



UNIVERSIDAD
DE MÁLAGA



ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

Departamento de Ingeniería Eléctrica

Área de conocimiento: Ingeniería Eléctrica

TRABAJO DE FIN DE GRADO

**Análisis económico de sistemas ferroviarios
con estrategias óptimas de operación y
almacenamiento energético**

Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales

Autor: DANIEL LAARBI GONZÁLEZ

Tutor: JOSÉ MANUEL GONZÁLEZ GONZÁLEZ

Cotutor: JOSÉ ANTONIO AGUADO SÁNCHEZ

MÁLAGA, 12 de junio de 2023

Título

Análisis económico de sistemas ferroviarios con estrategias óptimas de operación y almacenamiento energético.

Resumen

Este proyecto de investigación se enfoca en el desarrollo de un algoritmo avanzado y eficiente que simule el comportamiento energético de un tren en un trayecto específico, Málaga-Córdoba. Se establece como el objetivo principal, la optimización del uso de recursos y lograr un ahorro significativo de energía y financiera a partir de la combinación de distintas estrategias de conducción eficiente, sistemas de recuperación de energía, venta de excedentes o de almacenamiento. Para la construcción de dicho algoritmo se utilizan dos herramientas de programación ampliamente reconocidas: Matlab y GAMS. Estas plataformas ofrecen una amplia gama de funcionalidades y capacidades de modelado que permiten analizar y evaluar los diferentes escenarios definidos.

Palabras clave

Gases del efecto invernadero, transporte ferroviario, red ferroviaria, consumo energético, sostenible, sistemas de almacenamiento, freno regenerativo, conducción eficiente, potencia demandada, GAMS, función objetivo y optimización.

Title

Economic analysis of railway systems with optimal strategies for operation and energy storage.

Abstract

This research project focuses on the development of an advanced and efficient algorithm that simulates the energetic behavior of a train on a specific route, Málaga-Córdoba. The main objective is to optimize the use of resources and achieve significant energy and financial savings from the combination of different efficient driving strategies, energy recovery systems, sale of surpluses or storage. Two widely recognized programming tools are used to build this algorithm: Matlab and GAMS. These platforms offer a wide range of functionalities and modeling capabilities that allow the analysis and evaluation of the different defined scenarios.

Keywords

Greenhouse gases, railway transport, railroad network, energy consumption, sustainable, storage system, regenerative brake, eco-driving, demanded power, GAMS, objective function and optimization.

Índice

1. Introducción	11
1.1. Antecedentes	11
1.2. Objetivos	12
1.3. Estructura del documento	13
2. Sector ferroviario	14
2.1. Estructura del sector ferroviario español	15
2.2. Eficiencia energética en el sector ferroviario español	18
3. Dinámica del transporte ferroviario	29
3.1. Introducción a la dinámica del transporte ferroviario	29
3.2. Esfuerzo de tracción o frenado	31
3.3. Resistencia total al avance	35
3.4. Coeficiente de masas gravitatorias	38
3.5. Potencia demandada	40
4. Resolución del problema	43
4.1. Datos de partida	44
4.2. Variables	45
4.3. Restricciones	46
4.4. Ecuaciones	47
5. Resultados	51
5.1. Caso de estudio	51

5.2. Estrategia 1: Marcha tendida	55
5.3. Estrategia 2: Conducción eficiente	58
5.4. Estrategia 3: Conducción eficiente y batería	61
5.5. Estrategia 4: Conducción eficiente y venta de excedentes	66
5.6. Estrategia 5: Conducción eficiente, baterías y venta de excedentes	70
5.7. Resumen de los resultados	74
6. Conclusiones y futuras líneas de investigación	79
6.1. Conclusión	79
6.2. Contribuciones del trabajo	80
6.3. Futuras líneas de investigación	80

Índice de figuras

1.	Gases del efecto invernadero que se generan en España. Fuente: [3]	11
2.	Variación interanual de las emisiones brutas de GEI. Fuente: [5]	11
3.	Red ferroviaria española según la anchura de vía y gestores. Fuente: [9]	14
4.	Estructura del sector ferroviario español. Fuente: [11]	15
5.	Diagrama de sectores que representa el consumo final de energía. Año: 2021. Fuente: [13].	19
6.	Diagrama de sectores que representa el consumo energético del transporte. Año: 2021. Fuente: [13].	19
7.	Máquina síncrona con rotor a imanes permanentes. Fuente: [18].	22
8.	Relación densidad de potencia / densidad de energía para diferentes tipos de batería . Fuente: [20].	23
9.	Relación densidad de potencia/densidad de energía para diferentes tipos de batería. Fuente: [20].	24
10.	Locomotora FLXdrive. Fuente: [21].	24
11.	Esquema de Sitras MES integrated Concept. Fuente: [20].	25
12.	Pila de hidrógeno. Fuente: [26].	26
13.	Ejes de coordenadas para los estudios de la dinámica longitudinal ferroviaria. Fuente: [33]	29
14.	Discos de freno. Fuente: [34]	32
15.	Fuerza de tracción limitada por potencia y por adherencia en máquinas 251 y 252. Fuente: [33].	34
16.	Resistencia al avance en curva en función del radio y del ancho de vía. Fuente: [33].	37
17.	Resistencia gravitatoria. Fuente: [33].	38
18.	Diagrama de flujo.	43
19.	Mapa del trayecto Málaga-Córdoba. Fuente: [38]	51

20.	Pendiente en el trayecto.	52
21.	Altura en el trayecto.	53
22.	Ave S-102/112. Fuente: [40]	53
23.	Perfil de la velocidad en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.	55
24.	Perfil de la aceleración en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.	56
25.	Duración del recorrido en marcha tendida.	56
26.	Esfuerzo en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.	57
27.	Potencia empleada en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.	57
28.	Energía consumida en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.	58
29.	Perfil de las velocidades en las estrategias 1, 2 y máxima respecto al tiempo y a la distancia.	59
30.	Perfil de la aceleraciones en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.	59
31.	Duración de los recorridos en las estrategias 1 y 2.	60
32.	Potencias demandadas en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.	60
33.	Energías consumidas en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.	61
34.	Perfil de las velocidades máximas, estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.	62
35.	Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.	62
36.	Potencias demandadas en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.	63
37.	Energías consumidas en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.	64
38.	Energía regenerada con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.	64
39.	Potencia de la batería con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.	65
40.	Nivel de la batería con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.	65
41.	Perfil de las velocidades máximas y estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia.	66

42.	Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia. . .	67
43.	Potencias demandadas en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia. . .	67
44.	Energías consumidas en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia. . . .	68
45.	Energía regenerada con conducción eficiente y venta de excedentes respecto al tiempo y a la distancia.	69
46.	Perfil de las velocidades máximas y estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.	70
47.	Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia. .	71
48.	Potencias demandadas en las estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia. . .	71
49.	Energías consumidas respecto al tiempo y a la distancia.	72
50.	Energía regenerada con conducción eficiente, venta de excedentes y baterías respecto al tiempo y a la distancia.	73
51.	Potencias de las baterías en las estrategias 3 y 5 respecto al tiempo y a la distancia. .	73
52.	Niveles de las baterías en las estrategias 3 y 5 respecto al tiempo y a la distancia. . . .	74
53.	Variación del coste de operación respecto al precio de venta.	77
54.	Variación del coste de operación respecto al coste de la energía de la batería y la capacidad de la misma.	78

.

Índice de tablas

1.	Consumo final de energía por sectores. Año: 2021. Fuente: [13]	18
2.	Prestaciones mínimas de los frenos. Fuente: [33].	33
3.	Distancias máximas de frenado con freno de emergencia. Fuente: [33].	33
4.	Coefficientes absolutos.	36
5.	Características técnicas de la línea. Fuente:[37].	52
6.	Características técnicas del AVE S-102/112. Fuente:[40].	54
7.	Los pesos y las dimensiones del AVE S-102/112. Fuente:[40].	54
8.	Resumen de los resultados.	74
9.	Resultados aumentando el precio de venta.	75
10.	Resultados aumentando el precio de compra.	76
11.	Variación del precio de venta de excedentes.	77
12.	Variación del precio del kilovatio hora de la batería.	78

Abreviaturas

- km: kilómetro.
- ktep: kilotonelada equivalente al petróleo.
- kWh: kilovatio por hora.
- W: vatio.
- V: voltio.
- kV: kilovatio.
- mm: milímetro.
- kg: kilogramo.
- N: newton.
- m: metro.
- h: hora.
- daN: decanewton.
- kN: kilonewton.
- ton: tonelada.
- s: segundo.
- Hz: hercio.
- lzb: Linienzugbeeinflussung (sistema de seguridad de control de tráfico ferroviario).
- min: minutos.

Siglas

- GAMS: General Algebraic Modeling System/Sistema General de Modelado Algebraico.
- GEI: Gases del Efecto Invernadero.
- RFIG: Red Ferroviaria de Interés General.
- FGC: Ferrocarriles de la Generalidad de Cataluña.
- ETS: Euskal Trenbide Sarea/Red Ferroviaria Vasca.
- FGV: Ferrocarriles de la Generalidad de Valencia.
- SFM: Serveis Ferroviaris de Mallorca/Servicio de Ferrocarriles de Mallorca.
- ADIF: Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.
- RENFE: Red Nacional de Ferrocarriles Españoles.
- CA: Comunidades Autónomas.
- SNCF: Sociedad Nacional de Ferrocarriles Franceses.

- LFP: Línea Figueras Perpignan.
- AESF: Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria.
- CIAF: Comisión de Investigación de Accidentes Ferroviarios.
- LED: Light Emitting Diode/Diodo Emisor de Luz.
- MES: Mobil Energy Storage system)/Sistema de Almacenamiento de Energía Móvil.
- GNL: Gas Natural Licuado.
- GLP: Gas Licuado del Petróleo.
- ETI: Especificaciones Técnicas de Interoperabilidad.
- ERTMS: European Rail Traffic Management System/Sistema Europeo de Gestión del Tráfico Ferroviario.
- GSM-R: Global System for Railway Mobile communications/ Sistema Inalámbrico para la comunicación Ferroviaria.
- ASFA: Anuncio de Señales y Frenado Automático.
- AVE: Alta Velocidad Española.
- PMR: Personas con Movilidad Reducida.
- IGBT: Insulated Gate Bipolar Transistor/Transistor Bipolar de Puerta Aislada.
- STM: Specific Transmission Module o Módulo de Transmisión Específico.
- MRUA: Movimiento rectilíneo uniformemente acelerado.
- UMA: Universidad de Málaga.

1. Introducción

1.1. Antecedentes

Las actividades realizadas por el hombre están provocando una variación global del clima de la Tierra, el llamado cambio climático. Los efectos de este cambio, generan alteraciones de los parámetros climáticos como la temperatura, precipitaciones, nubosidad, etc, en diversas escalas de tiempo [1]. En el caso de la temperatura, por ejemplo, ha aumentado hasta 1,2 grados Celsius desde finales de siglo hasta el año 2020 [2].

El principal motor de ese cambio climático es el efecto invernadero [1], es decir, la retención del calor solar por parte de algunos gases atmosféricos, provocando que aumente la temperatura terrestre. Los gases se suelen producir de manera natural, sin embargo, las concentraciones de algunos de ellos crecen por la acción del ser humano, figura 2.

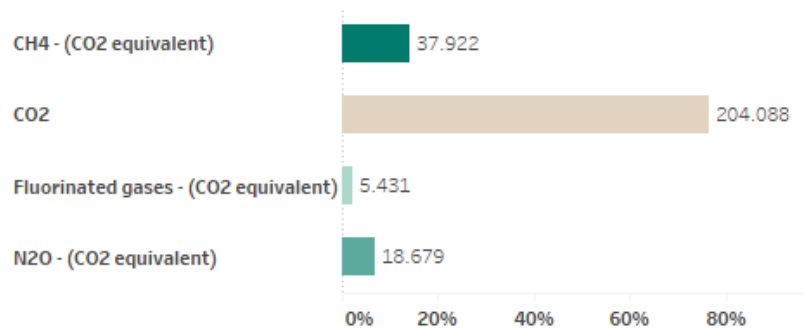


Figura 1: Gases del efecto invernadero que se generan en España. Fuente: [3]

El aumento de estas emisiones se deben al uso de los combustibles fósiles, la deforestación, el desarrollo de la ganadería o fertilizantes, entre los principales motivos. Se destaca el papel de los combustibles fósiles como principal motor de la generación de los GEI, representando más del 75% de las emisiones mundiales de estos gases y casi el 90% dióxido de carbono [4].

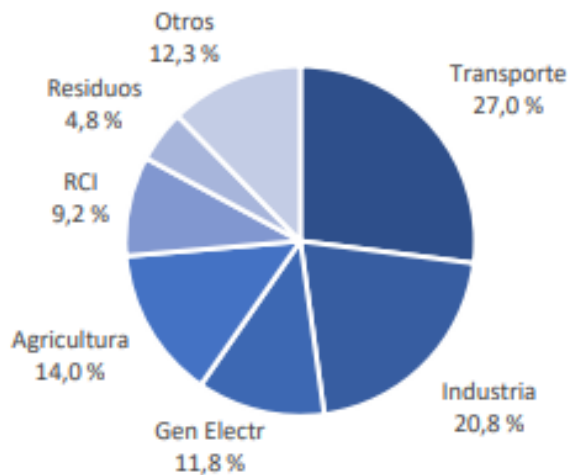


Figura 2: Variación interanual de las emisiones brutas de GEI. Fuente: [5]

Como se aprecia en la imagen 2, el mayor causante de emisiones de gases del efecto invernadero es el transporte, con un 27 % de las emisiones totales en España. Dentro del transporte, el sector más representativo es la carretera, ya que genera casi el 95 % de las emisiones, mientras que la contribución de otros medios es minoritaria [6].

En definitiva, se debe fomentar el empleo de medios de transportes más sostenibles para tratar de disminuir la huella de carbono. Dado a que si la proporción actual de combustibles fósiles se mantiene, y la demanda energética casi se duplica para 2050, las emisiones superarán enormemente la cantidad de carbono que se puede emitir, si se limita el aumento medio de temperatura a nivel mundial a 2 grados centígrados [7]. Para ello, se posiciona como principal apuesta el ferrocarril [6], tanto para pasajeros como para mercancías. Un sistema de transporte potenciando este medio representaría:

- Bajas emisiones de gases de efecto invernadero en comparación con otros medios de transporte, como los automóviles o los aviones, los trenes emiten significativamente menos gases de efecto invernadero, únicamente el 0,3 % del total [8], por pasajero o tonelada de carga transportada. Esto representa el empleo de 382 millones de circulaciones de coche, 4,4 millones de circulaciones de camiones y 116800 vuelos. El motivo de las bajas emisiones es por el uso de la energía eléctrica como fuente de alimentación, la cual puede provenir de fuentes renovables, y a la mayor eficiencia energética del sistema ferroviario.
- Menor consumo de energía: los trenes son más eficientes en términos de consumo de energía en comparación con los automóviles y los aviones, al ser capaces de integrar diferentes estrategias de conducción o almacenamiento que incrementan su eficiencia. Por otra parte, presenta una capacidad de carga de transporte de pasajeros o mercancías superior a otros medios de transporte, lo que reduce la cantidad de energía necesaria por unidad de transporte.
- Reducción de la congestión del tráfico: los trenes contribuyen a reducir la congestión del tráfico al transportar a un gran número de personas en un solo vehículo. Esto ayuda a disminuir la cantidad de automóviles en las carreteras, lo que a su vez reduce los atascos y el tiempo de viaje. Menos vehículos en circulación también implican menos emisiones contaminantes y una mejora en la calidad del aire.
- Uso eficiente del espacio: los trenes requieren menos espacio en comparación con las carreteras o las pistas de aterrizaje de los aviones. Además, las infraestructuras ferroviarias pueden integrarse en áreas urbanas existentes y aprovechar los corredores ya establecidos, lo que minimiza la necesidad de nuevas construcciones y la ocupación de tierras.
- Menor impacto ambiental: el tren tiene un impacto ambiental reducido en comparación con otros medios de transporte. No produce emisiones directas en el punto de uso, como los automóviles que emiten gases contaminantes, y el ruido y las vibraciones generadas por los trenes pueden ser mitigados mediante el uso de tecnologías adecuadas.

1.2. Objetivos

La línea del trabajo sigue con la investigación del departamento de ingeniería eléctrica de la UMA, en relación a la eficiencia e integración de sistemas de almacenamiento en las operaciones ferroviarias. El propósito central de este trabajo proyecto es el desarrollo de estrategias de conducción eficiente con el objetivo de minimizar los costes de operación del sistema ferroviario. Los objetivos específicos de este proyecto son:

- Desarrollo de un modelo dinámico preciso de trenes. Este modelo es compatible con cualquier tipo de sistema ferroviario.

- Desarrollo de un modelo energético para los trenes basado en el modelo dinámico desarrollado.
- Implementación de estrategias de minimización del coste de operación de los sistemas ferroviarios. Esta implementación será realizada en un problema de optimización.
- Inclusión de sistemas de frenada regenerativa en los algoritmos de optimización. Esto permitirá la venta de excedentes de energía y la inclusión de sistemas de almacenamiento.
- Validación de los algoritmos implementados y análisis de los resultados proporcionados por los distintos algoritmos.

1.3. Estructura del documento

Este documento se divide en seis apartados distintos:

- En este primer apartado se realiza una exposición de la actualidad en relación a la emisión de los GEI y la necesidad de reducirlos. Para ello se plantea como medida el empleo del tren como medio de transporte sostenible. También, se establece el motivo de la realización del presente documento y la estructura del mismo.
- En el segundo apartado se explica el sector ferroviario desde un punto de vista estructural y energético. Asimismo, se exponen posibles medidas para tratar de minimizar el consumo energético.
- En el tercer apartado se desarrollan las diferentes ecuaciones que determinan el movimiento del tren. Además, se introducen los balances de potencias llevados a cabo para elaborar correctamente el modelo matemático.
- En el cuarto apartado se explica el desarrollo realizado para obtener el algoritmo, desde los datos de partida hasta la simulación.
- En el quinto apartado se define el caso de estudio a realizar en el trabajo, determinando las diferentes estrategias para reducir el consumo energético, y se analizan los resultados. Además, se introducen las características del trayecto y del material móvil.
- En el último apartado se llega a una conclusión a partir de los resultados obtenidos en el anterior. Además, se desarrollan las contribuciones del trabajo para la actualidad y posibles líneas de investigación en el futuro.

2. Sector ferroviario

La Red Ferroviaria en España es el conjunto de líneas de ferrocarril con ancho ibérico, estándar, mixto y métrico. La red está compuesta principalmente por la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG) y por las líneas cuya titularidad las poseen las comunidades autónomas, como es el caso de Cataluña (FGC), País Vasco (ETS), Comunidad Valenciana (FGV) y las Islas Baleares (SFM) [9]. Está compuesta por [10]:

- Longitud Red Ferroviaria: 15652 [km].
 - Red de ancho ibérico, vías de 1668 milímetros de ancho: 11211 [km].
 - Red de ancho estándar, vías de 1435 milímetros de ancho: 3030 [km].
 - Red de ancho mixto, dos anchuras de vías diferentes (1435/1668 [mm]): 245 [km].
 - Red de ancho métrico, vías de 1000 milímetros de ancho: 1193 [km].
- Número de estaciones: 1496.
- Terminales de transporte de mercancías: 38.

La Red Ferroviaria de Interés General está formada por las infraestructuras ferroviarias esenciales para garantizar un sistema común de transporte ferroviaria en todo el país. De este modo, se garantiza el correcto funcionamiento del sistema común de transporte, los itinerarios de tráfico internacional, enlaces entre distintas comunidades autónomas y conexiones y accesos a los núcleos de población y transporte esencial de elementos para la economía y defensa nacional [10].



Figura 3: Red ferroviaria española según la anchura de vía y gestores. Fuente: [9]

Donde:

- RFIG:

Tramo azul: ancho estándar.

Tramo rojo: ancho ibérico.

Tramo celeste: ancho mixto.

Tramo verde claro: ancho métrico.

- Otras redes:

Tramo naranja: ferrocarriles autonómicos.

Tramo rosa: ferrocarril de Sóller.

M: metro.

T: tranvía.

T.T: tren-tram.

T.H: tranvía histórico.

2.1. Estructura del sector ferroviario español

El Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana tiene la responsabilidad de formular y llevar a cabo la política gubernamental en relación con las infraestructuras ferroviarias de competencia estatal. Además, se encarga de supervisar, regular y administrar los servicios de transporte ferroviario, así como de planificar y programar las inversiones relacionadas con las infraestructuras, materiales y servicios asociados a este sector.

Estas competencias están repartidas entre distintos órganos del Ministerio (figura 4), las entidades públicas ADIF, ADIF-Alta Velocidad y RENFE-Operadora, y la Agencia Estatal de Seguridad Ferroviaria, todas ellas adscritas al Ministerio [11].

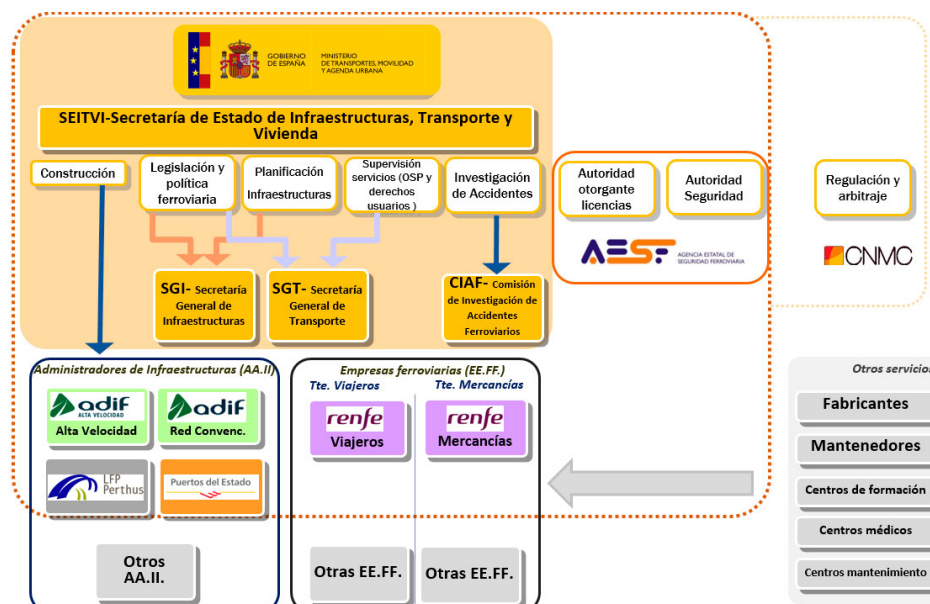


Figura 4: Estructura del sector ferroviario español. Fuente: [11]

2.1.1. Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana

Las principales funciones relacionadas con el sistema ferroviario las lleva a cabo el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana. Para ello, por medio de la Secretaría de Estado de Infraestructuras, Transporte y Vivienda, se responsabiliza de definir las política y ejecutarlas en relación a:

- Planificación y realización de infraestructura.
- Ordenación general de transporte.

Para garantizar estas actividades, la Secretaría de Estado se divide en la Secretaría General de Transportes y Secretaría General de Infraestructuras [11].

La Secretaría General de Infraestructuras se encarga de realizar inversiones en transporte por ferrocarril [11]:

- La realización de estudios de carácter prospectivo, económico-financiero y territorial, así como el seguimiento de los planes y programas de infraestructuras de transporte ferroviario del Departamento y la elaboración y seguimiento de la planificación de infraestructuras ferroviarias en la RFIG.
- La elaboración y seguimiento de estudios informativos, anteproyectos y, excepcionalmente proyectos ferroviarios.
- Las actuaciones expropiatorias en relación a las infraestructuras ferroviarias.
- La elaboración de disposiciones de carácter general relativos a las infraestructuras ferroviarias.

La Secretaría General de Transportes se encarga de la ordenación general del transporte por medio de las siguientes funciones [11]:

- La ordenación general y regulación del sistema de transporte ferroviario, que incluye la elaboración de proyectos normativos mediante los que se establezcan reglas básicas del mercado ferroviario, participación en la elaboración de normas de la Unión Europea y la elaboración de reglas de coordinación sobre competencias delegadas a las CA.
- Las propuestas, tramitación y adjudicación, así como el control y seguimiento de las obligaciones de servicio público en el transporte de viajeros por ferrocarril. Además, otorga de ayudas para la mejora del transporte ferroviario y la realización de estudios y elaboración de planes de actuaciones administrativa sobre dichas materias.
- La inspección y control del cumplimiento de las normas reguladoras del servicio de transporte por ferrocarril y de sus actividades auxiliares y complementarias. Además, aplica el correspondiente régimen sancionador y la coordinación de estas funciones cuando hayan sido delegadas en las Comunidades Autónomas.

2.1.2. Administradores de la infraestructura ferroviaria

La administración de la infraestructura ferroviarias que forman la RFIG es un servicio cuyo objetivo es el mantenimiento y explotación de estas, así como gestionar el sistema de control, de circulación y seguridad.

En la actualidad los principales administradores de la red son ADIF, ADIF-Alta velocidad, Puertos del Estado y la sociedad LFP (formado por ADIF y el gestor de infraestructuras SNCF-Réseau). Estas son entidades públicas empresariales adscritas al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana, sin embargo, tienen personalidad jurídica propia, plena capacidad de obrar y patrimonio propio.

Las funciones que desempeñan estas entidades públicas:

- Aprobación de proyectos básicos y de construcción, construcción y su administración (controlando, vigilando e inspeccionando).
- Garantizar las zonas de protección y de circulación ferroviaria.
- La elaboración, aprobación y publicación de la declaración de la red.
- La tramitación de solicitudes, adjudicación y puesta a disposición de la capacidad de infraestructura concedida a las empresas ferroviarias y restantes candidatos.
- La determinación, revisión y cobro de los cánones por utilización de las infraestructuras ferroviarias y la aprobación y cobro de las tarifas por la prestación de servicios complementarios y auxiliares.

