

# UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA DE CAMINOS, CANALES Y PUERTOS

## MASTER UNIVERSITARIO EN TRANSPORTE, TERRITORIO Y URBANISMO

---



UNIVERSITAT  
POLITÈCNICA  
DE VALÈNCIA



### ESTUDIO Y OPTIMIZACIÓN DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA CONDUCCIÓN DE TRENES METROPOLITANOS DE LA CIUDAD DE VALENCIA

CURSO 2014 / 2015

ALUMNO:  
**IGNACIO VILLALBA SANCHIS**

TUTOR:  
**RICARDO INSA FRANCO**

---

VALENCIA, SEPTIEMBRE DE 2015



# Resumen

---

El diseño de marchas y la conducción de trenes metropolitanos se ha realizado generalmente sin tener en cuenta criterios energéticos, pese al gran potencial de ahorro que existe. Considerando la situación económica actual y junto con el aumento del precio de la energía, los operadores metropolitanos están cada vez más presionados, por lo que son necesarias nuevas medidas y mejoras que permitan proporcionar un servicio eficaz, rápido y seguro con el menor uso de energía posible.

La operación de trenes tiene un impacto muy importante en cuanto a la energía consumida en las redes metropolitanas por lo que interesa analizar estrategias para minimizar dicho consumo. Así pues, en el presente trabajo se ha desarrollado un modelo que permite analizar con precisión la energía consumida durante la circulación de un vehículo entre dos estaciones, bajo una conducción manual. Para construir el modelo se han considerado las ecuaciones que representan y controlan el comportamiento del vehículo y se han implementado en un simulador.

Una vez creado, el modelo se ha utilizado en la red de Metrovalencia, con el objetivo de validar la precisión del mismo y evaluar la capacidad de representar el comportamiento real. Gracias a los datos obtenidos a través de una campaña de medida ha sido posible comprobar la precisión del modelo en cuanto al consumo, tiempos de recorrido y perfiles de velocidad. De esta forma se ha podido validar la herramienta de simulación y aplicarla para estudiar y optimizar el consumo.

Tras la validación, el modelo se ha aplicado en diferentes escenarios para reducir el consumo, manteniendo los actuales tiempos de recorrido y con el ajuste de ciertos parámetros. Los resultados muestran que manteniendo los actuales tiempos de recorrido y bajo las restricciones operativas consideradas, es posible reducir el consumo considerablemente. Así pues, el estudio proporciona una herramienta de ayuda para determinar las futuras acciones encaminadas a reducir el consumo en la red de metro de Valencia con unos costes mínimos.

# Abstract

---

The speed profiles design on suburban railway networks has generally performed without energy criteria, despite the important range of energy savings. Considering the actual financial crisis and the price of energy, metro operators are under intense pressure to reduce costs, so they are necessary new strategies in order to provide a better, fast and safe railway without more energy requirements.

Traffic operation has a significant impact on energy consumption in metro lines and thus it is important to analyze strategies to minimize it. In this work a model was developed accurately to analyze the energy consumption of metropolitan trains during its normal service between two stations. The equations considered represent the behavior of a single vehicle and were implemented in a simulator.

A real line of the Valencia Underground has been considered obtaining energy values in order to validate its accuracy. According to the data obtained, the model has been validated in terms of consumption, journey times and velocity profiles, which allows its use for the potential energy savings.

After validation, the model has been applied into different scenarios in order to reduce the energy consumption, maintaining current travel times and setting certain parameters. The results show that under the operating restrictions considered, the consumption can be reduced considerably. Therefore, the study provide future upgrading actions for energy saving in the Valencia metro network with a reduced economic impact.

# Resum

---

El disseny de marxes i la conducció de trens metropolitanos s'ha realitzat generalment sense tindre en compte criteris energètics, a pesar del gran potencial d'estalvi que existeix. Considerant la actual situació econòmica i junt amb l'augment del preu de l'energia, els operadors metropolitanos estan cada volta més pressionats, sent per tant necessàries mesures i millores que permeten proporcionar un servici eficaç, ràpid i segur amb el menor ús d'energia possible.

L'operació de trens té un impacte molt important en l'energia consumida en les xarxes metropolitanos, afavorint l'estudi d'estratègies per a minimitzar aquest consum. Baix aquestes condicions, en el present treball s'ha desenvolupat un model que permet analitzar amb precisió l'energia consumida durant la circulació d'un vehicle entre dos estacions, davall una conducció manual. Per a construir el model s'han considerat les equacions que representen i controlen el comportament del vehicle i s'han implementat en un simulador.

Una vegada creat, el model s'ha utilitzat en la xarxa de Metrovalencia amb l'objectiu de validar la precisió del mateix i avaluar la capacitat de representar el comportament real. Gràcies a les dades obtingudes mitjançant una campanya de mesura ha sigut possible comprovar la precisió del model pel que fa al consum, temps de recorregut i perfils de velocitat. D'aquesta forma s'ha pogut validar la ferramenta i aplicar-la per a estudiar i optimitzar el consum.

Una volta realitzada la validació, el model s'ha aplicat en diferents casos per a tractar de reduir el consum, mantenint els actuals temps de recorregut i reajustant alguns paràmetres. Els resultats mostren que mantenint els actuals temps de recorregut i davall les restriccions operatives considerades, és possible reduir el consum considerablement. D'aquesta forma el model plantejat proporciona una ferramenta d'ajuda per a determinar les futures accions destinades a reduir el consum energètic de la xarxa de Metrovalencia amb unes mínimes inversions.

# Agradecimientos

---

En primer lugar quería agradecer la paciencia y ayuda por parte de mi tutor, Ricardo Insa, por haberme dado la oportunidad de aprender sobre todos los aspectos que conciernen a los ferrocarriles bajo una aproximación con rigor y criterio. Gracias a su colaboración ha sido posible llevar a cabo todo este trabajo que de otra forma nunca hubiera sido posible realizar.

Gracias a Victoria, por su comprensión, su ayuda, su paciencia, por su confianza en mí y por subir al mismo tren en el que me embarqué hace tiempo, sin un destino fijo pero con la certeza de viajar juntos, gracias por estar a mi lado.

A toda mi familia y en especial a mis padres, por su esfuerzo y confianza, pues por ellos he conseguido.

También quiero agradecer la paciencia, incluso en los viajes y en mis momentos más extravagantes, que tienen mis compañeros, especialmente Pablo I y el resto de compañeros que alguna vez ha compartido tiempo en el departamento como Pablo II, Carla, Rafa, Rosa, Michela, Juan Diego, Javi. A los compañeros de almuerzo, pues sirve de pausa donde recargamos pilas con las siempre bienvenidas tartas. También quisiera destacar la ayuda recibida por parte de Andrés, tanto por su colaboración, por su tiempo y su conocimiento, pues de su dedicación resulta parte del éxito de este trabajo.

No quería olvidarme de dar las gracias a Sebastián, por su ayuda y valiosa información aportada.

Para finalizar, cabe destacar pues que el presente trabajo ha sido posible gracias al convenio de colaboración firmado entre la Universitat Politècnica de València y Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (FGV) realizado el 7 de mayo de 2014 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).

# Índice

1.	INTRODUCCIÓN.....	13
1.1.	ANTECEDENTES.....	15
1.2.	OBJETIVOS.....	16
1.3.	METODOLOGÍA.....	17
2.	EL FERROCARRIL. CARACTERÍSTICAS DEL SISTEMA DE TRACCIÓN Y DE CONDUCCIÓN.....	19
2.1.	INTRODUCCIÓN.....	19
2.2.	ENERGÍA PARA LA TRACCIÓN.....	22
2.3.	SISTEMAS DE CONTROL Y SEGURIDAD DE TRENES EN LA OPERACIÓN.....	24
2.3.1	<i>Sistema de Frenado Automático Puntual (FAP)</i> .....	25
2.3.2	<i>Sistema Automatic Train Protection (ATP)</i> .....	26
2.3.3	<i>Sistema Automatic Train Operation (ATO)</i> .....	30
3.	EL CONSUMO ELÉCTRICO Y LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN FERROCARRILES METROPOLITANOS.....	37
3.1.	EL CONSUMO ENERGÉTICO EN UN SISTEMA METROPOLITANO.....	39
3.2.	ASPECTOS QUE CONDICIONAN EL CONSUMO EN UN TREN.....	44
3.2.1	<i>Energía para la tracción y resistencias al avance</i> .....	47
3.2.2	<i>Energía para alimentar equipos auxiliares</i> .....	49
3.2.3	<i>Energía perdida en la cadena de tracción y en equipos</i> .....	50
3.3.	ACCIONES PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA EXPLOTACIÓN.....	51
3.3.1	<i>Conducción eficiente</i> .....	53
3.3.2	<i>Uso del frenado regenerativo y sistemas de acumulación de energía</i> .....	57
3.3.3	<i>Reducción del tiempo de parada en estaciones</i> .....	65
3.3.4	<i>Automatización de la operación</i> .....	66
4.	DESCRIPCIÓN DE LA RED METROPOLITANA DE ESTUDIO.....	69
4.1.	LÍNEAS DE ESTUDIO.....	75
4.2.	MATERIAL RODANTE.....	81
5.	DESCRIPCIÓN DE LOS DISPOSITIVOS DE MEDIDA Y DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN.....	88
5.1.	DESCRIPCIÓN DE LOS EQUIPOS DE REGISTRO.....	89
5.2.	DESCRIPCIÓN DE LA CAMPAÑA DE MEDICIÓN.....	95
5.3.	DATOS DE CONSUMO ENERGÉTICO OBTENIDOS.....	97
5.3.1	<i>Línea 1. Bétera/Seminari – Torrent/Vilanova de Castelló</i> .....	98
5.3.2	<i>Línea 2. Lliria/Paterna – Torrent Avinguda</i> .....	100
5.3.3	<i>Línea 3. Rafelbunyol – Aeroport</i> .....	102
5.3.4	<i>Línea 5. Marítim-Serreria – Aeroport</i> .....	104
5.3.5	<i>Línea 7. Marítim-Serreria – Torrent Avinguda</i> .....	106
5.4.	COMPARATIVA ENTRE LÍNEAS.....	108
6.	DESARROLLO DEL MODELO DE CONSUMO ENERGÉTICO.....	111
6.1.	INTRODUCCIÓN.....	111
6.2.	MODELO DE SIMULACIÓN.....	114
6.2.1	<i>Restricciones del vehículo y del trazado</i> .....	115
6.2.2	<i>Dinámica del vehículo</i> .....	116
6.2.3	<i>Comportamiento del motor</i> .....	122
6.2.4	<i>Regulador de conducción</i> .....	124
6.2.5	<i>Posición, velocidad y aceleración</i> .....	125



6.2.6	<i>Cálculo del consumo energético</i> .....	126
6.3.	OBTENCIÓN DE RESULTADOS .....	127
6.3.1	<i>Validación de resultados</i> .....	129
7.	SIMULACIÓN DE ESCENARIOS Y CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO .....	148
7.1.	CRITERIOS PARA EL DISEÑO DE MARCHAS ECONÓMICAS .....	150
7.2.	CASOS DE ESTUDIO .....	151
8.	CONCLUSIONES Y FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	169
8.1.	CONCLUSIONES .....	170
8.2.	FUTURAS LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN .....	172
9.	BIBLIOGRAFÍA .....	175
10.	ANEJOS .....	180
	ANEJO I: CONSUMOS ESPECÍFICOS ENTRE ESTACIONES (kWh) .....	180





## Listado de figuras

Figura 2.1. Distribución de km de vía por tipo de tracción en España, según datos de ADIF (2014). Elaboración propia. ....	23
Figura 2.2. Baliza ATP (sobre traviesa) y antena de recepción en vehículo (arriba). Fuente: <a href="https://ruedaycarril.wordpress.com/">https://ruedaycarril.wordpress.com/</a> (accedido el 7 de Jun de 2015). ....	27
Figura 2.3. ATP con códigos de velocidad. Fuente. Melis et al. (2008). ....	28
Figura 2.4. ATP con distancia objetivo. Fuente. Melis et al. (2008). ....	29
Figura 2.5. Baliza APR Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV). ....	29
Figura 2.6. Regulación del tráfico en el sistema ATO. Fuente: Estudio de la automatización CBTC en la línea 2 de metro de Barcelona. Antonio Francisco Carayol Romero. ....	33
Figura 2.7. Ejemplo representativo de velocidades del sistema ATO. Elaboración propia. ....	33
Figura 2.8. Ejemplo representativo de marchas ATO y consumo asociado. Elaboración propia. ....	34
Figura 2.9. Bobina del sensor ATO de la Línea Azul del Metro Municipal de Yokohama. Fuente: <a href="http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/ATO_chijyoushi.JPG">http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/ATO_chijyoushi.JPG</a> (accedido 25 Mayo 2015). ....	35
Figura 2.10. Representación de lectura de lazo ATO. Elaboración propia. ....	36
Figura 2.11. Representación de posición de lazos ATO en FGV. Elaboración propia. ....	36
Figura 3.1. Flujos energéticos en el ferrocarril. Fuente: Máster en sistemas ferroviarios gestión energética en el ferrocarril. Alberto García Álvarez. ....	38
Figura 3.2. Distribución de consumo energético en una red metropolitana. Elaboración propia. ....	41
Figura 3.3. Flujos de energía en una red de ferrocarril. Fuente: López el al. Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos. ....	42
Figura 3.4. Esquema sobre el balance energético de un tren metropolitano. Elaboración propia. ....	45
Figura 3.5. Distribución de pesos respecto al consumo de energía en un vehículo metropolitano. Elaboración propia. ....	46
Figura 3.6. Flujo del consumo de un tren metropolitano. Elaboración propia. ....	46
Figura 3.7. Esquema de modos de funcionamiento y consumo. Elaboración propia. ....	48
Figura 3.8. Equipo de aire acondicionado para instalar en un ferrocarril metropolitano. Fuente: <a href="http://www.toshiba.co.jp">http://www.toshiba.co.jp</a> . ....	49
Figura 3.9. Consumo de energía en función del tiempo de viaje. Fuente: Cucala García, P., Fernández Cardador, A., Rodríguez Pecharromán, R. (2013). "Reducción del consumo energético en el ferrocarril". ....	53
Figura 3.10. Equipo de reóstatos de ferrocarril alojados en el techo. Fuente: Metal Deploye resistor. ....	58
Figura 3.11. Usos y flujo de la energía regenerada durante la frenada. Fuente: Elaboración propia. ....	60
Figura 3.12. Baterías de vehículo. Fuente: Siemens. ....	61
Figura 3.13. Supercondensadores en techo de vehículo. Fuente: Maxwell Technologies. ....	62
Figura 3.14. Volante de inercia para vehículo ferroviario. Fuente: Ricardo. ....	63
Figura 3.15. Uso de energía regenerada por otro vehículo. Fuente: Elaboración propia. ....	64
Figura 3.16. Comparativa de diferentes marchas. Fuente: Metro Madrid. ....	67
Figura 4.1. Esquema de la organización de FGV. Elaboración propia. ....	69
Figura 4.2. Plano de la red completa de Metrovalencia, en vigor desde marzo de 2015. Fuente: FGV. ....	71
Figura 4.3. Esquema de flujo energético y tensión de la red de Metrovalencia. Elaboración propia. ....	73
Figura 4.4. Reparto del consumo energético. Elaboración propia. ....	74
Figura 4.5. Paneles solares en el taller de Machado de FGV. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.treneando.com">www.treneando.com</a> (accedido el 15 de Mayo de 2015). ....	74
Figura 4.6. Imágenes de la línea 1 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.vivireltren.es">www.vivireltren.es</a> . ....	76
Figura 4.7. Imágenes de la línea 2 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.urbanrail.net">www.urbanrail.net</a> . ....	77
Figura 4.8. Imágenes de la línea 3 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.ferropedia.es">www.ferropedia.es</a> . ....	78
Figura 4.9. Imágenes de la línea 5 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.urbanrail.net">www.urbanrail.net</a> . ....	79
Figura 4.10. Imágenes de la línea 7 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de <a href="http://www.vialibre-ffe.com">www.vialibre-ffe.com</a> . ....	80
Figura 4.11. Sección de la serie Vossloh 4300 en 4 y 5 coches. Fuente: Vossloh. ....	81
Figura 4.12. Diferentes vistas de la serie Vossloh 4300. Fuente: Vossloh. ....	82
Figura 4.13. Pupitre de serie Vossloh 4300. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV). ....	84
Figura 4.14. Velocímetro e indicaciones. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV). ....	86
Figura 5.1. Esquema de tareas y vehículo equipado. Elaboración propia. ....	89
Figura 5.2. Dimensiones e imagen del equipo de medida. Fuente: Mors Smitt. ....	90
Figura 5.3. Ficha de características del MSAVDC empleado. Fuente: Mors Smitt. ....	90
Figura 5.4. Esquema de montaje de los dispositivos instalados. Elaboración propia. ....	92

Figura 5.5. Imágenes de los dispositivos instalados. Elaboración propia.....	93
Figura 5.6. Esquema de medida de la energía consumida. Elaboración propia.....	94
Figura 5.7. Relación entre voltaje y velocidad en la sonda. Elaboración propia.....	95
Figura 5.8. Valores de consumo en la línea 1 por km. Elaboración propia.....	98
Figura 5.9. Valores de energía regenerada y km en la línea 1, por trayecto. Elaboración propia.....	99
Figura 5.10. Valores de consumo en la línea 2 por km. Elaboración propia.....	100
Figura 5.11. Valores de energía regenerada y km en la línea 2, por trayecto. Elaboración propia.....	101
Figura 5.12. Valores de consumo en la línea 3 por km. Elaboración propia.....	102
Figura 5.13. Valores de energía regenerada y km en la línea 3, por trayecto. Elaboración propia.....	103
Figura 5.14. Valores de consumo en la línea 5 por km. Elaboración propia.....	104
Figura 5.15. Valores de energía regenerada y km en la línea 5, por trayecto. Elaboración propia.....	105
Figura 5.16. Valores de consumo en la línea 7 por km. Elaboración propia.....	106
Figura 5.17. Valores de energía regenerada y km en la línea 7, por trayecto. Elaboración propia.....	107
Figura 5.18. Valores de consumo medio por km. Elaboración propia.....	108
Figura 5.19. Valores de consumo medio por km y viajero. Elaboración propia.....	109
Figura 5.20. Valores de recuperación energética medios por líneas. Elaboración propia.....	110
Figura 6.1. Esquema simplificado para llevar a cabo el modelo de simulación. Elaboración propia.....	114
Figura 6.2. Resistencias al en función de la velocidad y la masa estática total. Elaboración propia.....	120
Figura 6.3. Resistencias en curva en función del radio y de la masa estática. Elaboración propia.....	121
Figura 6.4. Valores de resistencia en función de la pendiente. Elaboración propia.....	122
Figura 6.5. Curva de fuerza de tracción para una locomotora. Elaboración propia.....	123
Figura 6.6. Imágenes de posición de la palanca del regulador. Fuente: <a href="http://todotrenesarg.com.ar/">http://todotrenesarg.com.ar/</a> .....	125
Figura 6.7. Ejemplo de resultados obtenidos con el modelo planteado. Elaboración propia.....	128
Figura 6.8. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 1 analizado (sentido Bétera-Seminari CEU). Elaboración propia.....	130
Figura 6.9. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Bétera-Seminari_CEU. Elaboración propia.....	131
Figura 6.10. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Seminari_CEU-Bétera. Elaboración propia.....	132
Figura 6.11. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.....	133
Figura 6.12. Comparativa de velocidades, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.....	134
Figura 6.13. Comparativa de velocidades, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia.....	134
Figura 6.14. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 2 analizado, (sentido Lliria-L'Èliana). Elaboración propia.....	135
Figura 6.15. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Lliria-L'Èliana. Elaboración propia.....	136
Figura 6.16. Comparativa de consumo por estaciones, tramo L'Èliana-Lliria. Elaboración propia.....	137
Figura 6.17. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.....	137
Figura 6.18. Comparativa de velocidades, tramo Benaguasil 2n-Benaguasil 1r. Elaboración propia.....	138
Figura 6.19. Comparativa de velocidades, tramo Pobla de Vallbona-Torre del Virrei. Elaboración propia.....	138
Figura 6.20. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 3 analizado (sentido Rafelbunyal-Almàssera). Elaboración propia.....	139
Figura 6.21. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Rafelbunyal - Almàssera. Elaboración propia.....	141
Figura 6.22. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Almàssera - Rafelbunyal. Elaboración propia.....	141
Figura 6.23. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.....	142
Figura 6.24. Comparativa de velocidades, tramo Rafelbunyal-Pobla de Farnals. Elaboración propia.....	143
Figura 6.25. Comparativa de velocidades, tramo Pobla de Farnals-Rafelbunyal. Elaboración propia.....	143
Figura 6.26. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 7 analizado (sentido Valencia Sud-Torrent). Elaboración propia.....	144
Figura 6.27. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Valencia Sud-Torrent. Elaboración propia.....	145
Figura 6.28. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Torrent-Valencia Sud. Elaboración propia.....	145
Figura 6.29. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.....	146
Figura 6.30. Comparativa de velocidades, tramo Paiporta-Picanya. Elaboración propia.....	147
Figura 6.31. Comparativa de velocidades, tramo Picanya-Paiporta. Elaboración propia.....	147
Figura 7.1. Ejemplo de consumo energético en función del tiempo de viaje. Elaboración propia.....	151
Figura 7.2. Espacio de soluciones. Elaboración propia.....	152
Figura 7.3. Espacio de soluciones, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.....	153

Figura 7.4. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia. ....	154
Figura 7.5. Espacio de soluciones, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia. ....	155
Figura 7.6. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia. ....	156
Figura 7.7. Espacio de soluciones, tramo Lliria-Benaguasil 2n. Elaboración propia. ....	157
Figura 7.8. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Lliria-Benaguasil 2n. Elaboración propia. ....	158
Figura 7.9. Espacio de soluciones, tramo Benaguasil 2n-Lliria. Elaboración propia. ....	159
Figura 7.10. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Benaguasil 2n-Lliria. Elaboración propia. ....	160
Figura 7.11. Espacio de soluciones, tramo Pobla de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia. ....	161
Figura 7.12. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Pobla de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia. ....	162
Figura 7.13. Espacio de soluciones, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia. ....	163
Figura 7.14. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia. ....	164
Figura 7.15. Espacio de soluciones, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboración propia. ....	165
Figura 7.16. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboración propia. ..	166
Figura 7.17. Espacio de soluciones, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia. ....	167
Figura 7.18. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia. ..	168
Figura A.1. Consumos, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia. ....	180
Figura A.2. Consumos, tramo S.Psiquiàtric-Masies. Elaboración propia. ....	180
Figura A.3. Consumos, tramo Masies-Seminari_CEU. Elaboración propia. ....	181
Figura A.4. Consumos, tramo Seminari_CEU-Masies. Elaboración propia. ....	181
Figura A.5. Consumos, tramo Masies-S.Psiquiàtric. Elaboración propia. ....	182
Figura A.6. Consumos, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia. ....	182
Figura A.7. Consumos, tramo Lliria-Benaguasil 2n. Elaboración propia. ....	183
Figura A.8. Consumos, tramo Benaguasil 2n-Benaguasil 1r. Elaboración propia. ....	183
Figura A.9. Consumos, tramo Benaguasil 1r-Pobla de Vallbona. Elaboración propia. ....	184
Figura A.10. Consumos, tramo Pobla de Vallbona-Torre del Virrei. Elaboración propia. ....	184
Figura A.11. Consumos, tramo Torre del Virrei-L'Èliana. Elaboración propia. ....	185
Figura A.12. Consumos, tramo L'Èliana-Torre de Virrei. Elaboración propia. ....	185
Figura A.13. Consumos, tramo Torre de Virrei-Pobla de Vallbona. Elaboración propia. ....	186
Figura A.14. Consumos, tramo Pobla de Vallbona-Benaguasil 1r. Elaboración propia. ....	186
Figura A.15. Consumos, tramo Benaguasil 1r-Benaguasil 2n. Elaboración propia. ....	187
Figura A.16. Consumos, tramo Benaguasil 2n-Lliria. Elaboración propia. ....	187
Figura A.17. Consumos, tramo Rafelbunyol-Pobla de Farnals. Elaboración propia. ....	188
Figura A.18. Consumos, tramo Pobla de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia. ....	188
Figura A.19. Consumos, tramo Massamagrell-Museros. Elaboración propia. ....	189
Figura A.20. Consumos, tramo Museros-Albalat dels Sorells. Elaboración propia. ....	189
Figura A.21. Consumos, tramo Albalat dels Sorells-Foios. Elaboración propia. ....	189
Figura A.22. Consumos, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia. ....	190
Figura A.23. Consumos, tramo Meliana-Almàssera. Elaboración propia. ....	190
Figura A.24. Consumos, tramo Pobla de Farnals-Rafelbunyol. Elaboración propia. ....	191
Figura A.25. Consumos, tramo Massamagrell-Pobla de Farnals. Elaboración propia. ....	191
Figura A.26. Consumos, tramo Museros-Massamagrell. Elaboración propia. ....	192
Figura A.27. Consumos, tramo Albalat dels Sorells-Museros. Elaboración propia. ....	192
Figura A.28. Consumos, tramo Foios-Albalat dels Sorells. Elaboración propia. ....	193
Figura A.29. Consumos, tramo Meliana-Foios. Elaboración propia. ....	193
Figura A.30. Consumos, tramo Almàssera- Meliana. Elaboración propia. ....	194
Figura A.31. Consumos, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboración propia. ....	195
Figura A.32. Consumos, tramo Paiporta-Picanya. Elaboración propia. ....	195
Figura A.33. Consumos, tramo Picanya-Torrent. Elaboración propia. ....	196
Figura A.34. Consumos, tramo Torrent-Picanya. Elaboración propia. ....	196
Figura A.35. Consumos, tramo Picanya-Paiporta. Elaboración propia. ....	197
Figura A.36. Consumos, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia. ....	197

## Listado de Tablas

Tabla 2.1. Sistemas de electrificación en redes metropolitanas de España. Elaboración propia. ....	24
Tabla 2.2. Grado de automatización según norma IEC 62290-1. ....	31
Tabla 3.1. Pérdidas en función de la tensión nominal de la red. Fuente: Pilo de la Fuente et al. Flujos de la energía de la electricidad para el transporte, Monografías EnerTrans; 2008 .....	40
Tabla 3.2. Consumo energético de las redes metropolitanas más importantes de España. Fuente: Datos obtenidos a partir de los informes anuales de cada red metropolitana. ....	44
Tabla 3.3. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua. Fuente: García Álvarez, A; Martín Cañizares, M. Monografía 5: Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción. ....	51
Tabla 3.4. Valores de tiempos y energía consumida del simulador desarrollado. Fuente: Renfe. ....	56
Tabla 3.5. Valores de posible energía recuperada. Fuente: IZT. ....	59
Tabla 3.6. Valores de energía devuelta y quemada. Fuente: Ingeteam. ....	65
Tabla 4.1. Datos principales de la red de Metrovalencia. Fuente: FGV. ....	70
Tabla 4.2. Datos de la red de Metrovalencia por líneas. Fuente: FGV .....	72
Tabla 4.3. Consumo energético de Metrovalencia. Fuente: FGV. ....	73
Tabla 4.4. Características de la serie 4300 de Vossloh. Fuente: Vossloh. ....	83
Tabla 4.5. Representación del panel de conducción. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV) .....	85
Tabla 4.6. Tabla de modos de conducción. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV)....	86
Tabla 6.1. Valores de aceleraciones y deceleraciones en servicio para vehículo Vossloh serie 4300. ....	115
Tabla 6.2. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 1. Elaboración propia. ....	131
Tabla 6.3. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 2. Elaboración propia. ....	136
Tabla 6.4. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 3. Elaboración propia. ....	140
Tabla 6.5. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 7. Elaboración propia. ....	145

# 1. Introducción

---

Durante las últimas décadas, aspectos y cuestiones relativas a la sostenibilidad, el medio ambiente y el ahorro de energético están recibiendo mucha atención y preocupación en todos los ámbitos de la sociedad. Bajo esta nueva perspectiva y siendo conscientes de que el transporte es una de las mayores fuentes de emisión de gases de efecto invernadero (según la OCDE, el transporte es responsable del 36 % de las emisiones mundiales de CO<sub>2</sub>), existe un interés especial en el desarrollo de modos y medidas que permitan limitar y reducir la energía que se consume en el transporte y, por lo tanto, las emisiones que generan, sin que ello conlleve un perjuicio en el servicio que se proporciona.

