceptada por la población. El tiempo total de viaje de la ruta Magangué-Mompóx-El Banco es de más de 9 horas, aunque en el cálculo no se consideraron paradas en las ciudades a lo largo del río. Además, implementar una capacidad de batería necesaria de más de dos toneladas conduciría a serias dificultades en el diseño de la embarcación y a un alto costo.

13.3.2.3. Propuesta de ruta

Operar las rutas mencionadas tomaría mucho tiempo y requeriría un alto peso de la batería. Por lo tanto, la ruta Pinillos-Magangué y Magangué-Pinillos se presentará en esta sección con paradas en ciudades a lo largo del camino. La figura 12.6 muestra la ruta en una vista de satélite y enumera las ciudades a lo largo del trayecto abordado.

En este caso, es necesario cargar 95,1 kWh. Si se utiliza el nivel 2 de DC (90 kW de potencia de carga), la carga duraría al menos 1 hora y 4 minutos. Dado que el último 20 % de la batería se carga más lentamente, el tiempo de carga durará 1,5 horas aproximadamente, en el cual los módulos fotovoltaicos de la embarcación generan 1,66 kWh de energía. A las 11:46 a.m., se supone que el barco está completamente cargado (200kWh) para el camino de regreso a Pinillos. En este cálculo, la ruta de Magangué de regreso a Pinillos se opera a una velocidad sobre el suelo de 10 nudos, lo que conduce a una velocidad de 12 nudos a través del agua por la dirección opuesta al flujo del río. Por lo tanto, la potencia del motor requerida será mayor y el requerimiento de energía también. El peso mínimo de la batería de la embarcación es de 853,5 kg. El consumo de energía en la ruta Magangué a Pinillos, incluida la energía solar generada es de 187,8 kWh, la energía solar generada es de 11,3 kWh. La potencia del motor y la potencia mínima instalada de la embarcación es de 57,9 kW. El viaje de regreso a Pinillos dura 3:51 horas y el flujo del río dura más que el viaje a Magangué, que dura 3:16 horas. El resto del día y la noche es tiempo suficiente para recargar el bote. Para este proceso de carga, una conexión DC de nivel 1 sería suficiente.



Figura 12.6.
Vista satélite con los pueblos a lo largo de la ruta Magangué – Pinillos

Fuente: elaboración propia.

12.4. Gestión del sistema de transporte multimodal

En esta sección se aborda el problema de la gestión de transporte y la asignación de puntos de carga para vehículos híbridos o eléctricos que realizan una petición a la estación de carga. Esto, por medio de una formulación lineal entera mixta (MILP) al tratar variables reales y binarias.

12.4.1. Gestión del transporte

Se entiende que n es la cantidad de vehículos del sistema de transporte; v es un vector de variables binarias de dimensión n que representa el índice de cada vehículo considerado en el sistema multimodal de transporte; m es la cantidad de puntos de carga del sistema de transporte; p es un vector de variables binarias de dimensión m que representa el índice de cada punto de carga considerado en el sistema multimodal de transporte; y la variable d es un vector perteneciente al conjunto binario $d \in [0, 1]$ de tamaño n , que representa la demanda de peticiones realizadas por los vehículos v a las estaciones de carga para la asignación de los puntos de carga. Entonces, una entrada $d_j = 0$ representa que el vehículo v_j no ha realizado solicitud o petición de carga a la estación; por el contrario, una entrada $d_j = 1$ simboliza que el vehículo v_j está realizando un solicitud o petición de carga a la estación donde $j \in n$.

$$V = [V_1, V_2, \dots, V_n] \tag{2.1}$$

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_n] \tag{2.2}$$

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_n] \tag{2.3}$$

La variable C_p tiene entradas binarias ($p_k^{vj} \in [0, 1]$) de tamaño $n \times m$, la cual indica en qué punto de carga p_k se deben encontrar los vehículos v_j , donde $k \in m$. Una entrada $p_k^{vj}=0$ representa que el vehículo v_j no se encuentra en el punto de carga p_k ; por el contrario, una entrada $p_k^{vj}=1$ representa que el vehículo v_j se encuentra en el punto de carga p_k para su respectiva carga. La variable S tiene entradas binarias ($S_j \in [0, 1]$) de tamaño n , que representa las colas o congestiones por fuera de los puntos de carga; en otras palabras, son los vehículos que no se han asignado a un punto de carga, pero han realizado una petición de carga. Una entrada $S_j = 0$ representa que el vehículo v_j ha realizado una solicitud o petición de carga y se le ha asignado un punto de carga; a su vez, una entrada $S_j = 1$ representa que el vehículo v_j ha realizado una solicitud o petición de carga, pero no se le ha asignado un punto de carga. La variable K tiene entradas binarias ($K_{k,j} \in [0, 1]$) de tamaño $n \times m$ y permite verificar que los vehículos v_j estén en su respectivo punto de carga p_k . Una entrada $K_{k,j}=0$ verifica que el vehículo v_j no se encuentra en la estación p_k ; por el contrario, una entrada $K_{k,j} = 1$ representa que el vehículo v_j se encuentra en la estación p_k .

$$C_p = [p_1^{v1}, \dots, p_1^{vn}, p_2^{v1}, \dots, p_2^{vn}, \dots, p_m^{v1}, \dots, p_m^{vn}] \tag{2.4}$$

$$S = [S_1, S_2, \dots, S_n] \tag{2.5}$$

$$K = [K_{1,1}, \dots, K_{1,n}, K_{2,1}, \dots, K_{2,n}, K_{m,1}, \dots, K_{m,n}] \tag{2.6}$$

La optimización MILP considera la minimización de la sumatoria de las entradas del vector S como función de costo. Esto minimiza la cola de espera en los puntos de carga bajo la variable de decisión C_p que modifica la ubicación de los vehículos en sus respectivos puntos de carga, como se describe en la ecuación 2.7; todo esto está sujeto a las siguientes restricciones.

La restricción 2.8 depende de la matriz A_1 de tamaño $[n \times m]$, donde $A_{1 \times m} \in [0, 1]$; esta favorece la asignación de valores para definir la ubicación y la recepción de peticiones realizadas por los usuarios. Esta restricción permite asignar vehículos a los puntos de carga dispuestos en el sistema multimodal; sin embargo, existe la posibilidad de que a dos vehículos se le asignen un mismo punto de carga, lo cual no puede ser posible. Por lo tanto, se define la segunda restricción 2.9, que depende del vector $\vec{1}$ donde todas sus entradas son iguales a 1, con dimensión m y la matriz A_2 de tamaño $[m \times m]$ donde $A_{2 \times m} \in [0, 1]$. El producto de esta matriz con C_p favorece la asignación de valores, para que solo se le pueda asignar a un vehículo un solo punto de carga; de esta forma, se evita que dos vehículos hagan uso de un mismo punto de carga. La restricción 2.10 depende de la matriz A_3 de tamaño $[m \times m]$ y de K , donde $A_{3 \times m}, K \in [0, 1]$; esta restricción verifica que un vehículo esté en el punto de carga asignado y que no pertenezca a dos puntos de carga diferentes.

$$\min_{C_p} \sum_{j=1}^n S_j \quad (2.7)$$

Sujeto a:

$$A_1 C_p + S = d \quad (2.8)$$

$$A_2 C_p \leq \bar{1} \quad (2.9)$$

$$A_3 C_p = K \quad (2.10)$$

12.4.2. Resultados

Para los resultados se contempla un escenario distribuido de la siguiente forma. En primera instancia, como ejemplo, se consideran tres vehículos, con un estado de carga porcentual del 82, 90 y 13 %, respectivamente. También, dos puntos de carga, que lo hacen a una tasa de una unidad de energía por cada 10 segundos. A su vez, asumiendo que cada vehículo no se encuentra al 100 % de la carga, las entradas del vector d de peticiones serán iguales a 1, lo que significa que los tres vehículos están realizando peticiones de carga de forma simultánea.

