



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



TESIS

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO
EN TRENES MEDIANTE EL DISEÑO GEOMÉTRICO VERTICAL
SINUSOIDAL Y SU IMPACTO EN EL COSTE DE LA
CONSTRUCCIÓN DE LA INFRAESTRUCTURA**

PRESENTADA POR

JUAN DIEGO PINEDA JARAMILLO

INGENIERO CIVIL

MÁSTER EN INGENIERÍA - INFRAESTRUCTURA Y SISTEMAS DE TRANSPORTE

DIRIGIDA POR

RICARDO INSA FRANCO

DR. INGENIERO DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

REALIZADA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE DOCTOR POR LA UNIVERSIDAD
POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA E INFRAESTRUCTURA DE LOS TRANSPORTES

UNIVERSIDAD POLITÈCNICA DE VALÈNCIA

VALENCIA, MAYO DE 2 017

*“¡Actúa en vez de suplicar! ¡Sacrificate sin esperanza de gloria ni recompensa!
Si quieres conocer los milagros, hazlos tú antes. Sólo así podrá cumplirse tu
peculiar destino.”*

Ludwig van Beethoven.

“El coraje, la audacia, la rebelión, serán elementos esenciales de nuestra poesía”.

Filippo Tommaso Marinetti.

PRÓLOGO

Al acabar esta tesis, y al comenzar a escribir estas líneas, me doy cuenta de todas las personas que de una u otra forma me inspiraron y ayudaron en la realización de esta tesis Doctoral. A ellos les dedico esta tesis.

Quisiera comenzar agradeciéndole a Dios por la fortaleza y la disciplina con la que he podido lograr los objetivos propuestos en mi vida. Y agradecer a mi familia, las personas más importantes en mi vida: Daniela, mis padres, mis hermanos y mis abuelos, pues sin el apoyo de ellos no sería quién soy hoy. Especialmente a mi abuelo, que Dios lo tenga en su gloria. Gracias por todo...

Ricardo Insa, la persona a la que le debo la realización de esta tesis, director y responsable del grupo de investigación GIIF de la UPV, no tengo palabras para expresarle mi agradecimiento. Sus prácticos conocimientos sobre ferrocarriles y su espectacular forma de ser, han sido una fuente de inspiración.

A Pablo Salvador, más que un compañero, un amigo. Gracias por todo tu apoyo en el difícil sendero de la realización de mi tesis, y gracias por todos los momentos compartidos en Valencia.

A los profesores Sebastián J. Argente y Josep R. Medina, pues su amabilidad y sus conocimientos sobre ferrocarriles y redes neuronales artificiales me ayudaron a desarrollar esta tesis. Destaco al profesor Iván Sarmiento, magnífico profesor y mejor persona aún, quien ha sido más que un guía orientándome a lo largo de mi vida académica e investigativa. También le hago una mención especial al profesor Pedro Botero, quien comparte mi cariño por los ferrocarriles y me ha ayudado en más de una ocasión.

No puede faltar una mención con cariño a mis compañeros en la UPV: los Pablos Martínez y Valls, Natxo, Carla, Rosa, Rafa, Jorge y Mapi. El tiempo pasado con ustedes en trabajo y ocio fue espectacular durante mi vida en la hermosa España.

Para terminar, quisiera mencionar que la realización de esta tesis fue posible gracias al convenio de colaboración firmado entre la Universitat Politècnica de València y Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana y a la financiación obtenida por el Ministerio de Economía y Competitividad, a través del proyecto “Estrategias para el diseño y la explotación energéticamente eficiente de infraestructuras ferroviarias y tranviarias” (Ref. TRA2011-26602).



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

ABSTRACT

Railways are generally much more efficient than road transport in terms of energy consumption for both freight and passengers. Despite this, it is still necessary to reduce their energy consumption in order to improve their competitiveness and contribute to a global sustainability.

This thesis presents the training of an artificial neural network using energy consumption data measured in the underground network of Valencia (Spain), with the objective of estimating the energy consumption of the systems. The section studied was line 5 of MetroValencia between Marítim-Serrería and Alameda stations.

After calibration and validation of the artificial neural network using part of the consumption data gathered, the results obtained show that the neural network can predict power consumption with high accuracy (just an error of 2.42%). The advantages of this method lie in its adjustment speed and simulation, and, specially, in the fact that the artificial neural network may function as a virtual laboratory where it is possible to test hypothetical scenarios to reduce the train energy consumption.

Once fully trained, the artificial neural network was used to model several scenarios of hypothetical vertical track layouts between two stations of a metro system, testing the energy consumption and infrastructure investment costs of the track layouts considered. The results show the fact that a symmetrical sinusoidal vertical layout is much more efficient than a flat layout, in terms of energy consumption, with reductions up to 18.41%, and the return period of the extra investment is 9.66 years for an example presented.

Therefore, this thesis provides a useful tool to develop optimum vertical layouts in terms of energy consumption and, in addition, to determine a set of actions to reduce the energy consumption of a metro network.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

RESUMEN

Los ferrocarriles son generalmente mucho más eficientes que el transporte carretero en términos de eficiencia energética para transporte de mercancías y pasajeros. Sin embargo, aún existe la necesidad de reducir su consumo energético para mejorar su competitividad y contribuir a un mundo más sostenible.

Esta tesis presenta el entrenamiento de una red neuronal artificial usando información del consumo medido en la red de metro de Valencia (España), con el objetivo de estimar el consumo energético de los sistemas. El tramo estudiado fue la línea 5 de la red de Metro de Valencia entre las estaciones Marítim-Serrería y Alameda.

Después de la calibración y la validación de la red neuronal artificial usando parte de los datos de consumo recogidos, los resultados obtenidos muestran que la red neuronal puede predecir el consumo energético con alta precisión (solo un error del 2.42%). Las ventajas de este método yacen en su velocidad de ajuste y simulación, y, especialmente, en el hecho de que la red neuronal artificial puede funcionar como un laboratorio virtual donde es posible evaluar escenarios hipotéticos para reducir el consumo energético del tren.

Una vez completamente entrenada, la red neuronal artificial se utilizó para modelar varios escenarios de trazados verticales hipotéticos entre dos estaciones de un sistema metro evaluando el consumo energético y los costes de inversión en infraestructura de los trazados verticales considerados. Los resultados muestran el hecho de que un trazado vertical sinusoidal simétrico es mucho más eficiente que un trazado plano, en términos de consumo energético, con reducciones hasta del 18.41%, y el período de retorno de la inversión extra es de 9.66 años para un ejemplo presentado.

De este modo, esta tesis proporciona una útil herramienta para desarrollar trazados verticales óptimos en términos de consumo energético y, además, para determinar acciones que reduzcan el consumo energético de una red de metro.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

RESUM

Els ferrocarrils són generalment molt més eficients que el transport viari en termes d'eficiència energètica per tal de transportar mercaderies i passatgers. No obstant, encara existeix la necessitat de reduir el seu consum energètic per tal de millorar la seua competitivitat i contribuir a abastar un món més sostenible.

Aquesta tesis presenta l'entrenament d'una xarxa neuronal artificial utilitzant informació del consum mesurat a la xarxa de metro de València (Espanya), amb l'objectiu d'estimar el consum energètic dels sistemes. El tram estudiat fou la línia 5 de la xarxa de Metro de València entre les estacions de Marítim-Serrería i Alameda.

Després de la calibració i la validació de la xarxa neuronal artificial utilitzant part de les dades de consum recollides, els resultats obtinguts mostren que la xarxa neuronal pot predir el consum energètic amb una alta precisió (només un error del 2.42%). Els avantatges d'aquest mètode recauen en la seua velocitat d'ajust i simulació i, especialment, en el fet que la xarxa neuronal artificial pot funcionar com a laboratori virtual on es possible avaluar escenaris hipotètics per reduir el consum energètic del tren.

Una volta completament entrenada, la xarxa neuronal artificial s'utilitzà per a modelitzar diferents escenaris de traçats verticals hipotètics entre dos estacions d'un sistema de metro avaluant el consum energètic i els costos d'inversió en infraestructura dels traçats verticals considerats. Els resultats mostren el fet que un traçat vertical sinusoidal simètric es molt més eficient que un traçat pla, en termes de consum energètic, amb reduccions fins al 18.41% i el període de retorn de la inversió extra es de 9.66 anys per a un exemple presentat.

D'aquest mode, aquesta tesis proporciona una ferramenta útil per desenvolupar traçats verticals òptims en termes de consum energètic i, a més a més, per a determinar accions que redueixen el consum energètic d'una xarxa de metro.



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes.....	2
1.2. Objetivo y justificación de la investigación.....	5
1.3. Organización del texto	6
2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES	11
2.1. Introducción.....	11
2.2. Funcionamiento de una red neuronal.....	13
2.3. Tipos de redes neuronales	16
2.4. Entrenamiento de la red neuronal.....	18
2.5. Sobreaprendizaje.....	20
2.6. Datos de entrenamiento, validación y test	21
2.7. Técnicas para evitar el sobreaprendizaje.....	22
2.7.1. Early-stopping.....	22
2.7.2. Regularización.....	23
2.7.3. Redes podadas	24
2.8. Tamaño de la red neuronal.....	24
2.9. Estandarización de los datos	25
2.10. Simulación	26
3. DINÁMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL FERROCARRIL	31
3.1. Resistencias del material rodante en los ferrocarriles	31
3.2. Resistencias al avance.....	32
3.2.1. Resistencia al avance en recta	32
3.2.2. Resistencia a la curvatura	33

3.2.3.	Resistencia a la pendiente.....	34
3.3.	Esfuerzos de tracción y frenado.....	34
3.4.	Dinámica en los ferrocarriles.....	37
3.4.1.	Ecuación del movimiento.....	37
3.4.2.	Dinámica del tren en rampas y pendientes	40
3.5.	Consumo energético.....	42
3.5.1.	Uso de la energía en el transporte.....	42
3.5.2.	Consumo energético en los ferrocarriles.....	44
3.6.	Medidas para mejorar la eficiencia energética en ferrocarriles.....	47
3.6.1.	Trazado sinusoidal simétrico.....	49
3.6.2.	Conducción económica.....	52
3.6.3.	Frenado regenerativo.....	56
4.	COSTES DE INVERSIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA.....	59
4.1.	Introducción.....	59
4.2.	Elementos de la infraestructura	62
4.2.1.	Infraestructura.....	63
4.2.2.	Vía	66
4.2.3.	Estaciones.....	69
4.2.4.	Sistemas de electrificación.....	71
4.2.5.	Sistemas de seguridad y comunicaciones	75
4.2.6.	Expropiaciones.....	76
4.3.	Comparación entre diferentes líneas de Metros.....	79
4.3.1.	Variación de costes en líneas de metro.....	79
4.3.2.	Explicación de las variaciones de los costes	82
5.	DESCRIPCIÓN DE LA RED METROPOLITANA ESTUDIADA.....	87

5.1. Línea de estudio	90
5.2. Material rodante.....	90
6. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y TOMA DE DATOS	96
6.1. Descripción de los dispositivos de medida.....	96
6.2. Toma de datos	100
7. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO	106
7.1. Metodología.....	106
7.1.1. Entrenamiento de la red neuronal	107
7.1.2. Desarrollo del trazado vertical sinusoidal	107
7.1.3. Inclusión del coste de inversión en la infraestructura de los trazados ...	107
7.2. Modelo de consumo energético utilizando redes neuronales artificiales.....	108
7.2.1. Estructura de la red neuronal	108
7.2.2. Metodología para el entrenamiento de la red neuronal	108
7.2.3. Mediciones.....	108
7.2.4. Entrenamiento de la red neuronal artificial.....	112
7.2.5. Resultados del entrenamiento de la red neuronal	115
7.3. Trazado geométrico sinusoidal.....	124
7.3.1. Características generales de los trazados.....	125
7.3.2. Perfil de velocidad.....	126
7.4. Resultados y discusión.....	130
7.5. Costes de inversión en la infraestructura de los trazados	135
7.5.1. Consideraciones generales	135
7.5.2. Coste de construcción del túnel.....	138

7.5.3. Resultados.....	141
8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN.....	145
8.1. Conclusiones.....	146
8.2. Futuras líneas de investigación.....	149
9. REFERENCIAS.....	153
10. ANEXOS.....	167
10.1. Anexo 1. Script de Red Neuronal: “Simple script”	167
10.2. Anexo 2. Script de Red Neuronal: “Advanced Script”	168
10.3. Anexo 3. Algoritmo desarrollado con datos estandarizados.....	170
10.3.1. Creación de la red.	170
10.3.2. Aplicación de la red neuronal para trazados sinusoidales	173

Listado de figuras

Fig. 1. Red neuronal con una capa oculta.....	15
Fig. 2. Funciones de transferencia.	16
Fig. 3. Estructura de la red neuronal.....	18
Fig. 4. Aproximación de la función seno con y sin sobreaprendizaje, usando datos con ruido.	21
Fig. 5. Evolución de errores de entrenamiento, validación y test.....	23
Fig. 6. Ejemplo de número de neuronas y error de una red neuronal.....	25
Fig. 7. Validación cruzada de datos de entrenamiento, validación, test y total de datos.	27
Fig. 8. Curvas de esfuerzo de tracción y de frenado de la locomotora EURO 4000 Freight de Vossloh.....	37
Fig. 9. Distribución de cada componente en el consumo enegético de una línea metropolitana.	46
Fig. 10. Trazado sinusoidal simétrico.	50
Fig. 11. Pantógrafo de tren serie 4300 de vossloh de Metro Valencia.....	73
Fig. 12. Costes típicos para metros de nueva construcción.	83
Fig. 13. Plano de la red completa de Metrovalencia, al año 2 016.	88
Fig. 14. Vehículo serie 4300 de Vossloh de cuatro y cinco cohes.....	91
Fig. 15. Tren de Metrovalencia serie 4300 de Vossloh.....	93

Fig. 16. Dimensiones e imagen de los medidores tipo MSAV-DC, fabricado por Mors-Smitt.....	97
Fig. 17. Ficha técnica con las características de los medidores tipo MSAV-DC de Mors-Smitt.....	98
Fig. 18. Esquema de medición del consumo energético.	99
Fig. 19. Trayecto de la línea 5 entre Marítim Serrería y Alameda.	100
Fig. 20. Perfil del trazado entre Marítim Serrería y Alameda y las estaciones (paradas) en el medio.....	101
Fig. 21. Consumo de tracción neto medido en el disyuntor para los trayectos medidos.	103
Fig. 22. Diagrama de flujo de la metodología para desarrollar el modelo.....	106
Fig. 23. Velocidad y aceleración del primer recorrido entre Marítim Serrería y Alameda.....	109
Fig. 24. Esfuerzo de tracción del primer recorrido entre Marítim Serrería y Alameda.	110
Fig. 25. Pendiente del trazado vertical, entre Marítim Serrería y Alameda.....	110
Fig. 26. Consumo energético medido en el disyuntor del tren en: (a) el primer recorrido entre Marítim Serrería – Alameda, (b) los seis recorridos realizados con dirección Marítim Serrería – Alameda.	111
Fig. 27. Valor del rMSE según el número de neuronas en la capa oculta.	114
Fig. 28. Estructura de red neuronal utilizada en Matlab.	115
Fig. 29. Validación cruzada para los datos de entrenamiento, validación, test y todos los datos juntos.....	116

Fig. 30. Comparación entre el consumo energético medido y el estimado por la red neuronal en los doce recorridos entre Marítim-Serrería y Alameda.	122
Fig. 31. Consumo global por viaje.	123
Fig. 32. Comparación entre el consumo energético medido y el estimado por la red neuronal entrenada en la validación de esta con el recorrido 13 entre Alameda y Marítim-Serrería.	124
Fig. 33. Alternativas de trazado vertical entre un par de estaciones.	125
Fig. 34. Perfil de velocidad con deriva.	126
Fig. 35. Curvas de características del tren Metrovalencia serie 4300 de Vossloh de 4 coches.	128
Fig. 36. Perfil de velocidad del trazado vertical plano.	129
Fig. 37. Perfil de velocidad del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta=0.5\%$	129
Fig. 38. Perfil de velocidad del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta=1.0\%$	130
Fig. 39. Consumo energético global entre dos estaciones para los tres trazados.	131
Fig. 40. Consumo energético en cada punto entre dos estaciones para los tres trazados hipotéticos.	132
Fig. 41. Consumo energético y trazado vertical para el trazado plano.	133
Fig. 42. Consumo energético y trazado vertical para el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$	134
Fig. 43. Consumo energético y trazado vertical para el trazado sinusoidal con $\delta = 1.0\%$	135

Fig. 44. Trazado plano.....	137
Fig. 45. Trazado sinusoidal con profundidad máxima $\delta = 0.5\%$	137
Fig. 46. Trazado sinusoidal con profundidad máxima $\delta = 1.0\%$	138
Fig. 47 Sección típica del túnel por el método de trinchera cubierta.	140

Listado de tablas

Tabla 1. Costes de infraestructura para diferentes topografías.	60
Tabla 2. Elementos que componen el coste total de inversión de una infraestructura ferroviaria.	62
Tabla 3. Precios unitarios para los diferentes tipos de excavación.....	64
Tabla 4. Precios unitarios para los diferentes tipos de terraplén.....	65
Tabla 5. Coste asociado a la construcción de estaciones.....	70
Tabla 6. Costes de construcción estimados relacionados a las estaciones.....	71
Tabla 7. Precios medios de los diferentes tipos de suelo.....	78
Tabla 8. Coste por kilómetro de algunos proyectos de Metro.....	79
Tabla 9. Datos de la red de Metrovalencia al año 2 015.....	89
Tabla 10. Características del tren serie 4300 de Vossloh de 4 coches.....	91
Tabla 11. Consumo de tracción global de los recorridos medidos.....	101
Tabla 12. Resultados del entrenamiento de la red con diferentes variables.....	112



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*



CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

El rápido crecimiento del consumo energético en el mundo ya ha provocado problemas debido a las dificultades en el suministro de energía, el agotamiento de los recursos energéticos y los impactos negativos medioambientales. La Agencia Internacional de la Energía ha reunido datos escalofriantes sobre las tendencias de consumo energético durante los últimos años [1]. En el año 1973 existía un consumo a nivel mundial de 4 661 millones de toneladas equivalentes de petróleo (Mtep), mientras que al año 2014 se consumieron 9 425 Mtep, representando un crecimiento del 102% en 40 años. En cuanto a las emisiones globales de CO₂, en el año 1973 hubo 15 458 Mt de emisiones de CO₂, mientras que al año 2014 estas emisiones alcanzaron la magnitud de 32 381 Mt, con un incremento del 107%. Estos datos llevan a las administraciones alrededor al mundo a tomar medidas para reducir el consumo energético y las emisiones de CO₂.

El sector del transporte contribuye enormemente en el consumo energético mundial. Según datos de la Agencia Internacional de la Energía [1], el consumo energético promedio del sector transporte en el año 2014 fue 2 627.02 Mtpe, siendo responsable del 27.87%. En cuanto al tipo de combustible utilizado, existe una fuerte presencia de los productos del petróleo con una cuota del 92.36% del total de los combustibles utilizados presentando un escenario pesimista en el tema medioambiental si no se reduce esta cifra.

La energía consumida por el sector transporte en la Unión Europea, al año 2014, fue de 352.8 Mtpe, representando el 33.2% del consumo total de energía en la Unión Europea [2].

Es importante resaltar que el consumo total de energía a nivel de la Unión Europea entre 2002 y 2012 ha reducido en un 3.3%, mientras que el consumo energético dedicado al transporte ha crecido el 0.96% en el mismo período de tiempo. A partir

del 2 008 se comienza a ver unas reducciones en el consumo energético en Europa, gracias a políticas que buscan reducir el alto consumo energético en el mundo. En el caso Español, el consumo energético en dicho período se ha reducido en un 2.4%, mientras que la energía dedicada al transporte se ha reducido en un 5.1% [2].

Los ferrocarriles son generalmente mucho más eficientes que el transporte por carretera en términos de consumo energético para transporte de mercancías y de pasajeros [3], [4], [5]. A pesar de esto, aún es necesario reducir su alto consumo energético buscando mejorar su competitividad y contribuir a un mundo más sostenible. Por esta razón, muchas estrategias son implementadas para reducir el consumo energético en los ferrocarriles. Entre estas estrategias, las más relevantes son concernientes al diseño de las líneas ferroviarias, el material rodante, y la operación ferroviaria [3].

El consumo energético en los ferrocarriles depende de muchos factores como las pendientes, velocidades máximas, cargas, patrones de parada, eficiencia eléctrica del tren y sistema de suministro de energía, resistencia a la rodadura, estilos de conducción de cada maquinista, etc. Autores han estimado el consumo energético y explorado mejoras en los ferrocarriles a través de la optimización del trazado geométrico por medio de Sistemas de Información Geográfica (SIG) [6], [7]. Otros autores han optimizado los sistemas de transporte de trenes y sus autobuses alimentadores en conjunto [8]. Se han utilizado algoritmos genéticos aplicados para trenes o para la programación del personal [9], [10], y para la optimización del trazado geométrico del tren [6], [7], [11]. Otros autores han realizado análisis basado en simulaciones de control de trenes bajo diferentes trazados geométricos [12].

En cuanto al trazado ferroviario, Kim & Schonfeld introdujeron el concepto del trazado vertical profundo para reducir el consumo energético y el desgaste de los frenos en las operaciones de tránsito de los ferrocarriles [13]. Este trazado utiliza la gravedad en la aceleración de los trenes entre un par de estaciones cuando existe una pendiente y la deceleración de ellos cuando existe una rampa.

Por otro lado, Yeh [14] optimizó el trazado vertical y las características operacionales y proporcionó ecuaciones más generalizadas para el trazado vertical profundo. Él también proporcionó un conjunto diferente de insumos para un análisis de sensibilidad, pero resolvió los problemas para estaciones a igual elevación. Para aplicaciones realistas, es muy deseable un enfoque considerando diferentes elevaciones de la estación.

Posteriormente, Kim & Chien [12] extendieron el estudio anterior de Kim & Schonfeld [13] para varios trazados geométricos entre estaciones de igual elevación: a nivel (pendiente de 0 mm/m), perfil convexo (profundo), y perfil cóncavo (donde el tren asciende hasta la mitad de la línea entre un par de estaciones y luego desciende). Para el análisis de sensibilidad, ellos analizaron los efectos del punto de inercia, tiempo de viaje y consumo energético.

Las inversiones en la construcción de nuevas líneas ferroviarias y las mejoras de las existentes son justificadas, muchas veces, por la reducción del consumo y de las emisiones del conjunto del sistema de transporte. Por ello es conveniente tener en cuenta en el diseño de los trazados las condiciones necesarias para lograr este fin [15].

En el tema de los costes de la inversión de la infraestructura, autores han optimizado los trazados de tránsito por ferrocarril conectando varias estaciones, con el objetivo de minimizar el coste de construcción a través de la optimización del trazado, combinando algoritmos genéticos con evaluaciones basadas en sistemas de información geográfica [6]. También se han empleado algoritmos genéticos para modelar el trazado geométrico con el objetivo de optimizar la ubicación de estaciones mientras se considera la minimización del coste total del sistema por persona, maximizando la cobertura de pasajeros, y minimizando el coste de uso por persona para los sistemas de transporte ferroviarios. Aun así, no consideraron el consumo energético en su estudio [11].

Considerando el panorama expuesto, este trabajo recoge las investigaciones desarrolladas anteriormente y busca desarrollar un modelo analítico en el que se propone un trazado geométrico vertical profundo en una línea metropolitana que

garantice el consumo energético mínimo, optimizando la explotación de una línea ferroviaria entre un par de estaciones, y a su vez garantizar el coste mínimo de la construcción de la infraestructura.

1.2. Objetivo y justificación de la investigación

En esta investigación se formularon preguntas que muestran la necesidad de incluir en los trazados verticales aspectos que reduzcan el consumo energético y el coste de la inversión de la infraestructura ferroviaria. La integración de estos costes puede llevar a lograr un análisis económico donde se incluya el factor más importante a la hora de considerar la factibilidad de construir una línea ferroviaria.

¿Se puede influir en el trazado geométrico vertical de una línea metropolitana con el fin de reducir el consumo energético y el coste de la inversión de la infraestructura asociada a ésta?

¿Cómo modelar analíticamente la elección de un trazado vertical óptimo en los aspectos del consumo energético y del coste de inversión de la infraestructura en una línea metropolitana?

Para resolver estos interrogantes, esta tesis tiene por objeto estudiar el consumo energético en trenes metropolitanos, y desarrollar una herramienta de simulación con tres objetivos: representar el consumo energético en una línea metropolitana entre dos estaciones, optimizar el consumo energético mínimo mediante la utilización de un trazado vertical profundo y garantizar el coste mínimo de la inversión de la infraestructura ferroviaria. En términos específicos se han tratado los siguientes temas:

- Relacionar las resistencias que debe vencer un tren con su tasa de consumo energético.
- Relacionar el consumo energético de una línea metropolitana durante su operación con el coste de la inversión de la infraestructura ferroviaria, mediante la implementación de un trazado vertical profundo entre un par de estaciones.
- Integrar el concepto de conducción económica con el fin de optimizar el consumo energético en los trenes.

El modelo planteado se configura como un aspecto fundamental para el análisis del consumo energético que se puede aplicar en líneas metropolitanas de nueva construcción.

Los principales aportes de este estudio son la capacidad de validación del modelo con datos reales de operación en una línea metropolitana, y su posterior aplicación para la evaluación de ahorro en el consumo energético que tiene un trazado ferroviario de esta índole. Esta herramienta resulta eficaz para las administraciones gubernamentales que planifican la implementación de una nueva línea metropolitana, y buscan optimizar el consumo energético durante su operación y la inversión en la infraestructura ferroviaria.

1.3. Organización del texto

En el siguiente capítulo se hace una breve introducción a las redes neuronales artificiales, conjunto de técnicas que forman parte de la inteligencia artificial utilizadas para detectar relaciones complejas y no lineales entre variables de entrada y variables de salida. Además, se argumenta la utilización de estas para plantear la necesidad e idoneidad de aplicar este tipo de metaheurísticas para el análisis del consumo energético en una línea metropolitana.

El capítulo 3 presenta los elementos teóricos relacionados con la dinámica ferroviaria y el consumo energético en el ferrocarril. En el tema de la dinámica de ferrocarriles, se introducen conceptos de resistencias existentes en el material rodante y esfuerzos existentes en el tren debido a la explotación ferroviaria. En cuanto al consumo energético se presentan conceptos del consumo energético y su implicación con trazados sinusoidales y conducciones económicas.

El capítulo 4 hace referencia a los costes de inversión de la infraestructura ferroviaria, presentando la influencia de cada elemento de la infraestructura en el coste global de un proyecto ferroviario. Se realiza una comparación general de costes en diferentes líneas de Metro, mostrando la gran variabilidad que existe entre estos.

El capítulo 5 describe a red metropolitana de la ciudad de Valencia, definiendo la línea de estudio y el material rodante estudiado.

El capítulo 6 presenta los dispositivos de medida empleados para lograr las mediciones, describiendo las pruebas realizadas, los tramos de vía, el tipo de material móvil y el equipo de registro empleados.

El capítulo 7 presenta el desarrollo del modelo de optimización del consumo energético. Primero se presenta la red neuronal entrenada para obtener una herramienta de mediciones de consumo energético. También se hace una comparación de las mediciones realizadas para este caso con las obtenidas por medio de la red neuronal, con objeto de validarlas. Luego se introduce el trazado geométrico vertical sinusoidal propuesto a evaluación para aplicación de la red neuronal con su respectivo perfil de velocidades consistente con la teoría de la conducción económica. A continuación, se presentan los resultados que resultan bastante clarificadores, y mediante ejemplos sencillos, se discute cómo influye el trazado geométrico vertical en el consumo energético del tren. Esto es fundamental, ya que constituye uno de los puntos clave de la presente tesis. Por último, se integran los conceptos de costes de la infraestructura en cada uno de los trazados mostrados.

En el capítulo 8 se recogen las principales conclusiones de esta tesis y se proponen los próximos pasos a seguir en esta línea de investigación.

Por último, en el capítulo 9 se presentan las referencias bibliográficas utilizadas, y se presentan los anexos en el capítulo 10.

Conviene resaltar, antes de continuar con el resto del texto, que éste se ha redactado con el propósito de ser leído por personal técnico especializado en diferentes campos de la ingeniería. Por esto, se ha procurado definir e ilustrar algunos aspectos que, desde el punto de vista de un ingeniero especializado en su campo, puede encontrar básicos. Conceptos como qué es una red neuronal o qué es un esfuerzo de tracción pueden ser aspectos ampliamente conocidos para un Ingeniero Informático y uno de Caminos, respectivamente. Sin embargo, el primer concepto puede ser totalmente

desconocido para el Ingeniero de Caminos, y viceversa. Por esto, se ha procurado explicar brevemente los conceptos *a priori* considerados como sobreentendidos, aun a riesgo de que el texto pueda llegar a resultar muy básico en ciertas partes.

CAPÍTULO 2.

REDES NEURONALES ARTIFICIALES

2. REDES NEURONALES ARTIFICIALES

2.1. Introducción

La inteligencia artificial es un área multidisciplinaria que a través de sistemas computacionales estudia la creación y el diseño de sistemas capaces de resolver problemas generalmente asociados con la inteligencia humana [16]. Hay una gran cantidad de definiciones del término y existe un debate alrededor de lo que es la inteligencia artificial, incluyendo argumentos filosóficos, matemáticos y lógicos [17], [18], [19], [20]. Las redes neuronales son metaheurísticas que hacen parte de la inteligencia artificial.

Warren McCulloch y Walter Pitts crearon en 1943 un modelo computacional para redes neuronales llamado la lógica del umbral, basado en matemáticas y algoritmos. Este modelo fue la base para la aplicación de las redes neuronales a la inteligencia artificial [21].

Las redes neuronales artificiales, comúnmente referidas como redes neuronales, son un conjunto de técnicas que forman parte del campo de la inteligencia artificial. Son modelos matemáticos con una estructura que consiste en una red formada por nodos (o neuronas) y conexiones que permiten que la información de una neurona pase a otra neurona, razón por la cual se asemejan al cerebro de los seres humanos, de allí su nombre.

Una red neuronal es un sistema computacional paralelo que consiste en muchos elementos de procesamiento conectados con cada otro de tal manera que pueda realizar una tarea. Las redes neuronales han ganado su popularidad porque son adaptables, robustas, tolerantes a fallos, tolerantes a ruidos y masivamente paralelas. De las muchas tareas que las redes neuronales realizan, la más importante es el aprendizaje. Una red neuronal puede mejorar su desempeño a través del aprendizaje, lo que permite presentar cierto comportamiento inteligente [22].

Las redes neuronales se aplican en diversidad de problemas de reconocimiento de patrones y de aproximación de funciones, debido a su flexibilidad y facilidad de uso. El poder de este modelo reside en la capacidad de procesamiento paralelo realizado por las neuronas artificiales. La neurona artificial es un elemento de procesamiento simple y forma el elemento principal de un sistema neuronal artificial.

Estas neuronas artificiales se disponen generalmente en estructuras denominadas capas. Una red neuronal artificial está compuesta por un conjunto de capas, de tal manera que cada neurona en la capa i se conecta a cada neurona en la capa $i+1$. De esta manera, la información se encuentra distribuida a lo largo de las sinapsis de la red, dándole a este sistema cierta tolerancia a fallos. Además, las redes neuronales artificiales pueden adaptar su funcionamiento a diferentes entornos, modificando sus conexiones entre sus neuronas. De esta manera pueden aprender de la experiencia y generalizar conceptos, o como se le llama coloquialmente, permite el “entrenamiento” de la red neuronal artificial.

Las redes neuronales tienen una capa de entrada y una capa de salida. Todas las capas entre ellas se llaman capas ocultas. El paso hacia adelante de una red neuronal artificial es donde la información fluye de la capa de entrada, a través de cualquier capa oculta, a la salida. En este proceso es mediante el cual se produce el entrenamiento de la red neuronal artificial. Algunas ventajas de las redes neuronales son:

- Robustez frente al ruido en datos de entrada y salida.
- Independencia entre complejidad del problema y dimensionamiento de la red.
- Rapidez de ajuste y simulación.
- Laboratorio virtual, curvas de diseño o dimensionamiento.

Y algunas desventajas de las redes neuronales, son:

- Posibilidad de hallar mínimos locales, y no el mínimo global.
- Sobreaprendizaje o pérdida de generalización.
- Criterios de dimensionamiento de la red neuronal arbitrarios.

- Comportamiento de caja negra.
- La inicialización aleatoria de los pesos y bias, y la división aleatoria de los datos en entrenamiento, validación y test, dan lugar a soluciones diferentes (relacionado con los mínimos locales).
- No permiten la extrapolación.

En cuanto a modelación del consumo energético mediante la implementación de redes neuronales artificiales, autores las han utilizado para desagregar consumo de electricidad de hogares [23], también para predecir el consumo energético en supermercados [24] obteniendo resultados interesantes.

Por otro lado, Moon et al. [25], desarrollaron un modelo de redes neuronales artificiales para predecir el consumo energético en cuartos de hoteles.

También han sido utilizados los modelos de redes neuronales para predecir el consumo energético en edificios bioclimáticos, obteniendo resultados que predicen el consumo energético medido [26].

En el ámbito ferroviario, Abolfazli et al. [27] desarrollaron un modelo de redes neuronales para predecir el consumo de petróleo en el transporte ferroviario iraní, y Feng et al. [28] construyeron un modelo de redes neuronales para calcular el consumo energético debido a la tracción en una línea de metro.

Sin embargo, en material consultado, no hay evidencia de un estudio pertinente donde exista un modelo de redes neuronales artificiales que involucren el trazado ferroviario para analizar su influencia en el consumo energético en una línea ferroviaria metropolitana, y su posterior aplicación para simular el consumo energético en escenarios hipotéticos de trazados geométricos.

2.2. Funcionamiento de una red neuronal

Una red neuronal es capaz de detectar relaciones complejas y no lineales entre variables, a partir de unidades sencillas como las neuronas, al disponer de muchas de estas unidades en paralelo. Las variables se dividen en variables de entrada y

variables de salida, relacionadas por algún tipo de correlación o dependencia (no necesariamente causa-efecto). También es posible que la salida sea la clasificación de las variables de entrada en diferentes grupos.

La neurona artificial es un elemento de procesamiento simple que, a partir de un vector de entrada, produce una única salida. Estas neuronas se pueden disponer en diferentes capas. En general existen tres tipos de neuronas artificiales (Fig. 1):

- Neuronas de entrada: Son las que reciben información directamente desde el exterior (e_i).
- Neuronas ocultas: Son las que reciben información desde otras neuronas artificiales, en estas es donde se realiza la representación de la información almacenada (b_j).
- Neuronas de salida: Son las que reciben la información procesada y las devuelven al exterior (s_j).

La información pasa de las neuronas de entrada a las neuronas ocultas por medio de los pesos sinápticos de las capas ($w_{i,j}$).

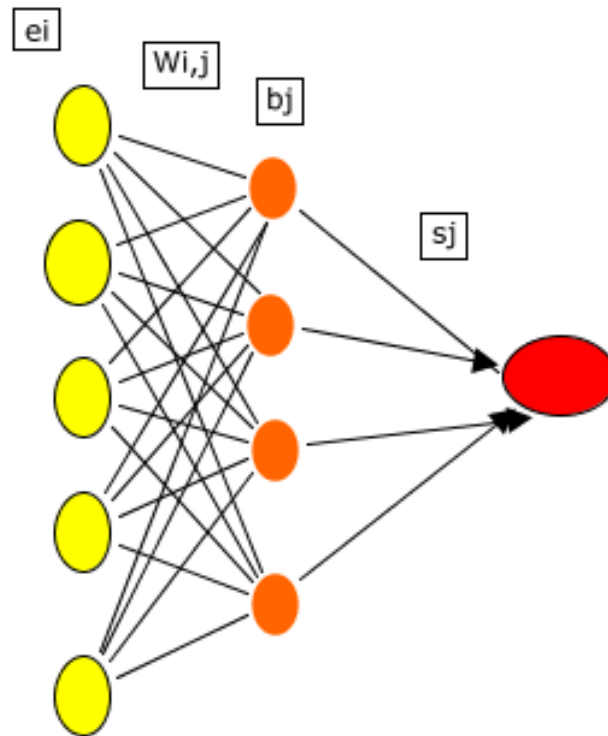


Fig. 1. Red neuronal con una capa oculta.
Fuente: Elaboración propia.

El funcionamiento de una neurona consiste en la transformación de los valores de las entradas a través de las conexiones, en una salida. La salida se obtiene a partir de una función de propagación, una función de activación, y una función de transferencia.

- La función de propagación consiste en la sumatoria de todas las entradas multiplicadas por los pesos de las conexiones, más un valor de sesgo o "bias".
- La función de activación, si existe, activa o desactiva la salida de esta neurona.
- La función de transferencia se aplica al resultado de la función de propagación y normalmente consiste en una función de salida acotada como la sigmoidea (logsig) $[0, 1]$, o la tangente hiperbólica (tansig) $[-1, 1]$. Otras funciones de transferencia pueden ser una función lineal (purelin) $[-\infty, +\infty]$, base radial (radbas) $[0, 1]$ o una función de discriminación (hardlim) $[0, 1]$ (Fig. 2).

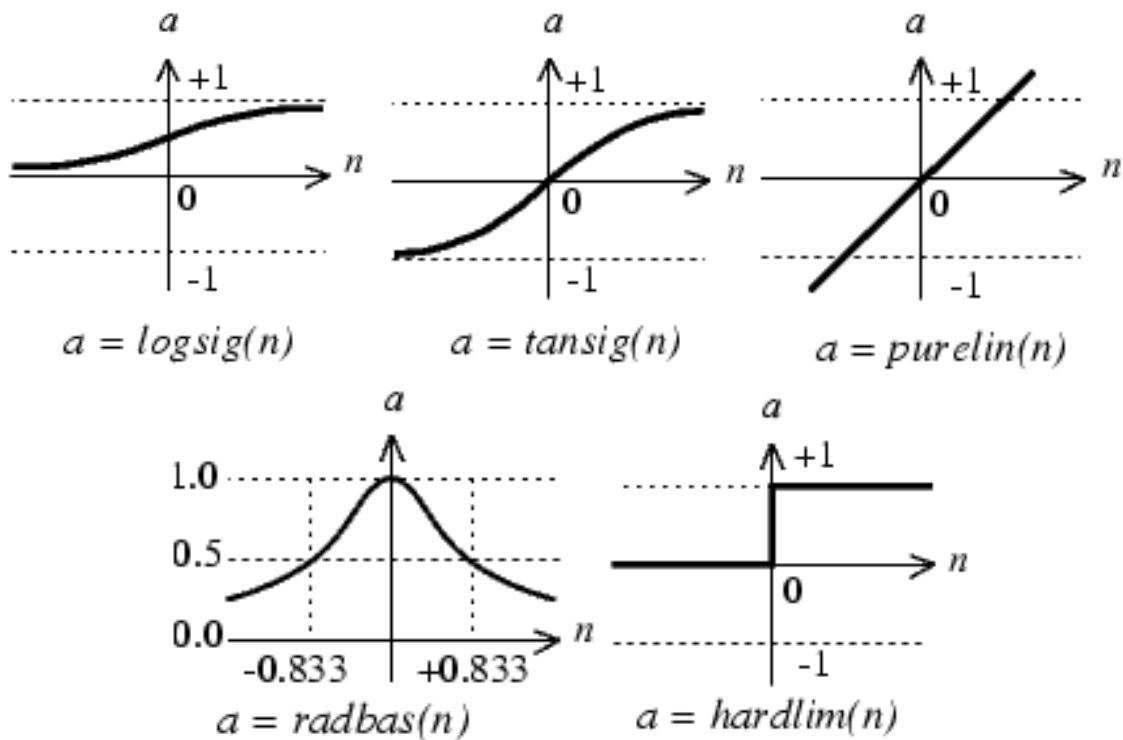


Fig. 2. Funciones de transferencia.

Fuente: [29].

2.3. Tipos de redes neuronales

Los criterios para clasificar las redes neuronales son:

- Según el tipo de conexiones:
 - Redes de propagación hacia adelante (*feed-forward*), donde las conexiones van en un solo sentido desde la capa de entrada hacia la capa de salida. Existen dos tipos de redes *feed-forward*, monocapa y multicapa.
 - Redes recurrentes, donde las conexiones pueden realizar al menos un ciclo cerrado de activación neuronal.
- Según el tipo de aprendizaje:
 - Aprendizaje supervisado, donde los datos de entrada tienen una respuesta conocida (o salida), con la cual se ajusta o entrena la red neuronal.

Ejemplos: perceptrón simple, perceptrón multicapa, red *backpropagation*, memoria asociativa bidireccional.

- Aprendizaje no supervisado o auto-organizado, donde los datos son solamente entradas. Son redes generalmente empleadas para clasificación y reconocimiento de patrones. Ejemplos: memoria asociativa, redes de Hopfield.
- Redes híbridas, con un enfoque mixto que usa una función de mejora para facilitar la convergencia. Ejemplo: red de base radial.
- Aprendizaje reforzado, que se sitúa a medio camino entre el supervisado y el no supervisado.
- Según el tipo de entrada:
 - Redes analógicas, que procesan los datos de entrada con valores continuos y habitualmente acotados.
 - Redes discretas, que procesan los datos de entrada de naturaleza discreta, habitualmente valores lógicos booleanos.

Esta tesis utilizará un modelo de redes neuronales artificiales con conexión hacia adelante (*feed-forward*) multicapa, con aprendizaje supervisado tipo *backpropagation*, porque es una estructura común y probada, y con gran capacidad para aproximación de funciones [30], [31].

Este tipo de red caracterizado por su organización en capas y conexiones rigurosamente hacia adelante, utiliza algoritmos de entrenamiento del tipo supervisado. Este tipo de red neuronal es el más utilizado en aplicaciones prácticas que utilizan redes neuronales, obteniendo muy buenos resultados fundamentalmente como clasificadores de patrones y estimadores de funciones.

Dentro de este grupo de redes neuronales, se implementará el perceptrón multicapa, con estructura presentada en la Fig. 3. La topología de un perceptrón multicapa está definido por un conjunto de capas ocultas, una capa de entrada y una de salida.