Así pues, considerando el ámbito urbano, es posible observar como existe una gran oferta de en cuanto a medios de transporte, si bien el ferrocarril se caracteriza por ser el único modo capaz de proporcionar al mismo tiempo ciertas características positivas como la eficiencia energética (menor consumo energético por viajero), la seguridad y la gran capacidad de transporte, en comparativa con el resto de medios.

Gracias a las características citadas y especialmente en cuanto a la que se refiere al consumo energético, el ferrocarril se presenta como un pilar fundamental en la protección del medio ambiente y el desarrollo en el ámbito del transporte, puesto que el actual modelo de transporte dista mucho de ser sostenible desde el punto de vista energético. Por ello, durante las últimas décadas se están desarrollando importantes esfuerzos para situar a este medio como la columna vertebral del transporte público urbano e interurbano.

Si bien se ha destacado la importante ventaja energética que presenta el ferrocarril frente al resto de modos, la cantidad de energía consumida por este modo de transporte es todavía muy importante y los costes de la misma no hacen más que aumentar, por lo que siguen siendo necesario llevar a cabo medidas y actuaciones con el objetivo de conseguir un transporte mucho más eficiente y sostenible desde el punto de vista social, ambiental y económico.

Para conseguir mejorar la eficiencia energética del transporte ferroviario existen diversas estrategias y actuaciones para las que su ámbito de actuación se concentra bien en la infraestructura, en el diseño del vehículo y/o en la propia regulación y operación del tráfico.

En primer lugar, las actuaciones referentes a la infraestructura incluyen generalmente mejoras en el diseño eficiente del trazado (en cuanto a pendientes, curvas, peraltes, etc.), la instalación de subestaciones reversibles en líneas alimentadas en corriente continua y la instalación de acumuladores de energía en tierra para mejorar el aprovechamiento de la energía regenerada en los frenados.

En segundo lugar, algunos de los aspectos de mejora relacionados con los vehículos que tienen un impacto directo sobre el consumo energético son mejoras en la aerodinámica, el rendimiento del sistema de tracción, el peso del vehículo, la instalación de acumuladores de energía y/o la reducción del consumo de los equipos auxiliares embarcados.

No obstante las ventajas que pueden proporcionar las actuaciones descritas anteriormente en cuanto a la infraestructura y vehículos, se trata de medidas cuya implantación a corto plazo es difícilmente aplicable, pues tanto la infraestructura como los vehículos son elementos rígidos que admiten poco cambios o son muy complejos cuando éstos ya existen. Además, cualquier modificación llevada a cabo supone realizar importantes inversiones económicas, siendo por tanto necesario establecer una adecuada planificación a largo plazo para poder desarrollar cualquier medida de este tipo.

En tercer lugar se encuentran las estrategias en la operación del tráfico y su gestión como son la adecuación de horarios, paradas, optimización de la marcha, etc. Un aspecto importante de este tipo de actuaciones es que pueden ser aplicadas a corto plazo y, en general, con inversiones reducidas, por lo que su desarrollo e implantación presenta especial interés. No obstante, el estudio y mejora de la operación de tráfico supone un problema de optimización a gran escala, con una elevada no linealidad e importantes restricciones y condiciones de contorno. Es en este campo, y más concretamente en el estudio y la mejora de las marchas, en el cual se centrará el presente Trabajo Final de Máster.

Así pues, el trabajo planteado pretende abordar el estudio del consumo energético de una red metropolitana de transporte ferroviario, además de desarrollar y aplicar un modelo de simulación de la conducción manual.

## 1.1. Antecedentes

En la búsqueda de llevar a cabo una modernización y mejora de los servicios prestados así como para asegurar su viabilidad tanto económica como ambiental durante los últimos años los operadores ferroviarios están claramente abordando el aspecto de la reducción del consumo energético, en todas las vertientes y para todo tipo de instalaciones y vehículos.

Así pues, uno de los aspectos más relevantes durante la fase de diseño y explotación de una infraestructura y que engloba aspectos técnicos, funcionales, económicos y medioambientales es el consumo energético que conlleva la operación. En el caso de los ferrocarriles metropolitanos, su gran expansión durante los últimos años ha provocado que sea una parte importante de la energía que se consume en las ciudades modernas. Además, desde el punto de vista de las compañías y administraciones ferroviarias metropolitanas, la operación de los vehículos supone el segundo aspecto con mayor gasto, únicamente superado por el coste de personal.

Si bien tal y como se ha comentado previamente la energía consumida es uno de los principales aspectos en cuanto a los costes, cabe destacar que existen pocos estudios publicados y no se dispone de clara información en cuanto a los detalles y factores que lo condicionan. Ante la falta de datos es posible comprender que se hace difícil determinar cuál es la política de explotación adecuada y en la que considere el consumo energético como un factor decisivo. Es por ello que, generalmente, se recurre al uso de valores medios globales, si bien este tipo de valores no siempre son adecuados cuando se desea realizar un estudio más en profundidad. Además, hay que tener presente que el consumo energético presenta una gran variabilidad, debido a la existencia de diferentes tipos de vehículo, infraestructura, servicios, formas de operación y políticas de precios, complicando aún más si cabe su determinación.

Por último, debido a la conducción manual que se realiza en parte de la red (muchas redes tienen sistemas automáticos pero no en la totalidad de la red, como es el caso de la red de la ciudad de Valencia), el factor humano condiciona de forma importante el consumo.

Bajo estos condicionantes, tradicionalmente la operación y la conducción de los ferrocarriles metropolitanos se ha realizado considerando únicamente criterios operacionales, es decir, considerando los tiempos de viaje y el confort del viajero, sin tener en cuenta otros aspectos. Hoy en día esta aproximación ya no es adecuada, especialmente por la crisis económica y por el problema medioambiental de emisiones, por lo que es necesario tener en cuenta criterios de eficiencia energética, especialmente si se considera el gran potencial de ahorro que presenta el ferrocarril metropolitano.

## 1.2. Objetivos

Los principales objetivos del presente trabajo son el estudio de consumo energético en trenes metropolitanos y el desarrollo de una herramienta de simulación de la conducción manual con dos objetivos: representar las condiciones actuales de operación y posibilitar la reducción del consumo energético mediante la optimización de la misma.

La mejora energética pretende conseguirse sin reducir la calidad del servicio, los tiempos de recorrido y el confort. Para el presente trabajo se realizarán simulaciones en escenarios sencillos (entre dos estaciones contiguas) para conocer las posibilidades que ofrece el modelo y sentar de esta forma unas bases sólidas para futuros desarrollos.

Por otra parte, se pretende poder conocer cuál es el impacto sobre la energía consumida que se conseguiría si se aplican ciertos cambios en la operación de los trenes, con el objetivo de realizar de forma más eficiente dicho servicio.

De forma más específica, los objetivos que se quieren cubrir mediante la elaboración del presente trabajo, son:

- Analizar y tratar los datos de los consumos de energía registrados en diferentes líneas de una red en explotación. El procesado y tratamiento se plantea necesario pues los valores y las cantidades de energía consumidas por los diferentes elementos



del tren no permiten su estudio directamente. A través del estudio será posible analizar los resultados con un nivel de detalle suficiente para analizar las diferencias y particularidades de cada línea y establecer los criterios adecuados para desarrollar el modelo de consumo.

- Desarrollo de una herramienta de simulación de consumo energético en ferrocarriles metropolitanos eléctricos en conducción manual, capaz de obtener resultados precisos y que representen la explotación real. Para ello se contará con datos reales que permitirán validar el modelo para unos determinados trayecto.
- Aplicación del modelo y optimización de la operación de trenes metropolitanos mediante la que se consiga una reducción del consumo energético. Gracias a la ayuda del modelo de consumo será posible plantear diferentes escenarios y simular la energía consumida en dichas condiciones.
- Ayuda en la toma de decisiones en la operación bajo criterios energéticos, gracias a la posibilidad de evaluar y analizar la sensibilidad energética de una línea a un posible cambio respecto de la situación de partida.

El modelo planteado, por tanto, se configura como un aspecto fundamental para el estudio del consumo de energía y su gestión en líneas ferroviarias en las que se emplea tracción eléctrica.

Las principales aportaciones que plantea este estudio residen en la capacidad de validar el modelo con datos reales la operación de trenes metropolitanos y aplicarlo para evaluar el potencial ahorro energético (y por consiguiente, de costes) que poseen las estrategias de conducción eficiente. Esta herramienta puede ser muy interesante para las operadoras de ferrocarriles metropolitanos en cuanto permite simular el consumo energético de un vehículo, con un coste prácticamente nulo.

### **1.3. Metodología**

Tal y como se ha comentado previamente, a lo largo del presente trabajo se analizará y estudiará el consumo energético, particularizado a la red metropolitana de Valencia. Para ello, el trabajo se iniciará a través de una introducción al ferrocarril y se analizará la conducción manual y automática que generalmente se produce en las redes metropolitanas

actuales, como punto de partida para comprender el funcionamiento de las mismas y las condiciones de operación.

En segundo lugar, se analizarán las características y los aspectos que condicionan el consumo en una red metropolitana, describiendo las principales medidas y actuaciones que pueden ser aplicadas para la mejora de la eficiencia energética.

Seguidamente se llevará a cabo la descripción de la red de estudio, mediante la descripción de las líneas objeto de análisis y del material móvil que circula por las mismas, con objeto de presentar el escenario y los elementos para los cuales se llevará a cabo el estudio.

Posteriormente se describirá el procedimiento de montaje de los equipos de registro y la campaña de medida llevada a cabo en un tren de la red metropolitana de Valencia y cuáles son los datos y variables registradas, las cuales serán fundamentales para el estudio y mejora del consumo.

Tras esto, se analizará la información obtenida y se evaluará el consumo para cada una de las líneas estudiadas, para poder construir el modelo de consumo capaz de representar el comportamiento de un vehículo a lo largo de las líneas analizadas, en función de las variables registradas.

Finalmente, el modelo de consumo será utilizado en diferentes tramos, para cada una de las líneas estudiadas, con el fin de minimizar el consumo y evaluar el potencial de ahorro económico y de reducción de consumo que sería posible conseguir, respecto de la situación actual. Para ello, la mejora de la conducción se llevará a cabo teniendo siempre en consideración aspectos fundamentales de la explotación ferroviaria como son la seguridad, confort, restricciones del vehículo, de la infraestructura, etc.

Por último, se expondrán las conclusiones y una serie de futuras líneas de investigación. Con todo ello, el trabajo plantea un especial interés, por cuanto está basado en datos reales y obtenidos en la red de FGV del área metropolitana de Valencia.

## 2. El ferrocarril. Características del sistema de tracción y de conducción

---

### 2.1. Introducción

El ferrocarril surge en la primera mitad del siglo XIX en el seno de la Revolución industrial gracias a la construcción de la primera línea de ferrocarril del mundo, el 15 de Abril de 1830 entre las ciudades de Liverpool y Manchester. Desde los primeros años de su nacimiento, el transporte ferroviario adquiere una gran importancia tanto en el transporte, la comunicación como en el desarrollo de las sociedades, llegando a ser un elemento clave en la transformación de la economía.

En cuanto al ferrocarril en el ámbito metropolitano, ya con la aparición del primer metro del mundo en Londres en el año 1863 explotado con locomotoras de vapor, este medio de transporte se ha convertido en un pilar fundamental e indispensable en todas las grandes ciudades del mundo.

Si bien el sector del ferrocarril ha experimentado numerosos cambios, avances, reestructuraciones y demás procesos, la importancia de este modo de transporte no ha disminuido en la actualidad, puesto que hoy en día no es posible entender muchos aspectos de la vida actual sin el papel fundamental que juega el ferrocarril, especialmente en la organización del territorio y en la reestructuración de las redes de ciudades.

Si se consideran las diferentes características del transporte, el ferrocarril presenta unas características intrínsecas que le proporcionan unas ventajas frente a otros tipos de transporte (Riol, 2013). Así pues, es posible destacar:

- **Capacidad:** Es un medio de transporte masivo, capaz de transportar una gran cantidad de viajeros o mercancías, con una ocupación de suelo inferior a la de la carretera.
- **Seguridad:** Es un modo muy seguro, con una tasa de accidentalidad reducida y un número de muertes muy pequeño.

- **Eficiencia Energética:** El ferrocarril es sin duda el modo de transporte terrestre más eficiente, bien por la baja resistencia en el contacto rueda-carril como por la tracción eléctrica, la cual proporciona ventajas frente a otros modos de transporte.
- **Contaminación:** La electrificación de la mayoría de las líneas férreas permite conseguir realizar el transporte con unas emisiones de gases de efecto invernadero reducidas, las cuales se producen en los centros de generación de energía que se encuentran generalmente alejadas de las ciudades.
- **Regularidad:** Debido a su configuración y plataforma reservada, la puntualidad de los servicios ferroviarios alcanza en España más del 90 % en trenes de largo recorrido, siendo mayor en servicios de cercanías.
- **Comodidad:** El grado de confort se ha incrementado notablemente durante las últimas décadas, estando limitados los niveles de aceleración que experimentan los viajeros y las sollicitaciones dinámicas.

Pese a estas características ventajosas frente a otros modos de transporte, su participación en el reparto modal del transporte de viajeros y mercancías ha sido generalmente inferior al que se cabría esperar, en parte por una mala administración y la falta de inversiones. Así pues, tras el auge de las primeras décadas y la gran expansión experimentada las inversiones dedicadas a las infraestructuras de transporte han apostado claramente por la carretera en detrimento del ferrocarril. Además, la irrupción de los vehículos a motor ha supuesto un serio competidor, llevando al ferrocarril a una situación compleja donde su protagonismo se ha ido reduciendo progresivamente a lo largo de las últimas décadas.

Sin embargo, la actual coyuntura y la introducción de criterios de sostenibilidad energética en el transporte hace necesario afrontar nuevos retos, potenciando las actuaciones que fomenten una movilidad mucho más sostenible a la vez que se aborde la internalización de los costes sociales y ambientales. Bajo estos condicionantes y para poder alcanzar los objetivos establecidos, el ferrocarril se presenta como uno de los pilares clave, por lo que las diferentes estrategias que se están llevando a cabo tanto en España como en el resto de Europa pretenden llevar a cabo un gran proceso de reactivación para situarlo al frente del desarrollo económico.

El mayor exponente de este resurgir en España y que plantea un futuro esperanzador lo componen los planes de infraestructura ferroviaria que se están desarrollando, especialmente en cuanto a las nuevas líneas y trenes de alta velocidad que se han extendido a lo largo del territorio nacional (además de las conexiones realizadas con Francia), a las que se une el proceso de liberalización que parece iniciarse durante estos últimos años.

Si bien en el ámbito de la media y larga distancia el impulso ha sido notable, no menos importante está siendo la integración de los sistemas de transporte urbano y metropolitano ferroviario. Este tipo de transporte está constituido por trenes que circulan en áreas urbanas, generalmente en túnel, con tracción eléctrica. En comparación con el tranvía convencional, poseen una mayor capacidad y velocidad.

Así pues, la implantación de estos nuevos sistemas de metro se ha llevado a cabo como respuesta al crecimiento de las ciudades y a las nuevas necesidades de movilidad, reduciendo el nivel de contaminación y contribuyendo a la mejora de la calidad de vida de los ciudadanos. Este tipo de servicios suele tener un horario diurno, cubriendo el perímetro suburbano de las grandes ciudades, facilitando los desplazamientos de grandes masas de personas en cortas distancias gracias a las múltiples paradas que realizan, generalmente para unir lugares de residencia y de trabajo.

En consecuencia, durante los últimos años ciudades como Madrid y Barcelona han visto ampliada sustancialmente su red metropolitana. Como ejemplo, entre los años 1995 y 1999 Metro de Madrid puso en servicio 56 nuevos kilómetros de vía (37,5 en túnel) además de 39 estaciones. Por su parte, otras ciudades que no disponían de este tipo de servicios se han sumado a la construcción y puesta en marcha de ferrocarriles metropolitanos como Valencia, Bilbao, Sevilla, Palma y Málaga, siendo Granada la próxima en inaugurar un servicio metropolitano de ferrocarril.

Gracias al proceso de expansión de las redes existentes y la construcción de nuevos metros las operadoras españolas han conseguido adquirir un alto nivel tecnológico y de conocimientos, entre los que es posible destacar:

- Importante mejora de la accesibilidad, la vigilancia y el mantenimiento.

- Mejora de la eficacia en el funcionamiento de las líneas.
- Integración del ferrocarril metropolitano como espacio público.
- Modernización de los sistemas de control y de acceso.
- Mejora de la flota de vehículos.
- Aumento de la eficiencia energética en infraestructuras.
- Automatización de la conducción.

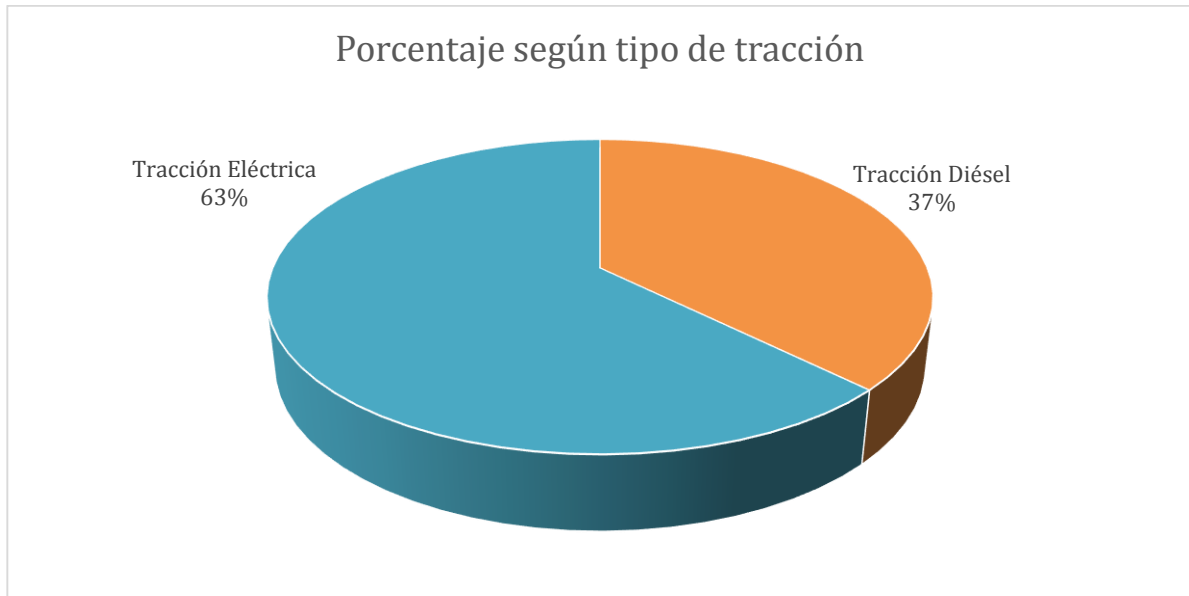
Si bien cada uno de los aspectos descritos anteriormente tiene su importancia y repercusión en la mejora y optimización de los servicios prestados, son los aspectos referentes a la conducción y la mejora del consumo energético en la operación los que mayoritariamente se abordarán en el presente trabajo, por su facilidad de implantación y aplicación con unos costes reducidos.

A continuación se describen los sistemas de suministro principales y los modos de conducción de la red de estudio, pues son dos aspectos importantes que condicionan la energía consumida.

## **2.2. Energía para la tracción**

Uno de los aspectos que condicionan el carácter de la explotación de una línea ferroviaria es el tipo de tracción que se emplea. Así pues, en la actualidad los vehículos están constituidos por sistemas de tracción diésel y/o eléctricos.

En el primer caso, los sistemas de tracción diésel emplean generalmente locomotoras con motores de combustión interna, con rendimientos que pueden alcanzar valores cercanos al 30 % respecto de la energía consumida. La principal ventaja de este tipo de tracción frente a la eléctrica es que para circular no es necesaria ningún tipo de instalación más allá de la propia infraestructura compuesta por el armamento ferroviario y sus capas portantes. No obstante, los vehículos diésel son más pesados, menos potentes y con menores prestaciones en cuanto a las aceleraciones y velocidades, a la vez que producen mayor contaminación acústica y ambiental. En la actualidad este tipo de tracción suele usarse en líneas secundarias y de poco tráfico, si bien en España existen bastantes kilómetros aún con este tipo de tracción, conformando alrededor del 37 % del total de km (véase Figura 2.1).



*Figura 2.1. Distribución de km de vía por tipo de tracción en España, según datos de ADIF (2014). Elaboración propia.*

En la tracción eléctrica los vehículos toman la energía eléctrica a través de un conductor aéreo mediante el pantógrafo o bien mediante un palpador que está en contacto con un tercer carril. Generalmente la línea aérea se constituye como polo positivo mientras que los carriles sobre los que se circula constituyen el negativo.

Este tipo de tracción ofrece importantes ventajas en cuanto a la potencia suministrada, el rendimiento (alrededor del 80 %-90 % frente al 30 % en diésel), el ruido, la deslocalización de las emisiones, etc. Pese a todas estas ventajas, posee el importante inconveniente de que para poder hacer uso de la energía es necesario construir una infraestructura eléctrica propia para el suministro y mantenimiento de la misma.

Para poder llevar a cabo la alimentación, generalmente existe una red de subestaciones de tracción que se encargan de transformar y rectificar la alta tensión alterna de suministro en valores de tensión en los que puede ser distribuirla al sistema de catenaria o tercer carril.

El suministro puede realizarse bien sea en corriente continua, con tensiones desde 600 V hasta 1.5-3 kV, o bien en corriente alterna, con tensiones hasta los 25 kV y 50-60 Hz como ocurre en la alta velocidad. En el caso de líneas metropolitanas, en España los sistemas de tracción está configurados por tensiones entre los 600 V y 1 500 V, en corriente continua. A

continuación se observan los diversos valores de las principales redes de España, en cuanto al nivel de tensión utilizado.

REDES METROPOLITANAS DE ESPAÑA	
	<i>Sistemas de electrificación existentes</i>
Metro Madrid	600 Vcc (L1-L4-L5-L6-L9) 750 Vcc (Líneas Metro ligero) 1500 Vcc (resto de Líneas)
Metro de Barcelona	1200 Vcc (L2-L3-L4-L5-L11) 1500 Vcc (L1-L9-L10)
Metro de Valencia	750 Vcc (Tranvía, L4 y L6) 1500 Vcc
Metro de Bilbao	1500 Vcc
Metro de Sevilla	750 Vcc

Tabla 2.1. Sistemas de electrificación en redes metropolitanas de España. Elaboración propia.