Entonces, para la primera iteración en el tiempo $t = 0$, el vehículo V_1 tiene un estado de carga C_h actual del 82 % y está haciendo una petición; se le asigna el punto de carga 1; asimismo, dada la tasa de carga, se calcula el tiempo estimado de carga t_c igual a 180 segundos, para llegar al 100 % de carga, y se calcula el tiempo inicial de carga t_{inicio} de 0 segundos y el tiempo final de carga t_{fin} de 180 segundos. Por otra parte, el vehículo V_2 se encuentra con un $C_h = 90$ %, está realizando una petición y se le asigna el punto de carga 2; tiene un $t_c = 90$ s, $t_{inicio} = 0$ s y $t_{fin} = 90$ s. Finalmente, el vehículo V_3 también está realizando la petición de carga; dado que no hay más puntos de carga disponibles, este se encuentra en cola o en espera a que V_1 o V_2 terminen su proceso de carga. En esta instancia, dado que V_3 tiene un $C_h = 13$ %, se calculan los tiempos de carga, $t_c = 870$ s, $t_{inicio} = 90$ s y $t_{fin} = 960$ s (ver tabla 12.3).

Tabla 12.3. Resultados para $t = 0$ segundos

Estación de carga (t=0 s)					
Vehículo	Información	Punto de carga 1	Punto de carga 2	En cola	Petición
V_1	$C_h = 82$ % $t_c = 180$ s $t_{inicio} = 0$ s $t_{fin} = 180$ s	x	-	-	x
V_2	$C_h = 90$ % $t_c = 90$ s $t_{inicio} = 0$ s $t_{fin} = 90$ s	-	x	-	x
V_3	$C_h = 13$ % $t_c = 870$ s $t_{inicio} = 90$ s $t_{fin} = 960$ s	-	-	x	x

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12.4. Resultados para $t = 90$ segundo

Estación de carga (t=90 s)					
Vehículo	Información	Punto de carga 1	Punto de carga 2	En cola	Petición
V_1	$C_h = 91 \%$ $t_c = 180 \text{ s}$ $t_{inicio} = 0 \text{ s}$ $t_{fin} = 180 \text{ s}$	x	-	-	x
V_2	$C_h = 100 \%$ $t_c = 90 \text{ s}$ $t_{inicio} = 0 \text{ s}$ $t_{fin} = 90 \text{ s}$	-	-	-	-
V_3	$C_h = 13 \%$ $t_c = 870 \text{ s}$ $t_{inicio} = 90 \text{ s}$ $t_{fin} = 960 \text{ s}$	-	x	-	x

Fuente: elaboración propia.

Tabla 12.5. Resultados para $t = 180$ segundos

Estación de carga (t=180 s)					
Vehículo	Información	Punto de carga 1	Punto de carga 2	En cola	Petición
V_1	$C_h = 100 \%$ $t_c = 180 \text{ s}$ $t_{inicio} = 0 \text{ s}$ $t_{fin} = 180 \text{ s}$	-	-	-	-
V_2	$C_h = 100 \%$ $t_c = 90 \text{ s}$ $t_{inicio} = 0 \text{ s}$ $t_{fin} = 90 \text{ s}$	-	-	-	-
V_3	$C_h = 22 \%$ $t_c = 870 \text{ s}$ $t_{inicio} = 90 \text{ s}$ $t_{fin} = 960 \text{ s}$	-	x	-	x

Fuente: elaboración propia.

Cabe aclarar que V_2 termina de cargar mucho más rápido que V_1 y, por ello, el punto de carga 2 estará disponible en $t = 90 \text{ s}$. Lo esperado sería que este punto de carga sea asignado a los vehículos en cola o en espera, en este caso V_3 . Al transcurrir 90 segundos, tiempo mínimo que tardó el vehículo V_2 en cargar, el punto 2 es desocupado es asignado a V_3 , como lo muestra la tabla 12.4. En ese instante, V_1 tiene $C_h = 91 \%$, V_2 tiene $C_h = 100 \%$ y V_3 se dispone a pasar del estado de espera o en cola a un estado de carga, lo cual tardará 870 segundos para llegar a su máximo estado de carga.

La tabla 12.5, muestra como en $t = 180 \text{ s}$, V_1 alcanza su estado de carga máximo desocupando el punto de carga 1. En este punto, V_1 y V_2 ya se encuentran con un $C_h = 100 \%$ y en vista que V_3 comenzó el proceso de carga a los 90 segundos y a que han transcurrido 180, ya han pasado 90 segundos. Esto corresponde a nueve unidades de

energía, teniendo en cuenta la tasa de carga mencionada, V_3 pasa de tener un $C_h = 13\%$ a tener un $C_h = 22\%$.

Finalmente, al transcurrir $t = 960$ s, V_3 termina su proceso de carga, su máximo $C_h = 100\%$. De esta manera, en la estación, los puntos de carga están disponibles para prestar el servicio de carga a nuevos vehículos de forma ordenada, minimizando la cola de espera.

En síntesis, en este capítulo se describió un sistema de transporte multimodal sostenible; este comprende motocicletas híbridas, embarcaciones electro-solares y estaciones de carga fotovoltaicas, el cual permite ser validado por medio de modelos microscópicos con ayuda de simulación de movilidad urbana. El sistema de gestión de transporte, también, es abordado por medio de la asignación de puntos de carga a vehículos híbridos o eléctricos y la minimización de las colas de espera en la estación de carga. Este breve ejemplo puede dar idea de cómo puede operar la gestión del transporte, considerando un mayor número de vehículos y un mínimo número de puntos de carga disponibles. Al integrar variables binarias como variables de decisión, se consideró el método de solución lineal entero mixto para resolver el problema de optimización. Los resultados muestran que el MILP permite la toma de decisiones de manera óptima, asignando de forma ordenada puntos de carga a los vehículos que realicen una petición. Cabe resaltar que en este desarrollo se adquieren las distancias desde SUMO entre los vehículos y las estaciones de carga, en el cual se selecciona la mínima distancia o la estación más cercana para optimizar los tiempos. El hecho de realizar la simulación y la planeación de estaciones de carga se tiene control sobre el comportamiento y la operación de un sistema de transporte multimodal; sin embargo, existen factores exógenos que limitan o facilitan la adopción de estas tecnologías, como lo son el contexto de la política y la legislación del transporte. A continuación, en el último apartado, se presenta el contexto de la política y la legislación alrededor del transporte sostenible.

