

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	106
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	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