Para poder desempeñar estas funciones, los administradores deben disponer de la autorización de la AESF. Esta agencia ejerce el papel de autoridad responsable de la seguridad ferroviaria, tal y como se desprende de la Directiva 2016/798, de 11 de mayo de 2016, sobre la seguridad ferroviaria, para la Red Ferroviaria de Interés General [11].

2.1.3. Empresas ferroviarias

Son empresas ferroviarias aquellas que se encargan de prestar servicios de transporte de viajeros o mercancías por ferrocarril. Para ello, deben de disponer de una licencia de empresa ferroviaria y de la licencia y certificado de seguridad de la AESF.

La principal empresa ferroviaria es RENFE, que además de ocuparse de prestar los servicios, se encarga de realizar tareas de mantenimiento y gestión del material móvil ferroviario. Al igual que los administradores de la infraestructura, tienen personalidad jurídica propia, plena capacidad de obrar para cumplimentar los fines y patrimonio propio. Además de RENFE, se encuentran empresas como Acciona (mercancías) o Aisa (viajeros) [11].

Cabe destacar que a partir del 14 de diciembre de 2020 [12] se inició la apertura a la libre competencia del transporte de viajeros por ferrocarril, sin embargo, no se realizó el primer servicio gestionado por otra empresa ferroviaria, Ouigo, hasta el 10 de mayo del año siguiente. La aparición de este tipo de compañías permiten acceder a más personas al transporte ferroviario al ofrecer alternativas más asequibles, provocando un aumento en el tráfico de trenes.

2.1.4. Seguridad ferroviaria

La responsabilidad de la seguridad en circulación sobre la RFIG recae en las empresas ferroviarias y a los administradores de la infraestructura que operen. Sus principales funciones:

- Evaluación y control de los riesgos de la circulación ferroviaria.
- Suministro de material.
- Contratación de servicios respecto a los usuarios, clientes, trabajadores, interesados y terceros.
- Formación y cualificación de sus empleados y personas que realicen trabajos que afecten a la seguridad de circulación.

Como la autoridad responsable de la seguridad ferroviaria de la RFIG, establecido en las Directiva Europeas y la Ley 38/2015 de 19 de septiembre del Sector Ferroviario, corresponde a la AESF. Destacando sus funciones en la seguridad ferroviaria:

- Supervisión del cumplimiento de las obligaciones de las entidades.
- Autorizar la puesta en servicio y comprobar que se cumplen los requisitos estructurales y de los vehículos.
- Otorgar los certificados de seguridad y las autorizaciones de seguridad de las empresas ferroviarias o administradores de infraestructura, las licencias y títulos de conducción del personal ferroviario, conceder la homologación de los centros de formación y de reconocimiento psicofísico del personal ferroviario, de los centros de formación y de reconocimiento psicofísico del personal ferroviario.
- Proponer, elaborar y desarrollar el marco normativo de seguridad y la supervisión de su cumplimiento.

En el caso de que se produzca un accidente, el estudio de este suceso lo realiza la CIAF. Se trata de un órgano colegiado con competencias para la investigación técnicas de los incidentes ocurridos en la RFIG. Este colegio está adscrito al Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana [11].

2.2. Eficiencia energética en el sector ferroviario español

Se define al consumo energético como el gasto total de energía para un proceso determinado. En España, el consumo energético durante el año 2021 se representa dividido en sectores en la tabla 1.

Consumo final de energía	ktep	Porcentaje
Industria	20134,00	25,61
Transporte	30350,05	38,62
Comercio y servicios públicos	10084,10	12,83
Hogares	14742,62	18,75
Agricultura/silvicultura	2781,188	3,54
Pesca	326,04	0,41
Otros	189,52	0,24

Cuadro 1: Consumo final de energía por sectores. Año: 2021. Fuente: [13]

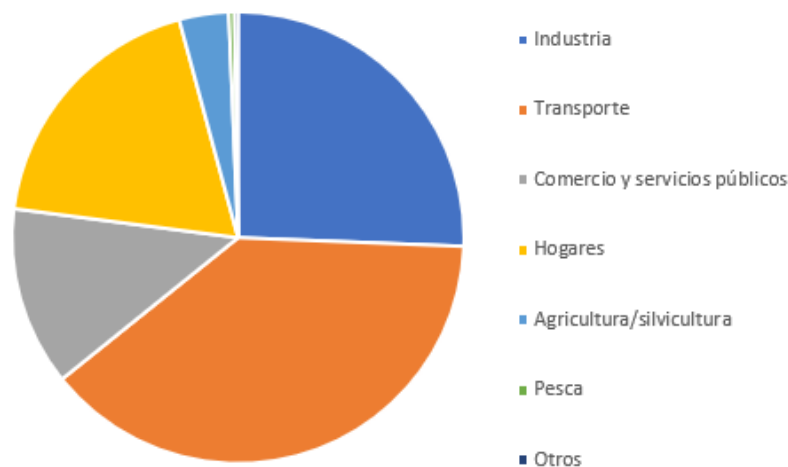


Figura 5: Diagrama de sectores que representa el consumo final de energía. Año: 2021. Fuente: [13].

En la figura 5, se aprecia que el transporte en España, en el año 2021, representa el sector que más energía consume (38,62%), seguido por la industria (25,61%) y los hogares (18,75%). Estos datos se pueden relacionar con los aportados en la figura 2, donde este sector, es aquel que más gases emite del efecto invernadero. En el caso de la pesca, el consumo energético es inapreciable en comparación a los demás.

Dentro del transporte, los medios más destacados son el ferrocarril, la carretera, transporte marítimo, aéreo o por tuberías. La carretera es el sector predominante en consumo de energía, siendo el responsable de casi el 90% del total. El transporte aéreo y marítimo son los medios que más consumen siguiendo a la carretera. En el caso del ferrocarril, empleando el 1% de la energía total, representa el 4,39% del tráfico de pasajeros y del 2,73% del tráfico de mercancías [14].

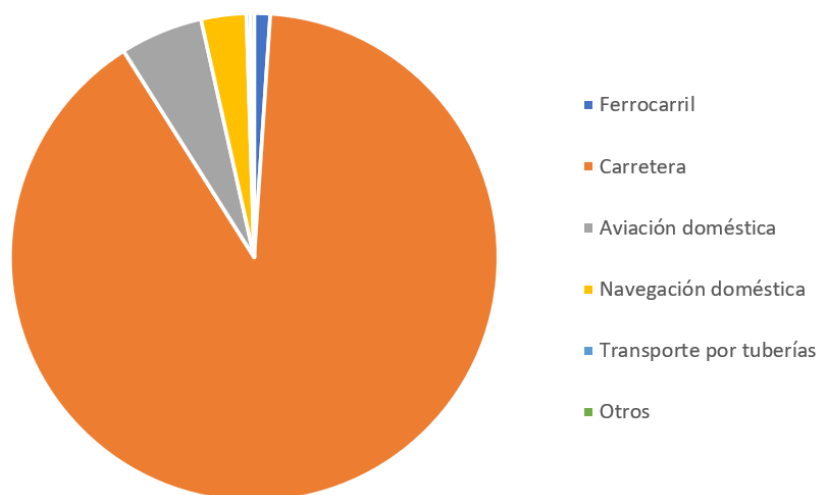


Figura 6: Diagrama de sectores que representa el consumo energético del transporte. Año: 2021. Fuente: [13].

Destacando el empleo de la energía en el sector ferroviario en la construcción de nueva infraestructura y garantizar el funcionamiento del mismo, el cual es motivo de este estudio. Dentro del funcionamiento del sistema, se diversifica la energía dependiendo de su finalidad en:

- Energía para el movimiento del tren: los trenes pueden ser de tracción eléctrica o diésel.

Los vehículos de tracción eléctrica representan un 80 % de la flota de RENFE [15]. Para su alimentación se dispone de una catenaria, hilo aéreo sobre el vehículo, o de un tercer riel electrificado que le transmite la energía. Contienen numerosas ventajas, frente a sus predecesores, respecto a potencia, limpieza o rendimiento de la máquina, alrededor del 80-90 %.

Los vehículos de tracción diésel representan casi el 20 % restante. El motor se alimentan de diésel y transmite el movimiento por medio de una transmisión mecánica o hidráulica. En este grupo se incluyen los trenes que operan con tracción eléctrica pero reciben la electricidad de un generador-alternador diésel. Presentan la ventaja de poder operar en líneas eléctricas y no requerir de un gran mantenimiento en la infraestructura, como en la tracción eléctrica. Por otra parte es mucho más contaminante y el combustible es más caro [16].

- Energía para alimentar los servicios auxiliares del tren:
 - Auxiliares técnicos: compresores, ventiladores de los motores, etc.
 - Auxiliares de confort: climatización, iluminación, etc.
- Energía para alimentar los servicios auxiliares de la infraestructura ferroviaria:
 - Auxiliares comerciales de climatización: calefacción y aire acondicionado.
 - Resto de servicios comerciales: iluminación, aseos, etc.

Para garantizar la mejor eficiencia energética dentro del sistema, se enumeran diferentes medidas dependiendo del ámbito de aplicación en el sistema ferroviario [14]:

- Infraestructura.
- Vehículo.
- Operación.

2.2.1. Infraestructura

Se define la infraestructura como el conjunto de elementos que posibilitan el funcionamiento del ferrocarril. Esta figura mantiene un papel importante en la gestión energética sostenible e inteligente del sistema ferroviario, ya que las medidas realizadas en este sector, garantizará un notable ahorro de energía en un futuro. Para ello, se debe de realizar un análisis y un diseño que satisfaga el aprovechamiento óptimo de la energía. Las estrategias empleadas en la infraestructura desde un punto de vista eléctrico [14]:

- Utilización de la regulación de los transformadores de la subestación, evitando tensiones muy bajas en los pantógrafos y reduciendo las pérdidas en los reóstatos.
- Desconexión de las subestaciones de subestaciones en hora valle o reduciendo la frecuencia de activos en el intercambio de energía entre trenes. A partir de esta medida se benefician, mayoritariamente, los cercanías y las líneas de metro.
- Utilización de subestaciones reversibles y sistemas de almacenamiento de energía. Estas subestaciones permite el paso de corriente continua de la infraestructura ferroviaria, en corriente alterna, a la red de distribución. Por lo que permite el aprovechamiento de la energía generada en el proceso de frenado de los trenes, evitando su disipación en las resistencias de freno [17]. El sistema de almacenamiento (volantes de inercia) disminuye la curva de carga, mejorando la estabilidad máquinas síncronas con rotor a imanes permanente.

- Desarrollo de una red eléctrica inteligente. A partir de esta red, se podría realizar una gestión óptima de la energía eléctrica en el sistema, produciendo mejoras en el funcionamiento y ahorro de energía. Los diferentes elementos del sistema eléctrico se agruparían en nodos susceptibles a recibir y entregar energía a la red, por lo que permitirá una producción eléctrica en la propia infraestructura y la implementación de sistemas de almacenamiento para otorgar de flexibilidad al funcionamiento del sistema ferroviario.

Los elementos externos al circuito de tracción, como son las cafeterías, taquillas, iluminación..., se deben de optimizar al máximo. Para realizar esta tarea, se recurre a las siguientes medidas [14]:

- Empleo de lámparas de bajo consumo.
- Empleo de farolas alimentadas por energía solar.
- Empleo de la tecnología LED para las señales fijas luminosas.
- Empleo de equipos de calefacción sostenibles y eficientes.

2.2.2. Vehículo

A pesar de que el material móvil actual presenta una alta eficiencia energética, principalmente el de tracción eléctrica, se debe mejorar aplicando las nuevas tecnologías. Destacando el desarrollo de los motores de máquina síncrona con rotor a imanes permanentes, nuevas tecnologías de almacenamiento, gas natural licuado o los sistemas de recuperación de energía durante el frenado [14].

2.2.2.1. Máquina síncrona con rotor a imanes permanentes

La eficiencia del consumo energético de los vehículos ha sido mejorada a partir de los importantes avances en la electrónica de potencia. El resultado de esta mejora, se concreta en la utilización, en algunos trenes, de las máquinas síncronas con rotor a imanes permanentes, en vez del motor trifásico asíncrono. El principal motivo es que presenta las mismas prestaciones que las máquinas asíncronas, carecen de elementos de conmutación, contacto por fricción o desnudo bajo tensión en su interior, y aumenta el rendimiento, oscilando entre el 97,2% y el 97,6%.

Estas son otras de las características que presentan este tipo de motor [18]:

- Alto nivel de tecnología.
- El aumento de la eficiencia en términos de rendimiento y consumo de energía (cada motor eléctrico de imán permanente) es potente y eficiente, pero también ahorra energía.
- Alta densidad de potencia por cuadro.
- Larga vida, durabilidad y fiabilidad en el tiempo.
- Peso y volumen reducidos para un diseño compacto.
- Máxima flexibilidad y el intercambio, garantizada por la estructura de cada motor e imanes permanentes.
- Menor pérdida de energía y temperatura gracias a los altos niveles de eficiencia garantizados por cada motor síncrono de imanes permanentes.

- Velocidad variable.
- Control y operación precisos a temperaturas más bajas, incluso a bajas velocidades.
- Reducción del ruido.



Figura 7: Máquina síncrona con rotor a imanes permanentes. Fuente: [18].

2.2.2.2. Sistemas de recuperación de energía

Cuando se emplea el freno regenerativo, los motores eléctricos del vehículo se convierten en generadores, utilizando la energía cinética del movimiento del vehículo para generar corriente eléctrica. Esta corriente eléctrica se dirige hacia la batería del vehículo o se inyecta en la red eléctrica, donde puede ser utilizada por otros dispositivos o vehículos eléctricos.

Por lo que si, en ese momento y en el mismo tramo, hay otro tren demandando energía, este aprovechará la energía que ha regenerado el primero. Si no hay más vehículos que necesiten esa energía en el tramo cubierto por la subestación, el propio funcionamiento del sistema la encaminará hasta esta, donde se transformará y será inyectada en la red de transporte. Por lo que este tipo de frenado contribuye de manera esencial a mejorar la eficiencia energética de este medio de transporte, ya que se puede llegar a recuperar un 30% [19].

2.2.2.3. Tecnologías de almacenamiento

La tecnología de almacenamiento a bordo del tren permite al vehículo acumular la energía regenerada por el tren durante la etapa de frenada. Por lo que se aprovecha directamente esta energía en vez de dársela a la catenaria, evitando el aumento de la tensión en el pantógrafo y reduciendo las pérdidas por transmisión de potencia a la red. Las principales tecnologías que operan en este ámbito son las baterías y ultracondensadores [20].

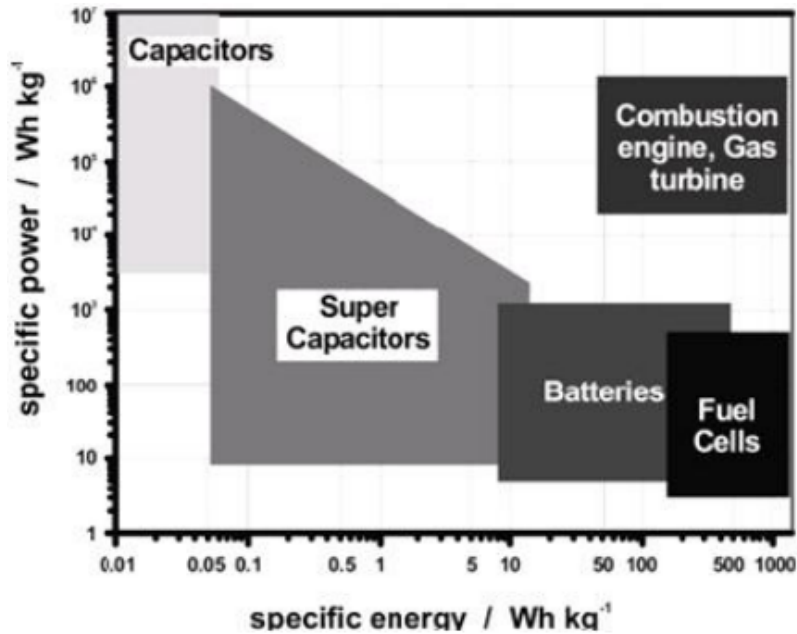


Figura 8: Relación densidad de potencia / densidad de energía para diferentes tipos de batería . Fuente: [20].

Baterías

Las baterías [20] son dispositivos que almacenas energía eléctrica por procedimientos electroquímicos y que, en función de la tecnología empleada, la devuelve posteriormente casi en su totalidad. Este ciclo puede repetirse un determinado número de veces, menor a los ultracondensadores.

Las baterías se componen de tres elementos, ánodo, cátodo y el electrolito. A medida que la corriente se extrae de la batería, los electrones comienzan a circular desde el ánodo a través del electrolito hacia el cátodo. El funcionamiento está basado esencialmente en un proceso químico reversible, es decir, los componentes se transforman químicamente en otros, que a su vez puedan retornar al estado primero en las circunstancias adecuadas. Estas circunstancias son, en el caso de las baterías, el cierre del circuito externo, durante el proceso de descarga, y la aplicación de una corriente, igualmente externa, durante el de carga.

Las baterías que más se emplean en la actualidad [20]:

- Ácido Plomo.
- Níquel Cadmio.
- NiMH.
- Litio-ion.
- $Na - NiCl_2$ (Zebra)

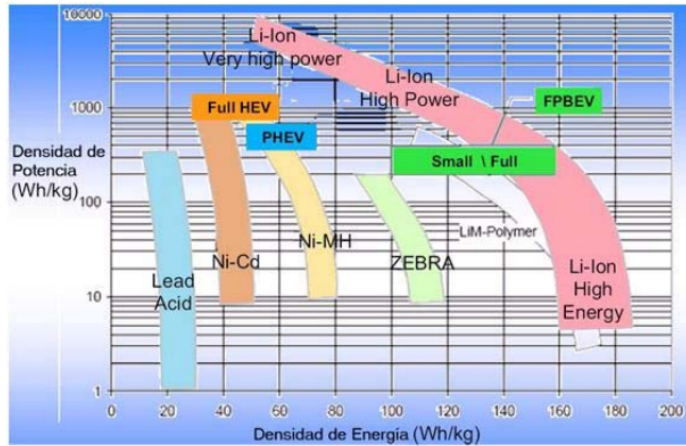


Figura 9: Relación densidad de potencia/densidad de energía para diferentes tipos de batería. Fuente: [20].

En la actualidad, el sector ferroviario ha iniciado su propio viaje hacia el fin de las emisiones recurriendo a las baterías. Una de las locomotoras que emplean este tipo de almacenamiento es la FLXdrive [21], de construcción estadounidense. Se caracteriza por la utilización de 18000 celdas de batería de iones de litio para alimentar los cuatro ejes y emplea una gestión inteligente del flujo de energía para optimizar la eficiencia. La recarga del sistemas de baterías se realizan en el depósito como un vehículo eléctrico o a través del sistema de frenado regenerativo. Se consiguió reducir el consumo en un 11 %, sin embargo, se pretende reducir hasta un 30 % en la próxima generación.



Figura 10: Locomotora FLXdrive. Fuente: [21].

Ultracondensadores

Los ultracondensadores [20] son condensadores de doble capa que almacenan energía electrostática cuando existe un potencial entre dos electrodos sumergidos en un electrolito. Aunque sea un elemento electroquímico, no existe reacción química en el almacenamiento de energía. Presenta un mecanismo irreversible, además, se puede cargar y descargar miles de veces y tiene una capacidad y densidad de energía muy superior a los condensadores electrolíticos. Destaca por ser un elemento ideal para proporcionar picos de energía durante cortos periodos de tiempo.

En la práctica se puede encontrar en el Sitras MES, integrado en la locomotora Siemens Desiro ML Cityjet Eco. Se define como un sistema de almacenamiento embarcado basado en el uso de los ultracondensadores. El banco formado por estos elementos está instalado sobre el techo del tren,

ayudando a la recuperación de parte de la energía generada en las frenadas. Se obtiene una reducción del consumo en catenaria de hasta un 30 % y de las emisiones de dióxido de carbono de hasta 80 toneladas por año. Además, este sistema ayuda a la estabilización de la tensión de la catenaria, lo cual, aumenta la disponibilidad de circulación de vehículos ferroviarios. Las características de este banco de ultracondensadores [20]:

- Energía utilizable: 0,85 [kWh].
- Máxima potencia: 2x144 [kW].
- Rango operable de tensión: 190-480 [V].
- Refrigeración: forzada.
- Dimensiones (anchura x profundidad x altura): 2000x1520x630 [mm^3].
- Peso: 820 [kg].

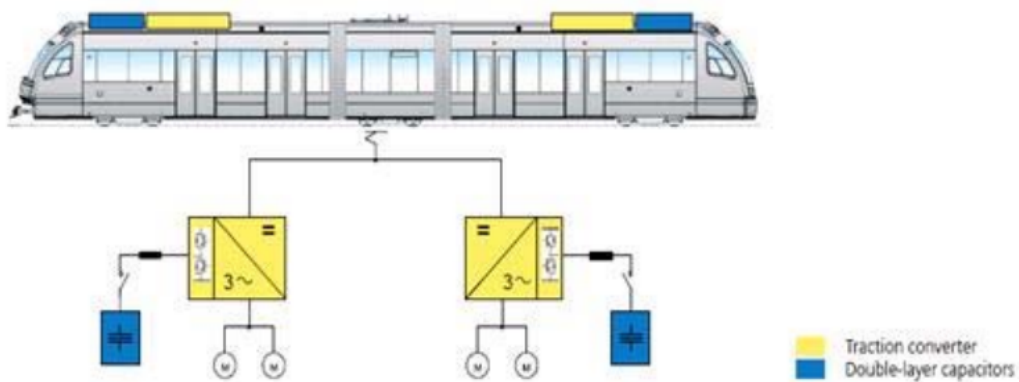


Figura 11: Esquema de Sitras MES integrated Concept. Fuente: [20].

2.2.2.4. Combustibles alternativos al diésel

En la actualidad, se estudian otros tipos de combustibles para tratar de sustituir el diésel en el sistema ferroviario. Estos combustibles se caracterizan por poseer una mayor densidad energética, además de reducir las emisiones de los GEI. Las principales apuestas son el hidrógeno y el gas natural licuado.

Gas natural licuado

El GNL es gas natural en fase líquida a una temperatura de -160 [$^{\circ}C$], por lo que se considera un líquido criogénico. Se caracteriza por estar formado en un 95 % por metano (CH_4) y contiene proporciones menores de etano, propano, butano, nitrógeno y dióxido de carbono. Además, es un combustible inodoro e incoloro que no es tóxico ni corrosivo [22].

Beneficios del gas natural licuado [22]:

- Se reduce en un 15 % la emisión de dióxido de carbono, en un 35 % la emisión de óxidos de nitrógeno y en un 95 % la emisión de partículas finas.

- Se reduce el ruido de sus motores en un 50 %
- Menos inflamable que otros combustibles.
- Su coste por kilómetros es un 30 % más económico en relación al gasóleo, un 50 % menor en comparación con la gasolina y un 20 % menor que el GLP (Gas Licuado del Petróleo).
- Reduce hasta un 90 % las emisiones contaminantes.
- Mejor combustión, control y eficiencia [23].
- Versatilidad de aplicaciones [23].
- Mayor seguridad [23].

Hidrógeno

El hidrógeno se puede emplear como combustibles gracias a las celdas de combustibles. Estos dispositivos son capaces de generar electricidad a partir del hidrógeno y oxígeno, generando como residuo agua. Por lo que se puede denominar como una tecnología limpia, al no emitir GEI.

Por otra parte, este tipo de tecnología se encuentra en una fase muy temprana debido a la escasa red de abastecimiento de hidrógeno existente y al alto coste de los sistemas de pila de combustible. Además, se debe garantizar que la obtención del hidrógeno sea a través de procesos sostenibles, como es el caso de la hidrólisis [24].

Las ventajas que presentan las celdas de hidrógeno [25]:

- Emisiones completamente inocuas.
- Menor peso que las baterías convencionales.
- Mayor densidad energética que las baterías convencionales.
- Menor uso de materias primas escasas.
- Reciclaje más fácil.
- Rapidez de recarga.

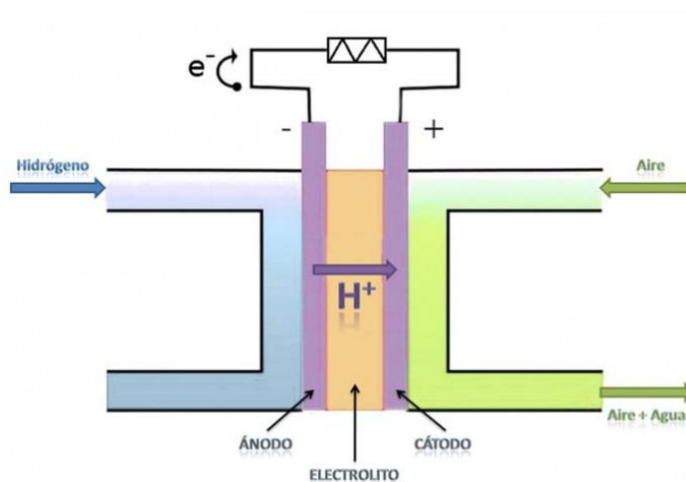


Figura 12: Pila de hidrógeno. Fuente: [26].

El primer tren que emplea esta tecnología es el Coradia iLint [27]. Su funcionamiento se basa en un sistema de propulsión basado en hidrógeno, donde las celdas de este combustible son las encargadas de generar la energía necesaria. Por otra parte, solo emite como desperdicios vapor y agua condensada, por lo que se trata de un medio sostenible, sin embargo, un estudio realizado en Alemania [28] sostiene que los trenes eléctricos con baterías son de momento más rentables, debido a la infraestructura requerida a construir. Aunque no se descarta como alternativa real en un futuro.