12.5. Referencias

- Eclipse Foundation. *About Eclipse SUMO*. <https://www.eclipse.org/sumo/about>
- Cumbal, J. (2017). Análisis del desempeño de una VANET mediante el uso de protocolos de enrutamiento y la ubicación óptima de la infraestructura RSU para alcanzar un throughput eficiente en escenarios urbanos. [Tesis de maestría, Escuela Politécnica Nacional]. Repositorio digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/17207/1/CD-7715.pdf>
- Vélez, C. y Montoya, A. (2021). *Optimization problems for a fluvial transport operation with an electric boat and photovoltaic charging stations*. [Tesis de maestría, Universidad EAFIT]. <http://hdl.handle.net/10784/30249>

Contexto de la política y la legislación alrededor del transporte sostenible

**Ricardo Mejía Gutiérrez¹, Gilberto Osorio Gómez¹,
Esteban Betancur Valencia¹, Manuela Montoya
Rivera¹, Felipe Gutiérrez Morales¹**

Resumen: el presente capítulo hace un recorrido por el marco legislativo y regulatorio sobre el cual se fundamentarán las diferentes acciones alrededor del mercado de la movilidad sostenible. Aun cuando en Colombia se ha dado una alta inserción de vehículos eléctricos y, además, existe un buen contexto jurídico y legislativo, todavía existen oportunidades para mejorar. En otros países hay mayores incentivos y apoyos para la movilidad eléctrica, pero es importante hacer primero un diagnóstico del estado actual, en este caso para Colombia, que es donde se desarrollaron varios de los casos analizados en este libro.

Palabras clave: electromovilidad; normativa colombiana; vehículos eléctricos; transición energética.

13.1. Crecimiento de la electromovilidad

La necesidad de energías alternativas, para la reducción del consumo de energías no renovables, es un tema de prioridad a nivel mundial. Tanto así que es uno de los 17 objetivos de desarrollo sostenible adoptado por la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en su numeral siete señala: ampliar la infraestructura y mejorar la tecnología para prestar servicios de energía modernos y sostenibles para todos en los países en desarrollo, en particular los países menos adelantados, los pequeños estados insulares

¹ Design Engineering Research Group (GRID), Universidad EAFIT, carrera 49 n.º 7 sur- 50, Medellín, Colombia. Correo electrónico: rmejiag@eafit.edu.co; gosoriog@eafit.edu.co; ebetanc2@eafit.edu.co; mmontoyar2@eafit.edu.co; fgutie10@eafit.edu.co

en desarrollo y los países en desarrollo sin litoral, en consonancia con sus respectivos programas de apoyo (Naciones Unidas, 2016).

Es importante considerar que la movilidad de personas y carga representa el 19 % del consumo mundial de energía final. Asimismo, desde 2013, este sector ha aumentado el consumo de petróleo en un 97 % (Kreuzer y Wilmsmeier, 2014). Estos aspectos la convierten en una industria estratégica para enfocar la transición energética, la cual se ha orientado, de manera general, al desarrollo de vehículos terrestres. No obstante, en los últimos años, en regiones como América Latina y el Caribe, se ha puesto el foco a la movilidad fluvial, ya que en esta zona los lagos y ríos forman vías naturales únicas de comunicación y que pueden integrarse a todo el circuito de movilidad. Además, dentro del sector de transporte, la movilidad fluvial es destacada como el modo de transporte más amigable con el desarrollo sostenible, por factores como: seguridad, flexibilidad, previsibilidad, menores costos económicos, mayor eficiencia energética, buen desempeño ambiental (ruido y emisiones) y menores costos de inversión (Jaimurzina y Wilmsmeier, 2017).

El aumento de vehículos registrados hasta 2010 fue ondulatoria, tanto en automóviles como en motocicletas, con crecimientos de 44 y 36 %, respectivamente. A partir del 2015, el registro de ambos tipos de vehículos presentó un decrecimiento sostenido hasta 2020, año en que se llegó al mínimo conocido, debido a las condiciones impuestas por la pandemia de la covid-19 (Mintransporte, 2021). De acuerdo con el balance realizado por Mintransporte, para diciembre de 2021, se contaba un total de 17 millones de vehículos en el Registro Único Nacional de Tránsito (RUNT), repartidos así: 60 % motocicletas, 39 % vehículos (automóviles, camionetas, camiones, buses, busetas y volquetas) y 1 % maquinaria y remolques. Cabe resaltar que en 2021 se registraron más de 990.000 matrículas; de estas un 73 % eran motocicletas.

Al estudiar el parque automotor en Colombia, es evidente la predominancia del uso de combustibles provenientes del petróleo: nueve de cada diez vehículos usan gasolina, cinco de cada cien operan con diésel/biodiésel, y uno de cada cien son híbridos. Los vehículos eléctricos, por su parte, apenas representan el 0,08 % del total actual en el país. Entre 2010 y 2013, no se presentó un aumento significativo en matrículas de estos vehículos (incluyendo los vehículos híbridos), con menos de 50 al año. Sin embargo, desde fines del 2013, se ha dado un cambio en esta tendencia, gracias a la entrada en vigor de un conjunto de medidas gubernamentales que fomentaron la entrada de este tipo de tecnologías aplicadas a movilidad y que además buscan favorecer a sus usuarios.

Este crecimiento se evidencia en las ventas registradas para el 2021 (ANDI, 2022). En automóviles se registraron 16.366 unidades de vehículos híbridos y 1329 unidades de vehículos eléctricos, para un total de 17.695 registrados. Respecto a los registros de 2017, esto representa un incremento considerable con 198 unidades; 2018 con 929; 2019 con 2209; y 2020 con 4697 unidades. Estos vehículos se distribuyen, principalmente, en utilitarios y automóviles con un 66 y 31 %, respectivamente; Toyota, Suzuki, Ford, Kia y Mercedes Benz son las cinco marcas con mayor número de matrículas en 2021, con una participación en el mercado de 39,3, 13,1, 9, 8,1 y 7,9 %, respectivamente (el 77,3 % del total en el 2021). En los últimos cinco años, el acumulado anual de vehículos eléctricos e híbridos ha estado focalizado en las áreas metropolitanas de Medellín y Bogotá, con un aporte en conjunto de más del 50 % desde 2017. En cuanto a motocicletas, se define una motocicleta o scúter eléctrica al vehículo automotor de dos ruedas en línea, cuya

fuelle de propulsión es un motor eléctrico de potencia nominal superior a 4 kW. El registro de este tipo de vehículos ha presentado, igualmente, un incremento: en 2021 se matricularon 2683 motos eléctricas, número mayor en un 24 % que 2020. Sin embargo, la acogida de este tipo de vehículos no es comparable a la de los automóviles, considerando la participación de las motocicletas en el parque automotor. Variaciones como los ciclomotores, que tienen un motor eléctrico menor a 4 kW, y los cuadriciclos, tienen mayor participación en el sector eléctrico que las motocicletas (RUNT, 2021).