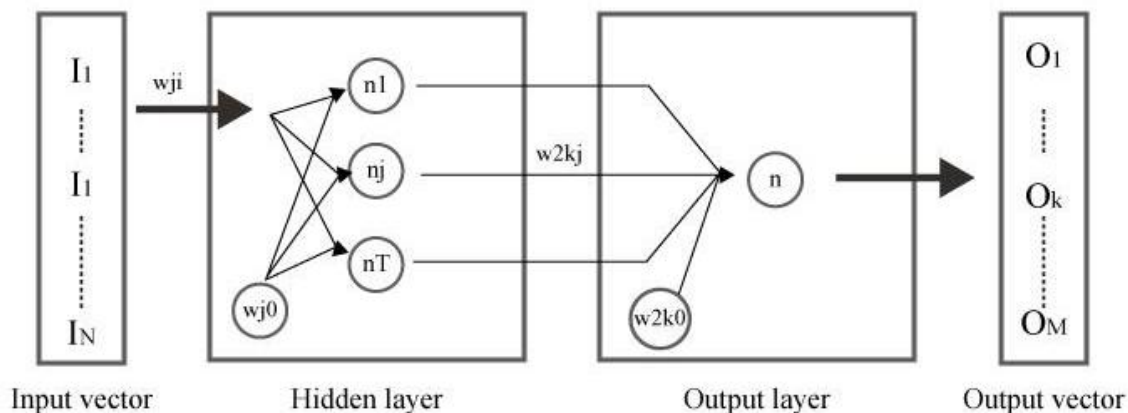


Fig. 3. Estructura de la red neuronal.

Fuente: Elaboración propia.

La primera capa, denominada capa oculta, tiene un número de neuronas a definir. La segunda capa tiene una única neurona con una función de transferencia lineal. La formulación global de la red es como se muestra en la ecuación (2.1):

$$O_k = \tilde{g}\left(\sum_{j=0}^M w_{2kj} \cdot g\left(\sum_{i=0}^N w_{ji} \cdot I_i\right)\right) \quad (2.1)$$

Donde O_k es la salida de la red, M es el número de elementos de salida, I_i son los datos de entrada, N es el número de variables de entrada, w_{ji} son los pesos sinápticos de la primera capa. Los pesos sinápticos w_{ji} , por ejemplo, define la fuerza de una conexión sináptica entre dos neuronas, la neurona presináptica j y la neurona postsináptica i , w_{2kj} son los pesos sinápticos de la segunda capa. Esta estructura permite identificar relaciones no lineales entre los datos de entrada y los de salida [30], gracias a la función de Log-Sigmoid utilizada como función de transferencia entre la capa oculta y la capa de salida.

2.4. Entrenamiento de la red neuronal

Una vez seleccionada una estructura y tamaño de la red neuronal, es necesario pasar a la fase de entrenamiento para que la red pueda ser utilizada.

El entrenamiento o aprendizaje, cuyo objetivo es que la red neuronal sea capaz de reproducir el comportamiento subyacente en los datos aportados, consiste básicamente en la minimización de una función de error, equivalente a que la salida de la red se aproxime a la salida en los datos. La función de error más común es la del Error Cuadrático Medio (MSE).

Para optimizar el ajuste de funciones por medio de la red neuronal, se emplean diferentes métodos de ajuste de parámetros de la red (pesos de las conexiones y sesgo de las neuronas), a partir de unos valores aleatorios o predefinidos (inicialización de la red). Algunos ejemplos de los métodos de ajuste son los de tipo gradiente o algoritmos genéticos.

- Los métodos de tipo gradiente calculan la variación del error al variar cada uno de los parámetros (a modo de derivada multidimensional), y luego modifican todos los parámetros de la red neuronal obteniendo un error menor. Fundamentalmente es una búsqueda en serie de la solución o mínimo global.
- Los métodos basados en algoritmos genéticos consisten en la generación de un número determinado de redes o *hijos* a través de *mutaciones* en los parámetros, evaluando el error de la red para cada uno de ellos. Los hijos con menor error tienen mayor probabilidad de convertirse en *padres* de nuevas redes, mientras que los hijos con mayor error desaparecen. Se trata de una búsqueda en paralelo de la solución.

Ambos métodos son métodos iterativos, que se repiten hasta cumplir alguno de los criterios de parada. Algunos criterios de parada son el número de iteraciones, la obtención de un error mínimo, o un tiempo de ejecución. En cualquier caso, generalmente es difícil asegurar que la solución obtenida no es un mínimo local.

Entre los métodos de entrenamiento de redes neuronales, el más utilizado en redes neuronales con conexión hacia adelante es el algoritmo *backpropagation* que resolvió eficazmente el problema de la formación rápida de redes neuronales multicapa [32]. El objetivo del entrenamiento será encontrar la configuración de pesos que corresponda al mínimo global de la función de error, aunque en muchos casos es

suficiente encontrar un mínimo local suficientemente bueno [33]. En este método de aprendizaje se distinguen dos fases: primero se aplica un patrón de entrada, el cual se propaga por las diferentes capas que componen la red hasta producir la salida de la misma. Esta salida se compara con la salida deseada y se calcula el error cometido por cada neurona de salida. Estos errores se transmiten hacia atrás, partiendo de la capa de salida, hacia todas las neuronas de las capas intermedias [34]. Cada neurona recibe un error que es proporcional a su contribución sobre el error total de la red. Basándose en el error recibido, se ajustan los errores de los pesos sinápticos de cada neurona.

Los algoritmos de *backpropagation* generalmente se clasifican en tres categorías [35]:

- Descenso más agudo (con tasa de aprendizaje variable, con tasa de aprendizaje variable y movimiento, *backpropagation* elástica).
- Cuasi-Newton (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno, un paso secante, Levenberg-Marquardt que es muy eficiente y con un uso ampliamente contrastado [30]).
- Gradiente conjugado (actualización Fletcher-Reeves, actualización Polak-Ribière, reinicio Powell-Beale, gradiente conjugado escalado).

Los métodos evolutivos [36], de programación de expresión de genes [37], la cristalización simulada [38], expectativa de maximización, los métodos no paramétricos y la optimización de enjambre de partículas [39], son algunos de los métodos comunes más utilizados para el entrenamiento de redes neuronales.

2.5. Sobreaprendizaje

El sobreaprendizaje (*overfitting*) es un posible problema del proceso de entrenamiento. Dado un conjunto de datos, es posible que la red neuronal reproduzca muy bien el comportamiento de dichos datos, pero no el de datos nuevos. Este problema se acentúa en el caso de que los datos tengan ruido o errores.

Otros tipos de aproximaciones de funciones como por ejemplo la interpolación con polinomios también pueden aproximar correctamente los datos con los que se realiza el ajuste, mientras que aproximan de modo erróneo datos nuevos no empleados en el

ajuste. La Fig. 4 muestra un ejemplo de la aproximación de la función seno con y sin sobreaprendizaje, usando datos con ruido.

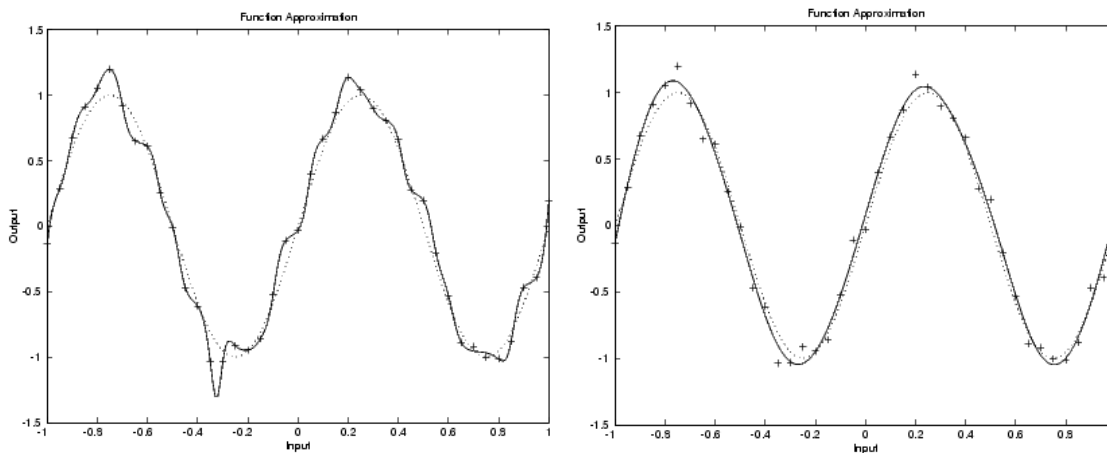


Fig. 4. Aproximación de la función seno con y sin sobreaprendizaje, usando datos con ruido.

Fuente: [29].

Existen diferentes modos de evitar el sobreaprendizaje. El primero sería obtener más datos para el entrenamiento, aunque no es posible siempre. Otra alternativa es reducir el tamaño de la red (menor número de parámetros), de modo que la red neuronal sea menos flexible y más robusta frente al ruido, aunque si se reduce demasiado, puede que no sea capaz de aprender o aproximar la función objetivo. Dotar a la red neuronal de suficientes parámetros para que sea capaz de aprender y evitar el sobreaprendizaje, es el principal aspecto a tener en cuenta en el dimensionamiento de una red neuronal.

2.6. Datos de entrenamiento, validación y test

Para controlar si una red neuronal tiene sobreaprendizaje se dividen los datos en tres grupos, esta división puede ser realizada con algún criterio de modo que los datos de cada grupo sean representativos, o de modo aleatorio, estos grupos son:

- Datos de entrenamiento: son empleados en el ajuste de los parámetros de la red neuronal. Han de ser representativos del total de datos, por lo que

normalmente se seleccionan aleatoriamente. Normalmente es el 70% de los datos.

- Datos de validación: son empleados luego de cada iteración en el proceso de entrenamiento, para comprobar si se produce el sobreaprendizaje. Normalmente es el 15% de los datos.
- Datos de test: solo se emplean una vez finalizado el entrenamiento. Normalmente es el 15%.

La red se entrena con el primer bloque de datos, y en cada iteración se realiza una comprobación con el bloque de validación, de manera que cuando el MSE de validación comienza a aumentar (mientras el MSE de entrenamiento sigue descendiendo) se considera que la red está empezando a ajustar el error de los datos y por tanto se detiene el entrenamiento. Llegados a este punto, se usa el tercer bloque (test) para realizar una última comprobación de la validez de la red.

2.7. Técnicas para evitar el sobreaprendizaje

2.7.1. *Early-stopping*

A partir de la división de los datos en los tres grupos mencionados, se puede aplicar el método *early-stopping* para evitar el sobreaprendizaje y por ello no existe un límite en el número de neuronas que forman la red [40]. Para determinar el tamaño óptimo, se prueban diferentes tamaños de red y se comparan los errores (MSE) obtenidos con los datos de entrenamiento y con los datos de validación. En el caso de que durante sucesivas iteraciones el error con los datos de entrenamiento disminuya, mientras que el error con los datos de validación aumente, se detiene el proceso de ajuste, como un criterio de parada adicional. Este tamaño es el óptimo, y aumentando el número de neuronas solo causará sobre-aprendizaje [41]. La Fig. 5 muestra una representación de la evolución de los errores de entrenamiento, validación y test, y donde se aplica la parada utilizando la técnica *early-stopping*.

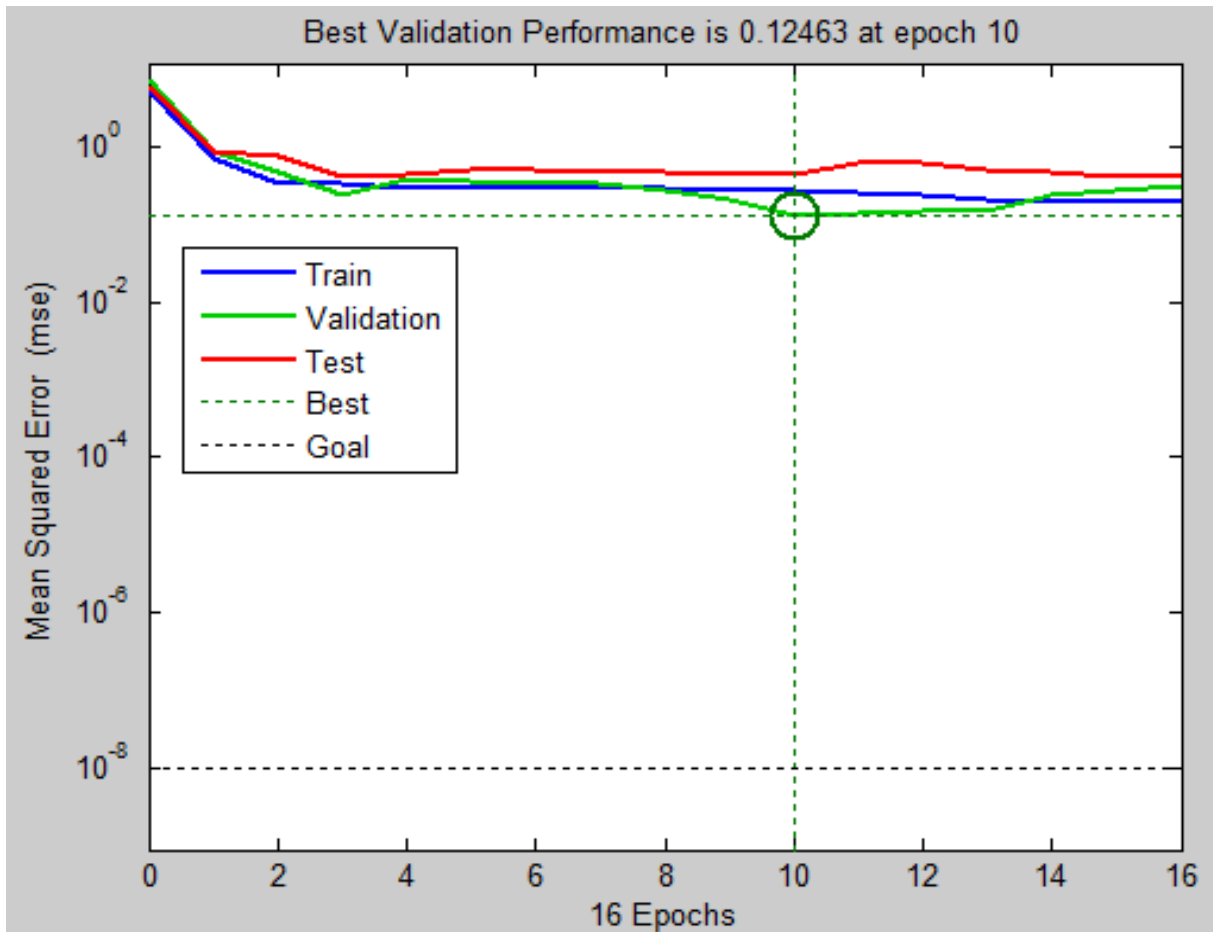


Fig. 5. Evolución de errores de entrenamiento, validación y test.

Fuente: [42].

2.7.2. Regularización

Otra técnica para evitar el sobreaprendizaje consiste en la aplicación de parsimonia o *navaja de Ockham*, por el cual, a igualdad de condiciones, la explicación más simple es la correcta. La regularización consiste en agregar la sumatoria ponderada de los pesos de la red a la función de error, de modo que, para un mismo error similar de dos redes neuronales, aquella que tiene valores de los pesos menores es mejor.

2.7.3. Redes podadas

Las redes podadas (pruned neural network), mediante la desconexión o eliminación de neuronas (reducción del número de parámetros), consiguen redes neuronales más simples, empleando una función de error que tiene en cuenta el número total de parámetros de la red. Un tipo de función de error a emplear en las redes neuronales podadas que tiene en cuenta el número de parámetros de la red, es el Error Cuadrático Predictivo (PSE). Con las redes neuronales podadas, es posible desconectar neuronas (reducción de la red) o desconectar entradas (reducción de variables poco relevantes).

2.8. Tamaño de la red neuronal

El dimensionamiento de una red neuronal *feed-forward* con una capa oculta para la aproximación de una función, consiste en la elección del número de neuronas de la capa oculta. Un posible criterio es el de dimensionar la red en función del número de datos disponibles, de modo que el número de parámetros de la red sea una fracción del total de datos disponibles. Si los datos disponibles se encuentran distribuidos uniformemente, se pueden tomar, por ejemplo, un tamaño de red tal que el número de datos sea aproximadamente diez veces el número de parámetros de la red neuronal (grados de libertad de la red). La Fig. 6 presenta un ejemplo de número de neuronas y error de una red neuronal.

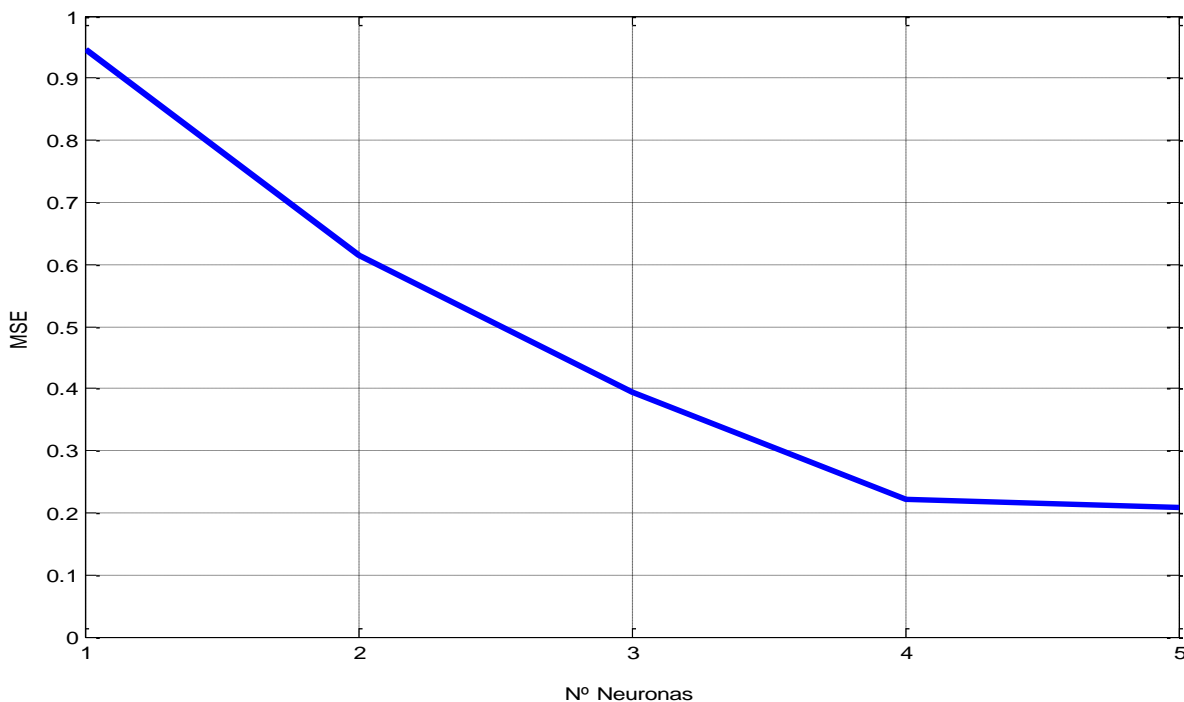


Fig. 6. Ejemplo de número de neuronas y error de una red neuronal.

Fuente: [42].

2.9. Estandarización de los datos

El proceso de entrenamiento de la red neuronal se realiza de manera más rápida si se estandarizan las entradas y salidas de la red, de modo que todas ellas se expresan en rangos similares (a modo de cambio de escala). En teoría no es necesaria esta transformación, pero debido a que los valores de los pesos de una red neuronal se inicializan de manera aleatoria con unos valores pequeños, el entrenamiento funciona mejor con entradas y salidas estandarizadas.

Se puede estandarizar forzando los datos a que se encuentren en un rango determinado, como por ejemplo, escalando todos los datos de una determinada variable al rango $[-1, 1]$ (variable uniformemente distribuida); o también de modo similar, haciendo que los datos se encuentren centrados en 0 con una desviación típica de 1 (como una variable de distribución normal).

Si alguna de las variables tiene otro tipo de distribución, es conveniente la linearización de dicha variable. Por ejemplo, si una variable X tiene una distribución exponencial, el funcionamiento de la red neuronal será mucho mejor si se transforma X , empleando como variable $Y = \ln(X)$, que empleando X directamente. A pesar de ello, las redes neuronales son capaces de aproximar cualquier tipo de función, sea cual sea la distribución de variables de entrada y salida, si se dispone de suficiente número de datos y de una red con suficientes parámetros (número de neuronas).

2.10. Simulación

Una vez entrenada una red neuronal, se puede comprobar el funcionamiento de la misma, aportando datos de entrada y obteniendo datos de salida. Este proceso se llama simulación, ya que los datos de entrada pueden ser datos empleados en el entrenamiento, o datos nuevos de los cuales se desea tener una predicción. Una de las principales ventajas que posee este modelo es que la red aprende la relación existente entre los datos, adquiriendo la capacidad de generalizar conceptos.

Se utilizan dos criterios diferentes para evaluar el desempeño de la red y decidir si el entrenamiento ha sido exitoso. El primero de ellos es el coeficiente de correlación de Pearson (R) entre la salida de la red (*output*) y los datos objetivo (*target*), que se requiere que sea igual o mayor que 90% para todos los tres subconjuntos (entrenamiento, validación y test). Esta comparación se llama validación cruzada, y permite representar gráficamente la bondad del ajuste de la red neuronal. Si el ajuste fuera perfecto, la representación de dichos valores se situaría sobre la recta $Y=X$. La validación cruzada (Fig. 7) se puede realizar para los datos de entrenamiento, validación, test, o todos los datos, de modo que se puede comprobar si se ha producido sobreaprendizaje o no.

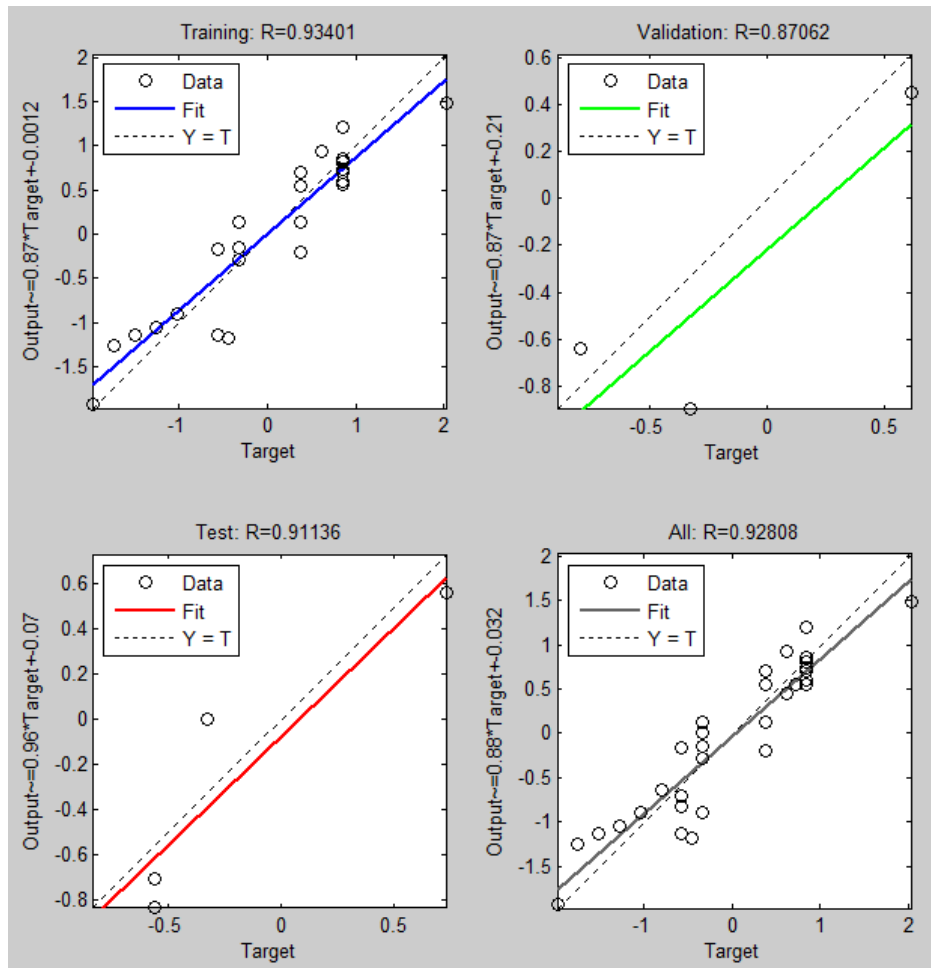


Fig. 7. Validación cruzada de datos de entrenamiento, validación, test y total de datos.

Fuente: [42].

Si en lugar de emplear datos existentes, se aplica la red neuronal a datos nuevos, se dispone de un laboratorio virtual con el que predecir el comportamiento del proceso aprendido por la red neuronal. Esta característica de las redes neuronales se la conoce como capacidad de generalización y se adquiere durante la fase de entrenamiento [43].

El segundo criterio es el Error Cuadrático Medio Relativo (rMSE) definido como se muestra en la ecuación (2.2):

$$rMSE = \frac{MSE}{Var(Q)} \leq 0.2 \quad (2.2)$$

Donde MSE es el Error Cuadrático Medio tal y como se ha definido anteriormente y $Var(Q)$ es la varianza de los datos de consumo medidos (target). Se exige que el MSE represente no más del 20% de la varianza de los datos para los tres subconjuntos (entrenamiento, validación y test) [44], para así controlar la dependencia de la red respecto de los datos específicos empleados para su entrenamiento.

CAPÍTULO 3.

DINÁMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL FERROCARRIL

3. DINÁMICA Y CONSUMO ENERGÉTICO EN EL FERROCARRIL

La Dinámica en los ferrocarriles se refiere al estudio de las fuerzas que provocan el desplazamiento de los trenes sobre la vía y el propio movimiento. Este tema es fundamental en diversos campos de explotación ferroviaria, principalmente en temas de cálculo de horarios y tiempos de viaje, así como en temas de consumo energético.

Para entender cómo se mueve un tren, se debe de comprender inicialmente los conceptos básicos de los esfuerzos de tracción y frenado. Este capítulo presenta todo lo relacionado al movimiento del tren y las variables de las que este depende.

3.1. Resistencias del material rodante en los ferrocarriles

Las resistencias del material rodante en los ferrocarriles son las resultantes de las fuerzas que se oponen (o en ocasiones ayudan) al movimiento del tren en la dirección longitudinal de la vía, diferentes de la fuerza de gravedad y de las fuerzas de tracción y frenado. Son de variada naturaleza:

- Rozamiento entre las ruedas y los carriles.
- Rozamientos internos de las partes móviles y giratorias del tren.
- Fuerza necesaria para acelerar el aire que entra al tren (para la refrigeración de motores y renovación del aire interior).
- Resistencia aerodinámica, que se compone a su vez de la resistencia de presión y de fricción.
- Rozamiento de las pestañas sobre el carril en las curvas.

En las líneas de metro, las fuerzas más relevantes (diferentes a la fuerza de gravedad, de tracción y de frenado), se clasifican en tres tipos: resistencia al avance, resistencia a la curvatura y resistencia a la pendiente.

En esta tesis no se considerarán otras resistencias que no son tan importantes como las ya mencionadas en líneas de metro, como la resistencia al avance debido a la entrada de aire y la resistencia aerodinámica. Esta última se desprecia debido a que la reducción de la resistencia aerodinámica es especialmente importante en los trenes cuando circulan a velocidades altas, típicamente por encima de 160 km/h [45], y este no es tal caso.

3.2. Resistencias al avance

El valor de la resistencia al avance depende de las siguientes características físicas del tren:

- Masa.
- Forma.
- Área de su sección transversal.
- Superficie mojada (esta va influenciada por la longitud del tren).
- Velocidad.

En el caso de que la vía no esté en alineación recta en algún punto, la resistencia al avance total será la suma de la resistencia al avance en recta y la resistencia al avance en curva.

3.2.1. Resistencia al avance en recta

La expresión habitual de la resistencia al avance de un tren en recta, en horizontal y con velocidad de viento exterior nula, es la conocida “fórmula de Davis” (ecuación (3.1)) [46]:

$$R_{av} = -(A + B * V + C * V^2) \quad (3.1)$$

Con:

- R_{av} = Resistencia al avance en recta [N]. Siempre será de valor negativo, pues se opone al movimiento de tren y es de sentido contrario a la velocidad.

- V = Velocidad del tren [km/h].
- A = Coeficiente que dependen de las características físicas del material rodante [N].
- B = Coeficiente que dependen de las características físicas del material rodante [N/(km/h)].
- C = Coeficiente que dependen de las características físicas del material rodante [N/(km/h)²].

Cada fabricante de trenes proporciona los coeficientes, o en su defecto, las características del material rodante que sirvan para conocer la resistencia al avance en recta de cada tren.

3.2.2. Resistencia a la curvatura

Cuando un tren circula por una curva horizontal, existe una fuerza longitudinal desaceleradora que actúa sobre el tren por efecto del rozamiento de las pestañas de las ruedas del tren sobre el carril de la vía, y por el rozamiento de la rueda externa sobre el carril (rozamiento debido a que giran las dos ruedas del mismo eje con la misma velocidad angular mientras la rueda externa recorre una mayor longitud) [45].

La fórmula utilizada para calcular la resistencia al avance en las curvas en ancho estándar (1 435 mm), es (ecuación (3.2)):

$$R_{ac} = - \left(M * \frac{600}{R} \right) * 10 \quad (3.2)$$

Con:

- R_{ac} = Resistencia al avance debida a la curva (resistencia a la curvatura) [N].
- M = Masa del tren [t].
- R = Radio de la curva [m].

3.2.3. Resistencia a la pendiente

Para tener en cuenta el efecto de la gravedad sobre el movimiento del tren que aumenta o disminuye la resistencia al avance, se debe de agregar la resistencia al avance debido a la rampa o a la pendiente, con cuyo valor expresado en la ecuación (3.3):

$$R_p = -(M * g * i) \quad (3.3)$$

Con:

- R_p = Resistencia al avance debida a la fuerza de gravedad [N]. Será positiva o negativa en función del signo de i .
- M = Masa del tren [t].
- g = Aceleración de la gravedad [9.81 m/s²].
- i = Pendiente [mm/m]. Será positivo si es una subida (rampa) o negativo si es una bajada (pendiente).

La resistencia a la pendiente debida a la fuerza de gravedad sobre el tren, es independiente a la velocidad y debe sumarse (con su respectivo signo) a la resistencia del avance.

3.3. Esfuerzos de tracción y frenado

Cuando el tren aumenta o reduce la velocidad, produce unas fuerzas llamadas esfuerzo de tracción y esfuerzo de frenado [45]. El esfuerzo de tracción (F_t), es la fuerza que resulta de la sumatoria de las fuerzas que produce el tren en sentido de su recorrido y se opone a las resistencias al avance del tren. El esfuerzo de frenado (F_f), por otra parte, es la fuerza que resulta de la sumatoria de los diferentes frenos del tren que se opone al recorrido del tren, sumando su trabajo a las resistencias al avance del tren.

Al total de la sumatoria de los esfuerzos de tracción y frenado existentes en un instante cualquiera, García [45] los denominó “esfuerzo de tracción o frenado” (F_{tf}).

Esta sumatoria es positiva, y tendrá el sentido del recorrido del tren, cuando se trata de un esfuerzo de tracción, y es negativa, y tendrá el sentido opuesto al recorrido del tren, cuando se trata de un esfuerzo de frenado.

Así pues, podrá suponerse que la existencia de un esfuerzo significa la ausencia del otro (aunque también puede existir ausencia de ambos) [45]. Esta suposición se debe a la existencia de los sistemas de seguridad de los trenes modernos, pues estos sistemas cortan la tracción del tren al existir una leve caída de presión en la tubería general del sistema de frenado del tren, haciendo imposible la existencia de esfuerzos de tracción y de frenado paralelamente.

En un instante cualquiera, el tren puede estar en tres situaciones diferentes desde el punto de vista de su tracción y freno [45]:

- Traccionando: Esto ocurrirá cuando la sumatoria de las fuerzas que produce el tren es en el sentido del recorrido de este. En esta fase, $F_{tr}>0$, o sea que $F_t>0$ y, generalmente, $F_r=0$.
- Frenando: Esto ocurrirá cuando la sumatoria de las fuerzas que produce el tren es en el sentido opuesto al recorrido de este. En esta fase, $F_{tr}<0$, o sea que $F_r>0$ y, generalmente, $F_t=0$.
- En deriva: Esto ocurrirá cuando el tren no produce ninguna fuerza. En esta fase, $F_{tr}=0$, porque, por lo general, $F_t=0$ y $F_r=0$.

El esfuerzo de tracción se transmite por medio de las ruedas del coche motor al ser apoyadas sobre el carril y transmitir el par que es producido en los motores del tren. Esta fuerza puede ser regulada por el maquinista (o el sistema de conducción automático, en caso de que el tren disponga de este), para ajustar la velocidad del tren según las necesidades del recorrido [45].

Por otro lado, el esfuerzo de frenado, desde el punto de vista de la dinámica del tren, García [45] lo clasifica en dos categorías según la magnitud del esfuerzo:

- Freno de servicio: Es un sistema de frenado de menor esfuerzo, aplicado normalmente en el recorrido ordinario del tren.
- Freno de emergencia: Es un sistema de frenado de mayor esfuerzo que el freno de servicio. Este solo es utilizado bajo condiciones extraordinarias, al presentarse incidencias que amerite la necesidad de frenar de forma urgente. Este sistema de frenado no se emplea normalmente, pues su uso ocasiona deceleraciones molestas para los ocupantes del tren y un mayor desgaste en las ruedas del tren y en los carriles de la vía.

Tanto el esfuerzo de tracción, como el esfuerzo de frenado, son distintas en cada vehículo motor, entre cuyas características suelen facilitarse las curvas que determinan el esfuerzo de tracción, o de frenado, máximo posible en función de la velocidad. Estos esfuerzos van ligados a la potencia disponible del vehículo, al tipo de vehículo motor (eléctrico o diésel) y a su sistema de control de la marcha [47].

La Fig. 8 presenta, a modo de ejemplo, las curvas de esfuerzo de tracción y de frenado de la locomotora diésel-eléctrica EURO 4000 Freight de Vossloh [48].

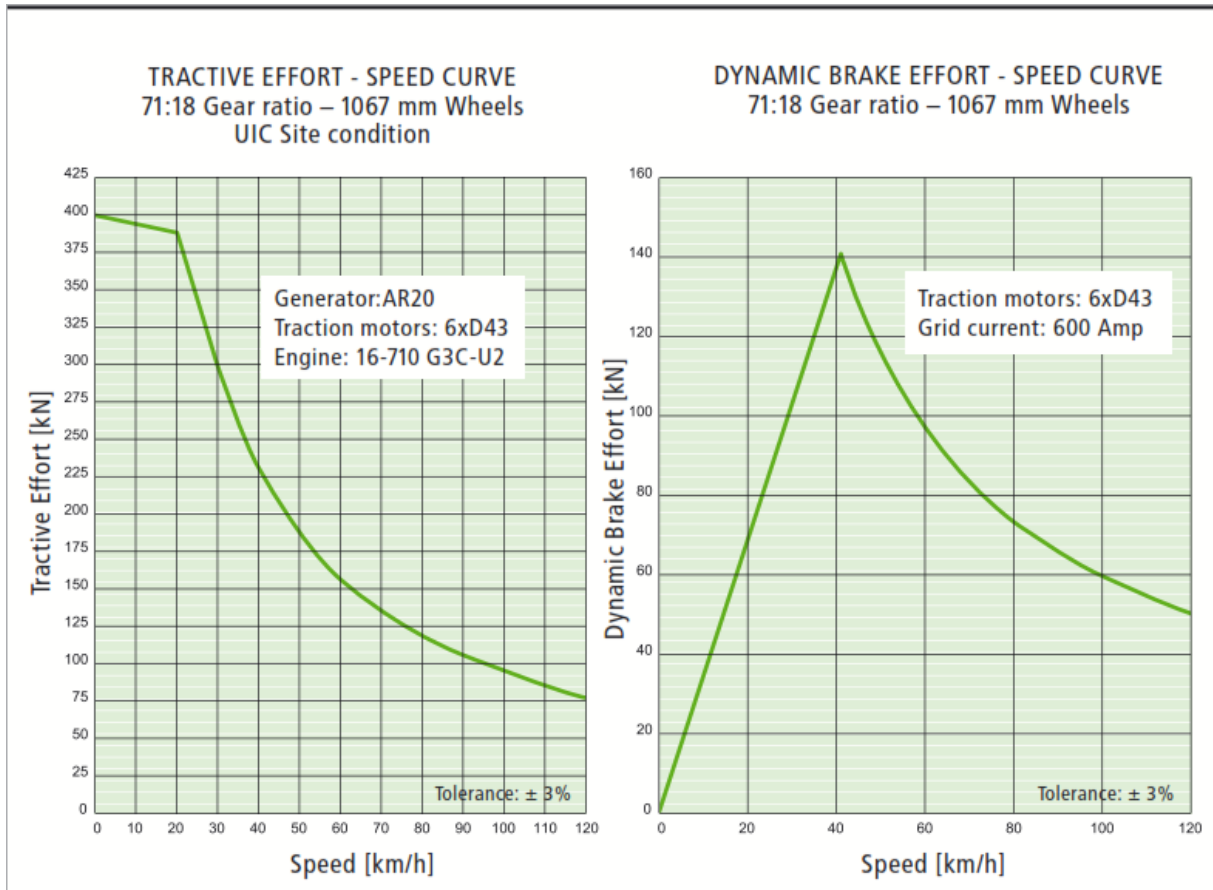


Fig. 8. Curvas de esfuerzo de tracción y de frenado de la locomotora EURO 4000 Freight de Vossloh.
 Fuente: [48].

La Fig. 8 muestra que, tanto para el esfuerzo de tracción, como para el esfuerzo de frenado, a mayor velocidad de viaje del tren, menor esfuerzo que el motor puede realizar.

3.4. Dinámica en los ferrocarriles

3.4.1. Ecuación del movimiento

El principio fundamental de la dinámica en ferrocarriles establece que, al existir una fuerza neta longitudinal F (sumatoria del esfuerzo de tracción, el esfuerzo de frenado, la fuerza gravitatoria y la resistencia al avance) sobre un tren que tiene una masa M ,

este tren cambiará su velocidad siguiendo el principio de la segunda ley de Newton (ecuación (3.4)) [45]:

$$F = M * a$$
$$a = \frac{F}{M} \quad (3.4)$$

Con:

- F: Fuerza neta longitudinal [N].
- M: Masa del tren [kg].
- a: Aceleración [m/s²].

Ahora, si la fuerza neta longitudinal sobre el tren es positiva, este incrementará su velocidad debido a que la aceleración será positiva. Por otro lado, si la fuerza neta longitudinal sobre el tren es negativa, el tren disminuirá su velocidad debido a que la aceleración será negativa. Debe aclararse que, aunque el tren disminuya su velocidad, no significa que este esté frenando, tan solo que las fuerzas que se oponen al movimiento del tren son mayores que las fuerzas que generan el movimiento de este [45].

3.4.1.1. Masas giratorias

Cuando un tren aumenta su velocidad, necesita aumentar la velocidad de rotación de las masas giratorias del tren, además de aumentar su velocidad de movimiento respecto al sentido longitudinal de la vía. Estas masas giratorias se componen de ruedas, ejes y discos de freno. Las masas giratorias girarán con una velocidad proporcional a la velocidad de recorrido del tren, por lo que es necesario que una fracción de la fuerza neta disponible del tren debe de dedicarse a acelerar o frenar angularmente dichas masas giratorias [45].

El coeficiente de masas giratorias (C_{mg}) es un valor fijo para cada tren (cada vehículo) que debe multiplicar la masa real del tren, Este coeficiente incluye los efectos de

inercia polar del conjunto giratorio, la masa del tren y el radio de giro de las masas giratorias (ecuación (3.5)) [45].

$$C_{mg} = 1 + \frac{\sum \left(M_{gi} * \frac{r_i^2}{R_i^2} \right)}{M} \quad (3.5)$$

Con:

- C_{mg} = Coeficiente de masas giratorias.
- M_{gi} = Masa giratoria i [t].
- r_i = Radio de la inercia polar i [m].
- R_i = Radio de la rueda motriz i [m].
- M = Masa del tren [t].

Son comunes valores del coeficiente de masas giratorias (C_{mg}) del orden de 1.045 a 1.07.

3.4.1.2. Expresión de la ecuación del movimiento del tren

La expresión de la ecuación general del movimiento del tren se presenta por la resultante de las fuerzas longitudinales que actúan sobre el tren (F).

Como consecuencia de la existencia de todas estas fuerzas y del efecto de las masas giratorias, la ecuación del movimiento se convierte en (ecuación (3.6)):

$$a = \frac{F_t - R_{av} - R_c - R_p}{M * C_{mg}} \quad (3.6)$$

Con:

- a = Aceleración [m/s²].
- F_t = Fuerza de tracción o fuerza de freno (solo puede haber una) [N].
- R_{av} = Resistencia al avance del tren [N].

- R_c = Resistencia por curvatura [N].
- R_p = Resistencia por pendiente o rampa (con su respectivo signo, (-) si es una pendiente -bajada-, o (+) si es en una rampa -subida-) [N].
- M = Masa del tren [kg].
- C_{mg} = Coeficiente de masas giratorias.

3.4.2. Dinámica del tren en rampas y pendientes

3.4.2.1. Dinámica del tren en rampa

Cuando un tren circula en una rampa (en subida), las siguientes fuerzas actúan sobre este [45]:

- Fuerza de tracción: Fuerza longitudinal que actúa a favor del movimiento del tren.
- Resistencia al avance y resistencia de la fuerza gravitatoria: Fuerzas longitudinales que actúan en contra del movimiento del tren.

Si la fuerza neta longitudinal que actúa a favor del movimiento del tren (fuerza de tracción) es superior a las fuerzas que actúan en contra del movimiento del tren (resistencia al avance y resistencia de la fuerza gravitatoria), el tren acelerará, pero si esta fuerza neta longitudinal es inferior, el tren reducirá su velocidad. García [45] define el concepto de “velocidad de equilibrio en rampa para un tren y una rampa r ” (V_{eqr}), para la cual la fuerza de tracción máxima que hace el tren es igual a la sumatoria de las fuerzas resistentes, por lo que si el tren circula traccionando al máximo, no cambiará su velocidad.

Según García [45], si la velocidad de equilibrio en rampa es mayor que la velocidad máxima (que depende de las características del tren y de la infraestructura), el tren no requerirá usar toda su fuerza de tracción para mantener su velocidad máxima en el ascenso de la rampa. Pero si la velocidad de equilibrio es menor que la velocidad máxima del tren, este no podrá mantener su velocidad máxima en el ascenso de la rampa.