### 2.3. Sistemas de control y seguridad de trenes en la operación

Otro de los aspectos que caracteriza al ferrocarril es el tipo de sistema de seguridad y control utilizado. Ya desde los inicios el ferrocarril ha contado con elementos y dispositivos que apoyaban la señalización lateral más básica. No obstante, es ya a principios del siglo XX y ante la necesidad de transportar más viajeros en el menor tiempo posible cuando surgen propiamente los sistemas de control y seguridad, los cuales han ido evolucionando y mejorando a lo largo de los años.

De forma genérica, este tipo de sistemas se encargan de asistir a los maquinistas en la conducción segura de los trenes. En la actualidad, la práctica totalidad de los ferrocarriles poseen algún tipo de sistema de seguridad y control, cuya misión fundamental es la de supervisar la operación, actuando en caso de anomalía o rebase de los límites establecidos.

Generalmente, en la terminología ferroviaria se usan una serie de siglas para describir e identificar alguno o varios de estos sistemas de seguridad y control. Sin embargo, su uso no está estandarizado, por lo que unas mismas siglas pueden ser utilizadas para denominar arquitecturas y sistemas diferentes dependiendo del ámbito y la compañía que los utiliza. Además de esta problemática, los diferentes fabricantes de sistemas de control de trenes utilizan de forma ambigua y confusa los términos y siglas, incluyéndolos en denominaciones



comerciales que complican más aún comprender y clasificar de forma adecuada estos sistemas.

Dicho esto, a continuación se analizarán las principales características de los sistemas FAP, ATP y ATO desde el punto de vista particular de su aplicación en la red de FGV, ya que son estos sistemas los que están en funcionamiento en la red de ferrocarriles de estudio.

### **2.3.1 Sistema de Frenado Automático Puntual (FAP)**

El sistema de Frenado Automático Puntual o FAP es un sistema de seguridad. En este tipo de sistema las informaciones son procesadas por el equipo embarcado, el cual es capaz de leer las balizas y aplicar freno cuando es necesario en los puntos objetivo que hay preestablecidos. Su función principal es, por tanto, evitar que el tren rebase señales en rojo o circule por encima de la velocidad máxima de la vía. En caso de que el tren se encuentre rebasando alguna de las restricciones se establece una curva de frenado que ejecuta el sistema para detener al vehículo.

El sistema FAP está generalmente compuesto por dos tipos de balizas a lo largo de la vía:

- Balizas informativas: Este tipo de balizas anuncian que se acerca una señal o una limitación de velocidad. Al conductor se le avisa mediante una alarma, que tras ser visualizada apaga pulsando el correspondiente botón del panel. Si esta alarma no se apaga, el sistema frena el tren.
- Balizas restrictivas: Este tipo de balizas se colocan sobre las señales o en los puntos de limitación de velocidad, de forma que se frena al tren en caso de que sobrepase una señal en rojo o la velocidad permitida, sin avisar previamente al conductor.

El FAP se suele utilizar en líneas metropolitanas con poca frecuencia y mucha distancia, como por ejemplo en algunos tramos de la red de MetroValencia, del metro de Palma de Mallorca o del metropolitano de Granada. Debido a que la comprobación se lleva a cabo únicamente en los puntos en los que se sitúan las balizas, es posible superar la velocidad máxima entre baliza y baliza, por lo que se considera un sistema con una seguridad limitada.

### **2.3.2 Sistema Automatic Train Protection (ATP)**

El sistema *Automatic Train Protection* o ATP es un sistema de información puntual, que se encuentra adaptado a la señalización existente en la vía, siendo uno de los sistemas de seguridad más utilizados. Este sistema se basa en que idea de que bajo ninguna circunstancia sea posible poner al tren en una situación de peligro. Para ello el sistema realiza una supervisión de la velocidad y de la localización del tren de forma que, en caso de ser necesario, el sistema ATP aplica el freno e impide otras posibles acciones cuando el sistema detecta que no se cumplen las condiciones de seguridad preestablecidas. Por ello el conductor del tren debe cumplir siempre la orden de las señales que le van siendo enviadas de acuerdo con las especificaciones del reglamento oportuno, y realizar en cabina las operaciones que se requieran. Para ello se el ATP calcula una curva de frenado que el maquinista tiene que cumplir. En caso contrario, el sistema actúa para cumplir con las restricciones establecidas.

Generalmente este tipo de sistema puede usarse hasta velocidades de 220 km/h, pudiendo diferenciar dos tipos de sistemas ATP:

- Con transmisión puntual de información. A través de las balizas instaladas se envía información al vehículo de las condiciones y restricciones establecidas. En este tipo de transmisión no se realiza un control durante todo el trayecto sino que únicamente se comprueba en los puntos donde se manda la información al sistema.
- Con transmisión continua de la información. En este tipo de sistemas se realiza un seguimiento continuo del vehículo de forma que en cada momento se comprueba que cumple con las condiciones de circulación.

Así pues, es posible afirmar que de forma general el sistema ATP supervisa la conducción y realiza el control de la velocidad máxima de circulación, protegiendo de esta forma segura y automática a los trenes de posibles alcances, velocidades excesivas de circulación, etc. Si bien el sistema ATP en combinación con el equipo de ATP de vía tiene la misión de supervisar la seguridad, además tiene la función de cumplir los objetivos siguientes:

- Impedir que un tren alcance al precedente, frenándole a la distancia suficiente.
- Frenar hasta la detención a cualquier tren que rebase una señal en rojo.

- Frenar hasta la detención a cualquier tren que se aproxime a una aguja en posición incorrecta.
- Frenar hasta la detención a cualquier tren que se aproxime a un paso a nivel que no esté debidamente protegido.
- Frenar hasta la detención a cualquier tren que sobrepase la velocidad máxima del circuito de vía donde se encuentre.
- Frenar hasta la detención a cualquier tren en el caso de que no reciba códigos en la vía o de que se pierda el modo de conducción.

Generalmente, cualquier sistema ATP está compuesto por dos elementos fundamentales:

- Balizas: generalmente son elementos fijos instalados entre los carriles de la vía, aunque también pueden ser dispositivos emisores que transmiten la información a través de ondas de radio o del propio carril. Las balizas se encargan de transmitir diferente información al tren, pudiendo clasificarse en función de la información que transmiten en:
  - Fija o estable: Este tipo de información suele ser constante a lo largo del tiempo, como el límite de velocidad en un tramo.
  - Variable: Esta información depende de condiciones cambiantes en la vía, como por ejemplo la situación de una señal (vía libre, parada, etc.). Así pues, para que una baliza pueda transmitir esta información es necesario que esté conectada al bloqueo o enclavamiento. Además de las balizas asociadas a señales, también es posible encontrar balizas asociadas a pantallas alfanuméricas y cartelones, permitiendo mandar información más completa y compleja.



*Figura 2.2. Baliza ATP (sobre traviesa) y antena de recepción en vehículo (arriba). Fuente: <https://ruedaycarril.wordpress.com/> (accedido el 7 de Jun de 2015).*

- Elementos embarcados en el tren: Estos elementos permiten al vehículo leer, analizar y recibir información de la vía con el fin de comprobar que se cumple con las pautas establecidas para dicha circulación.

### a) Funcionamiento del ATP

Un determinado sistema ATP puede operar bajo diferentes modos de funcionamiento. Así pues, durante la marcha, un determinado tren lee la información que le proporcionan las balizas dispuestas en la vía y comprueba que las condiciones impuestas se cumplan, siendo dichas condiciones función del modo en el que se realice la conducción.

Uno de los primeros modos de funcionamiento al que se podría definir como ATP clásico es el ATP por códigos de velocidad. Bajo este sistema la vía se divide en varios tramos o “cantones”. El sistema reconoce donde está situado el tren anterior puesto que el cantón que le corresponde estará ocupado y se establecen las velocidades que deben respetarse en cada uno de los cantones.



Figura 2.3. ATP con códigos de velocidad. Fuente. Melis et al. (2008).

Como una modernización del sistema ATP descrito anteriormente aparece el sistema ATP Distancia Objetivo, ATP DO. En este sistema se conoce con precisión la posición de un determinado tren (además de calcularse con tacogeneradores o ruedas fónicas, existen sistemas de vía y balizas que permiten leer y conocer la posición exacta de cada tren en la vía), pudiendo calcularse la curva de frenado necesaria para que el tren que circula pueda frenar adecuadamente sin ocupar el cantón que ocupa el tren anterior. Respecto al caso anterior, en este sistema es posible aprovechar entre cada dos trenes un cantón completo que puede ser ocupado por otro tren.

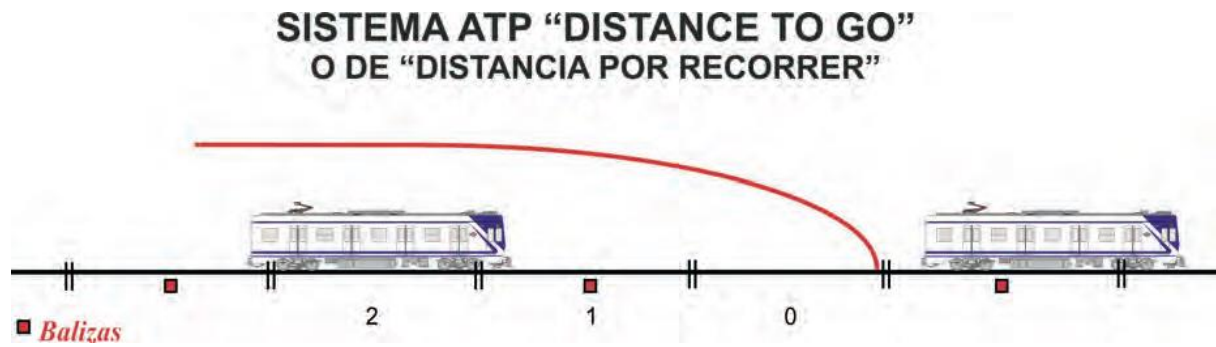


Figura 2.4. ATP con distancia objetivo. Fuente. Melis et al. (2008).

Si se analiza en particular la red de FGV, cuando el sistema ATP se encuentra localizado a través de la lectura de las balizas correspondientes y con la recepción de códigos en la vía, el vehículo puede circular en ATP con Distancia Objetivo. No obstante, cuando el sistema ATP no va localizado, el sistema puede circular en ATP con Códigos de Velocidad, coexistiendo ambos modos en función de las circunstancias.

#### b) Localización y deslocalización del ATP

Para que el sistema ATP funcione adecuadamente el tren ha de conocer la posición que tiene en cada momento en la vía. La localización del vehículo se realiza mediante la lectura de balizas denominadas APR, de tal forma que el tren se encuentra correctamente localizado cuando se realiza la lectura correcta de dos balizas APR consecutivas, teniendo la precaución de que el vehículo se encuentre completamente fuera de zona de agujas.



Figura 2.5. Baliza APR Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV).

Las balizas APR están situadas en la caja de la vía, existiendo una APR por circuito de vía o a una determinada distancia (por ejemplo, cada 200 metros). Para que puedan ser leídas los vehículos disponen de un lector de balizas APR que manda una señal de alta frecuencia continuamente. Al pasar por encima de una APR, esta señal cambia indicándole al ATP el número de baliza, permitiendo que se localice y sepa en todo momento la línea, vía, circuito de vía y punto exacto dentro de ese circuito de vía donde se encuentra.

No obstante, si el sistema no lee dos APR consecutivas, o lee una APR que no espera encontrarse en la zona por la que va circulando se produce la deslocalización pues el vehículo no es capaz de situarse de forma adecuada en la vía.

### **2.3.3 Sistema Automatic Train Operation (ATO)**

El objetivo principal de los ferrocarriles metropolitanos modernos es el de conseguir la máxima capacidad de transporte con la máxima seguridad en horas punta y alcanzar una elevada velocidad en horas valle, permitiendo asegurar tiempos de transporte reducidos con el mínimo coste posible.

Para poder alcanzar dichos objetivos y, gracias a la mejora durante los últimos años en cuanto a los sistemas de comunicación y control, los ferrocarriles metropolitanos han implementado diversos sistemas que permiten la conducción y control de forma automática de los vehículos.

Los grados de automatización posibles (Page, 2009) en el ámbito ferroviario hoy en día son varios. Así pues, la automatización puede ser (según norma IEC 62290-1) la siguiente:

- GoA 1: modo de operación manual con protección. Se emplea habitualmente como modo degradado
- GoA 2 (Semi-automated Train Operation, STO): en este modo se controla el tren sin la intervención del conductor.
- GoA 3 (Driverless Train Operation, DTO): modo donde se opera sin conductor en cabina pero con la presencia de un asistente a bordo para hacer frente a situaciones degradadas y guiar a los pasajeros en emergencias.

- GoA 4 (Unattended Train Operation, UTO): modo de operación completamente automático.

De forma esquemática, los grados de automatización según la citada norma son:

Automatización	GOa2	Goa3	Goa4
	<i>Auromatic Train Operation ATO - STO</i>	<i>Driverless Train Operation, DTO</i>	<i>Unattended Train Operation, UTO</i>
Supervisión Velocidad	Sistema	Sistema	Sistema
Tracción y freno	Sistema	Sistema	Sistema
Parada del tren	Sistema	Sistema	Sistema
Detección obstáculos	X	Sistema	Sistema
Control de puertas	X	Agente/Sistema	Sistema
Arranque del tren	X	Agente/Sistema	Sistema

Tabla 2.2. Grado de automatización según norma IEC 62290-1.

Así pues, una parte importante de los ferrocarriles metropolitanos utilizan el modo semi-automático GoA2, al que se le incorpora un modo de conducción automática al que se le conoce por sistema ATO (Automatic Train Operation). Este sistema será el que se analice en el presente trabajo por estar en funcionamiento en la red de estudio. No obstante, si bien el sistema ATO está muy extendido, es cierto que existen algunas redes en las que se usan sistemas más complejos, como el VAL o SAET, que permiten la eliminación completa del conductor. No obstante, este tipo de sistemas están poco extendidos y se usan en casos muy particulares, por lo que en el presente trabajo se abordará el estudio únicamente del sistema ATO, siendo el sistema usado en la red de análisis del proyecto.

Desde el punto de vista operativo, cuando en un ferrocarril metropolitano está activado el ATO este sistema controla la marcha y el frenado desde que parte de una estación hasta el punto de parada siguiente, que generalmente suele ser la siguiente estación en el itinerario previsto. Bajo estas condiciones de operación el conductor únicamente se encarga de la apertura y cerrado de puertas en las paradas, dar la orden de salida al sistema ATO y supervisar el funcionamiento del sistema durante la marcha, por lo que no interviene en la conducción.

Un hecho importante a destacar es que si bien el sistema el ATO es un modo de conducción semi-automática de un tren, estando supervisado en todo momento por el sistema ATP, lo que garantiza la seguridad de funcionamiento y permite realizar la conducción de forma

segura. Por ello, no es posible la conducción en modo ATO si el ATP no está operativo. La característica fundamental del sistema es la de estar diseñado para que en caso de fallo, la reacción sea en el sentido de obtenerse una situación de seguridad.

La primera línea equipada con ATO fue la Línea Victoria del metro londinense en 1967 y tenía una precisión de parada en estaciones de  $\pm 2$  metros. Actualmente, los modernos sistemas tienen una precisión de  $\pm 0,15$  metros, 14 veces mayor.

### a) Funcionamiento del ATO

Para que pueda ser llevada a cabo la explotación de un sistema en modo ATO debe establecerse, para una vía determinada, las curvas de aceleración y frenado, la velocidad idónea en cada punto, los puntos de parada y todos los parámetros necesarios para la conducción automática.

Generalmente, tras el estudio de una determinada línea es posible determinar la colocación de las balizas necesarias en la vía, las cuales generalmente pueden ser de dos tipos:

- Balizas con información sobre la tracción o frenado necesario.
- Balizas con información sobre la posición en la línea, de forma que el tren decida dónde acelerar y dónde frenar según el perfil de la vía registrado a bordo.

El equipo de conducción semiautomática ATO en combinación con la información de vía se encarga de elaborar las órdenes a los equipos de tracción y freno para controlar el movimiento del tren desde el arranque, la regulación de marcha y la curva de freno, hasta la parada en el punto predeterminado en estación, tal y como se ha citado previamente. En este sentido, los datos de vía que generalmente maneja el ATO son las velocidades máximas de circulación, las pendientes del terreno y los puntos de parada en estación.



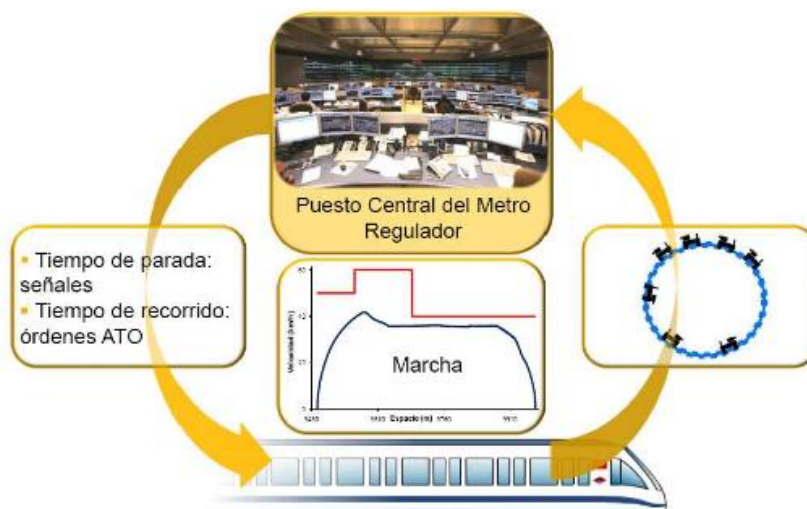


Figura 2.6. Regulación del tráfico en el sistema ATO. Fuente: Estudio de la automatización CBTC en la línea 2 de metro de Barcelona. Antonio Francisco Carayol Romero.

Una vez puesto en funcionamiento el modo ATO y a partir de la posición y velocidad del tren el sistema selecciona y aplica, en su caso, un esfuerzo a los motores. En función de la situación en la que se encuentre el vehículo, el esfuerzo aplicado puede ser de tracción si necesita acelerar, de frenado si necesita decelerar o nulo, cuando el vehículo circula en lo que se denomina “deriva”.

Mediante este procedimiento el sistema consigue alcanzar una velocidad tal que se cumpla con los tiempos de recorrido necesarios sin rebasar las velocidades máximas de vía (véase Figura 2.7.).

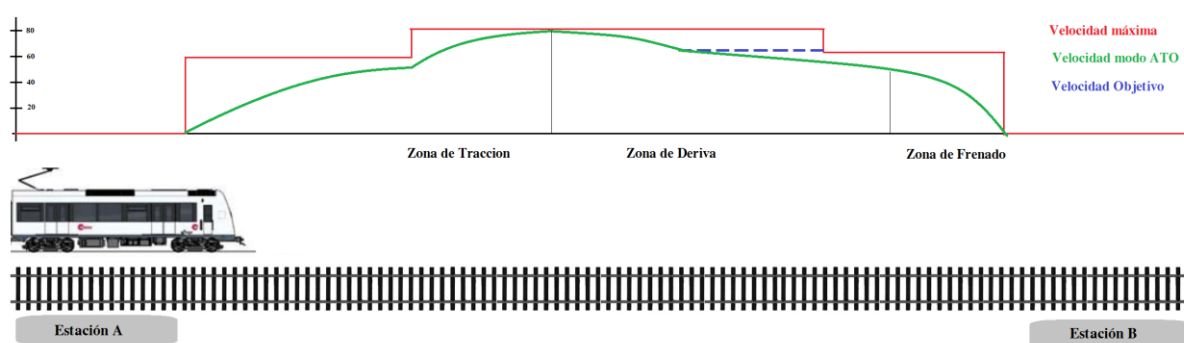


Figura 2.7. Ejemplo representativo de velocidades del sistema ATO. Elaboración propia.

En el caso de la red que se analizará y en muchas otras líneas donde está implantado el sistema ATO existen, generalmente, cuatro consignas de marcha (pueden ser menos o más, depende de la configuración escogida):

- Marcha rápida (M0)
- Marcha normal (M1)
- Marcha moderada (M2)
- Marcha lenta (M3)

Para una determinada línea o red cada una estas marchas se diseña como resultado de una combinación de los parámetros de configuración del equipo ATO embarcado, dando como resultado un perfil de velocidades que debe seguir el tren entre dos puntos (generalmente estaciones), el cual lleva asociado un tiempo de recorrido y un consumo asociado.

La marcha 0 o marcha rápida es aquella que tiene asociado el menor tiempo de recorrido al utilizar las máximas aceleraciones y deceleraciones. Las otras tres marchas son en consecuencia más lentas y, por lo tanto, tiene asociado un tiempo de recorrido y consumo energético más reducido (véase Figura 2.8). Si bien la diferencia de tiempo entre las marchas depende del sistema que se analice aunque, generalmente se sitúa alrededor de los 5 segundos.

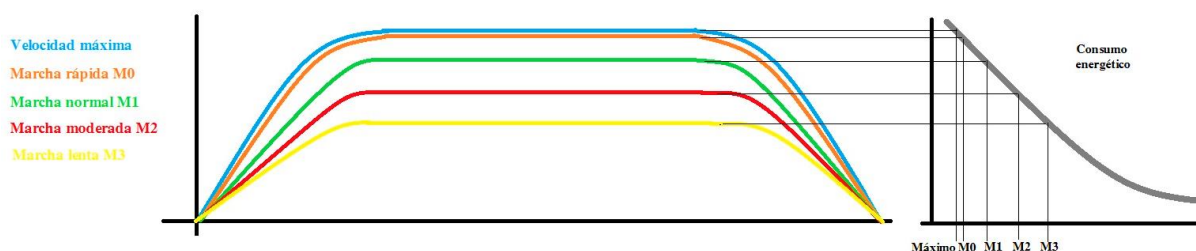


Figura 2.8. Ejemplo representativo de marchas ATO y consumo asociado. Elaboración propia.

Tras estas consideraciones puede fácilmente entenderse como durante la marcha un tren seleccionará una marcha rápida cuando exista un cierto retraso o, por el contrario, marchas más lentas cuando sea necesario retenerlo o no exista ningún retraso, tratando de cumplir con el horario programado de antemano.

Si el sistema ATO está bien ajustado y configurado, el uso de este modo de conducción proporciona una serie de ventajas respecto a la conducción manual:

- Reduce el tiempo de estación a estación, ya que apura al máximo la velocidad límite de la vía.
- El frenado se lleva a cabo de forma uniforme, ya que el ATO regula la velocidad y la va adecuando a la distancia que le queda para llegar al punto de parada.
- Se puede programar la parada siempre en el mismo punto del andén, generalmente con una precisión de  $\pm 0.5$  m.
- Como se regula la velocidad, se evita que el tren entre en frenada de emergencia inesperada.
- Al permitir la circulación más rápida, la línea puede mejorar su frecuencia de paso.

### b) Localización y deslocalización del ATO

Para poder realizar la conducción en modo ATO, es necesario que el tren reciba información que le indique el punto donde se encuentra. Por ello, a lo largo de la vía se instalan unas balizas ATO, las cuales están formadas por la unidad de alimentación de lazo o Loop Control Unit (LCU) y el lazo ATO, que se sitúa paralelo a los carriles.

Generalmente, por cada estación y vía se instalan dos LCU's (denominados lazo de entrada y lazo de salida) cuya función es la de adaptar la señal del equipo de vía y servir de elemento de ajuste para que por el lazo circule la corriente adecuada. Con la modulación de la señal por los LCU's el lazo ATO funciona como antena transmisora de señal que es recibida por los trenes a través de la antena en el equipo embarcado que posee cada uno de ellos.

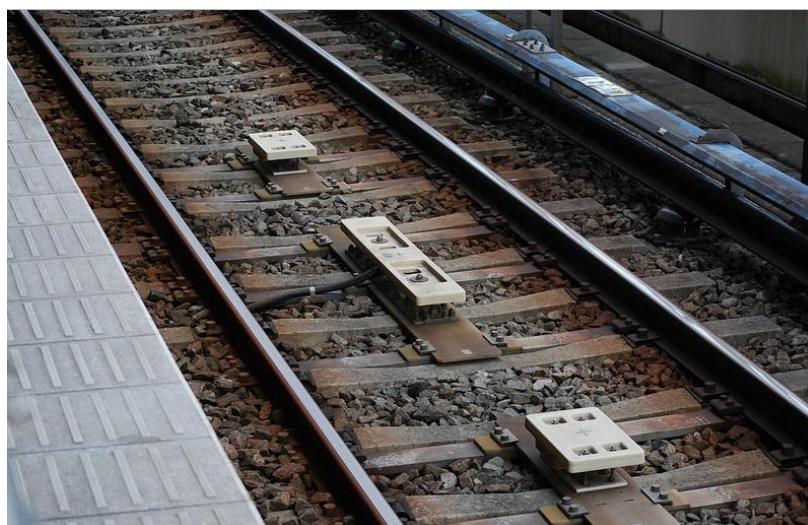


Figura 2.9. Bobina del sensor ATO de la Línea Azul del Metro Municipal de Yokohama. Fuente: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/ATO\\_chiyoushi.JPG](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/5/5f/ATO_chiyoushi.JPG) (accedido 25 Mayo 2015).