2.2.3. Operación

Además de la puesta en marcha de medidas en la infraestructura y material móvil, se debe de realizar acciones que operen de manera eficiente el vehículo sobre dicha infraestructura. Para ello se plantean las siguientes medidas:

- Sistemas de ayuda al conductor.
- Conducción eficiente.
- Diseño óptimo de horarios

2.2.3.1. Sistemas de ayuda al conductor

Los sistemas de ayuda al conductor [14] cada vez son más habituales debido a que se puede realizar un gran ahorro de energía, al ajustar el tiempo comercial y no llegar con antelación a la estación. Para realizar esta acción están los sistemas *off-line* y los sistemas con motor de cálculo dinámico embarcado y conectados con el sistema de tráfico. La práctica de estos sistemas suele ser en líneas de alta velocidad debido a que presentan pocas perturbaciones y márgenes de regularidad.

Los sistemas *off-line* emplean perfiles calculados mediante herramientas de predicción de perfiles eficientes, los cuales muestran al maquinista las consignas necesarias para la que realice la mejor conducción posible. Para hacer frente a retrasos o adelantos, este sistema tienen calculados otros perfiles que tratan de ajustar los tiempos establecidos.

Los sistemas con motor de cálculo dinámico embarcado y conectados con el sistema de tráfico permite, a diferencia del *off-line*, contemplar situaciones de cambios de horarios o estados degradados del tren. Este sistema consta de un motor embarcado con una base de datos que se actualiza con los parámetros que indican las condiciones de contorno, además, presenta un sistema de comunicaciones para conocer las actualizaciones de horarios y velocidades de vía, ajustando dicha base.

2.2.3.2. Conducción eficiente

La conducción eficiente o *eco-driving* [29] es un tipo de conducción que pretende disminuir el consumo de energía y emisiones de dióxido de carbono de los trenes durante el desplazamiento. Para ello, se aprovecha de la inercia del vehículo, la orografía del terreno y la energía cinética acumulada, logrando que se circule sin consumir energía durante parte del recorrido. El empleo de esta técnica de conducción y los sistemas de ayuda al conductor, puede reducir el costo de energía un 20 % .

Las estrategias para realizar este tipo de conducción depende en gran parte a las restricciones dadas por los horarios definidos, potencia de la máquina, terreno o limitación en la velocidad. Las estrategias más destacadas en el sistema ferroviario [30]:

- Reducción de la velocidad máxima de marcha.
- Tratar de realizar el trayecto a una velocidad constante.
- Tratar de mantener el tren en "deriva", es decir, aprovechar la inercia del tren. Esta manera el tren puede mantener una velocidad estable, además, evita pérdidas producidas por los frenos.

La conducción eficiente [31] se puede realizar manualmente o automáticamente. En la manual, es necesario la formación de los maquinistas para que actúen con la mayor eficiencia posible. En el automático, la velocidad se regula a partir de los datos obtenidos por el sistema de control de tráfico, por lo que es más preciso y eficiente que el manual.

2.2.3.3. Diseño óptimo de horarios

El diseño óptimo de horarios en trenes, desde un punto de vista de eficiencia energética, tiene como objetivo minimizar el consumo de energía durante las operaciones ferroviarias. Esto implica programar los horarios de manera que se aproveche al máximo la eficiencia de los trenes y se reduzca al mínimo el consumo de energía. Para tener un buen diseño se debe de garantizar [32]:

- Aumentar la duración de los viajes para reducir el consumo energético, al poder desarrollar mejor las estrategias de conducción eficiente.
- Tratar de que las salidas de los trenes no sean simultáneas para disminuir la potencia requerida en ese instante.
- Tratar de que las llegadas y salidas sean simultáneas, ya que como se ha explicado antes, se aprovecha la energía generada en los frenos de los vehículos que llegan para desplazar los trenes que salen.

3. Dinámica del transporte ferroviario

3.1. Introducción a la dinámica del transporte ferroviario

El estudio de la dinámica longitudinal de un tren es esencial para su propia explotación. Por medio de esta, se determinan aspectos tan importantes como los cálculos de los tiempos de viaje, consumos energéticos, cargas máximas...

3.1.1. Fuerzas que actúan sobre el transporte ferroviario

Un tren está afectado por numerosos y diferentes fuerzas longitudinales durante su recorrido. Estas se agrupan dependiendo de la acción realizada por el propio tren [33]:

- Fuerzas pasivas: son aquellas que soporta el tren sin que el mismo realice ninguna acción especial. Destacan la resistencia al avance y la fuerza gravitatoria.
- Fuerzas activas: son aquellas que se derivan de acciones del propio tren. Destacan las fuerzas de tracción y frenado.

3.1.2. Sistema de coordenadas

El sistema de coordenadas tomado como referencia para definir las fuerzas que actúan, es relativo a la vía por donde circula el tren. De este modo, se define un sistema con tres componentes [33]:

- Eje longitudinal: coincide con el eje de la vía.
- Eje transversal: es perpendicular al longitudinal y normal a la vía.
- Eje vertical: es perpendicular al plano que forman los carriles en su superficie superior.

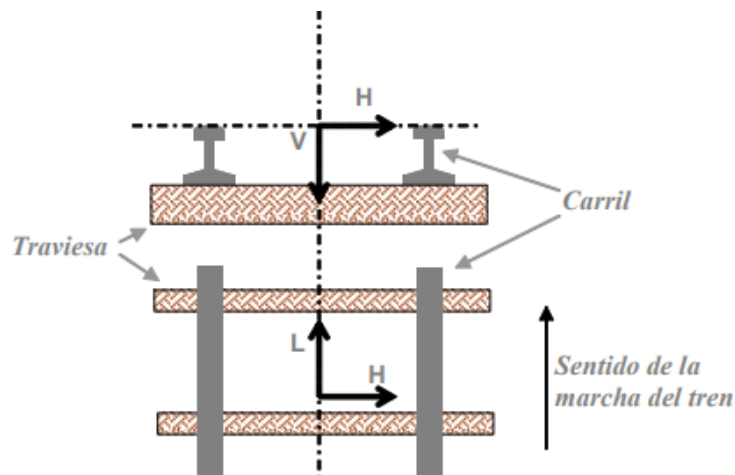


Figura 13: Ejes de coordenadas para los estudios de la dinámica longitudinal ferroviaria. Fuente: [33]

En la figura 13, quedan definidos los sentidos positivos en el sistema de coordenadas. En el caso del eje longitudinal L, coincide con la dirección de marcha del tren. Para el eje vertical V, se toma como referencia positiva, el sentido de la fuerza de la gravedad.

Cabe destacar que para el estudio de la dinámica longitudinal, el problema se centra en el eje longitudinal L. Los otros ejes, V y L, se enfocan en problemas relacionados con la estabilidad del vehículo y la infraestructura.

Para acabar de definir el sistema de coordenadas, es preciso introducir los conceptos de rampa y pendiente. En ambos casos, los tramos de las vías presentan diferentes cotas, es decir, no son horizontales. Para las rampas, son aquellas donde las cotas en el sentido de la marcha del tren van aumentando. Por lo que se toman como la coordenada de signo positivo. En las pendientes ocurre lo contrario a las rampas, por lo que se consideran con signo negativo.

Para aquellos tramos dónde la vía presenta una inclinación, se denomina como rampa y se considera con signo positivo. En el caso contrario, es decir, aumenta la altitud de la vía, se dice que en los tramos en los que la vía no es horizontal, es decir, donde tiene una inclinación, ésta se considera de signo positivo y se denomina “rampa” cuando la vía aumenta su altitud en el sentido de la marcha del tren. Por el contrario, se considera negativa y se denomina “pendiente” cuando la vía disminuye su altitud al recorrerla en el sentido de la marcha del tren.

3.1.3. Ecuación del movimiento del tren

La ecuación del movimiento del tren proviene de la célebre segunda ley de Newton, es decir, las aceleraciones que experimenta es proporcional a la fuerza neta longitudinal F recibida [33].

$$F = M \cdot a \quad (1)$$

Donde:

- F : fuerza neta longitudinal [N].
- M : masa del tren [kg].
- a : aceleración del tren [m/s^2].

La fuerza de la ecuación 1 proviene de la resultante de la resistencia de avance y de las fuerzas generadas por la gravedad, tracción y frenado. De este modo, se implementan dichos parámetros para dar lugar a la ecuación 2, que define la dinámica del tren [33].

$$F_{tf} - R_a = C_{cm} \cdot M \cdot dv/dt \quad (2)$$

Donde:

- F_{tf} : fuerza de tracción o frenado [N].
- R_a : resistencia total al avance [N].

- C_{cm} : coeficiente de masas gravitatorias.
- M : masa del tren [kg].
- dv/dt : es la expresión de la aceleración del tren [m/s^2].

3.2. Esfuerzo de tracción o frenado

Los esfuerzos de tracción o frenado son las fuerzas encargadas de aumentar o reducir la velocidad del tren. El esfuerzo de tracción (F_t) es el resultante de las fuerzas producidas por el tren en sentido de su marcha y se opone a las resistencias al avance. El esfuerzo de frenado (F_f) es la resultante de las fuerzas que se realizan desde los diferentes frenos del tren y que se oponen al avance, es decir, ejercen resistencia al avance. A la resultante de los esfuerzos de tracción y frenado presentes en un momento determinado la denominaremos esfuerzo de tracción o frenado (F_{tf})

Durante el funcionamiento del tren, es imposible de la actuación de ambos esfuerzos debido a la modernización de los sistemas de seguridad de las máquinas modernas. Estas emplean una pequeña caída de presión en la tubería general del freno del tren, cortando la tracción del tren.

Se encuentran tres modos de actuación del tren, en función de la tracción y freno [33]:

- Traccionando: cuando la fuerza neta realizada es en el sentido de la marcha. Por lo que $F_{tf} > 0$ debido a que $F_t > 0$, entonces $F_f = 0$
- Frenado: cuando la fuerza neta realizada es al contrario de la marcha. Por lo que $F_{tf} < 0$ debido a que $F_t = 0$, entonces $F_f > 0$
- En deriva: cuando la fuerza neta realizada es en el sentido de la marcha. Por lo que $F_{tf} = 0$ debido a que $F_t = 0$, entonces $F_f = 0$

3.2.1. Esfuerzo de tracción

Las ruedas motoras son los elementos que transmiten el esfuerzo de tracción al apoyarse sobre el carril y traspasar el par producido en el motor del tren. Cabe destacar, que dicho esfuerzo presenta como virtud principal la capacidad de ser muy moderado. Por lo que permite al maquinista adecuar la velocidad del tren según la marche necesite.

Las diferencias en el motor empleado por la máquina, genera esfuerzos de tracción diferentes para cada tipo. Por ello, se facilitan las curvas que determinan el esfuerzo de tracción máximo en función de la velocidad.

En este caso, al carecer de curvas, se estima que la potencia empleada en la tracción del tren es del orden entre el 80 y el 90 % de la potencia de los motores de tracción. Se define el esfuerzo de tracción a través de la ecuación 3, [33].

$$F_t = \frac{P \cdot 3600}{V} \quad (3)$$

Donde:

- F_t : esfuerzo de tracción [daN].
- P : potencia destinada a la tracción [kW].
- V : velocidad [km/h].

3.2.2. Esfuerzo de frenado

Para realizar el esfuerzo de frenado para la disminución de la velocidad de un tren, se emplea un sistema compuesto por frenos. Entre ellos destacan aquellos basados en la adherencia entre rueda y carril, fenómenos físicos o los frenos aerodinámicos. Sin embargo, para este trabajo se dividen desde el punto de vista dinámico. Así, según la magnitud del esfuerzo se distinguen entre [33]:

- Freno de emergencia: se emplea ante la necesidad de frenar de forma urgente. Utilizan el valor máximo del esfuerzo de frenado. Corta automáticamente la alimentación eléctrica de tracción mientras entra en acción.
- Freno de servicio: se emplea de forma regular en la marcha ordinaria del tren.



Figura 14: Discos de freno. Fuente: [34]

Condiciones de aplicación del freno

Las condiciones de aplicación de los frenos están regulados según las ETI, de este modo se garantiza el cumplimiento con los requisitos esenciales y garantizar la interoperabilidad del sistema ferroviario de la Unión Europea [33].

- Frenado de emergencia: 360 [kN].
- Frenado de servicio a fondo para ajustar la velocidad: 180 [kN].
- Frenado de servicios en rampas, pendientes o cuando los límites de velocidad se apliquen automáticamente: 100 [kN].

Prestaciones mínimas de los frenos

Las prestaciones mínimas de los frenos del tren de alta velocidad quedan reguladas por la ETI. En el cuadro 2, quedan definidas las deceleraciones y los tiempos de retardo que deben cumplir mínimamente los frenos de servicio y de emergencia. Por otra parte, los frenos de emergencia deben de satisfacer unas distancias de empleo del freno de emergencia, cuadro 3.

		Retardo	Deceleración entre 330-300 [km/h]	Deceleración entre 300-230 [km/h]	Deceleración entre 230-170 [km/h]	Deceleración entre 170-0 [km/h]
		s	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]	[m/s ²]
Emergencia	Caso A	3	0,85	0,90	1,05	1,20
Emergencia	Caso B	3	0,65	0,70	0,80	0,90
Servicio	Caso B	2	0,35	0,35	0,60	0,60

Cuadro 2: Prestaciones mínimas de los frenos. Fuente: [33].

		Retardo	Distancia entre 330-0 [km/h]	Distancia entre 300-0 [km/h]	Distancia entre 250-0 [km/h]	Distancia entre 200-0 [km/h]
		s	[m]	[m]	[m]	[m]
Emergencia	Caso A	3	4530	3650	2430	1500
Emergencia	Caso B	3	5840	4690	3130	1940

Cuadro 3: Distancias máximas de frenado con freno de emergencia. Fuente: [33].

Donde:

- Caso A: cuando el tren en horizontal, con una climatología normal, con carga normal (80 [kg] por asiento) y un módulo de freno eléctrico aislado.
- Caso B: cuando ocurre el caso A y, además, un distribuidor de freno aislado, una adherencia rueda carril reducida y el coeficiente de fricción entre la guarnición y el disco de freno reducido por la humedad.

3.2.3. Adherencia

La adherencia es la resistencia que se opone al deslizamiento de las ruedas del tren sobre los carriles. Esta debe de tener un valor razonable para tratar de evitar el deslizamiento de las ruedas del móvil sobre las vías del tren. De este modo, este coeficiente, definirá la efectividad con la que el vehículo podrá emplear su peso para traccionar o frenar sin patinar.

El deslizamiento entre la rueda y vía se produce cuando el par motor es muy alto y superior al par resistente. Por lo que se genera una nueva limitación, además de la potencia de la máquina, el límite de adherencia. El esfuerzo de tracción y frenado máximo que se puede emplear está delimitado por la ecuación 4, [33].

$$F_t = n \cdot M_r \cdot g \cdot \mu_v \cdot 100 \quad (4)$$

Donde:

- F_t : fuerza de tracción o frenado [daN].

- M_r : masa adherente [ton].
- g : aceleración de la gravedad [m/s^2]
- μ_v : coeficiente de adherencia a la velocidad.

Por medio de la figura 15, se explican las limitaciones de la potencia nombradas con anterioridad.

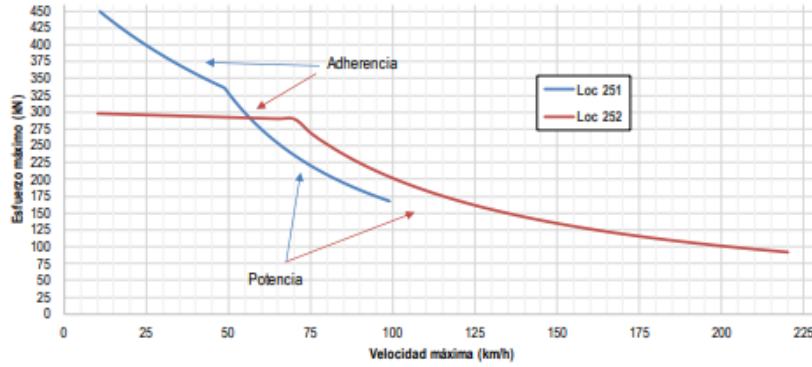


Figura 15: Fuerza de tracción limitada por potencia y por adherencia en máquinas 251 y 252. Fuente: [33].

En la figura 15 se encuentran dos máquinas distintas. La curva roja representa la curva de tracción de la máquina 252 (5.600 [kW], 90 [ton]), mientras que la azul, de la 251 (4.650 [kW], 138 [ton]). Se puede apreciar perfectamente las limitaciones generadas por la adherencia y la potencia de la máquina. En el primer tramo de ambas, limitado por la adhesión, el esfuerzo de tracción es superior en la máquina 251 debido a la diferencia de peso. En el segundo tramo, limitado por la potencia, al poseer la máquina 252 una mayor potencia, los esfuerzos de tracción serán superiores.

Valor de la adherencia en marcha

El valor que determina el factor de adherencia [33] depende de la velocidad, es decir, disminuye si esta lo hace. Según RENFE, se debe de emplear la ecuación 5 para poder obtenerlo.

$$\mu_v = \mu_o \cdot \left(0,2115 + \frac{33}{V + 42} \right) \quad (5)$$

Donde:

- μ_v : coeficiente de adherencia a la velocidad.
- μ_o : coeficiente estático de adherencia, el que corresponde para el tren en estático.
- V : velocidad del tren [km/h].

El coeficiente de adherencia suele ser un parámetro otorgado por el fabricante, su valor oscila de 0,2 a 0,4. Dicho valor depende del motor, continuo o trifásico, y si dispone de equipo antipatinaje.

Existen una serie de condiciones en la vía que permiten elevar la adherencia. Las principales medidas son relacionados con el buen mantenimiento de los carriles, para ello se debe de garantizar un buen lavado, nivelado y soldadura de las vías. En el caso de que el estado superficial de la vía contenga suciedad, se puede mejorar la adherencia utilizando arena.

3.3. Resistencia total al avance

La resistencia total al avance es definido como la suma de todas las resultantes de las fuerzas que oponen dificultades al movimiento del móvil, en este caso del tren. Se toman siempre como un componente negativo.

Para obtener el correcto valor de la resistencia total al avance se debe de tener en cuenta, las fuerzas pasivas no gravitatorias y el efecto de la fuerza de la gravedad generados en pendientes y rampas. La expresión que determina este parámetro queda reflejado en la ecuación 6, [33].

$$R_a = (R_{ar} + R_{ac} + R_g)/10 \quad (6)$$

Donde:

- R_a : resistencia total al avance [N].
- R_{ar} : resistencia al avance en recta [daN].
- R_{ac} : resistencia al avance en curva [daN].
- R_g : resistencia gravitatoria al avance [daN].

3.3.1. Resistencia al avance en recta

La resistencia al avance en recta [33] se expresa como una ecuación polinómica de segundo grado, conocida por la ecuación de Davis, ecuación 7. Esta es la metodología más empleada y contrastada, en contraposición del sumatorio de las resistencias mecánicas, aerodinámicas y entrada de aire.

La resistencia al avance en recta depende de las siguientes características:

- Masa del tren.
- Forma del tren.
- Área de la sección transversal.
- Velocidad de circulación.
- Superficie mojada.

$$R_{ar} = (A + B \cdot V + C \cdot V^2) \quad (7)$$

Donde:

- R_{ar} : resistencia al avance en recta [daN].
- A, B y C : coeficientes que dependen de las características físicas del material rodante, que se miden, respectivamente, en [daN], [$daN/(km/h)$] y [$daN/(km/h)^2$].
- V : velocidad del tren [km/h].

Coeficientes		
A	B	C
[daN]	[$daN/(km/h)$]	[$daN/(km/h)^2$]
288,5	3,469	0,0509

Cuadro 4: Coeficientes absolutos.

El motivo de emplear la ecuación de Davis, frente a otras, es evitar errores significativos en el cálculo de la resistencia al avance en recta. En otras ecuaciones polinómicas, se tiene en cuenta la masa cuando los coeficientes B y C no dependen de ella, sino de la velocidad. Por lo que se generaría un resultado erróneo.

3.3.2. Resistencia al avance en curva

La resistencia al avance en curva se define como la resistencia adicional a la rodadura que un tren debe de superar al circular por un tramo curva de la vía aparece una fuerza longitudinal que actúa sobre él, retardándolo. La aparición es motivo de las siguientes causas [33]:

- Solidaridad de las ruedas y ejes.
- Paralelismo de los ejes.
- Fuerza centrífuga.

Por lo que la expresión que calcula la resistencia al avance en curva total es la ecuación 8, [33].

$$R_{ac} = M \cdot \frac{k}{R} \quad (8)$$

Donde:

- R_{ac} : resistencia al avance en curva [daN].
- M : masa del tren [ton].
- k : constante que depende del ancho de la vía.
- R : radio de la curvatura [m].

Por otra parte, se puede obtener el valor de la resistencia al avance en curva por medio de la gráfica en la figura 16.

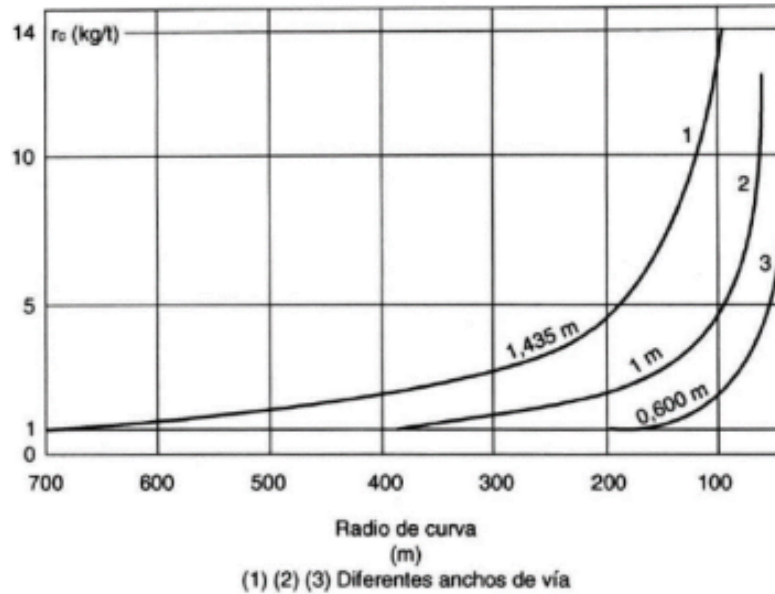


Figura 16: Resistencia al avance en curva en función del radio y del ancho de vía. Fuente: [33].

Como se observa en la figura 16, se puede llegar a la conclusión de que a mayor ancho de vía, para un mismo radio de curvatura, mayor será la resistencia ejercida en el tren. Además, a menor radio de curvatura, se incrementa el valor de la resistencia por lo que el tren deberá emplear mayor esfuerzo de tracción para no frenar.

3.3.3. Resistencia gravitatoria al avance

La aparición de la resistencia gravitatoria depende del tramos ferroviario por donde circula el tren. En el caso de que el tramo de la vía sea recto, esta resistencia se anula, es decir, no se tiene en cuenta para obtener la resistencia total al avance.

La fórmula que determina el valor es la ecuación 9, [33].

$$R_g = M \cdot i \cdot g \cdot 10^{-1} \quad (9)$$

Donde:

- R_g : resistencia gravitatoria al avance [daN].
- i : inclinación [mm/m].
- g : aceleración de la gravedad [m/s^2].
- M : masa del tren [ton].

La inclinación presenta un valor negativo si es una rampa, mientras que para las pendientes positivo.

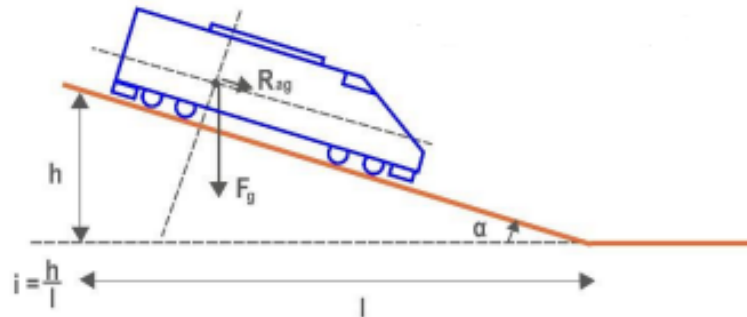


Figura 17: Resistencia gravitatoria. Fuente: [33].

Rampa ficticia

La rampa ficticia es la inclinación que se toma cuando el tren circule por un tramo que presenta desnivel y curva. Para evitar la necesidad de emplear el perfil real y la planta para los cálculos, simplificándolos. Esta nueva inclinación se define en la ecuación 10, [33].

$$i = i_r + r_c \quad (10)$$

Donde:

- i : inclinación ficticia [mm/m].
- i_r : inclinación real [mm/m].
- r_c : resistencia específica en curva [mm/m].

3.4. Coeficiente de masas gravitatorias

Cuando el tren aumenta o disminuye su velocidad, es preciso aumentar la velocidad de traslación en el sentido longitudinal de la vía y de rotación de diversas masas que giran. Estas masas giran con mayor velocidad al aumentar la del propio tren. Como masas giratorias, se pueden definir las ruedas, los ejes y los discos de frenos, entre otros.

Como se ha indicado, las masas aumentan la velocidad cuando el tren aumenta (y viceversa), por lo que se debe de emplear parte de la fuerza para acelerar o frenar de manera angular estas masas giratorias. Por lo que se genera un efecto de inercia al producir dichas fuerzas, cuyo efecto, es la aparición de una aceleración [33], ecuación 11.

$$a = \frac{F_t}{(M + (\sum M_{gi} \cdot \frac{r_i^2}{R_i^2}) \cdot 100)} \quad (11)$$

Donde:

- a : aceleración [m/s^2].
- F_t : fuerza de tracción o frenado [daN].
- M : masa del tren [ton].
- M_g : masa del conjunto giratorio [ton].
- r : radio de inercia polar del conjunto [m].
- R : radio de las ruedas motrices [m].