Considerando otro punto de vista, un tren con una velocidad máxima (restringida a las características del tren y de la infraestructura) le corresponde una rampa, que García [45] llamó “rampa crítica” (r_c), en la que las fuerzas que están a favor y se oponen al movimiento longitudinal del tren se igualan, generando que este mantenga su velocidad constante. Si la rampa existente es mayor que r_c , el tren no podrá aumentar su velocidad para alcanzar la velocidad máxima, y si la rampa existente es menor que r_c , el tren tendrá suficiente potencia para mantener su velocidad máxima en el ascenso de la rampa.

Este concepto es fundamental en el diseño geométrico de la infraestructura, ya que, para optimizar el sistema, las rampas y curvas del trazado deben diseñarse análogamente, considerando las características del tren que circulará por la vía [45].

3.4.2.2. Dinámica del tren en pendiente

En la circulación de un tren en una pendiente (bajada), actúan las siguientes fuerzas sobre el tren:

- Fuerza de gravedad y fuerza de tracción (a favor del movimiento del tren).
- Resistencia al avance y fuerza de freno (en contra del movimiento del tren). La fuerza de freno es incompatible con la fuerza de tracción.

Suponiendo el caso de que un tren entre a una pendiente a velocidad máxima, y allí no haga uso de la fuerza de tracción, pueden ocurrir tres escenarios [45]:

1. La fuerza de gravedad (positiva) es mayor que la resistencia al avance (negativa):
En este caso el tren se acelerará y será necesario aplicar el freno para evitar que el tren exceda la velocidad máxima.
2. La fuerza de gravedad (positiva) es menor que la resistencia de avance (negativa):
En este caso el tren disminuirá su velocidad, siendo necesario aplicar tracción para mantener la velocidad y que el tren no detenga su movimiento.

3. La fuerza de gravedad (positiva) es igual que la resistencia al avance (negativa): En este caso el tren mantendrá la velocidad máxima durante el descenso de la pendiente, y no se requerirá aplicar freno ni tracción.

Teniendo en cuenta que en las líneas ferroviarias se emplea la misma plataforma (con su respectivo trazado vertical) para circular en ambos sentidos, se tiene que las pendientes para los trenes que viajan en un sentido, son las rampas para los trenes que viajan en sentido contrario. Esto lleva a considerar que el valor de la pendiente o la rampa es la misma, por lo que se debe de analizar conjuntamente los efectos de la velocidad de equilibrio en subida y en bajada, que generalmente no son iguales.

3.5. Consumo energético

3.5.1. Uso de la energía en el transporte

El movimiento de todos los vehículos de transporte requiere un uso importante de energía. Dentro de los procesos de transporte, García [15] definió tres tipos de actividades que consumen energía:

- **Construcción y mantenimiento de infraestructuras:** Es necesaria la utilización de energía para construir y realizar el mantenimiento a las infraestructuras necesarias para la explotación del transporte. En este apartado se incluye la energía necesaria para realizar las excavaciones, terraplenes, túneles, traslado de tierras excedentes a lugares específicos, fabricación de materiales necesarios para la construcción de infraestructuras, como cemento, acero, entre otros. Debido a que este consumo energético es realizado por empresas constructoras, no es tenido en cuenta en las estadísticas de consumo energético en el sector transporte, sino en el sector de construcción.
- **Construcción, final de vida y movimiento de los vehículos:** Es necesaria la utilización de energía para la fabricación, desguace o reciclado y mantenimiento de los vehículos. En este apartado se incluye la energía necesaria para la extracción y elaboración de las materias primas necesarias para la fabricación de las piezas y componentes de los vehículos, su montaje y el transporte de las piezas

y del vehículo mismo anterior a su entrega, etc. Es necesario incluir en este apartado, además, la energía necesaria para el desguace o el reciclado del vehículo al final de su vida útil. Estos consumos, al igual que los consumos en la construcción y el mantenimiento de las infraestructuras, no son tenidos en cuenta en las estadísticas del consumo energético en el sector transporte, con excepción del consumo de energía de talleres de mantenimiento de trenes, aviones y barcos que a veces si son incluidos, sino en el sector industrial.

- **Explotación del transporte:** La energía necesaria para la explotación del transporte es el que produce directamente el movimiento de los vehículos y otros servicios auxiliares, tanto en los propios vehículos (como por ejemplo el aire acondicionado o la iluminación dentro de los vehículos), como en la infraestructura (señalización, sistemas de seguridad, etc.). Este consumo, a diferencia de los dos apartados anteriores, estadísticamente si son incluidos en el sector transporte.

Los consumos de explotación que se caracterizan por ser recurrentes, en comparación con los consumos de construcción o industriales, se producen en cuatro tipos de actividades:

- **Movimiento de los vehículos:** Es la más importante cuantitativamente y la más característica del transporte.
- **Servicios auxiliares de los vehículos:** Son los necesarios para el funcionamiento de los vehículos (compresores, ventiladores de motores, etc.) o los requeridos para el confort de los viajeros (aire acondicionado, iluminación, calefacción, etc.). Este consumo cada vez es mayor por los requerimientos de los pasajeros.
- **Servicios auxiliares de la infraestructura:** Incluye los consumos de iluminación de túneles o de la vía, calefacción de las agujas del ferrocarril, sistemas de señalización, paneles de información, etc.
- **Funcionamiento de terminales y otros usos:** incluye la iluminación y climatización de parqueaderos, terminales, estaciones, talleres y oficinas.

3.5.2. Consumo energético en los ferrocarriles

El consumo energético de los ferrocarriles está influenciado por factores directos e indirectos. Los factores directos están relacionados al actual uso del vehículo, y los factores indirectos están relacionados a la construcción y mantenimiento de infraestructura, así como la producción (combustible y vehículos) y el mantenimiento del vehículo [49]. Los factores directos a su vez pueden estar divididos en factores logísticos, técnicos y operacionales.

Los factores logísticos principalmente incluyen los factores de carga (la medición del grado en que se utiliza la capacidad del vehículo) y las características de la superficie de la infraestructura de transporte de la red.

Los factores técnicos están relacionados con las características específicas del vehículo como el peso, capacidad, motor, tipo de combustible y aerodinámica. Los factores técnicos están en parte influenciados por los esfuerzos llevados a cabo por los fabricantes de los vehículos para reducir el consumo de combustible mejorando la eficiencia del motor y reduciendo la masa del vehículo, la fricción y la aerodinámica [50], [51]. Esas acciones dependen en gran parte de los costes técnicos dirigidos en mejorar el consumo de combustible específico en la combustión interna y motores eléctricos [52]. En este sentido, el transporte es el sector con el más grande potencial para los ahorros de energía a través de la adopción de tecnologías para mejorar la eficiencia energética [53].

Los factores operacionales, que se refieren a la manera en que el vehículo es utilizado, incluyen velocidad y dinámica de conducción. Los factores operacionales están fuertemente influenciados por las características de la superficie de la infraestructura de transporte de la red y el número de paradas técnicas y comerciales [54]. La infraestructura del transporte determina la naturaleza y el diseño del tejido urbano de acompañamiento y el consumo energético por t/km llevado [55]. Los factores directos únicamente determinan una parte del consumo energético de los modos de transporte de carga por superficie.

El movimiento de los trenes requiere un gran aporte de energía, no solo para el movimiento de trenes, sino también para la construcción de las infraestructuras y edificios y para la construcción de trenes.

Al igual que como en el resto de sistemas de transporte, el consumo energético en los ferrocarriles distingue cuatro tipos de actividades que consumen energía [15]:

- Energía para el movimiento de los trenes.
- Energía para los servicios auxiliares de los trenes.
- Energía para los servicios auxiliares de la infraestructura.
- Energía para las estaciones, talleres y otros usos.

Esta tesis pretende estudiar la energía para el movimiento de los trenes, ya que es la más importante cuantitativamente (alrededor del 70% del consumo energético en una red metropolitana estándar [56]) y la más característica en el transporte.

El tren, en cada instante, debe vencer una fuerza que se opone a su avance y recibir además la energía necesaria para aumentar su velocidad o su altura. Además, en algunos momentos, el tren cede una cantidad de energía como consecuencia de una reducción de su velocidad o de su altura.

El tren recibe energía para tres funciones de su movimiento:

- Para vencer la resistencia al avance (que depende de la masa del tren, de su velocidad, de la infraestructura por la que circula, de las curvas, etc.).
- Para incrementar su velocidad (en el origen del viaje y después de cada parada). Un aumento de velocidad del tren requiere un importe de energía, y por ello el tren recibe una cantidad de energía que la almacena en forma de energía cinética.
- Para aumentar su altitud, pues cada vez que el tren supera una rampa, su altitud aumenta y por ello recibe cierta cantidad de energía que acumula en forma de energía potencial.

En contraste, los trenes pierden energía:

- Cuando reducen velocidad (en una parada o en cualquier instante en el que el tren pasa de una velocidad mayor a una velocidad menor). Sin que aumente la cota ni se devuelva corriente a la catenaria
- Cuando pierden altitud al circular una pendiente, pues allí reduce su energía potencial sin que se pueda aumentar la velocidad ni devolver corriente a la catenaria

Consumo energético en una línea metropolitana

García [15] estudió la incidencia de cada uno de los componentes que influyen en el consumo de energía en las diferentes tipologías de ferrocarriles de viajeros, y encontró para los trenes metropolitanos (Línea 10 del Metro de Madrid), que los componentes que consumen energía en una línea metropolitana se distribuye como se muestra en la Fig. 9.

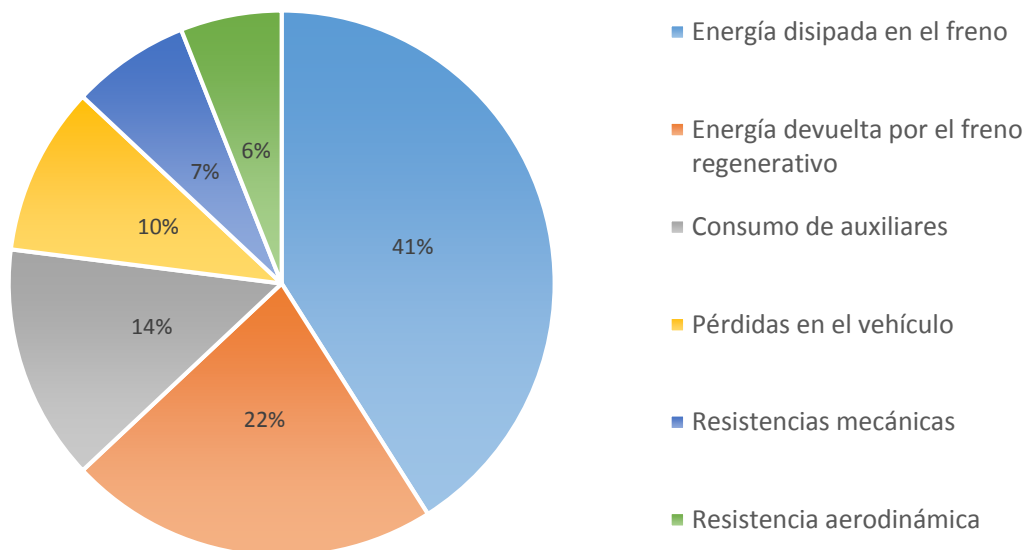


Fig. 9. Distribución de cada componente en el consumo energético de una línea metropolitana.

Fuente: [15].

La Fig. 9 muestra que el componente que más consume energía en una línea metropolitana es la que se disipa en el freno, esto se debe a que una línea

metropolitana presenta un servicio con muchas paradas, y esta energía representa la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad. Además, como una línea metropolitana discurre por tramos urbanos, generalmente con pendientes muy fuertes, la energía potencial tiene también mucho peso en la energía disipada en el freno.

3.6. Medidas para mejorar la eficiencia energética en ferrocarriles

El uso de la electricidad, junto a la posibilidad de transportar una gran cantidad de viajeros, le permite al ferrocarril obtener buenos resultados en cuanto al consumo energético frente a otros modos de transporte. Sin embargo, buscando reducir el consumo energético, el ferrocarril continúa mejorando sus características para mantener esta ventaja frente al resto de modos de transporte. Existen estudios ([6], [11], [12], [15]) donde proponen las actuaciones en el ferrocarril destinadas a reducir el consumo energético y las emisiones de gases de efecto invernadero, estas se puede dividir en tres categorías:

- Actuaciones en el diseño de trenes
 - Reducción de la masa específica de los trenes (en los trenes, los vehículos tienen una masa por plaza de 800 a 1 200 kg, muy superior comparado con la masa por plaza en otros modos de transporte, como por ejemplo 200 – 300 kg/plaza en los automóviles, 500 kg/plaza en un autobús, o 300 kg/plaza en un avión. En los trenes de mercancías sucede de igual manera, donde el tren tiene una masa por tonelada de 800 kg, frente a los 600 kg/t de un camión) y de las masas giratorias para reducir resistencia al avance y la pérdida de energía en el frenado.
 - Reducción de pérdidas en los servicios auxiliares.
 - Reducción de las resistencias aerodinámicas.
 - Implementación de trenes de caja ancha y de dos pisos.
- Actuaciones en el trazado geométrico de la vía
 - Curvas de radios anchos para reducir la resistencia por curvatura.
 - Túneles con un gálibo amplio para reducir la resistencia aerodinámica del tren.

- Un perfil de velocidad homogénea para reducir las pérdidas de energía el frenado para desacelerar.
- Evitar limitaciones puntuales relevantes de velocidad.
- Elevación de la rasante en estaciones con paradas de muchos trenes (como en líneas de metro).
- Gradientes reducidos para evitar el frenado al bajar pendientes.
- Utilización de trazados más cortos para reducir la resistencia al avance y la aerodinámica entre los mismos puntos de origen y destino de los pasajeros.
- Uso de voltajes de electrificación altos y en corriente alterna, y reducción de la distancia entre las subestaciones para reducir las pérdidas óhmicas.
- Instalación de subestaciones reversibles en sistemas de corriente continua para devolver la energía regenerada a la red de energía. En los sistemas de corriente alterna las subestaciones ya son reversibles.
- Pendientes armonizadas con la velocidad
- Actuaciones en la operación
 - Reducir la composición de los trenes cuando sea posible.
 - No hacer funcionar los servicios auxiliares cuando no sean requeridos, como en los talleres o en período de limpieza de trenes.
 - Estacionar los trenes en lugares en los que no reciba el sol directamente.
 - Regular la entrada de aire al tren para adecuarla a los niveles necesarios que son función de la ocupación real del tren.
 - Reducción del número de paradas del tren para reducir la pérdida de energía en el frenado.
 - Aumento del coeficiente de utilización para reducir el consumo por pasajero.
 - Implementación de un margen de tiempo que permita la conducción económica (conducción en la que el tren recorre varios tramos en deriva a velocidades inferiores a la máxima, reduciendo el consumo energético, aumentando el tiempo de viaje.).
 - Implementación de un sistema de conducción económica (diferente según si el tren tiene o no un freno regenerativo) en el que, si es posible, pueda ser reprogramado en tiempo real.

En los siguientes apartados serán descritas algunas medidas encaminadas a la reducción del consumo energético entre un par de estaciones.

3.6.1. Trazado sinusoidal simétrico

El concepto de trazado sinusoidal simétrico (trazado vertical profundo) para sistemas ferroviarios urbanos fue introducido por Kim y Schonfeld [13] para reducir el consumo energético y el desgaste de los frenos en las operaciones ferroviarias. Ellos compararon este trazado frente a trazados a nivel e identificaron sus beneficios potenciales significativos relacionados con el tiempo de viaje, consumo energético y costes de operación.

Kim y Schonfeld [13] consideraron un perfil de alineamiento vertical simétrico que es función de la longitud total de la curva "S" y la máxima profundidad δ en el medio de las dos estaciones a la misma elevación (Fig. 10). Se distinguen tres tramos estratégicos en un trazado sinusoidal simétrico entre dos estaciones:

- Tramo 1: Cuando el tren sale de la estación debe acelerar, en este caso encuentra una pendiente, y gracias a la fuerza de la gravedad, el tren alcanza una tasa de aceleración adecuada más fácilmente que en un trazado plano, aquí las resistencias a la aceleración y a la pendiente se reducen, lo que conlleva a una reducción de la necesidad de potencia.
- Tramo 2: El tren circula en deriva.
- Tramo 3: La existencia de una rampa en el tramo en el que el tren debe decelerar para frenar supone una menor necesidad de usar el freno, equivalente a una menor disipación de energía. Esto significa una ventaja energética cuando una estación está situada en una cota relativamente más alta que los tramos de la vía colaterales.

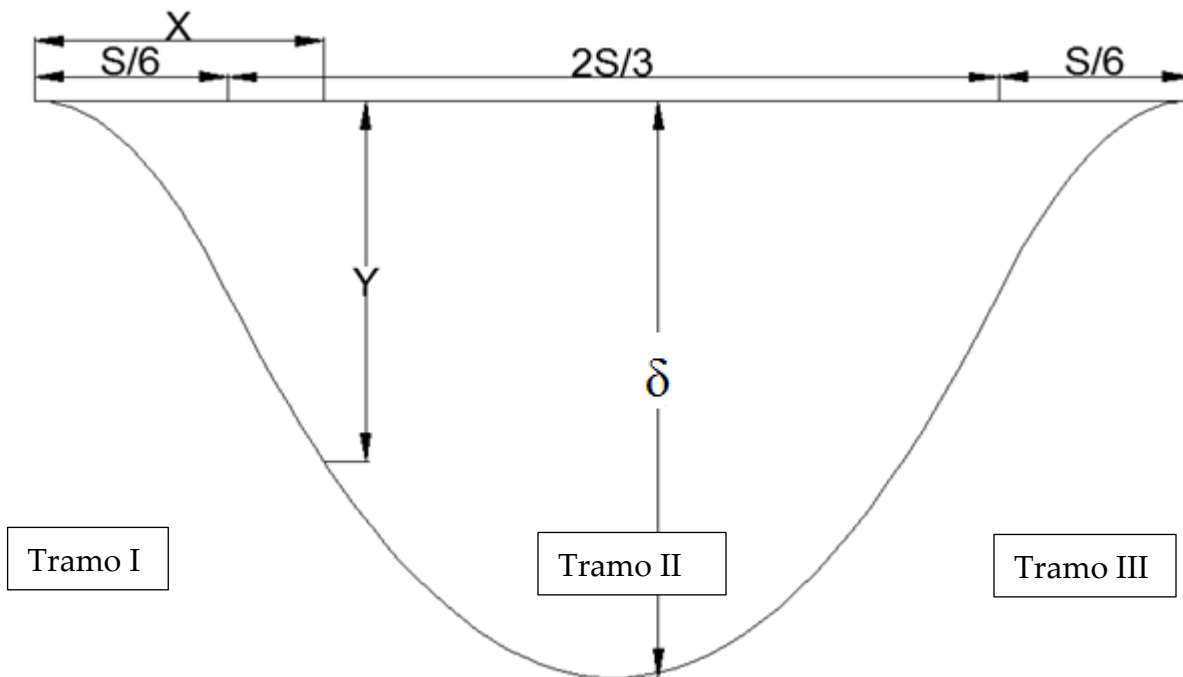


Fig. 10. Trazado sinusoidal simétrico.

Fuente: Elaboración propia con información de [13].

Las ecuaciones de los tres tramos del alineamiento sinusoidal se muestran en la ecuación (3.7) [13]:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= -\frac{12\delta}{S^2}x^2 & \text{Para } 0 \leq x \leq \frac{S}{6} \\
 y_2 &= \frac{6\delta}{S^2}x^2 - \frac{6\delta}{S}x + \frac{\delta}{2} & \text{Para } \frac{S}{6} \leq x \leq \frac{5S}{6} \\
 y_3 &= -\frac{12\delta}{S^2}x^2 - \frac{24\delta}{S}x - 12\delta & \text{Para } \frac{5S}{6} \leq x \leq S
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

Con:

- y_1, y_2, y_3 : Diferencia en la elevación con respecto a la estación inicial [m].
- x : Distancia horizontal desde el centro de la estación inicial [m].

- δ : Profundidad máxima en el intermedio de las dos estaciones [m].
- S: Longitud total entre las dos estaciones [m].

Los problemas potenciales identificados de este trazado [57] son el aumento de la aceleración centrífuga en el plano vertical, las restricciones a la pendiente máxima a alcanzar por los trenes y el aumento del coste de la construcción de infraestructura. Sobre los dos primeros, se sugiere tener en cuenta restricciones de velocidad, pendientes máximas y combinaciones de curvaturas verticales que puedan satisfacer los requerimientos de confort de los pasajeros. Sobre el último problema, no existe en la bibliografía consultada un modelo que optimice el consumo energético en un trazado vertical midiendo el impacto que pueda tener éste con el coste de la construcción de la infraestructura.

En cuanto a la aplicación del trazado sinusoidal, García Álvarez [15] define que el valor de inclinación en el entorno de la estación tiene relación con la deceleración o aceleración que se desea conseguir: cuando el tren sube una rampa de i mm/m, la fuerza gravitatoria (en N) que se opone a su marcha tiene por valor M (en t) $\times i$ (mm/m) y la resistencia al avance tiene valores del orden de 20 a 30 N/t.

Es importante comprender que una rampa evita el uso del freno para lograr una deceleración en ese lugar. En los trenes que carecen de freno regenerativo, o en los que tienen freno regenerativo, pero no aprovechan toda la energía del frenado, la ventaja es mayor.

También se debe evitar ubicar señales de entrada a las estaciones en zonas de fuerte rampa, debido a que los trenes se detienen con frecuencia ante ellas. Los escapes situados a la entrada de las estaciones deben estar ubicados en rasante constante. Como la señal de entrada debe estar delante de los escapes de la entrada de la estación, una buena solución puede ser iniciar el acuerdo vertical justamente después de la señal de entrada, a fin de que la zona de rampa de valor constante coincida con la zona de escapes, y luego, comience el acuerdo vertical para finalizar la zona en rampa [15].

3.6.2. Conducción económica

El consumo energético depende enormemente de la forma de conducir un tren por parte del maquinista (o del sistema de conducción automático, en caso de que el tren disponga de este). El concepto “conducción económica” se refiere a la manera de conducir un tren que permite generar un consumo energético inferior al que se obtendría conduciendo un tren haciéndolo circular a las velocidades máximas autorizadas en cada punto de la línea. Según García [15], la conducción de un tren a velocidad máxima es la menos eficiente, mientras que la conducción económica supone una reducción del consumo energético, aunque aumentando de cierta forma el tiempo de viaje. Esto es debido a que realizar una conducción económica supone regular la marcha del tren para hacerlo circular a velocidades diferentes a las máximas y ahorrar energía, pero si no se circula a la velocidad máxima posible en cada punto, se pierde algo de tiempo.

En el campo de las estrategias de conducción, los autores se han centrado en técnicas de conducción y minimización del consumo energético para trenes de mercancías [58], [59], [60]. Otros estudios indican que es posible ahorrar energía bajo restricciones rigurosas de horarios manteniendo la velocidad del tren uniforme [61], y se demuestra un método formal para optimizar el consumo energético de la tracción durante un viaje de un solo tren por la compensación en las reducciones de la energía contra el aumento en tiempo de viaje [62].

Existen diferentes estilos de conducir un tren, diferentes tipos de preseleccionar la velocidad dentro de los sistemas de operación automática del tren (ATO), la regulación del tráfico ferroviario, la influencia del perfil de velocidades en la línea, y la existencia de limitaciones temporales de velocidad [62].

En cuanto a políticas, existen algunas compañías que han empezado a implementar programas de formación en la conducción energéticamente eficiente [63], [64]. Dentro de esos programas, los maquinistas aprenden sobre la conducción de ahorro de energía, con diferentes módulos y lecciones. Como parte de la formación, la

evaluación de la conducción económica se lleva a cabo en simuladores de conducción. En estos simuladores, los maquinistas pueden practicar los contenidos teóricos de los cursos y reciben retroalimentación sobre el grado de eficiencia alcanzado. Especialmente interesante ha sido el proyecto TRAINER, en el que diferentes administraciones ferroviarias han puesto en práctica estos programas de formación, por ejemplo, Trenitalia (Italia), NS (Países Bajos), ZSSK (Eslovaquia) y HSZ (Eslovenia). Paralelamente a esto, el proyecto TRAINER también apuesta por la implementación de acuerdos a largo plazo (LTA) entre las compañías ferroviarias y las administraciones públicas. Dentro de estos LTA, las medidas de eficiencia energética pueden ser establecidas y reguladas mediante la identificación de algunos objetivos y la planificación para su cumplimiento [31].

3.6.2.1. Estrategias de la conducción económica

García, en su libro “Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril” (2 011) [15], explica las estrategias básicas de conducción necesarias para lograr una reducción del consumo energético en la explotación ferroviaria:

1. Hacer que el tren no circule a la velocidad máxima a la que podría hacerlo. De esta manera se logra reducir la resistencia aerodinámica y, a su vez, el consumo energético.
2. Hacer que el tren circule en deriva (*coasting*), es decir, aprovechando la inercia y/o gravedad (avanzando sin tracción ni freno). De esta forma se evita hasta cierto punto el uso del freno y por tanto la disipación y pérdida de energía asociada al freno. Esto es particularmente útil cuando el tren transita a velocidades altas y también cuando no existe el sistema de freno regenerativo.
3. Circular en deriva antes de un punto alto de la línea. De esta manera se logra recuperar la velocidad máxima al descender la pendiente.

Generalmente, estas estrategias de conducción económica son aplicadas conjuntamente en la práctica. Así pues, puede decirse que las siguientes son las

estrategias de conducción en un recorrido entre dos estaciones, o puntos de parada [15]:

1. Acelerar al máximo, mantener la velocidad máxima y reducir la velocidad en deriva antes de llegar a cada punto en los que sea necesario reducir la velocidad.
2. La misma estrategia anterior, pero con la diferencia de que la deriva no se produce hasta la velocidad mínima (o hasta el punto donde el tren para), sino hasta una velocidad que es superior a ésta (que puede llamarse “velocidad mínima en deriva”) por debajo de la cual se debe aplicar el freno de servicio para reducir la velocidad.
3. Acelerar al máximo con el objetivo de recuperar la velocidad máxima.
4. Se repite el procedimiento completo.

3.6.2.2. Obtención de marcha óptima de conducción económica

La marcha óptima de conducción económica de un tren en un determinado recorrido está condicionada por la diferencia entre el tiempo mínimo en el que puede realizar el recorrido y el tiempo permitido. Aparte de esto, debe de considerarse las limitaciones de velocidad en cada punto del recorrido, las rampas y pendientes, y las paradas que el tren debe realizar [15]. Durante el recorrido de un tren, las limitaciones de velocidad pueden estar impuestas por:

- La velocidad de la línea determinada por las características de la infraestructura.
- El estado de las señales luminosas.
- La velocidad máxima del tren.
- El sistema de refuerzo del sistema de señalización de la línea ferroviaria.

La marcha de consumo mínimo se obtiene realizando un cálculo manual, considerando las siguientes premisas:

- La aceleración se produce con los valores máximos, a fin de aprovechar al máximo la potencia de un tren.

- Una vez alcanzada cierta velocidad, se desconectan los motores y se deja al tren circular en deriva.
- Se intenta minimizar el número de aceleraciones y frenadas.
- Se procura utilizar todo el tiempo de viaje asignado, ya que se supone que, dadas las velocidades asignadas a este servicio, nos encontramos en la zona en que el consumo decrece al aumentar el tiempo de viaje.

Con estas observaciones se evita circular a marcha sostenida y se intenta acelerar hasta una velocidad que permita alcanzar el siguiente límite de velocidad circulando en deriva, es decir, sin necesidad de aplicar los frenos. De esta forma el proceso iterativo queda de la siguiente manera [31]:

- **1.** Acelerar al máximo hasta alcanzar la restricción de velocidad.
- **2.a.** En caso de que el siguiente límite de velocidad sea superior, se debe circular en deriva hasta finalizar la limitación actual y acelerar de nuevo al máximo hasta alcanzar el nuevo límite de velocidad.
- **2.b.** En caso de que el siguiente límite de velocidad sea inferior, se debe circular en deriva hasta la siguiente limitación, intentando que la velocidad del tren se reduzca hasta ser la adecuada al llegar la siguiente limitación sin necesidad de aplicar el freno.
- **3.** Si la velocidad al llegar a un límite de velocidad es superior a dicho límite, deberá reducirse el valor de velocidad máxima alcanzado en el tramo anterior a fin de cumplir lo descrito en 2.b.
- **4.** Realizar los pasos 1 a 3 en todas las limitaciones de velocidad.
- **5.** Una vez realizado el paso 4, se debe comprobar que el tiempo de viaje empleado no excede el concedido.
- **6.a.** Si el tiempo de viaje empleado es menor al concedido, deberá reducirse la máxima velocidad alcanzada en todo el trayecto.
- **6.b.** Si el tiempo de viaje empleado es mayor al concedido, deberá aumentarse la velocidad en alguno de los tramos que lo permita y emplear el freno.

3.6.3. Frenado regenerativo

El frenado regenerativo es un freno dinámico que se basa en el principio de que un motor eléctrico puede funcionar a su vez como generador, sin la necesidad de efectuarse modificaciones en él. El funcionamiento del frenado regenerativo se realiza mediante un procedimiento en el que el motor eléctrico de tracción es reconectado como generador durante el frenado suministrando energía, este aprovecha la energía cinética y potencial del vehículo en movimiento para generar energía eléctrica durante el frenado.

En la actualidad, la mayoría de los nuevos trenes eléctricos permiten este tipo de frenado, siendo especialmente importante en los trenes metropolitanos. Esta importancia reside en que estos servicios realizan muchas paradas, llevando a lugar a muchas reducciones de velocidad durante la operación del sistema, permitiendo entonces que parte de la energía cinética disipada pueda ser convertida y aprovechada.

El frenado convencional basado en la fricción de la rueda del vehículo y el carril de la vía se sigue empleando junto con el frenado regenerativo, porque, aunque el frenado regenerativo reduce efectivamente la velocidad, la cantidad de energía a disipar queda limitada por la capacidad de absorción de la misma por parte del sistema ferroviario [56].

La generación de energía eléctrica que produce el frenado de los trenes no produce ninguna emisión de CO₂, siendo el coste marginal de esta energía nulo.

Los flujos de energía en el ferrocarril en los que se puede descomponer la energía proveniente del freno regenerativo, pueden ser utilizados con varios fines:

- Equipos auxiliares del tren
- Alimentación de acumuladores de energía eléctrica
- Devolución a la catenaria
- Devolución a la red eléctrica



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

CAPÍTULO 4.

COSTES DE INVERSIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

4. COSTES DE INVERSIÓN EN LA INFRAESTRUCTURA FERROVIARIA

4.1. Introducción

Este capítulo tiene por objetivo analizar y determinar los costes de construcción de una línea metropolitana. Posterior al análisis, se analizará el efecto del trazado vertical de una infraestructura ferroviaria en estos costes, esto servirá para establecer la conexión entre el trazado vertical y los costes de construcción.

En términos generales, los costes relacionados con la producción de un servicio del transporte público se pueden distinguir de los costes de inversión necesarios para la compra de componentes (para los ferrocarriles: infraestructura, material rodante, instalaciones, etc.) para la acción planificada, y los costes de operación incluyendo aquellos para la operación y mantenimiento del servicio de transporte.

Diversos autores especializados en sistemas de transporte públicos proponen diferentes maneras de investigar los costes. Entre los estudios particularmente referidos a los ferrocarriles, Baumgartner [65] incluyó costes de inversión y de operación.

En Italia, un estudio sobre la reactivación de una línea ferroviaria [66] incluye una indicación básica del coste de inversión y de operación de la misma. Mancuso y Reverbi [67] estudiaron el coste de operación y organización del mercado de los servicios ferroviarios italianos. Un análisis de costes para los costes de inversión y de mantenimiento en sistemas de transporte públicos avanzados fue propuesto por Gattuso y Meduri [68].

En Alemania, Ott [69] comparó costes de infraestructura de carretera y ferrocarril.

En Estados Unidos, Von Brown [70] propone una metodología de planificación para la estimación del coste de la construcción del ferrocarril en Norteamérica.

Flyvbjerg, Bruzelius y Van Wee [71] compararon costes de inversión en ferrocarriles urbanos.

Por otra parte, algunos estudios están específicamente relacionados con los ferrocarriles de alta velocidad [72], [73], [74]. García [75] vinculó los costes de operación a la velocidad, al igual que lo hizo González [76].

Calvo y De Oña [77] investigaron una serie de sistemas nacionales de tarificación para comparar los costes de uso de vía y los cargos que tratan de recuperar esos costes.

Olsson, Økland y Halvorsen [78] determinaron las consecuencias de las diferencias en la metodología de costes y beneficios en la valoración de la infraestructura ferroviaria.

Por otro lado, Gattuso y Restuccia [79] asumen el coste de la construcción de infraestructura como un coste por kilómetro de porciones homogéneas de línea ferroviaria, incluyendo la preparación del terreno, terraplenes, drenaje, estructuras (paredes, conductos de agua, puentes, túneles, pasos superiores e inferiores), cercas y equipos de protección contra el ruido, carreteras de acceso al servicio, gastos generales y mantenimiento adicional inicial. La Tabla 1 muestra costes típicos de infraestructura en el caso de topografía sencilla, topografía promedio, túneles y puentes.

Tabla 1. Costes de infraestructura para diferentes topografías.

<i>Vía ferroviaria</i>	<i>Topografía sencilla (M€/km)</i>	<i>Topografía promedio (M€/km)</i>	<i>Túneles (M€/km)</i>	<i>Puentes (M€/km)</i>
<i>Vía única</i>	1 - 3	3 - 15	10 - 50	10 - 20
<i>Vía doble</i>	1 - 4	3 - 20	20 - 70	20 - 50

Fuente: [79].

Tal como se pudo comprobar de todas las referencias consultadas, se puede concluir que existe una dificultad para encontrar unas variables comunes que influyan los

costes de construcción de una infraestructura ferroviaria. Esto es así debido, principalmente, a las diferencias económicas y geográficas presentadas por cada una de las referencias analizadas. Por ejemplo, el coste asociado a los salarios, material, transporte de material en cada referencia, son parámetros importantes y muy diferentes en cada país que se estudie, pues estos precios son condicionados por las condiciones económicas de cada nación.

Como bien explica González [76], estas variaciones provocan grandes diferencias en la estructura de costes entre proyectos que presentan requerimientos técnicos similares, lo cual se traduce finalmente en grandes diferencias en los costes de construcción de la infraestructura ferroviaria. Estas diferencias observadas entre los costes por kilómetro se deben, entre otras razones, a [76]:

- Tiempo de construcción de la infraestructura. Esto es importante debido a la evolución de los costes durante este tiempo.
- Países, y ciudades, con costes unitarios y condiciones económicas diferentes.
- Calidad del suelo diferente en cada punto.
- Topografía y orografía diferente entre líneas ferroviarias e incluso en tramos de una misma línea.
- Normativa diferente en cuanto a las condiciones técnicas de explotación, medioambientales y urbanísticas.
- Diferencias en el trazado geométrico vertical de la vía, con sus respectivas diferencias en los valores de inclinación (rampas y pendientes).
- Diferencias en las velocidades máximas de diseño para cada línea ferroviaria.

González [76] explica estas diferencias, debido a la evolución en el tiempo de los costes unitarios y de los requerimientos técnicos y. Pero, generalmente, estas diferencias se deben al tipo de suelo y las características orográficas sobre las que se construye la infraestructura ferroviaria.

Considerando lo anterior, se puede inferir que los costes de construcción de una infraestructura ferroviaria se relacionan con los requisitos técnicos exigidos para construir esta. En otras palabras, se puede centrar el estudio mediante la definición

del trazado geométrico, analizando los parámetros geométricos necesarios para la construcción de una línea metropolitana, y así estudiar la relación de estos parámetros con el coste de construcción de la infraestructura [76].

Es necesario resaltar que los valores y modelos que aquí se exponen, pueden servir para realizar una primera aproximación de la inversión necesaria en proyectos de infraestructuras ferroviarias. Estas cifras que se mostrarán son aproximadas, recogidas de forma empírica tras el análisis de casos reales consultados de diferentes fuentes. Esto no limita el alcance del proyecto, ya que los valores mostrados permiten obtener una idea de la magnitud de cada uno de ellos [76].

4.2. Elementos de la infraestructura

A modo de resumen puede afirmarse que el coste total de inversión se compone por los elementos presentados en la Tabla 2:

Tabla 2. Elementos que componen el coste total de inversión de una infraestructura ferroviaria.

<i>Componente principal</i>	<i>Elementos</i>
<i>Infraestructura</i>	<i>Movimiento de tierras</i>
	<i>Drenaje</i>
	<i>Reposición de servidumbres y servicios afectados</i>
	<i>Túneles</i>
	<i>Integración ambiental</i>
<i>Vía</i>	<i>Vía en balasto o en placa</i>
	<i>Carriles</i>
	<i>Traviesas</i>
	<i>Sujeciones</i>
	<i>Aparatos de vía</i>
<i>Estaciones</i>	<i>Estaciones</i>
<i>Sistemas de electrificación</i>	<i>Líneas de alimentación en alta tensión</i>
	<i>Subestaciones de tracción</i>
	<i>Línea aérea de contacto</i>
<i>Sistemas de seguridad y</i>	<i>ATP</i>

<i>Componente principal</i>	<i>Elementos</i>
<i>comunicaciones</i>	<i>ATO</i>
	<i>FAP</i>
	<i>Enclavamientos</i>
	<i>Centro de Control</i>
	<i>Sistema tren-tierra</i>
	<i>Telemando de instalaciones y energía</i>
	<i>Sistema de monitorización y vigilancia</i>
<i>Expropiaciones</i>	<i>Expropiaciones</i>

Fuente: Elaboración propia con información de [76] y [74].

A continuación, se profundiza en cada uno de estos costes.

4.2.1. Infraestructura

Dentro de la partida de infraestructura se distinguen los siguientes conceptos:

- *Movimiento de tierras*: el coste de los movimientos de tierras depende de las condiciones geológicas y geotécnicas, el porcentaje de los materiales procedentes de excavación que pueden ser utilizados para la construcción de terraplenes y la altura de terraplenes y desmontes. Este concepto también incluye el subbalasto, que constituye la capa superior de la plataforma sobre la que apoya el balasto, y capa de forma, que se ubica bajo la capa de subbalasto. El movimiento de tierras se clasifica en dos procesos.
 - *Excavación*: Es el procedimiento por el cual se baja la rasante del terreno, y, por lo tanto, la cota de este, con el objetivo de crear un plano en el que se puede asentar la infraestructura ferroviaria. Los precios unitarios de excavación según la base de precios elaborada por el Ministerio de Fomento en el año 2 011 son los presentados en la Tabla 3 [80]. Todos esos precios incluyen la carga y el acopio dentro de la obra, transporte al vertedero hasta una distancia de 10 km o al lugar de utilización dentro de la obra sea cual sea la distancia.

Tabla 3. Precios unitarios para los diferentes tipos de excavación.

Tipo de excavación	Precio [€/m ³]
Excavación de tierra vegetal	1.97
Excavación en desmonte en tierra con medios mecánicos sin explosivos	1.85
Excavación en desmonte en tránsito con medios mecánicos sin explosivos	2.70
Excavación en desmonte en roca con empleo de explosivos	5.80
Excavación en vaciado entre pantallas en cualquier tipo de terreno a cielo abierto	4.18
Excavación en vaciado entre pantallas en cualquier tipo de terreno en zonas cubiertas	7.56
Excavación en tierra para formación de escalonado en cimientos, en vaciado o saneo con unas dimensiones en planta superiores a 3 m o por debajo de la cota de fondo de excavación de desmonte o apoyo de terraplenes hasta una profundidad definida en proyecto	2.09
Excavación en tránsito para formación de escalonado en cimientos, en vaciado o saneo con unas dimensiones en planta superiores a 3 m o por debajo de la cota de fondo de excavación de desmonte o apoyo de terraplenes hasta una profundidad definida en proyecto	3.05
Excavación suplementaria en retaluzado sin explosivos	2.86
Excavación suplementaria en retaluzado con explosivos	15.51
Excavación mecánica de zanjas, pozos o cimientos en cualquier tipo de terreno	6.00
Excavación manual en zanjas, pozos y cimientos	39.00
Precorte para taludes en roca para cualquier inclinación del talud (incluso escalonado en cimientos en roca) con taladros, incluido ejecución de taladros	10.65

Fuente: Elaboración propia con información de [80].

- *Terraplén, o llenos*: Es el procedimiento por el cual se eleva la rasante del terreno, y, por lo tanto, su cota. Este procedimiento se realiza mediante el llenado de una zona por medio de tierra. Este procedimiento también busca crear un plano en el que se pueda asentar la infraestructura ferroviaria. Los precios unitarios de terraplén según la base de precios elaborada por el Ministerio de Fomento en el año 2011 son los presentados en la Tabla 4 [80]. Todos estos precios incluyen el extendido, la humectación, la nivelación, compactación, terminación y refino de taludes totalmente terminado.

Tabla 4. Precios unitarios para los diferentes tipos de terraplén.

Tipo de terraplén	Precio [€/m ³]
Terraplén, pedraplén o relleno todo-uno con materiales procedentes de la excavación	1.01
Terraplén o relleno todo-uno con materiales procedentes de préstamo o cantera	3.90
Pedraplén con materiales procedentes de cantera	5.00
Suelo adecuado procedente de préstamo, yacimiento granular o cantera para formación de explanada en coronación de terraplén y en fondo de desmonte	4.70
Suelo seleccionado procedente de préstamo, yacimiento granular o cantera para formación de explanada en coronación de terraplén y en fondo de desmonte	5.50
Relleno localizado tratado con cemento en cuñas de transición.	18.07
Relleno saneo en desmonte con material procedente de la excavación de la traza.	1.01
Relleno saneo en desmonte con material de préstamo	3.90
Relleno localizado en zanjas, pozos y cimientos con material procedente de la traza	3.21
Relleno localizado en zanjas, pozos y cimientos con material procedente de préstamo, yacimiento granular y/o cantera	6.61
Relleno con material granular con suelos adecuados o seleccionados, procedente de préstamo, yacimiento granular y/o cantera en trasdós de estructuras u obras de drenaje	11.02
Relleno en formación de vertedero	0.52

Fuente: Elaboración propia con información de [80].

- *Drenaje*: su finalidad es proveer de un sistema de protección que evite que el agua de escorrentía tanto superficial como subterránea produzca efectos negativos en la infraestructura, garantizando su seguridad.
- *Reposición de servidumbres y servicios afectados*: la construcción de una línea metropolitana implica en ocasiones la afección a servidumbres y servicios existentes que deben reponerse. Las servidumbres que comúnmente se ven afectadas son viales, instalaciones de saneamiento y de abastecimiento de agua. Los servicios que se suelen ver afectados son líneas eléctricas, telefónicas y telegráficas, oleoductos y gaseoductos.
- *Túneles*: generalmente las líneas de metro son de vía doble. Estos túneles pueden ser mono-tubo cuando un único túnel aloja las dos vías o bi-tubo si se trata de dos túneles separados con una única vía por tubo.