Por su parte, la movilidad fluvial representa menos del 1 % de la totalidad de los modos de transporte en el país. No obstante, su importancia ha venido aumentando en los últimos años, teniendo en cuenta la cantidad de kilómetros navegables en Latinoamérica y el subuso que se le da, tanto para movilizar pasajeros como carga. Por ejemplo, en Colombia solo se utilizan 18.525 km de 24.274 km disponibles (Jaimurzina y Wilmsmeier, 2017), que movilizan anualmente 1.597.222 pasajeros y hasta 2.448.000 toneladas, solamente en el río Magdalena (Mintransporte, 2021). El mercado de embarcaciones eléctricas en 2021 alcanzó los 5000 millones de dólares, con una tasa de crecimiento anual estimada alrededor del 12 %, pero se centra en las embarcaciones de lujo y en asuntos turísticos (Barbieri, 2022); por ello no es posible hablar de cifras concretas alrededor de la movilidad fluvial con vehículos eléctricos, ya que esta se encuentra en etapa de crecimiento tecnológico. En Suramérica, se han implementado algunas embarcaciones eléctricas para el transporte de pasajeros y actividades turísticas, aunque no ha representado ninguna ventaja, más allá de ser amigables con el medio ambiente, comparativa con la movilidad convencional. Al igual que en el caso de la movilidad terrestre, los principales obstáculos son la infraestructura de carga y el rendimiento de los sistemas almacenadores de energía (Barbieri, 2022).

Respecto a las estaciones de carga, Bogotá y Medellín contaban, para 2019, con 16 y 5 estaciones de carga, respectivamente, que integraban 39 tipos de conectores diferentes en las primeras y solo 19 en las segundas. Para 2030, se proyecta que los vehículos eléctricos de la capital colombiana superen los 270.000, por lo cual el Distrito debe contar con más de 239 cargadores públicos y 250.000 puntos de carga privada (UPME, 2019). Para comparar, en América Latina sólo hay una red de 1292 cargadores públicos, mientras que China, para el 2020, tenía más de 800.000 cargadores públicos y Estados Unidos alrededor de 16.700 (Guarino, 2022). Algunos países latinoamericanos, como Chile y Brasil, desde mediados de 2018, han mantenido un acuerdo con Nissan, con el objetivo de analizar la integración de los vehículos eléctricos a la sociedad, mientras que Argentina lo ha hecho desde el 2019. En México, se lanzó la aplicación de transporte Beat, en alianza con Tesla, que es la primera en desplegar una flota de vehículos eléctricos en la región.

13.2. Análisis de la legislación y el marco normativo

Debido al crecimiento del sector transporte en el país, junto con la necesidad de crear un plan para la transición energética de la movilidad sostenible, el Gobierno colombiano ha dispuesto, en el transcurso de los últimos años, una serie de legislaciones e iniciativas para cimentar las bases de los insumos e infraestructura necesaria, así como su operación.

13.2.1. Política y legislación alrededor de la energía

El acuerdo de París, aprobado por 195 países en diciembre de 2015, representa un marco común para la creación de políticas para combatir el cambio climático. Pese a esto, se aprecian variaciones en cada continente; por ejemplo, en Europa, hay un viraje hacia la energía eólica, mientras que en América Latina se ha optado por la energía solar (FGV Energía, 2021). Para adelantar los esfuerzos hacia la transición energética en Colombia, se expidió la Ley 1844 de 2017 (Congreso de la República, 2015), “por medio de la cual se aprueba el Acuerdo de París”, con el compromiso de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en un 20 % respecto a las proyectadas para 2030. En función de esto, el Gobierno colombiano desarrolló el Plan energético nacional Colombia: Ideario energético 2050 (UPME), la base para la elaboración e implementación de la política energética nacional. Dentro de este plan, se puede evidenciar una división en cuatro enfoques: incentivo y promoción, uso de biocombustibles y, finalmente, la instalación.

Incentivo y promoción

- Consejo Nacional de Política Económica (CONPES) 3918: mediante este documento se definen las metas y estrategias para el cumplimiento de la Agenda 2030, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), así como la declaración de crecimiento verde de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Entre los objetivos se encuentra aumentar la cooperación internacional para facilitar el acceso a recursos científicos y promover las tecnologías relativas a energías limpias que incluyan fuentes renovables, la eficiencia energética y la reducción de gases contaminantes causadas por combustibles fósiles y, por último, generar la inversión en la infraestructura necesaria.
- Ley 1955 de 2019: estipula un marco regulatorio y una política integral para fomentar la transición hacia la movilidad de cero y bajas emisiones. Se incluyen lineamientos como los planes de movilidad sostenible, fuentes de financiación para los Sistemas de Transporte Público, entre otros (Mintransporte, 2019).
- Ley 1964 de 2019: tiene el objetivo de promover el uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones y contribuir, con ello, a la movilidad sostenible y a reducir las emisiones contaminantes. Para ello, un elemento clave son las estaciones de carga rápida, que son sistemas que proveen energía para la carga rápida de vehículos con una potencia de salida superior a 50 kW; y las estaciones de carga lenta, que tienen una potencia de salida entre 7 y 49 kW (Congreso de la República, 2019).

Entre sus directrices, esta Ley estipula: un descuento sobre la revisión técnico-mecánica y de emisiones contaminantes, así como reglamentar los lineamientos para ejecutar dicha evaluación sobre este tipo de vehículos. Además, las compañías aseguradoras establecerán un descuento del 10 % en el seguro obligatorio SOAT. También, promover que las entidades territoriales desarrollen y oferten beneficios y estímulos económicos para incentivar la adopción de la movilidad eléctrica. Asimismo, los vehículos eléctricos están exentos de las medidas de restricción a la circulación como lo son el pico y placa, día sin carro o aquellas por materia ambiental. Se proponen parqueaderos especiales habilitados en las entidades públicas y establecimientos comerciales. Por último, los vehículos que sean comprados o contratados anualmente por prestadores de servicio público deben ser eléctricos, como mínimo un 30 %.

- Decreto 1116 de 2017: establece que los impuestos de importación de vehículos eléctricos son del 0 % y de híbridos, del 5 % hasta 2027. Esto, con el propósito de impulsar la llegada de 52.800 unidades vehiculares que sean de estas dos modalidades, las cuales estarían distribuidas así: 1500 unidades para 2017, 2018 y 2019; 2300 para 2020, 2021 y 2022; y, finalmente, 3000 vehículos entre 2023 y 2027 (Congreso de la República, 2017).
- Resolución 1988 de 2017: establece dos medidas para el sector de transportes: primero, la reconversión a gas natural vehicular (GNV) del transporte público de pasajeros; segundo, el uso de electricidad en flotas del sector oficial, taxis en las principales ciudades del país, al igual que motos, automóviles y transporte público de pasajeros de los principales centros urbanos. Sobre estos se deben enmarcar las solicitudes para optar por la exclusión del IVA y descuento del impuesto sobre la renta (Ministerio de Ambiente, 2017).
- Decreto 2051 de 2019: establece que el impuesto de importación para vehículos a gas natural es del 5 % (Ministerio de Comercio, Industria y Comercio, 2019).
- Resolución 5304 de 2019: aborda la promoción para la modernización de vehículos eléctricos y sus facilidades de registro (Ministerio de Transporte, 2019).