Se puede concluir que a los efectos del cálculo de la aceleración o frenado, a la masa del tren, incluyendo la carga, hay que añadirle el valor de la suma de cada una de las masa giratorias multiplicada por la relación al cuadrado entre el radio de inercia polar y de giro, ecuación 11. Cabe destacar que el valor suele ser fijo en cada tren, por lo que se suele expresar como un coeficiente de masas giratorias [33] (C_{mg}). El coeficiente se calcula empleando la ecuación 12.

$$C_{mg} = 1 + \frac{\sum(M_{gi} \cdot \frac{r_i^2}{R_i^2})}{M} \quad (12)$$

Donde:

- C_{mg} : coeficiente de masas giratorias.
- M_g : masa del conjunto giratorio [ton].
- r : radio de inercia polar del conjunto [m].
- R : radio de las ruedas motrices [m].
- M : masa del tren [ton].

Se suelen utilizar valores para el coeficiente de masas giratorias (C_{mg}) del orden 1,045 a 1,07 [33].

3.5. Potencia demandada

El tren va a requerir potencia para satisfacer dos prioridades, generar el esfuerzo de tracción y prestar servicios auxiliares. La primera de ellas es la que más potencia va a precisar, necesaria para desplazarse por los tramos definidos. En el caso de prestar servicios. Dicha potencia se encargará de alimentar, por ejemplo, la iluminación dentro del tren o las conexión de carga de dispositivos de los viajeros. La potencia demandada total se establece como la suma de dichas potencias, ecuación 13.

$$P_d = P_t + P_{aux} \quad (13)$$

Donde:

- P_d : potencia demandada [W].
- P_t : potencia de tracción [W].
- P_{aux} : potencia auxiliar, 845 [W].

La potencia de tracción se calcula dependiendo de cómo está trabajando el tren, por lo que hay que distinguir entre los siguientes casos:

- Desplazamiento: el esfuerzo de tracción es mayor a cero. La potencia de tracción en este caso queda definido por la ecuación 14.

$$P_t = \frac{F_t \cdot V}{\eta} \quad (14)$$

Donde:

- P_t : potencia de tracción [W].
 - F_t : esfuerzo de tracción [N]
 - V : velocidad del tren [m/s]
 - η : rendimiento en regeneración.
- Parado: el esfuerzo de tracción es nulo, por lo que no se requiere de potencia.

$$P_t = 0 \quad (15)$$

Donde:

- P_t : potencia de tracción [W].
- Frenando: el esfuerzo es negativo, y el valor de la potencia empleada depende de si hay freno regenerativo:
 - Sin freno regenerativo, la potencia recuperada al frenar es nula.

$$P_{reg} = 0 \quad (16)$$

Donde:

- P_{reg} : potencia recuperada [W].

- Con freno regenerativo, la potencia recuperada:

$$P_{reg} = F_f \cdot V \cdot \eta_{reg} \quad (17)$$

Donde:

- P_{reg} : potencia recuperada [W].
- F_f : esfuerzo de frenado [N].
- V : velocidad [m/s].
- η_{reg} : eficiencia del frenado regenerativo.

La potencia recuperada, por medio del freno regenerativo, es almacenada en un sistema de almacenamiento de baterías. Entonces, se modifica la ecuación 14 para introducir dicha potencia almacenada, ecuación 18.

$$P_d = P_t + P_{aux} - P_{bat} \quad (18)$$

Donde:

- P_d : potencia demandada [W].
- P_t : potencia de tracción [W].
- P_{aux} : potencia auxiliar [W].
- P_{bat} : potencia almacenada en las baterías [W].

Se debe de tener en cuenta [35], de las baterías, su pérdida de capacidad química para retener energía y por lo tanto la merma de su rendimiento y la razón de pérdidas en la autonomía con el paso del tiempo, es decir, la degeneración de la misma. Esta es causada principalmente por:

- *Calendar life*: se refiere a la vida útil de la misma basada en el tiempo, independientemente de su uso o ciclos de carga y descarga. Se representa a partir de la ecuación 19.

$$FOL = \frac{C_{bat}}{Vidautil} \quad (19)$$

Donde:

- FOL : fracción de vida perdida [kW].
- C_{bat} : capacidad de la batería [kWh].
- $Vidautil$: tiempo de funcionamiento de la batería [horas].
- *Throughput*: se refiere a la capacidad de una batería para suministrar energía o corriente de manera efectiva durante un período de tiempo determinado. Se representa a partir de la ecuación 20, [36].

$$FOL = \frac{E_{batd}}{c} \quad (20)$$

Donde:

- FOL : fracción de vida perdida [kWh/ciclos].
- E_{batd} : energía descargada [kWh].

- c : ciclos de la batería.

Además, es importante definir el concepto de *C-rate*. Este parámetro establece la relación entre la corriente de carga o descarga y la capacidad nominal de la batería. Un *C-rate* alto implica una carga o descarga más rápida, por lo que afecta directamente a la vida útil de la batería y su rendimiento al poder generar un estrés excesivo en la batería y reducir su capacidad y duración.

4. Resolución del problema

Para la resolución y visualización del problema emplean dos softwares distintos, Matlab y GAMS. El primero de ellos exporta los datos de partida a GAMS y permite crear las diferentes gráficas para su posterior estudio. En el segundo, se desarrolla el algoritmo y se ejecuta la simulación de los diferentes casos, optimizando las variables de interés.

El modelo matemático desarrollado en GAMS se elabora por medio de las ecuaciones descritas en el apartado 3 de este estudio, donde se establece la dinámica del tren y los balances de energías que rigen el desplazamiento de un tren de tracción eléctrica, las variables a calcular, parámetros, restricciones y funciones objetivo a optimizar. Su resolución se realiza a partir de la definición de distintos intervalos de tiempo (Δt) y como un problema de programación no lineal, es decir, se optimiza la función objetivo tomando en cuenta distintas restricciones no lineales. Este intervalo de tiempo determina la duración del recorrido entre dos tramos del trayecto, dividiendo el total del trayecto en una serie de subtramos limitados entre el punto kilométrico inicial ($x-1$) y final (x).

El flujo seguido hasta llegar a la simulación del modelo está representado en la figura 18.

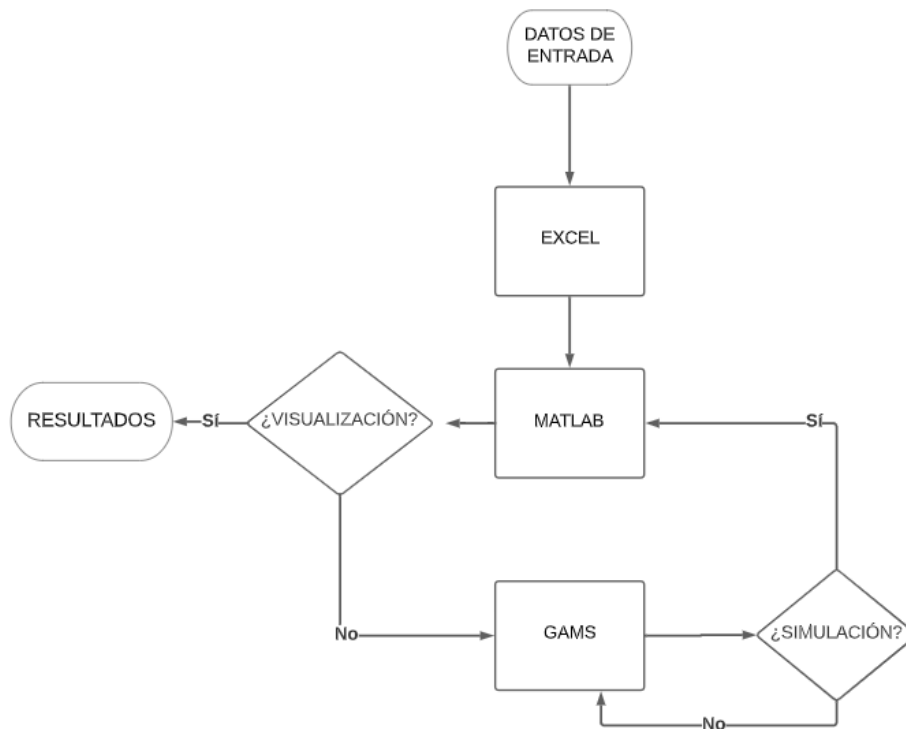


Figura 18: Diagrama de flujo.

Los datos de entrada se encuentran inicialmente definidos en un archivo de Excel, por lo que para el programa GAMS, es imposible utilizarlos. Es por ello que se deben de importar, en un primer lugar, a Matlab. Este software es capaz de generar un archivo .gdx para que GAMS pueda trabajar con los datos de partida. A partir de estos y las diferentes ecuaciones desarrolladas en el algoritmo en GAMS, se procede a la simulación y generación de un archivo .gdx con los resultados de la misma. Este último archivo con la solución obtenida, es devuelto a Matlab para su tratamiento y visualización por medio de gráficas. En el diagrama de flujo, figura 18, se establece la ruta seguida para solucionar este problema.

En este apartado desarrolla el modelo matemático del tren operando con una conducción eficiente, un sistema de baterías para el almacenamiento y venta de excedentes. El principal motivo es que representa la estrategia más completa de todas, ya que se compone a partir de una combinación de las demás.

4.1. Datos de partida

Los datos de partidas son aquellos que son conocidos a lo largo del recorrido y se comprenden por las características del terreno, restricciones del trayecto y características del tren. Se definen en el GAMS los siguientes:

- $V_{max}(x)$: velocidad máxima permitida [km/h].
- $R_{curva}(x)$: radio de curvatura [m].
- $i(x)$: pendiente del trayecto [mm/m]
- $Dis\mu(x)$: punto kilométrico del recorrido [km].
- $Aux(x)$: parámetro para conocer la localización de las estaciones.
- $T_{final}(x)$: tiempo total de duración del recorrido establecido [min].
- a : coeficiente específico ecuación de Davis para la resistencia al avance por recta, 288,5 [daN].
- b : coeficiente específico ecuación de Davis para la resistencia al avance por recta, 3,469 [daN/(km/h)].
- c : coeficiente específico ecuación de Davis para la resistencia al avance por recta, 0,0509 [daN/(km/h)²].
- P_{max} : potencia máxima de tracción, 8800 [kW].
- P_{fren} : potencia máxima de frenado, -4200 [kW].
- P_{aux} : potencia de los servicios auxiliares, 845 [kW].
- m : es la masa del material rodante, 322 [t].
- a_{max} : es la aceleración máxima de confort del tren, 0,3 [m/s^2].
- a_{min} : es la aceleración mínima de confort del tren, -0,3 [m/s^2].
- g : aceleración de la gravedad, 9,8 [m/s^2].
- m_{adh} : es la masa del material rodante proyectada sobre las ruedas motrices, 272 [ton].
- r_{via} : coeficiente de resistencia en curva del tren, 800.
- μ_0 : coeficiente estático de adherencia del tren, 0,32.
- μ_a : coeficiente de adherencia, 0,2115.
- μ_b : coeficiente de adherencia, 33.
- μ_c : coeficiente de adherencia, 42.
- η_t : rendimiento del sistema de tracción, 85 %.
- F_{0m} : límite de tracción por adherencia, 800 [kN].

- F_A : coeficiente de tracción por adherencia en curva, 0,0121 [kN].
- F_B : coeficiente de tracción por adherencia en curva, -4,1395 [kN].
- F_C : coeficiente de tracción por adherencia en curva, 602,961 [kN].
- F_D : coeficiente de tracción por adherencia en curva, 602,961 [kN].
- η_{bat} : rendimiento de la batería, 90 %.
- η_{reg} : rendimiento de regeneración, 70 %.
- $Precio_{ener}$: precio de compra de la energía de la red, 0,13 [€/kWh].
- $Precio_{venta}$: precio venta de excedentes, 0,05 [€/kWh].
- $Vida_{util}$: vida útil sistema de baterías, 10 [años].
- $Coste_{bat}$: coste batería, 800 [€/kWh].
- SoC_{min} : mínima energía acumulada en el sistema de baterías respecto a su capacidad nominal, 20 %.
- $Crat_{max}$: potencia instantánea máxima de intercambio de la batería es 2 veces su capacidad.

4.2. Variables

Las variables representan las incógnitas o valores desconocidos del modelo matemático. Se pueden encontrar en este algoritmo las siguientes:

- z : función objetivo [€].
- $Pot(x)$: potencia de tracción [kW].
- $Pot_{neg}(x)$: potencia de frenado del tren [kW].
- $Pot_{bat}(x)$: potencia batería [kW].
- $Pot_{cons}(x)$: potencia demandada [kW].
- $Pot_{batc}(x)$: potencia batería carga [kW].
- $Pot_{batd}(x)$: potencia batería descarga [kW].
- $Pot_{reg}(x)$: potencia regenerada [kW].
- Pot_{auxreg} : potencia regenerada para reducir los servicios auxiliares [kW].
- Pot_{auxred} : potencia restante de los servicios auxiliares [kW].
- $Pot_{exc}(x)$: potencia excedente [kW].
- $v(x)$: velocidad [m/s].
- $ac(x)$: aceleración en [m/s^2].
- $t(x)$: tiempo [s].
- $Ft(x)$: esfuerzo de tracción [kN].
- $Ra_N(x)$: resistencia de avance [N].

- $Ra_{KN}(x)$: resistencia de avance en recta [kN].
- $Ra_{TKN}(x)$: resistencia total de avance [kN].
- $T_{par}(x)$: tiempo que permanece el tren en la parada [s].
- $t_{llegada}(x)$: tiempo de llegada a las estaciones [s].
- $E_{cons}(x)$: energía que consume el tren [kWh].
- $E_{batc}(x)$: energía batería carga [kWh].
- $E_{batd}(x)$: energía batería descarga [kWh].
- $E_{bat}(x)$: energía batería [kWh].
- $E_{exc}(x)$: energía excedente [kWh].
- C_{bat} : capacidad de la batería [kWh].
- $Coste_{tren}(x)$: coste operación del tren por trayecto sin el coste de las baterías[€].
- $Venta_{exc}(x)$: venta de excedente [€].
- $Coste_{bat}$: coste de adquisición de la batería [€].

4.3. Restricciones

En GAMS, las restricciones son condiciones que limitan o controlan las soluciones de un modelo matemático. Estas restricciones se definen mediante ecuaciones o desigualdades y se utilizan para representar las limitaciones o requisitos que deben cumplirse en un problema específico. Están definidas a partir de variables, parámetros o constantes implementados en el algoritmo. Se destacan las siguientes restricciones:

- La velocidad está acotada superiormente por la velocidad máxima de circulación posible:

$$v.up(x) = v_{max}(x) \cdot \frac{1000}{3600} \quad (21)$$

- La velocidad en el último instante es nula:

$$v.fx('final') = 0 \quad (22)$$

- La aceleración, positiva y negativa está acotada por la aceleración máxima permitida:

$$ac.up(x) = a_{max} \quad (23)$$

$$ac.lo(x) = a_{min} \quad (24)$$

- Se establece como tiempo inicial el instante 0 [s] y el final a los 63 minutos:

$$t.fx('inicio') = 0 \quad (25)$$

$$t.fx(x)(ord(x) \text{ eq } card(x)) = T_{final} \quad (26)$$

- La potencia empleada está acotada superiormente por la potencia máxima:

$$Pot.up(x) = P_{max} \quad (27)$$

- La potencia regenerada está acotada superiormente por la potencia máxima:

$$Pot_{reg.up}(x) = P_{max} \quad (28)$$

- Se inicializan todas las energías a 0 [kWh]:

$$E_{cons}.fx("inicio") = 0 \quad (29)$$

$$E_{neg}.fx("inicio") = 0 \quad (30)$$

$$E.fx("inicio") = 0 \quad (31)$$

$$E_{batc}.fx("inicio") = 0 \quad (32)$$

$$E_{batd}.fx("inicio") = 0 \quad (33)$$

$$E_{reg}.fx("inicio") = 0 \quad (34)$$

$$E_{aux}.fx("inicio") = 0 \quad (35)$$

$$E_{exc}.fx("inicio") = 0 \quad (36)$$

- Se inicializa la condición de tiempo de parada:

$$T_{par}.fx(x) = 0; \quad (37)$$

$$T_{par}.fx(x)(ord(x) > 1 \text{ And } aux(x) \text{ eq } 0) = tpar \quad (38)$$

- Se establece que la capacidad mínima de la batería es de 0 [kWh]:

$$C_{bat.lo} = 0 \quad (39)$$

4.4. Ecuaciones

Las ecuaciones definidas en el GAMS permiten obtener los valores de las variables y simular el comportamiento del tren para los diferentes casos. El origen y desarrollo de estas ecuaciones están presentes en el apartado 3 de este documento.

La simulación del MRUA del tren, en el GAMS, está definido por las ecuaciones 40-41. Este depende de la velocidad, tiempo de aceleración y la posición del tren.

$$dism(x) = dism(x-1) + v(x-1) \cdot (t(x) - t(x-1)) + 0,5 \cdot ac(x-1) \cdot \sqrt{(t(x) - t(x-1))}, \text{ si } \forall x > 1 \quad (40)$$

$$v(x) = v(x-1) + ac(x-1) \cdot (t(x) - t(x-1)), \text{ si } \forall x > 1 \quad (41)$$

El intervalo de tiempo presenta una restricción para un tiempo mínimo de 0,1 [s] entre dos puntos del recorrido, ecuación 42. En el caso de que el tren esté en una parada, se incrementa el tiempo añadiendo la duración de esta, ecuación 43. Para determinar el tiempo de llegada final se emplea la ecuación 44.

$$t(x) \geq t(x-1) + 0,1, \text{ si } \forall x > 1 \quad (42)$$

$$t(x) = t(x-1) + T_{par}(x), \text{ si } \forall x > 1 \wedge aux(x) = 0 \quad (43)$$

$$t_{llegada}(x) = t(x), \text{ si } aux(x) \neq 0 \wedge V_{max}(x) = 0 \quad (44)$$

La resistencia en curva depende de la anchura de las vías, de la masa del tren y del radio de curvatura. Su valor se obtiene por medio de la ecuación 45.

$$R_{curva} = \frac{r_{via} \cdot m \cdot 10}{Rc(x) \cdot 1000} \quad (45)$$

La resistencia al avance en recta, para cada tramo, se calcula por medio de la ecuación de Davis, ecuación 46. Una vez se ha obtenido este valor, se suma a la resistencia de avance por curva y gravitatoria, ecuación 48, para poder obtener la resistencia al avance total. Antes, se debe de cambiar la unidad de la resistencia total al avance en recta de newtons a kilonewtons, ecuación 47.

$$Ra_N(x) = (a + v(x) \cdot 3,6 \cdot b + c \cdot (v(x) \cdot 3,6) \cdot 2) \cdot 10, \forall x \quad (46)$$

$$Ra_{KN}(x) = \frac{Ra_N(x)}{1000}, \forall x \quad (47)$$

$$Ra_{TKN}(x) = Ra_{KN}(x) + g \cdot m \cdot \sin(\arctan(\frac{i(x)}{1000})) + R_{curva}(x), \forall x \quad (48)$$

Se define el esfuerzo de tracción del vehículo a partir de la ecuación 49. Este depende de la resistencia al avance total, calculado anteriormente, la aceleración de la máquina, la masa y el rendimiento del sistema de tracción. Además, se establecen los valores máximos y mínimos en los que el tren puede trabajar. Como valores máximos, se encuentran los esfuerzos obtenidos en las ecuaciones 50, 51 y 52, las cuales representan respectivamente las limitaciones en la parte recta, recta con pendiente y curva. En el caso del mínimo, se emplea la ecuación 53. Estos valores están muy influenciados por los coeficientes de adherencia y tracción por adherencia en cada punto del trayecto.

$$Ft(x) = \frac{m \cdot ac(x) + Ra_{TKN}(x)}{\eta_t}, \forall x \quad (49)$$

$$Ft(x) \leq \frac{m_{adh} \cdot g \cdot \mu_0 \cdot \left(\mu_a + \frac{\mu_b}{v(x) \cdot 3,6 + \mu_c} \right)}{\eta_t}, \forall x \quad (50)$$

$$Ft(x) \leq F_{0m}, \forall x \quad (51)$$

$$Ft(x) \leq F_{maxA} \cdot (v(x) \cdot 3,6)^3 + F_{maxB} \cdot (v(x) \cdot 3,6)^2 + F_{maxC} \cdot (v(x) \cdot 3,6) + F_{maxD}, \forall x \quad (52)$$

$$Ft(x) \geq \frac{-m_{adh} \cdot g \cdot \mu_0 \cdot \left(\mu_a + \frac{\mu_b}{v(x) \cdot 3,6 + \mu_c} \right)}{\eta_t}, \forall x \quad (53)$$

Se desarrolla el balance de potencia del vehículo, donde la potencia positiva es mayor o igual a cero y la negativa menor o igual a cero. La suma de estas potencias debe ser igual al producto del esfuerzo del tren por su velocidad en ese instante, ecuación 56.

$$Pot(x) \geq 0, \forall x \quad (54)$$

$$Pot_{neg}(x) \leq 0, \forall x \quad (55)$$

$$(Pot(x) + Pot_{neg}(x) \cdot 0,999) = (v(x) \cdot Ft(x)), \forall x \quad (56)$$

La potencia total demandada por el tren se define mediante la ecuación 59. Las variables que definen esta ecuación son la potencia consumida, la potencia auxiliar que no se ha conseguido regenerar y la potencia de descarga de la batería. Por otra parte, se establece la capacidad máxima de carga a partir de la potencia de frenado y el rendimiento de la batería, ecuación 57.

$$Pot_{batc}(x) \leq -Pot_{neg}(x) \cdot \eta_{bat}, \forall x \quad (57)$$

$$Pot_{bat}(x) = Pot_{batc}(x) - Pot_{batd}(x), \forall x \quad (58)$$

$$Pot_{cons}(x) = Pot(x) + Pot_{auxred}(x) - Pot_{batd}(x), \forall x \quad (59)$$

$$Pot_{aux} = Pot_{auxred}(x) - Pot_{auxreg}(x), \forall x \quad (60)$$

Se establece una restricción en la batería con el fin de evitar que se cargue y descargue a la vez, ecuación 61. La potencia de carga de la batería se obtiene a partir de la potencia regenerada cuando el tren frena (ecuación 62), aunque parte de esta última se devuelve a la red y se utiliza para atenuar el gasto de los servicios auxiliares, ecuación 63.

$$Pot_{batc}(x) \cdot Pot_{batd}(x) = 0, \forall x \quad (61)$$

$$Pot_{reg}(x) = -1 \cdot Pot_{neg}(x) \cdot n_{reg}, \forall x \quad (62)$$

$$Pot_{reg}(x) = \frac{Pot_{batc}(x)}{n_{bat}} + Pot_{exc}(x) + Pot_{auxreg}, \forall x \quad (63)$$

Las energías de carga, descarga, regeneradas y excedidas se calculan, respectivamente, a partir de las siguientes ecuaciones:

$$E_{batc}(x) = Pot_{batc}(x) \cdot \left(\frac{t(x) - t(x-1)}{3600} \right), \forall x > 1 \quad (64)$$

$$E_{batd}(x) = Pot_{batd}(x) \cdot \left(\frac{t(x) - t(x-1)}{3600} \right), \forall x > 1 \quad (65)$$

$$E_{reg}(x) = Pot_{reg}(x) \cdot \left(\frac{t(x) - t(x-1)}{3600} \right), \forall x > 1 \quad (66)$$

$$E_{exc}(x) = Pot_{exc}(x) \cdot \left(\frac{t(x) - t(x-1)}{3600} \right), \forall x > 1 \quad (67)$$

Para calcular la energía total que posee la batería en ese momento, se debe de sumar la empleada en ese instante y la que se tenía en el tramo anterior, 68. La energía consumida por su parte, se obtiene a partir de la potencia requerida y el tiempo de empleo, ecuación 69.

$$E_{bat}(x) = E_{bat}(x-1) + \frac{Pot_{bat}(x) \cdot (t(x) - t(x-1))}{3600}, \forall x > 1 \quad (68)$$

$$E_{cons}(x) = Pot_{cons}(x) \cdot \left(\frac{t(x) - t(x-1)}{3600} \right), \forall x > 1 \quad (69)$$

La batería, puede descargar hasta el 20% de su capacidad total, para evitar que se pueda tener un impacto negativo en su rendimiento y vida útil. Esta restricción se define mediante la ecuación 70. Por otra parte, la potencia de la batería se define dentro de un intervalo establecido por las ecuaciones 71 y 72, y la energía siempre tiene que ser menor a la capacidad total (ecuación 73). Para ello se indica que la potencia instantánea máxima intercambiada es de 2.

$$E_{bat} \geq SoC_{min} \cdot C_{bat}, \forall x \quad (70)$$

$$Pot_{bat} \geq -Crate_{max} \cdot C_{bat}, \forall x \quad (71)$$

$$Pot_{bat} \leq Ccrate_{max} \cdot C_{bat}, \forall x \quad (72)$$

$$E_{bat} \leq C_{bat}, \forall x \quad (73)$$

Además de las restricciones anteriores, se establece que la batería está cargada en el inicio del trayecto y en el final a un 30 %, ecuación 75 y 74.

$$E_{bat}('inicio') = 0,3 \cdot C_{bat}, \forall x \quad (74)$$

$$E_{bat}('final') = 0,3 \cdot C_{bat}, \forall x \quad (75)$$

El cálculo del coste energético en el trayecto se expresa siguiendo la ecuación 76, donde se fija el precio de compra a 0,13 [€/kWh]. En cuanto a la venta de excedentes, ecuación 77, el precio de venta se estima a 0,05 [€/kWh].

$$Coste_{tren} = Precio_{ener} \cdot E_{cons} - Venta_{exc}(x), \forall x > 1 \quad (76)$$

$$Venta_{exc}(x) = E_{exc} \cdot Precio_{venta} \quad (77)$$

La capacidad de la batería se dimensiona, ecuación (78), en función del coste generado a partir del *calendar life*. Por lo que precisa también de su vida útil, definiendo que se emplea cinco horas al día, y el precio del kilovatio por hora, 800[€/kWh].

$$Coste_{bat}(x) = \frac{CostekWh \cdot C_{bat}}{5 \cdot Vida_{util} \cdot 365}, \forall x \quad (78)$$

4.4.1. Función objetivo

La función objetivo es una parte fundamental del modelo debido a que se encarga de optimizar una determinada variable. En este problema, se pretende reducir el coste de operación del tren.

$$z = \sum_1^n Coste_{tren}(x) + Coste_{bat}(x) \quad (79)$$

Siendo n el número total de tramos que componen el trayecto.