Los lazos dispuestos en la vía sirven a los trenes para localizarse y eliminar posibles errores de distancia, además de suministrar consignas de regulación. El funcionamiento del sistema es el siguiente:

- Para que el ATO se localice, es necesario que el tren pase por un lazo y el ATO lo lea. A partir de ese momento el ATO se encuentra localizado
- Si el ATO perdiese algún lazo se iluminará de manera intermitentemente la indicación de “alarma de ATO” hasta recibir el siguiente lazo. Si este se recibe correctamente, se apagará esta indicación.
- Si se pierden dos lazos consecutivos de distintas estaciones, se pierde el modo ATO y la indicación de “alarma de ATO” pasa a ser fija, aplicando freno de urgencia.
- Si se pierden dos lazos consecutivos de la misma estación la “alarma de ATO” permanece encendida de manera intermitente hasta recibir el primer lazo de la siguiente estación.

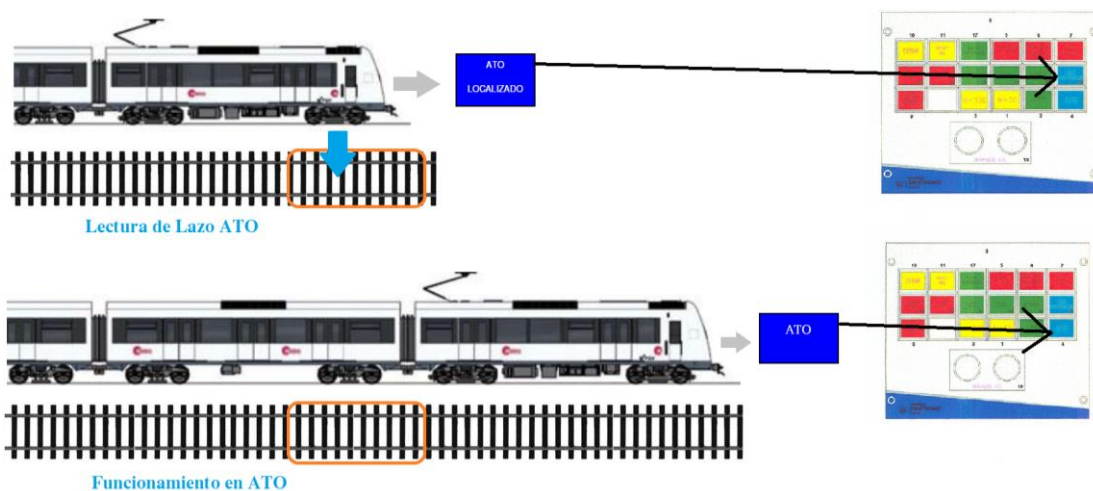


Figura 2.10. Representación de lectura de lazo ATO. Elaboración propia.

En el caso de la red de FGV, el sistema de ATO de vía en cada estación está constituido por dos lazos, uno de entrada y otro de salida. El lazo de entrada se encuentra 70 metros aproximadamente antes del punto de parada, y el lazo de salida a 90 metros aproximadamente después del punto de parada del andén.

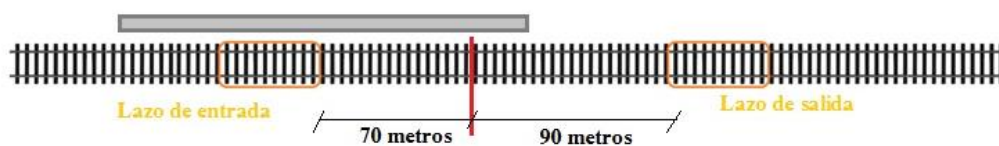


Figura 2.11. Representación de posición de lazos ATO en FGV. Elaboración propia.

### 3. El consumo eléctrico y la mejora de la eficiencia energética en ferrocarriles metropolitanos

---

A lo largo de los últimos años el consumo energético en España y el resto de Europa ha crecido notablemente, incluido el sector del transporte (según datos del ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente el consumo de energía del transporte en España ha crecido desde 1990 hasta la actualidad un 84 %), siendo dicho sector el responsable aproximadamente del 40 % de la energía total consumida. Esta tendencia se ha visto frenada desde el año 2007 debido a la reciente crisis económica que sufre especialmente el viejo continente, si bien el peso del transporte en el consumo energético se mantiene en los valores citados anteriormente.

Sin embargo, pese al descenso del consumo energético provocado por la situación económica es previsible que la demanda de transporte siga aumentando en los próximos años y, con ello, las necesidades energéticas para ofrecer el servicio deseado. Bajo estas premisas y con el objetivo de poder alcanzar un sistema mucho más sostenible las autoridades y administraciones públicas están realizando esfuerzos importantes para reducir las externalidades del transporte, especialmente de las derivadas del uso de la energía.

El ferrocarril, como parte importante del sistema de transporte no es ajeno a los nuevos retos y a la necesidad de reducir el consumo energético y mejorar la eficiencia en todos aquellos aspectos que lo conciernen. Además, en términos económicos el consumo de energía eléctrica supone una parte importante del presupuesto de explotación de las administraciones ferroviarias.

Por ello, mediante la reducción de costes se pretende dos objetivos básicos como son el de aumentar la cuota de mercado del transporte, mientras que mediante la disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, el ferrocarril potencia el desarrollo sostenible.

En el caso de España, este tipo de medidas vienen reflejadas bien sea en el derogado PEIT “Plan Estratégico de las Infraestructuras y Transporte”, bien sea en el actual PITIVI “Plan de Infraestructuras, Transporte y Vivienda” el cual posee un horizonte temporal hasta el año 2024. Si bien en estos planes se recogen numerosas medidas y actuaciones en materia de eficiencia energética, todas ellas pueden ser agrupadas bajo dos aspectos claves: aumentar la participación de aquellos modos de transporte que presentan una mejor eficiencia energética y mejorar la eficiencia de cada uno de los modos de forma individual.

Entrando en materia, si se analizan las fuentes energéticas de las que se sirve el transporte es posible observar una fuerte dependencia de los derivados del petróleo y de las fuentes no renovables de energía. Es en este aspecto donde el ferrocarril tiene uno de sus puntos fuertes, especialmente gracias a la tracción eléctrica (permite un alto rendimiento de la cadena de tracción, ausencia de emisiones locales, oportunidad de empleo de fuentes renovables de energía en origen y el uso del freno eléctrico regenerativo), por lo que se espera una gran expansión de los servicios de alta velocidad, cercanías y metropolitanos.

A continuación se observa los flujos energéticos para el caso español del sistema energético nacional (Pilos de la Fuente, 2013) del que se sirve el ferrocarril.

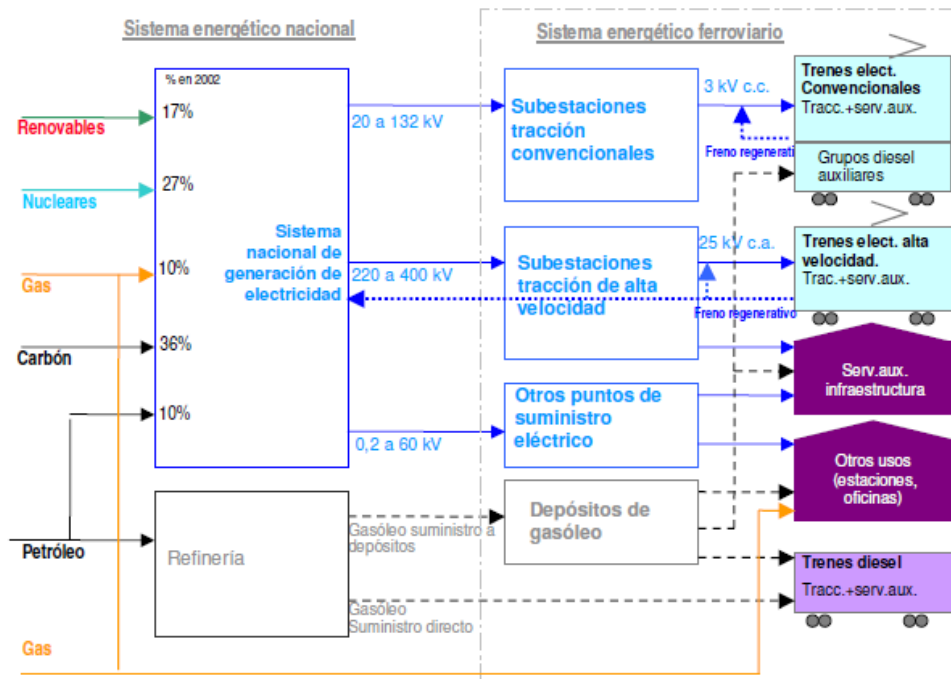


Figura 3.1. Flujos energéticos en el ferrocarril. Fuente: Máster en sistemas ferroviarios gestión energética en el ferrocarril. Alberto García Álvarez.

Visto las fuentes de energía de las que se sirve el ferrocarril, en los siguientes apartados se abordará en detalle los aspectos que condicionan el consumo energético desde el punto de vista global de una red, desde la perspectiva de un vehículo y las diferentes medidas existentes para poder mejorar la eficiencia de la red, cosa que ayudará a comprender mejor el problema que se aborda.

### **3.1. El consumo energético en un sistema metropolitano**

En primer lugar, cabe destacar que los vehículos metropolitanos son siempre unidades eléctricas, puesto que no es posible realizar una explotación en tracción diésel, ya que la mayor parte de las redes son subterráneas. Generalmente y tal y como se ha descrito anteriormente, la alimentación de los metros se realiza con tensiones entre 750 Vcc y 3 000 Vcc, si bien un valor estándar ampliamente utilizado son los 1 500 Vcc. La red de subestaciones de tracción es la encargada de transformar y rectificar la alta tensión alterna de suministro en tensión continua, para posteriormente distribuirla al sistema de catenaria o tercer carril que posea la red.

Dicho esto, el estudio del consumo energético puede ser abordado desde varios puntos de vista. En este apartado se pretende dar una visión global de algunos sistemas de transporte metropolitanos bajo una aproximación general, con el fin de establecer las bases y poner de manifiesto los diversos aspectos que son claves en la el suministro de la energía eléctrica de una red metropolitana. Las consideraciones y datos aquí expuestos se realizan a nivel de las subestaciones, los cuales proporcionan valores globales de consumo, pudiendo conocer el consumo total en un instante o durante un periodo determinado de la red. No obstante, el análisis detallado y particular del consumo de un vehículo será desarrollado abordado más adelante.

Así pues, en España no existen centrales de producción de electricidad específicas para el ferrocarril como sí ocurre en otros países, como por ejemplo Alemania. Por lo tanto, cualquier red de ferrocarril metropolitana se sirve de la red general de distribución, siendo la energía que consumen contratada directamente a las empresas generadoras.

Por otro lado, hay que tener presente que los datos de energía mostrados se obtienen en la entrada de las subestaciones por lo que las pérdidas desde las mismas hasta el vehículo (es decir, pérdidas en catenaria y distribución interna) no son consideradas en estos valores. No obstante, de forma orientativa, es posible establecer un índice de pérdidas que se producen desde la central de generación hasta la catenaria, es decir, las pérdidas en la red de distribución y las ligadas a la red de tracción, alcanzan los valores siguientes, en función de la tensión de alimentación:

TENSIÓN NOMINAL				
	Porcentaje de pérdidas (%)	Pérdidas (kVA)	Intensidad del vehículo (A)	Tensión media (V)
2x25 kV c.a.	2.2	224	400	25000
1x25 kV c.a.	3.5	352	400	25000
3 000 V c.c.	5.6	129	350	3300
1 500 V c.c.	10.1	81	500	1600
750 V c.c.	18.2	136	1000	750
600 V c.c.	22.0	132	1000	600

Tabla 3.1. Pérdidas en función de la tensión nominal de la red. Fuente: Pilo de la Fuente et al. *Flujos de la energía de la electricidad para el transporte, Monografías EnerTrans; 2008*

Entrando en materia, en el estudio de la energía consumida por una red metropolitana se suele diferenciar el consumo debido a la tracción y el resto de consumos. El consumo debido a la tracción no solo comprende la energía necesaria para desplazar un cierto vehículo sino que debe considerarse además todos los elementos auxiliares que lo componen, mientras que el resto del consumo lo constituyen aspectos muy diversos: estaciones, ventilación, suministro de agua, iluminación, ascensores, escaleras mecánicas, máquinas de venta y de información, cámaras de seguridad, megafonía, etc. Es por este motivo que el consumo de una red está muy ligado a las características de la misma, pudiendo variar notablemente de unas a otras.

Pese a que el consumo está ligado a las propias características de cada red, de forma general la distribución de consumo energético de una red estándar se distribuye de la siguiente forma:



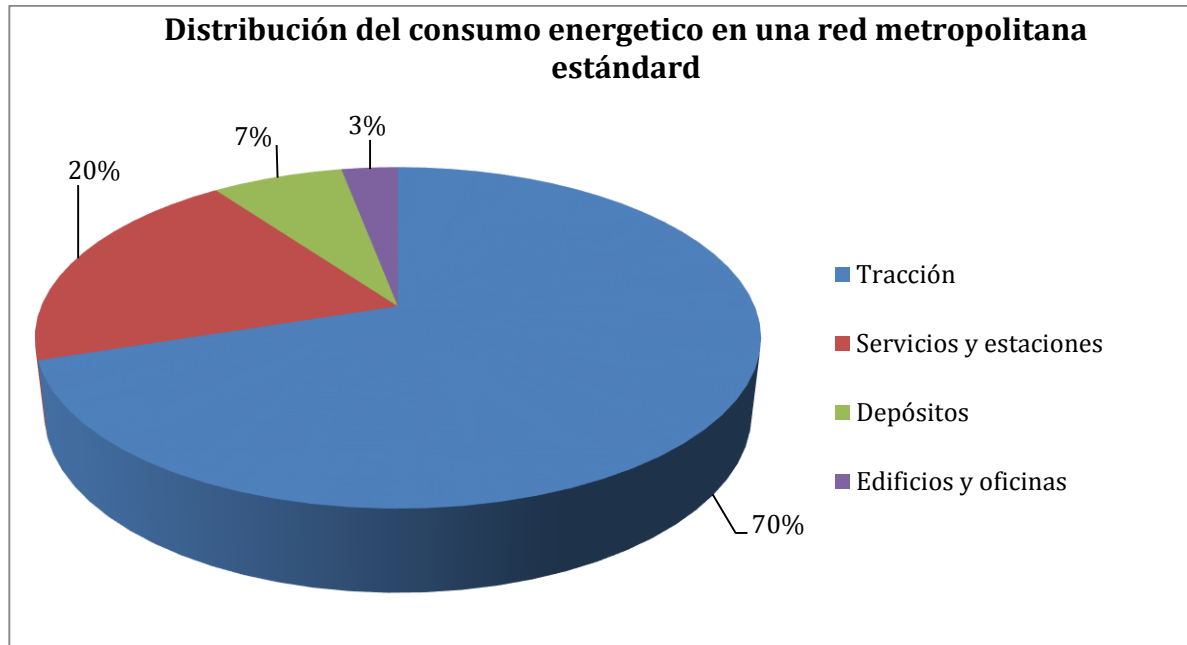


Figura 3.2. Distribución de consumo energético en una red metropolitana. Elaboración propia.

Tal y como se aprecia en la Figura 3.2., la mayor parte de la energía consumida es debida a la tracción de los vehículos (por tracción se entiende, tal y como se ha comentado anteriormente, el consumo de los motores y de todos los servicios auxiliares del tren durante su funcionamiento), siendo muchos menos importante la energía consumida en las estaciones y servicios (estaciones de bombeo, ventilación, iluminación, escaleras y ascensores, etc.), en los depósitos o talleres y en las oficinas y edificios de la administración correspondiente.

A continuación se puede observar un diagrama de Sankey de un sistema eléctrico ferroviario en corriente continua con regeneración de energía, donde se aprecian los flujos de energía en función de su magnitud considerando el flujo energético total para la energía de tracción.

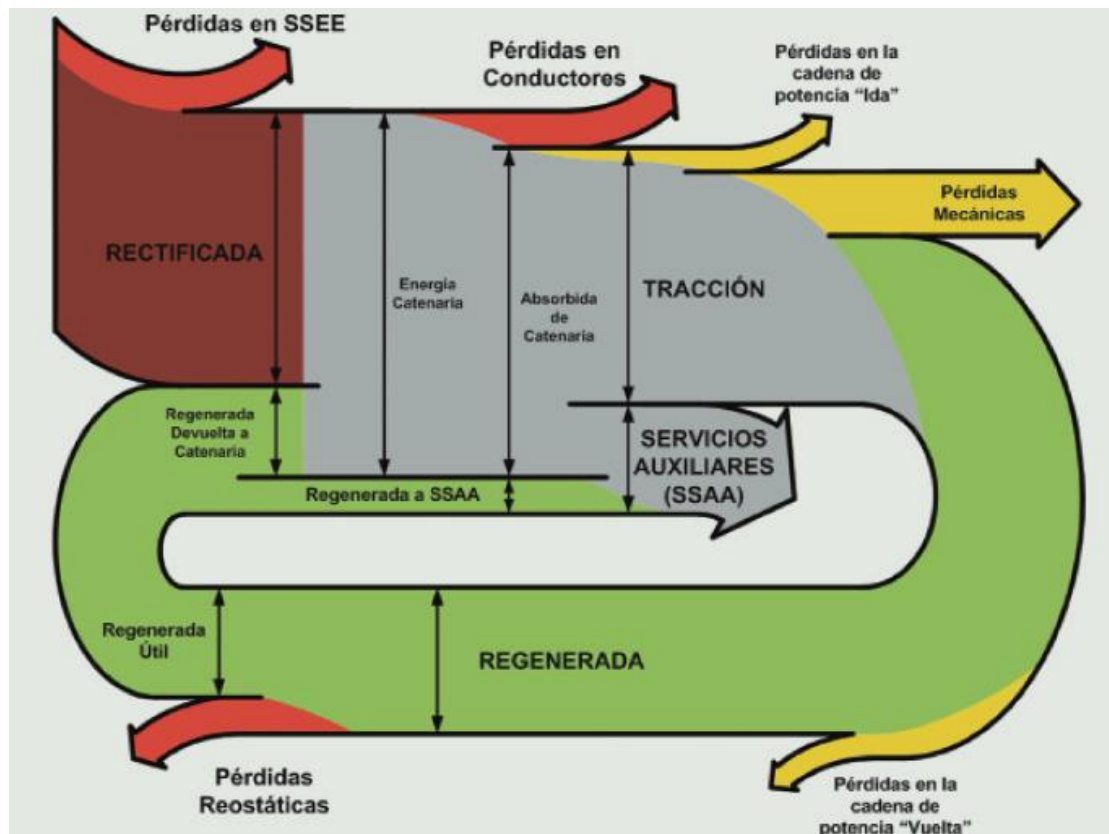


Figura 3.3. Flujos de energía en una red de ferrocarril. Fuente: López et al. Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos.

Tal y como se observa en la Figura 3.3., además del consumo propio de la tracción y servicios auxiliares existen una serie de pérdidas a lo largo del sistema y una parte de energía regenerada que se devuelve. Como valor orientativo, en un sistema estándar el rendimiento de la energía captada en el pantógrafo se sitúa en torno al 80 %-87 %, por lo que las pérdidas están entorno al 13-20 % de la energía captada.

Del conjunto de pérdidas existentes a lo largo del flujo es posible realizar una agrupación en dos aspectos: pérdidas que se producen en el vehículo y pérdidas en la propia infraestructura. En primer lugar, las pérdidas que se producen en el vehículo se deben a las que se producen en los sistemas que posee el propio vehículo como resultado del rendimiento de cada uno de los dispositivos además de las pérdidas mecánicas que se producen en el sistema de frenado. En segundo lugar, las pérdidas asociadas a la infraestructura son las que se producen en las subestaciones (representan las pérdidas en los transformadores y en los rectificadores), en los conductores (son función de la sección y

están relacionadas de forma directa con el cuadrado de la corriente) y las pérdidas en reóstatos (consecuencia de la falta de receptividad momentánea del sistema).

Además, el diagrama anterior muestra que para poder entender el consumo de energía en un vehículo no solo es necesario considerar la energía que se capta desde el pantógrafo sino que en el balance tiene un peso importante la energía regenerada así como el consumo de los sistemas auxiliares. Por ello, cualquier estudio que se lleve a cabo ha de considerar estos aspectos, tal y como se realizará en el presente trabajo tanto en la fase de recogida de datos como en los modelos que posteriormente se desarrollarán.

Una vez mostrados los aspectos más relevantes del flujo energético a continuación se mostrarán los datos de consumo eléctrico de las redes metropolitanas más importantes de España, permitiendo profundizar en el estudio.

En primer lugar cabe destacar que los datos energéticos no se encuentran estandarizados y se presentan bajo diferentes magnitudes (datos físicos, o bien solamente económicos), siendo necesario estandarizar cada uno de los valores para poder realizar una comparativa. Además, otro aspecto negativo es que los datos muestran una gran dispersión de resultados en función de la fuente consultada. Ante estos inconvenientes se pretende únicamente dar una aproximación general en cuanto a la energía consumida por las principales redes sin entrar a valorar aspectos más en detalle.

Teniendo en consideración las limitaciones anteriores, es posible afirmar que el ferrocarril español recibe de la red eléctrica unos 5 000 GWh, mientras que la parte de dicha energía empleada por los ferrocarriles metropolitanos asciende a unos 1 200 GWh, lo cual representa un 24 % de la energía eléctrica total consumida por los ferrocarriles. Estos 1 200 GWh medidos a la entrada de las subestaciones, para un año medio, se distribuyen de la siguiente forma:

REDES METROPOLITANAS				
	Consumo Total en GWh anuales	km de red	GWh anuales por km de vía	Consumo por viajero (kWh/viajero)
Metro de Madrid	737	293	2.51	1.32
Metro de Barcelona	258	123	2.09	0.70
Metro de Valencia	82.5	126	0.65	1.37
Metro de Bilbao	73	43.3	1.68	0.84
Metro de Sevilla	20	18	1.11	1.38

*Tabla 3.2. Consumo energético de las redes metropolitanas más importantes de España. Fuente: Datos obtenidos a partir de los informes anuales de cada red metropolitana.*

A la vista de los datos es posible observar ciertas diferencias en cuanto al consumo eléctrico por km de vía o por viajero en las diferentes redes. Este dato puede hacer pensar que la eficiencia energética de unas redes frente a otras es muy diversa, siendo aquellas redes con mayor consumo mucho menos eficientes que el resto. No obstante, no es posible llegar a este tipo de afirmaciones únicamente con estos valores globales pues cada una de las redes posee características diferenciadoras en cuanto a los valores de tensión de electrificación, número de estaciones, trazado de la línea, tipología y configuración de los vehículos, horarios y frecuencia de paso, escaleras mecánicas y servicios, etc.

Todos los aspectos descritos anteriormente repercuten sobre el consumo final de una red metropolitana y, por tanto, deben considerarse y ponderarse de forma adecuada para poder realizar una comparativa precisa, aunque este estudio no es objeto del presente trabajo.

### 3.2. Aspectos que condicionan el consumo en un tren

Si bien en el apartado anterior se ha analizado desde un punto de vista global una red metropolitana es momento de estudiar los aspectos del vehículo que condicionan el consumo para una determinada red.

Si se analiza la tracción ferroviaria, generalmente los ferrocarriles metropolitanos utilizan equipos eléctricos formados por motores de inducción (la tracción diésel no se considera pues en el ámbito del ferrocarril metropolitano este tipo de tracción no se utiliza).

En cuanto a su régimen de funcionamiento, es posible diferenciar claramente dos modos de actuación: funcionando como dispositivos de tracción alimentados por la red y, por lo tanto,

consumiendo energía eléctrica y en modo de generación de energía, cuando el freno eléctrico que ayuda a reducir la velocidad actúa pudiendo ser, en su caso, aprovechada por diferentes elementos.

Dicho esto, de forma genérica el consumo neto de un vehículo que recorre un determinado trayecto puede obtenerse como la cantidad de energía entregada en el pantógrafo del tren menos la energía generada por el freno regenerativo (en caso de que exista esta tecnología a bordo), después de alimentar los elementos auxiliares (véase ecuación (1)).

$$E_{consumida} = E_{entreg} - E_{regen} \quad (1)$$

donde:

$E_{consumida}$ : Consumo energético neto (W)

$E_{entreg}$ : Energía entregada en el pantógrafo al tren (W)

$E_{regen}$ : Energía regenerada por el freno regenerativo, si existe (W)

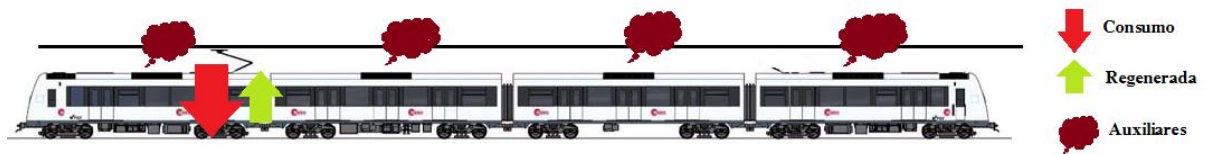


Figura 3.4. Esquema sobre el balance energético de un tren metropolitano. Elaboración propia.