- *Integración ambiental*: tiene por objetivo la definición de actuaciones para prevenir las afecciones que pueden producirse en el medio como consecuencia de las obras que se proyectan o cuando ello no sea viable, para corregirlas o minimizarlas.

El trazado de una línea está definido por los parámetros funcionales y las secciones tipo. Los parámetros funcionales definen las restricciones geométricas y funcionales que un trazado debe cumplir en planta y en alzado para garantizar el guiado y el soporte de los vehículos. Estos parámetros son función de la velocidad máxima de la línea y de la tipología del tráfico (viajeros, mercancías o mixto).

4.2.2. *Vía*

En la actualidad se implementan dos tipologías de vía en líneas de metro:

- Vía sobre balasto, generalmente en líneas de metro elevadas y a superficie.
- Vía en placa, generalmente en líneas de metro subterráneas.

4.2.2.1. *Vía sobre balasto*

La superestructura tradicional de vía está formada por el conjunto carril, traviesa y balasto, elementos que interaccionan conjuntamente con el objeto de transmitir con valores admisibles las tensiones desde el carril a la plataforma.

El balasto es el material granular que se pone bajo las traviesas para repartir las cargas en una superficie mayor, se caracteriza por tener un buen comportamiento elástico y de drenaje, por lo que ha venido siendo utilizado sistemáticamente en las líneas ferroviarias europeas. También presenta un buen comportamiento como material amortiguador de los efectos dinámicos y los fenómenos vibratorios.

4.2.2.2. *Vía en placa*

Este tipo de vía se compone especialmente de una losa de hormigón y/o asfalto que reemplaza al balasto para transferir las cargas a la plataforma. El objetivo es reducir al

máximo los asentamientos y mantener la geometría de vía a lo largo del tiempo sin necesidad de operaciones de mantenimiento frecuentes.

La vía en placa como alternativa al balasto suele plantearse para velocidades por encima de los 200 km/h donde la geometría de vía es más exigente y debe conservarse con un coste de mantenimiento asumible. Se implementa con frecuencia en túneles, en los que los trabajos de mantenimiento del balasto son complejos y facilita la evacuación de viajeros en caso de emergencia. También se utiliza en estaciones de alta velocidad.

Además de disminuir los costes de mantenimiento, la vía en placa presenta las siguientes ventajas sobre una vía en balasto [81]:

- Soporta mayores cargas por eje.
- Disminuye la presión transmitida a la plataforma.
- Asegura unas condiciones de geometría invariable y de tolerancias muy estrictas de la vía.
- Resuelve el problema de la escasez y gran rechazo medioambiental de las canteras de balasto.
- Posibilita la utilización de áridos marginales o reciclados para la placa de hormigón.

Como principales desventajas, está su mayor coste, mayor dificultad de ejecución y una mayor dificultad de reposición en caso de avería, que, por otra parte, es menos frecuente que sobre vía en balasto. Tampoco admite terraplenes elevados por el tema de ser más sensible a asientos diferenciales.

4.2.2.3. Carril

El carril es el elemento encargado de soportar directamente el peso de los vehículos y las acciones dinámicas generadas por la velocidad y el estado de conservación de la vía y el vehículo, las funciones que deben desempeñar los carriles dentro del conjunto de la vía son las siguientes [82]:

- Absorber, resistir y transmitir a las traviesas los esfuerzos recibidos por parte de los vehículos al igual que los de origen térmico.
- Servir de guía al material rodante con la máxima continuidad.
- Servir de elemento conductor para el retorno de la corriente en líneas explotadas con tracción eléctrica.
- Servir de conductor para las corrientes de señalización.

4.2.2.4. *Traviesas*

Las traviesas son los elementos transversales ubicados debajo de los rieles que los une mediante sistemas de sujeción y los conserva a una misma distancia. Su función es de recibir las cargas de los carriles y transmitirlos al balasto (o a la placa) a través de su superficie de contacto con este último. También sirve de soporte a los carriles, garantizando la invariabilidad de la distancia entre ellos, además se encarga de disipar el ruido y de mantener un adecuado aislamiento entre los dos rieles que permita el buen funcionamiento de los sistemas de señalización.

Las traviesas pueden ser de madera, metálicas, hormigón, siendo estas últimas las más utilizadas en las líneas de metro. Las traviesas de hormigón, a su vez, pueden tener diferentes formas, siendo las más utilizadas las traviesas monobloque, las traviesas bibloque con riostra, las semitraviesas y las traviesas de dos rótulas, el uso de esta última es muy limitado debido a su mal funcionamiento.

4.2.2.5. *Sujeciones*

Las sujeciones son los elementos que hacen posible la continuidad estructural de la vía, manteniendo la integridad física del conjunto carril-traviesa. Existen varios elementos: sujeciones de carriles que los fijan a las traviesas (por ejemplo, las sujeciones tipo clip de Vossloh), placas de asiento que reducen la presión transmitida por el carril.

4.2.2.6. Aparatos de vía

Desvíos

Los desvíos permiten el paso de una vía a otra y la bifurcación y cruce de líneas. Pueden ser simples o dobles (escapes) y de varios tipos según la velocidad de paso que permitan por vía general y desviada.

Travesías

Las travesías permiten la intersección de dos vías, por lo que los ejes de las vías se cortan.

4.2.3. Estaciones

En la mayoría de los casos, las estaciones son un caso extraordinario, pues la información típica no permite la separación de las estaciones para análisis independientes de los costes, y por lo general se trata de inversiones injustificadas para el funcionamiento real de la explotación ferroviaria. Algunos estudios presentados por González [76] consideran que los costes asociados a las estaciones no tienen una relación directa con los costes del proyecto y que no deberían de ser atribuidas al coste total de construcción del proyecto ferroviario, esto debido a que muchas veces se incrementan de una forma desproporcionada los costes por ser consideradas obras de arte donde importan más aspectos estéticos y de adaptación al medio, que los aspectos técnicos que son los que priman en el proyecto ferroviario.

Aun así, se han analizado una serie de proyectos y estudios informativos en busca de costes que permitan tener un orden de magnitud [76]:

- Para una línea de alta velocidad, a modo de ejemplo, en el Strategic Rail Authority (SRA) se concluyó que este coste es aproximadamente un 8-10% del coste de inversión del proyecto. También se demuestra que este coste aumenta al menos un 20% cuando se construye una estación monumental, donde priman los

aspectos estéticos con excesivos adornos arquitectónicos, frente a una estación funcional.

- Otro estudio realizado por Baumgartner [65] realiza una clasificación de las estaciones y estima el coste por unidad en millones de euros del año 2 001. Este es presentado en la Tabla 5:

Tabla 5. Coste asociado a la construcción de estaciones.

<i>Tipo de estación</i>	<i>Coste (Millones de euros del año 2 001)</i>	
	<i>Promedio</i>	<i>Rango</i>
<i>Estación intermedia en línea de vía única, sin señalización ni otros equipos</i>	1	0.5 a 2
<i>Estación intermedia en línea de vía única, con enclavamiento y señalización, pero sin ningún otro equipo</i>	3	2 a 6
<i>Dos conexiones (4 desvíos) entre las dos vías de una línea de vía doble con señalización, telemando</i>	10	5 a 15
<i>Estación con vía doble (2 pares de conexiones y 2 vías principales) con señalización, etc.</i>	30	20 a 40
<i>Paso elevado</i>	15	10 a 30
<i>Estación de pasajeros grande</i>	200	50 a 500
<i>Estación de clasificación con lomo de asno (vías de recepción, vías de clasificación, vías de expedición, vías de apartado, etc.)</i>	300	100 a 500
<i>Terminal de transporte combinado internacional o continental</i>	100	50 a 200

Fuente: [65].

- Por otro lado, Pickrell [83] estimó el coste de las estaciones subterráneas en USD 40 millones, las estaciones elevadas en USD 23 millones, y las estaciones a nivel en USD 10 millones (dólares del año 1 983, ver Tabla 6). Sin embargo, debe considerarse que el estudio fue hecho en el año 1 983 y solamente se consideraron metros norteamericanos. Así como los otros costes de las líneas presentadas anteriormente, estos costes son enormemente variables.

Tabla 6. Costes de construcción estimados relacionados a las estaciones.

Componente	Coste de construcción, Millones de USD\$ del año 1 983
Estaciones subterráneas	40
Estaciones elevadas	23
Estaciones a nivel	10
<i>Kilómetro de doble vía, subterránea:</i>	
<i>incluyendo estaciones</i>	85
<i>excluyendo estaciones</i>	64
<i>Kilómetro de doble vía, elevada:</i>	
<i>incluyendo estaciones</i>	34
<i>excluyendo estaciones</i>	24
<i>Kilómetro de doble vía, a nivel:</i>	
<i>incluyendo estaciones</i>	19
<i>excluyendo estaciones</i>	14

Fuente: [83]

- La Tabla 6 muestra que incluir los costes de la estación incrementa el coste del proyecto en un 33-42%. En otras palabras, el coste de la estación tiene una cuota del 25-29% del coste de proyecto medio.
- También se observa que el coste de una estación elevada es más del doble que una estación a nivel, y que una estación subterránea tiene un coste de más de 4 veces que una estación a nivel. Se presenta la Tabla 6 más para ver la cuota que tiene el coste de la estación en el coste del proyecto, que para considerar sus costes en dólares de 1 983.

4.2.4. Sistemas de electrificación

Los sistemas de electrificación adoptados en España para las líneas de metro son, generalmente, de corriente continua a 1 500 V.

El sistema de electrificación está compuesto por:

- Líneas de alimentación en alta tensión a las subestaciones de tracción, procedentes de subcentrales de distribución o de líneas integrantes de la red de energía de alta tensión.
- Subestaciones de tracción.
- Línea aérea de contacto (o catenaria), implantada a lo largo del trazado para permitir la captación de energía por los trenes.

El proceso consiste en que, a partir de una distribución de energía en alta tensión, y mediante la construcción de subestaciones, la corriente eléctrica llegue a los vehículos por intermedio de la catenaria que sirve de conductor.

En la locomotora se transforma la energía eléctrica en energía mecánica para asegurar la tracción. Por último, la corriente es devuelta a la subestación por el circuito de retorno constituido por el propio carril de la vía.

El transporte de la corriente desde la subestación hasta el material motor se realizará por medio de un conductor aéreo suspendido de soportes colocados al lado de la vía. El paso de la corriente del conductor al material se realiza a través de los pantógrafos del tren [84].

4.2.4.1. Líneas de alimentación a las subestaciones en alta tensión

La energía llega a las subestaciones eléctricas de tracción a través de las líneas eléctricas de transporte. En España los valores de tensión empleados son de 220 y 400 kV y dichas líneas son operadas por Red Eléctrica de España (REE). La longitud de la conexión a las líneas de alimentación en alta tensión es variable dependiendo de la distancia a la que se encuentre la red pública de transporte de energía.

4.2.4.2. Subestaciones de tracción

Las subestaciones de tracción obtienen energía del proveedor y estabiliza la tensión y la reduce al voltaje de operación de la línea, además convierte la energía de alterna a continua para que pueda ser usada por los trenes.

4.2.4.3. Línea aérea de contacto

Las líneas aéreas de contacto adoptadas en general en España es la catenaria aérea flexible, siempre y cuando el gálibo lo permita, en caso contrario se instala el carril conductor aéreo.

La función principal de la línea aérea de contacto es suministrar energía eléctrica desde las subestaciones a las locomotoras eléctricas. Para que este proceso se pueda realizar, además de la línea aérea de contacto por la que circula la energía eléctrica desde las subestaciones, es necesaria la existencia de aparatos de toma de corriente en las locomotoras: pantógrafo (ver Fig. 11).



Fig. 11. Pantógrafo de tren serie 4300 de vossloh de Metro Valencia.

Fuente: [85]

La normativa europea define el pantógrafo como el aparato para la toma de corriente de uno o más hilos de contacto, formado por un dispositivo articulado que permite el desplazamiento vertical de la cabeza del pantógrafo.

Los principales elementos de la catenaria son [86]:

- Elementos conductores:

- Hilos de contacto: son los conductores de la línea aérea de contacto con los que hacen contacto los aparatos de toma de corriente (pantógrafos).
- Sustentador: es el conductor que soporta el peso de la catenaria y mantiene los hilos de contacto a una altura constante, mediante unos elementos verticales llamados péndolas.
- Feeders de acompañamiento: son conductores contiguos a la línea aérea de contacto, que se conectan directamente a ella a intervalos frecuentes, para aumentar la sección transversal efectiva de la línea aérea de contacto.
- Feeders de alimentación: son los conductores encargados de alimentar la catenaria desde las subestaciones.
- Elementos de sustentación y apoyo:
 - Postes: son los encargados de soportar la catenaria, van fijados al suelo mediante macizos de hormigón.
 - Ménsulas: son los elementos que permiten la colocación de la catenaria en la posición correcta, y suelen ir fijadas al poste.
 - Pórticos: son estructuras empleadas para soportar la catenaria cuando hay problemas de gálibo para montar postes independientes, permitiendo el apoyo de varias catenarias sobre él mismo.
- Elementos de protección:
 - Aisladores: son los encargados de aislar eléctricamente los conductores de la catenaria de los apoyos y tierra.
 - Seccionadores: empleados para separar o unir eléctricamente distintos tramos de catenaria.
 - Aisladores de sección: empleados para separar eléctricamente unas vías de otras, formando paquetes de vías.
 - Cable de tierra: encargado de unir todos los soportes de catenaria y mantenerlos al mismo potencial.
 - Pararrayos: encargados de proteger a la línea aérea de contacto frente a sobretensiones, principalmente de origen atmosférico.

4.2.5. Sistemas de seguridad y comunicaciones

Los sistemas de seguridad o señalización están compuestos por [74]:

- Sistema de protección automática del tren (ATP) que vigila en todo momento la conducción, regulando el proceso de frenado, de forma que no se permite que el tren circule a una velocidad superior a la autorizada en cada punto. El sistema ATP impide el alcance entre trenes, frenando hasta la detención cualquier tren que rebese una señal en rojo, que se aproxime a una aguja no enclavada por el itinerario o que sobrepase la velocidad máxima en cualquier punto del trayecto que recorre.
- Sistema de operación automática del tren (ATO), donde el modo de conducción que gobierna al tren es de forma automática sin la intervención del conductor. El ATO es un modo de conducción y no un sistema de seguridad, por lo que siempre va supervisado por otros sistemas, como el ATP.
- Sistema de frenado automático puntual (FAP) que evita que el tren rebese señales en rojo o circule por encima de a velocidad máxima de la vía.
- Enclavamientos electrónicos que monitorizan y controlan el movimiento de los trenes en estaciones y apartaderos, mostrando la información por medio de las señales luminosas.
- Centro de control (CRC) desde el que se gestiona de manera centralizada la circulación en la línea.

La línea 5 de Metrovalencia utiliza el sistema ATP con preinstalación de ATO y soporte de FAP en todos los trenes que circulan por ella. Por lo que este será el sistema considerado en esta tesis.

El sistema de comunicaciones consiste en:

- Sistema tren-tierra.
- Telemando de instalaciones fijas y sistema de energía.
- Sistemas de monitorización y vigilancia.

4.2.6. Expropiaciones

4.2.6.1. Terrenos a expropiar

La aprobación de un proyecto ferroviario, así como la mejora de los proyectos existentes, incide en la ocupación o la afección de nuevos terrenos. González [76] demuestra que, según el texto de la Ley de Ordenación de los Transportes Terrestres de 30 de Julio de 1 987 actualizado a marzo de 2 011, así como el Reglamento de 28 de Septiembre de 1 990 y la Ley 39/2 003 de 17 de Septiembre del sector ferroviario, se consideran zonas de dominio público los terrenos que están ocupados por las líneas ferroviarias que formen parte de la Red Ferroviaria de Interés General y una franja de terreno de 8 m a cada lado de la plataforma, medida en horizontal y perpendicularmente al eje de la misma desde la arista exterior de la explanación.

En general, en algunos casos como viaductos, puentes y obras similares, se pueden fijar como aristas exteriores de la explanación las líneas de proyección vertical sobre el terreno. En túneles es necesaria la expropiación de los 100 primeros metros (boquillas), no expropiando el resto.

Considerando la normativa presentada, el ancho de expropiación promedio que se considera para una infraestructura ferroviaria, es el siguiente [76]:

- Plataforma a cielo abierto: Ancho medio de 70 m, correspondientes a un terraplén de 8 m de altura. Esto supone una ocupación de 46 m de ancho a los que se añaden 8 m de las franjas laterales a cada lado (16 m en total) y 8 m a mayores debido a los incrementos que pueden suponer la reposición de caminos.
- Puentes y viaductos: En este caso se estima un ancho medio de 35 m, correspondientes a los 15 m de la estructura más 16 metros de las franjas laterales y 4 m a cada lado debido al incremento de caminos.
- Túneles: En este caso sólo se consideran expropiación los 100 m de las boquillas, que se consideran tramos normales a cielo abierto, más unos 500 m (por cada boquilla) para caminos complementarios, como vías de acceso y reposición de estos.

- Subestaciones: Aquí se estima una superficie media de 5 000 m² en el caso de las subestaciones y de 10 400 m² para las vías de acceso (carretera de 400 m).

Conociendo el ancho de la plataforma y la longitud de la línea, es posible calcular la superficie que es necesario expropiar para construir una línea ferroviaria (ecuación (4.1)) [76].

$$S_{exp} = L_{movt} * 70 + L_{est} * 35 + n_{tun} * 1\ 200 * 70 + n_{subes} * 15400 \quad (4.1)$$

Donde:

- S_{exp} : Superficie a expropiar para la construcción de una línea ferroviaria (m²).
- L_{movt} : Longitud de la línea a cielo abierto (m).
- L_{est} : Longitud de la línea que pasa por viaductos o puentes (m).
- n_{tun} , n_{subes} : Número de túneles y subestaciones.

4.2.6.2. Tipos de suelo

En el territorio Español, según la Ley del suelo 8/2 007 del 28 de mayo y el Real Decreto 1 492/2 011 del 24 de octubre, todo suelo se clasifica en dos situaciones básicas [76]:

- Suelo urbanizado: Cuando el terreno esté o no edificado, y que tengan, o puedan llegar a tener, los servicios propios de los núcleos de población y las dotaciones requeridas por la legislación urbanística del Reino Español.
- Suelo rural: Este es el suelo preservado para su transformación mediante la urbanización, así como los terrenos excluidos de esta transformación, suelos agrícolas, ganaderos, forestales, ecológicos, paisajísticos y los que tienen riesgos tecnológicos o naturales. También son suelos rurales aquellos que permitan su paso a situación de suelo urbanizado, hasta que termine la correspondiente actuación de urbanización. Dentro de este apartado se encuentran los siguientes tipos de suelos:
 - Erial: Comprende los terrenos improductivos, montes bajos o matorrales, eriales propiamente dichos y pastizales, pastos, etc.

- Cereal: Comprende los cultivos de secano de cereal, los definidos como labor, secanos y viñas.
- Monte alto: Comprende los montes maderables, ornamentales y frutales (no de regadío).
- Regadío: Comprende los cultivos de cereal, leguminosos o frutales de regadío.

4.2.6.3. Precios

El Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente estima anualmente el precio medio de la tierra y su evolución histórica [87]. De este informe se puede conocer el precio, al año 2 014, de cada uno de los terrenos descritos anteriormente (Tabla 7). En cuanto a los precios del suelo urbanizado, el Ministerio de Fomento determina el precio medio del metro cuadrado del suelo urbanizado categorizado por comunidades autónomas o a nivel nacional. Este informe clasifica también por municipio, diferenciándolos por número de habitantes [88]. Los precios de ambos Ministerios son presentados en la Tabla 7.

Tabla 7. Precios medios de los diferentes tipos de suelo.

Clase de tierra	Año 2 014	
	Precio €/Ha	Precio €/m ²
<i>Erial</i>	3 032	0.3032
<i>Cereal</i>	7 399	0.7399
<i>Monte alto</i>	8 369	0.8369
<i>Regadío</i>	17 272	1.7272
<i>Suelo urbanizado (media España)</i>	1 556 000	155.6
<i>Municipios con menos de 1 000 habitantes</i>	461 000	46.1
<i>Municipios entre 1 000 y 5 000 habitantes</i>	935 000	93.5
<i>Municipios entre 5 000 y 10 000 habitantes</i>	1 194 000	119.4
<i>Municipios entre 10 000 y 50 000 habitantes</i>	1 591 000	159.1
<i>Municipios con más de 50 000 habitantes</i>	2 875 000	287.5

Fuente: Elaboración propia con datos de [87] y [88].

La Tabla 7 muestra como el metro cuadrado de una zona urbana es mucho más costoso que incluso el suelo rural más caro, aproximadamente 90 veces más caro en el año 2 014. También se observa que mientras el municipio es más grande (mayor población), el precio del metro cuadrado aumenta, al nivel de que en municipios de más de 50 000 habitantes tiene un precio 6.2 veces mayor que en municipios con menos de 1 000 habitantes. Esto es de fundamental importancia en un estudio de esta índole, puesto que un sistema Metro generalmente estará ubicado en una ciudad con más de 50 000 habitantes.

Debe de agregarse a estos precios, el coste de los bienes indemnizables. Estos deben de ser abonados independientemente del suelo, así como parte del terreno que no ha sido expropiado y cuya explotación no sea rentable para el propietario. Estos bienes inmuebles deben de ser valorados económicamente de acuerdo al Artículo 23 de la Ley de 16 de diciembre de 1 954 sobre expropiación forzosa [89].

4.3. Comparación entre diferentes líneas de Metros

4.3.1. Variación de costes en líneas de metro

Como se ha expresado anteriormente, el coste de construcción por kilómetro varía significativamente en cada proyecto, la Tabla 8 ilustra las características generales de algunos sistemas metro.

Tabla 8. Coste por kilómetro de algunos proyectos de Metro.

Línea	Año de apertura	Longitud [km]	Porcentaje enterrado	Número de paradas	Coste/km (millones USD-año 2 002)
<i>Copenhagen Metro Phases 1-3</i>	2 002 –2 007	21.0	48%	22	69.8
<i>London Jubilee Line - extension</i>	1 999	16.0	78%	ND	329.9
<i>Madrid Extensión 1 995- 1 999</i>	1 999	56.3	68%	38	26.7

<i>Línea</i>	<i>Año de apertura</i>	<i>Longitud [km]</i>	<i>Porcentaje enterrado</i>	<i>Número de paradas</i>	<i>Coste/km (millones USD-año 2 002)</i>
<i>Toulouse VAL Line A</i>	1 993	9.7	90%	15	60.9
<i>Toulouse VAL Line A - extension</i>	2 004	2.2	ND	3	81.1
<i>Marseille Lines 1-2</i>	1 977–1 992	19.6	80%	24	59.1
<i>Lille VAL RT</i>	1 988	29.0	75%	ND	56
<i>Lyon Ligne D</i>	1 991–1 997	14.0	ND	15	79.5
<i>Paris Meteor Phase 1</i>	1 998	7.2	ND	7	220
<i>Marseille Line 1 - extension</i>	2 006	2.5	ND	4	68.8
<i>Toulouse VAL line B</i>	2 007	15.0	ND	20	63.2
<i>London Victoria Line</i>	1 968–1 969	15.8	100%	ND	63.1
<i>Vienna Stage 1</i>	1 984	ND	ND	ND	94.2
<i>Berlin U-Bahn</i>	ND	4.6	100%	5	88.3
<i>Hannover U- Bahn</i>	ND	69	17%	110	16.1
<i>Hannover U- Bahn extension</i>	ND	2.8	100%	ND	56.9
<i>Turin Metro Phase 1</i>	2 005	9.6	100%	15	71.7
<i>Washington, DC. Metro</i>	1 985	97.3	57%	57	114.3
<i>Atlanta MARTA</i>	1 986	43.1	42%	26	88.0
<i>Baltimore Metro Section A & B</i>	1 983	12.2	56%	9	147.5
<i>Los Angeles North Hollywood – extension</i>	2 000	10.1	ND	3	131.6
<i>Atlanta North Line – extension</i>	2 000–2 003	3.7	ND	2	126.9

Línea	Año de apertura	Longitud [km]	Porcentaje enterrado	Número de paradas	Coste/km (millones USD-año 2 002)
San Francisco BART Airport - extension	2 002	14.0	ND	4	109.4
Singapore	ND	67.0	30%	ND	54.5
Seoul	ND	116.5	80%	ND	65.8
Calcutta	ND	16.5	95%	ND	59.9
Mexico City Line B	2 000	23.7	25%	21	43.8
Caracas Line 3	1 994	4.4	100%	4	98.4
Santiago Line 5 extension	2 000	2.8	100%	3	71.8
Athens	ND	ND	ND	ND	156.0*
Cairo	ND	ND	ND	ND	109.0*
Frankfurt a.m.	ND	ND	ND	ND	108.0*
Lisbon	ND	ND	ND	ND	118.0*

Fuente: Elaboración propia con información de [71].

ND: No disponible.

* No se tiene información del año en que calcularon el coste por kilómetro ni la línea específica del metro a la que se refiere.

Nota: Los impuestos están incluidos para Madrid (16%), México (15%), Caracas (16%), Santiago (6%) El estatuto de los impuestos para Londres, Viena, Berlín, Hannover y Turín, son desconocidos. En los otros proyectos los impuestos son desconocidos.

Los costes unitarios más bajos son para el Metro de Hannover, y los más altos son los de la extensión de la línea Jubilee del Metro de Londres. El Metro de Hannover tiene un coste unitario más bajo incluso que la extensión del Metro de Madrid (bien conocida por sus bajos costes), el cual se explica porque solamente 17% del Metro en Hannover es subterráneo [71].

La Tabla 8 confirma las grandes variaciones en los costes por kilómetro entre diversos proyectos. También se observa que los metros estadounidenses tienden a tener costes por kilómetro más altos que sus contrapartes en Europa, Asia y Latinoamérica.

Excluyendo los valores límite de los casos de Madrid, Hannover y London Jubilee, el rango del coste de los metros está entre USD 50 – 150 millones por kilómetro (precios del 2 002).

4.3.2. Explicación de las variaciones de los costes

Ya se ha explicado que un factor clave que explica la variación de los costes entre proyectos es el coste de establecer el corredor, incluyendo las expropiaciones. Los costes pueden ser tan bajos como USD 10 millones por kilómetro para un ferrocarril a nivel si no hay que pagar por los permisos de construcción, pero puede elevarse a más de USD 200 millones por kilómetro para un ferrocarril subterráneo en un terreno urbano difícil con geología problemática, y altos costes para la expropiación de tierras, la reubicación y compensación para las empresas y residencias existentes, etc. [90].

Un factor adicional es si las estaciones están por debajo o por encima del suelo, donde se encontró que la construcción subterránea para los metros es de 4 a 6 veces más costosa que una construcción a nivel, y la construcción elevada de 2 a 2.5 veces más costosa que una construcción a nivel [90] (Fig. 12).

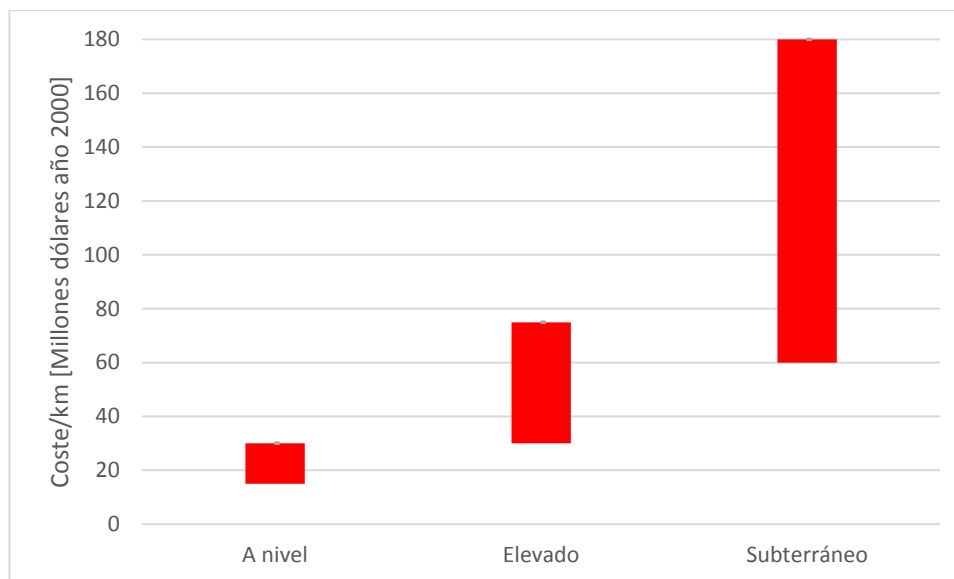


Fig. 12. Costes típicos para metros de nueva construcción.

Fuente: Elaboración propia con información de [90].

Otros factores que afectan en gran medida el coste por kilómetro son la calidad de la gestión, ya sea un nuevo ferrocarril que se construye o líneas que se añadan progresivamente a un ferrocarril existente, y las limitaciones ambientales y requisitos de seguridad [91].

Desafortunadamente no hay información disponible con respecto a la importancia de lo privado frente a las finanzas públicas. Además, los costes pueden ser influenciados por las condiciones específicas del mercado, por ejemplo, si la demanda de la construcción de infraestructura es mayor que la capacidad disponible (regional o nacional), los márgenes de ganancia podrían ser relativamente altos, lo que llevaría a mayores “costes” como se ha definido anteriormente.

Además, los mercados financieros pueden tener un impacto en los precios. Ambos sujetos, finanzas privadas vs públicas, así como las condiciones de mercado son áreas interesantes para futuras investigaciones.

En un estudio realizado por BB&J Consult [91] se hizo un análisis de la diferencia sustancial entre el coste de la extensión del Metro de Madrid y las extensiones de los

Metros de ciudad de México, Santiago y Caracas. En resumen, a lo que a infraestructura se refiere, los bajos costes de la extensión del Metro de Madrid pueden ser explicados por:

- Razones generales, que incluyen un fuerte compromiso político, un equipo de gestión de proyectos de gran experiencia, y la adjudicación de contratos no esté basada en la oferta más barata. Esto representa un ahorro de USD 15-20 millones/km.
- Razones específicas relacionadas con la obra civil, que incluyen el uso de métodos específicos de perforaciones geotécnicas, su supervisión y el monitoreo y diseño de estaciones estandarizadas. Esto representa un ahorro de hasta USD 10 millones/km.
- Reducción de costes específicos en equipos, incluyendo la ausencia de equipos de aire acondicionado en las estaciones, limitados sistemas de alimentación de energía ininterrumpidos, catenaria rígida, sistema ATP (sistema de protección automática del tren) y sistema ATO (sistema de operación automática del tren), tecnología probada para señalización y telecomunicaciones, y ruedas de acero convencionales. Esto representa un ahorro de hasta USD 10 millones/km.
- Reducción de costes específicos en el diseño, supervisión y gestión, incluyendo un tiempo de construcción corto, un pequeño equipo de gestión del proyecto, asistencia técnica limitada y la posibilidad de aprovechar la economía a escala. Esto representa un ahorro de USD 1-5 millones/km.

CAPÍTULO 5.

DESCRIPCIÓN DE LA RED METROPOLITANA ESTUDIADA

5. DESCRIPCIÓN DE LA RED METROPOLITANA ESTUDIADA

La empresa *Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana* (FGV) nace en la Comunidad Valenciana (España) en 1986 como empresa pública que depende de la Comunidad Valenciana con el objetivo de realizar la explotación, gestión y mantenimiento de las líneas ferroviarias que están dentro de los límites de la Comunidad Valenciana.

Los servicios que presta la empresa FGV se enmarcan en dos marcas comerciales:

- **Metrovalencia:** Es la red más extensa administrada por FGV, cubre la ciudad de Valencia, su área metropolitana y zonas de influencia.
- **TRAM Metropolitano de Alicante:** Esta red sirve a la ciudad de Alicante, su área metropolitana y sus zonas de influencia.

Este estudio se centrará en un tramo de la red de Metrovalencia. En la actualidad, Metrovalencia se compone de seis líneas de Metro (líneas 1, 2, 3, 5, 7 y 9) y tres líneas de tranvía (líneas 4, 6 y 8), siendo en su conjunto la segunda red en número de kilómetros de España por detrás del Metro de Madrid, y la cuarta en número de usuarios en España, tras los metros de Madrid, Barcelona y Bilbao.

El plano de la red se presenta en la Fig. 13, y los datos relevantes de la red de Metrovalencia se presentan en la Tabla 9.



Fig. 13. Plano de la red completa de Metrovalencia, al año 2016.

Fuente: [92].

Tabla 9. Datos de la red de Metrovalencia al año 2 015.

<i>Datos Metrovalencia en el año 2 015</i>	
<i>Demanda de viajeros 2 014</i>	60 686 589
<i>Líneas</i>	9
<i>Kilómetros de red</i>	156.39
<i>Kilómetros en túnel</i>	27.3
<i>Kilómetros en superficie</i>	129.1
<i>Kilómetros vía única</i>	87.31
<i>Kilómetros vía doble</i>	69.08
<i>Estaciones y apeaderos</i>	137
<i>Estaciones subterráneas</i>	35
<i>Estaciones en superficie</i>	102
<i>Escaleras mecánicas</i>	137
<i>Ascensores</i>	85
<i>Ancho de vía [mm]</i>	1 000
<i>Trenes y tranvías</i>	108

Fuente: Elaboración propia con información de [93].

En cuanto a la tracción y los sistemas de alimentación de la red, solo hay una única tensión de entrada a las subestaciones con una magnitud de 20 kV c.a. Sin embargo, hay dos tensiones distintas de salida, 1500 V c.c. (utilizada en las seis líneas de metro) y 750 V c.c. (utilizada en las tres líneas de tranvía), con unos consumos anuales alrededor de 64.4 GWh y 18.1 GWh, respectivamente (78% para las seis líneas de metro, y del 22% para las tres líneas de tranvía). Esta energía representa la consumida por todos los elementos y sistemas existentes en la red de Metrovalencia.

Si el consumo energético de cada componente de la red de Metrovalencia es considerado, 70% del consumo energético global va a la tracción (53 GWh) y 24% va a las estaciones, otros consumos de energía son despreciables [56].

5.1. Línea de estudio

El sistema de protección automática utilizado en las líneas de Metrovalencia es el ATP DTG (Distance to go) o distancia objetivo, integrado por dos elementos: ATP y ATO.

En general, en la red de Metrovalencia, los tramos subterráneos cuentan con sistema de conducción automática (ATO), siempre supervisado por el sistema ATP que es quien se encarga de la seguridad de la circulación. Por el contrario, en los tramos en superficie, se realiza una conducción manual supervisada por sistemas ATP o FAP/DIMAP.

La línea 5 de Metrovalencia, en donde se encuentra el tramo de línea en el que se centra este estudio, tiene una longitud de 12.95 km que conecta el puerto de Valencia con el aeropuerto de Valencia. Tiene un total de 18 estaciones y al año 2 014 transportó 14 648 527 pasajeros. Esta línea, en su totalidad, es gestionada mediante el sistema de seguridad ATP con conducción ATO para todos los trenes que circulan por la línea.

El tramo a estudiar de la línea 5 es la que se compone de las estaciones Marítim-Serrería, Ayora, Amistat, Aragón y Alameda. La distancia entre estas cinco estaciones es de 2.72 km.

5.2. Material rodante

El material rodante del Metrovalencia se compone, principalmente, por vehículos de la compañía Vossloh serie 4300, estos serán los vehículos que se utilizarán para el estudio y análisis del consumo energético. Este vehículo ha sustituido a las antiguas series 3600 y 3700, y también se han estado reemplazando los vehículos serie 3900 con este nuevo vehículo.

FGV dispone de 62 vehículos serie 4300, distribuidas en 42 unidades de cuatro coches y 20 unidades de cinco coches (Fig. 14) que circulan por las líneas 1, 2, 3, 5, 7 y 9.

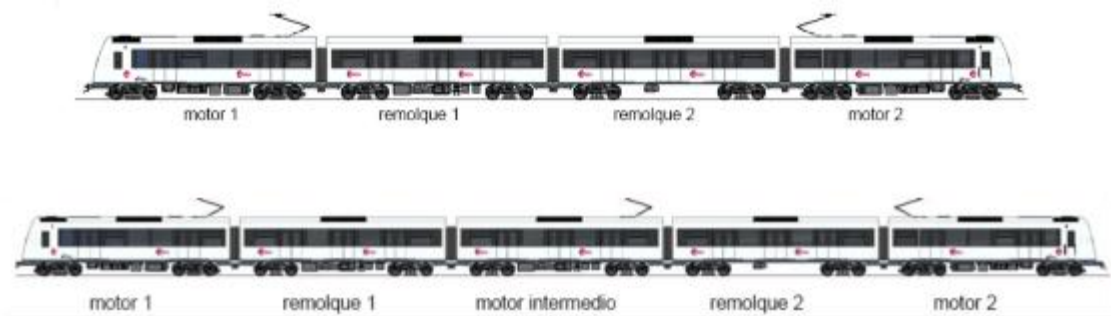


Fig. 14. Vehículo serie 4300 de Vossloh de cuatro y cinco cohes.

Fuente: [94].

Esta tesis evaluará el tren de 4 coches, cuyas características principales se muestran en la Tabla 10 [94]:

Tabla 10. Características del tren serie 4300 de Vossloh de 4 coches.

Característica	Valor	Unidades
<i>Dimensiones</i>		
<i>Longitud (sin enganches)</i>	60.49	<i>m</i>
<i>Anchura exterior</i>	2.55	<i>m</i>
<i>Altura</i>	4.055	<i>m</i>
<i>Altura al interior del vehículo</i>	2.15	<i>m</i>
<i>Altura de la plataforma</i>	1.15	<i>m</i>
<i>Pesos aproximados</i>		
<i>Cajas</i>	70.2	<i>t</i>
<i>Bogies</i>	50.8	<i>t</i>
<i>Tara</i>	121	<i>t</i>
<i>Carga máxima</i>	54	<i>t</i>
<i>Peso máximo</i>	175	<i>t</i>
<i>Capacidad del vehículo</i>		
<i>Personas sentadas</i>	116	<i>personas</i>
<i>De pie con 6 personas/m²</i>	472	<i>personas</i>
<i>Total</i>	588	<i>personas</i>

<i>Característica</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
<i>Características eléctricas</i>		
<i>Tensión de alimentación</i>	1 500	V c.c.
<i>Servicios auxiliares</i>	400	V a.c.
<i>Control</i>	110	V c.c.
<i>Servicios reducidos</i>	24	V c.c.
<i>Prestaciones</i>		
<i>Potencia de tracción en régimen continuo</i>	1 485	kW
<i>Velocidad máxima</i>	80	km/h
<i>Aceleración aprox. entre 0 y 40 km/h</i>	1.1	m/s ²
<i>Deceleración máxima con freno de servicio</i>	1.2	m/s ²
<i>Deceleración con freno de urgencia</i>	1.2	m/s ²
<i>Deceleración con freno eléctrico</i>	0.8	m/s ²
<i>Deceleración máxima de emergencia</i>	2	m/s ²
<i>Peso máximo por eje</i>	11	t

Fuente: [94].

Las características técnicas principales de este vehículo son [94]:

- Equipo de tracción con semiconductores IGBT con ventilación forzada, con aceleración de hasta 1.1 m/s² (con una aceleración residual de 0.3 m/s).
- Sistema de información integrado, acoplamiento automático, equipos de aire acondicionado independientes en cabina y compartimento de viajeros, posibilidad de tracción múltiple, caja negra y equipo de radio tren-tierra.
- Monitorización del equipo de freno neumático, con compresores rotativos.
- Equipo de climatización en caja de acero inoxidable.
- Controles y pulsadores redundantes.

- Sistema ATP redundante y preparado para ATO y distancia objetivo.
- Equipo de vídeo vigilancia con ocho cámaras repartidas por el departamento de viajeros.
- Preinstalación de un equipo de detección de incendios.
- Mejoras en el aislamiento acústico de los coches.

La apariencia del vehículo serie 4300 es la mostrada en la Fig. 15.



Fig. 15. Tren de Metrovalencia serie 4300 de Vossloh.

Fuente: [95].



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

*Modelo de optimización del consumo energético en trenes mediante el
diseño geométrico vertical sinusoidal y su impacto en el coste de la
construcción de la infraestructura*

CAPÍTULO 6.

DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y TOMA DE DATOS

6. DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y TOMA DE DATOS

6.1. Descripción de los dispositivos de medida

Tradicionalmente, el consumo energético de un tren eléctrico es monitoreado por medio de las subestaciones. Esto provee información sobre el total de la energía consumida en un instante o durante un período de tiempo determinado. No obstante, las subestaciones no dan información sobre cómo se está consumiendo esta energía por cada elemento y subsistema del sistema ferroviario, así que no es posible conocer en detalle el impacto de cualquier acción tomada para reducir el consumo energético.

Ante este panorama, es necesario estudiar de una manera más detallada centrándose en los vehículos. El objetivo es medir el consumo energético de un ferrocarril metropolitano desde el propio vehículo, para conocer a detalle los valores y flujos energéticos de un tren.

Para lograr esto, se instaló un sistema de medida que proporcionaba mediciones y datos necesarios para la gestión y el estudio del consumo energético. El vehículo monitoreado fue la unidad 4361 serie 4300 (Vossloh) con 4 coches.

El registro de consumo energético se llevó a cabo mediante la instalación de unos equipos medidores de consumo energético tipo MSAV-DC, fabricado por Mors Smitt (Fig. 16), colocados en el coche M2 (motor) de una unidad serie 4300 de Vossloh.