La función objetivo se modifica dependiendo de la estrategia empleada. En la ecuación 79 se representa la función objetivo para aquellas que empleen sistemas de baterías, por lo que para las que carezcan de ellas, se suprime el segundo coste (ecuación 80). En el caso de marcha tendida el objetivo a optimizar es el tiempo (ecuación 81), ya que esta estrategia pretende reducir el la duración del trayecto.

$$z = \sum_1^n Coste_{tren}(x) \quad (80)$$

$$z = \sum_1^n t(x) \quad (81)$$

5. Resultados

En este apartado se representan los resultados obtenidos a partir del modelo matemático desarrollado en el apartado anterior. Se establecen las diferentes estrategias de operación del material móvil, eligiendo aquella que determinen el mejor resultado. Dichas estrategias están enfocadas en el uso de *eco-driving*, sistemas de almacenamiento o venta de los excedentes generados.

5.1. Caso de estudio

Se plantea un total de cinco estrategias distintas en este caso de estudio:

- Estrategia 1: Marcha tendida.
- Estrategia 2: Conducción eficiente.
- Estrategia 3: Conducción eficiente y baterías.
- Estrategia 4: Conducción eficiente y venta de excedentes.
- Estrategia 5: Conducción eficiente, baterías y venta de excedentes.

5.1.1. Características del trayecto

La línea de alta velocidad Córdoba-Málaga, figura 19, es una rama de alta velocidad del Nuevo Acceso Ferroviario a Andalucía, con el fin de conectar esta comunidad autónoma con el centro de la península ibérica. El trayecto, inaugurado en diciembre de 2007, circula por un total de 19 municipios de Córdoba, Sevilla y Málaga y supuso una inversión de 2.539 millones de euros para su construcción y puesta en servicio [37].



Figura 19: Mapa del trayecto Córdoba-Málaga. Fuente: [38]

En la figura 19, se puede apreciar la línea ferroviaria que une Málaga y Córdoba, y sus respectivas estaciones de transbordo, Puente Genil-Herrera y Antequera-Santa Ana, en los puntos kilométricos 66,67 y 104,16.

Las características técnicas de esta línea de alta velocidad están definidas en la siguiente tabla:

Características técnicas de la línea	
Longitud	167,68 [km]
Longitud total en túneles	27 [km]
Longitud total en viaductos	más de 11 [km]
Ancho de vía	1435 [mm]
Electrificación	1 x 25 [kV] 50 [Hz] ca
Velocidad máxima	350 [km]
Señalización	ASFA200 LZB
Telecomunicaciones	GSM-R
Radio mínimo	7250 [m]
Peralte máximo	27,6 [mm/m]
Pendiente máxima	27,6 [mm/m]
Longitud entrevía	4,7 [m]
Ancho de plataforma	14 [m]
Estaciones	Puente Genil-Herrera Antequera-Santa Ana

Cuadro 5: Características técnicas de la línea. Fuente:[37].

Por otra lado, la pendiente y altura del trayecto queda definida en la figura 20 y 21, respectivamente.

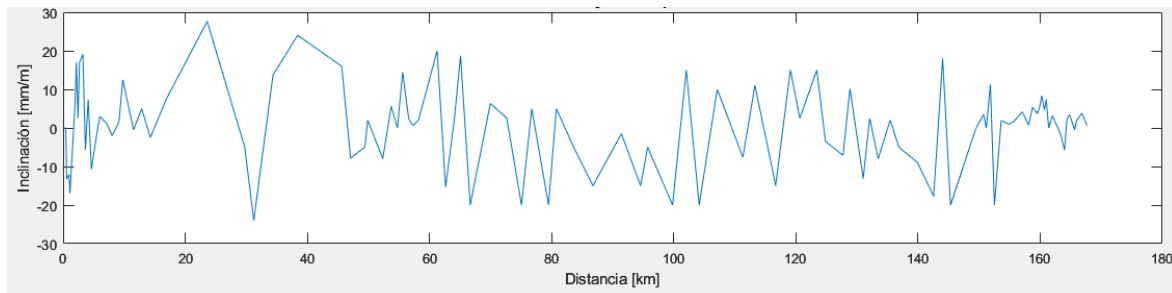


Figura 20: Pendiente en el trayecto.

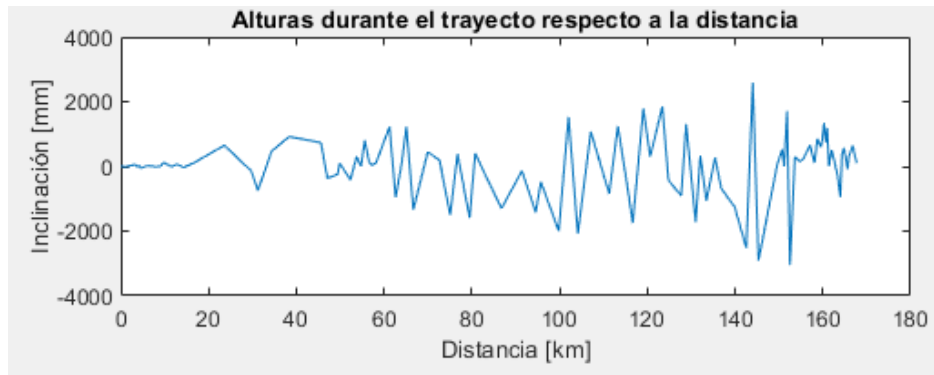


Figura 21: Altura en el trayecto.

Como se puede apreciar en la figura 20, la mayor pendiente encontrada en el trayecto está en el kilómetro 23,5 y posee una inclinación de 27,6 [mm/m]. En el caso de la rampa, la mayor de ellas está en el kilómetro 31,23 y posee un valor de 23,98 [mm/m].

5.1.2. Características del material rodante

El material rodante empleado es el AVE modelo S-102/112. Ambos modelos son ensamblados por la compañía Talgo-Bombardier, de los cuales un gran número de estos últimos son desarrollados en el Taller de los Prados (Málaga) [39]. Se destaca que las principales mejoras en el modelo S-112, respecto a su predecesor, son el incremento de asientos de la clase turista (pasando de 316 a 353 viajeros), la reducción del peso total del convoy y la mejora de la maniobrabilidad para las PMR [40].



Figura 22: Ave S-102/112. Fuente: [40]

Las características técnicas del AVE S-102/112 se resumen en la tabla 6.

Características técnicas del AVE S-102/112	
Tracción	Eléctrica
Ancho de vía	1,435 [m]
Cabezas motrices	2
Composición mínima	M+12R+M
Tensión	25 [kV] a 50 [Hz] CA
Potencia	8000 [kW]
Potencia específica	24,7 [kW/ton]
Motores	8 asíncronos
Distribución de bogies en cabeza tractora	Bo-Bo
Bogies motores	4
Empate bogies	2,650 [m]
Número de ejes motores	8
Rodales Talgo	13
Número máximo de ejes del tren	21
Velocidad máxima	330 [km/h]
Esfuerzo tractor arranque	200 [kN]
Transformadores	2
Aceleración lateral máxima en curva	1,2 [m/s^2]
Convertidores	4, tecnología IGBT
Freno neumático	En ejes motores; 2 discos en rueda y 1 en eje. En ejes portadores: 2 discos en rueda y 2 en eje.
Freno eléctrico	Recuperación de 8800 [kW] Reostático de 5400 [kW]
Señalización	ERTMS niveles 1 y 2 STM de LZB y ASFA.
Plazas totales	316 en la serie 102 353 en la serie 112.
Constructor	Consorcio Talgo/Bombardier

Cuadro 6: Características técnicas del AVE S-102/112. Fuente:[40].

El peso y las dimensiones del AVE S-102/112 están en la tabla 7.

Peso y dimensiones del AVE S-102/112	
Masa del tren	322 [ton]
Masa de la cabeza tractora	68 [ton]
Masa del coche	14 [ton]
Peso por eje	17 [ton]
Longitud de tren	200 [m]
Longitud de cabeza tractora	20 [m]
Altura cabeza tractora	4 [m]
Anchura cabeza tractora	2,960 [m]
Longitud de coches	13,14 [m]
Longitud de coche extremos	13,89 [m]
Altura coches	3,365 [m]
Altura del piso sobre el carril	0,756 [m]
Anchura coches	2,952 [m]

Cuadro 7: Los pesos y las dimensiones del AVE S-102/112. Fuente:[40].

5.2. Estrategia 1: Marcha tendida

La marcha tendida es un tipo de conducción caracterizada por tener el objetivo de cubrir la distancia entre dos estaciones en el menor tiempo posible, respetando todas las restricciones. Además, se debe añadir que, en esta estrategia, el tren carece de cualquier sistema de almacenamiento de energía o de regeneración, es decir, su fuente de alimentación es directamente la red de distribución.

5.2.1. Perfil de la velocidad

El perfil de velocidad obtenido en la estrategia 1 es el que está representado en la figura 23. Se puede observar como el móvil trata de mantener una velocidad similar a la velocidad máxima posible, sin llegarla a superarla de modo que se garantice la seguridad durante todo el recorrido. Por otra parte, se comprueba que las velocidades en el inicio, final y las paradas intermedias son nulas durante el tiempo de parada (1 minuto), establecido en las condiciones iniciales.

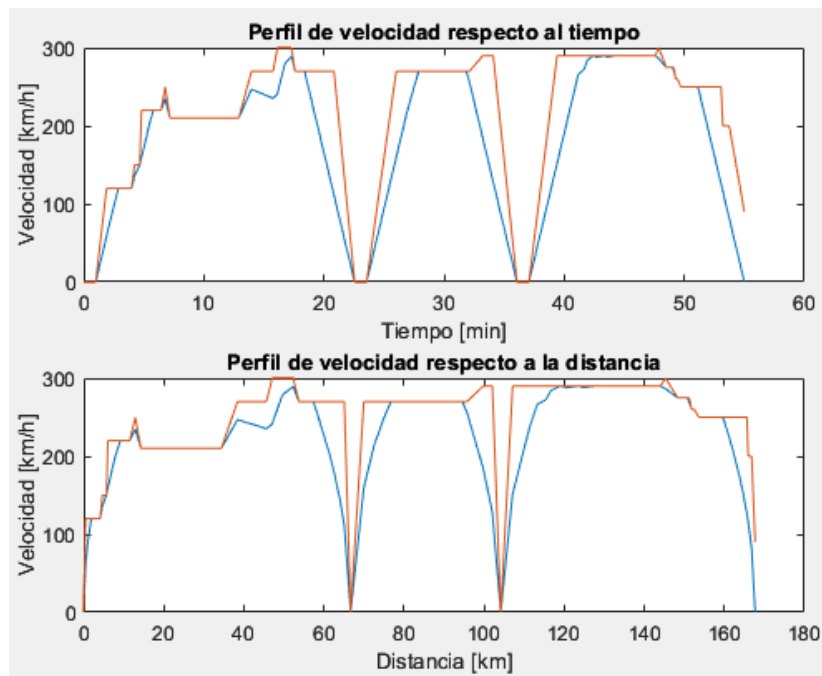


Figura 23: Perfil de la velocidad en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.

5.2.2. Perfil de la aceleración

El perfil de aceleración obtenido en la estrategia 1 es el que está representado en la figura 24. En este, se cumple con la normativa establecida para los valores máximos de confort ($\pm 3 [m/s^2]$). Además, se puede destacar el estado de movimiento suave y constante del tren, es decir, sin acelerar ni desacelerar bruscamente, lo cual es característico de la marcha tendida.

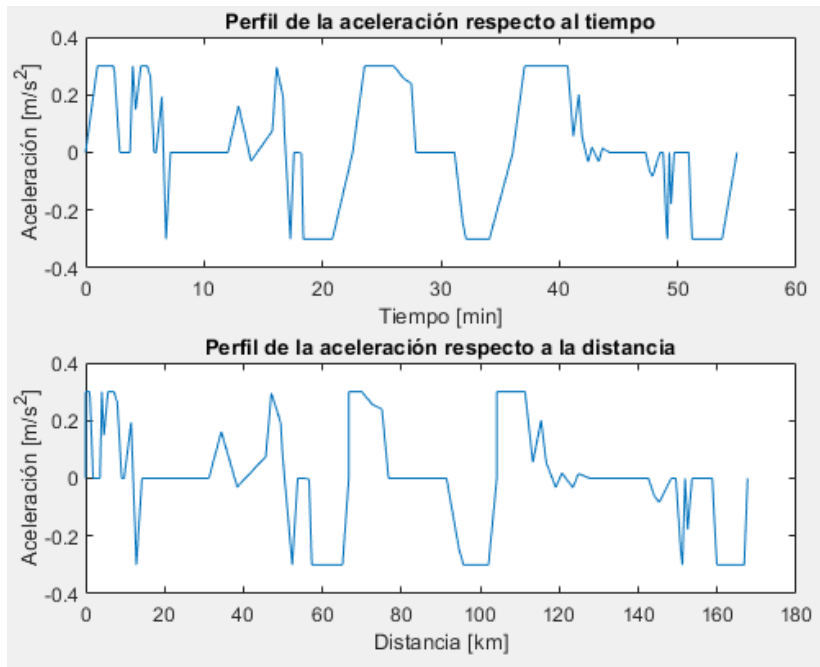


Figura 24: Perfil de la aceleración en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.

5.2.3. Duración del recorrido

Como se ha mencionado anteriormente, la marcha tendida trata de disminuir el tiempo del trayecto lo máximo posible. En la figura 25, se observa como evoluciona la distancia recorrida respecto al tiempo y los periodos donde se realizan las paradas, representado en la figura como ondulaciones. Se obtiene que el tiempo del trayecto está cerca de los 55 minutos.

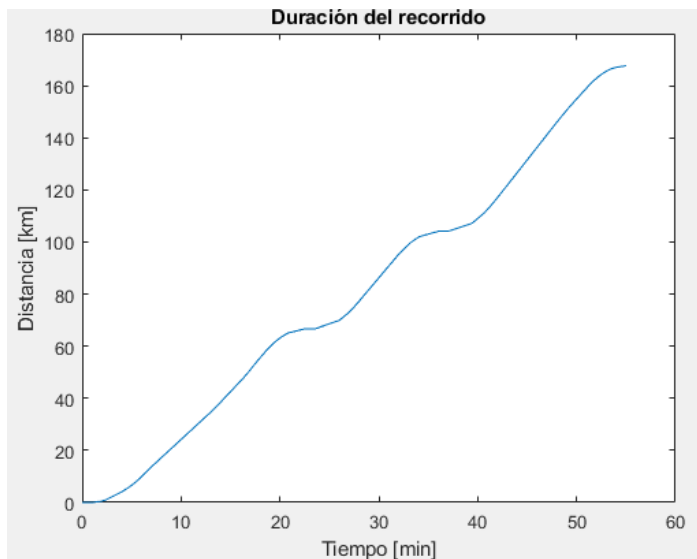


Figura 25: Duración del recorrido en marcha tendida.

5.2.4. Potencia demandada

La potencia demandada obtenida en la estrategia 1 está representada en la figura 27. Esta evoluciona en función del esfuerzo, figura 26, y la velocidad, figura 23. Además, se le suma la potencia auxiliar empleada por los servicios del tren, siendo esta el mínimo de potencia demandada (845 [kW]). Este valor de potencia es habitual cerca de las paradas donde el tren frena y va a una menor velocidad. Por otra parte, se establecen picos de potencia con valor cercano a los 9645 [kW], que coincide con el valor máximo de demanda en el tren.

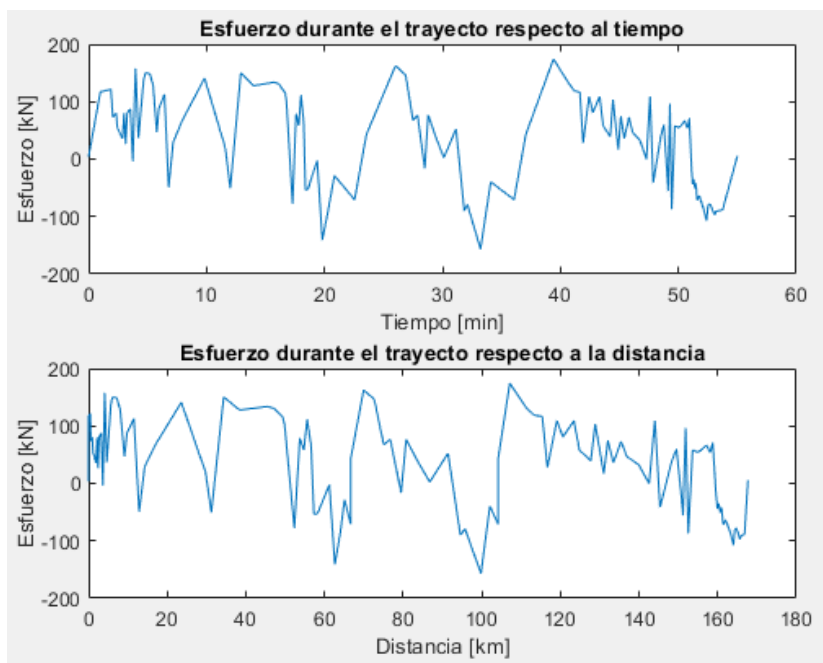


Figura 26: Esfuerzo en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.

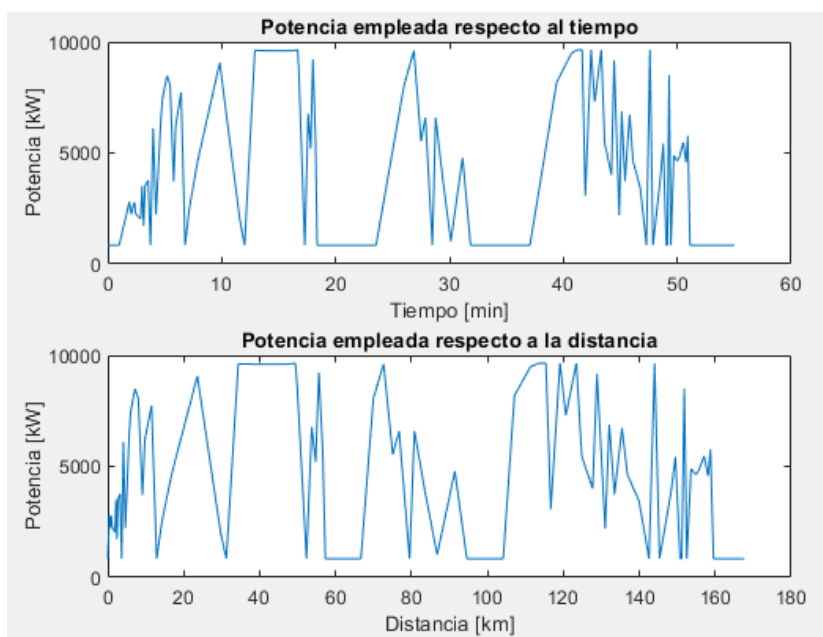


Figura 27: Potencia empleada en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.

5.2.5. Energía consumida

La energía consumida en la estrategia 1 está representada en la figura 28. Se puede observar el aumento de su valor en función del incremento del tiempo y espacio. El valor total de energía requerida es de 4133,489 [kWh].

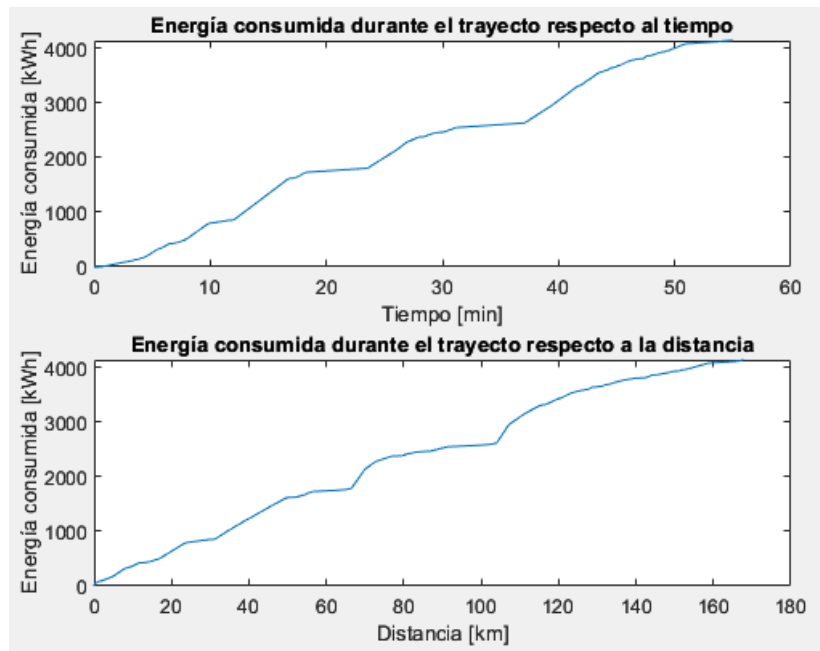


Figura 28: Energía consumida en marcha tendida respecto al tiempo y a la distancia.

5.3. Estrategia 2: Conducción eficiente

Esta estrategia se caracteriza por la utilización de la conducción eficiente, es decir, se emplean las velocidades óptimas en cada tramo de la vía, considerando las características topográficas y las restricciones de operación. Esto permite minimizar el consumo de energía al ajustar la velocidad del tren según las condiciones del terreno. Al igual que en la estrategia 1, se prescinde del empleo de sistemas de almacenamiento de energía o de recuperación de la misma durante el frenado.

5.3.1. Perfil de la velocidad

El perfil de la velocidad obtenida en la estrategia 2 está representada en la figura 29. Se mantiene siempre con un valor menor a la velocidad máxima y a la velocidad de la estrategia 1 debido al aprovechamiento de la inercia generada por la orografía del terreno.

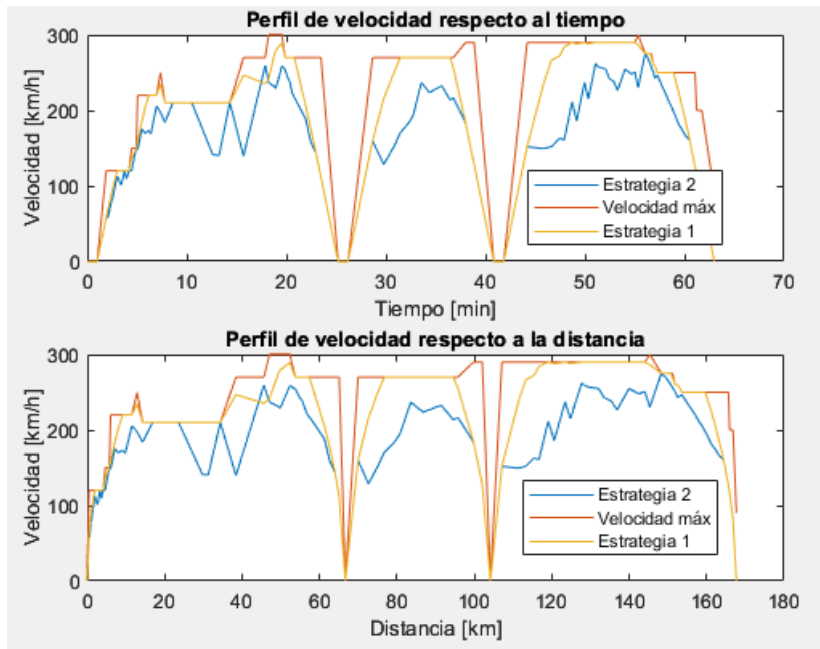


Figura 29: Perfil de las velocidades en las estrategias 1, 2 y máxima respecto al tiempo y a la distancia.

5.3.2. Perfil de la aceleración

El perfil de la aceleración obtenida en la estrategia 2 está representada en la figura 30. Se observa que hay más variación de la aceleración que en la estrategia 1, pero siempre manteniendo el límite establecido de confort.

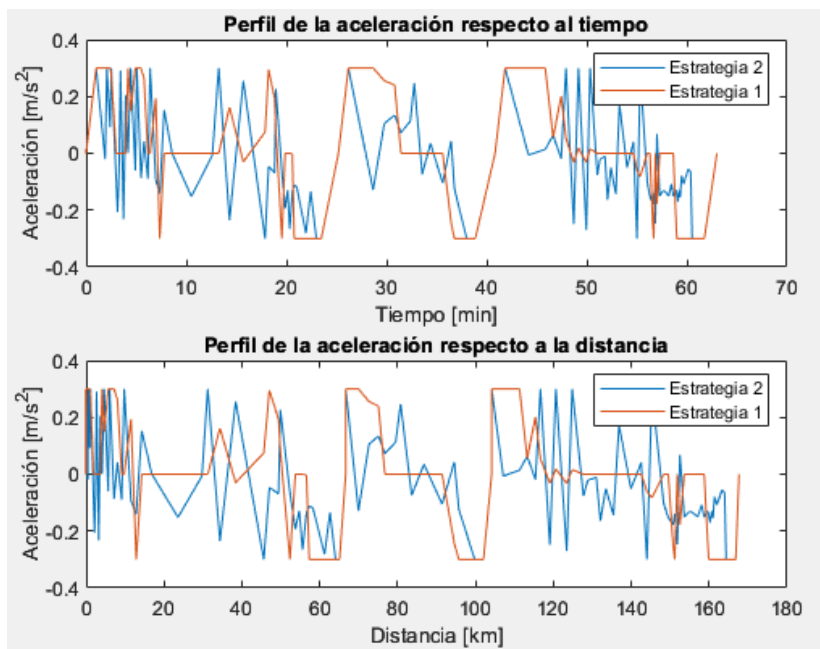


Figura 30: Perfil de la aceleraciones en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.