Uso de biocombustibles

- Ley 1083 de 2006: define los planes de movilidad que deben adoptar los municipios, indicando que estos deben priorizar la movilización en modos alternativos de transporte no contaminantes. De igual modo, hace énfasis en los sistemas de transporte público para que funcionen con combustibles limpios (Congreso de la República, 2006).
- Resolución 182087 de 2007: modifica los criterios de calidad de los biocombustibles para uso en motores diésel, además de estipular que, a partir del 2013, este tipo de combustible debe tener un contenido de azufre menor a las 50 ppm (Ministerio de Minas y Energía, 2007).
- Resolución 2604 de 2009: determina las características de los combustibles limpios, considerando el contenido de sus componentes para los vehículos de servicio público. Se consideran combustibles limpios: el hidrógeno, el gas natural (GN), el gas licuado de petróleo (GLP), el diésel hasta de 50 ppm de azufre y sus mezclas con biodiésel, la gasolina hasta de 50 ppm de azufre y sus mezclas de gasolina con alcohol carburante o etanol (Minminas, 2009).
- Resolución 40177 de 2020: define los combustibles utilizados en el sector transporte y clasifica los energéticos de cero y bajas emisiones (Minambiente, 2020).
- Resolución 40178 de 2020: condiciones para el desarrollo del piloto de uso de biocombustibles en vehículos automotores (Minambiente, 2020).

Instalación:

Está regulada por el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE), que se aplica a toda instalación eléctrica nueva, así como a la ampliación y remodelación de instalaciones eléctricas de generación, transmisión, transformación y utilización de la energía eléctrica. Se complementa con la NTC ISO 50001 que, a su vez, estará en actualización constante de acuerdo con la NTC 2050 (Minminas, 2013).

13.2.2. Sistemas de recarga

En el 2021, el Ministerio de Minas y Energía publicó la Resolución ME 40223 (Minminas, 2021), con la que se establecen las condiciones mínimas de estandarización y mercado para la implementación de la infraestructura de carga para vehículos eléctricos e híbridos enchufables y, asimismo, en la que se mencionan los siguientes aspectos:

- El suministro de energía eléctrica para vehículos eléctricos e híbridos enchufables en estaciones de carga no es un servicio público domiciliario, sino un servicio de carga, el cual no abarca la actividad de comercialización.
- El precio del servicio de carga en estaciones será fijado de manera libre.

En ese mismo año, se publicó la Ley de transformación energética, Ley 2099 de 2021 (Mintransporte, 2021). El artículo 49 establece el incentivo de no pago sobre el consumo de la energía eléctrica destinado a la carga de vehículos o sistemas eléctricos de transporte masivo de pasajeros.

13.2.3. Ciudades inteligentes

El Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones (MinTIC, 2021) plantea la iniciativa para el desarrollo de ciudades y territorios inteligentes a lo largo del territorio nacional por medio de la implementación de la política de Gobierno Digital, que propone el fortalecimiento de las capacidades necesarias para definir las rutas que las entidades territoriales pueden trazar para la transformación digital. Para tal fin, plantea como líneas de acción: el acompañamiento técnico y asesoría consultiva, pues se ha visto un incremento en el interés de recibir asesorías técnicas por parte de esta entidad. Así, se dispone de consultores expertos en temas de ciudades inteligentes para la formulación de iniciativas hacia la transformación digital, todo bajo el marco de la estrategia “2021 Ciudades y Territorios Inteligentes”.

- Modelo de madurez de ciudades y territorios inteligentes: de acuerdo con el artículo 148 de la Ley 1955 de 2019 (Mintransporte, 2019), se da prioridad a la adopción del Modelo de Ciudades y Territorios Inteligentes, lo que permite hacer un diagnóstico inicial de un municipio o departamento con relación a las dimensiones de calidad de vida, hábitat, medio ambiente, desarrollo económico y gobernanza.
- Lineamientos técnicos para ciudades y territorios inteligentes: el artículo 147 de la Ley 1955 de 2019 (Mintransporte, 2019) estipula que las entidades pueden elaborar estrategias de ciudades y territorios inteligentes siguiendo los lineamientos técnicos que estipule el MinTIC. Esta entidad, en conjunto con diferentes líderes del sector, definieron los Acuerdos Marco de Precio (AMP), que incentivan el desarrollo en búsqueda de solventar las necesidades de las ciudades en temas como cámaras de videovigilancia, sistemas fotovoltaicos, imágenes de plataformas satélite y nube pública.

13.3. Operación de sistemas multimodales

13.3.1. Movilidad terrestre

La Ley 769 de 2002 establece el Código Nacional de Tránsito Terrestre, que rige en todo el territorio nacional y regula la circulación de los peatones, usuarios, pasajeros, conductores, motociclistas, ciclistas, agentes de tránsito y vehículos que se mueven por las vías públicas o privadas que están abiertas al público, o en vías privadas en que internamente circulen vehículos. Se consideran diferentes disposiciones como: autoridades de tránsito, cumplimiento del régimen normativo, RUNT, licencias de tránsito y conducción, vehículos y su conducción, ciclistas y motociclistas (Mintransporte, 2002).

Conjuntamente, la Resolución 4775 de 2009 tiene por objeto establecer los requisitos y el procedimiento para el registro de los vehículos no automotores: remolques, semirremolques, multimodular, el registro de la maquinaria agrícola, de construcción e industrial autopropulsada, así como la matrícula de los vehículos automotores y demás trámites asociados con los mismos (Mintransporte, 2009). Es importante considerar esta resolución, ya que contiene algunos lineamientos respecto a la identificación o cambio de registro de diferentes vehículos, si ciertas modificaciones o condiciones se cumplen, entre estas:

1. Para el registro vehicular, se identificará el vehículo con las características de clase, marca, línea, modelo, color, cilindrada, potencia, tipo de carrocería, número de motor, número de chasis, número de serie, VIN y número de puertas.
2. Cambio de características que identifican un vehículo automotor: cualquier modificación a los elementos que identifican un vehículo automotor está sujeta a la autorización previa del Organismo de Tránsito, en el cual esté matriculado el vehículo y a la inscripción en el Registro Nacional Automotor (RNA). La modificación en ningún caso implica cambiar la clase de vehículo, adulterar los números de identificación del motor, chasis o serial de un vehículo automotor, ni retocar o alterar la placa del vehículo, lo que conllevaría a una sanción establecida en el Código Nacional de Tránsito Terrestre. Tampoco es modificable ni cambiabile el chasis, ni su número o serial, el modelo y la marca que identifican el vehículo automotor.
- Cambio de motor: en casos en que el motor no ha sido instalado en otro vehículo automotor, el interesado debe anexar fotocopia de la declaración de importación del motor sustituto en la que se especifique su número de identificación. Si el motor a instalar carece del número de identificación, este se caracterizará mediante un código que consta de los ocho alfanuméricos del número del chasis, tomado de izquierda a derecha a continuación del guion las letras CM, grabado en bajo relieve. Finalmente, se expide otra licencia con el registro del número del nuevo motor.

Contemplando la transición energética desde la movilidad terrestre, la hibridación surge como alternativa potencial, sin embargo, esta requiere modificar y alterar el vehículo, así como su funcionamiento. El Código Nacional de Tránsito en el artículo 49 hace referencia directa a las modificaciones estipulando que cualquier modificación en

las características que identifican un vehículo automotor estará sujeto a la autorización previa por parte de la autoridad de tránsito competente y deberá inscribirse en el RNA: “En ningún caso se podrán cambiar, modificar, ni adulterar los números de identificación del motor, chasis o serie de un vehículo, ni retocar o alterar las placas del vehículo, so pena de incurrir en la sanción prevista en este Código para quien transite sin placas” (Mintransporte, 2002). El artículo define la transformación de un vehículo como el procedimiento físico y mecánico, mediante el cual un vehículo automotor puede ser modificado, con el fin de cumplir una función diferente o mejorar su funcionamiento, higiene o seguridad.