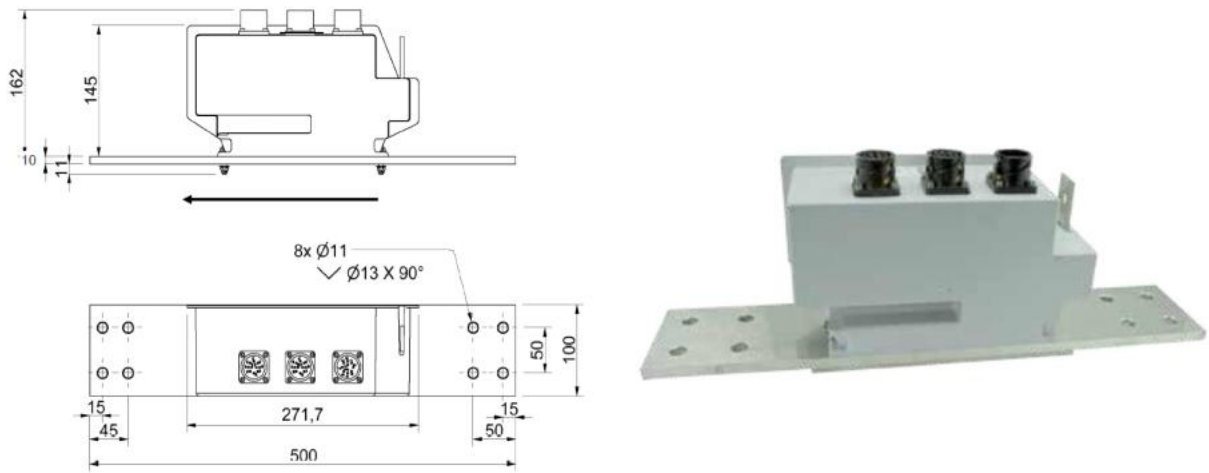


Fig. 16. Dimensiones e imagen de los medidores tipo MSAV-DC, fabricado por Mors-Smitt.

Fuente: [96].

Este equipo mide la energía a bordo en alta tensión para unidades en corriente continua, y permite calcular el consumo energético con un error inferior al 1.5% para redes de corriente alterna, y del 2% para las redes en corriente continua, cumpliendo la norma EN 50463 (medición de la energía a bordo de los trenes) [56]. Este medidor dispone de una salida modular tipo Ethernet que permite el envío de la información para ser almacenada directamente en un ordenador. Su diseño proporciona un nivel muy alto de seguridad de aislamiento de hasta 12 kV. Incluye una barra de conexión diseñada especialmente para la instalación al aire libre. La Fig. 17 presenta la ficha técnica del medidor MSAVDC de Mors Smitt.

Current Measurement Function (CMF)		
Nominal primary current	I_{PN}	76Adc to 1500Adc
Accuracy	ϵ_{CMF}	Class 1R (1% from 120A to 1440A)
Estimated error at 10A.....		<10%
Voltage Measurement Function (VMF)		
Nominal primary voltage	U_{PN}	from 1000 to 2000Vdc
Accuracy	ϵ_{VMF}	Class 0,5R
Energy Calculation Function (ECF)		
Accuracy	ϵ_{ECF}	Class 0,2R
Total EMF error.....	ϵ_{EMF}	< 2% according to prEN 50463
Energy Measurement Outputs		
EMF output.....	ETH1	Ethernet port 1 for energy data and Urms / Irms
EMF output.....	ETH2	Ethernet port 2 for energy data and Urms / Irms
General characteristics		
Auxiliary supply.....	V_C	Battery voltage 72Vdc (EN50155).
Dielectric test primary / secondary circuit.....	V_{D1}	12kV - 50 Hz - 1 min
Dielectric test auxiliary supply and outputs	V_{D2}	1.5kV - 50 Hz - 1 min
Operating temperature	T_A	-40 à +75°C
Storing temperature	T_S	-50 à +90°C
Ingress protection	I_p	IP66
Surge voltage category.....	O_v	OV4
Weight.....	m	<9 kg

Fig. 17. Ficha técnica con las características de los medidores tipo MSAV-DC de Mors-Smitt.

Fuente: [96].

Para monitorizar de una manera global el flujo energético del tren, se instalaron 3 equipos MSAVDC: uno en el pantógrafo (disyuntor), el segundo a la entrada del convertidor de auxiliares, y el tercero en las resistencias de frenado. Estos dispositivos permiten no solo medir el consumo energético promedio del tren en tiempo real, sino también el consumo energético en cada subsistema: tracción, dispositivos auxiliares y freno reostático. La Fig. 18 muestra un esquema de la medición del consumo energético.

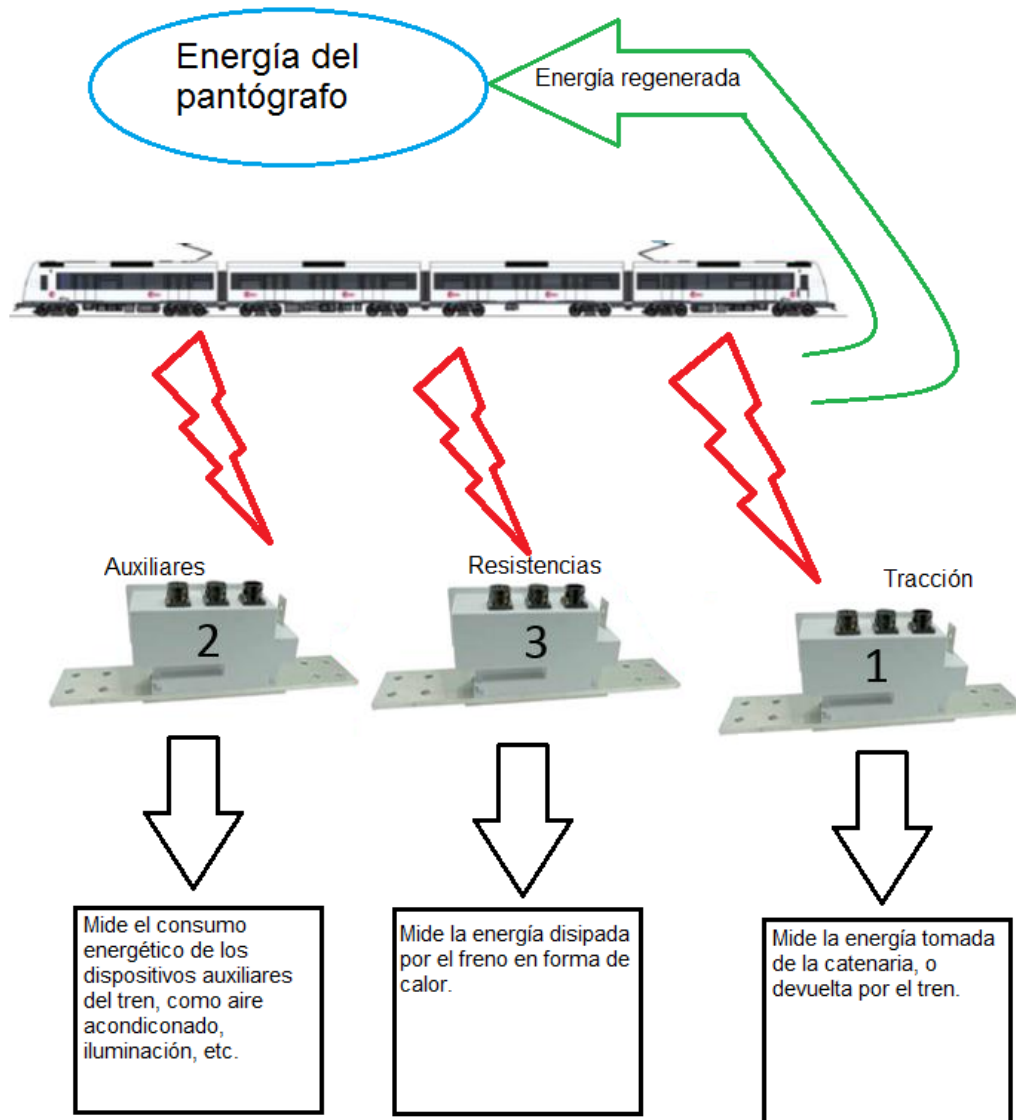


Fig. 18. Esquema de medición del consumo energético.

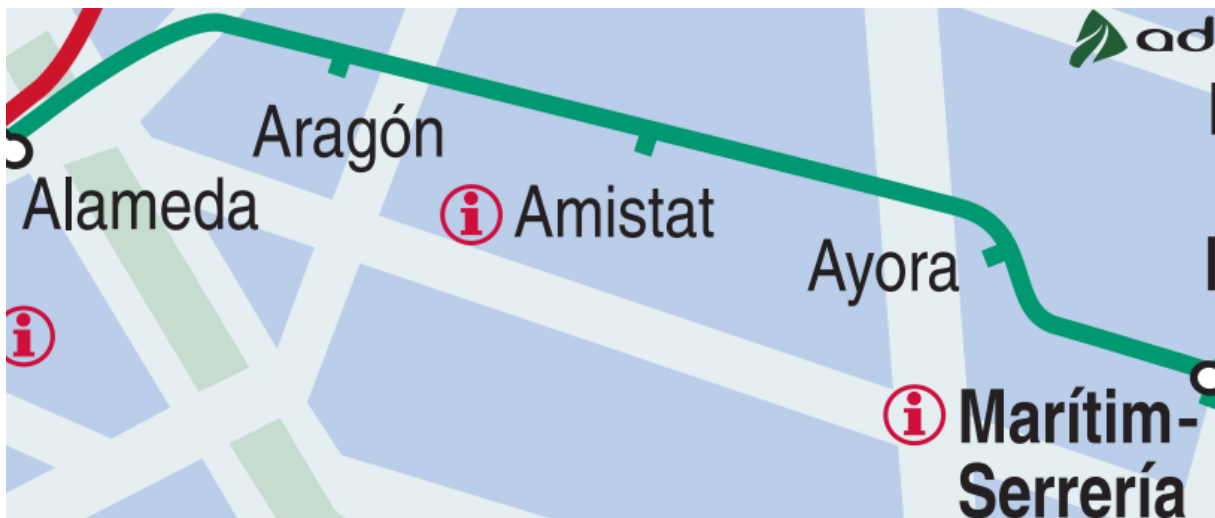
Fuente: Elaboración propia.

Además de los equipos de medición de consumo energético MSAVDC, se instaló un odómetro que permitiera conocer y registrar la velocidad del tren en cada instante de tiempo. Este odómetro es una sonda Knorr modelo BB0457681100, alimentado por una rueda fónica situado en uno de los ejes del coche R2 del vehículo. Este dispositivo da señal de pulsos que midiendo el voltaje puede conocer el valor de la velocidad.

Junto al dispositivo que mide la velocidad se ha instalado una fuente de alimentación de 72 V para suministrar alimentación a los equipos MSAVDC, un switch para integrar los datos aportados por cada equipo, y un ordenador portátil, para registrar y almacenar los datos obtenidos tanto de consumo energético como de velocidad.

6.2. Toma de datos

Centrándose en la línea 5 de MetroValencia, particularmente entre las estaciones de Marítim-Serrería y la Alameda, hay tres estaciones en el medio con una distancia total de 2.72 km y tiene cuatro paradas. La Fig. 19 presenta el trayecto estudiado.



*Fig. 19. Trayecto de la línea 5 entre Marítim Serrería y Alameda.
Fuente: Elaboración propia con información de [92].*

La Fig. 20 muestra un diagrama del trazado vertical de la ruta estudiada, indicando las estaciones (Marítim-Serrería, Ayora, Amistat, Aragón y Alameda) y el perfil en la línea. La pendiente máxima es 20 mm/m en un tramo comprendido entre las estaciones Amistat y Aragón.

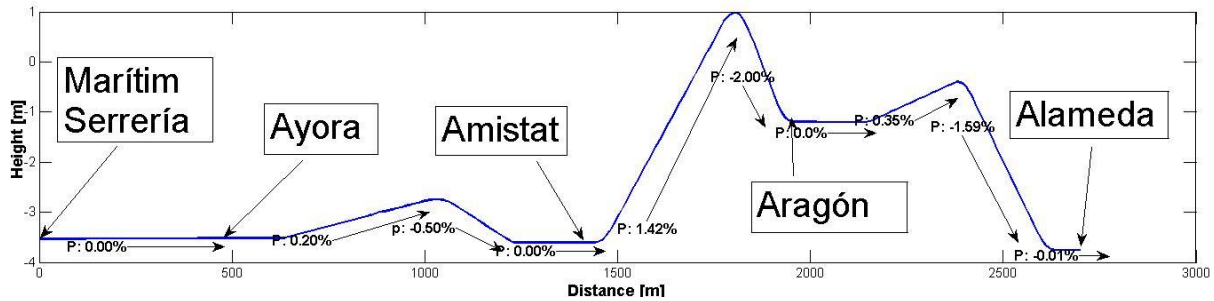


Fig. 20. Perfil del trazado entre Marítim Serrería y Alameda y las estaciones (paradas) en el medio.

Fuente: Elaboración propia.

Después de verificar la correcta operación de todos los dispositivos instalados, se realizaron mediciones en el tren mientras hacía servicios convencionales con pasajeros a bordo el 4 de agosto del año 2014. Trece viajes fueron medidos a lo largo de las estaciones mencionadas, seis en dirección Alameda y siete en dirección Marítim-Serrería. Los datos de consumo de tracción neto y bruto obtenidos para cada uno de los doce primeros recorridos se muestran en la Tabla 11, donde el consumo bruto se entiende como la energía importada por el tren a través del pantógrafo, mientras que el neto se obtiene restando al consumo bruto la energía devuelta por el tren a la catenaria durante los sucesivos frenados. Cada viaje es igual, con cuatro paradas entre la primera estación y la última. Los datos del recorrido 13 se reservan para una validación posterior de la red neuronal artificial.

Tabla 11. Consumo de tracción global de los recorridos medidos.

	Fecha	Tiempo viaje [min]	Consumo bruto medido en el disyuntor [kWh]	Consumo neto medido en el disyuntor [kWh]	Ratio neto/bruto
Marítim Serrería - Alameda	04/08/2014	9.52	19.52	15.65	80.17%
	04/08/2014	11.78	22.07	18.03	81.69%
	04/08/2014	11.68	22.66	17.64	77.85%
	04/08/2014	11.87	25.15	20.25	80.52%
	04/08/2014	11.00	22.20	18.68	84.14%
	04/08/2014	10.38	25.58	20.11	78.62%

<i>Valor medio</i>		11.04	22.86	18.39	80.50%
<i>Consumo neto por km [kWh/km]</i>				6.76	
	<i>Fecha</i>	<i>Tiempo viaje [min]</i>	<i>Consumo bruto medido en el disyuntor [kWh]</i>	<i>Consumo neto medido en el disyuntor [kWh]</i>	<i>Ratio neto/bruto</i>
<i>Alameda</i>	04/08/2 014	10.58	22.26	17.74	79.69%
<i>– Marítim</i>	04/08/2 014	11.10	21.47	17.51	81.56%
<i>Serrería</i>	04/08/2 014	10.83	24.04	20.52	85.36%
	04/08/2 014	10.08	26.01	22.47	86.39%
	04/08/2 014	9.82	24.47	20.84	85.17%
	04/08/2 014	10.00	27.09	21.54	79.51%
<i>Valor medio</i>		10.40	24.22	20.10	82.95%
<i>Consumo de tracción neto por km [kWh/km]</i>				7.39	

Se observa que el consumo de tracción neto es mayor en sentido Marítim Serrería, con 20.10 kWh de consumo medio frente a 18.39 kWh en sentido Alameda, al igual que el ratio neto/bruto: un 82.95% en sentido Marítim Serrería frente un 80.50% en sentido Alameda. Esto se debe a que el perfil de la línea es más favorable en el sentido de circulación de Marítim Serrería hacia Alameda.

Si se analizan los consumos de tracción netos respecto al tiempo de viaje, se obtienen los resultados mostrados en la Fig. 21.

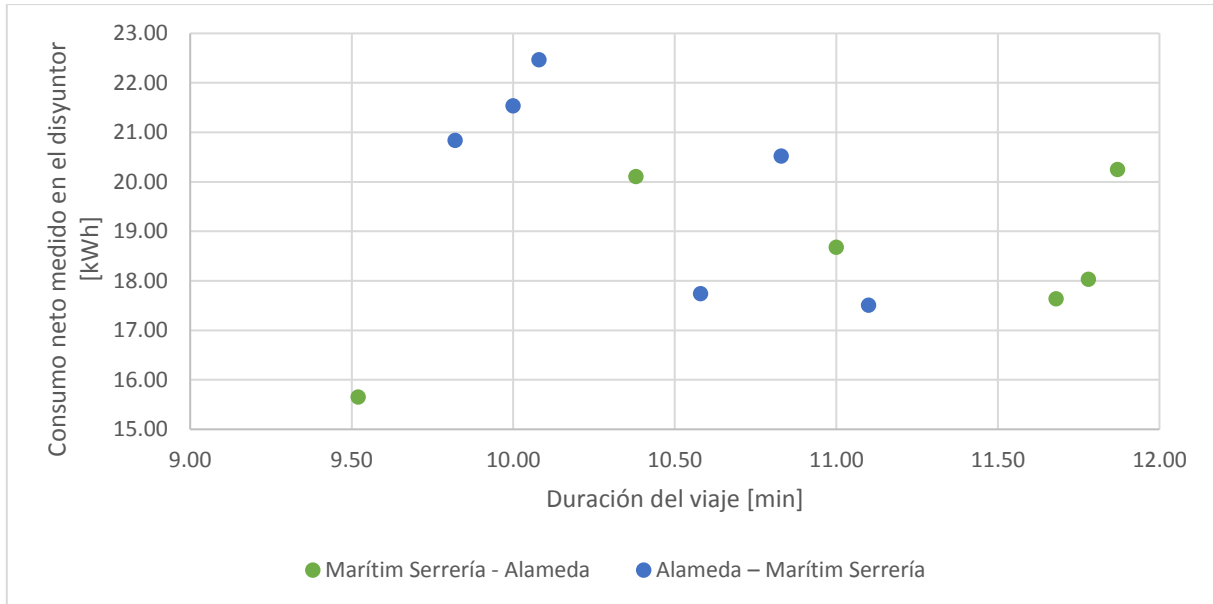


Fig. 21. Consumo de tracción neto medido en el disyuntor para los trayectos medidos.

No existe una clara correlación entre la energía de tracción y el tiempo de viaje (Fig. 21). Esto señala que las diferencias entre el tiempo total de viaje son principalmente debido a la variación del tiempo de parada en cada estación, mientras que el consumo energético depende de factores externos como el trazado geométrico de la vía, la temperatura, el grado de ocupación del vehículo, y el estilo de conducción de cada maquinista.

CAPÍTULO 7.

DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

7. DESARROLLO DEL MODELO DE OPTIMIZACIÓN DEL CONSUMO ENERGÉTICO

7.1. Metodología

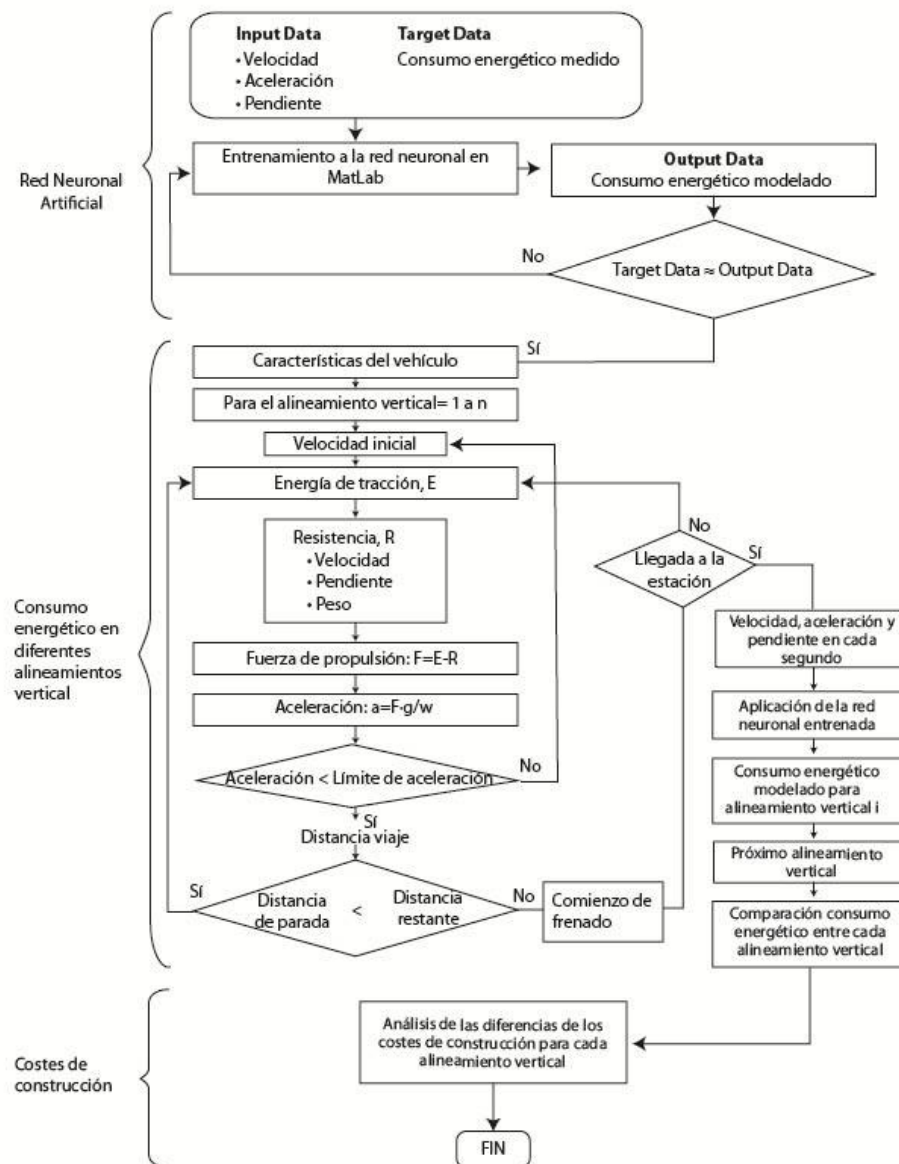


Fig. 22. Diagrama de flujo de la metodología para desarrollar el modelo.

La Fig. 22 presenta un diagrama de flujo de la metodología seguida para desarrollar el modelo de optimización del consumo energético mediante el desarrollo de un trazado vertical sinusoidal simétrico, utilizando redes neuronales artificiales.

A continuación, se detallan grosso modo los pasos descritos en el diagrama de flujo.

7.1.1. Entrenamiento de la red neuronal

La red neuronal utilizará los datos obtenidos en la campaña de medición: velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción, como *input*, y consumo energético medido como *target*. Posteriormente se desarrollará un algoritmo en Matlab para realizar el entrenamiento de la red. Una vez entrenada la red neuronal, esta podrá predecir un consumo energético simulado (*output*) con una alta exactitud de predicción comparada al consumo energético medido (*target*).

7.1.2. Desarrollo del trazado vertical sinusoidal

Posterior al entrenamiento de la red neuronal, se especificarán trazados verticales hipotéticos con su respectivo perfil de velocidad considerando las indicaciones óptimas para una conducción eficiente.

Determinados los trazados geométricos hipotéticos, se aplicará la red neuronal entrenada a estos para obtener el consumo energético (*output*) verificándolos en cada uno de los trazados, haciendo una comparación cuantitativa de ellos y obteniendo el trazado vertical con el menor consumo energético.

7.1.3. Inclusión del coste de inversión en la infraestructura de los trazados

Conociendo el consumo energético en cada uno de los trazados verticales hipotéticos, se analizarán las diferencias en el coste de inversión en la infraestructura que llevaría construir cada uno de ellos.

7.2. Modelo de consumo energético utilizando redes neuronales artificiales

7.2.1. Estructura de la red neuronal

En esta tesis se utilizará un modelo de redes neuronales artificiales con conexión hacia adelante (*feed-forward*) multicapa y con aprendizaje supervisado tipo *backpropagation*, para evaluar la influencia de cada variable sobre el consumo energético. Por lo tanto, la red, suministrada con una serie de datos de entrada a definir (por ejemplo, velocidad, aceleración, etc.) será capaz de proporcionar el consumo bruto de energía del tren.

7.2.2. Metodología para el entrenamiento de la red neuronal

El método de entrenamiento utilizado es de tipo *Back-Propagation*, lo que significa que la red se evalúa, los resultados obtenidos se comprueban con base en un determinado criterio, y los pesos sinápticos se modifican en un bucle iterativo [97]. El criterio empleado es la minimización del Error Cuadrático Medio (MSE) entre la salida de la Red y los datos-objetivo de referencia, lo cual se comprueba derivando el MSE respecto a los pesos sinápticos de la red. El algoritmo de entrenamiento específico empleado es el algoritmo de *Levenberg-Marquardt*.

Después de la fase de aprendizaje, se evalúa el comportamiento de la red ante patrones nunca vistos. Para lograr esto, los datos se dividieron al azar en tres grupos, datos de entrenamiento (70%), datos de validación (15%) y datos de test (15%).

7.2.3. Mediciones

Los datos obtenidos durante la campaña de monitoreo han sido procesados como se ha explicado anteriormente. Se identificaron las variables que proporcionaban información sobre el consumo energético medido en el disyuntor y se entrenaron redes neuronales con diferentes combinaciones de dichas variables para identificar qué composición dio los mejores resultados. Las variables estudiadas fueron velocidad [km/h], aceleración [m/s^2], pendiente [mm/m] y esfuerzo de tracción [N].

Los datos empleados para cada variable de entrada (*input*), y los valores objetivo (*target*) con el que se compararon los datos de salida de la red (*output*), se tomaron de los registros obtenidos durante la campaña de medición.

La velocidad fue medida usando un odómetro localizado en una de las ruedas del tren monitoreado, la aceleración es directamente derivada de la velocidad, la Fig. 23 muestra estas dos variables medidas durante el primer viaje.

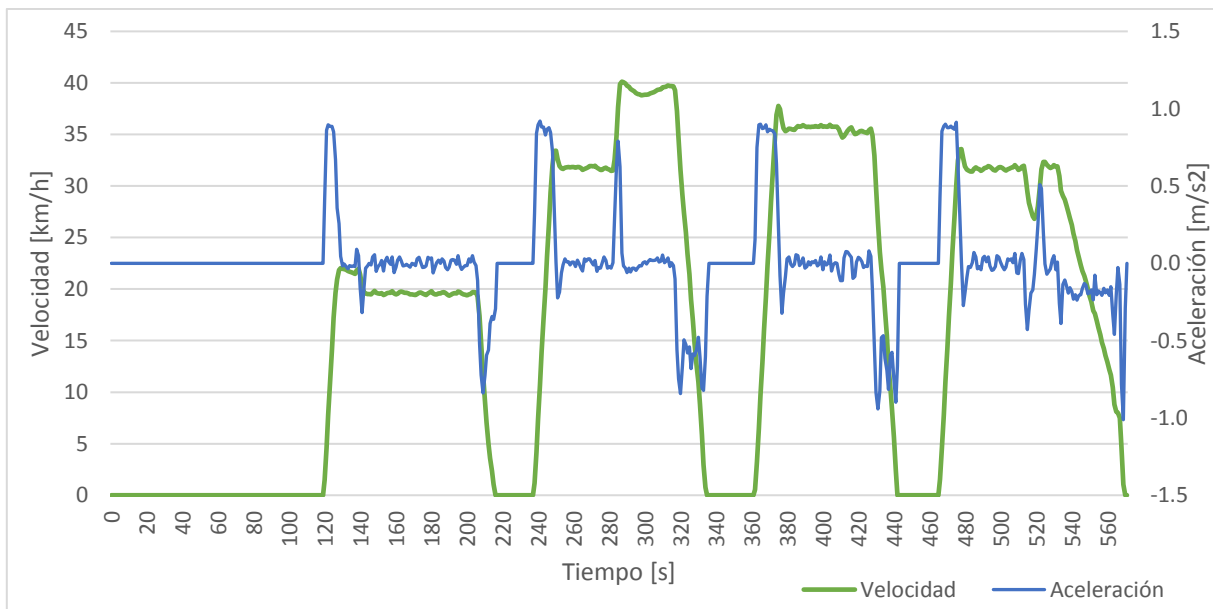


Fig. 23. Velocidad y aceleración del primer recorrido entre Marítim Serrería y Alameda.

El esfuerzo de tracción calculado para el primer viaje se presenta en la Fig. 24.

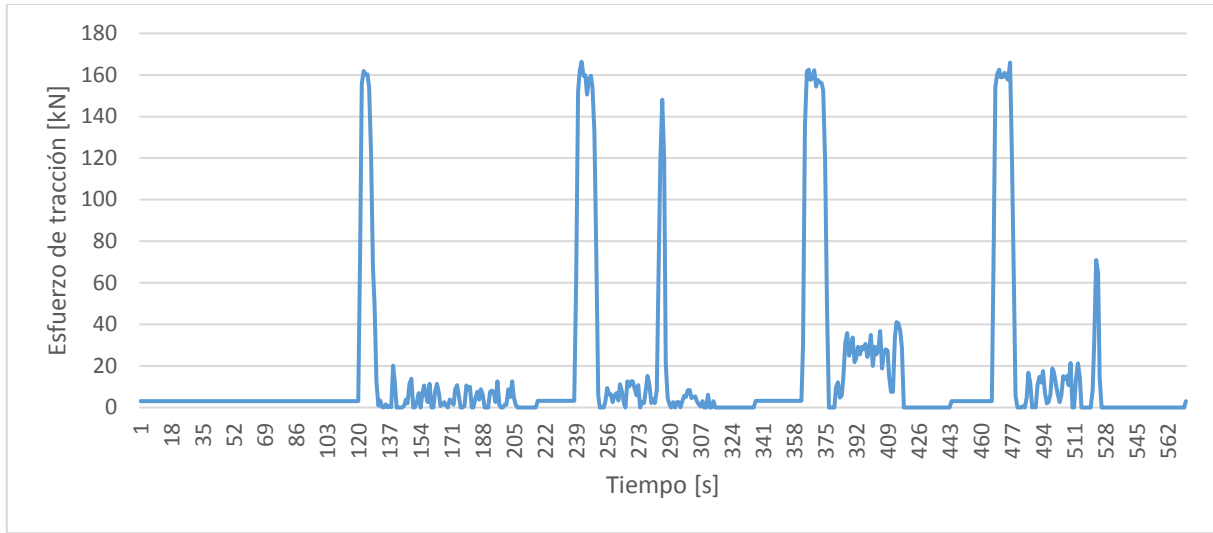


Fig. 24. Esfuerzo de tracción del primer recorrido entre Marítim Serrería y Alameda.

La Fig. 25 presenta la pendiente del trazado vertical del tramo considerado de la vía.

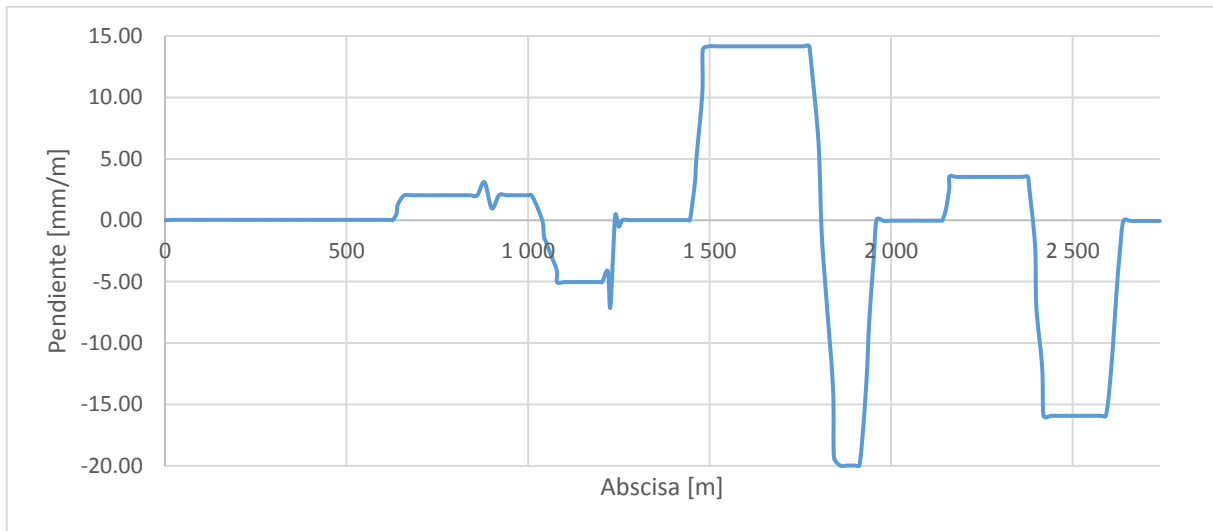
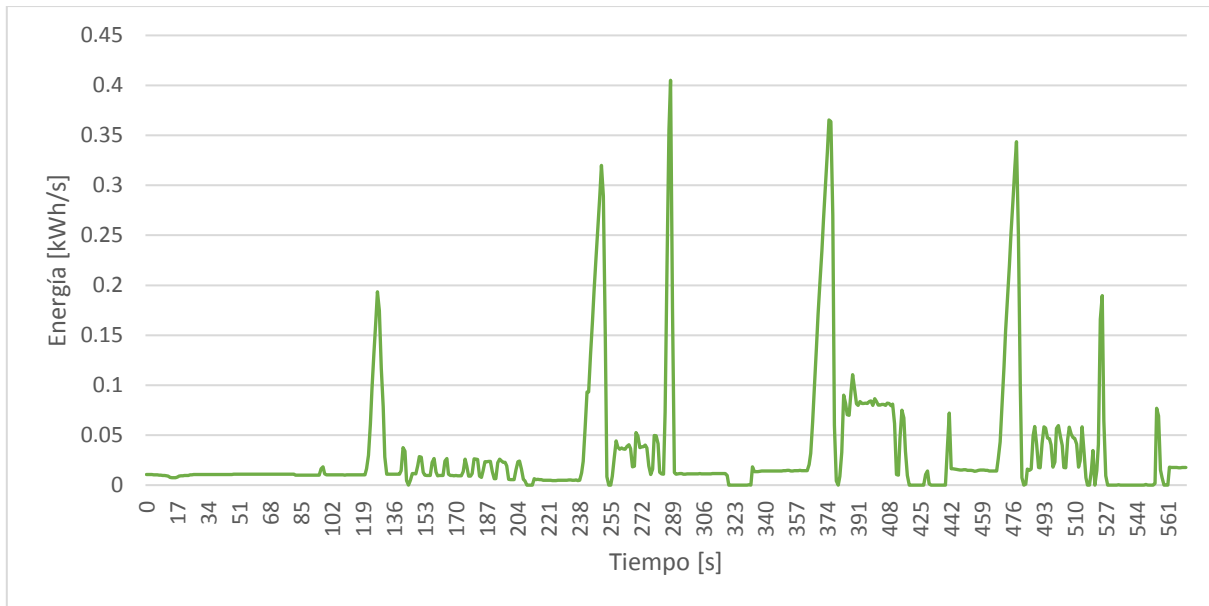
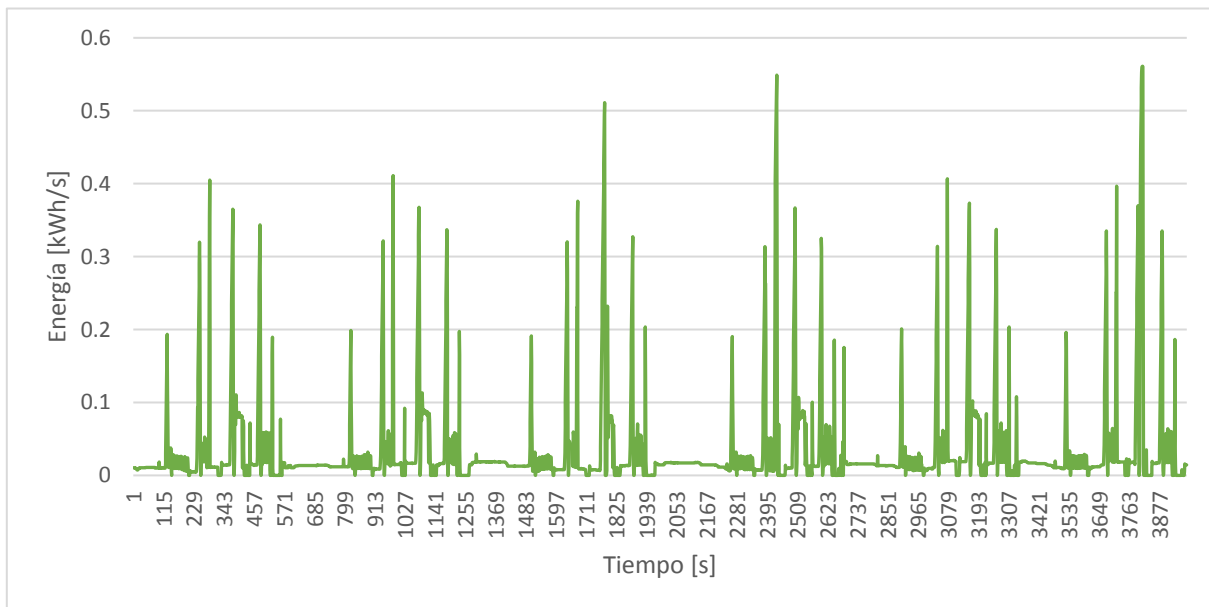


Fig. 25. Pendiente del trazado vertical, entre Marítim Serrería y Alameda.

Los dispositivos de medición arrojan el consumo energético medido en el disyuntor del tren cada segundo en cada viaje realizado como se muestra, a modo de ejemplo, en la Fig. 26. Estos datos representan el *target* de la red neuronal artificial.



(a)



(b)

Fig. 26. Consumo energético medido en el disyuntor del tren en: (a) el primer recorrido entre Marítim Serreria – Alameda, (b) los seis recorridos realizados con dirección Marítim Serreria – Alameda.

7.2.4. Entrenamiento de la red neuronal artificial

Con todos estos datos de entrada, diferentes combinaciones fueron definidas, y posteriores entrenamientos y evaluaciones de la red neuronal se realizaron hasta encontrar la combinación de variables de entrada que mejor se ajustaba a los datos de la energía bruta consumida. El proceso de creación, entrenamiento y validación de la red neuronal se ha llevado a cabo por medio de la herramienta *Neural Fitting Tool*, de MATLAB R2014a (The MathWorks, Inc.). Los algoritmos desarrollados en Matlab se presentan en ANEXOS.

Fueron realizadas diferentes pruebas con combinaciones de las cuatro variables de entrada definidas anteriormente (velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción), para así identificar cuáles de ellas proporcionaban un mejor ajuste a los datos de consumo energético. Además, para obtener un mejor entrenamiento de la red neuronal, se alimentó la red con muestras de circulación del tren en deriva de otros tramos de MetroValencia donde circulaba el mismo tren, utilizando un simulador dinámico de la marcha del tren.

La Tabla 12 muestra algunos de los resultados obtenidos para varias combinaciones estudiadas bajo cada uno de los criterios definidos previamente (coeficiente R y rMSE) utilizando doce recorridos (ida y vuelta), el treceavo recorrido se reservó para una validación final. El entrenamiento previo se realizó utilizando 20 neuronas en la capa oculta.

Tabla 12. Resultados del entrenamiento de la red con diferentes variables.

		20 NEURONAS					
Modelo	Variables Input	Entrenamiento		Validación		Test	
		R	rMSE	R	rMSE	R	rMSE
1	Velocidad	0.49	0.64	0.45	0.65	0.43	0.70
2	Pendiente	0.27	0.79	0.26	0.81	0.28	0.72
3	Velocidad	0.86	0.21	0.87	0.20	0.84	0.25
	Aceleración						

		20 NEURONAS					
Modelo	Variables Input	Entrenamiento		Validación		Test	
		R	rMSE	R	rMSE	R	rMSE
4	Velocidad	0.63	0.52	0.60	0.50	0.55	0.58
	Pendiente						
5	Velocidad	0.90	0.17	0.90	0.18	0.90	0.17
	Aceleración						
	Pendiente						
6	Velocidad	0.92	0.17	0.91	0.18	0.90	0.16
	Aceleración						
	Pendiente						
	Esfuerzo de tracción						

La Tabla 12 muestra que, si la velocidad es la única variable de entrada, los resultados son claramente negativos, con un rMSE superior al 60%. Sin embargo, si las variables velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción son usadas, la red neuronal satisface todos los criterios, con un rMSE menor al 20% y el coeficiente R mayor al 90%. Por lo tanto, las variables de entrada elegidas para el análisis son velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción, porque tienen un impacto importante en el consumo energético.

Definidas las variables de entrada, el tamaño de la red fue determinado estudiando los valores de rMSE de entrenamiento y validación, variando el número de neuronas en la capa oculta. La Fig. 27 muestra los resultados, donde cada valor es el promedio de 20 simulaciones.

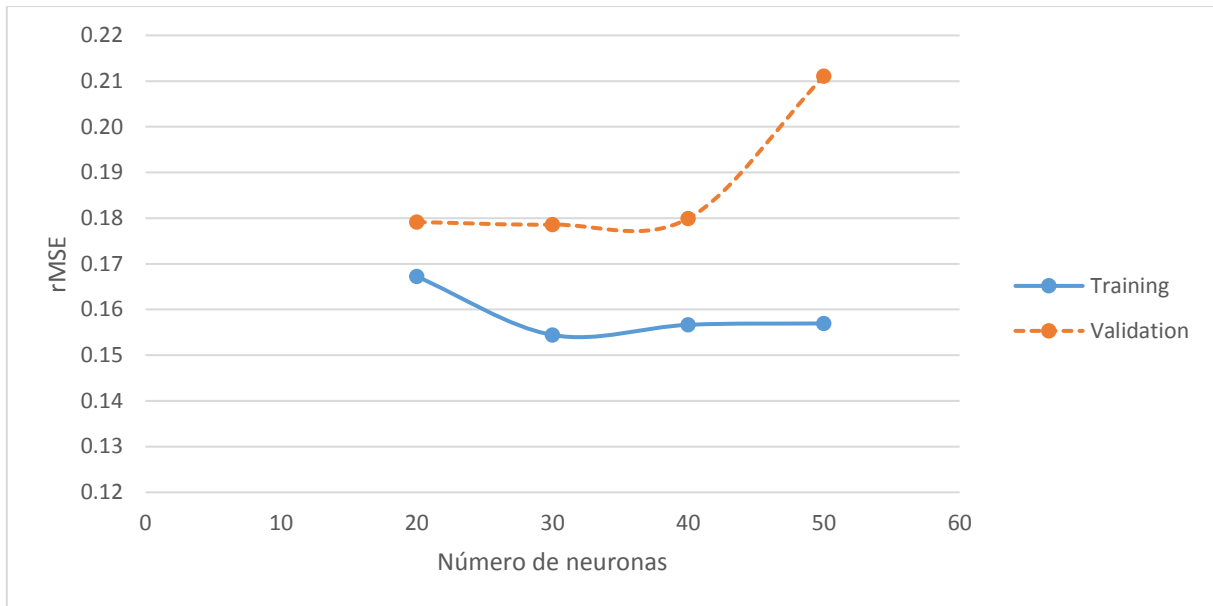


Fig. 27. Valor del rMSE según el número de neuronas en la capa oculta.