5.3.3. Duración del recorrido

En este caso, al igual que en los futuros, se establece el valor de duración del recorrido a 63 minutos. Esta duración es superior a la marcha tendida al ir a menor velocidad. Las paradas en las estaciones se hacen más tarde pero siempre durando un minuto.

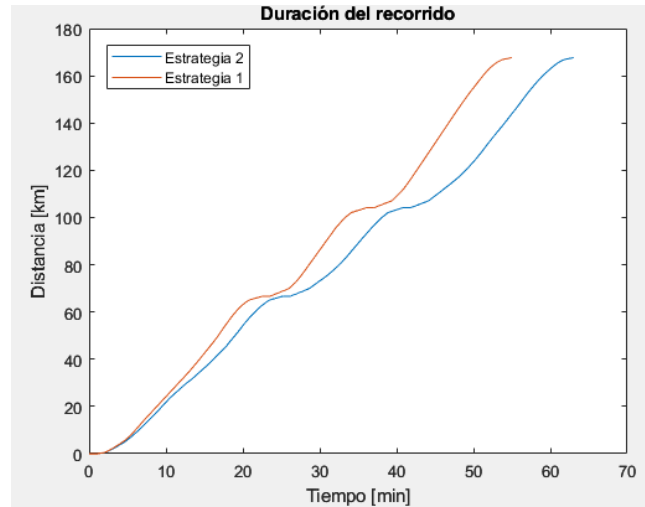


Figura 31: Duración de los recorridos en las estrategias 1 y 2.

5.3.4. Potencia demandada

La potencia demandada obtenida en la estrategia 2 está representada en la figura 32. Se establecen picos de potencia con valor cercano a los 9645 [kW] al igual que en el caso anterior, sin embargo, se presenta en menor cantidad debido a la conducción *eco-driving*.

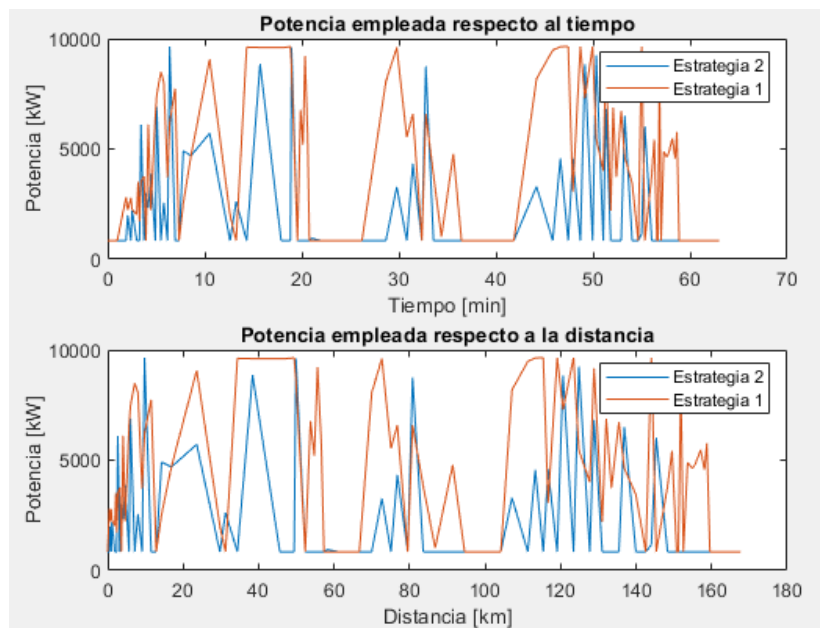


Figura 32: Potencias demandadas en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.

5.3.5. Energía consumida

La energía consumida en la estrategia 2, figura 33, es inferior a la de la estrategia 1. Esto es debido a la reducción de la potencia demandada por la conducción empleada. El valor total de la energía consumida en este trayecto es de 1961,5 [kWh], menos de la mitad que en el caso a marcha tendida, por lo que se establece un ahorro energético del 52,55 %.

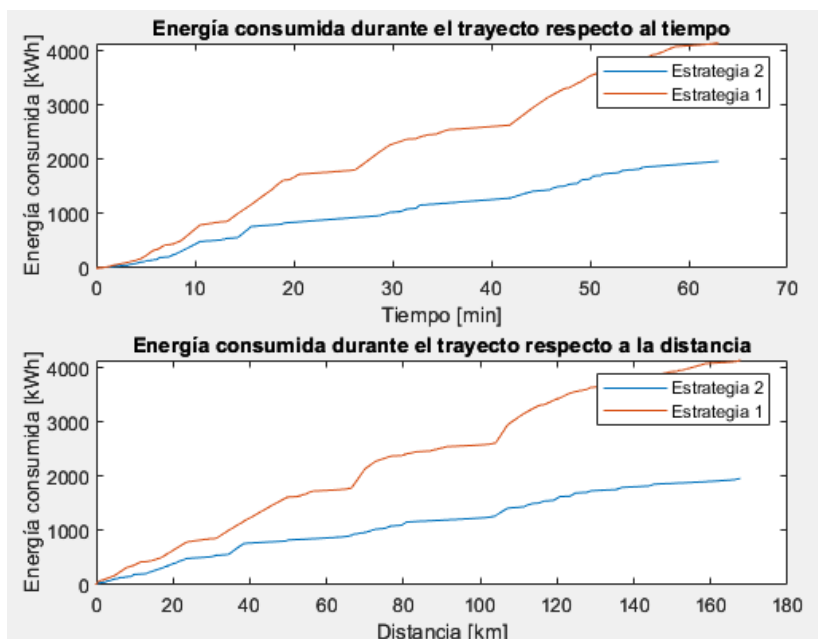


Figura 33: Energías consumidas en las estrategias 1 y 2 respecto al tiempo y a la distancia.

5.4. Estrategia 3: Conducción eficiente y batería

En esta estrategia, se emplea el *eco-driving* y almacenamiento por medio de un sistema de baterías, las cuales se cargan a partir del freno regenerativo. Además, el sistema de recuperación tratará de la energía consumida por los equipos auxiliares. Por otra parte, se establece el tiempo de duración del recorrido a 63 minutos.

5.4.1. Perfil de la velocidad

En esta estrategia, el perfil de velocidad, figura 34, es muy parecido al de la estrategia 2, figura 30, debido al empleo del mismo tipo de conducción, sin embargo, presenta mayores picos de velocidad para tratar de recuperar una mayor cantidad de energía durante el frenado regenerativo.

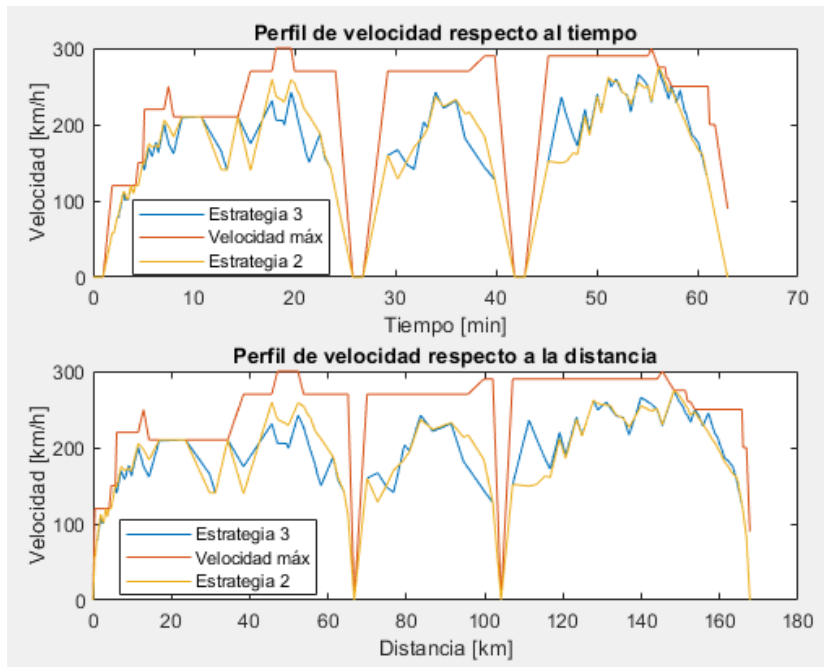


Figura 34: Perfil de las velocidades máximas, estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.

5.4.2. Perfil de la aceleración

El perfil de la aceleración en la estrategia 3 está definido en la figura 35. Al igual que la velocidad, las gráficas expresan resultados similares a los de la estrategia 2 (figura 30). También presentan mayor número de picos de aceleración en algunos tramos, aunque siempre manteniendo los límites de confort.

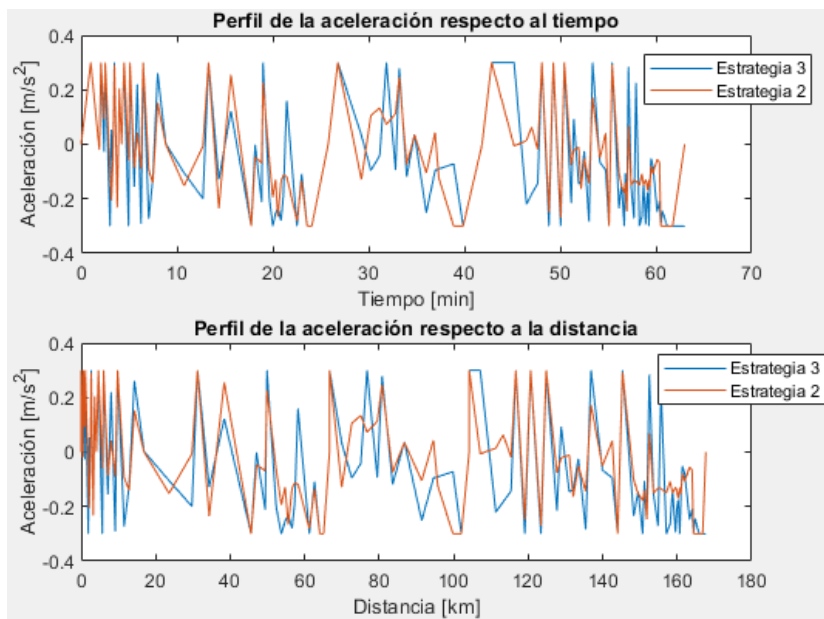


Figura 35: Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.

5.4.3. Potencia demandada

La potencia demandada por el tren en la estrategia 3 está definida en la figura 36. Sigue manteniendo picos máximos de 9645 [kW], sin embargo, se ha conseguido eliminar el requerimiento de potencia en parte del trayecto debido a la energía generada por medio del freno regenerativo. A diferencia de la estrategia 2 que tiene un consumo mínimo de los servicios auxiliares.

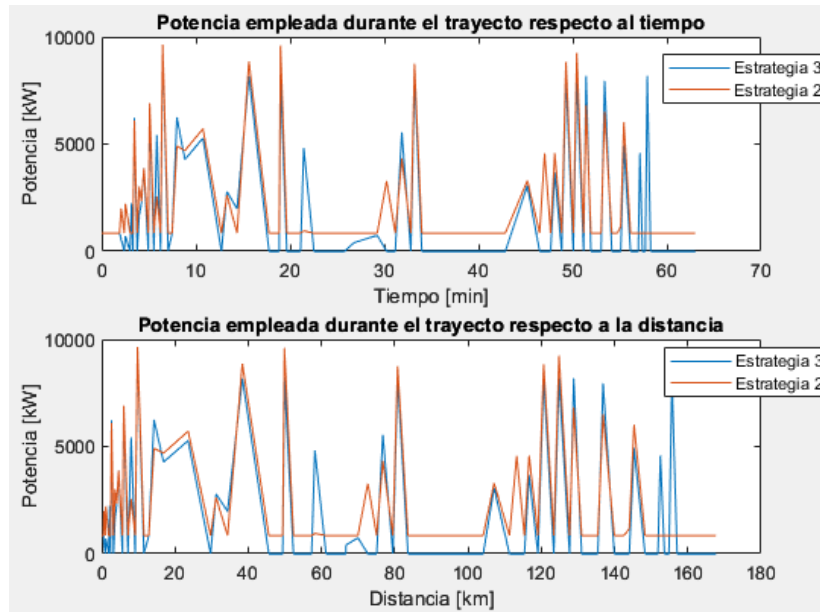


Figura 36: Potencias demandadas en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.

5.4.4. Energía consumida

La energía consumida en la estrategia 3, figura 37, es de 1297,57 [kWh]. Allí, se puede apreciar la evolución de la misma, respecto al tiempo y la distancia, y comparándola con la energía consumida en la estrategia 2, donde se observa que el uso de las baterías representan un impacto significativo en el consumo energético al conseguir un ahorro del 33,85%.

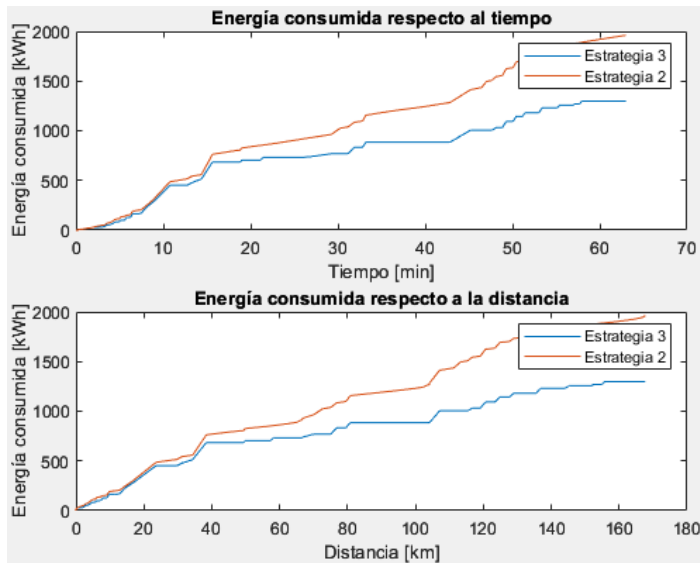


Figura 37: Energías consumidas en las estrategias 2 y 3 respecto al tiempo y a la distancia.

5.4.5. Energía regenerada

En esta estrategia, como ya se ha mencionado, se emplea un sistema de frenado regenerativo para recuperar energía durante el frenado. Esta energía recuperada se divide para el consumo del propio tren y para almacenarla en las baterías. Por medio de la figura 38, se puede observar el desarrollo y la partición de la energía regenerada durante todo el trayecto. La mayor parte de esta, un 49,58 %, se usa para recargar la batería, sin embargo, se debe de tener en cuenta las pérdidas en la carga (5,51 %), por lo que el porcentaje real derivado a la carga de la batería es de 55,09 %. El resto, se emplea para alimentar los servicios auxiliares, es decir, el 44.91 %. En unidades energéticas, la energía total recuperada mediante la frenada regenerativa es de 1003,1 [kWh], de los cuales el tren autoconsume 450,16 [kWh], recarga la batería con un valor de 497,38 [kWh] y se pierden 55,27 [kWh].

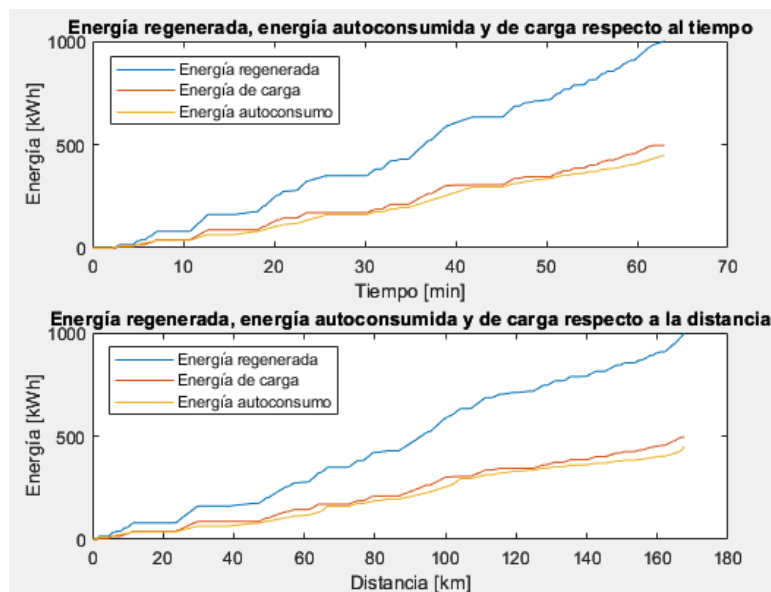


Figura 38: Energía regenerada con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.

En el caso de la actuación de las baterías durante el trayecto, se obtienen la variación de la potencia de la batería, así como su nivel de energía, están representadas respectivamente en las figuras 39 y 40. El nivel de la batería cumple con las condiciones de restricción, impidiéndole estar por debajo del 20%. Además, se cumple que la potencia instantánea máxima de intercambio de la batería no es superior a dos veces su capacidad, figura 39.

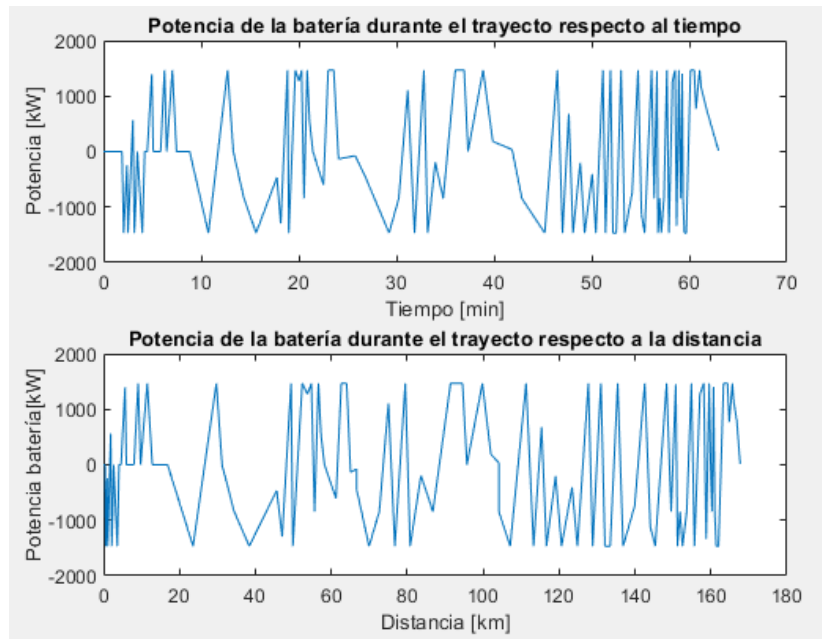


Figura 39: Potencia de la batería con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.

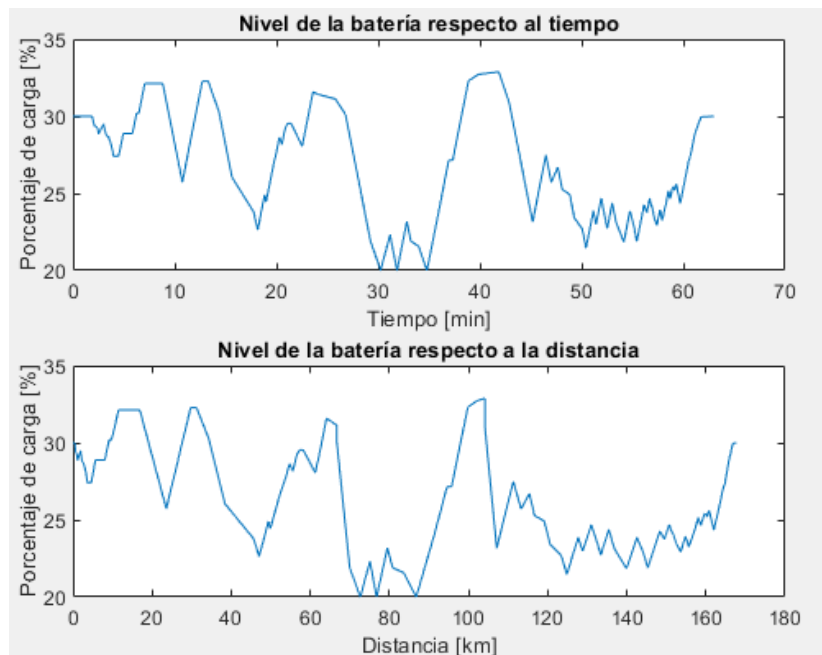


Figura 40: Nivel de la batería con conducción eficiente y baterías respecto al tiempo y a la distancia.

5.5. Estrategia 4: Conducción eficiente y venta de excedentes

En esta estrategia, se emplea el *eco-driving* y la venta de excedentes. Para la generación de los excedentes se emplea un sistema de freno regenerativo y se realiza su venta si se satisface el consumo de la energía de los servicios auxiliares. Por otra parte se establece el tiempo de duración del recorrido a 63 minutos.

5.5.1. Perfil de la velocidad

En esta estrategia, el perfil de velocidad, figura 41, es muy parecido al de la estrategia 2, figura 29, debido al empleo del mismo tipo de conducción, sin embargo, presenta mayores picos de velocidad para tratar de recuperar una mayor cantidad de energía durante el frenado regenerativo, como ocurre en la estrategia 3.

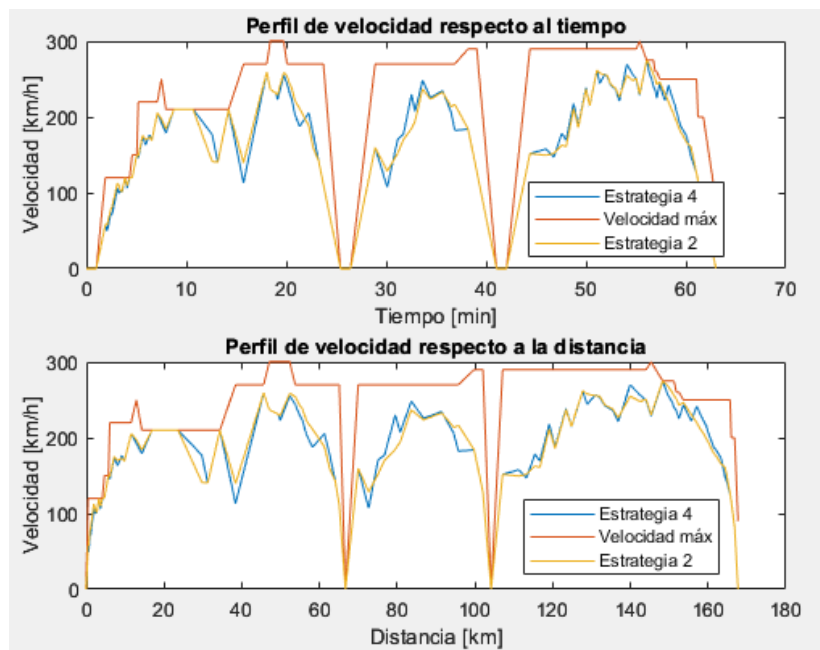


Figura 41: Perfil de las velocidades máximas y estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia.

5.5.2. Perfil de la aceleración

El perfil de la aceleración en la estrategia 4 está definido en la figura 42. Al igual que la velocidad, las gráficas expresan resultados similares a los de la estrategia 3 y con más picos máximos que en la 2. Por otra parte, se mantiene dentro de los límites de confort.

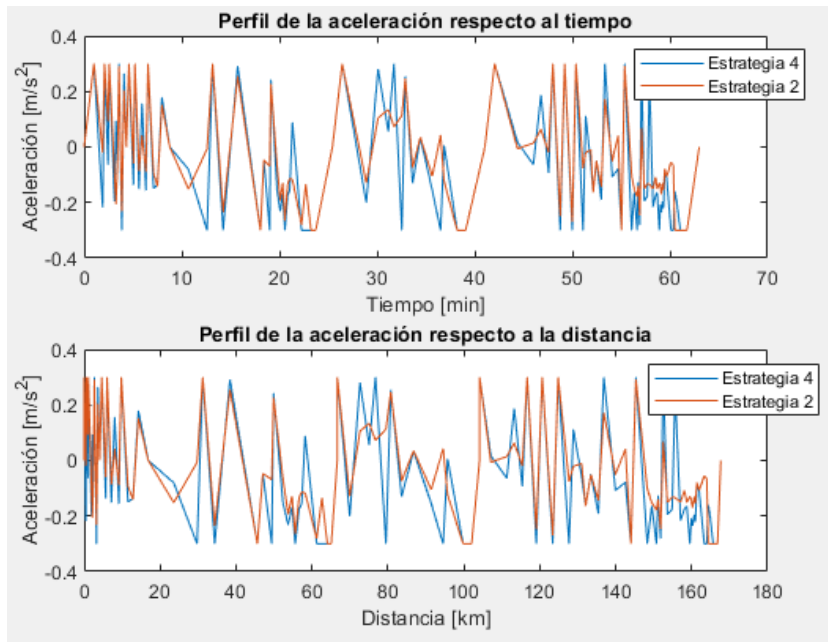


Figura 42: Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia.

5.5.3. Potencia demandada

La potencia demandada por el tren en la estrategia 4 está definida en la figura 43. Sigue manteniendo el mismo valor de pico de máximo que en las demás estrategias, 9645 [kW]. Por otra parte, al igual que en el caso 3, a partir de la frenada regenerativa consigue eliminar la demanda en parte del trayecto, aunque en menor medida que su predecesor.