13.3.2. Movilidad fluvial

La normativa alrededor de la movilidad fluvial en Colombia se abordará desde la construcción de las embarcaciones y la operación de estas, puesto que aún no hay reglamentación específica para medios de transporte de esta modalidad de bajas o cero emisiones. El Plan Maestro Fluvial de Colombia, elaborado en conjunto por el Departamento Nacional de Planeación (DNP) y el Ministerio de Transporte, es la herramienta de planeación para el desarrollo del transporte fluvial, en la que se prioriza la recuperación de la navegabilidad en las principales cuencas hidrográficas del país (Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015, 2015). Además, en 2015, el Gobierno nacional estructuró el plan maestro de transporte intermodal como una política de Estado, con vigencia a 2035, orientada a definir medidas que reduzcan los costos generalizados del transporte, asegurar el crecimiento económico y potenciar la participación dentro de las dinámicas globales.

El transporte fluvial en Colombia está regulado por la Ley 1242 de 2008 (Congreso de la República, 2008), que es el Código nacional de navegación y actividades portuarias fluviales; este ha sido modificado con la adición del decreto 2106 de 2019 (Mintransporte, 1999b). Además, es pertinente tener en cuenta otras regulaciones y normativas, que se describen a continuación:

- Ley 336 de 1996: se adopta el estatuto nacional de transporte, con los principios y criterios para la regulación y reglamento del transporte público aéreo, marítimo, fluvial, férreo, masivo y terrestre, así como su operación en el territorio nacional (Congreso de la República, 1996).
- Decreto 3112 de 1997: disposiciones que aplicarán al servicio público de transporte fluvial, de acuerdo con lo establecido en la Ley 336 de 1996 (Mintransporte, 1997).
- Decreto 2409 de 2018: modifica y renueva la estructura de la Superintendencia de Puertos y Transporte (Congreso de la República, 2018).
- Decreto 87 de 2011: modifica la estructura del Ministerio de Transporte y se dictan otras disposiciones (Congreso de la República de Colombia, 2011).
- Decreto 474 de 2015: reglamenta el régimen de homologaciones para la realización de las actividades portuarias fluviales (Mintransporte, 2015).
- Resolución 666 de 1999 (Mintransporte, 1999d) - Resolución 3767 de 2013 (Mintransporte, 2013): aprobación del reglamento de luces y señales de navegación fluvial.
- Resolución 2104 de 1999: se expide el reglamento para embarcaciones mayores (Mintransporte, 1999).

- Resolución 2105 de 1999: se expide el reglamento para embarcaciones menores (Min-Transporte, 1999a).
- Resolución 2106 de 1999: se expide el reglamento para puertos, muelles y bodegas en el modo fluvial (Mintransporte, 1999b).
- Resolución 2107 de 1999: establece las especificaciones técnicas de tripulaciones y dotaciones de las embarcaciones fluviales (Mintransporte, 1999c).
- Resolución 20203040003645 de 2020: reglamenta el Registro Nacional Fluvial (RNF) (Mintransporte, 2020).
- NTC 4737 1999: tipología y requisitos generales para vehículos de transporte fluvial de pasajeros (ICONTEC, 1999).

Respecto a la normativa para la construcción de embarcaciones, es importante señalar que en Colombia pueden navegar por las vías fluviales tanto embarcaciones mayores como menores, aunque únicamente para estas últimas existe una norma ISO para regular su construcción:

- Decreto 2049 de 1957: habla de la adopción de normas para la construcción, inspección, reparación y clasificación de embarcaciones fluviales en el territorio de la república (Congreso de la República, 1957).
- Resolución 665 de 1999: reglamento para la construcción, reparación o modificación de embarcaciones y artefactos fluviales (Congreso de la República, 1999).
- NTC ISO 12215 (ICONTEC, 2018): regula la construcción de embarcaciones menores, cascos y escantillonado, sus partes abordan los siguientes temas: partes 1, 2 y 3: materiales; parte 4: talleres y fabricación; parte 5: presiones de diseño para monocasco, esfuerzos de diseño y determinación de escantillonado; parte 6: disposiciones estructurales y detalles de construcción.

13.4. Oportunidades y retos alrededor de la apropiación del transporte sostenible

Trazar un análisis en cuanto a la transición energética para América Latina es una tarea desafiante, porque la región está formada por países con estructuras energéticas muy distintas, con agendas diferentes y cuestiones coyunturales complejas. Ese desafío se vuelve aún mayor en la medida que lograr la transición energética es una tarea multidisciplinaria, que exige un planeamiento coherente y coordinado del país, pues involucra a variados sectores (FGV Energía, 2021). Aunque es técnicamente viable y económicamente beneficiosa, no ocurrirá por sí sola y es necesaria una acción política urgente para poner el sistema energético global en el camino de la sostenibilidad (Agencia Internacional de Energías Renovables, 2018), a partir de los siguientes ejes:

- Una de las máximas prioridades políticas debe ser el aprovechamiento de las potentes sinergias entre la eficiencia energética y las energías renovables. Esto, para satisfacer rentablemente el grueso de las necesidades de descarbonización relacionadas con la energía para 2050.
- El fomento de la innovación en todo el sistema, del mismo modo que el desarrollo de nuevas tecnologías, ha desempeñado un papel esencial en el progreso de las energías renovables en el pasado. Es necesario que prosiga la innovación tecnológica en

el futuro para el éxito de la transición energética mundial. Esta debe abarcar todo el ciclo de vida de una tecnología, incluyendo las fases de demostración, implantación y comercialización.

La política de transición energética en Latinoamérica se ha construido sin un verdadero diálogo social, lo que ha resultado en un desconocimiento por parte de la sociedad en general y su falta de compromiso alrededor de este tema (FGV Energía, 2021). Por esto, sería valioso tomar el ejemplo de países como Alemania, donde el *Energiewende* corresponde al plan nacional de transición energética y para construirlo hubo participación de un conjunto amplio de *stakeholders*, lo que ha hecho que la sociedad alemana siga participando y cada vez de manera más activa. También, cabe destacar que la inestabilidad política de los países latinoamericanos dificulta el compromiso con estas iniciativas. A pesar de esto, países como Brasil y México han creado entidades gubernamentales que puedan centrarse directamente en el tema de la transición energética y Colombia ha priorizado las acciones para mejorar la eficiencia energética.

Desde el tema de innovación, es posible evidenciar cómo grandes empresas vuelcan su interés asimismo a este ámbito. A fines de 2021, General Motors gastó 150 millones de pesos adquiriendo el 25 % de Pure Watercraft; BMW y Torqeedo se asociaron; y Jaguar ha desarrollado el Vector Racing V20E, una lancha propulsada por el motor de un monoplaza de la Fórmula 1. En el tema de embarcaciones 100 % eléctricas, la empresa más importante es Candela, que ha vendido más de 100 barcos de su último modelo, el C-8; son protagonistas igualmente empresas estadounidenses, como Zin boats y ARC, y la empresa emergente catalana Magonis que, además, está estudiando una propulsión completamente de hidrógeno para aumentar la autonomía (Barbieri, 2022).