La Fig. 27 muestra que mientras se incrementa el número de neuronas en la capa oculta se reduce el rMSE durante el entrenamiento. Lo mismo se observa en la validación, hasta alcanzar un tamaño de 30 neuronas. A partir de ese punto, tanto para la validación como para el entrenamiento, el rMSE tiende a aumentar de nuevo, lo que indica que la red está experimentando *overfitting* o sobreaprendizaje. De esto se puede concluir que el tamaño óptimo de la red es de 30 neuronas en la capa oculta.

La estructura de la red neuronal utilizada en Matlab, con el número de variables, número de capas y neuronas usadas, se muestra en la Fig. 28.

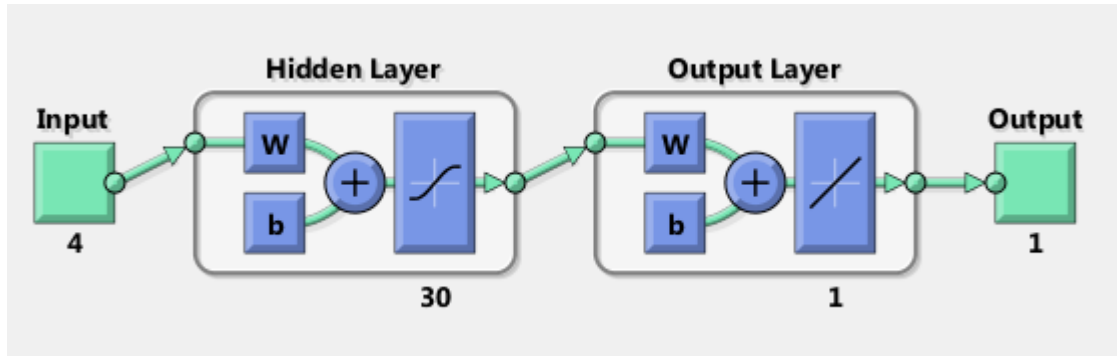


Fig. 28. Estructura de red neuronal utilizada en Matlab.

7.2.5. Resultados del entrenamiento de la red neuronal

Una vez entrenada la red neuronal, se realiza una simulación de la red para comprobar el funcionamiento de la misma, aportando datos de entrada (*Input*) y obteniendo datos de salida (*Output*).

7.2.5.1. Validación cruzada

El proceso conocido como “Validación cruzada” permite representar gráficamente el ajuste de la red neuronal, donde se comparan los datos de salida (*Target*) empleados en el entrenamiento, con los datos simulados por la red neuronal (*Output*). Si el ajuste fuera perfecto, la representación de ambos valores se situaría en una recta $y=x$. La Fig. 29 presenta la validación cruzada para los datos de entrenamiento, validación, test y todos los datos juntos. De esta gráfica se observa que la red ajusta razonablemente bien para los datos de entrenamiento, validación, test, y todos los datos juntos.

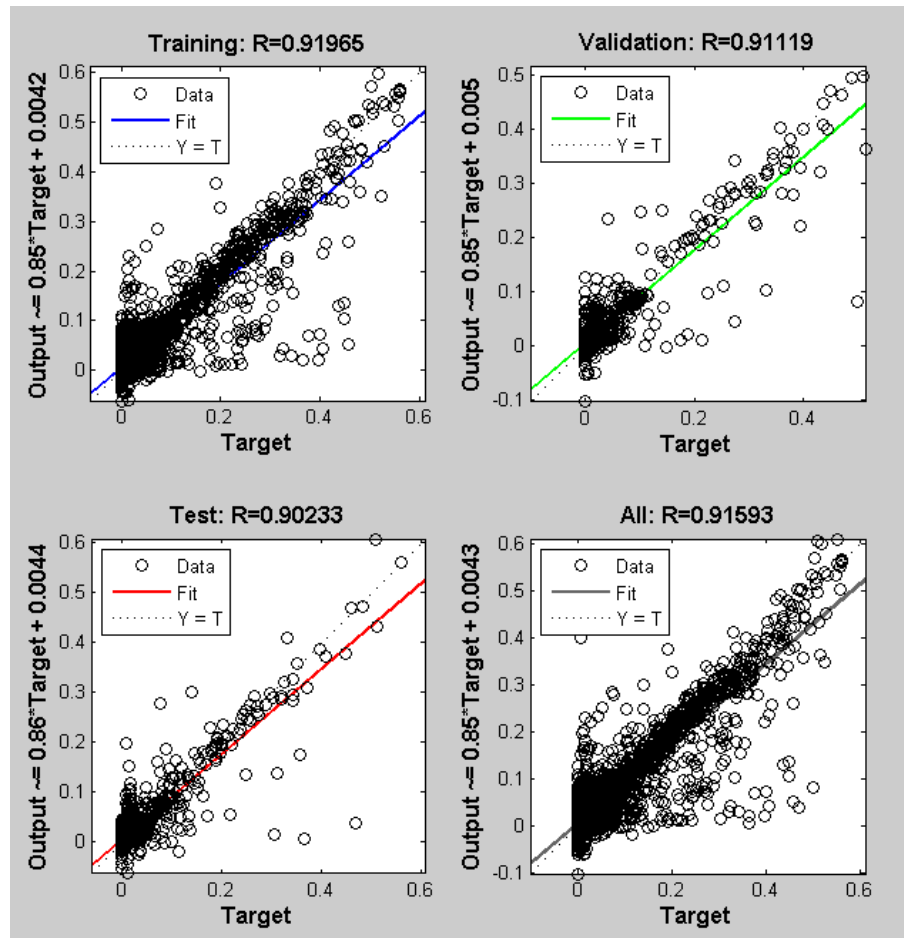
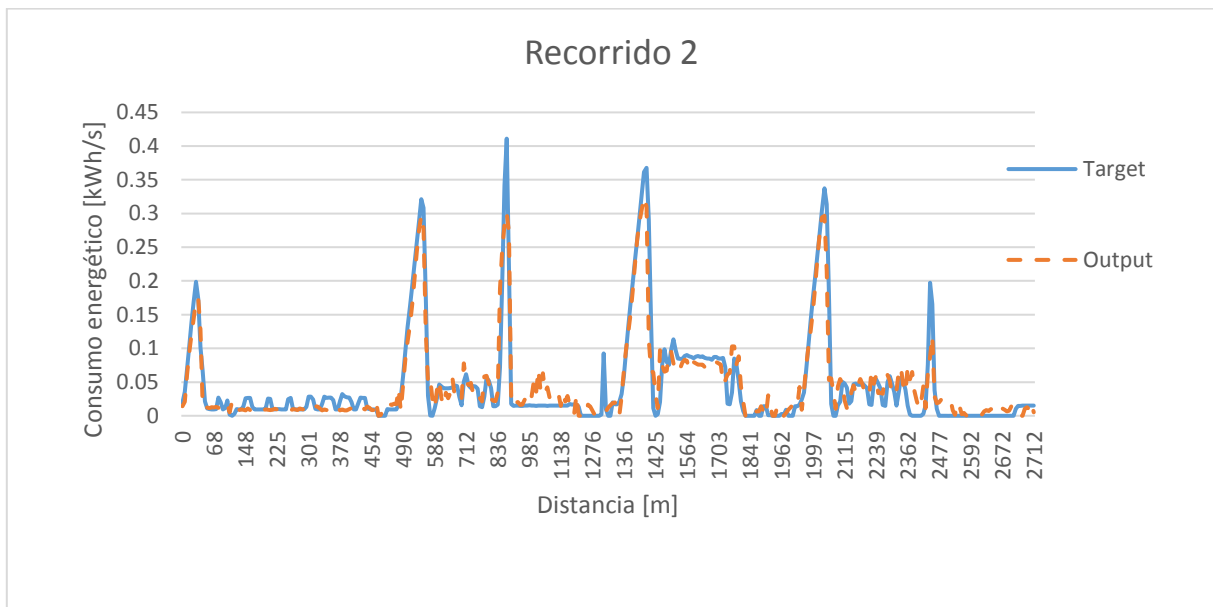
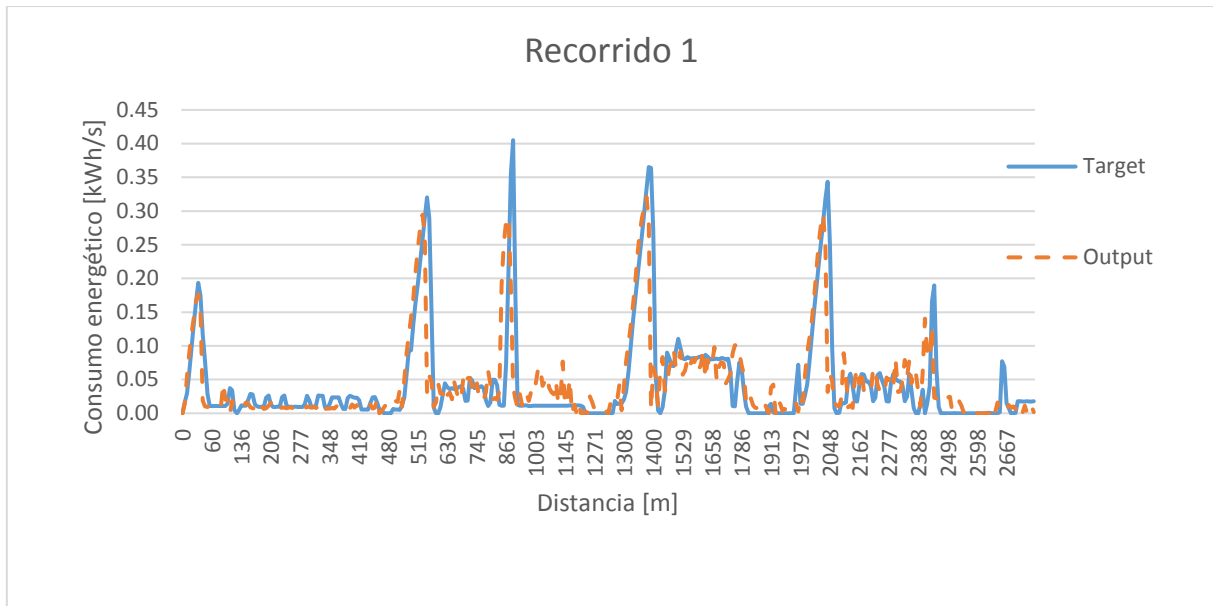
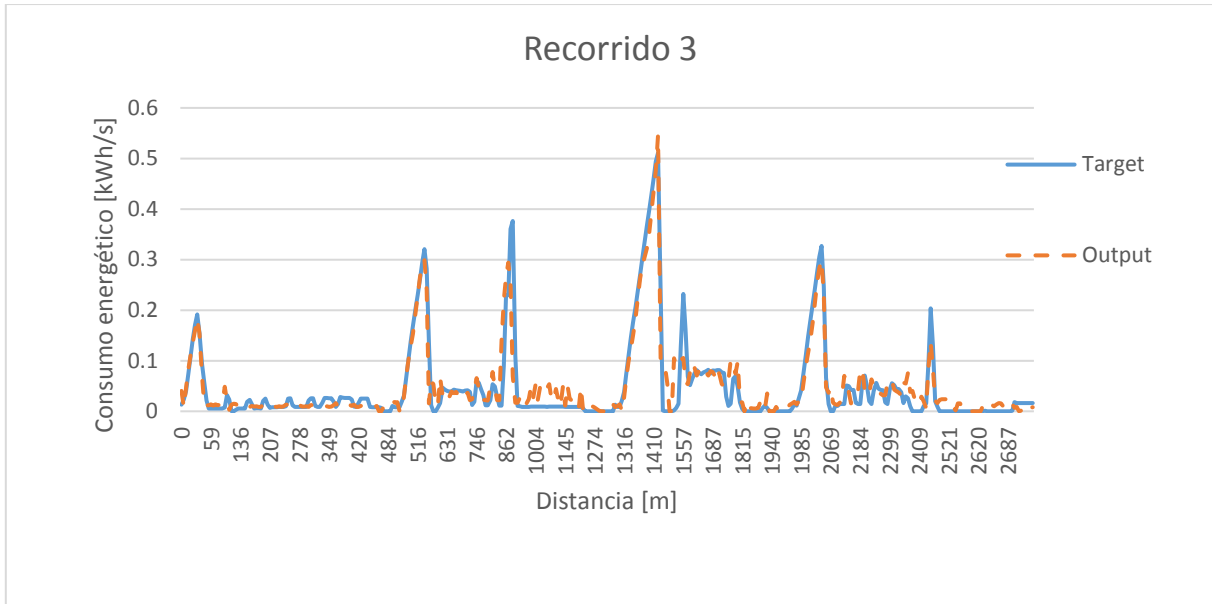


Fig. 29. Validación cruzada para los datos de entrenamiento, validación, test y todos los datos juntos

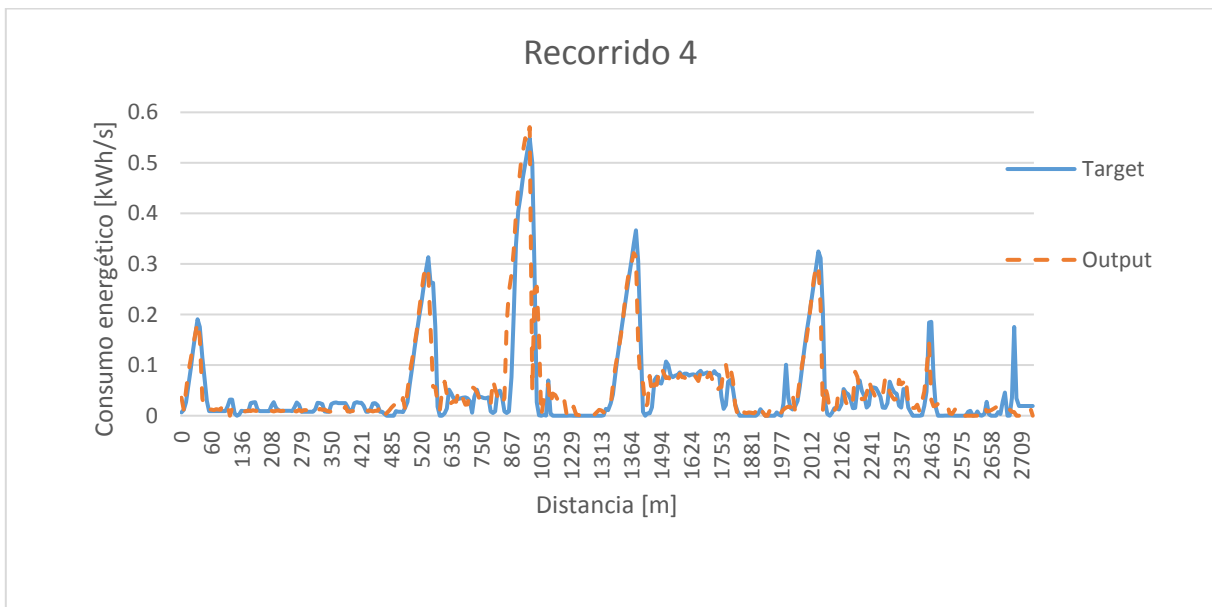
7.2.5.2. Validación de los resultados del consumo energético

La Fig. 30 muestra la comparación entre el consumo energético medido (*Target*) y el consumo energético estimado por la red (*Output*) para los doce viajes realizados entre Marítim-Serrería y Alameda que fueron utilizados para entrenar la red neuronal.

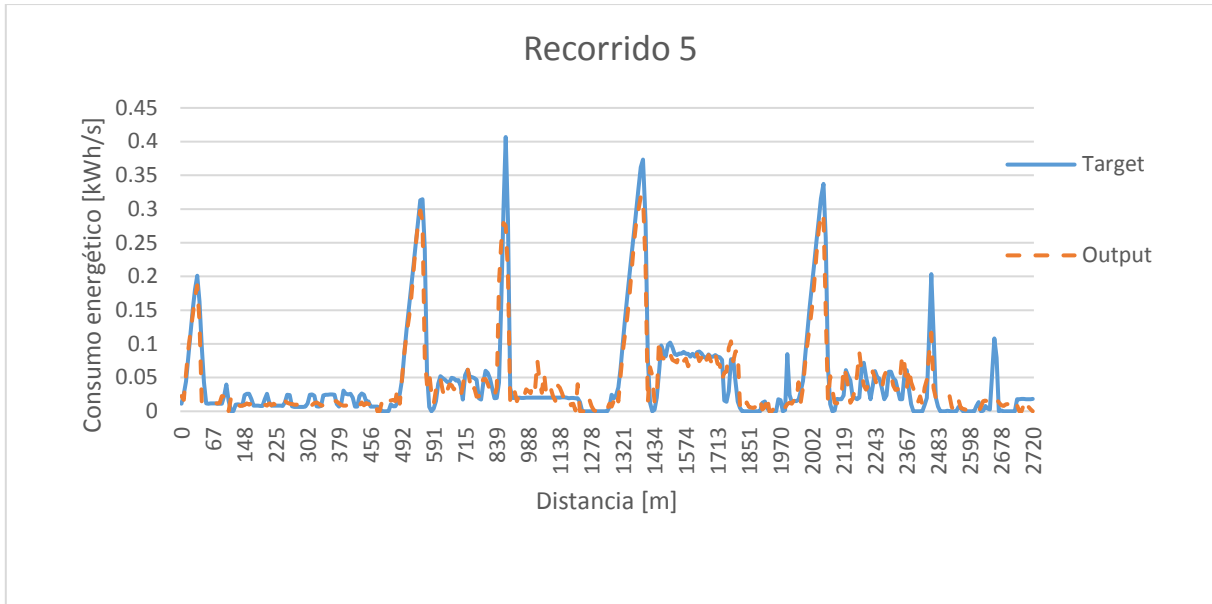




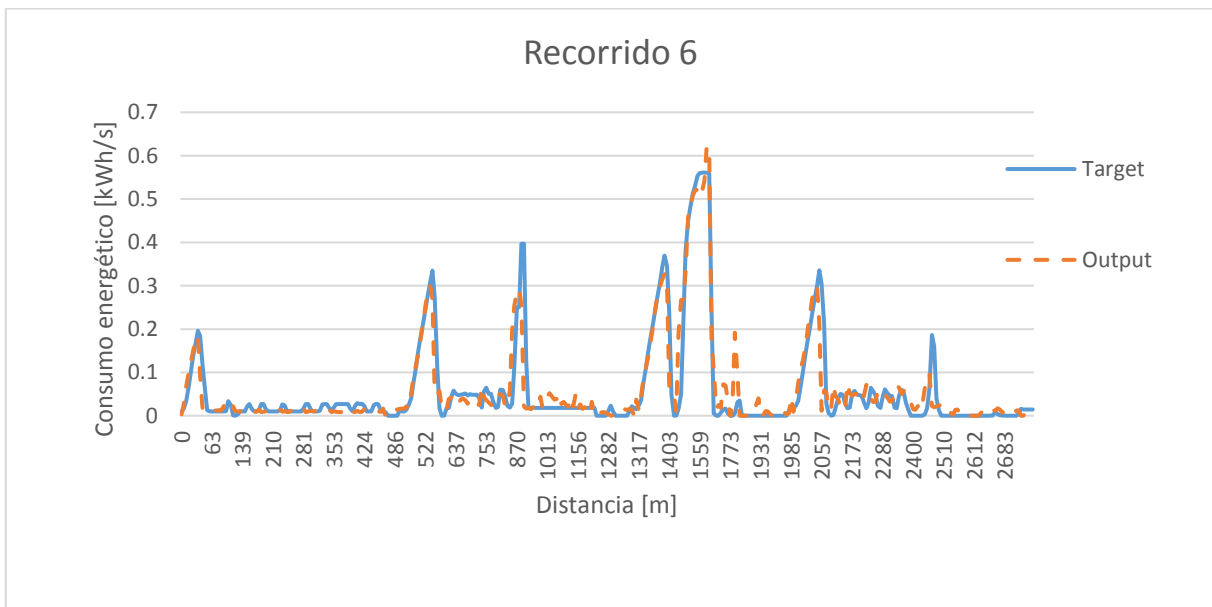
(c)



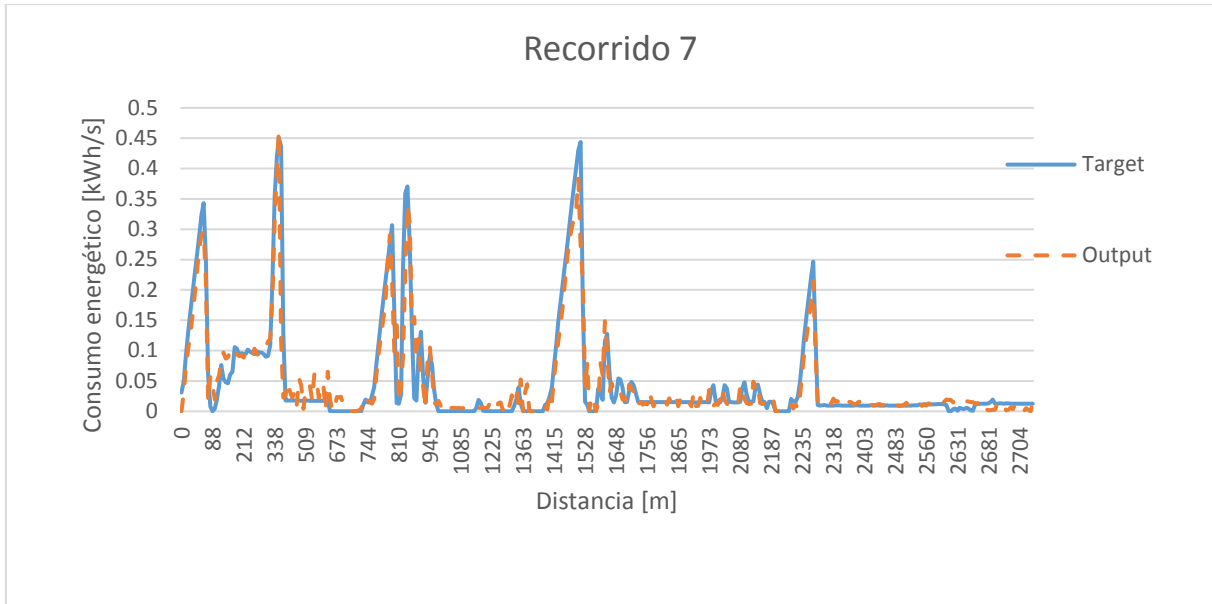
(d)



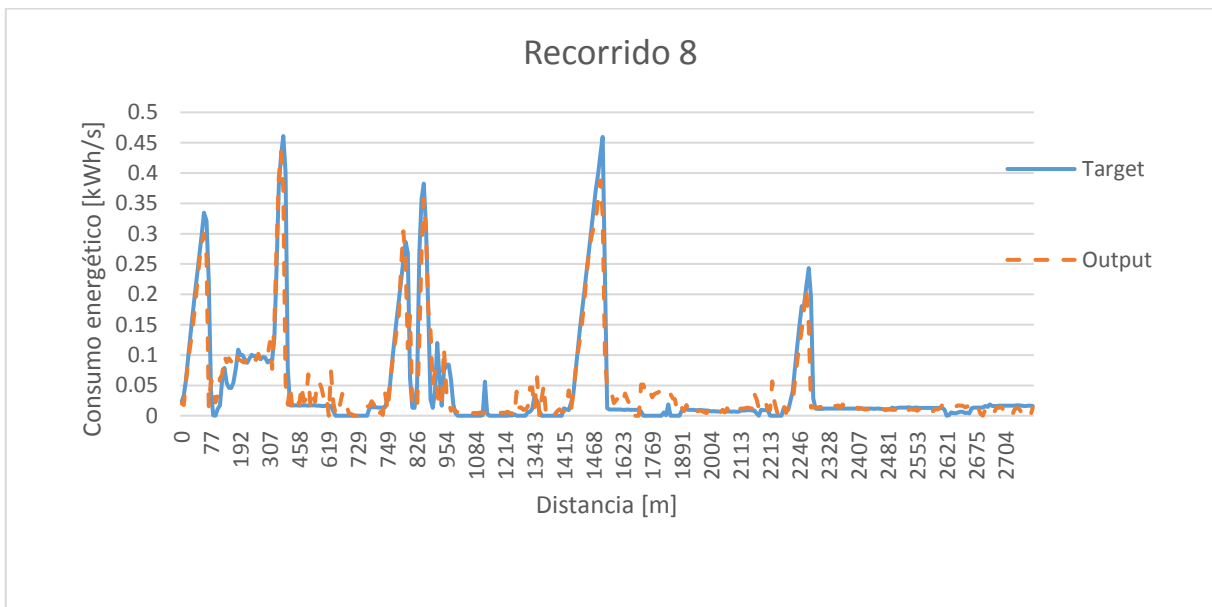
(e)



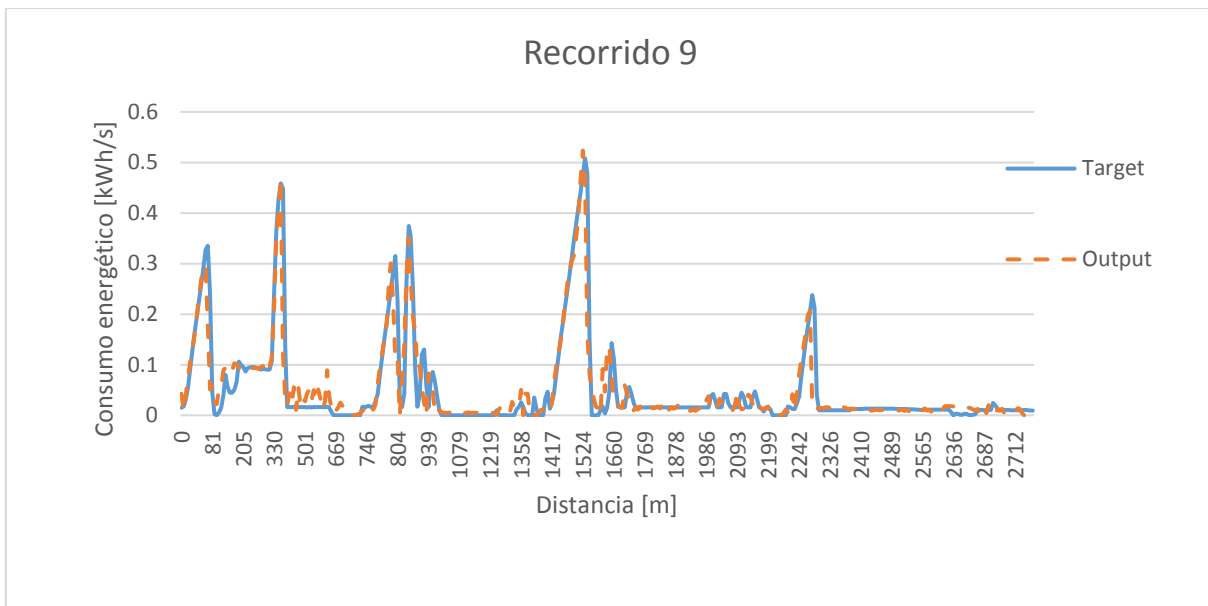
(f)



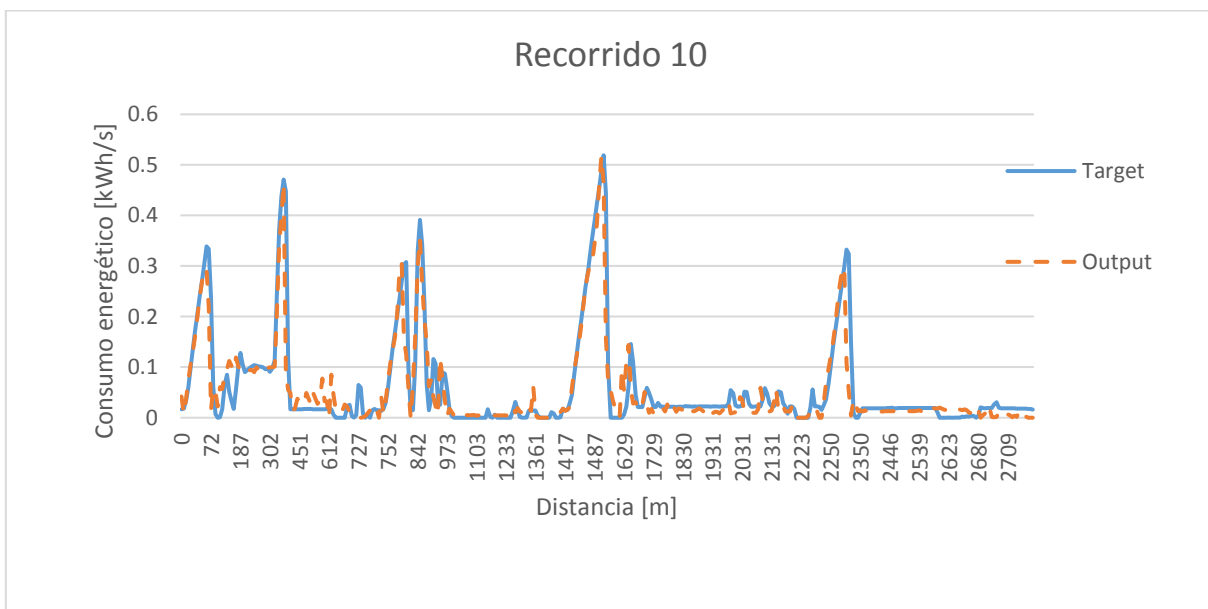
(g)



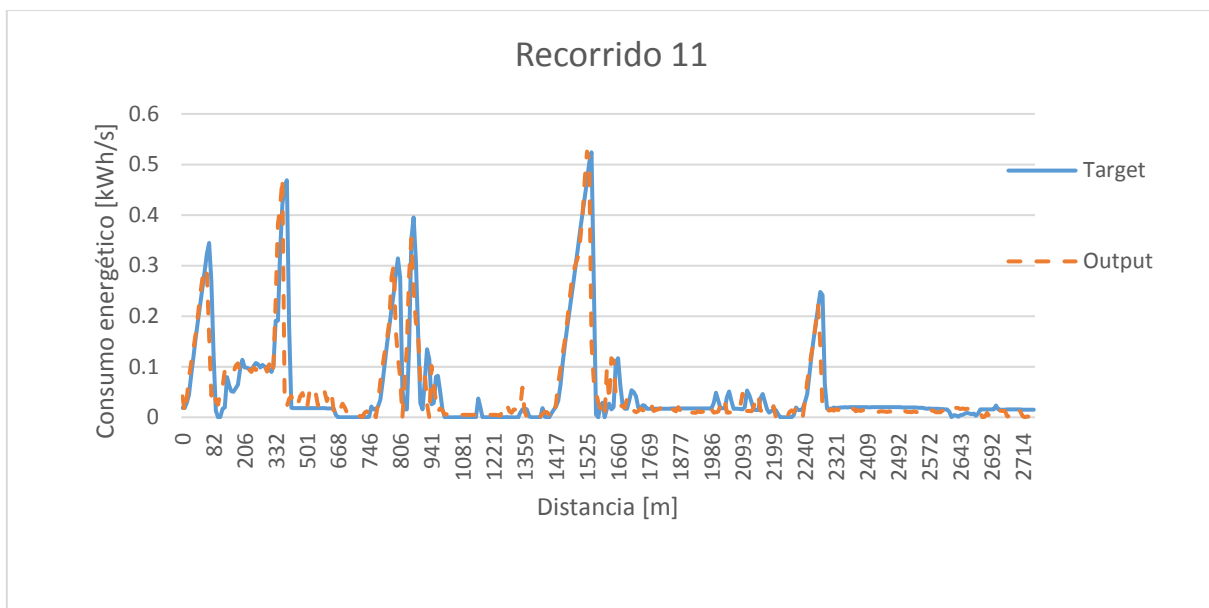
(h)



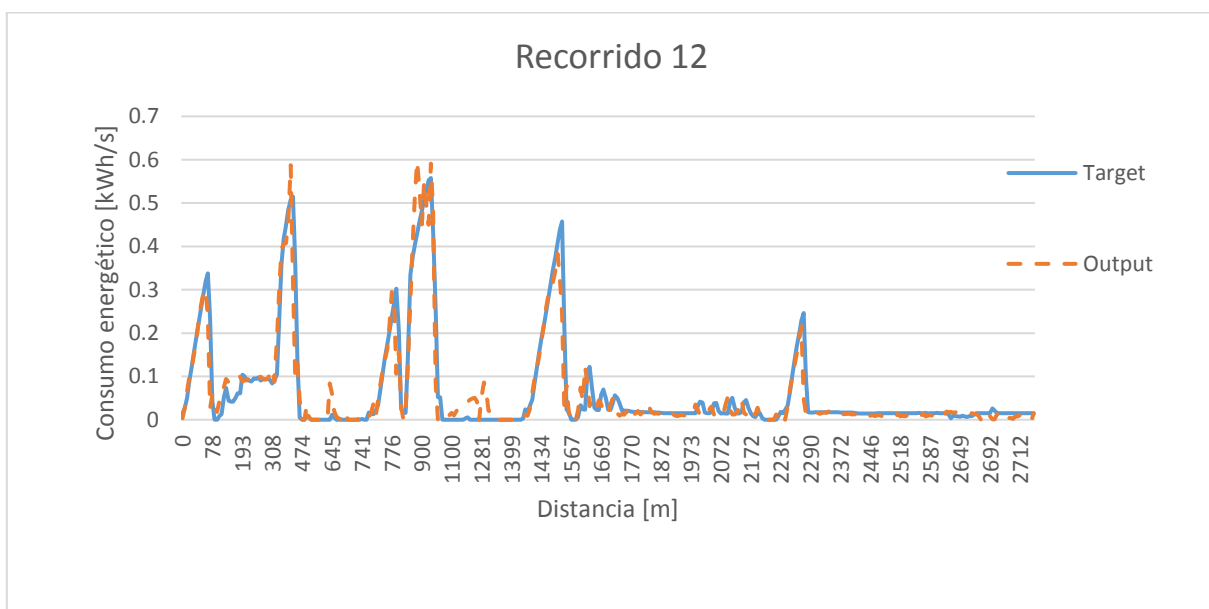
(i)



(j)



(k)



(l)

Fig. 30. Comparación entre el consumo energético medido y el estimado por la red neuronal en los doce recorridos entre Marítim-Serrería y Alameda.

De (a) a (f) son recorridos en sentido Alameda (ida), y de (g) a (l) son recorridos en sentido Marítim-Serrería (vuelta)

La Fig. 30 muestra que la red ajusta razonablemente bien la energía bruta medida en el disyuntor para los doce recorridos utilizados para entrenar la red neuronal, reproduciendo los picos debidos a una mayor tracción y los valles en los que el motor funciona al ralentí. Sin embargo, la red omite pequeñas oscilaciones en el consumo.

En todo caso, la red así entrenada, con un tamaño de 30 neuronas y cuatro variables de entrada (velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción), proporciona una buena estimación del consumo energético del tren, siempre dentro de los rangos considerados para cada variable, por lo que la red podría ser usada como una herramienta para probar alternativas en trazados verticales, operación en el tren y estilos de conducción, buscando reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia.

Cuando se analiza el consumo global por trayecto (Fig. 31), la medición arroja un consumo energético promedio de 7.29 kWh/km, mientras que la red estima un consumo energético promedio de 7.11 kWh/km, un error de apenas 0.176 kWh/km (2.42%).

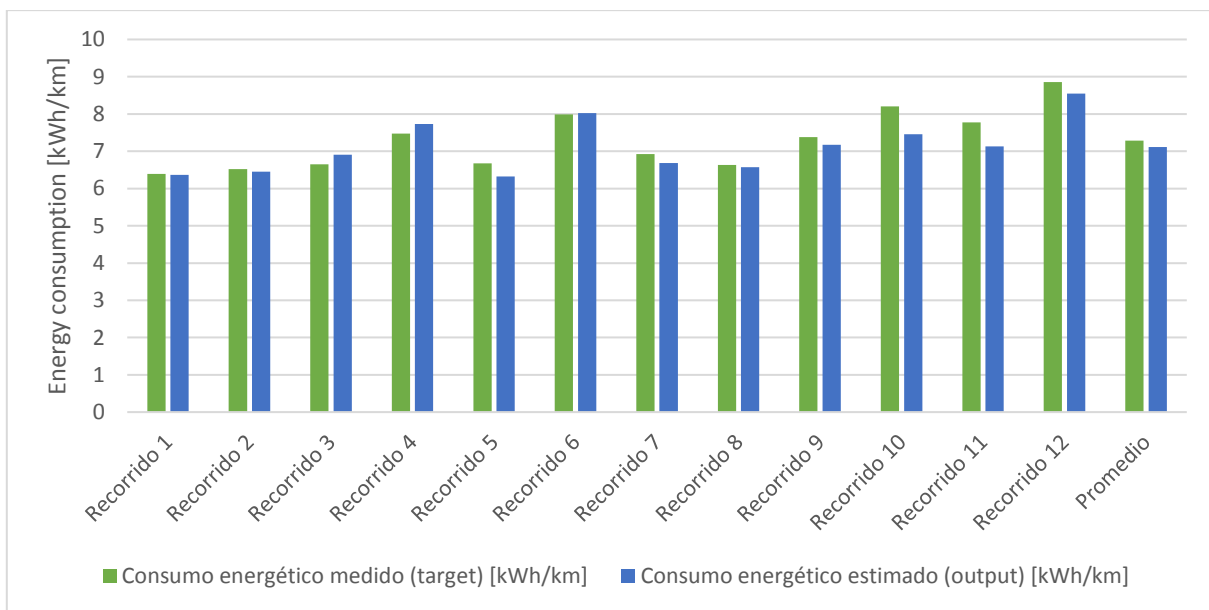


Fig. 31. Consumo global por viaje.

Posteriormente, la red neuronal fue probada en el recorrido trece para validar los resultados. La Fig. 32 presenta la comparación entre el consumo energético medido (*Target*) y el consumo energético estimado por la red (*Output*) para el treceavo viaje realizado entre Alameda y Marítim-Serrería que fue utilizado para validar la red neuronal entrenada.

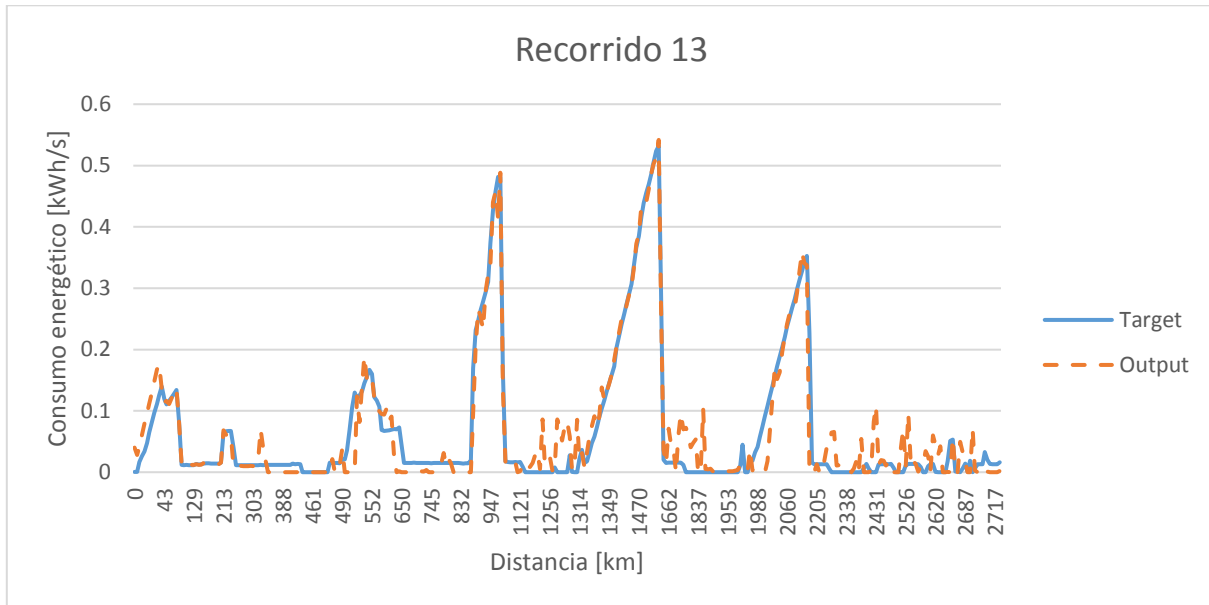


Fig. 32. Comparación entre el consumo energético medido y el estimado por la red neuronal entrenada en la validación de esta con el recorrido 13 entre Alameda y Marítim-Serrería.

Cuando se analiza el consumo global para el treceavo recorrido (Fig. 32), la medición arroja un consumo energético de 8.54 kWh/km, mientras que la red estima un consumo energético de 8.84 kWh/km, un error de 0.30 kWh/km (3.53%). Por lo tanto, se infiere que la red neuronal entrenada está correctamente validada.

7.3. Trazado geométrico sinusoidal

Para esta tesis se considerarán tres casos hipotéticos de trazados verticales entre dos estaciones con el fin de comparar la influencia del trazado vertical en el consumo energético del tren. Para lograr este objetivo, es necesario suponer unas características

generales iguales en los tres trazados propuestos (trazado horizontal recto, señalización, electrificación, tipo de suelo).

7.3.1. Características generales de los trazados

En los tres trazados propuestos, la línea ferroviaria entre un par de estaciones será subterránea, con vía en placa de doble vía y una longitud de 1 000 m (Fig. 33). En todos los casos la totalidad del trazado será subterráneo, incluidas las estaciones:

- El primer trazado consiste en un trazado completamente plano.
- El segundo consiste en un trazado sinusoidal con una profundidad máxima del 0.5% de la longitud entre estaciones ($\delta = 0.5\% = 5 \text{ m}$).
- El tercer caso consiste en un trazado sinusoidal con una profundidad máxima del 1.0% de la longitud entre estaciones ($\delta = 1.0\% = 10 \text{ m}$).