Si bien el balance anterior sirve para poder comprender el de forma muy simplificada el consumo energético de un tren metropolitano, es necesario descomponer cada uno de los factores en una serie de conceptos más precisos.

Así pues, el término de energía entregada en el pantógrafo al vehículo ( $E_{entreg}$ ) puede, a su vez, descomponerse en los siguientes aspectos (véase ecuación 2):

$$E_{entreg} = E_{avan} + E_{aux} + E_{perdid} \quad (2)$$

donde:

$E_{avan}$ : Energía para vencer las resistencias al avance (avance, aerodinámica, curvas).

$E_{aux}$ : Energía para alimentar a todos los equipos auxiliares.

$E_{perdid}$ : Energía perdida en la cadena de tracción y alimentación de los equipos.

En la Figura 3.5 se observa la distribución del consumo, para los diferentes aspectos, en cuanto a la energía entregada en el pantógrafo a un vehículo.

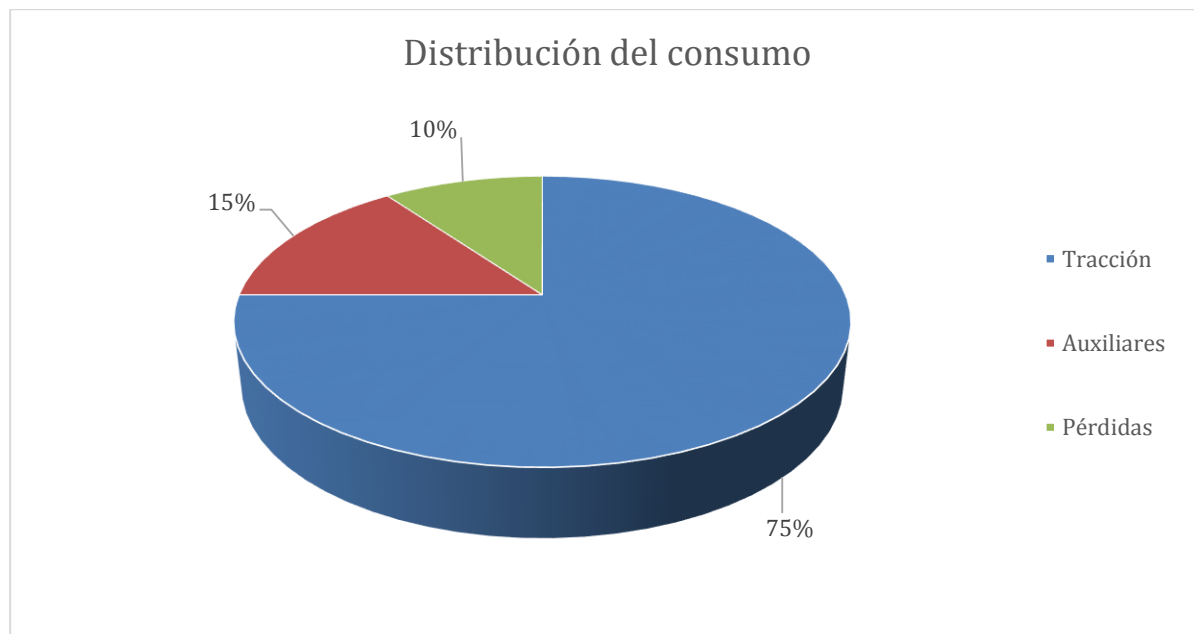


Figura 3.5. Distribución de pesos respecto al consumo de energía en un vehículo metropolitano. Elaboración propia.

Descomponiendo en un diagrama de flujos cada uno de los aspectos anteriores, se obtiene la Figura 3.6.

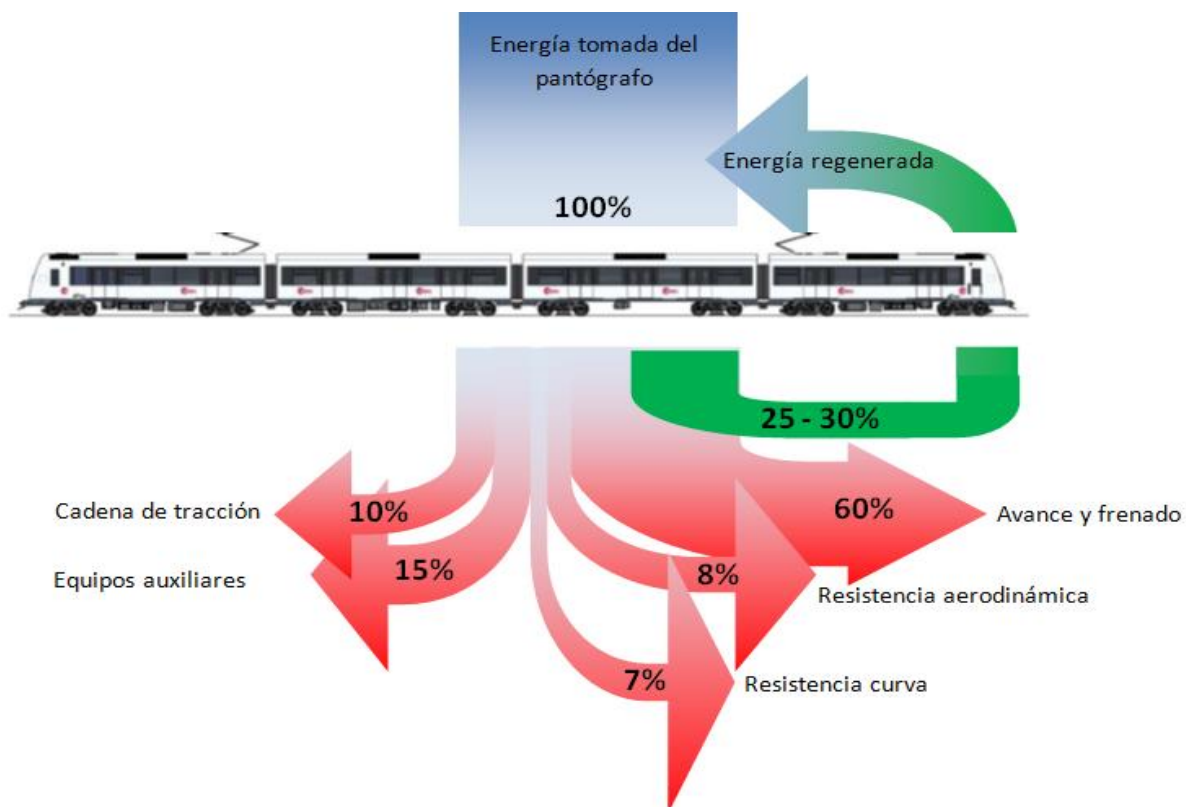


Figura 3.6. Flujo del consumo de un tren metropolitano. Elaboración propia.

Como puede observarse, el 75 % de la energía tomada en la catenaria se consume en vencer las resistencias al avance (tracción, aerodinámica y curvas), considerando que parte de dicha energía consumida puede ser regenerada en el vehículo si existen sistemas de recuperación de energía oportunos. Por otro lado, los consumos interiores del vehículo (auxiliares y pérdidas en la cadena de tracción) suponen un 25 %, siendo dicho valor función del número y potencia de los equipos instalados así como de los condicionantes externos.

A continuación se describirán alguno de las características más relevantes de cada uno de los aspectos en los que se ha descompuesto el flujo energético.

### ***3.2.1 Energía para la tracción y resistencias al avance***

El estudio de la energía necesaria para el movimiento del tren puede realizarse desde varios puntos de vista. En este momento se realizará una descripción de los factores que condicionan el consumo sin entrar en su cálculo, el cual será abordado y detallado en apartados posteriores donde se desarrollará el modelo de consumo.

La energía de tracción es aquella energía necesaria para que un cierto vehículo se desplace entre dos puntos, considerando las resistencias al avance, compuesta por la energía necesaria para vencer la fuerza de la gravedad así como la resistencia al avance y en curva, además de la energía potencial por diferencia de alturas entre ambos puntos y la energía para vencer la resistencia aerodinámica.

Como puede comprenderse cada uno de los términos descritos anteriormente plantea cierta complejidad a la hora de ser analizado. No obstante, desde una perspectiva operacional, es posible describir el movimiento de un vehículo desde un punto a otro en función de los modos de funcionamiento y conducción simples en los que puede desglosarse.

Así pues, la conducción de un vehículo puede descomponerse en tres modos simples de operación, que son: Tracción, deriva y freno.

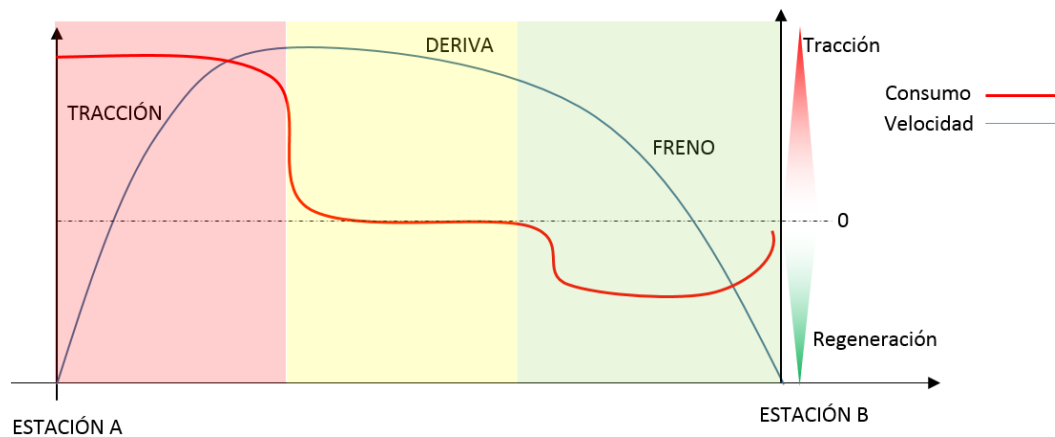


Figura 3.7. Esquema de modos de funcionamiento y consumo. Elaboración propia.

En la tracción el motor del vehículo se encuentra consumiendo energía para vencer a las resistencias dinámicas al avance y mantener o aumentar la velocidad. La evolución de la potencia empleada es creciente durante el tiempo en que se está acelerando, disminuyendo progresivamente una vez se va alcanzando la velocidad objetivo. Generalmente, las resistencias mecánicas se encuentran en torno al 10 %, considerando dicho porcentaje como resultado de la suma de dos términos, la resistencia al avance en recta y resistencia al avance en curva.

En cuanto a la deriva, en este modo de conducción no se aplica ningún esfuerzo sobre el motor, por lo que el movimiento del tren está determinado por el equilibrio de fuerzas entre la componente activa de la gravedad y las fuerzas que ejerce la resistencia dinámica durante la marcha. Hay que diferenciar este modo de deriva del de circulación a velocidad constante, donde se usa una pequeña cantidad de energía con el objetivo de mantener la velocidad constante en un cierto tramo (puede ser elevada si, por ejemplo, se quiere mantener la velocidad en una pendiente positiva), por lo que se emplea una pequeña cantidad de energía para vencer todas las pérdidas mecánicas y eléctricas asociadas.

Para finalizar, en el modo de freno se aplica sobre las ruedas una fuerza para disminuir la velocidad, pudiendo ser parte de la energía de frenado recuperada si existe algún sistema capaz de obtener dicha energía en el propio vehículo (freno regenerativo), pasando a inyectarse en la catenaria. La potencia en este caso disminuye hasta ser nula si se llega a la detención del vehículo. La energía disipada en el freno supone algo más del 40 % de la



energía de tracción, siendo la energía devuelta alrededor del 25 %, si bien no toda ella puede siempre ser utilizada.

### 3.2.2 Energía para alimentar equipos auxiliares

Si bien el consumo que se produce en los equipos auxiliares de un tren no es el más importante (que corresponde a la tracción, tal y como se ha visto anteriormente) sí es importante destacar que existen situaciones en las que el consumo de auxiliares representa prácticamente el 100 % del consumo instantáneo de potencia. Estas situaciones se producen generalmente cuando el vehículo se encuentra parado, como en los períodos de regulación de final de línea, parada en estaciones, parada en semáforos, etc. En estos casos no hay ningún consumo por parte de la tracción y, por tanto, la energía consumida únicamente se debe a los equipos auxiliares y a las pérdidas existentes en los diferentes equipos alimentados.

Los equipos auxiliares comprenden diversos aspectos como:

- Dispositivos comerciales de climatización: calefacción y aire acondicionado.
- Otros servicios comerciales: iluminación, aseos, motores para apertura y cierre de puertas, pulsadores de parada, rampas de acceso a personas de movilidad reducida, cámaras de video vigilancia, etc.
- Equipos auxiliares técnicos: ventiladores de equipos de tracción, compresores, cargadores de baterías, etc.



Figura 3.8. Equipo de aire acondicionado para instalar en un ferrocarril metropolitano. Fuente: <http://www.toshiba.co.jp>

Como es posible observar existen múltiples equipos embarcados en un vehículo metropolitano. De entre los diversos aparatos el principal consumidor de energía son los equipos de climatización. Aproximadamente, el consumo de estos equipos esta alrededor

del 80 % del consumo de equipos auxiliares total. No obstante, la cuantificación del consumo de estos equipos es un aspecto muy complejo, pues son función de variables muy diversas como la época del año, la hora del día, la localización geográfica o el grado de llenado. También existen aspectos como la frecuencia de paradas y el número de puertas que se abren que influyen en la renovación del aire y, por tanto, en el consumo final.

Además de estos factores asociados a la climatización, algunos de los equipos auxiliares técnicos se encuentran redundados por motivos de seguridad y fiabilidad, complicando la cuantificación del consumo.

Por estos motivos y ante la dificultad de conocer el consumo energético suele recurrirse a la estimación a través de los valores de potencia de cada uno de los equipos, considerando para ello el tiempo de viaje y un factor de simultaneidad. Como orden de magnitud, el consumo de los equipos auxiliares suele ser del 15 % de la energía tomada en el pantógrafo, si bien dicho valor está muy ligado al tiempo de funcionamiento y características de los equipos.

### ***3.2.3 Energía perdida en la cadena de tracción y en equipos***

Para finalizar, la energía perdida en la cadena de tracción se debe a los rendimientos de cada uno de los equipos y sistemas que participan en la tracción, como por ejemplo los motores, el convertidor, las reductoras o los filtros, en su caso. El efecto global de estas pérdidas se puede cuantificar a través del “rendimiento”, entendiendo por tal el cociente entre la energía que sale del sistema y la energía que entra al mismo, sin considerar los elementos auxiliares.

Así pues, a continuación se detallan los rendimientos de los diferentes elementos en función de la tensión de alimentación, para los sistemas de corriente continua.

RENDIMIENTOS						
TIPO	Motor cc (500 kW)	Motor cc (1 500 kW)	Síncrono ac (500 kW)	Síncrono ac (1 500 kW)	Asíncronos ac	Imanes permanentes
Transformador	0.99	0.99	1	1	1	1
Convertidor	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
Motor	0.915	0.935	0.93	0.945	0.95	0.98
Reductora (2 etapas)	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98	0.98
<b>Rendimiento total</b>	<b>0.8699</b>	<b>0.8889</b>	<b>0.8932</b>	<b>0.9076</b>	<b>0.9124</b>	<b>0.94119</b>

Tabla 3.3. Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica en electrificación en corriente continua. Fuente: García Álvarez, A; Martín Cañizares, M. Monografía 5: Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones en el diseño del material rodante para su reducción.

Para el caso de los ferrocarriles metropolitanos, actualmente vienen siendo utilizados los motores asíncronos monofásicos y trifásicos, por lo que el rendimiento global se encuentra alrededor del 90 %.

### 3.3. Acciones para la mejora de la eficiencia energética en la explotación

Tal y como se ha descrito anteriormente, el uso de la electricidad junto con la posibilidad de transportar grandes volúmenes de viajeros permiten al ferrocarril alcanzar buenos resultados en cuanto al consumo energético. No obstante, en la búsqueda de mejorar y ofrecer un servicio competitivo el ferrocarril sigue mejorando sus características para mantener la ventaja que posee frente al resto de modos.

En general, la eficiencia está ligada al uso de la mínima cantidad de energía para obtener un determinado objetivo, finalidad o servicio. En cuanto al rendimiento, referido al aspecto energético, es posible cuantificar dicho parámetro para un determinado vehículo mediante la ecuación (3) que relaciona la energía útil ( $E_{\text{útil}}$ ) que proporciona un sistema y la energía que es necesario entregar al sistema ( $E_{\text{entreg}}$ ) para que pueda ser aprovechada dicha energía útil (la diferencia entre ambos términos reside fundamentalmente en las pérdidas que se producen,  $E_{\text{perdidas}}$ ).

$$\eta = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{entreg}}} = \frac{E_{\text{útil}}}{E_{\text{ravan}} + E_{\text{aux}} + E_{\text{perdidas}}} \quad (3)$$

donde:

$E_{\text{útil}}$ : Energía utilizada por el vehículo para su normal funcionamiento (W)

Las razones más importantes para aumentar el rendimiento y disminuir el consumo total de energía de los ferrocarriles se encuentran, por un lado, en la necesidad de reducir los costes totales, puesto que el gasto energético en tracción representa una de las partidas más importantes del presupuesto de las empresas que gestionan estos sistemas, mientras que por otro lado se trata de favorecer y mejorar el medio ambiente, debido a las bajas emisiones que presenta frente al resto de modos. Este segundo aspecto se encuentra englobado en los denominados “costes sociales” o “costes externos”, que no son soportados por el usuario del transporte, sino por el conjunto de la sociedad y que están estrechamente ligados con el medio ambiente.

Bajo estas premisas, los avances en el campo del ferrocarril metropolitano son múltiples, pudiendo ser clasificados según la fase en la que son llevadas a cabo: actuaciones en la fase de diseño, de construcción y, finalmente, en la fase de explotación. En los dos primeros casos (actuaciones ligadas al trazado, vehículos y la infraestructura) las medidas tienen normalmente un efecto mayor de aquellas que pueden ser tomadas una vez construida la infraestructura y adquiridos los vehículos. No obstante, para poder llevar a cabo este tipo de medidas se debe realizar una planificación con mucha antelación, no siendo siempre posible anticipar con eficacia las actuaciones a desarrollar. Además, actuar sobre el diseño o sobre la propia infraestructura supone llevar a cabo inversiones muy elevadas que solo pueden llevarse a cabo con una planificación y programación adecuada de inversiones.

En cuanto a la fase de explotación, existen una serie de medidas que es posible adoptar con las líneas en operación y que se concretan en modificaciones que se realizan sobre la red y/o los vehículos, de tal forma que el sistema de transporte preste el mejor servicio posible con la mínima energía. En este sentido, el mayor potencial de ahorro energético se localiza sin lugar a dudas en la reducción del consumo de energía para tracción (especialmente durante el arranque y aceleración), seguido del consumo de equipos auxiliares, junto a un mejor uso del freno regenerativo.

En los siguientes apartados pues se describen algunas acciones encaminadas a la reducción del consumo energético desde el punto de vista de la conducción, el cual supone la parte más importante del consumo de un vehículo.

Cabe destacar que algunas de las estrategias que se presentan aumentan ligeramente el tiempo de viaje, si bien este aumento no tiene por qué traducirse en un retraso del tren en todos los casos, pues existen ciertas holguras en los horarios que pueden ser aprovechadas para realizar una conducción con un consumo mínimo, tal y como puede apreciarse en la Figura 3.9. Además, generalmente los viajeros dan un mayor peso e importancia a la puntualidad frente a pequeñas reducciones en el tiempo de viaje, por lo que no deben ser consideradas a priori como medidas que empeoren o afecten negativamente al servicio prestado.

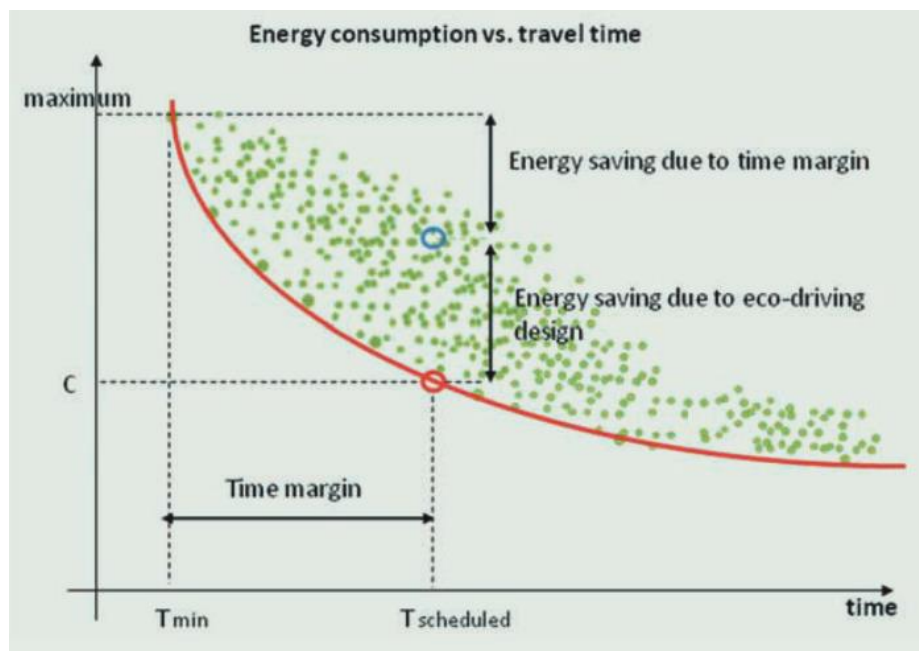


Figura 3.9. Consumo de energía en función del tiempo de viaje. Fuente: Cucala García, P., Fernández Cardador, A., Rodríguez Pecharromán, R. (2013). "Reducción del consumo energético en el ferrocarril".

### 3.3.1 Conducción eficiente

A lo largo de un cierto recorrido el consumo de energía depende, en gran medida, de la forma de conducir de los maquinistas. Como dato revelador de la importancia de este aspecto existen algunas experiencias en las que se ha analizado el consumo en función del operador del tren, observándose diferencias de consumo para un mismo trayecto de más del 20 %. Es por ello que, desde hace décadas, las administraciones se encargan de realizar programas de formación para llevar a cabo una conducción económica, tratando de modificar el estilo de conducción de los maquinistas. Aunque las inversiones necesarias para desarrollar estos programas de formación a maquinistas son costosas, se ha observado que son una de las medidas más económicas para ahorrar energía, lo que hace que sea una

herramienta muy efectiva. Es importante que la información proporcionada al personal que opera los trenes sea clara, simple y concisa, con el objetivo de reducir el nivel de estrés y permitir que las medidas puedan ser aplicadas.

Dentro de los diversos puntos que pueden ser tratados, las medidas de ahorro de energía en la conducción pueden clasificarse en tres aspectos básicos: Reducción de la velocidad máxima, reducción del ratio de aceleración y, por último, uso de la circulación en deriva. A su vez estas tres estrategias básicas se pueden combinar dando lugar a estrategias más elaboradas y detalladas, debiendo ser particularizadas para cada red.

En cuanto a la velocidad máxima, el límite al que puede circular un vehículo a lo largo de un cierto tramo cambia debido la presencia de curvas, elementos singulares en la vía, proximidad de estaciones y/o paradas, precauciones y reducciones temporales de velocidad, etc. Cada uno de estos cambios provoca, generalmente, que el tren modifique su velocidad, para mantener la velocidad a la que circula por debajo del límite establecido, pues de lo contrario los sistemas de seguridad frenarían al tren. En este sentido, la modificación de la velocidad está asociada a un proceso de aceleración o frenado, cada uno de los cuales aumenta el consumo energético respecto de una situación donde se mantiene una velocidad constante entre ambos tramos de velocidad, por lo que cuanto más uniforme y suave sea la conducción, menor será el consumo final. Por ejemplo, si se conoce la posición exacta de una limitación de velocidad, se recomienda circular en deriva una cierta distancia antes de llegar al límite, de tal forma que no sea necesario aplicar el freno.

Por lo que se refiere al ratio de aceleración de los vehículos metropolitanos, para poder alcanzar velocidades comerciales aceptables y dada la proximidad entre las estaciones los vehículos desarrollan aceleraciones y deceleraciones de  $1 \text{ m/s}^2$  o  $1,2 \text{ m/s}^2$  en condiciones normales, alcanzando velocidades de unos 80 km/h. El conductor del vehículo puede, a través del mando de conducción que posee en el pupitre, aplicar la fuerza máxima disponible o un valor menor, para adecuar la velocidad del tren a las necesidades de la marcha. En función del valor de tracción o frenado aplicado en cada momento aumentará o disminuirá el consumo, por lo que la aceleración (o deceleración) que se aplica en cada instante es un elemento importante en el balance energético final. Para finalizar, hay que

destacar que el uso del freno regenerativo durante la reducción de la velocidad puede ayudar a reducir considerablemente el consumo energético, si bien dicho sistema será analizado detalladamente en el siguiente apartado.

Por último, se conoce como circulación en deriva al estado en el que un vehículo ferroviario avanza sin que se le aplique ningún esfuerzo a los motores. Un ejemplo de la aplicación de la deriva es la que puede llevarse a cabo justo antes de coronar un punto elevado. En este caso el tren circula en deriva una cierta distancia previa a alcanzar el punto más elevado. Una vez llegado a este punto el tren circula hacia un punto de menor cota permitiendo ahorrar importantes cantidades de energía.