En América Latina, 27 de los 33 países de la región han priorizado el sector transporte como un elemento clave para alcanzar sus metas de reducción de emisiones. Por ende, los entes gubernamentales deben contar con políticas que favorezcan la implementación y adquisición de vehículos eléctricos; además deben modificar los planes de movilidad y ordenamiento territorial, y que estos cuenten con incentivos para la movilidad eléctrica y, de esa forma, buscar la integración con actores claves del mercado. Por ejemplo, Colombia actualizó sus compromisos en 2020, comprometiéndose a la creación de un marco habilitante de regulación de las tarifas eléctricas y de especificaciones vehiculares; Argentina, por su parte, propuso una cadena productiva en torno al hidrógeno como parte de su transición energética; Chile aumentó sus objetivos para alcanzar que el 100 % de los vehículos de transporte urbano sean eléctricos para 2050; y Brasil tiene como objetivo alcanzar la neutralidad de sus emisiones para 2060 (Guarino, 2022).

Los desarrollos tecnológicos alrededor de la movilidad fluvial sostenible siguen estando encaminados a mejorar la eficiencia energética, como el Candela C-8, que recurre al sistema de hidro-alas para reducir el rozamiento con el agua y elimina hasta en un 80 % la resistencia. Al mismo tiempo, se han identificado las vías fluviales como opciones para descongestionar las ciudades. Así lo hace la empresa noruega Zeabuz, que se encuentra desarrollando una flotilla de transbordadores eléctricos completamente autónomos para transportar personas a lo largo de las vías fluviales urbanas, porque la reducción de consumo, de contaminación, de ruido y movimiento de las olas, los hacen perfectos para ciudades navegables.

En Colombia, se espera un crecimiento exponencial del sector transporte, lo cual es lógico si se consideran las dinámicas económicas y de urbanización por las que está atravesando el país. Por este motivo, si se tiene en cuenta la incertidumbre respecto a la disponibilidad de los combustibles fósiles, la variabilidad en sus precios y el efecto negativo que tiene su uso sobre el medio ambiente, se hace imperativa una transición eficiente hacia la movilidad eléctrica. Sin embargo, en lo que compete a los transportes en nuestro país, este sector presenta el problema de no poder definir adecuadamente la vida útil de sus vehículos; a esto se suma una baja tasa de renovación, que se debe, en general, al criterio de desintegración de vehículos, específicamente los dedicados al servicio público y de carga.

Estas consideraciones crean un incentivo hacia la electrificación de la movilidad terrestre, considerando dos factores. Primero, un vehículo eléctrico representa un ahorro a largo plazo respecto a su mantenimiento, en comparación con los que operan con combustibles fósiles, dada la simplicidad mecánica de los primeros y a que los costos de estas actividades resultan un 56 % más baratos (Gaviria, 2021). Segundo, un vehículo eléctrico en su vida útil puede resultar un 40 % más económico comparando los costos por kilómetro, específicamente en vehículos particulares tipo sedan (Burnham *et al.*, 2021). Sin embargo, implementar estas tecnologías trae consigo diferentes retos: actualmente Colombia no cuenta con los recursos técnicos a lo largo del territorio nacional para beneficiar la tecnología vehicular eléctrica, lo cual hace necesario garantizar el desarrollo de diferentes herramientas para su correcta implementación. Así, las estaciones de carga son elementos indispensables y es necesario garantizar sus condiciones mínimas de operación, tales como la estandarización de los cargadores y la medición diferenciada para vehículos eléctricos e híbridos. A lo anterior se suma el uso y mantenimiento de las tecnologías de bajas y cero emisiones análogo al servicio de revisión técnico-mecánica a vehículos impulsados por combustibles fósiles; será necesario, entonces, crear planes de capacitación para verificar el estado de los vehículos con estas tecnologías limpias, debido a características que pueden variar entre fabricantes.

Como se evidencia, en los últimos años, en temas de implementación y regulación se han presentado avances en materia de generación de políticas y normas sobre el uso de tecnologías para el paso a la movilidad sostenible. Por ende, es necesario continuar con esta tendencia, con miras a incentivar mejores desempeños en términos de eficiencia energética y generaciones de emisiones en el sector transporte. Junto con esto, deben dedicarse nuevos esfuerzos a la promoción de la importación, producción u operación de otro tipo de tecnologías, como vehículos impulsados por hidrógeno. Además, se deben plantear mejores esquemas respecto a las tarifas de compra y uso; que no se tengan cupos limitados para la importación de este tipo de vehículos, así como beneficios y ayudas económicas para los usuarios que quieran acceder a estas tecnologías.

13.5. Referencias

Agencia Internacional de Energías Renovables. (2018). *Transformación energética mundial: hoja de ruta hasta 2050*. IRENA. https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2018/Apr/IRENA_Global_Energy_Transformation_2018_summary_ES.pdf?la=en&hash=A5492C2AAC7D8E7A7CBF71A460649A8DEDB48A82

- Asociación Nacional de Industriales. (2021). *Boletín vehículos híbridos y eléctricos - Diciembre 2021*. Reporte técnico.
- Burnham, A., Gohlke, D., Rush, L., Stephens, T., Zhou, Y., Delucchi, M., Birky, A., Hunter, C., Lin, Z., Ou, S., Xie, F., Proctor, C., Wiryadinata, S., Liu, N. y Bloor, M. (2021). Comprehensive total cost of ownership quantification for vehicles with different size classes and powertrains. <https://doi.org/10.2172/1780970>
- Barbieri, A. (2022). El futuro de la náutica es eléctrico y ‘made in Barcelona’. *La Vanguardia*. <https://www.lavanguardia.com/magazine/experiencias/20220617/8339641/futuro-nautica-electrico-made-in-barcelona.html>
- Congreso de la República. (1957, 23 de agosto). *Decreto 2049 de 1957. Por el cual se adoptan las normas para la construcción, reparación, inspección y clasificación de embarcaciones fluviales*. DO: 29137. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Decretos/1895675>
- Congreso de la República. (1996, 20 de diciembre). *Ley 336 de 1996*. Por la cual se adopta el estatuto nacional de transporte. DO: 42.948 https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=346
- Congreso de la República. (1999, 13 de abril). *Resolución 665 de 1999*. Por medio de la cual se expide el Reglamento para el Funcionamiento de Astilleros y Talleres Fluviales.
- Congreso de la República. (2008, 5 de agosto). *Ley 1242 de 2008*. Por la cual se establece el Código Nacional de Navegación y Actividades Portuarias Fluviales y se dictan otras disposiciones. DO: 47072. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=31783
- Congreso de la República. (2011, 17 de enero). *Decreto 87 de 2011*. Por el cual se modifica la estructura del Ministerio de Transporte, y se determinan las funciones de sus dependencias. DO: 47.955. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=64906
- Congreso de la República. (2017, 14 de julio). *Ley 1844 de 2017*. Por medio de la cual se aprueba el “Acuerdo de París”, adoptado el 12 de diciembre de 2015, en París, Francia. DO: 50294. <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?ruta=Leyes/30032607#:~:text=%E2%80%9CLas%20Partes%20deber%C3%ADan%20proteger%20el,diferenciadas%20y%20sus%20respectivas%20capacidades.>
- Congreso de la República. (2018, 24 de diciembre). *Decreto 2409 de 2018*. Por el cual se modifica y renueva la estructura de la Superintendencia de Transporte y se dictan otras disposiciones. DO: 50.817. https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036031#ver_30179852
- FGV Energía. (2021). *Un análisis comparativo de la transición energética*. Konrad Adenauer Stiftung. https://www.kas.de/c/document_library/get_file?uuid=60691a11-3ba7-d739-5de6-06df4600f994&groupId=252038
- Kreuzer, F. y Wilmsmeier, G. (2014). *Eficiencia energética y movilidad en América Latina y el Caribe. Una hoja de ruta para la sostenibilidad*. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/36798/S1420695_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Guarino, L. (2022). ¿Cuál es el futuro de la movilidad eléctrica en América Latina? <https://www.bloomberglinea.com/2022/01/28/cual-es-el-futuro-de-la-movilidad-electrica-en-america-latina/>
- Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (1999). *Tipología y requisitos*

generales para vehículos de transporte fluvial de pasajeros. <https://tienda.icontec.org/gp-tipologia-y-requisitos-generales-para-vehiculos-de-transporte-fluvial-de-pasajeros-ntc4737-1999.html>