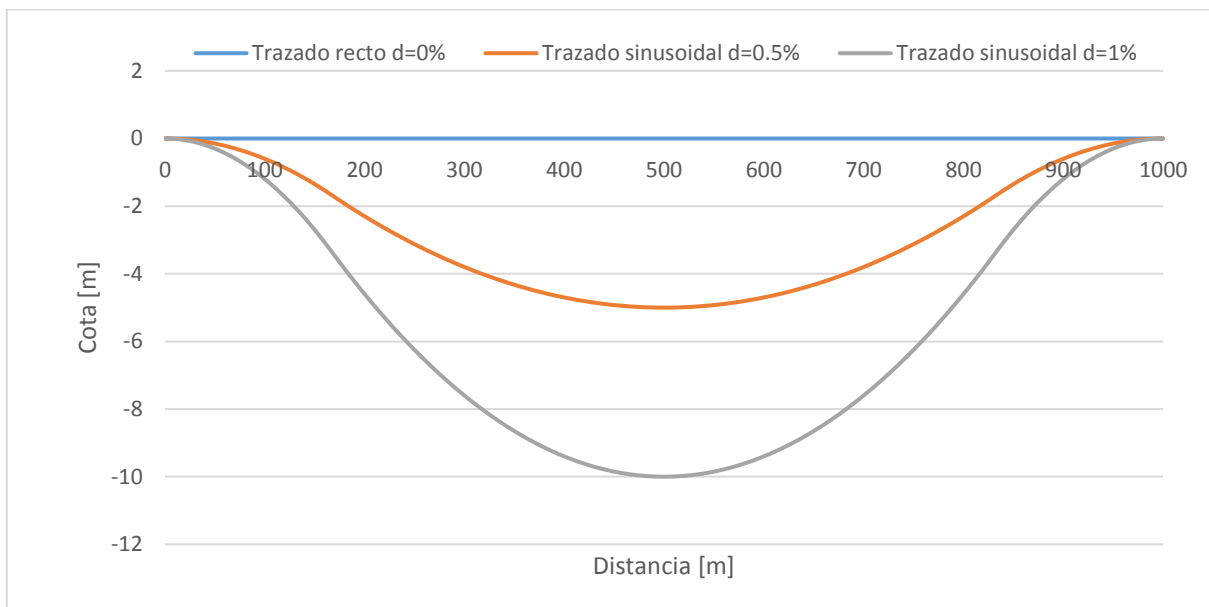


Fig. 33. Alternativas de trazado vertical entre un par de estaciones.

Para este tipo de vía por donde se transportarán pasajeros a velocidades menores de 100 km/h, se utilizará un sistema de vía en placa con traviesas. El carril será de 54 kg/m que permite la transmisión de una mayor carga por parte del vehículo

ferroviario y un menor mantenimiento que los carriles de 45 kg/m, uniendo barras de 288 m de longitud soldadas en taller, y una vez puesta en obra se realizarán sus uniones mediante soldadura aluminotérmica [82]. Se utilizará el ancho de vía estándar, de 1 435 mm.

7.3.2. Perfil de velocidad

Para aplicar la red neuronal entrenada y evaluar la influencia del trazado vertical sinusoidal de la vía en el consumo energético, se debe definir un perfil de velocidad para cada trazado. Cabe destacar que el perfil de velocidad en los tres casos cumple las bases teóricas de la conducción económica descritos en el capítulo 3, donde se acelera inicialmente hasta obtener una velocidad de crucero, luego el tren circula en deriva sin aplicar fuerza de tracción hasta el momento en el que comienza a aplicarse el frenado, para alcanzar la estación final (Fig. 34).

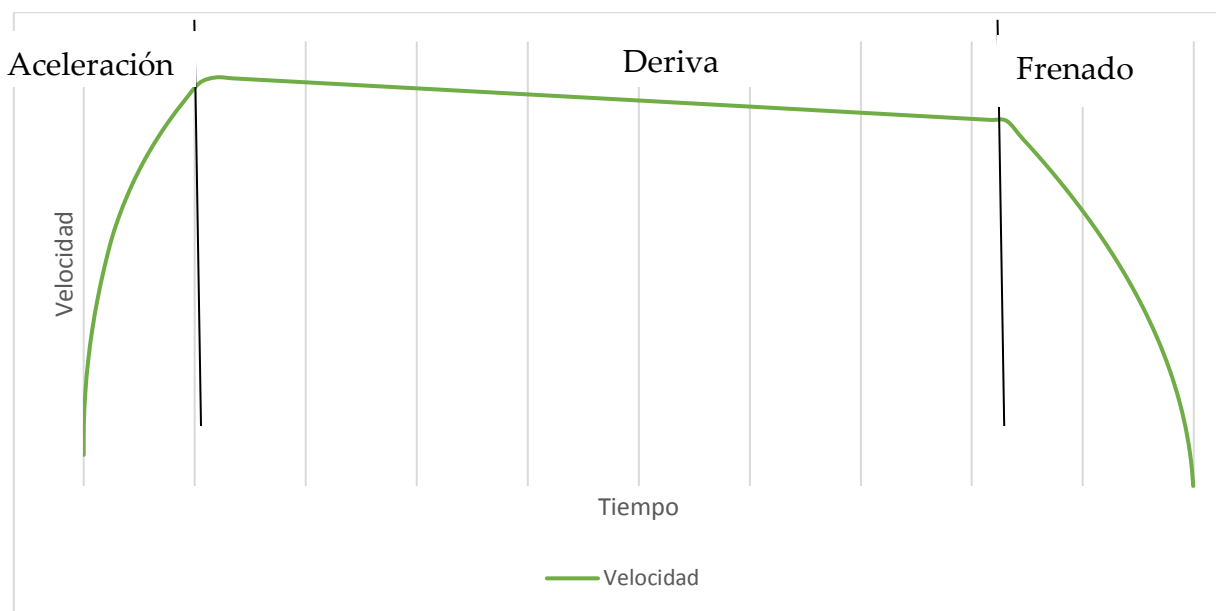


Fig. 34. Perfil de velocidad con deriva.

Para calcular el perfil de velocidad para cada uno de los tres casos, se debe considerar las características del tren Metrovalencia serie 4300 de 4 coches de Vossloh [98] [94]:

- Masa de la unidad = 163.9 t.
- Masa total = Masa de la unidad + Masas rotativas = 177.012 t.
- Velocidad máxima = 80 km/h a 1 250 V dc.
- Potencia = 1 480 kW.
- Aceleración máxima = 1.1 m/s².
- Deceleración máxima = -1.2m/s².
- Carga = 6 personas/m².
- Motor = 4ELA2534.
- Diámetro rueda = 810 mm.

La resistencia al avance se presenta en la ecuación (7.1):

$$R_{av} = 6.4 * M + 130 * n + 0.14 * M * V + (0.046 + 0.0065(N - 1)) * A * V^2 \quad (7.1)$$

Con:

- M = masa en toneladas = 163.9 t.
- n = número de ejes = 16.
- N = número de coches = 4.
- A = superficie frontal = 8.66 m².
- V = velocidad en km/h.

La Fig. 35 presenta las curvas del Esfuerzo de tracción (F [N]), de la aceleración [m/s²] y de la resistencia al avance para un trazado plano (Rav 0% [N]), con respecto a la velocidad del tren.

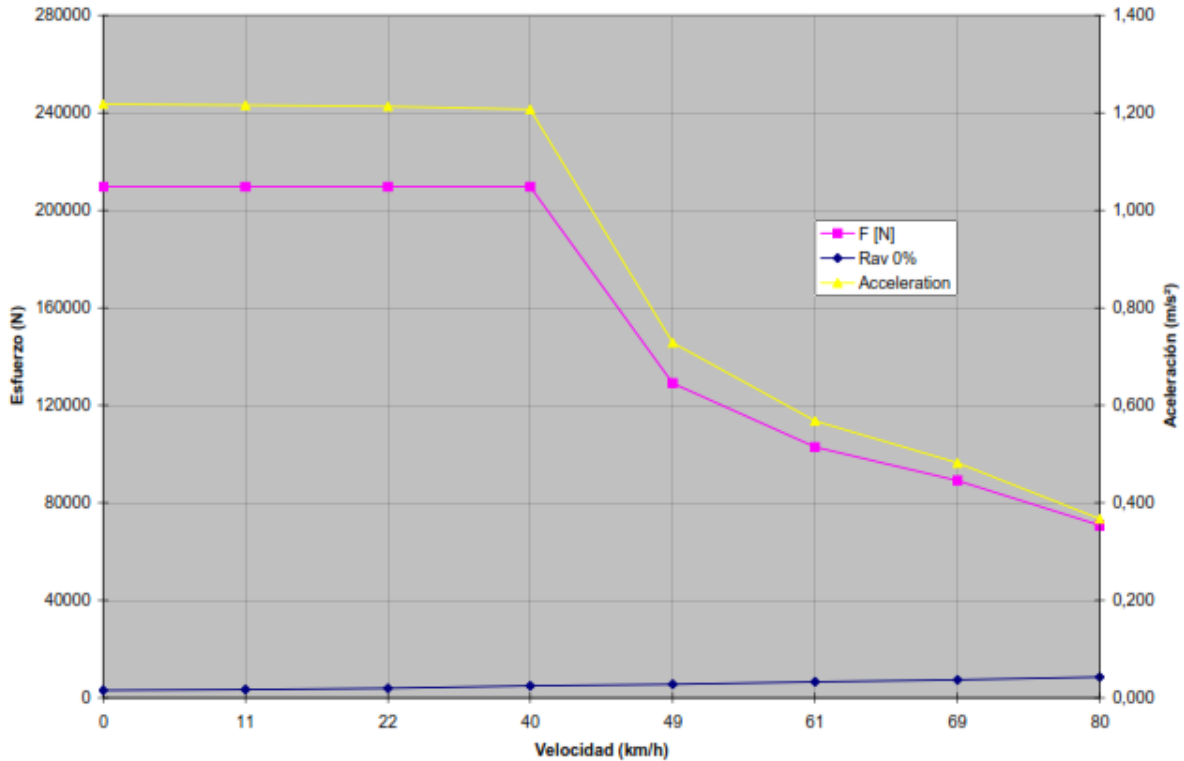


Fig. 35. Curvas de características del tren Metrovalencia serie 4300 de Vossloh de 4 coches.
 Fuente: [94].

Con base en esta información, y sin tener en cuenta la resistencia por curvatura a efectos del interés de esta investigación, se obtienen los perfiles de velocidad de la Fig. 36 para el trazado plano, de la Fig. 37 para el trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta = 0.5\%$, y de la Fig. 38 para el trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta = 1.0\%$.

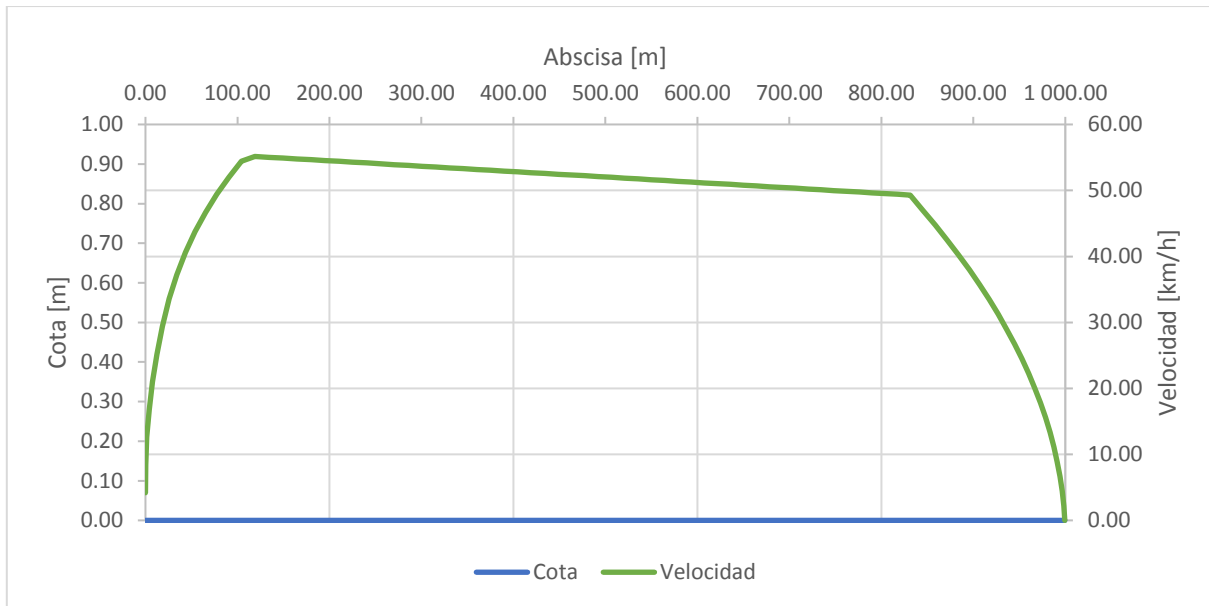


Fig. 36. Perfil de velocidad del trazado vertical plano.

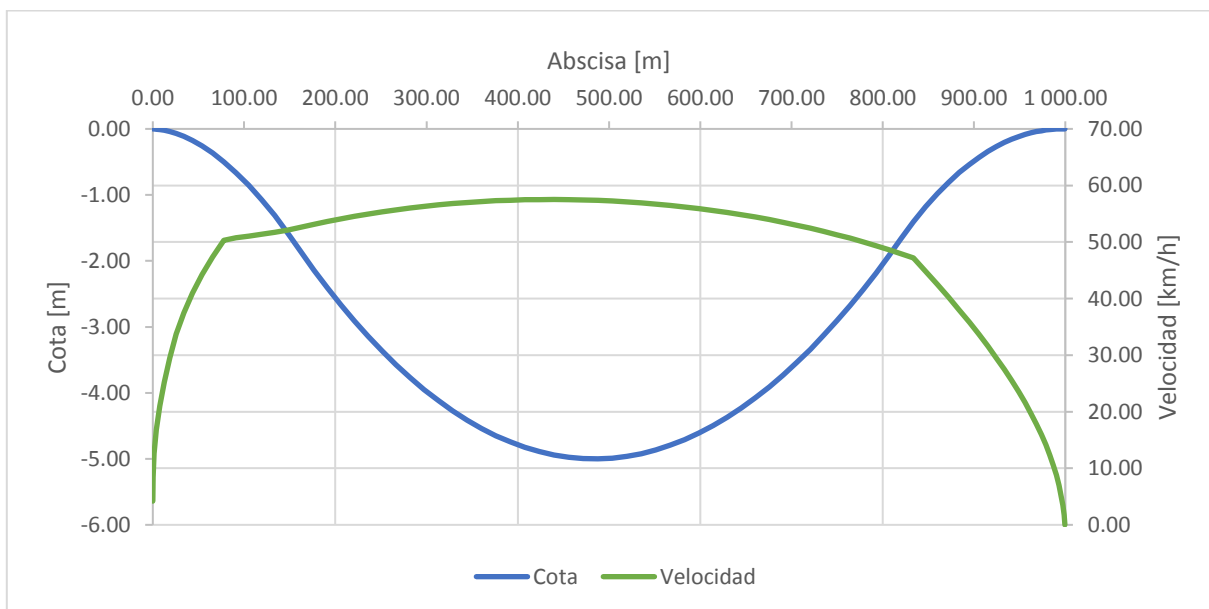


Fig. 37. Perfil de velocidad del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta=0.5\%$.

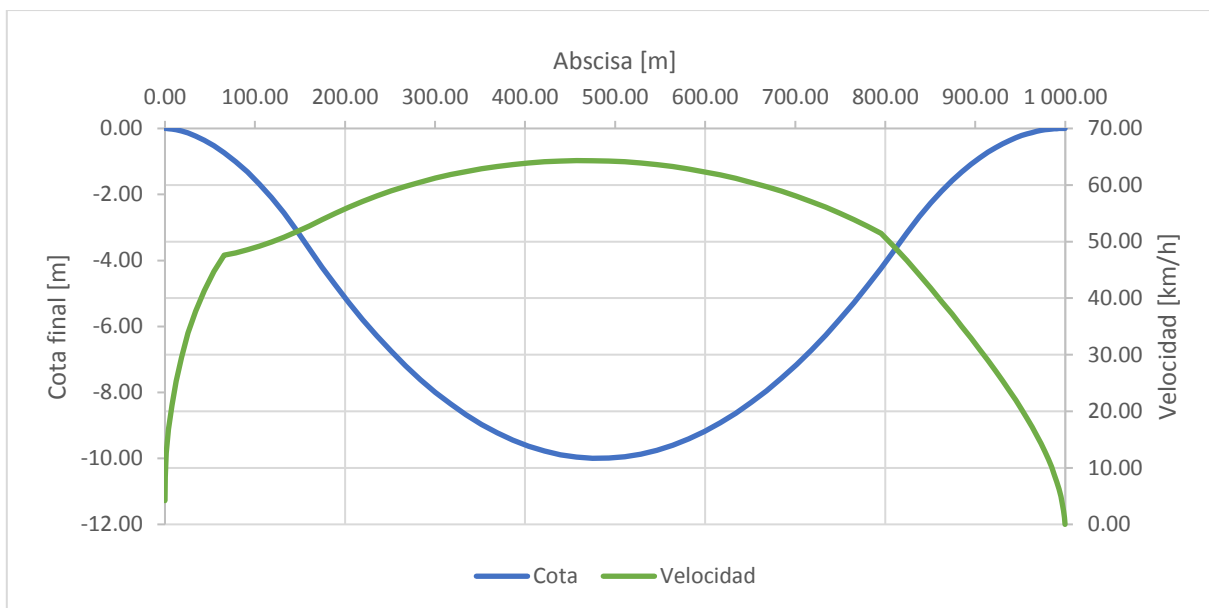


Fig. 38. Perfil de velocidad del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta=1.0\%$.

Se observa en los dos trazados verticales sinusoidales simétricos (Fig. 37 y Fig. 38) que el tren hace uso de la resistencia a la pendiente para alcanzar una mayor velocidad en la mitad del recorrido, donde el trazado alcanza su punto mínimo de cota, y luego esta misma pendiente influye en que el tren vaya decelerando a medida que se va acercando a la estación de llegada.

7.4. Resultados y discusión

Luego de definir los perfiles de velocidad de cada trazado vertical entre dos estaciones, se implementó la red neuronal entrenada para calcular el consumo energético con las cuatro variables elegidas (velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción).

El modelo dio como resultado los siguientes consumos energéticos totales para cada trazado propuesto con una duración de los recorridos de 86 segundos (Fig. 39):

- Trazado plano: 5.81 kWh/km.
- Trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$: 4.74 kWh/km.
- Trazado sinusoidal con $\delta = 1.0\%$: 4.94 kWh/km.

Se observa que el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$, con una pendiente máxima de 19.5 mm/m, consigue el menor consumo energético, representando un ahorro del 18.41% con respecto al consumo energético con el trazado plano.

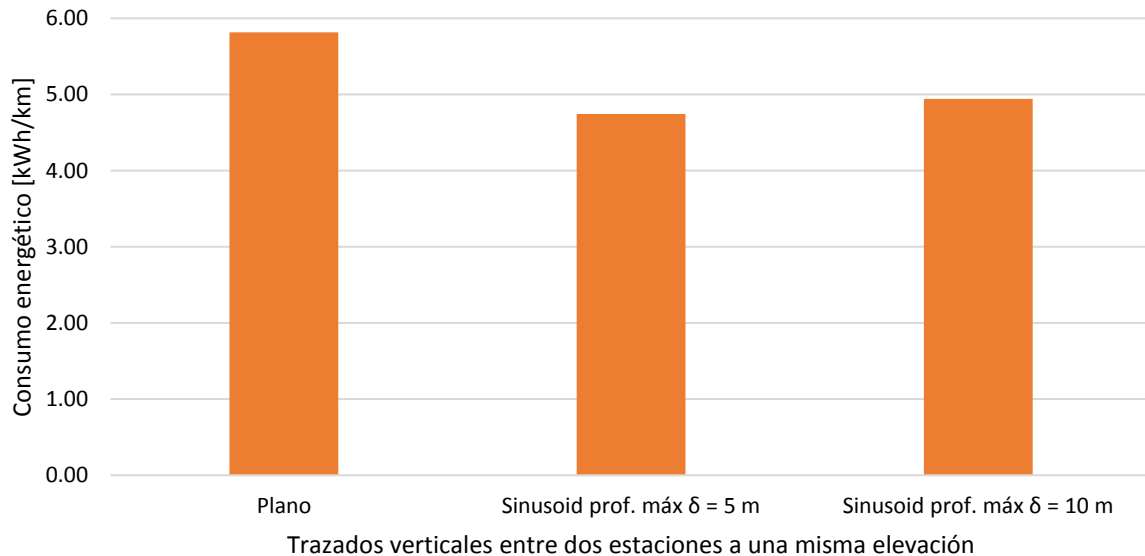


Fig. 39. Consumo energético global entre dos estaciones para los tres trazados.

La Fig. 40 ilustra el comportamiento del consumo energético en cada punto entre el par de estaciones para los tres trazados verticales propuestos. En general, el comportamiento del consumo energético en los tres casos coincide al inicio del recorrido, presentando picos de consumo energético en la etapa de aceleración inicial. En cuanto a las diferencias, se observa que el consumo energético del trazado plano presenta un pico más elevado al inicio del recorrido, pues requiere un mayor esfuerzo de tracción para iniciar la marcha debido a la ausencia de inclinación que podría ayudarle a reducir el esfuerzo a realizar. En contraste, el consumo energético en los dos trazados verticales sinusoidales se comporta diferente, pues presenta unos picos iniciales menos elevados que en el trazado plano; esto es debido a que cuando el tren está en la fase de aceleración requiere un menor esfuerzo de tracción para poner al tren en movimiento, pues gracias a la pendiente del trazado, la resistencia por pendiente actúa en dirección al movimiento del tren y no en dirección opuesta. Los picos de consumo energético presentados al final del recorrido para los tres trazados

son desajustes presentados en el entrenamiento de la red neuronal, pues dicha red no considera el consumo energético debido a la aplicación del freno reostático. Así pues, la red neuronal podría incluir datos de consumo energético en el freno reostático para una mejor calibración de esta en trabajos futuros.

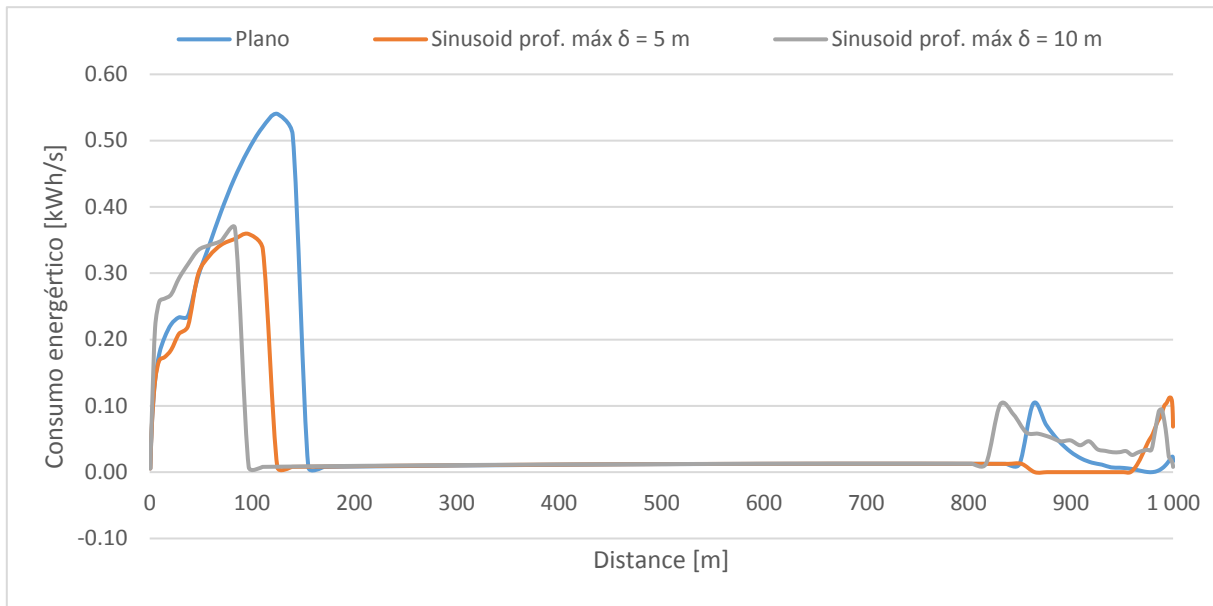


Fig. 40. Consumo energético en cada punto entre dos estaciones para los tres trazados hipotéticos.

La Fig. 41 muestra el consumo energético arrojado por la red neuronal para el trazado plano. Se observa que existe un pico de consumo energético al inicio del recorrido, cuando el tren acelera hasta alcanzar la velocidad de cruce. Luego de esto, cuando el tren circula en deriva, existe un consumo energético casi nulo.

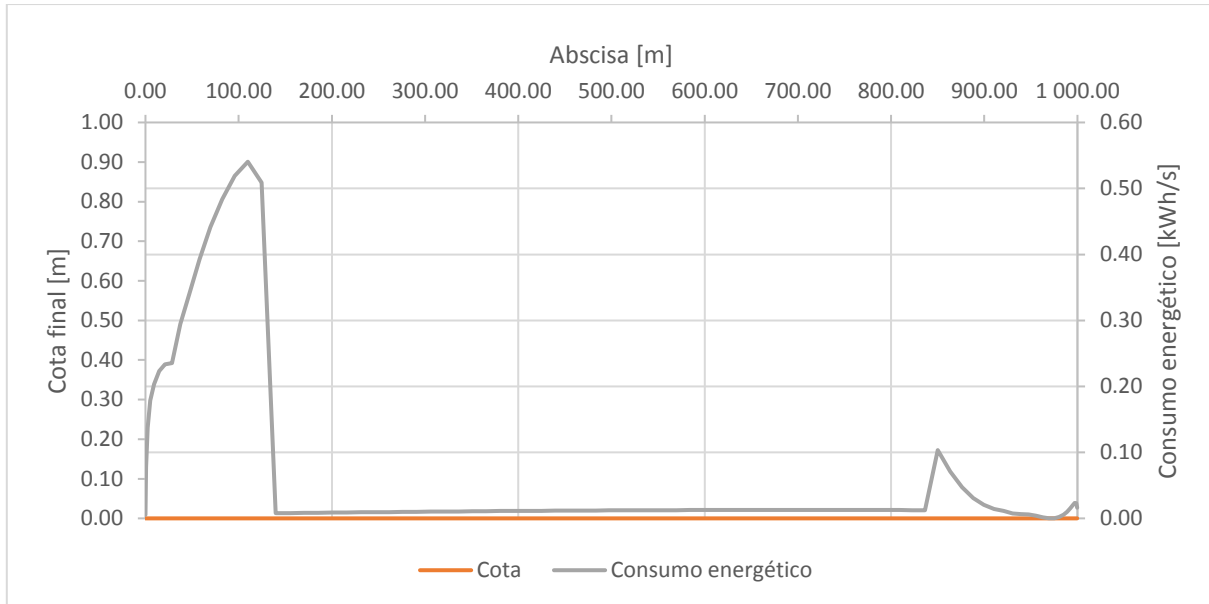


Fig. 41. Consumo energético y trazado vertical para el trazado plano.

La Fig. 42 muestra el consumo energético arrojado por la red neuronal para el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$. Se observa que existe un pico de consumo energético al inicio del recorrido cuando el tren acelera hasta alcanzar la velocidad de crucero, luego de esto, cuando el tren circula en deriva, el consumo energético es casi nulo, pues no se requiere aplicar esfuerzo de tracción alguno.

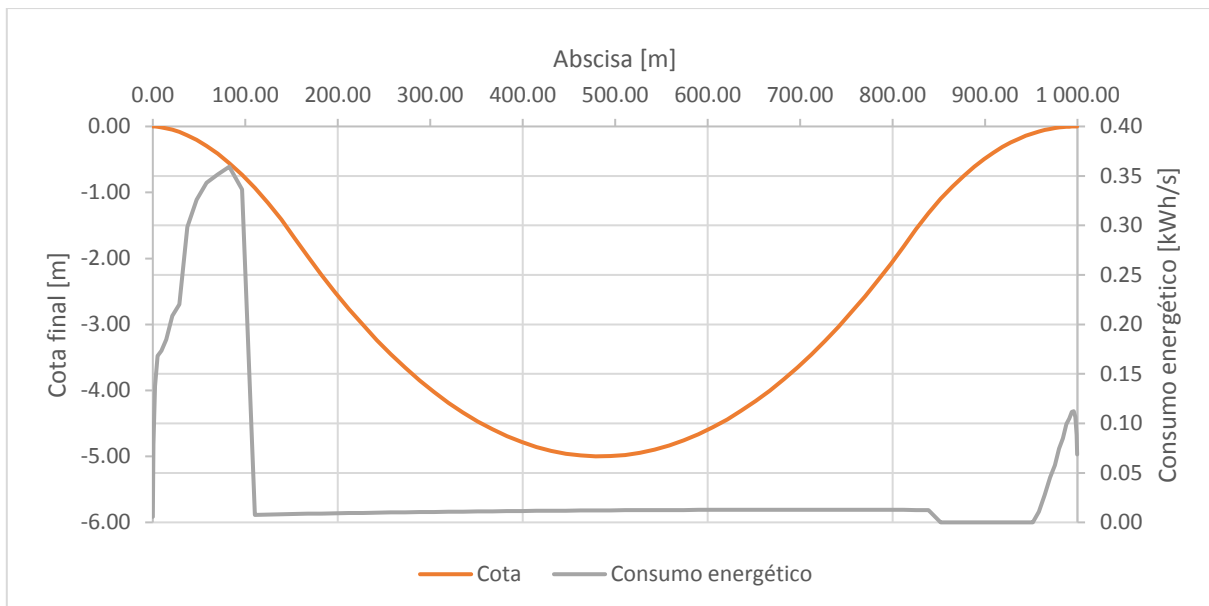


Fig. 42. Consumo energético y trazado vertical para el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$.

La Fig. 43 muestra el consumo energético arrojado por la red neuronal para el trazado sinusoidal con $\delta = 1.0\%$. El consumo energético para este trazado se comporta de una manera similar al caso anterior de la Fig. 42 para el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$.

El pico inicial de consumo energético en este trazado desciende hasta el consumo energético casi nulo unos metros de recorrido antes que en el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$. Esto se debe a que este trazado tiene una inclinación mayor, por lo que la resistencia por pendiente, que en este caso actúa a favor del movimiento del tren, es mayor que en el trazado sinusoidal con $\delta = 0.5\%$.

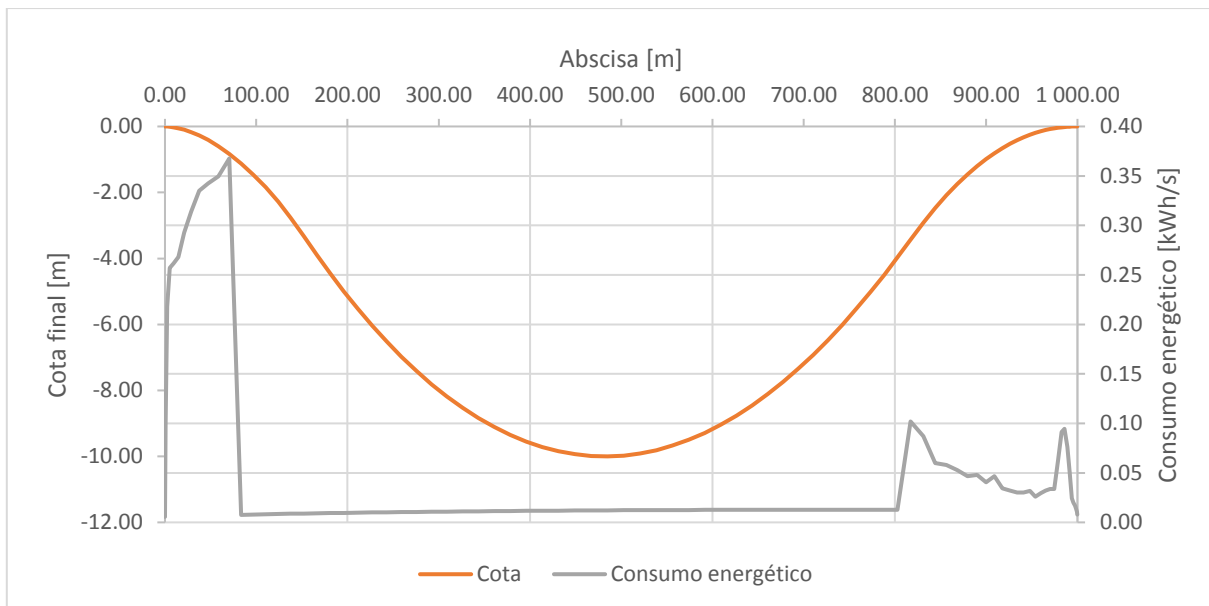


Fig. 43. Consumo energético y trazado vertical para el trazado sinusoidal con $\delta = 1.0\%$.

Ahora, a modo de ejemplo, suponiendo un coste de energía en promedio en España para el año 2 016 de 0.086 €/kWh [99], una red metropolitana de 100 km, una frecuencia de paso de un tren cada 3 minutos y un servicio comercial de 20 horas/día, se tiene los siguientes costes de tracción para los tres trazados hipotéticos:

- Trazado plano: 7.30 millones €/año
- Trazado sinusoidal con $\delta=0.5\%$: 5.96 millones €/año
- Trazado sinusoidal con $\delta=1.0\%$: 6.21 millones €/año

7.5. Costes de inversión en la infraestructura de los trazados

7.5.1. Consideraciones generales

Para comparar el coste de inversión en la infraestructura de los tres trazados geométricos, además de suponer que los tres trazados tendrán la misma superestructura ferroviaria, se considerarán las mismas condiciones para las variables que influyen en el coste de la construcción de los túneles ferroviarios para los tres diferentes trazados geométricos, estos son:

- Variables de fondo:
 - Tipo de contrato
 - Ubicación
 - Localidad (en este caso, urbana)
 - Geología (se supondrá el mismo material rocoso en los tres trazados geométricos)
 - Nivel freático
- Variables de diseño:
 - Diámetro
 - Tipo de línea
 - Tipo de excavación
 - Longitud
 - Finalidad del túnel
 - Materiales de revestimiento del túnel
- Variables de costes
 - Licitaciones del trabajo del túnel
 - Ejecuciones del trabajo en túnel
 - Licitaciones del proyecto
 - Ejecución del proyecto

Por lo tanto, la única variable que varía en los tres trazados hipotéticos de esta tesis será la variable geométrica de la profundidad. El trazado plano estará completamente enterrado, incluyendo las estaciones (Fig. 44).

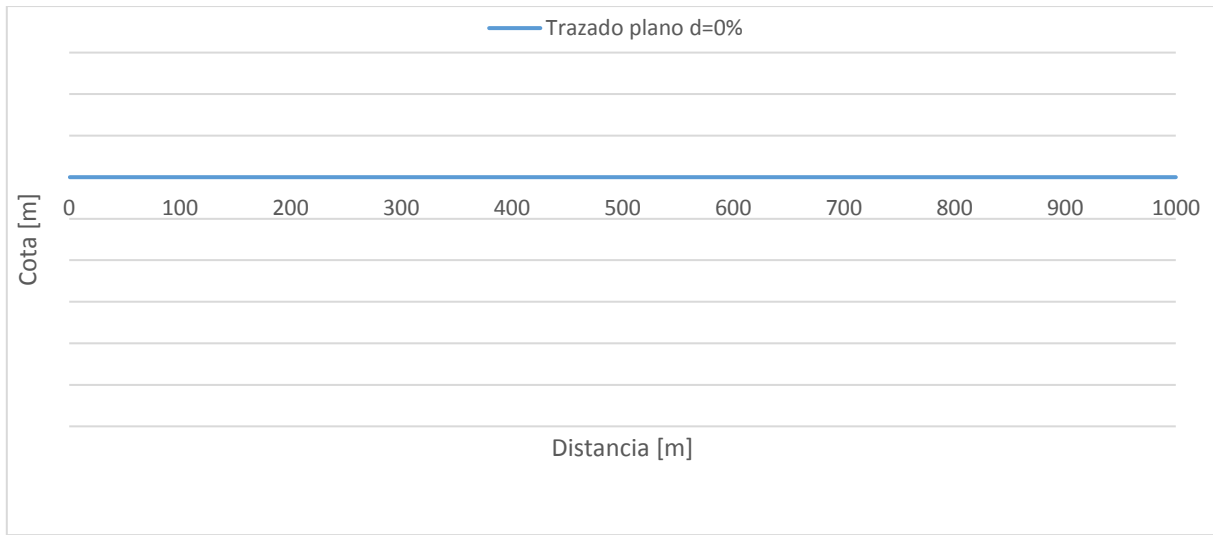


Fig. 44. Trazado plano.

El trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta = 0.5\%$ de la longitud entre estaciones (5 m) estará enterrado en su totalidad, incluyendo las estaciones (Fig. 45). Este trazado tiene una pendiente máxima de 19.5 mm/m.

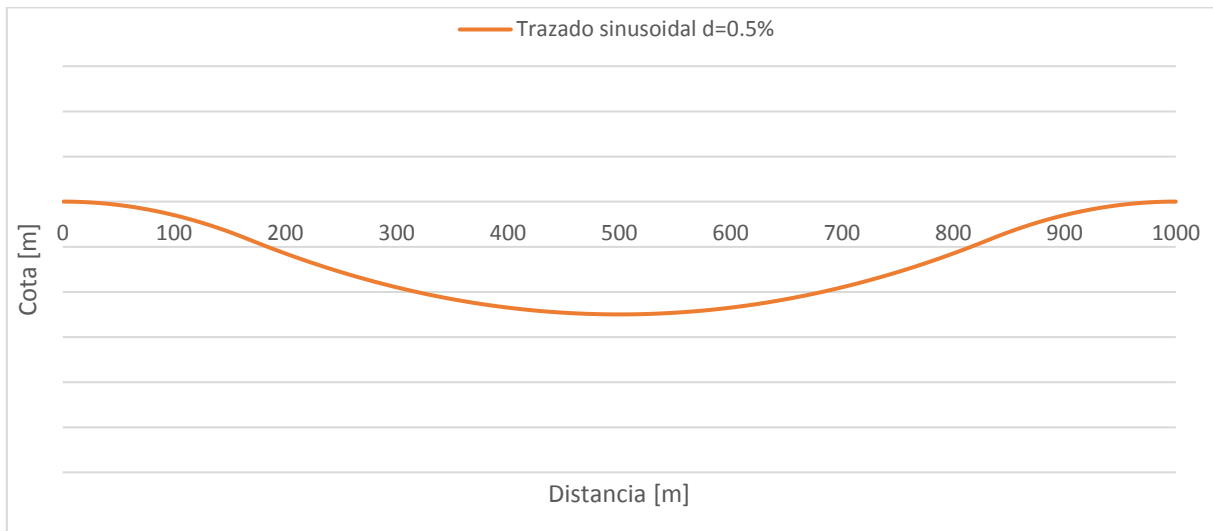


Fig. 45. Trazado sinusoidal con profundidad máxima $\delta = 0.5\%$.

De igual manera al anterior, el trazado sinusoidal con una profundidad máxima de $\delta = 1.0\%$ de la longitud entre estaciones (10 m) estará enterrado en su totalidad,

incluyendo las estaciones (Fig. 46). Este trazado tiene una pendiente máxima de 38.9 mm/m.

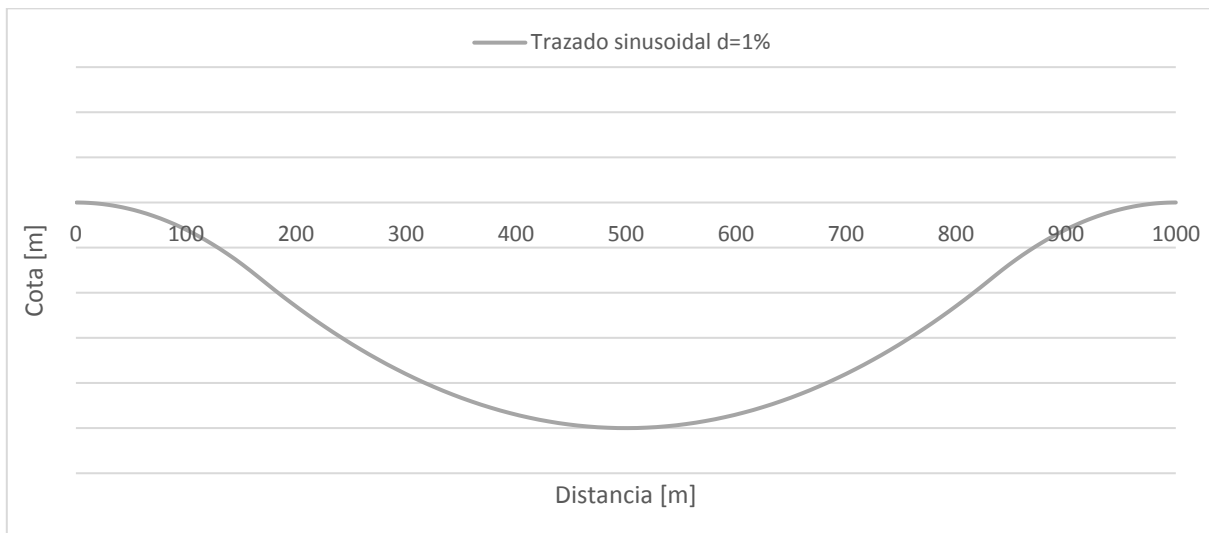


Fig. 46. Trazado sinusoidal con profundidad máxima $\delta = 1.0\%$.

7.5.2. Coste de construcción del túnel

Considerando las mismas especificaciones de todas las variables influyentes en el coste de la construcción de túneles ferroviarios para los tres trazados hipotéticos, se tienen las siguientes variaciones posibles en el coste de la inversión de infraestructura para los tres:

- Profundidad de excavación
- Longitud de los tres trazados entre un par de estaciones

7.5.2.1. Volumen de excavación y relleno

Se elegirá el método de excavación de túneles de trinchera cubierta (*cut and cover*), debido a que este método se emplea generalmente para zonas donde es difícil la construcción con tuneladoras, por razones de subsidencias del terreno y afectaciones en construcciones existentes. Este método se emplea para profundidades menores a

20 m (tal como se plantea en esta tesis) y es uno de los métodos de mayor utilización para zonas urbanas y estaciones superficiales [100].

Las características consideradas, a modo de ejemplo, serán las siguientes para los tres trazados geométricos, diferenciándose entre sí únicamente en el volumen de excavación y relleno:

- Trinchera de sección de 9 m de ancho x 7.40 m de alto
- Estabilización con hormigón proyectado y con refuerzos de malla metálica anclada al terreno
- Armado y vaciado de fundaciones de los muros y parte inferior de las paredes de los muros
- Armado y vaciado de losa de techo y parte superior de las paredes de los muros
- Posteriormente se ubica la losa del piso
- Relleno utilizable de mínimo 3 m para el paso de servicios, hasta la rasante de la superficie de cada trazado, se utiliza como material de relleno roca picada. Este relleno de 3 m será para el trazado plano, mientras que, para los trazados sinusoidales, deberá sumarse estos 3 m a la configuración geométrica respectiva
- Espesores de muro entre 55 cm y 80 cm, y losa entre 60 cm y 110 cm
- El rendimiento será de 6 m lineales de muro diario y 6 m lineales de techo diario. Además, 47 m³ de hormigón en muros y 37 m³ de hormigón para las losas diario

La sección típica del túnel por el método de trinchera cubierta utilizada a modo de ejemplo en el diseño de los tres trazados geométricos se presenta en la Fig. 47.