Otros aspectos adicionales a enseñar a los maquinistas para la mejora del consumo y que no están directamente ligados con la operación de la conducción son:

- Técnicas de reducción del consumo de energía a la hora de mantener el confort en los trenes mientras están aparcados.
- Optimización del horario y salida puntual para aumentar la holgura de tiempo y permitir la conducción económica.
- Coordinación del personal para reducir el consumo de energía en el material estacionado.
- Reducción del consumo energético para mantener en nivel de confort en los trenes, por ejemplo, modificando la temperatura en los coches.
- Muestra a los maquinistas, personal de estaciones y directivos información de los costes energéticos y consumo de energía tanto durante la conducción como durante el mantenimiento de trenes.
- Control y almacenamiento de los datos del consumo de energía para su análisis.

Más allá de las medidas durante la conducción, existen otro tipo de actuaciones para reducir el consumo dirigido a los maquinistas. Una posible herramienta de ayuda es el diseño y desarrollo de un simulador de consumo energético en el que sea posible llevar a cabo diferentes modos de conducción.

Como ejemplo de la aplicación de un simulador es posible destacar la experiencia que se llevó a cabo en la línea Madrid-Sevilla, en la que se instó a los maquinistas a mejorar el consumo mediante la manipulación del simulador que consideraba los aspectos de circulación en deriva, reducción de la velocidad máxima y menor aceleración. Los resultados en la explotación real de la línea fueron muy satisfactorios.

A continuación se muestran en la tabla 3.4. los valores obtenidos en el simulador citado anteriormente:

DATOS DEL SIMULADOR		
	Madrid-Sevilla (Córdoba)	Sevilla-Madrid (Córdoba)
Tiempo planeado	2 h 35 min	2 h 35 min
Tiempo de viaje mínimo	2 h 11 min	2 h 20 min
Máx. consumo de energía kWh (kWh/km)	6 400 (13,6)	7 400 (15,7)
Mín. consumo de energía kWh (kWh/km)	5 200 (11,1)	6 900 (14,7)
Ahorro de energía	20 %	10 %

Tabla 3.4. Valores de tiempos y energía consumida del simulador desarrollado. Fuente: Renfe.

Por otro lado, la experiencia adquirida ha permitido observar que un incremento del tiempo de viaje de sólo cinco minutos puede suponer una reducción del consumo del 8 %, ya que en sentido Madrid-Sevilla es posible circular en deriva en el sesenta por ciento del recorrido.

Además del ejemplo en España, en otros países como Alemania se han desarrollado experiencias en cuanto a la conducción eficiente y al entrenamiento de los maquinistas. En este país, los maquinistas del Ferrocarril BLS Lötschberg recibieron una serie de cursos e información para aplicar las técnicas de conducción económica. Para controlar y comprobar la efectividad de dichas medidas se equipó a las locomotoras de la serie Re 465 con medidores de consumo energético. A través de dichos equipos era posible medir la energía total tomada de la red y la energía total devuelta a la misma, como resultado de la utilización del frenado por recuperación.

De entre los múltiples datos obtenidos destacaba la influencia significativa del estilo de conducción en terrenos llanos. Realizando una conducción económica, el consumo de



energía para el tramo Berna-Thun era de 305 kWh, mientras que para el mismo trayecto sin la conducción económica el valor de energía alcanzaba 373 kWh, un 22 % superior.

Un dato curioso registrado a destacar es que el consumo de energía no muestra diferencias significativas entre carriles secos y húmedos. Sin embargo, la energía que es posible recuperar cuando el carril está húmedo desciende a casi un tercio de la obtenida con carril seco, pues la humedad impide aplicar todo el esfuerzo de frenado.

### ***3.3.2 Uso del frenado regenerativo y sistemas de acumulación de energía***

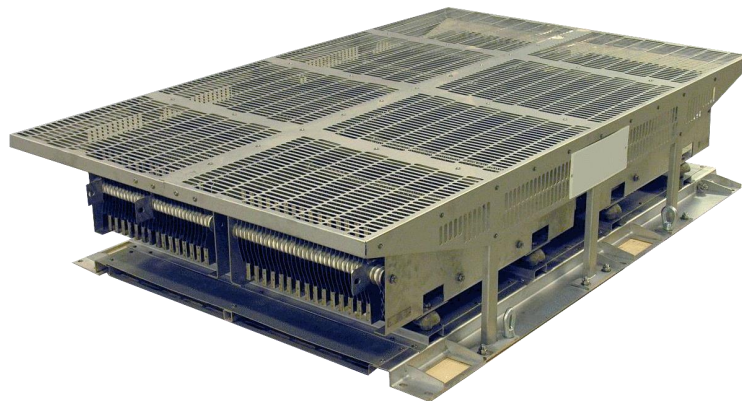
El frenado regenerativo es un tipo de freno dinámico que se basa en el principio de que un motor eléctrico puede ser utilizado como generador, sin necesidad de llevar a cabo modificaciones en el mismo. Consiste en un proceso mediante el cual el motor eléctrico de tracción es reconectado como generador durante el frenado (usándose como “freno motor”) suministrando energía, puesto que aprovecha la energía cinética y potencial del vehículo en movimiento para generar energía eléctrica durante dicho frenado.

Un aspecto a tener en cuenta es que el frenado convencional basado en la fricción de varios elementos entre sí se sigue empleando junto con el regenerativo, puesto que aunque el frenado regenerativo reduce de manera efectiva la velocidad, la cantidad de energía a disipar queda limitada por la capacidad de absorción de la misma por parte del sistema ferroviario.

La generación de energía eléctrica por el frenado de los trenes no conlleva ningún tipo de emisión asociada, siendo el coste marginal de esta energía nulo. Actualmente, la mayoría de los nuevos trenes eléctricos permiten este tipo de frenado, siendo especialmente importante en los servicios metropolitanos. Esta importancia reside en que en los servicios con muchas paradas, como ocurre en el caso del metro, se producen muchas reducciones de velocidad durante el trayecto, permitiendo por tanto que parte de la energía cinética disipada pueda ser transformada y aprovechada, si bien no toda la energía puede ser aprovechada por diferentes motivos, perdiéndose parte de la energía.

Así pues, la energía eléctrica producida durante el frenado del vehículo puede ser utilizada para alimentar elementos diferentes. En función del uso de la energía es posible realizar una clasificación de los tipos de freno:

- Frenado reostático: Este tipo de freno se emplea cuando la energía generada en el frenado no puede ser inyectada en la catenaria o en la red. En estas condiciones, se puede desperdiciar en parte el tremendo potencial de ahorro del frenado regenerativo. La energía es enviada a un conjunto de resistencias, que se encarga de proporcionar una elevada carga al circuito eléctrico, lo cual provoca que la velocidad de rotación de los motores disminuya. Durante este proceso las resistencias aumentan considerablemente su temperatura, ya que la energía se disipa en forma de calor (en algunos casos puede ser usada para el sistema de calefacción). Por este motivo es necesario equipar a las resistencias con sistemas de ventilación adecuados para evitar su deterioro. Como ejemplo, en el conjunto de los sistemas metropolitanos españoles se estima que alrededor de 150 GWh son disipados en forma de calor en las resistencias de los trenes.



*Figura 3.10. Equipo de reóstatos de ferrocarril alojados en el techo. Fuente: Metal Deploye resistor.*

- Frenado regenerativo: En este caso, las conexiones del motor de tracción son modificadas, mediante un dispositivo electrónico, para que funcione como un generador eléctrico. La energía generada durante el frenado de este tipo no se disipa en las resistencias, pudiendo ser usada para alimentar los servicios auxiliares del mismo tren, almacenada en unos acumuladores especiales instalados a bordo, devuelta a la catenaria para que pueda ser usada de nuevo por otro vehículo situado en el mismo cantón eléctrico o, finalmente, entregada a la red eléctrica general, siendo posible que coexistan simultáneamente varias de estas situaciones. En España

se generan más de 480 GWh al año en este tipo de frenado por los ferrocarriles metropolitanos, de los cuales solo se aprovecha una pequeña cantidad, por diversos inconvenientes técnicos y legales. Algunos valores representativos de redes metropolitanas son del 5 % en Hong Kong KCRC, 30 % en el metro de Lisboa y 34 % en el metro de Nueva Delhi.

Además de estos dos tipos de frenos y para completar el sistema de frenado de un vehículo cabe destacar que existe un tercer tipo de freno, llamado freno neumático. Este freno constituye el sistema de frenado básico, el cual se acciona mediante circuitos neumáticos de aire comprimido o de vacío con presiones de funcionamiento que oscilan entre 0 y 6 atmósferas. A través de la presión ejercida por unas zapatas sobre las ruedas o de patines sobre el carril se consigue el frenado. Este sistema siempre está presente, aunque el tren disponga de sistemas de frenos dinámicos más avanzados, y se usa generalmente como freno complementario, de reserva y de estacionamiento.

Ante las ventajas que presenta este tipo de frenado, cabe preguntarse cuáles son los parámetros que afectan y determinan el grado de energía que es posible recuperarse. Los factores de los que depende son muchos y de diversa naturaleza, siendo los más destacados el grado de desaceleración aplicado por el tren, el tipo de conducción, la frecuencia del servicio, el perfil de potencia de los trenes, la configuración de la red y el perfil del terreno y la presencia de sistemas de acumulación embarcados o en la red.

Como valores orientativos, según el Institute for Futures Studies and Technology Assessment alemán (IZT), tenemos la tabla 3.5., por tipo de líneas:

	Potencial de recuperación	Corrección por pérdidas en cadena de tracción	Corrección por pérdidas frenado	Potencial de recuperación con tecnologías adicionales	Corrección por receptividad de la red	Potencial de recuperación sin tecnologías adicionales
<b>Líneas principales</b>	15 %	0,9	0,8	11 %	0,2	2 %
<b>Líneas regionales</b>	35 %	0,9	0,8	25 %	0,4	10 %
<b>Líneas secundarias</b>	45 %	0,9	0,8	32 %	0,5	16 %

Tabla 3.5. Valores de posible energía recuperada. Fuente: IZT.

Vistos los diferentes tipos de freno que pueden coexistir, el estudio se centrará en los sistemas y posibles aprovechamientos de la energía regenerada. En la Figura 3.11. se pueden apreciar los flujos de energía en el ferrocarril en los que puede descomponerse la energía proveniente del freno regenerativo.

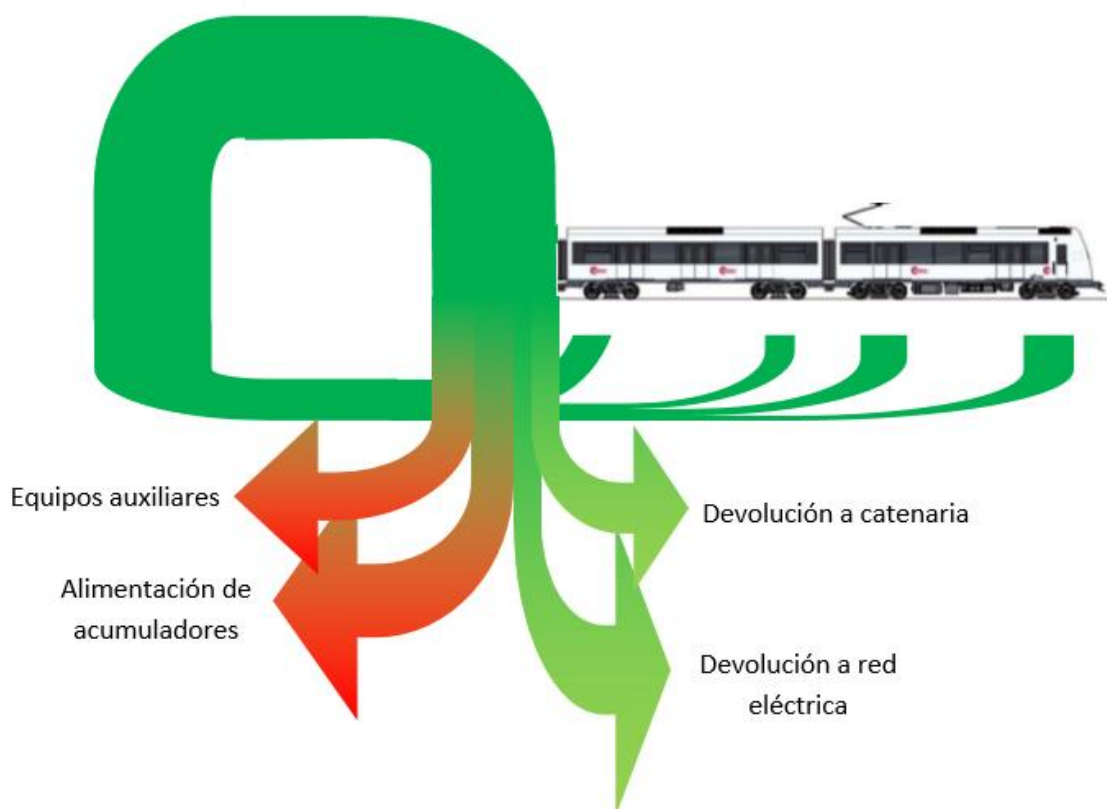


Figura 3.11. Usos y flujo de la energía regenerada durante la frenada. Fuente: Elaboración propia.

En el primer caso, la energía regenerada puede utilizarse para alimentar parcialmente los propios sistemas auxiliares del tren, por lo que la demanda de energía en la catenaria será menor durante el tiempo que se esté alimentando, reduciéndose el total de energía consumida.

Por otro lado, también es posible el almacenamiento de energía gracias a las últimas tecnologías que permiten almacenar una cierta cantidad que puede ser usada en el momento que se requiera. Así pues, la energía puede ser almacenada en el mismo tren (almacenamiento embarcado) o bien en la propia infraestructura. Este tipo de tecnología y sistema está actualmente en constante evolución, desarrollándose nuevas soluciones que se adaptan a las necesidades de los trenes o mejoran algunas de las prestaciones ya ofrecidas.

El uso de un sistema u otro depende de diversos factores, como la capacidad de almacenamiento o el coste de la tecnología, entre otros aspectos.

Uno de los mayores inconvenientes para el uso de la tecnología de almacenamiento es el hecho de que existe una gran incertidumbre sobre la mejor tecnología a emplear en cada caso y de cómo debe ser combinada con otro tipo de acciones.

A continuación se describen algunos de los sistemas actuales que permiten almacenar la energía eléctrica en los propios vehículos:

- **Baterías:** Estos elementos son equipos de almacenamiento de energía eléctrica usados en múltiples campos y sistemas. El almacenamiento de la energía se realiza en forma química, el cual puede ser fácilmente recuperable como electricidad. Estos elementos poseen una rápida respuesta, con pérdidas reducidas y, por tanto, alto rendimiento. No obstante, generalmente contienen materiales tóxicos, por lo que medioambientalmente pueden ser perjudiciales, especialmente tras la vida útil. Además, un aspecto que las condiciona es su baja potencia de salida, lo que limita mucho su uso en el campo ferroviario. Un ejemplo de su uso se encuentra tanto en los tranvías Citadis Alstom de Niza (Francia) como en los Siemens S70 de San Diego (EE.UU.).



*Figura 3.12. Baterías en techo de vehículo. Fuente: Siemens.*

- **Campos electromagnéticos (SMES):** En este caso la energía se almacena dentro de un imán. La ventaja de este sistema es que es capaz de proporcionar megavatios de energía en una fracción reducida de tiempo, por lo que puede sustituir una pérdida

repentina de energía en la línea. El tiempo de carga de estos elementos es de unos pocos minutos. En el campo ferroviario no han sido usados, pero sí se han aplicado en otros sistemas eléctricos.

- Células reversibles de combustible. Estos elementos producen energía transformando el hidrógeno de un depósito y el oxígeno del aire en agua, generando una corriente eléctrica en un proceso electroquímico que es reversible. La capacidad de generación viene determinada, entre otros aspectos, por el tamaño de los depósitos de almacenamiento, si bien alcanzan un rendimiento menor que muchas de las baterías convencionales.
- Supercondensadores. El funcionamiento de un supercondensador es similar al de un condensador convencional. Generalmente, se considera supercondensador a los dispositivos pasivos de almacenamiento de energía con una capacitancia mayor a un faradio. En ellos la energía está almacenada electrostáticamente entre dos electrodos separados por un electrolito, pudiendo proporcionar rápidas descargas de energía. Son capaces de realizar miles de ciclos de carga y descarga. Es posible que sean agrupados para alcanzar la tensión y potencia necesaria. Un ejemplo del uso de estos sistemas se encuentra en el sistema MITRAC Energy Saver que posee Bombardier, instalado en el tranvía de Mannheim (Alemania).

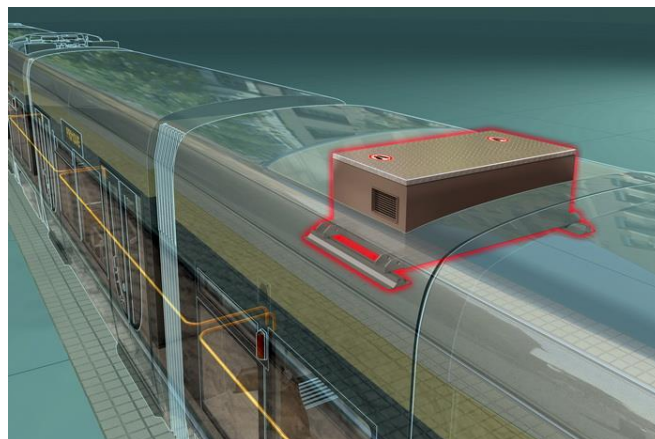
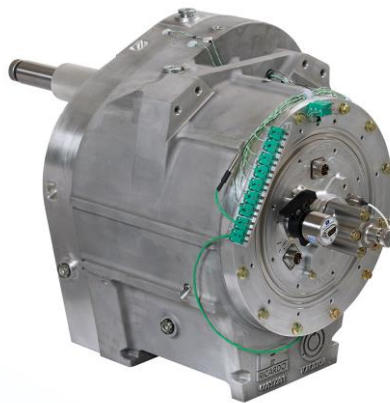


Figura 3.13. Supercondensadores en techo de vehículo. Fuente: Maxwell Technologies.

- Volantes de inercia. Los volantes de inercia son elementos formados por una masa que rota sobre un eje, donde la energía almacenada es energía cinética. El volante tiene acoplado un motor eléctrico que lo carga cuando el volante eleva su velocidad, mientras que es capaz de devolver dicha energía cuando reduce su velocidad. Estos elementos poseen ventajas respecto al resto de elementos, como la elevada densidad

de energía o la velocidad con la que la energía se puede intercambiar. Además, poseen una larga vida útil (unos 20 años o decenas de miles de ciclos) y emplean materiales medioambientalmente inertes. Este sistema ha sido aplicado en los tranvías de Rotterdam y en la red suburbana de París. No obstante las ventajas descritas, debido a su rotor gira a una alta velocidad existe el riesgo de daño o rotura, entregando toda la energía de una manera incontrolada, cosa que puede comprometer la seguridad del tren. Además, su coste actual es elevado, limitando su aplicación por el momento.



*Figura 3.14. Volante de inercia para vehículo ferroviario. Fuente: Ricardo.*

Más allá de los sistemas descritos existen otras tecnologías mucho más experimentales y en fase de desarrollo (resortes radioidales, nanotubos de carbono, ultracapacitores, etc.). No obstante, uno de los inconvenientes que todavía no ha sido superado para poder aplicar cualquiera de las tecnologías descritas es que todas ellas están fuertemente condicionadas por el volumen y masa que se puede embarcar en un tren sin afectar a la dinámica y la capacidad de carga.

Como alternativa para evitar las limitaciones de instalar acumuladores embarcados existe la posibilidad de instalar los acumuladores en tierra. En este caso, la tecnología más idónea y que mejor se adapta a las necesidades son los volantes de inercia, aunque también es posible el uso de baterías o ultracondensadores.

Como alternativa al almacenamiento de la energía se plantea la posibilidad de utilizar la energía para alimentar otros vehículos o instalaciones (balizas, semáforos o talleres). En un primer momento puede pensarse que el uso de la energía en otros vehículos es la solución

más razonable y de mayor utilidad, si bien dicho uso está fuertemente condicionado por la presencia de otro vehículo en la red capaz utilizar dicha energía.

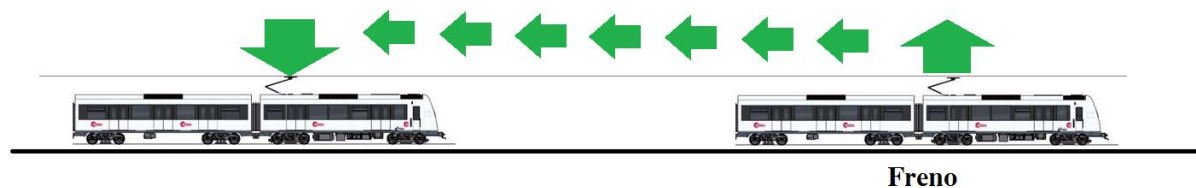


Figura 3.15. Uso de energía regenerada por otro vehículo. Fuente: Elaboración propia.

Por ello, la efectividad de esta aplicación depende de lo que se denomina como receptividad del sistema, entendida ésta como la capacidad del sistema para aceptar la energía devuelta por los trenes durante el frenado. Esta receptividad está muy condicionada por la longitud de las secciones eléctricas (cuanto más largas son existe mayor probabilidad de encontrar un vehículo que pueda usar la energía) y la densidad del tráfico.

Una de las situaciones más favorables para el uso de la energía regenerada se presenta cuando se sincroniza el frenado de un vehículo con la aceleración de otro en la misma sección eléctrica, de forma que la energía de la frenada pueda ser aprovechada para acelerar. Existen algunas investigaciones como las desarrolladas (Peña. *et al.* 2012, Xun *et al.* 2012 o Fournier, 2014) donde el objetivo es la sincronización de horarios para mejorar el consumo global de la red. No obstante, la complejidad del sistema es notable, siendo posible que pequeños retrasos en el horario produzcan “puntas” de consumo eléctrico que aumentan las necesidades de dimensionamiento del sistema eléctrico. En el caso de líneas de metro y cercanías bien sincronizadas es posible alcanzar porcentajes de aprovechamiento del orden del 15 % al 30 %.

El último aspecto descrito en cuanto al uso de la energía regenerada es el de la devolución de la energía a la red general eléctrica. Para que dicha energía sea devuelta es imprescindible que la subestación sea bidireccional. Esta práctica está aun poco desarrollada, pues en gran medida la tecnología necesaria se está desarrollando en la actualidad. En el caso de líneas electrificadas en corriente alterna, la conexión a la red pública se hace mediante un transformador, por lo que las subestaciones son siempre bidireccionales. No obstante, en líneas electrificadas en corriente continua, la subestación



puede ser bidireccional o no, dependiendo del convertidor electrónico que exista. En España, generalmente las subestaciones de corriente continua no son bidireccionales, por lo que la energía no puede ser devuelta a la red. Además, por el momento la energía devuelta no tiene una compensación económica, por lo que no existe un apoyo e incentivo para llevar a cabo la instalación de subestaciones bidireccionales.

En la tabla 3.6. se muestran algunos datos de diferentes redes, en cuanto a valores de energía devuelta y quemada en sistemas que incorporan frenado regenerativo, los cuales permiten tener una idea de las magnitudes de cada término:

Valores de energía				
	Energía consumida GWh	% Energía devuelta	% Energía quemada	Energía quemada GWh
Metro de Bilbao	52	45	7	6,34
Metro de Bruselas	40	32	7	4
ADIF (Cercanías Málaga-Fuengirola)	6	28	20	1.45

Tabla 3.6. Valores de energía devuelta y quemada. Fuente: Ingeteam.

### 3.3.3 Reducción del tiempo de parada en estaciones

Este tiempo de parada que se realiza en cada estación de metro es, generalmente, el aspecto que produce los retrasos en el horario previsto. Para volver al horario estimado, el tren deberá circular más rápido, aprovechando las holguras de las que dispone para recuperar el tiempo. Este hecho provoca que las holguras no puedan ser aprovechadas para llevar a cabo una conducción económica, por lo que muchas de las propuestas planteadas no son aplicables en estos casos.

Por este motivo el cumplimiento de los horarios es fundamental, pues de lo contrario la conducción económica pasa a un segundo plano. El tiempo de parada en las estaciones se puede dividir en diferentes aspectos:

- Desde el instante de detención del tren hasta la apertura de puertas.
- Desde el instante anterior hasta que comienza el intercambio de viajeros.
- Tiempo de intercambio de viajeros.
- Desde el final del intercambio de viajeros hasta el cierre de puertas.
- Desde el instante anterior hasta que el tren se pone en movimiento.

En cada uno de los aspectos anteriormente es posible llevar a cabo medidas para reducir el tiempo utilizado, si bien las ideas más desarrolladas se centran únicamente en el tiempo de intercambio de viajeros y el comportamiento de los mismos. En este sentido, la mayor reducción del tiempo de parada se produce mediante la distribución adecuada a lo largo del andén de los viajeros, evitando la acumulación que suele producirse en algunas puertas, junto con la liberación del espacio junto a la puerta de acceso, lo cual facilita el acceso o la salida a los otros viajeros.