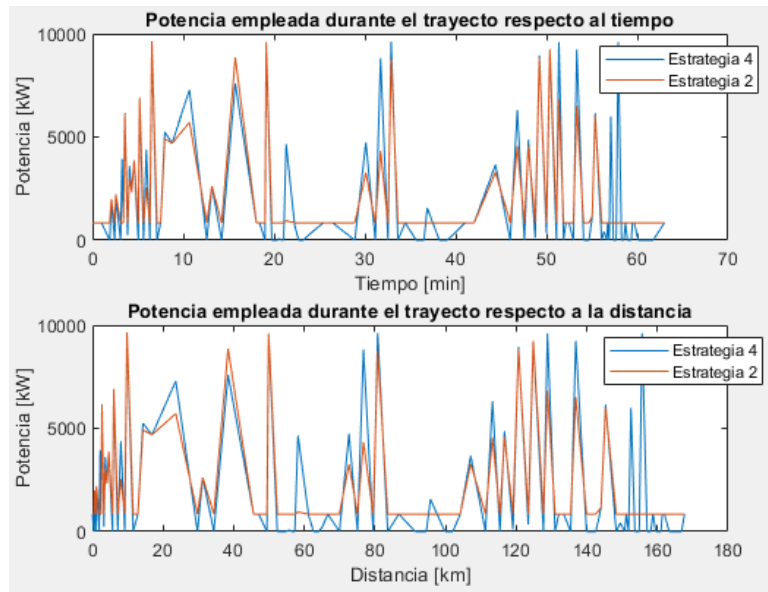


Figura 43: Potencias demandadas en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia.

5.5.4. Energía consumida

La energía consumida en la estrategia 4, figura 44, es de 1773,37 [kWh]. La combinación de la conducción eficiente y la venta de excedentes representa un ahorro, respecto a la estrategia 2, de 9,59%.

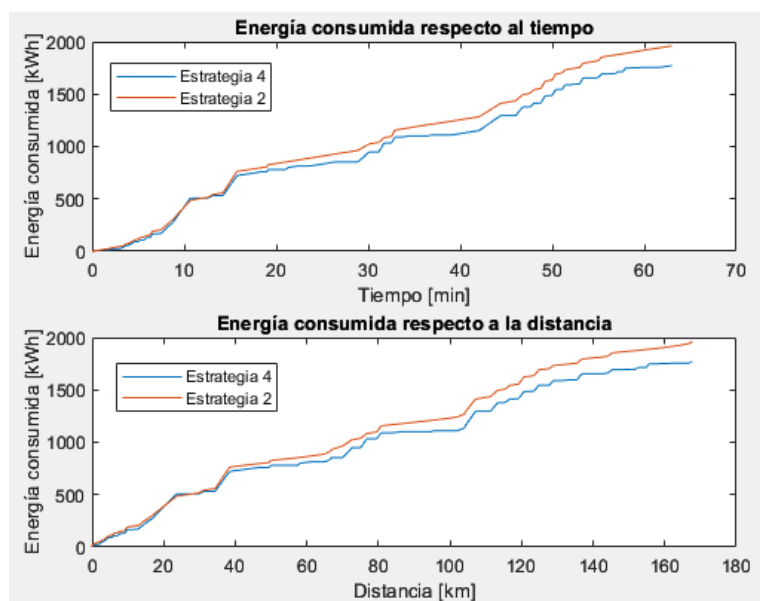


Figura 44: Energías consumidas en las estrategias 2 y 4 respecto al tiempo y a la distancia.

5.5.5. Energía regenerada

Como se ha mencionado anteriormente, este caso posee de un sistema de frenado regenerativo para recuperar energía durante el frenado. Esta energía recuperada se divide para el consumo del propio tren y para devolverla a la red. Por medio de la figura 45, se puede observar el desarrollo y la partición de la energía regenerada durante todo el trayecto. La mayor parte de esta, un 55.84%, se devuelve a la red, mientras que el 44.15% se utiliza para la tracción del tren. En unidades energéticas, la energía total recuperada mediante la frenada regenerativa es de 1019,6 [kWh], de los cuales el tren autoconsume 450,16 [kWh], y vierte a red 569,41 [kWh] de energía excedente.

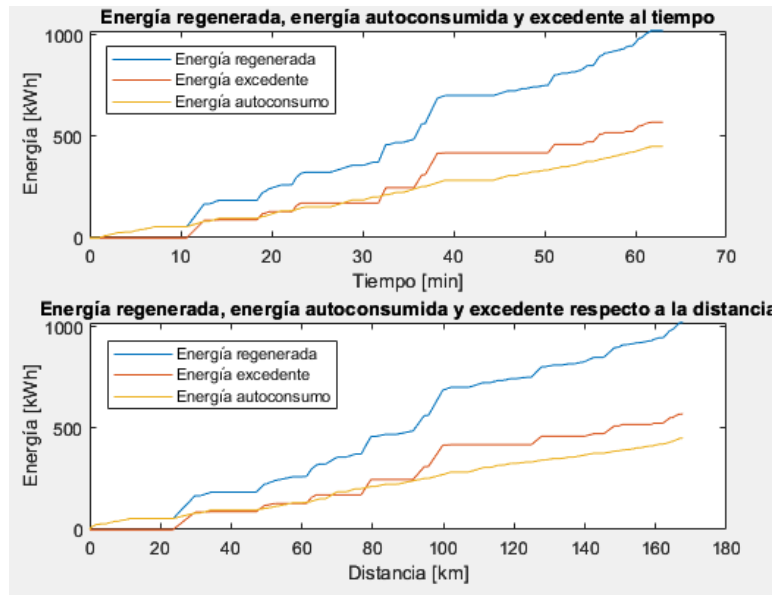


Figura 45: Energía regenerada con conducción eficiente y venta de excedentes respecto al tiempo y a la distancia.

5.6. Estrategia 5: Conducción eficiente, baterías y venta de excedentes

En esta estrategia, se emplea el *eco-driving*, un sistema de baterías y la venta de la energía excedente. La recuperación de la energía se realiza a cargo del sistema de frenado regenerativo. Esta energía se utiliza para disminuir aquella que consumen los equipos auxiliares, cargar un sistemas de baterías y vendiendo el excedente, si se satisface las necesidades de la primera. Por otra parte, se establece el tiempo de duración del recorrido a 63 minutos.

5.6.1. Perfil de la velocidad

En esta estrategia, el perfil de velocidad, figura 46, es muy parecido al de la estrategia 2, figura 30, debido al empleo del mismo tipo de conducción, sin embargo, presenta mayores picos de velocidad para tratar de recuperar una mayor cantidad de energía durante el frenado regenerativo, como en las estrategias 3 y 4.

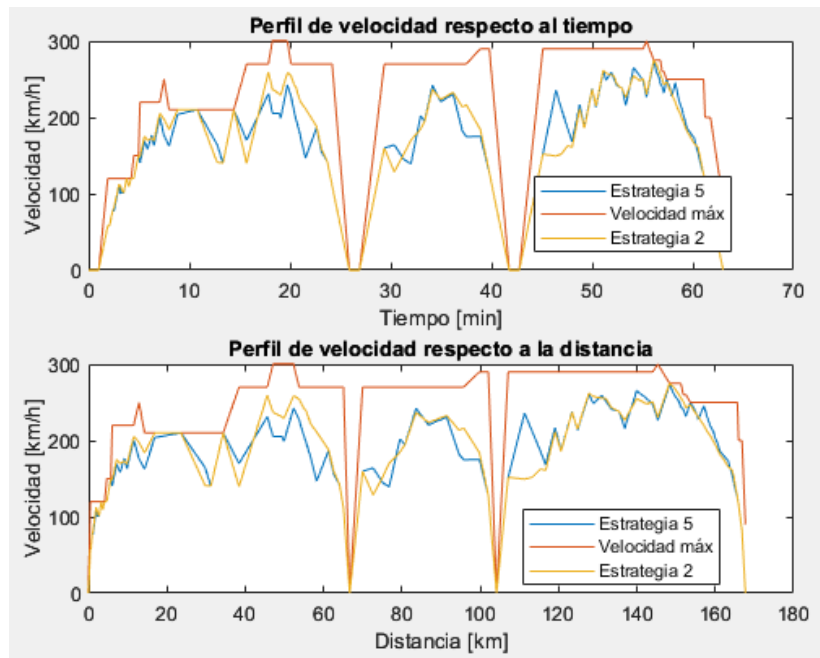


Figura 46: Perfil de las velocidades máximas y estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.

5.6.2. Perfil de la aceleración

El perfil de la aceleración en la estrategia 5 está definido en la figura 47. Al igual que la velocidad, las gráficas expresan resultados similares a los de la estrategia 2. Por otra parte, se mantiene dentro de los límites de confort.

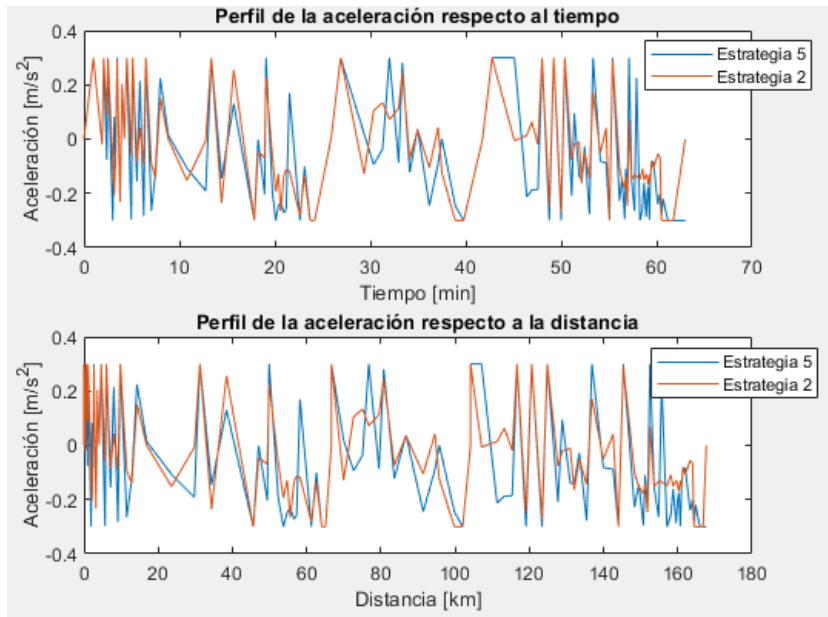


Figura 47: Perfil de las aceleraciones en las estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.

5.6.3. Potencia demandada

La potencia demandada por el tren en la estrategia 5 está definida en la figura 48. Sigue manteniendo el mismo valor de pico de máximo que en las demás estrategias, 9645 [kW]. Por otra parte, al igual que en el caso 3 y 4, a partir de la frenada regenerativa consigue eliminar la demanda en parte del trayecto.

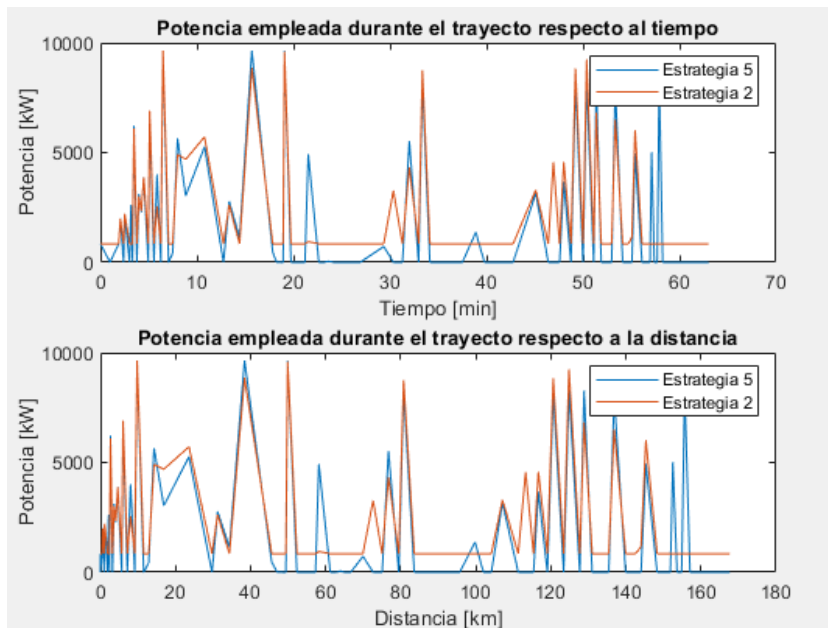


Figura 48: Potencias demandadas en las estrategias 2 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.

5.6.4. Energía consumida

La energía consumida en la estrategia 5, figura 49, es de 1341,4 [kWh]. Allí, se puede apreciar la evolución de la misma respecto al tiempo y la distancia. Respecto a la estrategia 2, se consigue un ahorro energético de 31,61.

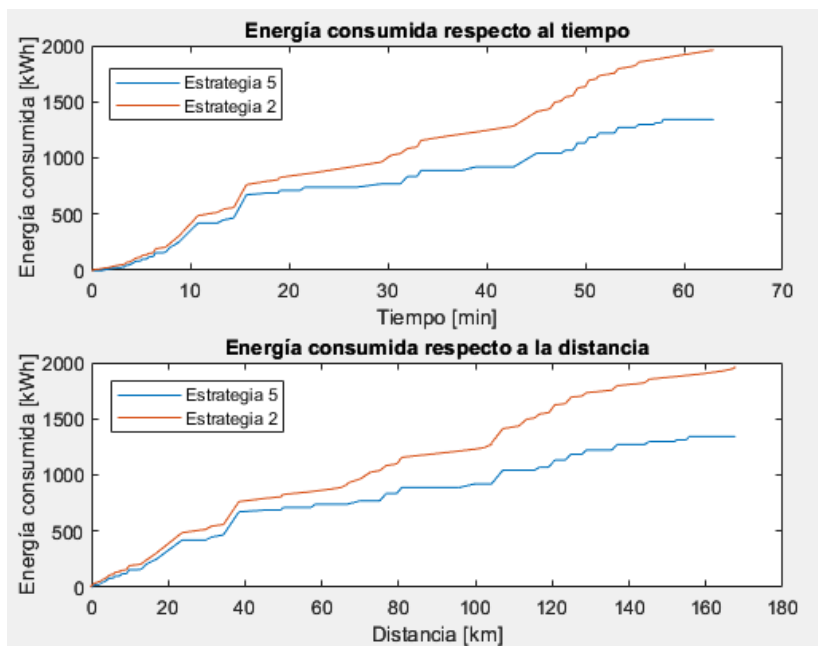


Figura 49: Energías consumidas respecto al tiempo y a la distancia.

5.6.5. Energía regenerada

En esta estrategia, como se ha mencionado, se emplea un sistema de frenado regenerativo. Esta energía recuperada se divide para el consumo del propio tren, venta de excedentes y almacenamiento en las baterías. Por medio de la figura 50, se puede observar el desarrollo y la partición de la energía regenerada durante todo el trayecto. La mayor parte de esta, un 45,67 %, se usa para recargar la batería, sin embargo, se debe de tener en cuenta las pérdidas en la carga (3 %), por lo que el porcentaje real de carga es de 48,67 %. El resto, se emplea para alimentar los servicios auxiliares con un 43,17 % y para vender a la red (8,11 %). En unidades energéticas, la energía total recuperada mediante la frenada regenerativa es de 1042,82 [kWh], de los cuales el tren autoconsume 450,463 [kWh], recarga la batería con un valor de 476,234 [kWh], vende al excedente 84,79 [kWh] y se pierden 31,33 [kWh].

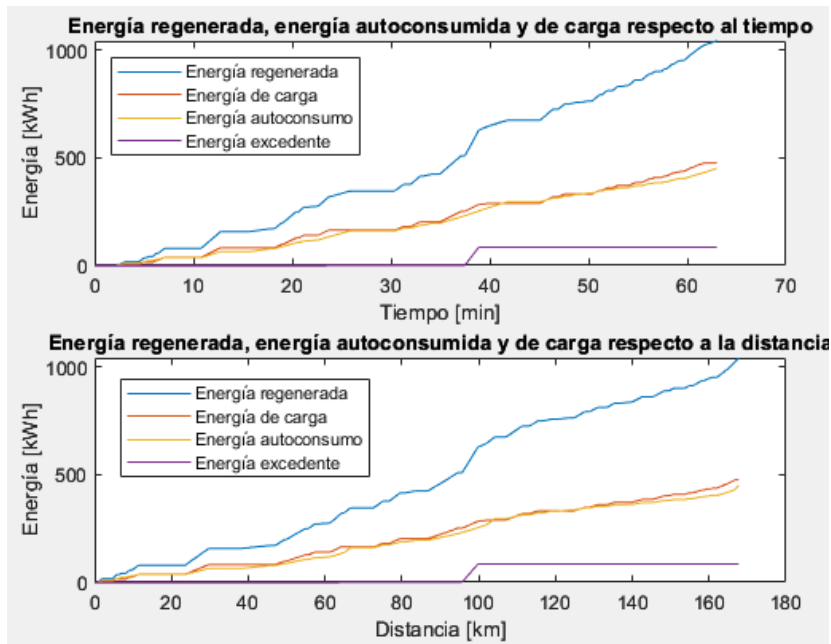


Figura 50: Energía regenerada con conducción eficiente, venta de excedentes y baterías respecto al tiempo y a la distancia.

La variación de la potencia de la batería, así como el nivel de energía, están representadas respectivamente en las figuras 51 y 52. El nivel de la batería cumple con las condiciones de restricción, impidiéndole estar por debajo del 20% y con la potencia máxima de intercambio de la batería, es inferior a dos veces la capacidad de la misma. Ambos parámetros son muy similares a los de la estrategia 3 a lo largo de todo el recorrido, exceptuando que la potencia de la batería en la estrategia 5 es inferior en algunas ocasiones.

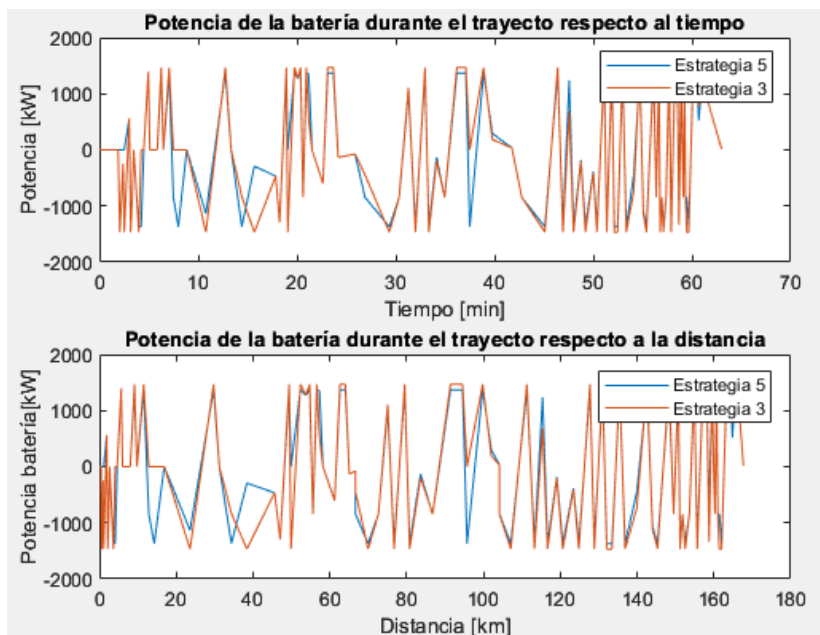


Figura 51: Potencias de las baterías en las estrategias 3 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.

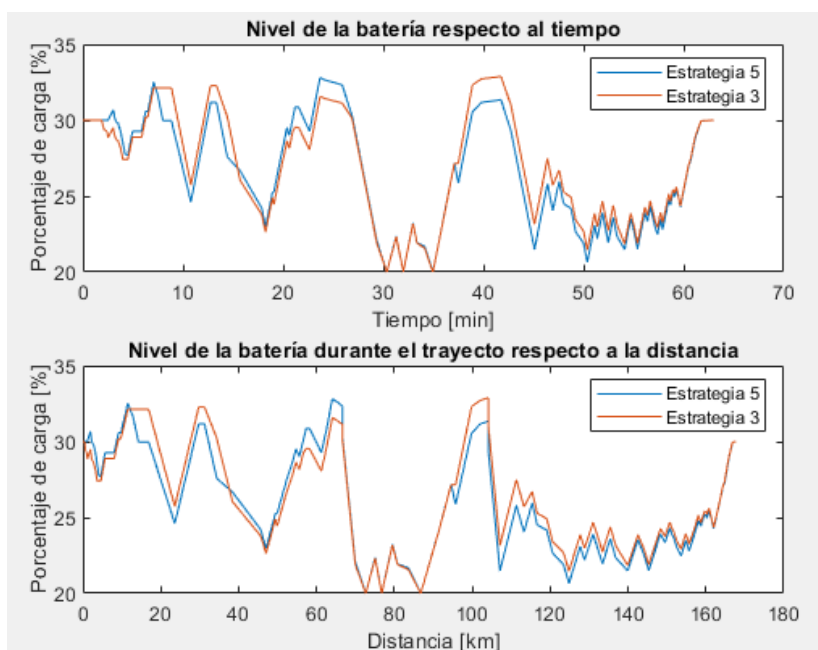


Figura 52: Niveles de las baterías en las estrategias 3 y 5 respecto al tiempo y a la distancia.

5.7. Resumen de los resultados

Los resultados obtenidos a partir de las cinco estrategias están recogidos en la tabla 8. Se han resuelto a partir de los datos de partida definidos en el apartado 4.1.

Estrategias	Capacidad batería [kWh]	Consumo [kWh]	Coste operación [euros]	Duración [min]	Ahorro energético [%]	Ahorro económico [%]
Estrategia 1	-	4133,49	537,35	55	-	-
Estrategia 2	-	1961,5	254,992	63	52,55	52,55
Estrategia 3	733,5	1297,57	200,84	63	68,61	62,62
Estrategia 4	-	1773,3	202,067	63	57,1	62,4
Estrategia 5	685,213	1341,4	200,19	63	67,55	62,74

Cuadro 8: Resumen de los resultados.

Se toma como base del caso de estudio la marcha tendida, ya que es la situación más desfavorable de todas. Esta estrategia, para realizar el trayecto, requiere un consumo energético de 4133,49 [kWh], por lo que se sitúa como la menos eficiente. El motivo por lo que consume tanta energía es por emplear una mayor velocidad, al tratar de tardar el menor tiempo posible. Se consigue reducir el tiempo de recorrido a 55 minutos, es decir, 8 minutos menos que aplicando las otras estrategias. En contraposición, el coste de operación es muy superior situándose en los 537,35 euros.

En la estrategia 2, como se ha mencionado anteriormente, se emplea la conducción eficiente. La utilización de este tipo de conducción reduce la energía a 1961,5 [kWh], es decir, un 52,55 %. El ahorro económico es igual al energético, 52,55 %, debido a que carece de un sistema de recuperación de energía y el valor de compra de la energía en este modelo es una constante. El coste de operación es de 254,992 euros y el tiempo de recorrido se establece en 63 minutos.

En la estrategia 3 se emplea conducción eficiente y un sistema de baterías que se almacena a partir de un recuperador de energía durante el frenado. Además, esta energía regenerada se utiliza para tratar de eliminar los gastos generados por los servicios auxiliares. A partir de esta estrategia, se consigue realizar el mayor ahorro energético en este caso de estudio, con un 62,62%. Para poder haber llegado a este resultado la batería modelada debe tener una capacidad de 733,5 [kWh], mucho mayor que en la estrategia 5, por lo que puede almacenar más energía y consumir menos. Por otra parte, se ha conseguido un buen ahorro económico al disminuir el coste de operación a 200,84 euros, sin embargo, sigue sin ser la mejor de las estrategias. En esta simulación, al igual que en la estrategia anterior, se establece a 63 minutos.

En la estrategia 4 se emplea conducción eficiente y venta de la energía excedente, a partir de un freno regenerativo. Se ha establecido en el modelo que se pretenda eliminarlos gastos provocados por los servicios auxiliares, vendiendo a la red si hay excedentes. Es interesante observar que el consumo de energía es superior a la consumida en las estrategias 3 y 5, sin embargo, el coste de operación no es muy diferente, 202,067 euros. Esto se debe a que en esta estrategia no se emplea baterías, por lo que se evita el coste de la misma y que a diferencia de la estrategia 5, se venden más kilovatios hora a la red. Asimismo, el consumo de una mayor energía es consecuencia de carecer de sistema de almacenamiento. La duración del trayecto se establece a 63 minutos.

En la estrategia 5 se emplea las estrategias combinadas de 2, 3 y 4. Se consigue el mayor ahorro económico con un 62,74% respecto a la marcha tendida, esto representa un consumo de 200,19 euros. La capacidad de la batería con mayor optimización para esta estrategia es la de 685,213 kWh. El consumo, por otra parte, es ligeramente superior a la de la estrategia 3 debido a poder acumular menos energía y que el algoritmo, al tener un bajo precio de venta, prefiere almacenarla a venderla. El tiempo establecido para esta simulación es de 63 minutos.

Una vez se ha explicado el caso de estudio presentado, se realizan una serie de simulaciones y análisis con el objetivo de ver el comportamiento de las estrategias de eficiencia ante diferentes situaciones. Cabe destacar que estas simulaciones son de ámbito académico debido a que en algunas ocasiones los valores planteados no son reales.

5.7.1. Aumento precio de excedentes

En este caso de estudio, se simulan las estrategias del caso anterior pero modificando el precio de venta de los excedentes. Se establece un precio de 0,15 [€/kwh] para tratar de hacer que el algoritmo venda la energía excedente. Por otra parte, se mantiene el precio de adquisición de la energía. Los resultados obtenido se representan en la tabla 9.

Estrategias	Capacidad batería [kWh]	Consumo [kWh]	Coste operación [euros]	Duración [min]	Ahorro energético [%]	Ahorro económico [%]
Estrategia 1	-	4133,49	537,35	55	-	-
Estrategia 2	-	1961,5	254,992	63	52,55	52,55
Estrategia 3	733,5	1297,57	200,84	63	68,61	62,62
Estrategia 4	-	2563,5	95,372	63	37,98	82,25
Estrategia 5	747,47	1888	195,75	63	54,32	63,57

Cuadro 9: Resultados aumentando el precio de venta.