Instituto Colombiano de Normas Técnicas y Certificación. (2018). *Embarcaciones menores. construcción de cascos y escantillonado. parte 6: disposiciones estructurales y detalles de construcción*. <https://tienda.icontec.org/gp-embarcaciones-menores-construccion-de-cascos-y-escantillonado-parte-6-disposiciones-estructurales-y-detalles-de-construccion-ntc-iso12215-6-2018.html>

Jaimurzina, A. y Wilmsmeier, G. (2017). La movilidad fluvial en América del Sur. Avances y tareas pendientes en materia de políticas públicas. *Serie recursos naturales e infraestructura*, 188. CEPAL. https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/43135/S1700967_es.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Ministerio de Minas y Energía. (2013). *Anexo general reglamento técnico de instalaciones eléctricas (RETIE)*. Resolución 90708 de agosto 30 de 2013. <https://sic.gov.co/sites/default/files/files/reglamentos%20tecnicos/ANEXO%20GENERAL%20RETIE%20Res%2090708%20de%202013%20actualizado%20a%20Res%202017-03-29.pdf>

Ministerio de Transporte. (1999a, 15 de octubre). *Resolución 2105 de 1999*. Por medio de la cual se expide el Reglamento para las Embarcaciones Menores, las cuales registrarán en el territorio nacional. DO: 43.751. <https://www.mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=655>

Ministerio de Transporte. (1999b, 15 de octubre). *Resolución 2106 de 1999*. Por la cual se expide el Reglamento para Puertos, Muelles y Bodegas en el modo fluvial. DO: 43.751. <https://www.mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=689>

Ministerio de Transporte. (1999c, 15 de octubre). *Resolución 2107 de 1999*. Por medio de la cual se expide el Reglamento de Tripulaciones y Dotaciones de las Embarcaciones fluviales. https://web.mintransporte.gov.co/jspui/bitstream/001/7311/1/Resolucion_2107_1999.pdf

Ministerio de Transporte de la República de Colombia. (1999d, 13 de abril). *Resolución 666 de 1999*. Por medio de la cual se expide el reglamento de luces y señales de navegación https://web.mintransporte.gov.co/jspui/bitstream/001/6534/1/Resolucion_000666_1999.pdf

Ministerio de Transporte. (1999e, 15 de octubre). *Resolución 2104 de 1999*. Por medio de la cual se expide el Reglamento de las Embarcaciones Mayores, las cuales registrarán en todo el territorio nacional. https://vusstaticweb.blob.core.windows.net/strapiimagenesdev/1999_Resolucion_002104_1999_4514bcbebf.pdf

Ministerio de Transporte. (2013, 26 de septiembre). *Resolución 003767 de 2013*. Por medio del cual se adopta el Manual Único de Señalización Fluvial como reglamento de señalización y balizaje fluvial y se dictan otras disposiciones. <https://web.mintransporte.gov.co/jspui/handle/001/5732>

Ministerio de Transporte. (2015, 17 de marzo). *Decreto 474 de 2015*. Por medio del cual se reglamenta el trámite de solicitud de concesiones para el desarrollo de actividades portuarias previstas en las Leyes 1.ª de 1991 y 1242 de 2008. https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30019787#ver_30044990

Ministerio de Transporte. (2020, 22 de mayo). *Resolución 20203040003645*. Por la cual se reglamenta el Registro Nacional Fluvial – RNF y se dictan otras disposiciones. <https://www.>

mintransporte.gov.co/loader.php?lServicio=Tools2&lTipo=descargas&lFuncion=descargar&idFile=23891

- Ministerio de Transporte. (2021, 9 de julio). *Resolución número 40223 de 2021*. Por la cual se establecen las condiciones mínimas de estandarización y de mercado para la implementación de infraestructura de carga para vehículos eléctricos e híbridos enchufables.
- Ministerio de Transporte. (2021, 10 de julio). *Ley 2099 de 2021*. Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones. DO: 51.731. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma_pdf.php?i=166326
- Ministerio de Transporte. (2021). *Transporte en cifras. Estadísticas 2020*. <https://plc.mintransporte.gov.co/Portals/0/Documentos/Transporte en Cifras 2021 Version 30 Dic.pdf?ver=2021-12-30-175937-487>
- Naciones Unidas. (2016). *The sustainable development goals report*. <https://www.un-ilibrary.org/content/books/9789210582599/read>
- Plan Maestro Fluvial de Colombia. (2015). Plan Maestro Fluvial de Colombia 2015.
- RUNT. Runt en cifras. URL <https://www.runt.com.co/runt-en-cifras>.
- Unidad De Planeación Minero Energética. (2015). *Plan energético nacional Colombia: ideario energético 2050*. <https://repositoriobi.minenergia.gov.co/bitstream/handle/123456789/2679/6395.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Unidad De Planeación Minero Energética. (2019). *Análisis de infraestructura de electrolineras en ciudades* [Infografía]. https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Infografia2_Proyecciones_EVSE.pdf

*Movilidad sostenible en países en desarrollo. Tecnologías y estrategias
de transporte multimodal e inteligente*

Se editó en la Editorial Universidad Nacional de Colombia.

En su composición se utilizaron las tipografías

Minion Pro y Libre Franklin.

Se terminó de imprimir en los talleres de DGP Editores S. A. S.

Julio de 2023

Bogotá D. C., Colombia.



2030

En 2017 el Gobierno de Colombia hizo una apuesta novedosa con la creación de los Ecosistemas Científicos en el marco del programa Colombia Científica. Energética 2030 surge de esta política, materializando el esfuerzo de un equipo de trabajo de empresas y universidades que han colaborado por muchos años en el propósito de construir una sociedad basada en el conocimiento. Energética 2030 se impuso por entonces el ambicioso objetivo de “Desarrollar una estrategia integral para la transformación del sector energético colombiano, orientada a su confiabilidad y sostenibilidad social, económica y ambiental en el horizonte del año 2030”. Seis años después un equipo multidisciplinario de más de 300 investigadores de una decena de nacionalidades entregan importantes resultados que se reflejan en la política energética del país, en el desarrollo tecnológico de soluciones a los problemas de la transición energética y en un grupo de personas que se ha preparado para afrontar los retos que demanda el planeta en la descarbonización de la producción y el uso de la energía. De este modo, los diez volúmenes que conforman la colección Energética 2030 son el testimonio y registro de los logros y resultados que esta comunión de voluntades produjo.