### ***3.3.4 Automatización de la operación***

Como se ha visto en apartados anteriores, la conducción automática de trenes (ATO) es un sistema que permite automatizar el proceso de conducción. En este tipo de sistemas entre cada estación se diseñan varias marchas asociadas a en base a parámetros de tiempo, velocidad, distancia, perfil y prestaciones de los trenes, pudiendo recuperar retrasos o realizar conducciones más lentas según las necesidades de cada momento. El ATO controla los siguientes aspectos:

- Grado de aceleración a aplicar.
- Velocidad óptima para cada instante.
- Momento exacto para iniciar la circulación en deriva.
- Momento exacto para aplicar los frenos, y el grado de aplicación.

Tradicionalmente el diseño de las marchas se ha llevado a cabo considerando solamente aspectos operacionales como los tiempos de recorrido o el confort de los viajeros. Debido a su complejidad, las programaciones realizadas se llevan a cabo mediante simplificaciones en los modelos del movimiento y control del tren. No obstante, a dichos criterios es posible añadir otros aspectos, como la eficiencia energética de la conducción, de forma que se seleccione la marcha más adecuada atendiendo también a la energía consumida y no solo a criterios operacionales.

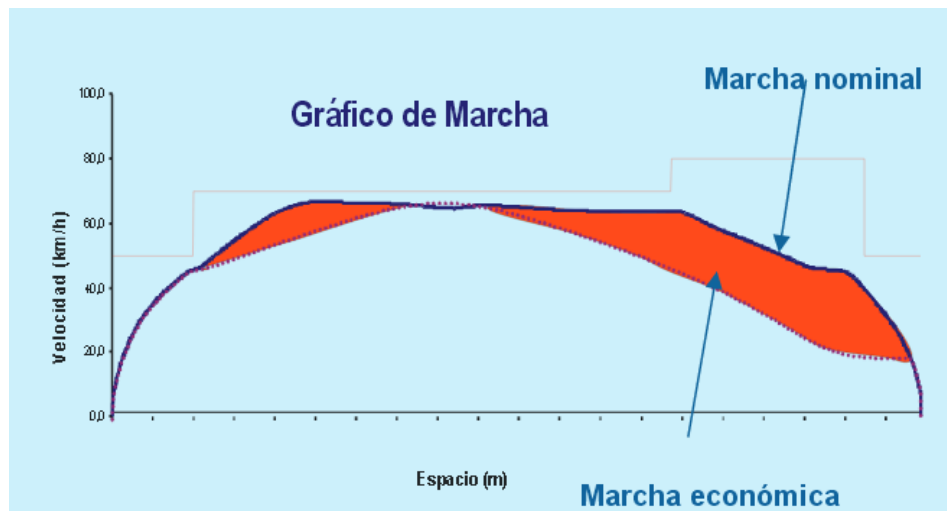


Figura 3.16. Comparativa de diferentes marchas. Fuente: Metro Madrid.

Para poder llevar a cabo la programación bajo estos criterios energéticos es necesario tener en cuenta las características del material móvil, de la vía, de la red de alimentación y las características funcionales del sistema ATO de cada red. En su caso, una buena programación debe incorporar aspectos más específicos como el grado de aprovechamiento de la energía regenerada, la cogeneración y los acumuladores. El uso de derivas o reducciones de velocidad en tramos concretos del recorrido puede permitir ahorros considerables de energía. No obstante, la programación debe llevarse considerando el balance energético global de la línea y no de cada tren por separado.

En cuanto a los aspectos energéticos, el sistema ATO tiene las siguientes ventajas:

- Marchas más suaves para el conjunto de trenes de una misma línea.
- Viajes más confortables.
- Rebasar una estación sin detenerse.
- Cambiar el punto de detención de los trenes en las estaciones.
- Posibilidad de realizar diferentes marchas entre estaciones, como “modo control” o “modo de ahorro de energía”.

En el modo “ahorro de energía” se produce un ligero incremento de los tiempos de viaje, haciendo uso de las holguras previstas en los horarios. Como ejemplo, en el metro de Madrid y gracias al control de tráfico la regularidad se ha mejorado en un 43 % y el consumo de energía se ha reducido en un 18 % desde el año 1996.



Para finalizar, hay que destacar los trabajos desarrollados por el Instituto de Investigación Tecnológica (IIT) de la Universidad Pontificia Comillas (España), donde el grupo de trabajo desarrolla nuevos modelos de simulación de la marcha del tren y su consumo energético específicos. Entre los logros más relevantes obtenidos en los últimos años es posible citar el ahorro conseguido en las líneas 2 y 5 de Metro de Barcelona cercano al 16 % y del 8 % en el caso de Metro Bilbao.



## 4. Descripción de la red metropolitana de estudio

En la Comunidad Valenciana la empresa *Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana* (FGV) nace en el año 1986 como empresa pública dependiente de la Generalidad Valenciana cuya responsabilidad es la explotación, gestión y mantenimiento de las líneas férreas que discurren exclusivamente por el territorio perteneciente a la Comunidad Valenciana.

Los servicios prestados por la empresa FGV están englobados bajo dos marcas comerciales:

- **Metrovalencia:** Constituye la red que da cobertura a la ciudad de Valencia, a su área metropolitana y zonas de influencia.
- **TRAM Metropolitano de Alicante:** Cuya red da servicio a la ciudad de Alicante, su área metropolitana y el eje de la Costa Blanca hasta Denia.



Figura 4.1. Esquema de la organización de FGV. Elaboración propia.

En primer lugar cae destacar que el estudio del consumo energético se centra en la red de Metrovalencia, por lo que no se analizará la red de TRAM Metropolitano de Alicante. En cuanto a la red de Metrovalencia, es posible afirmar que la red actual es el resultado de la expansión de la antigua red de ferrocarriles suburbanos de Valencia, conocida popularmente como el “Trenet de Valencia”, la cual unía la capital con las poblaciones del

área metropolitana. En el año 1988 se inaugura las primeras líneas metropolitanas, convirtiéndose en la tercera ciudad con este tipo de servicio tras Madrid y Barcelona.

Así pues, en la actualidad Metrovalencia y tras el cambio de líneas y la reestructuración de las mismas la ciudad de Valencia dispone de seis líneas de metro (correspondientes a las líneas 1,2,3,5,7 y 9) y tres de tranvía (líneas 4, 6 y 8), siendo la red completa la segunda en número de kilómetros, por detrás únicamente de la red de Madrid y la cuarta en número de usuarios, tras las de Madrid, Barcelona y Bilbao.

En cuanto a las características de la red, Metrovalencia cuenta con una longitud total de 146,797 km, 132 estaciones y 121 trenes. Los datos más relevantes de la red se reflejan en la tabla 4.1, mientras que el plano de la red puede observarse en la Figura 4.2.

Datos de la red de Metrovalencia en el año 2014	
Demanda de viajeros 2014	60.279.360
Líneas	5 (9 en la actualidad)
Kilómetros de red	146,774 km
Kilómetros en túnel	26,593 km
Kilómetros en superficie	120,180 km
Kilómetros vía única	79,099 km
Kilómetros vía doble	67,675 km
Estaciones y apeaderos	133
Estaciones subterráneas	35
Estaciones en superficie	98
Escaleras mecánicas	137
Ascensores	85
Trenes y tranvías	124

Tabla 4.1. Datos principales de la red de Metrovalencia. Fuente: FGV



Figura 4.2. Plano de la red completa de Metrovalencia, en vigor desde marzo de 2015. Fuente: FGV.

Datos por línea de Metrovalencia					
Línea	Trayecto	Tipo	Estaciones	Longitud (km)	Viajeros (2014)
1	Bétera - Villanueva de Castellón	Metro	40	70,24	17.690.417
2	Llíria - Torrent Avinguda	Metro	33	39,75	–
3	Rafelbunyol - Aeroport	Metro	27	24,691	19.329.165
4	Mas del Rosari/Lloma Llarga-Terramelar/Fira València - Doctor Lluch	Tranvía	33	15,921	4.920.404
5	Marítim-Serrería - Aeroport	Metro	18	12,95	14.648.527
6	Tossal del Rei - Marítim-Serrería	Tranvía	21	10,067	2.522.669
7	Marítim-Serrería - Torrent Avinguda	Metro	16	15,45	–
8	Marina Reial Joan Carles I - Marítim-Serrería	Tranvía	4	1,2	–
9	Alboraya-Peris Aragó - Riba-roja de Túria	Metro	22	23,367	–

Tabla 4.2. Datos de la red de Metrovalencia por líneas. Fuente: FGV

Vistas las principales características de la red, es momento de analizar los aspectos más relevantes en cuanto al consumo energético, tema que interesa en el presente trabajo. Para dar servicio a todas estas líneas, durante los últimos años FGV ha aumentado la potencia de suministro hasta los 23 000 kW.

En cuanto a la tracción y los sistemas de alimentación de la red, cabe destacar que sólo existe una única tensión de entrada a las subestaciones con valor de 20 kV c.a. No obstante, existen dos tensiones diferentes de salida, 1 500 Vcc (la cual se utiliza en la red de metro) y 750 Vcc (se utiliza en la red de tranvías), con unos consumos anuales alrededor de 64,4 GWh y 18,1 GWh, los cuales representan un 78 % y 22 % respectivamente del total de energía consumida.



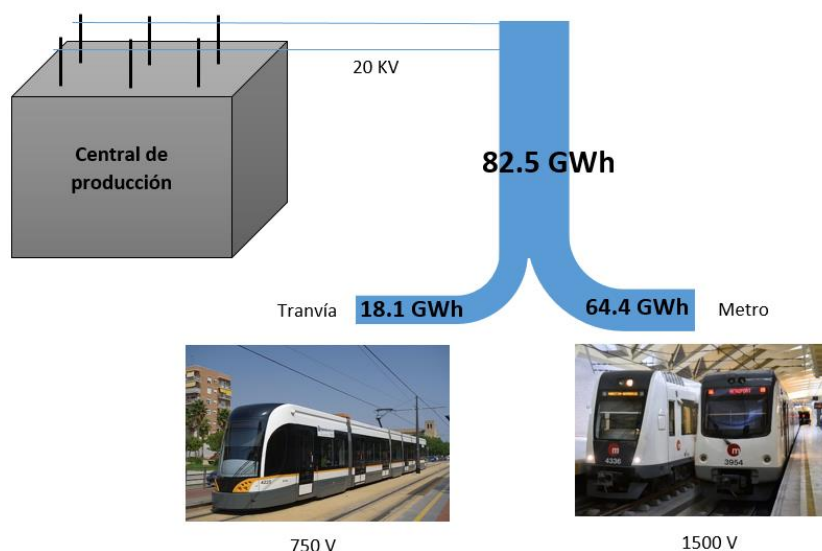


Figura 4.3. Esquema de flujo energético y tensión de la red de Metrovalencia. Elaboración propia.

Así pues, el consumo anteriormente indicado corresponde a la energía utilizada por todos los elementos y sistemas que existen en la red. De forma desglosada, tenemos la siguiente situación:

Datos de consumo energético en Metrovalencia			
Consumo (kWh)	2011	2012	2013
Complejo Valencia SUD	3 059 769	2 573 957	2 532 002
Talleres de Machado	2 041 012	2 047 057	1 916 973
Taller de Naranjos	925 625	734 959	648 630
Estaciones/otras instalaciones	20 340 424	19 288 871	18 647 182
Tracción	58 659 955	56 615 484	53 679 848
<b>CONSUMO TOTAL</b>	<b>85 026 785</b>	<b>81 260 328</b>	<b>77 424 635</b>

Tabla 4.3. Consumo energético de Metrovalencia. Fuente: FGV.

En cuanto al reparto modal de la energía, en el caso del año 2013 (último año del que se disponen datos), es el siguiente:

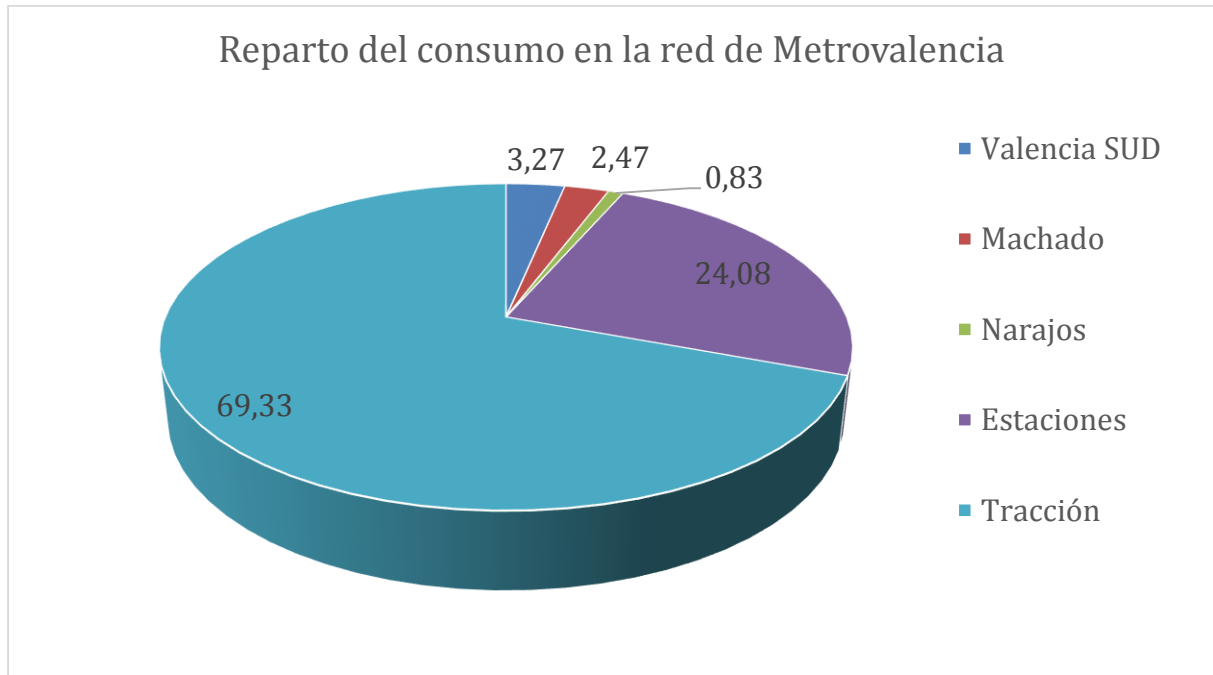


Figura 4.4. Reparto del consumo energético. Elaboración propia.

Como se observa en la Figura 4.4, alrededor del 70 % del consumo energético lo supone la tracción (unos 53 GWh), mientras que el 24 % se consume en estaciones, siendo despreciable el resto de aspectos. Un aspecto que cabe destacar es el que FGV dispone de unos 10 400 paneles fotovoltaicos con una superficie de 18 000 m<sup>2</sup> distribuidos en los diferentes talleres de la red, los cuales generan alrededor de 2 GWh al año, lo que supone un 3 % de la energía total consumida.



Figura 4.5. Paneles solares en el taller de Machado de FGV. Fuente: Recuperado de [www.treando.com](http://www.treando.com) (accedido el 15 de Mayo de 2015)

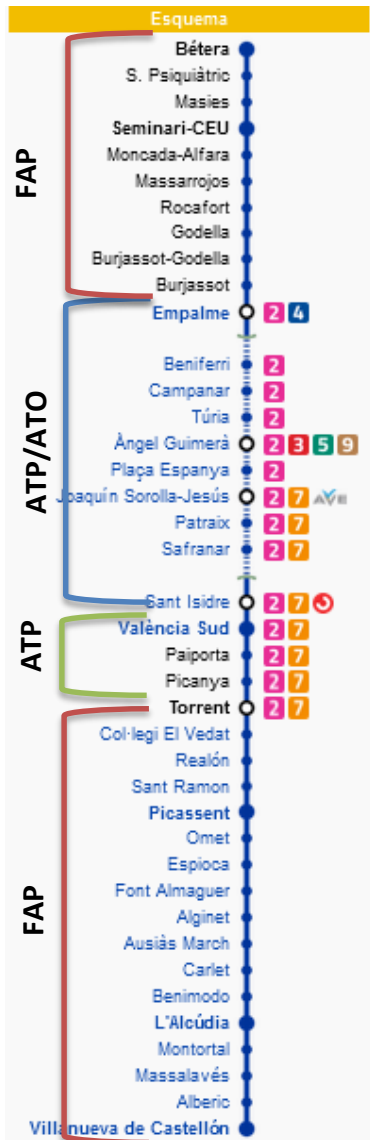
## 4.1. Líneas de estudio

El estudio del consumo energético se ha llevado a cabo en todas las líneas de metro de la red de Metrovalencia, esto es, las actuales líneas 1, 2, 3, 5 y 7 siendo excluidas las líneas de tranvía (líneas 4, 6 y 8 que poseen tensión y vehículos diferentes) además la nueva línea 9 (inaugurada el 6 de marzo de 2015), puesto que durante el estudio ésta última todavía no estaba operativa y no se tienen datos de consumo del tramo Aeropuerto-Ribarroja.

El Sistema de protección automática que se usa es el denominado ATP DTG (*Distance To Go*) o Distancia Objetivo (DO), el cual está integrado por dos elementos que son: ATP y ATO. En la red de Metrovalencia también existen tramos en superficie con el sistema FAP/DIMAP. De forma más específica, los tramos en subterráneo (lo cuales discurren en su mayoría por el casco urbano de la ciudad de Valencia) cuentan con el sistema de conducción automática o ATO (siempre supervisado por el sistema ATP, que es en realidad quien se encarga de la seguridad de la circulación) y corresponden a unos 27 km (lo que supone un 18 % de la red) mientras que en el resto de tramos, en superficie, se realiza una conducción manual supervisada por los sistemas ATP o FAP/DIMAP, los cuales constituyen unos 129 km (el 82 % de la red).

En cuanto al tipo de conducción por líneas, hay que destacar que la conducción automática se realiza en las líneas 1 y 2 en el tramo comprendido entre las estaciones de Empalme y València Sud; en la línea 3 entre las estaciones de Alboraya-Peris, Aragón y Aeropuerto; en la línea 5 en su totalidad, es decir, entre Marítim-Serrería y Aeropuerto y en la línea 7 entre Marítim-Serrería y València Sud.

Vistas las principales características en cuanto a los sistemas de seguridad y ayuda a la conducción existentes, a continuación se describen en detalle cada una de las diferentes líneas analizadas y sus particularidades.



1

Bétera/Seminari  
Torrent/Villanueva de Castellón

La línea 1 de Metrovalencia proviene de las antiguas líneas de FEVE Jesús - Villanueva de Castellón y Pont de Fusta - Bétera. Es la línea de mayor longitud y cuenta con 40 estaciones, de las cuales 8 comprendidas entre las estaciones de Beniferri y Safranar son subterráneas, con un recorrido total de 70,24 kilómetros.

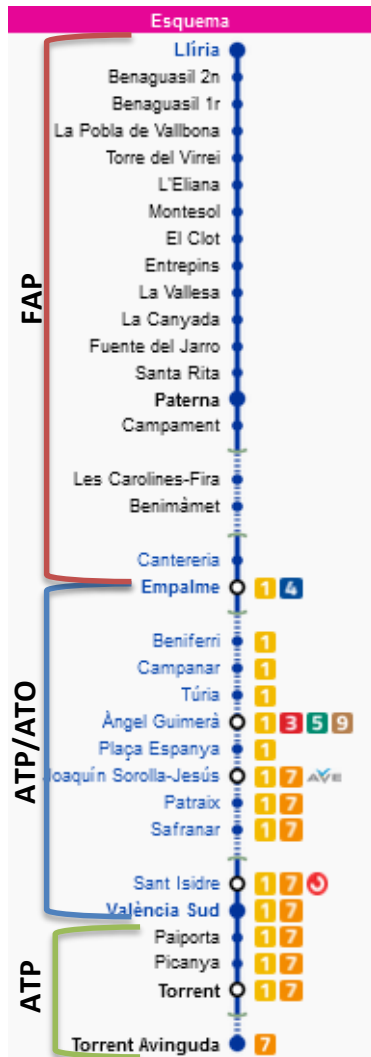
Además del trayecto completo entre Bétera y Villanueva de Castellón, presta servicios cortos entre otras estaciones intermedias con un importante número de viajeros como Seminari-CEU, Empalme, València Sud, Torrent, Picassent y L'Alcúdia.

En cuanto a la explotación, la línea cuenta con el sistema de seguridad ATP en el tramo Empalme-Torrent, contando con la conducción automática ATO en el tramo subterráneo Empalme-Sant Isidre y operativo hasta València Sud. En el

resto de la línea existe el sistema FAP/DIMFAP.



Figura 4.6. Imágenes de la línea 1 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de [www.vivireltren.es](http://www.vivireltren.es)



## 2 Llíria/Paterna Torrent Avinguda

A partir de la reorganización de la red en marzo de 2015, el tramo Llíria-Empalme forma parte de la nueva línea 2, mientras que el ramal a Torrent Avinguda es explotado conjuntamente por las líneas 2 y 7.

La longitud total es de 39,75 km. En cuanto a la explotación, cuenta con el sistema de seguridad ATP entre las estaciones de Empalme y Torrent Avinguda, estando disponible la conducción automática ATO en los tramos de Empalme/Sant Isidre. En el resto de la línea comprendida entre Llíria y Empalme la línea cuenta con FAP/DIMFAP.

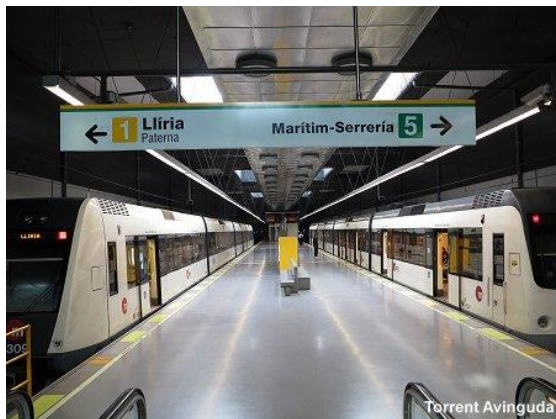


Figura 4.7. Imágenes de la línea 2 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de [www.urbanrail.net](http://www.urbanrail.net)



### 3 Rafelbunyo Aeroport

La línea 3 es la segunda línea de más afluencia de pasajeros de la red de Metrovalencia. Discurre en superficie desde las estaciones de Rafelbunyo/Alboraya-Peris Aragó y en túnel hasta el final de línea, la cual finaliza en la parada de Aeropuerto.

La línea tiene una longitud de 24,69 km y cuenta con el sistema de seguridad ATP, siendo posible realizar la conducción automática ATO en el tramo subterráneo entre Alboraya-Peris Aragó y Aeropuerto.



Figura 4.8. Imágenes de la línea 3 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de [www.ferropedia.es](http://www.ferropedia.es)



# 5

## Maritim Serrería Aeroport

La línea 5 de Metrovalencia une el puerto con el Aeropuerto. Esta línea tiene una longitud de 12,95 km, siendo en su totalidad gestionada mediante el sistema de seguridad ATP con conducción en ATO para todos los trenes que circulan por la línea.

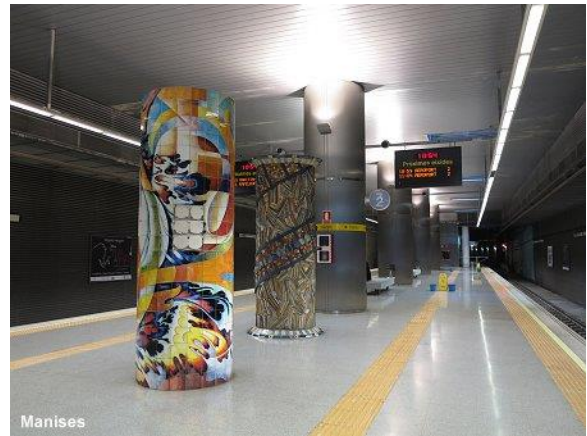
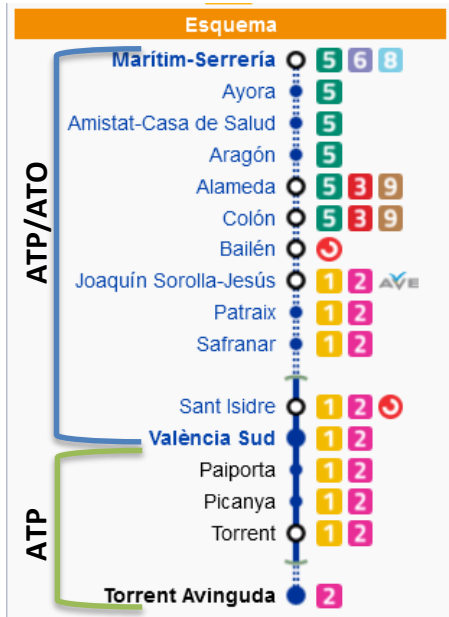


Figura 4.9. Imágenes de la línea 5 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de [www.urbanrail.net](http://www.urbanrail.net)



7

Marítim Serrería  
Torrent Avinguda

La línea 7 de Metrovalencia nace como una división de la antigua línea 5, concretamente el ramal que une Torrent Avinguda con la Estación de Marítim-Serrería, pasando por la estación intermodal de Bailén de cercanías.

Cuenta con una longitud de 15,45 km y el sistema de seguridad ATP en todo su trayecto. Es posible llevar a

cabo la conducción automática ATO en el tramo entre Marítim-Serrería y València Sud.