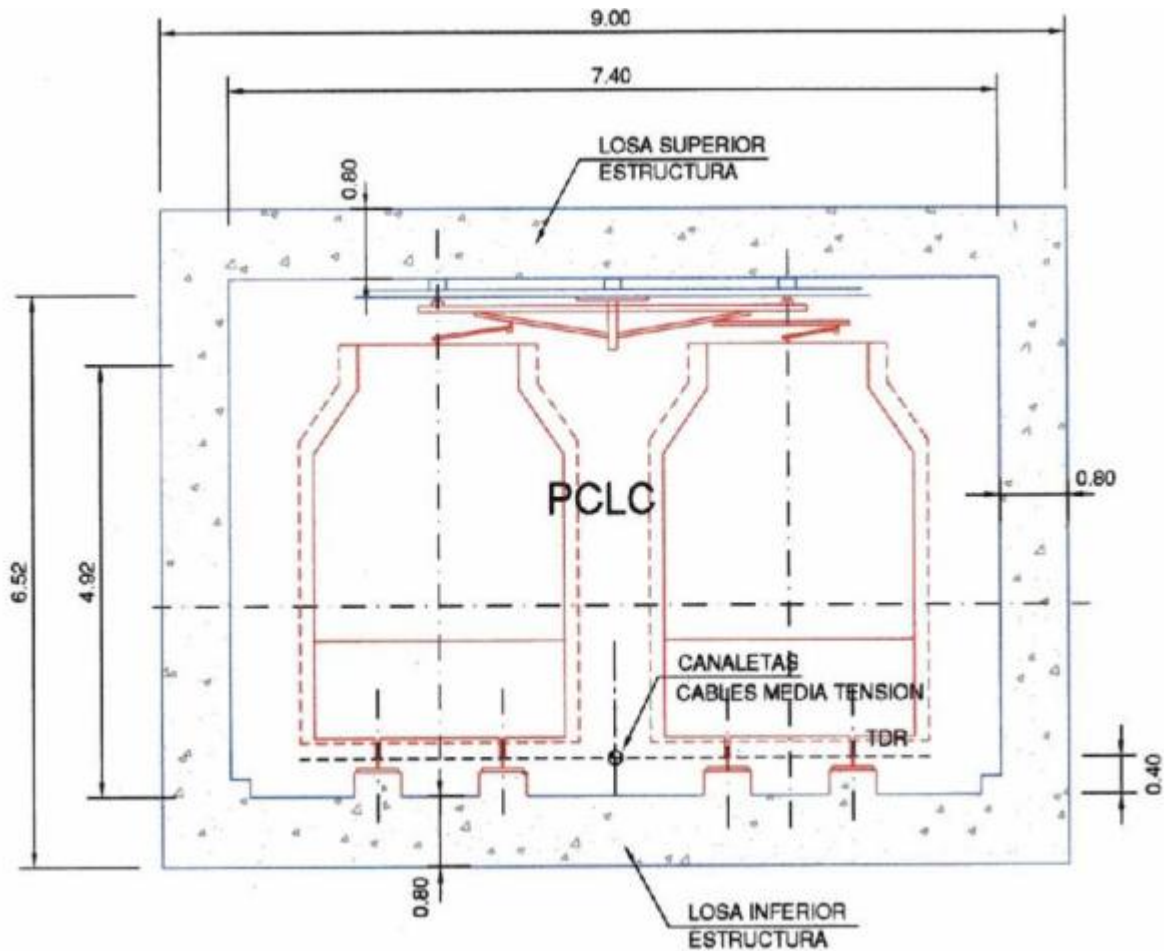


Fig. 47 Sección típica del túnel por el método de trinchera cubierta.

El volumen de excavación y de relleno considerado para cada uno de los tres trazados geométricos, es el siguiente:

- Para el trazado plano: 93 600 m³ de excavación + 27 000 m³ de material de relleno
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 5 m: 118 600 m³ de excavación + 52 000 m³ de material de relleno
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 10 m: 143 600 m³ de excavación + 77 000 m³ de material de relleno

Considerando un coste de excavación de 4.18 €/m³ (coste de una excavación en vaciado entre pantallas en cualquier tipo de terreno a cielo abierto), y un coste de relleno de 1.01 €/m³ (coste de terraplén, pedraplén o relleno todo-uno con materiales procedentes de la excavación), se tienen los siguientes costes totales de excavación y relleno para cada uno de los trazados geométricos [80]:

- Para el trazado plano: 418 518 €/km
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 5 m: 548 268 €/km
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 10 m: 678 018 €/km

7.5.2.2. Longitud de los tres trazados entre un par de estaciones

Considerando la hipótesis de que existe una distancia horizontal de 1 000 m entre un par de estaciones, se tiene que los trazados sinusoidales, debido a sus pendientes, tendrán una longitud un poco mayor que el trazado plano. Esta longitud, calculada mediante la teoría de longitud de arcos para una distancia en recta de 1 000 m, es:

- Para el trazado plano: 1 000.00 m
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 5 m: 1 000.06 m
- Para el trazado sinusoidal con profundidad máxima de 10 m: 1 000.20 m

Así pues, se observa que las longitudes de los trazados sinusoidales exceden máximo por solo 0.02%, por lo que no hay una diferencia de coste considerable en cuanto al factor de la longitud de los trazados sinusoidales frente a la longitud del trazado plano entre un par de estaciones.

7.5.3. Resultados

Teniendo en cuenta los costes de excavación y relleno para los tres trazados geométricos considerados en esta tesis, se tiene que el coste del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de 5 m excede en 129 750 €/km el coste de excavación y relleno al trazado plano.

Ahora, según el ejemplo presentado en el capítulo 7.4, el coste de explotación del trazado sinusoidal con una profundidad máxima de 5 m presenta un ahorro de 1.34 millones €/año en una red metropolitana de 100 km frente al trazado plano, con lo que el período de retorno de la inversión extra que supone el trazado sinusoidal con una profundidad máxima de 5 m entre un par de estaciones (en cuanto a coste de excavación y relleno se refiere), sería de 9.66 años.

Es necesario enfatizar en que esto es solo un ejemplo práctico "intermedio". Así pues, para cada caso particular, se debería realizar un estudio detallado, pues los costes de excavación y relleno de cada trazado depende de muchos factores, como la topografía del terreno, el tipo de material, la presencia del nivel freático, el método de excavación, y en general todos los factores presentados en el capítulo 4.

CAPÍTULO 8.

CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

8. CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN

Teniendo en cuenta que el sector del transporte es un gran consumidor de energía, es cada vez más importante y necesario llevar a cabo acciones con el fin de ofrecer alternativas que busquen minimizar o reducir el elevado consumo energético.

Por esta razón, en esta tesis se desarrolló una metodología para la optimización del consumo energético y el coste de la construcción de la infraestructura de un ferrocarril metropolitano, mediante el diseño de trazados verticales simétricos sinusoidales. La red de estudio considerada en esta investigación fue la línea 5 de MetroValencia, entre las estaciones Marítim-Serrería y Alameda.

La razón por la cual se consideran trazados verticales simétricos sinusoidales reside en dos aspectos fundamentales: en primer lugar, cuando un tren parte de la estación debe acelerar, y en este trazado encuentra una pendiente con la que alcanza una tasa de aceleración adecuada más fácilmente que en un trazado plano, haciendo uso de la fuerza de la gravedad. En segundo lugar, al existir una rampa en el tramo en el que el tren debe decelerar para frenar supone una menor necesidad de usar el freno. Estas dos medidas suponen una reducción en el consumo energético de un tren en su trayecto entre dos estaciones.

Una vez establecidos los criterios, el trabajo se dividió en tres fases: primero, se desarrolló un modelo de simulación que permitiera calcular el consumo energético del tren en cada instante mediante la implementación de una red neuronal artificial. Para validar y comparar la precisión de la red, se ha compararon los datos obtenidos en una campaña de medición con los resultados del modelo, permitiendo comprobar la validez y precisión del modelo. La ventaja de este método reside en su velocidad de ajuste y simulación, y, especialmente, que las redes neuronales artificiales funcionan como un laboratorio virtual con el que es posible realizar escenarios

hipotéticos para inducir cambios en las variables y conseguir una reducción del consumo energético del tren.

Posteriormente, el modelo validado se aplicó en diferentes escenarios hipotéticos de trazados verticales simétricos entre dos estaciones. Esto fue desarrollado para valorar el uso de trazados verticales simétricos sinusoidales en la optimización del consumo energético, calculando el potencial de ahorro en el consumo energético que tiene un tren en estos trazados al usar la deriva y las pendientes.

Finalmente, se realizó una comparación de los costes de inversión en infraestructura entre los diferentes escenarios hipotéticos analizados, para evaluar las diferencias existentes y la factibilidad económica de utilizar un trazado vertical energéticamente eficiente.

Más allá de los resultados numéricos obtenidos, la aportación de esta tesis reside en el modelo propuesto de red mediante el entrenamiento de la red neuronal artificial que permite evaluar escenarios hipotéticos conducentes a lograr ahorros de consumo energético en una red de tren metropolitano, validando las diferentes características tecnológicas y operativas del sistema en cuestión.

8.1. Conclusiones

En este trabajo se abordó el problema de la optimización del consumo energético mediante la implementación de trazados verticales simétricos sinusoidales. El objetivo final era desarrollar un modelo de optimización del consumo energético que evaluara dicho consumo en diferentes escenarios de trazados verticales sinusoidales, valorando las diferencias en la construcción de la infraestructura de dichos trazados.

En primer lugar, gracias a la campaña de medición llevada a cabo en un tren metropolitano de la red de MetroValencia, se analizó el consumo energético de la línea 5 de esta red entre las estaciones Marítim-Serrería y Alameda. Esta información permitió obtener el consumo energético medido en el tramo estudiado, por sentido de circulación.

Posteriormente, se analizó la información medida, y parte de ella fue utilizada para entrenar y validar una red neuronal artificial basada en cuatro variables de entrada: velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción. Estas cuatro variables ayudaron a estimar el consumo energético, probando que una única variable no puede explicar este fenómeno por ella misma.

Tras la validación de la red neuronal artificial entrenada, se observó para el trayecto global de 2.72 km un consumo energético medido promedio de 19.83 kWh (igual a 7.29 kWh/km), mientras que la red neuronal estimó un consumo energético promedio de 19.35 kWh (igual a 7.11 kWh/km), un error de sólo 2.42%. Validando la red neuronal entrenada con un recorrido extra medido, se observó un error de sólo el 3.53%. La red neuronal produce una buena estimación en tiempo real de la energía consumida por el tren, incluyendo los picos de tracción y la deriva.

Continuando con el cumplimiento de los objetivos de la tesis, se consideraron tres casos hipotéticos de trazados verticales entre dos estaciones separadas 1 km, con el fin de comparar la influencia del trazado vertical en el consumo energético del tren. Considerando estos trazados hipotéticos, se desarrolló un modelo basado en el movimiento de un vehículo, considerando la dinámica del tren para conocer la fuerza de tracción y las resistencias a la rodadura del tren (resistencia al avance, resistencia por curvatura y resistencia por pendiente), los trazados geométricos hipotéticos, las aceleraciones y deceleraciones máximas, así como las características y prestaciones del vehículo serie 4300 de Vossloh de cuatro coches.

Luego de definir los perfiles de velocidad de cada trazado vertical hipotético entre dos estaciones, se implementó la red neuronal artificial entrenada anteriormente para calcular el consumo energético utilizando las cuatro variables de entrada elegidas (velocidad, aceleración, pendiente y esfuerzo de tracción) para cada trazado hipotético.

El modelo dio como resultado un consumo energético de 5.81 kWh/km para un trazado plano, 4.74 kWh/km para un trazado vertical sinusoidal simétrico con una profundidad máxima de 5 m en el medio, y 4.94 kWh/km para un trazado vertical

sinusoidal simétrico con una profundidad máxima de 10 m en el medio. Estos resultados muestran un ahorro del 18.41% del trazado vertical sinusoidal simétrico que tiene una máxima de 5 m, y una pendiente máxima de 19.5 mm/m, con respecto al trazado plano. Esto, a modo de ejemplo, en una red de 100 km, una frecuencia de paso de un tren cada 3 minutos y un servicio comercial de 20 horas/día, representa un ahorro en los costes de tracción de 1.34 millones €/año.

Tras verificar el trazado vertical que proporcionaba menor consumo energético entre dos estaciones, se comparó las diferencias de inversión en la infraestructura de los tres trazados geométricos hipotéticos estudiados considerando las mismas especificaciones de todos los elementos, mostrando que las variaciones posibles recaían en la longitud total de los tres trazados hipotéticos, longitud mayor a su distancia horizontal debido a las pendientes de los trazados, y el volumen de excavación y relleno de los tres túneles (construidos, a modo de ejemplo, siguiendo la metodología de túneles de trinchera cubierta). Se comprobó, que el coste debido a la mayor longitud del trazado que daba un menor consumo energético no excedía de manera significativa, mientras que el coste de los volúmenes de excavación y relleno de ambas alternativas excedía por 129 750 €/km. A modo de ejemplo, si este coste extra de excavación y relleno lo comparamos con el ahorro en el coste de tracción de 1.34 millones €/año de la red de ejemplo presentada anteriormente, se tiene un período de retorno de la inversión extra de 9.66 años.

Estos resultados muestran la importancia de poder llevar a cabo un diseño en los trazados geométricos que sea más eficiente energéticamente. Si bien por si sola esta medida permite obtener unos ahorros energéticos importantes, si esta medida es acompañada con otras medidas como la conducción económica, se puede llegar a obtener un transporte mucho más eficiente en términos de consumo energético.

Si bien los resultados obtenidos en esta tesis son satisfactorios, cabe destacar que pueden estar sujetos por los vehículos estudiados, las condiciones de contorno, el tipo de conducción llevada a cabo por los maquinistas y, en general, las hipótesis consideradas.

Cabe destacar que esta metodología es novedosa, pues, no existe evidencia en material consultado de una estructura de modelo de redes neuronales artificiales que involucren el trazado ferroviario para analizar su impacto en el consumo energético en una línea ferroviaria metropolitana, y su posterior aplicación para simular el consumo energético en escenarios hipotéticos de trazados geométricos.

8.2. Futuras líneas de investigación

Considerando los resultados obtenidos, y teniendo en cuenta las hipótesis y simplificaciones adoptadas a lo largo de esta tesis, se presentan a continuación los próximos pasos a seguir con el objetivo de mejorar los aportes generados.

En primer lugar, podría incluirse la recuperación de la energía para analizar el comportamiento del modelo frente a este proceso.

También habría que realizar el entrenamiento de una red neuronal considerando la información de toda la línea 5 de la red de MetroValencia, o mejor aún, considerando la información de toda la red en general, así podría entrenarse una red neuronal con un ajuste más preciso.

Entrenada una red neuronal artificial más robusta, debe proporcionarse una herramienta más sencilla que la abarque, con el objetivo de poder evaluar otros escenarios de una forma más simple, mediante una ecuación, por ejemplo.

A partir de la relación de los escenarios hipotéticos evaluados entre dos estaciones, se procedería, entonces, a evaluar estos trazados con el trazado real actual, por trayectos entre dos estaciones, conociendo el consumo energético en las diferentes configuraciones de trazados verticales actuales.

Esta red neuronal entrenada podría utilizarse para probar otros escenarios hipotéticos de operación y construcción, buscando minimizar el consumo energético del sistema.

Otros trabajos futuros deberían de considerar el consumo energético por la mayor cantidad de obra a ejecutar en términos de movimiento de tierra para lograr los

trazados sinusoidales. Además de la ingeniería económica y financiera necesarias para validar el período de retorno de la mayor inversión según el trazado.

Para finalizar, dado que esta tesis únicamente consideró la dinámica del tren en su trazado vertical, posteriores análisis podrían incluir la dinámica del tren en su trazado horizontal, evaluando también su influencia en el consumo energético del tren.

CAPÍTULO 9.

REFERENCIAS

9. REFERENCIAS

- [1] International Energy Agency, «Key World Energy STATISTICS,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/key-world-energy-statistics.html>. [Último acceso: 17 Enero 2017].
- [2] European Union, «Eurostat Statistics Explained - Consumption of energy,» Bruselas, 2016.
- [3] A. García Álvarez, «High speed, energy consumption and emissions,» Study and Research Group for Railway Energy and emissions, Madrid, 2010.
- [4] K. Kim y S. I. Chien, «Optimal train operation for minimum energy consumption considering schedule adherence,» *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*, 2010.
- [5] A. Kosinski, L. Schipper y E. Deakin, «Analysis of high-speed rail's potential to reduce CO2 emissions from transportation in the United States,» *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*, 2011.
- [6] X. Lai y P. Schonfeld, «Optimizing rail transit alignment connecting several major stations,» *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*, 2010.
- [7] M. K. Jha, P. Schonfeld y S. Samanta, «Optimizing rail transit routes with genetic algorithms and geographic information systems,» *J. Urban Plann. Dev.*, 133(3), pp. 161-171, 2007.

- [8] S. Chien y P. Schonfeld, «Joint optimization of a rail transit line and its feeder bus system,» *J. Adv. Transp.*, 32(3), pp. 253-284, 1998.
- [9] S. Dunder y I. Sahin, «A genetic algorithm solution for train scheduling,» *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*, 2011.
- [10] M. Liu, A. Haghani y S. Toobaie, «A genetic Algorithm-based column generation approach to passenger rail crew scheduling,» *TRB Annual Meeting Compendium. Transportation Research Board*, 2010.
- [11] S. Samanta y M. K. Jha, «Modeling a rail transit alignment considering different objectives,» *Transportation Research: Part A*, 45(1), pp. 31-45, 2011.
- [12] K. Kim y S. I. Chien, «Simulation-based analysis of train controls under various track alignments,» *Journal of Transportation Engineering*, 136(11), pp. 937-948, 2010.
- [13] D. N. Kim y P. Schonfeld, «Benefits of dipped vertical alignment for rail transit routes,» *Journal of Transportation Engineering*, 123(1), pp. 20-27, 1997.
- [14] S. Yeh, «Integrated analysis of vertical alignment and speed profiles for rail transit routes,» Maryland, 2003.
- [15] A. García Álvarez, *Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril*, Madrid, 2011.
- [16] E. K. Burke y G. Kendall, «Introduction,» de *Search Methodologies*, Nottingham, Springer, 2005, pp. 5-18.
- [17] M. Negnevitsky, *Artificial Intelligence: A guide to intelligent systems*, Reading, 2005.

- [18] S. Russell y P. Norvig, *Artificial Intelligence: A modern approach*, Englewood Cliffs, 2003.
- [19] R. Callan, *Artificial Intelligence*, London, 2003.
- [20] G. Luger, *Artificial Intelligence: Structures and strategies for complex problem solving*, Reading, 2002.
- [21] W. McCulloch y W. Pitts, «A logical calculus of ideas immanent in nervous activity,» *Bulletin of Mathematical Biophysics*, vol. 5, nº 4, pp. 115-133, 1943.
- [22] X. Yao y Y. Liu, «Machine learning,» de *Search Methodologies*, New York, Springer, 2005, pp. 341-373.
- [23] J. Kelly y W. Knottenbelt, «Neural NILM: Deep neural networks applied to energy disaggregation,» de *Proceedings of the 2nd ACM International Conference on Embedded Systems for Energy-Efficient Built Environments*, Seoul, 2015.
- [24] D. Datta, S. A. Tassou y D. Marriott, «Application of neural networks for the prediction of the energy consumption in a supermarket,» de *Proceedings of the International Conference CLIMA 2000*, Brussels, 1997.
- [25] J. W. Moon, S. K. Jung, Y. O. Lee y S. Choi, «Prediction performance of an artificial neural network model for the amount of cooling energy consumption in hotel rooms,» *Energies*, vol. 8, pp. 8226-8243, 2015.
- [26] H. R. Khosravani, M. D. M. Castilla, M. Berenguel, A. E. Ruano y P. M. Ferreira, «A comparison of energy consumption prediction models based on neural networks of a bioclimatic building,» *Energies*, vol. 9, nº 57, 2016.
- [27] H. Abolfazli, S. M. Asadzadeh, S. Nazari-Shirkouhi, S. M. Asadzadeh y K. Rezaie, «Forecasting rail transport petroleum consumption using an integrated model of autocorrelation functions - artificial neural network,» *Acta Polytechnica*

Hungarica, vol. 11, nº 2, pp. 203-214, 2014.

- [28] J. Feng, X. M. Li, M. Q. Xie y L. P. Gao, «A neural network model for calculating metro traction energy consumption,» de *International Conference on Power, Energy Engineering and Management (PEEM 2016)* , Bangkok, 2016.
- [29] M. Hudson Beale, M. Hagan y H. Demuth, *Neural Network Toolbox - User's Guide*, MathWorks, 2016.
- [30] C. Bishop, *Neural networks for pattern recognition*, Oxford, UK: Clarendon Press, 1995.
- [31] R. Insa Franco, P. Salvador Zuriaga, I. Villalba Sanchis, P. Martínez Fernández, C. García Román, J. D. Pineda Jaramillo y R. Sánchez Alandí, *Monitorización, modelización y simulación del consumo energético en el ferrocarril*, Valencia, Valencia: Universitat Politècnica de València, 2016.
- [32] P. Werbos, «Beyond regression: New tools for prediction and analysis in the behavioral sciences,» Cambridge, 1974.
- [33] G. Cauwenberghs, «A fast stochastic Error-Descent Algorithm for supervised learning and optimization,» de *Advances in Neural Information Processing Systems*, Pasadena, 1993, pp. 244-251.
- [34] J. Fritsch, «Modular neural networks for speech recognition,» Pittsburgh, 1996.
- [35] M. Forouzanfar, H. Dajani, V. Groza, M. Bolic y S. Rajan, «Comparison of feed-forward neural network training algorithms for oscillometric blood pressure estimation,» de *4th International Workshop on Soft Computing Applications (SOFA)*, Arad , 2010.
- [36] D. de Rigo, A. Castelletti, A. Rizzoli, R. Soncini-Sessa y E. Weber, «A selective improvement technique for fastening Neuro-Dynamic Programming in Water

Resources Network Management,» de *16th IFAC World Congress, Prague, 2005*.

- [37] C. Ferreira, «Designing neural networks using gene expression programming,» de *Applied Soft Computing Technologies: The Challenge of Complexity*, Springer, 2006, pp. 517-536.
- [38] Y. Da y G. Xiurun, «An improved PSO-based ANN with simulated annealing technique.,» de *New Aspects in Neurocomputing: 11th European Symposium on Artificial Neural Networks*, Bruges, 2005.
- [39] J. Wu y E. Chen, «A Novel Nonparametric Regression Ensemble for Rainfall Forecasting Using Particle Swarm Optimization Technique Coupled with Artificial Neural Network,» de *Sixth International Symposium on Neural Networks*, Wuhan, 2009.
- [40] I. V. Tetko, D. J. Livingstone y A. I. Luik, «Neural network studies, 1. Comparison of Overfitting and Overtraining,» *Journal of Chemical Information and Computer Sciences*, nº 35, pp. 826-833, 1995.
- [41] M. A. Van Gent, H. P. Van den Boogard, B. Pozueta y J. R. Medina, «Neural network modelling of wave overtopping at coastal structures,» *Coastal engineering*, nº 54, pp. 586-593, 2007.
- [42] M. Figueres Moreno, «Optimización Heurística,» [En línea]. Available: <http://optimizacionheuristica.blogs.upv.es/files/2013/04/Introducci%C3%B3n-Redes-Neuronales-ArtificialesMFM.pdf>. [Último acceso: 30 Marzo 2016].
- [43] T. Sanger, «Optimal unsupervised learning in feedforward neural networks,» *En neural networks*, vol. 2, pp. 459-473, 1989.
- [44] J. Molines, «Stability of crown walls of cube and cubipod armoured mound breakwaters,» *PIANC E-Magazine*, nº 144, pp. 29-44, 2011.

- [45] A. García Álvarez, *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Cuarta ed., Madrid, 2007.
- [46] B. P. Rochard y F. Schmid, «A review of methods to measure and calculate train resistances,» *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 214, nº 4, pp. 185-199, 2000.
- [47] O. Fröidh, «Design speed for new high-speed lines,» *Journal of Rail Transport Planning & Management*, nº 4, pp. 59-69, 2014.
- [48] Stadler, «Stadler,» 2006. [En línea]. Available: http://www.stadlerrail.es/media/downloads/pdfs/flyer/Vossloh_Espana_EURO_4000_freight_us.pdf. [Último acceso: 4 Abril 2016].
- [49] B. Van Wee, P. Janse y R. Van Den Brink, «Comparing energy use and environmental performance of land transport modes,» *Transport Reviews* 25(1), pp. 3-24, 2005.
- [50] W. Orasch y F. Wirl, «Technological efficiency and the demand for energy (road transport),» *Energy Policy* 25(14-15), pp. 1 129-1 136, 1997.
- [51] P. Advenier, P. Boisson, C. Delarue, A. Douaud, C. Girard y M. Legendre, «Energy consumption and CO2 emissions of road transportation: Comparative analysis of technologies and fuels,» *Energy Environment* 13(4-5), pp. 631-646, 2002.
- [52] G. J. Koopman, «Long-term challenges for inland transport in the European Union: 1 997 - 2 010. Consequences for transport fuel economy and use,» *Energy Policy* 25(14-15), pp. 1 151-1 161, 1997.
- [53] D. Pimentel, A. Pleasant, J. Barron, J. Gaudioso, N. Pollock, E. Chae, Y. Kim, A. Lassiter, C. Schiavoni, A. Jackson, M. Lee y A. Eaton, «US energy conservation and efficiency: Benefits and costs,» *Environment, Development and Sustainability*

6(3), pp. 279-305, 2004.

- [54] S. C. Burgess y J. J. Choi, «A parametric study of the energy demands of car transportation: A case study of two competing commuter routes in the UK,» *Transportation Research Part D* 8(1), pp. 21-36, 2003.
- [55] J. Cuddihy, C. Kennedy y P. Byer, «Energy use in Canada: Environmental impacts and opportunities in relationship to infrastructure systems,» *Canadian Journal of Civil Engineering* 32(1), pp. 1-15, 2005.
- [56] I. Villalba Sanchis, «Estudio y optimización de la eficiencia energética en la conducción de trenes metropolitanos de la ciudad de Valencia,» Valencia, 2015.
- [57] M. E. Kim, P. Schonfeld, F. Asce y E. Kim, «Comparison of Vertical Alignments for Rail Transit,» *Journal of Transportation Engineering*, pp. 230-238, Febrero 2013.
- [58] P. Lukaszewicz, «Driving techniques and strategies for freight trains,» de *Computers in railways VII*, J. Allan, C. A. Brebbia, R. J. Hill, G. Sciutto y S. Sone, Edits., WIT Press, 2000, pp. 1065-1073.
- [59] P. Lukaszewicz, «Energy consumption and running time for trains,» Stockolm, 2001.
- [60] P. Lukaszewicz, «Reducing power peaks and energy consumption in rail transit systems by simultaneous train running time control,» de *Computers in railways IX*, J. Allan, C. A. Brebbia, R. J. Hill, G. Sciutto y S. Sone, Edits., WIT Press, 2004, pp. 885-894.
- [61] Y. Bai, B. Mao, F. Zhou, Y. Ding y C. Dong, «Energy-Efficient driving strategy for freight trains based on power consumption analysis,» *Journal of transportation systems engineering and information technology*, vol. 9, nº 3, pp. 43-50, 2009.

- [62] Y. V. Bocharnikov, A. M. Tobias, C. Roberts, S. Hillmansen y C. J. Goodman, «Optimal driving strategy for traction energy on DC suburban railways,» *IET Electric Power Applications*, vol. 1, nº 5, pp. 675-682, 2007.
- [63] D. Sanftleben, H. Sonntag y K. Weber, «Verfahren, Energiesparende Fahrweise - ESF,» *ETR*, nº 50, pp. 510-517, 2001.
- [64] H. Strößenreuther y J. Halbach, «Projekt EnergieSparen im Personenverkehr - Energiekostenmanagement für die Traktionsenergie der Deutsche Bahn,» *ZEVrail Glasers Annalen*, nº 129, pp. 356-362, 2005.
- [65] J. P. Baumgartner, «Prices and costs in the railway sector,» Lausanne, 2001.
- [66] M. Santinelli, «Progetto per la riattivazione della linea ferroviaria Fano-Urbino. Relazione tecnico-illustrativa,» 2007.
- [67] P. Mancuso y P. Reverberi, «Operating cost and market organization in railway services. The case of Italy, 1980-1995,» *Transportation Research Part B*, vol. 37, nº 1, pp. 43-61, 2003.
- [68] D. Gattuso y G. Meduri, «Analisi dei costi e delle alternative di intervento,» de *Sistemi di trasporto collettivo avanzati a media potenzialità: analisi funzionali ed economico-finanziarie*, Reggio Calabria, Laruffa, 2006.
- [69] A. Ott, «Comparable cost calculation for infrastructure of road and rail,» de *Conference on Applied Infrastructure Research*, Berlin, 2001.
- [70] J. T. Von Brown, «A Planning methodology for railway construction cost estimation in North America,» Iowa, 2011.
- [71] B. Flyvbjerg, N. Bruzelius y B. Van Wee, «Comparison of Capital Costs per Route-Kilometre in Urban Rail,» *Journal of Transport and Infrastructure Research*,

vol. 8, nº 1, pp. 17-30, 2008.

- [72] D. Levinson, J. M. Mathieu, D. Gillen y A. Kanafani, «The full cost of high-speed rail: an engineering approach,» *The Annals of Regional Science. Springer - Verlag*, pp. 189-215, 1997.
- [73] G. Van Hecke, G. Aubry, U. Hackenbeck, S. Leveritt y P. Smith, «High-speed railway construction projects.,» de *The International Association of Engineering Insurers WGP*, 2003.
- [74] M. Martín Cañizares, «Contribución al diseño eficiente de la configuración en planta de líneas de alta velocidad,» Barcelona, 2015.
- [75] A. García Álvarez, «Relationship between rail service operating direct costs and speed,» Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid, 2010.
- [76] I. González Franco, «Metodología para la estimación de la combinación de velocidades máximas que permiten alcanzar el tiempo de viaje comercialmente requerido en una infraestructura ferroviaria,» Barcelona, 2015.
- [77] F. Calvo y J. De Oña, «Are rail charges connected to costs?,» *Journal of Transport Geography*, nº 22, pp. 28-33, 2012.
- [78] N. O. E. Olsson, A. Økland y S. B. Halvorsen, « Consequences of differences in cost-benefit methodology in railway infrastructure appraisal – A comparison between selected countries,» *Transport Policy*, nº 22, pp. 29-35, 2012.
- [79] D. Gattuso y A. Restuccia, «A tool for railway transport cost evaluation,» *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, vol. 111, pp. 549-558, 2014.
- [80] Ministerio de Fomento. Gobierno de España, «Cuadro de precios de referencia de la dirección general de carreteras,» Madrid, 2 011.

- [81] Ministerio de Fomento - Gobierno de España, «Estudios informativos para el desarrollo de la red de alta velocidad en Asturias. Tramo Pola de Lena - Oviedo,» Madrid, 2015.
- [82] A. López Pita, *Infraestructuras ferroviarias*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2006.
- [83] D. Pickrell, «Estimates of rail transit construction costs,» *Transportation Research Record*, nº 106, 1985.
- [84] A. López Pita, *Explotación de líneas de ferrocarril*, Barcelona: Universitat Politècnica de Catalunya, 2008.
- [85] Listado tren, «Listado tren,» Jorge Herrero Gimeno, 11 Julio 2016. [En línea]. Available: <http://www.listadotren.es/motor/phototrain.php?tid=5214&from=ser>. [Último acceso: 15 Febrero 2017].
- [86] ADIF, «Modelos de Catenaria de ADIF,» [En línea]. Available: http://www.adif.es/es_ES/comunicacion_y_prensa/fichas_de_actualidad/ficha_actualidad_00070.shtml. [Último acceso: 31 Marzo 2016].
- [87] Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, «Encuesta de Precios de la Tierra 2014,» Madrid, 2015.
- [88] Ministerio de Fomento, «Estadística de precios de suelo urbano,» Madrid, 2015.
- [89] Gobierno de España, «Ley de 16 de Diciembre de 1954,» Madrid, 1954.
- [90] Halcrow Fox, «World bank urban transport strategy review: Mass rapid transit in developing countries. Final report,» World Bank, Washington, DC, 2000.
- [91] BB&J Consult, «The world bank group urban transport strategy review: Implementation of rapid transit. Final report,» World Bank, Washington, DC,

2000.

- [92] MetroValencia, «www.metrovalencia.es,» [En línea]. Available: http://www.metrovalencia.es/descargas/pdf/Plano%20de%20red_2011_1200x1760_ok.pdf. [Último acceso: 15 Octubre 2015].
- [93] Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana, «Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana,» [En línea]. Available: <http://www.fgv.es/conoce-fgv/fgv-en-cifras/metrovalencia-en-cifras/datos-de-la-red-de-metrovalencia/>. [Último acceso: 12 Junio 2016].
- [94] Vossloh España, «Metro de Valencia serie 4300 - Manual descriptivo,» Valencia, 2009.
- [95] Flickr, «www.flickr.com,» [En línea]. Available: <https://www.flickr.com/photos/pantoteatre/14418347791>. [Último acceso: 15 Octubre 2015].
- [96] Mors Smitt, «www.morssmitt.com,» [En línea]. Available: <http://www.morssmitt.com/railway/files/Documents/Brochure-MSAV%20V3.1.pdf>. [Último acceso: 15 Octubre 2015].
- [97] J. Fritsch, «Modular neural networks for speech recognition,» 1996.
- [98] Vossloh España; FGV, «Datos tracción y freno - Metro Valencia 4 y 5 coches - S / 4300,» Valencia, 2010.
- [99] Ministerio de energía, turismo y agenda digital, «Precio neto de la electricidad para uso doméstico y uso industrial,» 21 Noviembre 2016. [En línea]. Available: http://www.minetad.gob.es/es-ES/IndicadoresyEstadisticas/DatosEstadisticos/IV.%20Energ%C3%ADa%20y%20emisiones/IV_12.pdf. [Último acceso: 22 Febrero 2017].

- [100] J. O. Rodríguez Rodríguez, D. Monroy Monroy y J. C. Ruge Cárdenas, «Estado del conocimiento de los procesos constructivos en proyectos tuneleros dentro del contexto colombiano,» Bogotá, 2016.



ANEXOS

10. ANEXOS

10.1. Anexo 1. Script de Red Neuronal: “Simple script”

```
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by Neural Fitting app
% Created Wed Sep 16 12:00:43 CET 2 015
%
% This script assumes these variables are defined:
%
% Vel_Ace_Pdte - input data.
% Target - target data.

x = Vel_Ace_Pdte;
t = Target;

% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help nntrain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. NFOOTOL falls back to this in low memory
situations.
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 30;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Train the Network
[net,tr] = train(net,x,t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t,y);
performance = perform(net,t,y)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
```

```
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotfit(net,x,t)
%figure, plotregression(t,y)
%figure, ploterrhist(e)
```

10.2. Anexo 2. Script de Red Neuronal: “Advanced Script”

```
% Solve an Input-Output Fitting problem with a Neural Network
% Script generated by Neural Fitting app
% Created Wed Sep 16 12:00:56 CET 2 015
%
% This script assumes these variables are defined:
%
% Vel_Ace_Pdte - input data.
% Target - target data.

x = Vel_Ace_Pdte;
t = Target;

% Choose a Training Function
% For a list of all training functions type: help nntrain
% 'trainlm' is usually fastest.
% 'trainbr' takes longer but may be better for challenging problems.
% 'trainscg' uses less memory. NFOOTOL falls back to this in low memory
situations.
trainFcn = 'trainlm'; % Levenberg-Marquardt

% Create a Fitting Network
hiddenLayerSize = 30;
net = fitnet(hiddenLayerSize,trainFcn);

% Choose Input and Output Pre/Post-Processing Functions
% For a list of all processing functions type: help nnprocess
net.input.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};
net.output.processFcns = {'removeconstantrows','mapminmax'};

% Setup Division of Data for Training, Validation, Testing
% For a list of all data division functions type: help nndivide
net.divideFcn = 'dividerand'; % Divide data randomly
net.divideMode = 'sample'; % Divide up every sample
net.divideParam.trainRatio = 70/100;
net.divideParam.valRatio = 15/100;
net.divideParam.testRatio = 15/100;

% Choose a Performance Function
% For a list of all performance functions type: help nnperformance
net.performFcn = 'mse'; % Mean squared error

% Choose Plot Functions
% For a list of all plot functions type: help nnplot
```



```
net.plotFcns = {'plotperform', 'plottrainstate', 'ploterrhist', ...
    'plotregression', 'plotfit'};

% Train the Network
[net, tr] = train(net, x, t);

% Test the Network
y = net(x);
e = gsubtract(t, y);
performance = perform(net, t, y)

% Recalculate Training, Validation and Test Performance
trainTargets = t .* tr.trainMask{1};
valTargets = t .* tr.valMask{1};
testTargets = t .* tr.testMask{1};
trainPerformance = perform(net, trainTargets, y)
valPerformance = perform(net, valTargets, y)
testPerformance = perform(net, testTargets, y)

% View the Network
view(net)

% Plots
% Uncomment these lines to enable various plots.
%figure, plotperform(tr)
%figure, plottrainstate(tr)
%figure, plotfit(net, x, t)
%figure, plotregression(t, y)
%figure, ploterrhist(e)

% Deployment
% Change the (false) values to (true) to enable the following code blocks.
if (false)
    % Generate MATLAB function for neural network for application deployment
    % in MATLAB scripts or with MATLAB Compiler and Builder tools, or simply
    % to examine the calculations your trained neural network performs.
    genFunction(net, 'myNeuralNetworkFunction');
    y = myNeuralNetworkFunction(x);
end
if (false)
    % Generate a matrix-only MATLAB function for neural network code
    % generation with MATLAB Coder tools.
    genFunction(net, 'myNeuralNetworkFunction', 'MatrixOnly', 'yes');
    y = myNeuralNetworkFunction(x);
end
if (false)
    % Generate a Simulink diagram for simulation or deployment with.
    % Simulink Coder tools.
    gensim(net);
end
```

10.3. Anexo 3. Algoritmo desarrollado con datos estandarizados

10.3.1. Creación de la red.

%Preparación de los datos para la red neuronal

ptotal=Input;

ttotal=Target;

N=size(ptotal,2);

%Porcentaje en los que se dividen los datos

prob_entr=0.7;

prob_vali=0.15;

prob_test=0.15;

N_entr=floor(N*prob_entr);

N_vali=floor(N*prob_vali);

N_test=N-N_entr-N_vali;

%Separación de los datos en entrenamiento, validación y test

entr_P=[]

entr_T = []; vali_P = []; vali_T = []; test_P = []; test_T = [];

VPerm=randperm(N);

entr_P=ptotal(:,VPerm(1:N_entr));

entr_T=ttotal(:,VPerm(1:N_entr));

```
entr_P=ptotal(:,(1:N_entr));  
  
VPerm=randperm(N);  
  
entr_P=ptotal(:,VPerm(1:N_entr));  
  
entr_T=ttotal(:,VPerm(1:N_entr));  
  
vali_P=ptotal(:,VPerm(N_entr+1:N_entr+N_vali));  
  
vali_T=ttotal(:,VPerm(N_entr+1:N_entr+N_vali));  
  
test_P=ptotal(:,VPerm(N_entr+N_vali+1:N));  
  
test_T=ttotal(:,VPerm(N_entr+N_vali+1:N));  
  
%Estandarización de datos  
  
[pstd, coefp]=mapstd(entr_P);  
  
[tstd, coeft]=mapstd(entr_T);  
  
valistd.P=mapstd('apply',vali_P,coefp);  
  
valistd.T = mapstd('apply',vali_T,coeft);  
  
teststd.P = mapstd('apply',test_P,coefp);  
  
teststd.T = mapstd('apply',test_T,coeft);  
  
%Creación de la red  
  
nocultas=30;  
  
nentrada=size(ptotal,1);  
  
nsalida=size(tttotal,1);
```

%Creación de la red

```
net = newff(pstd,tstd,[nocultas,nsalida],{'tansig','purelin'}, 'trainlm','learngdm','mse');
```

```
net.trainParam.show=100;
```

```
net.trainParam.goal=10^(-8);
```

```
net.trainParam.epochs=100;
```

```
net.trainParam.min_grad=10^(-6);
```

```
net.trainParam.max_fail=5;
```

%Inicialización de red

```
net=init(net);
```

%Entrenamiento de la red y cálculo de PSE

```
[net, tr, Y, E]=train(net, pstd, tstd, [], [], valistd,teststd);
```

```
size(net.IW{1,1},1)*size(net.IW{1,1},2)+size(net.b{1,1},1)+size(net.b{2,1},1)+size(net.LW{2,1},1)*size(net.LW{2,1},2);
```

```
NPar2 = nentrada*nocultas+nocultas+nocultas*nsalida+nsalida;
```

```
astd = sim(net,pstd);
```

```
MSE = mean((astd-tstd).^2)
```

```
RMSE = MSE/var(tstd)
```

%Validación cruzada

```
an=sim(net, mapstd('apply', ptotal, coefp));
```

```
a=mapstd('reverse',an,coef);
```

```
postreg(a,ttotal);
```

```
%% LA VALIDACIÓN CRUZADA es para ver output vs. target
```

```
%Matrices de pesos y sesgo (entradas y salidas estandarizadas)
```

```
net.IW{1,1}
```

```
net.b{1,1}
```

```
net.LW{2,1}
```

```
net.b{2,1}
```

```
IW=net.IW{1,1};
```

```
b1=net.b{1,1};
```

```
LW=net.lw{2,1};
```

```
b2=net.b{2,1};
```

10.3.2. Aplicación de la red neuronal para trazados sinusoidales

```
>> ResMRectostd=sim(net,mapstd('apply',MRecto,coefp));
```

```
>> ResMRecto=mapstd('reverse',ResMRectostd,coeft);
```

```
>> ResMSinod05std=sim(net,mapstd('apply',MSinod05,coefp));
```

```
>> ResMSinod05=mapstd('reverse',ResMSinod05std,coeft);
```

```
>> ResMSinod1std=sim(net,mapstd('apply',MSinod1,coefp));
```

```
>> ResMSinod1=mapstd('reverse',ResMSinod1std,coeft);
```