Una vez se han obtenido los resultados, se puede observar como los costes de operación de las

estrategias 4 y 5 varían, ya que son los únicos que venden. A partir del empleo de la estrategia 4, se establece un coste de operación de 95,372 euros, traduciéndose en un ahorro energético de 82,25 %. El ahorro por parte de la estrategia 5 es insignificante en comparación con la 4, debido también al aumento del precio de la batería al aumentar la capacidad de esta a 747,47 [kWh]. Se llega a la conclusión de que al aumentar el precio de venta de los excedentes a valores elevados, la estrategia más rentable es la 4, aún teniendo grandes cantidades de consumo de energía.

5.7.2. Aumento del precio de adquisición

En la siguiente simulación, se aumenta el precio de adquisición de la energía a 0,25 [€/kWh]. El precio de venta para aquellas estrategias que tengan capacidad de vender los excedentes se mantiene respecto a la simulación anterior. Los nuevos resultados se definen en la tabla 10.

Estrategias	Capacidad batería [kWh]	Consumo [kWh]	Coste operación [euros]	Duración [min]	Ahorro energético [%]	Ahorro económico [%]
Estrategia 1	-	4133,49	1033,37	55	-	-
Estrategia 2	-	1961,5	490,39	63	52,55	52,55
Estrategia 3	1368,142	1127,7	341,896	63	72,72	66,91
Estrategia 4	-	1957,1	348,38	63	52,65	66,29
Estrategia 5	1368,142	1127,7	341,896	63	72,72	66,91

Cuadro 10: Resultados aumentando el precio de compra.

Los resultados obtenidos en las estrategias 1 y 2 son directamente proporcionales a los de la tabla 8, lo cual tiene sentido debido a que la potencia demandada es la misma y el coste de operación depende del valor de compra. En cuanto a la estrategia 4, el ahorro energético y económico disminuyen respecto a la primera simulación, ya que el aumento del valor de compra es demasiado grande en comparación con el de venta. Las estrategias 3 y 5 actúan de la misma manera puesto que, en la segunda, sale más rentable almacenar la energía regenerada que venderla. Se llega a la conclusión de que la mejor estrategia para el caso de que el valor de compra sea mucho más elevado a la venta es la tercera. Además, se puede destacar que los ahorros energéticos y económicos producidos son mejores cuanto mayores son los precios de compra con esta estrategia.

5.7.3. Análisis de la sensibilidad de los precios de venta

En este apartado se realiza un análisis de sensibilidad de los precio de venta de los excedentes empleando la estrategia 5. Para ello se modifica este parámetro con el objetivo de estudiar la actuación del algoritmo. Modificando el precio de venta de los excedentes se obtienen los resultados de la tabla 11.

Precio venta [euros]	Capacidad bat. [kWh]	Coste operación [euros]	Energía excedente total [kWh]
0,05	685,213	200,18	84,791
0,1	685,213	200,18	123,231
0,15	747,476	195,75	549,708
0,2	1030,638	146,57	5466,866
0,25	850,44	57,84	4307,09
0,3	389,38	22,11	3040,709
0,4	29,5	1,29	1724,687
0,5	0	0	1082

Cuadro 11: Variación del precio de venta de excedentes.

Se puede establecer una relación entre el coste de operación del tren y el precio de venta de las energías excedentes, ya que al aumentar este último, el coste de operación disminuye (figura 53). En el caso de la energía excedente y la capacidad de la batería, estas crecen hasta llegar a un precio de venta de 0,2 [€/kWh]. En este periodo, el algoritmo pretende reducir el costo de operación combinando el aumento de los beneficios de las ventas y la capacidad posible de almacenamiento en la batería. Una vez pasado este punto de inflexión, se reducen ambos parámetros debido a que solo con los beneficios generados por la venta de excedentes, al tener los precios altos, menor la necesidad de almacenar energía en la batería. Esta deja de hacer falta para un precio de venta de 0,5 [€/kWh], donde el coste de operación es nulo, significando que el tren podría operar solo vendiendo la energía excedente. En conclusión, la variación del precio de venta de los excedentes incide directamente en el coste de operación y se tiene en mayor medida al aumentar el precio de venta.

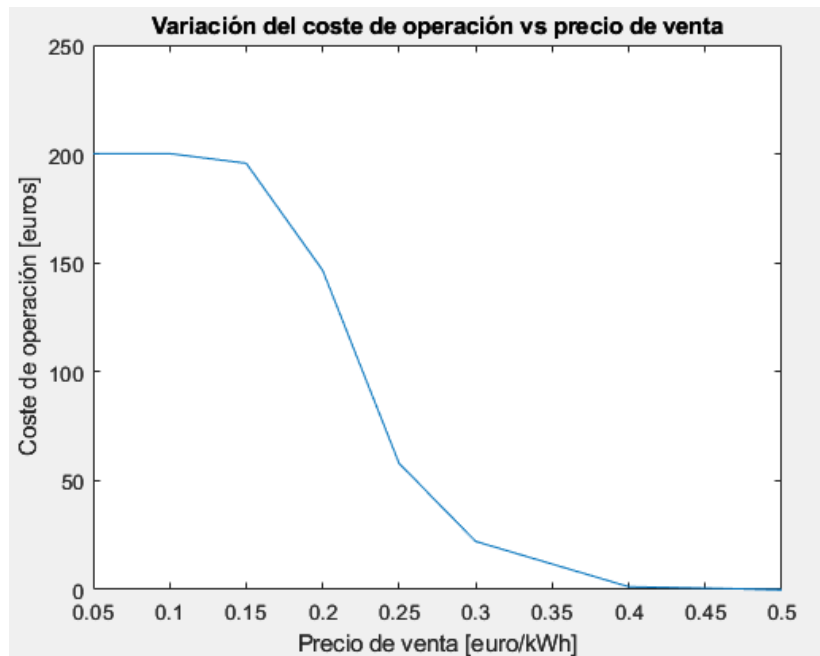


Figura 53: Variación del coste de operación respecto al precio de venta.

5.7.4. Análisis de la sensibilidad de los precios de la energía de la batería

En este apartado se realiza un análisis de sensibilidad, en la estrategia 5, de los precio que definen el coste del kilovatio por hora. Los resultados obtenidos al realizar la simulación están en la tabla 12.

Precio ener. bat. [euros/kWh]	Capacidad bat. [kWh]	Coste operación [euros]
500	1337,17	184,01
600	1103,52	190,92
800	685,213	200,18
900	422,5	203,01
1000	274,84	205,11
1200	17,84	206,36
1300	0	206,42

Cuadro 12: Variación del precio del kilovatio hora de la batería.

El algoritmo actúa aumentando la capacidad de almacenamiento de le energía al disminuir el coste del kilovatio hora de la batería, y viceversa. En el caso contrario se puede observar como cuando el coste es de 1300 [€/kWh] se prefiere eliminar el uso de las baterías y actuar como en la estrategia 4, es decir, mediante conducción eficiente y venta de excedentes para intentar reducir el coste de operación. Por otro lado, el aumento del coste de la energía de la batería genera que el coste de operación aumente, de ahí que se produzca el cambio de estrategia. En definitiva, el aumento del precio de la energía de la batería provoca el incremento en el coste de operación, por lo que el algoritmo trata de disminuir el valor de la capacidad para evitarlo, hasta llegar a suprimirla en determinados niveles.

La representación gráfica de esta simulación es la figura 54.

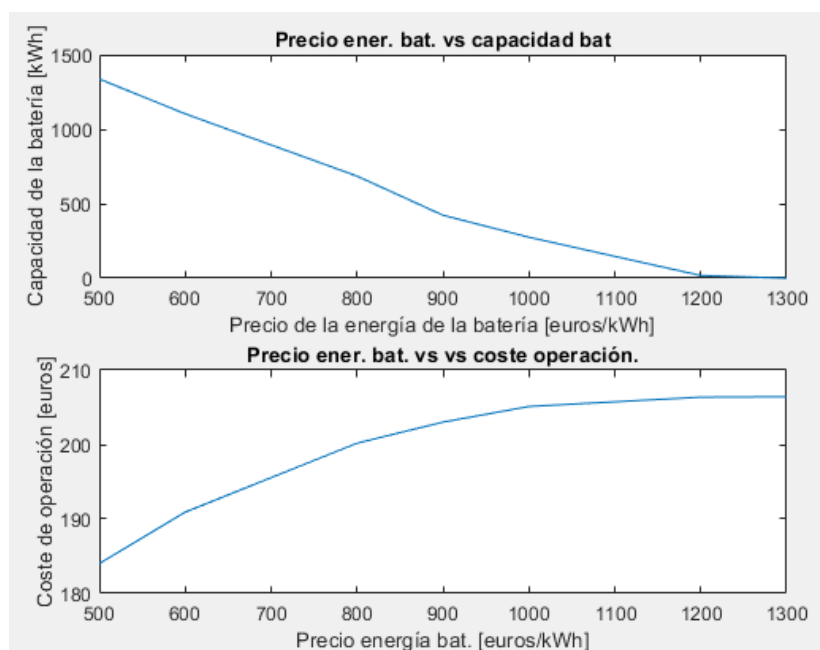


Figura 54: Variación del coste de la energía de la batería respecto al coste de operación y la capacidad de la misma.

6. Conclusiones y futuras líneas de investigación

6.1. Conclusión

Este trabajo ha presentado un algoritmo de optimización para la minimización del coste de operación de un sistema ferroviario. El algoritmo de optimización trabaja siguiendo diferentes estrategias: (1) marcha tendida; (2) conducción eficiente; (3) conducción eficiente y uso de baterías; (4) conducción eficiente y venta de excedentes; y (5) conducción eficiente, uso de baterías y venta de excedentes.

Los algoritmos implementados han sido simulados utilizando como caso de estudio el trayecto del AVE entre Córdoba y Málaga. Los resultados obtenidos han permitido validar de forma positiva las estrategias de conducción eficiente. Además, se ha demostrado que estas estrategias pueden conducir a ahorros significativos en el consumo de energía y, por ende, en los costes de operación del tren. Estas estrategias logran un ahorro superior al 50 % respecto a la operación con marcha tendida y sin necesidad de realizar grandes inversiones. Además, este tipo de estrategias son compatibles con la integración de sistemas de almacenamiento de energía y venta de excedentes, por lo que se aumenta el potencial de ahorro energética y de mejora de la eficiencia operativa del tren.

La combinación de la conducción eficiente y un sistema de almacenamiento de baterías de 733,5 [kWh], cargado por medio de la energía procedente del frenado regenerativo, presenta un ahorro adicional sin necesidad de vender los excedentes a la red. Esta estrategia consigue un ahorro superior al 60 % frente a la operación a marcha tendida utilizando costes actuales de energía y almacenamiento. Por otra parte, se destaca la mejora significativa de la eficiencia energética y económica del sistema respecto a la estrategia de solo conducción eficiente, al disminuir considerablemente los valores obtenidos un 33,84 % y 21,5 %, respectivamente.

La inclusión de la venta de excedentes a la red provenientes de la frenada regenerativa ha permitido explorar nuevas oportunidades de generación de ingresos para el sistema ferroviario. Esta estrategia junto a la conducción eficiente permite obtener un ahorro económico de un 62,4 % respecto al caso base, aunque este valor depende del precio de venta de la energía en el momento. Al igual que en la estrategia anterior se requiere de un sistema de regeneración por freno regenerativo, por lo que se demuestra que el empleo de este sistema es fundamental si se pretende tener un sector ferroviario eficiente y sostenible.

En definitiva, según los resultados obtenidos se establece como la mejor estrategia de operación aquella que emplea conducción eficiente, sistema de almacenamiento de 685,213 [kWh] y venta de excedentes, por lo que se define como la más prometedora de todas para aumentar la eficiencia energética y generar beneficios económicos adicionales, obteniendo como coste de operación 200,19[€], lo que significa un 62,74 %, 21,49 %, 0,33 % y 0,93 % respecto a las estrategias 1, 2, 3 y 4, respectivamente.

En conclusión, este trabajo sienta las bases para una gestión más eficiente y sostenible de la operación ferroviaria. Los resultados obtenidos brindan información valiosa para los operadores de trenes y responsables de políticas, permitiéndoles tomar decisiones informadas sobre la implementación de estrategias de conducción eficiente y sistemas de almacenamiento de energía en el sector ferroviario.

6.2. Contribuciones del trabajo

Las principales contribuciones de este trabajo pueden resumirse en los siguientes puntos:

- El algoritmo permite realizar análisis sobre la influencia de parámetros como la velocidad, perfil del terreno o resistencia al avance en el consumo energético. De este modo, se pueden mejorar o investigar nuevas estrategias efectivas tratando de disminuir el impacto de estos factores, para así, optimizar la eficiencia energética del tren.
- El algoritmo desarrollado en este trabajo implementa de forma precisa la dinámica del tren y sus consumos energéticos, así como el dimensionamiento básico de los sistemas de acumulación, a partir de la degeneración del *calendar life*. Por lo que se puede emplear en proyectos ferroviarios actuales, con el fin de realizar simulaciones y seleccionar otras estrategias más óptimas y sostenibles, desechando la utilizada en ese momento.
- A partir de este modelo, se puede realizar un análisis detallado de la energía ahorrada al emplear diferentes estrategias y medidas para reducir el consumo. Además, permite realizar una estimación de los beneficios económicos generados al disminuir los costos operativos del tren.

6.3. Futuras líneas de investigación

Se puede mejorar y ampliar el propósito de este trabajo añadiendo nuevas líneas de investigación:

- En este trabajo la energía que consume el tren se obtiene a partir de la red eléctrica y de la regeneración mediante el freno regenerativo. En un futuro, se podría mejorar este modelo implementando como alternativa el uso de las energías renovables, principalmente la energía solar o eólica. Esto generaría una gran reducción del consumo energético y aumentaría la autonomía del tren.
- La energía generada en este trabajo es almacenada en un sistema de baterías, por lo que se podría mejorar el algoritmo para realizar análisis y comparaciones, respecto a otros tipos de tecnologías de almacenamiento emergente, para mejorar la eficiencia y gestión de la energía. Entre los principales sistemas, a diferencia de las baterías, se encuentran los ultracondensadores, los volantes de inercia o los almacenamientos térmicos.
- El coste de operación del modelo se calcula aplicando una constante fija que define el precio del kilovatio-hora. Esto provoca que el resultado obtenido no sea el real, ya que en la realidad, el precio de la electricidad varía en función de las condiciones del mercado, de los costes de producción y de los periodos tarifarios. Es por esto que se podría mejorar el algoritmo matemático actual, simulando esta variación o implementando las diferentes tarifas eléctricas existentes.
- La implementación de la degradación de la batería en este modelo matemático de una manera más realista. Para ello se debe definir la fracción de vida perdida a partir del número de ciclos de descarga, no solo la del *calendar life*, ya que puede ser más restrictiva en algunos intervalos de funcionamiento.
- El algoritmo desarrollado en este trabajo no presenta de un sistema de gestión de tráfico, donde se controle por medio de sistemas de comunicación o sensores los flujos de trenes. A partir de este modelo, se podrían optimizar los horarios de funcionamiento para mejorar el aprovechamiento energético en el mallado ferroviario.

Referencias

- [1] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Qué es el cambio climático*. 2014. URL: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/cumbre-cambio-climatico-cop21/el-cambio-climatico/#:~:text=Se%5C%20llama%5C%20cambio%5C%20clim%5C%C3%5C%Aitico%5C%20a,muy%5C%20diversas%5C%20escalas%5C%20de%5C%20tiempo..>
- [2] Oriol Vidal. *El aumento de la temperatura del planeta en tres gráficos*. 2021. URL: <https://www.lavanguardia.com/vida/junior-report/20210325/6605302/aumento-temperatura-planeta-tres-graficos.html#:~:text=Desde%5C%20finales%5C%20del%5C%20siglo%5C%20XIX,de%5C%20gases%5C%20de%5C%20efecto%5C%20invernadero..>
- [3] European Environment Agency. *EEA greenhouse gases*. 2022. URL: <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/data-viewers/greenhouse-gases-viewer>.
- [4] Naciones Unidas. *Causas y efectos del cambio climático*. 2022. URL: [https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=Los%5C%20combustibles%5C%20f%5C%C3%5C%B3siles%5C%20\(carb%5C%C3%5C%B3n%5C%2C%5C%20petr%5C%C3%5C%B3leo,emisiones%5C%20de%5C%20di%5C%C3%5C%B3xido%5C%20de%5C%20carbono](https://www.un.org/es/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=Los%5C%20combustibles%5C%20f%5C%C3%5C%B3siles%5C%20(carb%5C%C3%5C%B3n%5C%2C%5C%20petr%5C%C3%5C%B3leo,emisiones%5C%20de%5C%20di%5C%C3%5C%B3xido%5C%20de%5C%20carbono).
- [5] Dirección General de Calidad y Evaluación Ambiental. *Inventario nacional de emisiones a la atmósfera*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, mar. de 2022, pág. 7. URL: https://www.miteco.gob.es/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-/resumen_inventario_gei-ed_2022_tcm30-534394.pdf.
- [6] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. *Sector ferroviario*. (s.f.) URL: <https://www.miteco.gob.es/es/cambio-climatico/temas/mitigacion-politicas-y-medidas/transporte.aspx>.
- [7] Naciones Unidas. *El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible — Naciones Unidas*. 2019. URL: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>.
- [8] RENFE. *Transporte sostenible*. (s.f.) URL: <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/transporte-sostenible/reduccion-de-emisiones>.
- [9] Ángeles Táuler y Sergio Martín. *Observatorio del Ferrocarril en España*. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, dic. de 2022, págs. 16-22. URL: https://cdn.mitma.gob.es/portal-web-drupal/ferroviario/observatorio/ofe_2021_feb2023_v2.pdf.
- [10] Movilidad y Agenda Urbana Ministerio de Transportes. *Ferroviano*. (s.f.) URL: <https://www.mitma.gob.es/ferroviario>.
- [11] Movilidad y Agenda Urbana Ministerio de Transportes. *Organización del sector ferroviario*. (s.f.) URL: <https://www.mitma.gob.es/ferrocarriles/estructura-del-sector-ferroviario-en-espana/principales-agentes-del-sector-ferroviario>.
- [12] Rubén Samaniego Sánchez. “Un año de la liberalización ferroviaria”. En: *CNMC* (dic. de 2021). URL: <https://blog.cnmc.es/2021/12/14/un-ano-de-la-liberalizacion-ferroviaria-video/#:~:text=Aunque%5C%20el%5C%20transporte%5C%20de%5C%20pasajeros,las%5C%20v%5C%C3%5C%ADas%5C%20de%5C%20nuestro%5C%20pa%5C%C3%5C%ADs..>
- [13] Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. *Estadísticas y balances energéticos*. 2022. URL: <https://www.idae.es/informacion-y-publicaciones/estudios-informes-y-estadisticas>.
- [14] Plataforma Tecnológica Ferroviaria Española. *Gestión energética sostenible e inteligente en el ámbito ferroviario*. Nov. de 2016, págs. 2-15. URL: https://nertatec.es/Media/nertatec/dayvo/Gestion_Energetica%5C%20en%5C%20Ferrocarril.pdf.
- [15] L.U. “Renfe, transporte sostenible”. En: *Diario de León* (nov. de 2022). URL: <https://www.diariodeleon.es/articulo/actualidad/renfe-transporte-sostenible/202211301054582281280.html>.

- [16] Alberto García Álvarez y María del Pilar Martín Cañizares. *Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por ferrocarril*. EnerTrans, 2008. URL: https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Libros/16-EnerTrans_Consumos_ferrocarril.pdf.
- [17] Federación de Empresarios del Metal de la Provincia de Alicante. “Primera subestación eléctrica de corriente continua reversible”. En: *FEMPA* (oct. de 2013). URL: <https://www.fempa.es/noticias/actualidad/tecnico-industrial/primera-subestacion-electrica-de-corriente-continua-reversible>.
- [18] OME. *Motores de imanes permanentes*. (s.f.) URL: <https://www.fempa.es/noticias/actualidad/tecnico-industrial/primera-subestacion-electrica-de-corriente-continua-reversible>.
- [19] Diego López Durán. *Estudio del aprovechamiento de la energía regenerada por los trenes*. Universidad Pontificia de Comillas, (s.f.) Págs. 80-83. URL: https://www.tecnica-vialibre.es/documentos/Articulos/VLT03_06.Diego_L%5C%C3%5C%B3pez.pdf.
- [20] Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado y Egoitz Iturritxa Zubiri. *Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes*. Construcción y Auxiliar de Ferrocarriles S.A., 2008, págs. 5-28. URL: https://www.investigacion-ffe.es/documentos/elecraail/M4-ElecRail_Sistemas_acumulaci%5C%C3%5C%B3n.pdf.
- [21] Sarah Romero. “Este tren eléctrico que funciona con baterías reduce el uso de combustible en un 11%”. En: *El Confidencial* (jun. de 2021). URL: https://www.elconfidencial.com/medioambiente/ciudad/2021-06-04/tren-electrico-baterias-ahorro-combustible_3113984/.
- [22] Grupo Ham. *Qué es el GNL*. (s.f.) URL: <https://ham.es/que-es-el-gnl/>.
- [23] ENESTAS. *Trenes con Gas Natural Licuado*. (s.f.) URL: <https://www.enestas.com/trenes-con-gas-natural-licuado/>.
- [24] Gonzalo García. “Esta es la celda de combustible de hidrógeno más duradera y rentable del mundo”. En: *Híbridos y Eléctricos* (jul. de 2022). URL: https://www.hibridosyelectricos.com/coches/celda-combustible-hidrogeno-mas-duradera-rentable-mundo_60188_102.html.
- [25] Rubén Fidalgo. “Pila de hidrógeno”. En: *Autocasión* (jul. de 2022). URL: <https://www.autocasion.com/diccionario/pila-de-hidrogeno>.
- [26] Carlos Sánchez Criado. *Pilas de combustible como almacenes de energía*. 2014. URL: <https://movilidadelectrica.com/pilas-de-combustible-como-almacenes-de-energia/>.
- [27] Raquel Holgado. “El primer tren de hidrógeno del mundo comienza a circular por Alemania”. En: *20minutos* (ago. de 2022). URL: <https://www.20minutos.es/tecnologia/actualidad/el-primer-tren-de-hidrogeno-del-mundo-comienza-a-circular-por-alemania-5044765/>.
- [28] Álvaro Ruiz. “Alemania mata al tren de hidrógeno antes de nacer. El eléctrico de batería es más rentable, de momento”. En: *motorpasion* (nov. de 2022). URL: <https://www.motorpasion.com/futuro-movimiento/alemania-mata-tren-hidrogeno-antes-nacer-electrico-bateria-rentable-momento>.
- [29] Javier R. Ventoda. *El reto de la eficiencia energética*. Fundación de los Ferrocarriles Españoles, feb. de 2021. URL: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/pdf/0B3975D6-A6AB-4410-8755-798CE852D13B/142526/Fe14_21.pdf.
- [30] Alberto García Álvarez. *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril*. 5^a. Mar. de 2021, págs. 215-216.
- [31] M. J. Putney, A. Fernández Cardador y R. Rodríguez Pecharromán. *Reducción del consumo energético en el ferrocarril*. 4^a. Vol. XCI. 2000, págs. 38-41.
- [32] Ignacio González Franco y Eva Suárez Marcos. *Technologies and potencial developments for energy efficiency and CO2 reductions in rail systems*. FFE, dic. de 2016. URL: https://uic.org/IMG/pdf/_27_technologies_and_potential_developments_for_energy_efficiency_and_co2_reductions_in_rail_systems._uic_in_colaboration.pdf.

- [33] Alberto García Álvarez e Ignacio González Franco. *Dinámica de los trenes en alta velocidad*. 15.^a ed. Mar. de 2021. URL: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/libro?codigo=790159>.
- [34] Alberto de Juan. “¿Cómo frenan los trenes?” En: *Trenvista* (mar. de 2015). URL: <https://www.trenvista.net/a-fondo/como-frenan-los-trenes/>.
- [35] José María Martín Spuch. “Degradación de la batería: ¿el mayor temor del coche eléctrico?” En: *soymotor* (oct. de 2021). URL: <https://soymotor.com/coches/articulos/degradacion-de-la-bateria-coche-electrico-990993#:~:text=QU%5C%C3%5C%89%5C%20ES%5C%20LA%5C%20DEGRADACI%5C%C3%5C%93N%5C%20DE,ser%5C%C3%5C%A1%5C%20diferente%5C%20transcurridos%5C%20unos%5C%20a%5C%C3%5C%B1os..>
- [36] Meysam Khojasteh, Pedro Faria y Zita Vale. *Energy-constrained model for scheduling of battery storage systems in joint energy and ancillary service markets based on the energy throughput concept*. Dic. de 2021. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014206152100452X>.
- [37] Marián Campra G^a. de Viguera. “El AVE Madrid-Málaga cumple 10 años”. En: *Dialnet* (dic. de 2017). URL: https://www.mitma.gob.es/recursos_mfom/comodin/recursos/en34_39.pdf.
- [38] Wikipedia. *Córdoba-Málaga High Speed rail line*. Mayo de 2021. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:C%5C%C3%5C%B3rdoba-M%5C%C3%5C%A1laga_HS_line.svg.
- [39] Vía libre. “RENFE inicia la fabricación de trenes AVE de la serie 112 en sus propios talleres”. En: *Vía libre* (mar. de 2009). URL: <https://www.vialibre-ffe.com/noticias.asp?not=3300>.
- [40] RENFE. *S-102/112*. (s.f.) URL: <https://www.renfe.com/es/es/grupo-renfe/grupo-renfe/flota-de-trenes/s-102-112#:~:text=El%5C%20AVE%5C%20de%5C%20la%5C%20serie,una%5C%20capacidad%5C%20para%5C%20353%5C%20viajeros..>