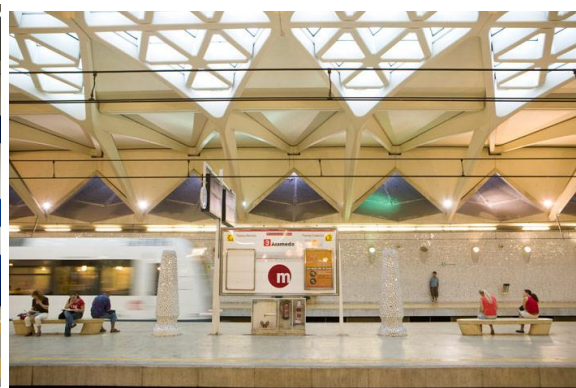


Figura 4.10. Imágenes de la línea 7 de Metrovalencia. Fuente: Recuperado de [www.vialibre-ffe.com](http://www.vialibre-ffe.com)



## 4.2. Material rodante

El parque móvil de Metrovalencia está compuesto fundamentalmente por vehículos de la compañía Vossloh Serie – 4300, los cuales serán los vehículos objeto de estudio y análisis del consumo energético. Así pues, en la red de Metrovalencia este modelo surge como sustituto de las antiguas series 3600 y 3700, complementando en un inicio a las ya antiguas unidades 3900, las cuales han sido progresivamente retiradas, por lo que el parque móvil en la actualidad está compuesto prácticamente en su totalidad por los vehículos de la serie 4300. En cuanto a número de unidades, FGV dispone de 62 unidades 4300, distribuidas en 42 unidades de cuatro coches y 20 unidades de cinco coches que circulan por las líneas 1, 2, 3, 5, 7 y 9.

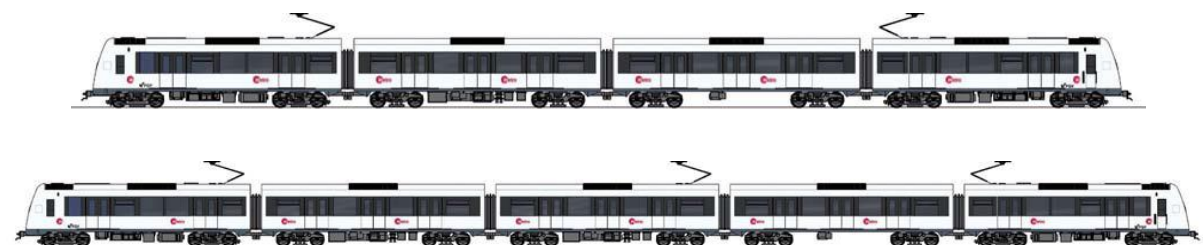


Figura 4.11. Sección de la serie Vossloh 4300 en 4 y 5 coches. Fuente: Vossloh.

En cuanto a las características técnicas más significativas, es posible destacar:

- Equipo de tracción con semiconductores IGBT con ventilación forzada, con aceleración de hasta  $1,1 \text{ m/s}^2$  (con una aceleración residual de  $0,3 \text{ m/s}^2$ ).
- 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.

En cuanto a dimensiones, cada unidad tiene una longitud de 60,25 m, una anchura de 2,55 m y una altura de 4,05 m. El interior la altura de vehículo es de 2,15 m y la altura de la plataforma de 1,15 m. En cuanto a prestaciones, el peso máximo por eje es de 11 t, la velocidad máxima de 80 km/h y las deceleraciones de 1,2 m/sg<sup>2</sup> a 40 kms/h, 1,6 la de urgencia. Los esfuerzos máximos de tracción y de freno eléctricos son ambos de 20 kN por motor.

Además, la unidad de 4 coches está compuesta por diez puertas dobles en cada lado, dos por cada coche motor y tres en cada coche remolque. Su curva en planta mínima es de ochenta metros y el esfuerzo de compresión de 130 T. La tensión de alimentación es de 1 500 voltios y la potencia total de 1 485 kW. Cuenta con dos convertidores principales de 120 kVA y otros dos auxiliares de 6 kVA, con dos compresores de un caudal de 950 litros por minuto.

El aspecto y la ficha de características pueden verse en la Figura 4.12 .



Figura 4.12 Diferentes vistas de la serie Vossloh 4300. Fuente: Vossloh.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS	Unidad de 4 coches
Longitud	60 250 mm
Altura total	4 050 mm
Nº de coches	4 (M-R-R-M)
Longitud de coches (M/R)	14 500 mm
Anchura	2 550 mm
Material de caja	Acero inoxidable
Tensión de alimentación	1.500 VCC
Peso total	122,850 t
Tipo de bogies	Tipo serie 3.900
Nº de bogies	8
Empate bogies	2 100 mm
Díámetro de ruedas	860 mm (ruedas nuevas)
Suspensión primaria	Muelles helicoidales
Suspensión secundaria	Neumática
Número de motores	8
Potencia	1.484,8 Kw
Radio mínimo	80 m
Capacidad 6 p/m <sup>2</sup>	588 (474 de pie y 114 sentadas)
Número de puertas	10 por costado
Velocidad máxima	80 km/h
Aceleración máxima	1,1 m /s <sup>2</sup>
Freno de servicio	1,2 m /s <sup>2</sup>
Nº de convertidores de tracción	2
Nº de convertidores auxiliares principales	2

Tabla 4.4. Características de la serie 4300 de Vossloh. Fuente: Vossloh.

Por cuanto respecta a la conducción de este tipo de vehículos, cabe destacar que las particularidades de la conducción de un vehículo ferroviario (marcha a la vista, existencia de plataforma parcialmente compartida, distancia corta entre estaciones) conllevan una conducción complicada y con muchas interferencias, por lo que el diseño del puesto de conducción requiere un cuidado especial. Por otro lado, se debe dar cabida a los diferentes

sistemas que controlan el estado del vehículo permiten monitorizar los distintos componentes e informar sobre posibles fallos o averías.

En el caso de los vehículos de la serie 4300 de Vossloh, éstos disponen del sistema ATP/ATO instalado en el pupitre para su uso, pudiéndose observar a continuación.

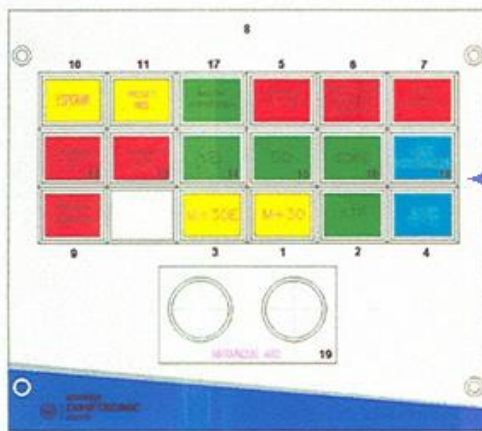


Figura 4.13. Pupitre de serie Vossloh 4300. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV).

El panel de conducción situado en el pupitre del maquinista en cada cabina de la serie 4300 contiene los siguientes mensajes y funciones.




















Aspecto	Tipo / Color	Función
	Pulsador Azul	Selección del modo "ATO". Si al pulsarlo se mantiene iluminado, indica que está efectivamente seleccionado.
	Pulsador Verde	Selección del modo "ATP". Si al pulsarlo se mantiene iluminado, indica que está efectivamente seleccionado.
	Pulsador Amarillo	Selección del modo "Manual + 30". Si al pulsarlo se mantiene iluminado, indica que está efectivamente seleccionado.
	Pulsador Amarillo	Al pulsar junto a M+30 se pasa de modo protegido (ATP o ATO) a modo M+30. Con una velocidad inferior a 30 km/h.
	Pulsador Rojo	Indica la proximidad a la velocidad objetivo y el corte de tracción. Va acompañado de un avisador acústico. El pulsador se utiliza para silenciar la bocina.
	Indicador Azul	Indica que el ATO se encuentra localizado y por tanto se puede seleccionar este modo de conducción.
	Indicador Verde	Indica que existen códigos en vía y que puede seleccionar ATP.
	Indicador Verde	Indica que el ATP se encuentra funcionando en distancia objetivo.
	Indicador Verde	Indica que el ATP se encuentra funcionando en códigos de velocidad.
	Indicador Rojo	Indica que existe un fallo de ATO y no puede circular en este modo mientras la indicación esté iluminada.
	Indicador Rojo	Indica que existe un fallo de ATP y no puede circular en este modo mientras la indicación esté iluminada.
	Indicador Rojo	Se ilumina intermitentemente cuando está seleccionada la "llave especial".
	Pulsador Rojo	Anula la función de ATP DO pasando a ATP VEL. Si al pulsarlo se mantiene iluminado, indica que está seleccionado.
	Pulsador Rojo	Se utiliza para poder iniciar la marcha en modo LLE cuando hay presencia de códigos válidos en la vía (Se ilumina mientras está activo. Es necesario mantenerlo pulsado cuando se inicia la marcha hasta que se sobrepasan los 5 km/h aproximadamente y se mantendrá activo hasta que el tren se pare. Cada vez que el tren se pare en estas condiciones será necesario repetir esta operación.
	Indicador Verde	Indica que existen códigos en vía que permiten reanudar la marcha en ATP o ATO, es decir, la velocidad objetivo es distinta de cero.
	Indicador Amarillo	Se ilumina cuando hay un fallo en la unidad TBS y es necesario resetear el equipo.
	Pulsador	Dos pulsadores que sirven para arrancar el tren en modo ATO. Pulsar simultáneamente durante más de dos segundos.
		Pulsador de Reset TBS. Reinicia el equipo ATP. Situado en el panel superior de cabina en 4300 y en el propio panel en 3900.
		Cerradura de llave especial. Situado en el panel superior de cabina en 4300 y en el propio panel en 3900.  La situación del conmutador en posición "CON" (que será la posición en circulación ordinaria) indica que el MODO LLE ha sido desconectado y el equipo (ATP/ATO) está en servicio permitiendo seleccionar cualquiera de los demás modos (M+30, ATP o ATO).

Tabla 4.5. Representación del panel de conducción. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV)

Por lo que respecta a los modos de conducción, existen cuatro modos y un estado en espera de selección, denominado como “no modo”. En la tabla 4.6. se resumen las condiciones de circulación de cada uno de ellos:

NO MODO	Con el equipo de ATP conectado ( <b>LLE en CON</b> ), pero sin modo de conducción seleccionado
<b>MODO DE CONDUCCIÓN</b>	<b>CONDICIONES DE CIRCULACIÓN</b>
<b>LLE</b>	<b>ATP/ATO DESCONECTADO.</b> En este modo el sistema no realiza protección automática, ni limitaciones de velocidad
<b>M+30</b>	Modo manual, <b>sin protección</b> automática y restringido a 30 km/h hacia delante y 6 km/h hacia atrás.
<b>ATP</b>	Modo protegido, posibilidad de funcionar en DO ó VEL.
<b>ATO</b>	Modo de conducción semiautomática, supervisado por el ATP y con la posibilidad de funcionar en DO o VEL.

Tabla 4.6. Tabla de modos de conducción. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV).

Por su parte, la información de la velocidad real del tren, la proporcionan tres sensores de velocidad (dos tacogeneradores y un doppler). En el panel del pupitre, respecto a la velocidad, se observa la siguiente información, recogida en la Figura 4.14.

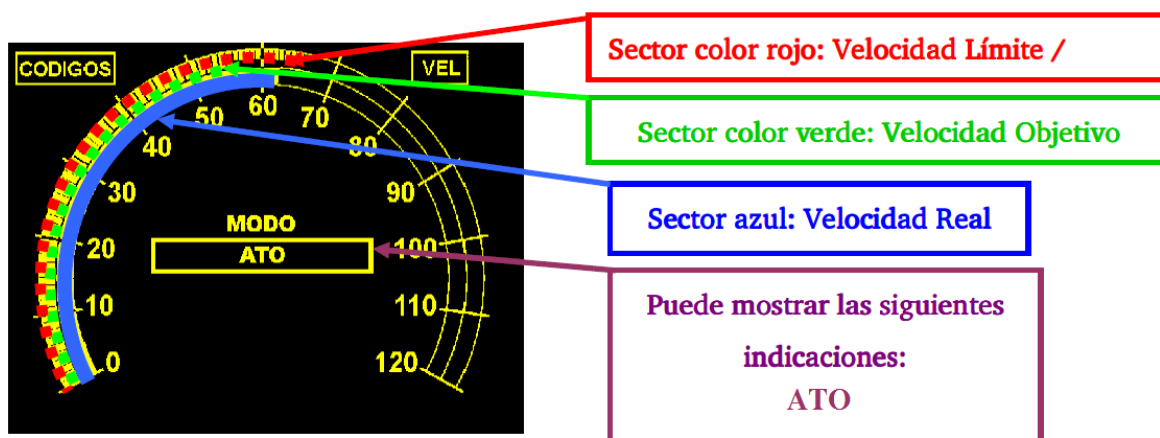


Figura 4.14. Velocímetro e indicaciones. Fuente: Consigna Provisional nº 12/10 ATP-ATO DO (FGV).

Tal y como se aprecia en la Figura 4.14. , en el panel de velocidades se muestran tres tipos de velocidades diferentes. En la parte más superior y de color rojo se muestra la velocidad máxima del tramo, la cual no puede ser nunca superada bajo ninguna circunstancia. En el

caso de que el vehículo, por cualquier motivo superase dicha velocidad, el sistema de protección ATP actuaría y frenaría el vehículo inmediatamente (para otros tipos de sistemas de seguridad la funcionalidad y el frenado del vehículo se lleva a cabo de forma distinta).

La segunda velocidad mostrada en verde es la velocidad objetivo, la cual corresponde a la velocidad a la que debería circular el vehículo, considerando las condiciones del tráfico y de la infraestructura, pudiendo variar en cada caso.

Por último, la tercera velocidad que se muestra es la velocidad real, que es a la que efectivamente circula el vehículo en un determinado instante. Además, en el panel de velocidades también se muestra el modo de conducción en el que se está circulando (ATP, ATO, FAP).

## 5. Descripción de los dispositivos de medida y de la campaña de medición

---

Generalmente el consumo energético de una explotación ferroviaria de tracción eléctrica se ha controlado a nivel de las subestaciones, tal y como se ha visto a lo largo del presente trabajo. Esta forma de analizar el consumo permite obtener valores globales, pudiendo conocerse el consumo total para un instante o durante un periodo determinado. Sin embargo, este tipo de información proporciona muy poca información sobre el modo en que los trenes consumen dicha energía, particularmente los picos de demanda y el porcentaje de recuperación de la misma.

Ante esta situación, se hace necesario llevar a cabo un estudio más detallado centrado en los vehículos. El objetivo es abordar el estudio del consumo energético en ferrocarriles metropolitanos desde el propio vehículo, a fin de poder conocer con detalle los valores y los flujos energéticos de un tren. Éste hecho supone un paso importante en el conocimiento y el estudio del consumo energético en la operación de trenes, pues generalmente el consumo energético se evalúa a través de modelos teóricos más o menos realistas, pero sin ser contrastados con datos reales.

Para ello se ha instalado un sistema de medida que proporciona las mediciones y datos necesarios para la gestión y el estudio del ahorro energético. La instalación y prueba del sistema de medida se ha llevado a cabo mediante la realización de una serie de tareas, a fin de comprobar el funcionamiento de los equipos de registro embarcados en el tren, que son:

*Tarea 1. Montaje de los equipos a bordo de una unidad serie 4300 (4361).*

*Tarea 2. Pruebas con tren parado en la vía de montaje.*

*Tarea 3. Pruebas con la unidad en la vía de pruebas de los talleres.*

*Tarea 4. Circulación y pruebas en diferentes líneas, sin viajeros.*

*Tarea 5. Campaña de mediciones*



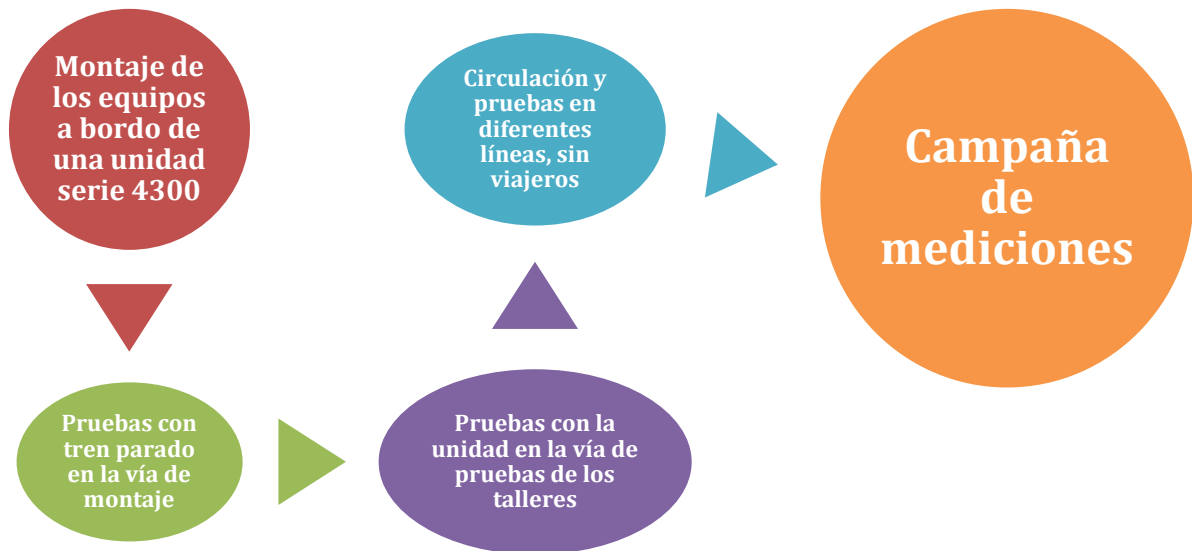


Figura.5.1 Esquema de tareas y vehículo equipado. Elaboración propia.

### 5.1.Descripción de los equipos de registro

Tal y como se ha citado previamente, el registro del consumo energético se ha llevado a cabo mediante la instalación de unos equipos de medida de consumos energéticos para ferrocarriles modelo MSAVDC de la empresa Mors Smitt, colocados en el coche M2 (motor) de la unidad 4361.

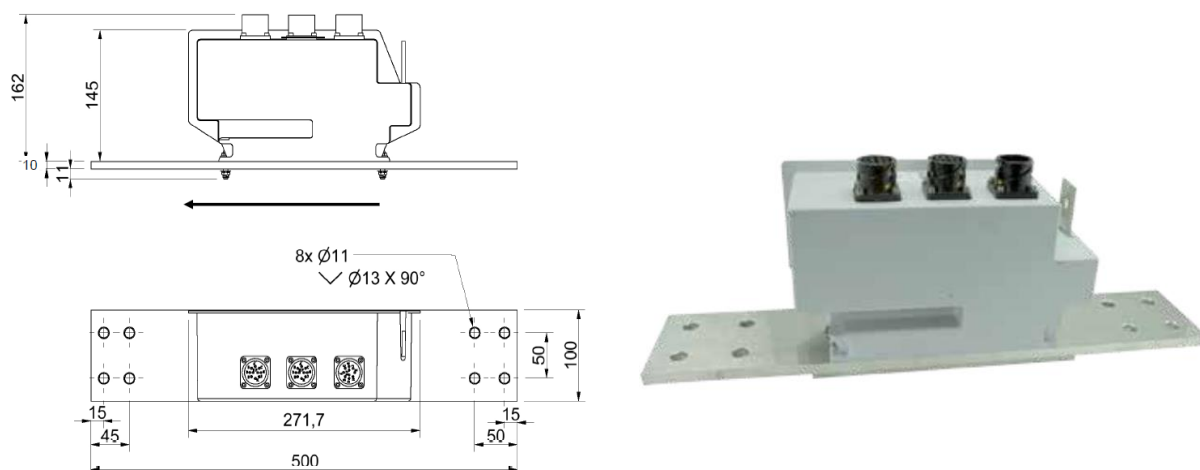


Figura 5.2. Dimensiones e imagen del equipo de medida. Fuente: Mors Smitt.

El MSAVDC es un sistema completo de medición de energía a bordo en alta tensión para unidades en corriente continua. Este dispositivo permite calcular el consumo de energía con un error inferior al 1,5 % para redes de corriente alterna y del 2 % para las redes de corriente continua, cumpliendo con la norma EN 50463 (Medición de la energía a bordo de los trenes.). Dispone de una salida modular digital tipo Ethernet que permite el envío de la información para ser almacenada. 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. A continuación (Figura 5.3.) se observa la ficha técnica del MSAVDC.

<b>Current Measurement Function (CMF)</b>	
Nominal primary current .....	$I_{PN}$ ..... 76Adc to 1500Adc
Accuracy .....	$\epsilon_{CMF}$ ..... Class 1R (1% from 120A to 1440A)
Estimated error at 10A.....	<10%
<b>Voltage Measurement Function (VMF)</b>	
Nominal primary voltage.....	$U_{PN}$ ..... from 1000 to 2000Vdc
Accuracy .....	$\epsilon_{VMF}$ ..... Class 0,5R
<b>Energy Calculation Function (ECF)</b>	
Accuracy .....	$\epsilon_{ECF}$ ..... Class 0,2R
Total EMF error.....	$\epsilon_{EMF}$ ..... < 2% according to prEN 50463
<b>Energy Measurement Outputs</b>	
EMF output.....	<b>ETH1</b> ..... Ethernet port 1 for energy data and Urms / Irms
EMF output.....	<b>ETH2</b> ..... Ethernet port 2 for energy data and Urms / Irms
<b>General characteristics</b>	
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

Figura 5.3. Ficha de características del MSAVDC empleado. Fuente: Mors Smitt.

Para poder tener completamente monitorizado el flujo energético en un tren se han instalado 3 equipos MSAVDC en un vehículo serie 4300. Concretamente, los equipos se han instalado en el pantógrafo (disyuntor), a la entrada del convertidor de auxiliares y en las resistencias de frenado, permitiendo de esta forma tener completamente monitorizado la energía consumida. Estos equipos permiten discriminar el sentido de circulación de la corriente, pudiendo conocer el sentido del flujo en cada instante.

El esquema de montaje con todos los equipos auxiliares necesarios es el mostrado en la Figura 5.4.

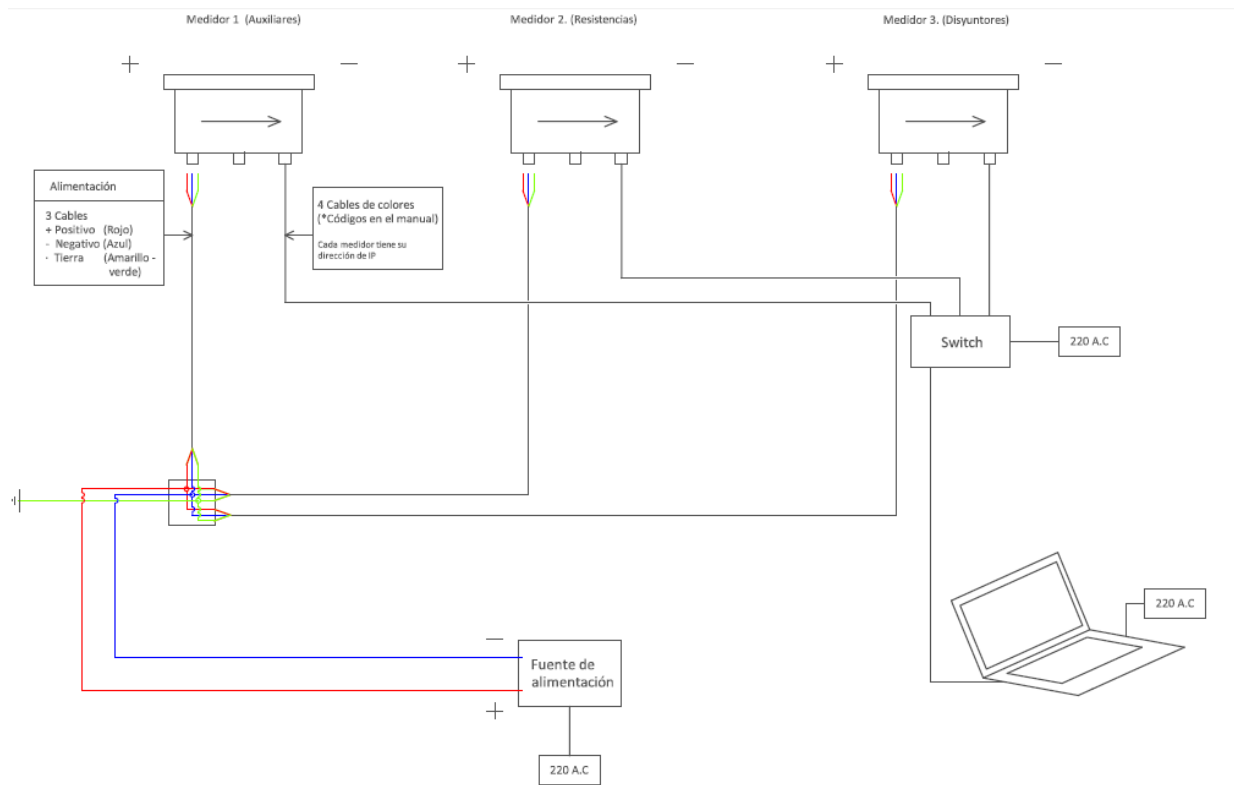


Figura 5.4. Esquema de montaje de los dispositivos instalados. Elaboración propia.



Figura 5.5. Imágenes de los dispositivos instalados. Elaboración propia.

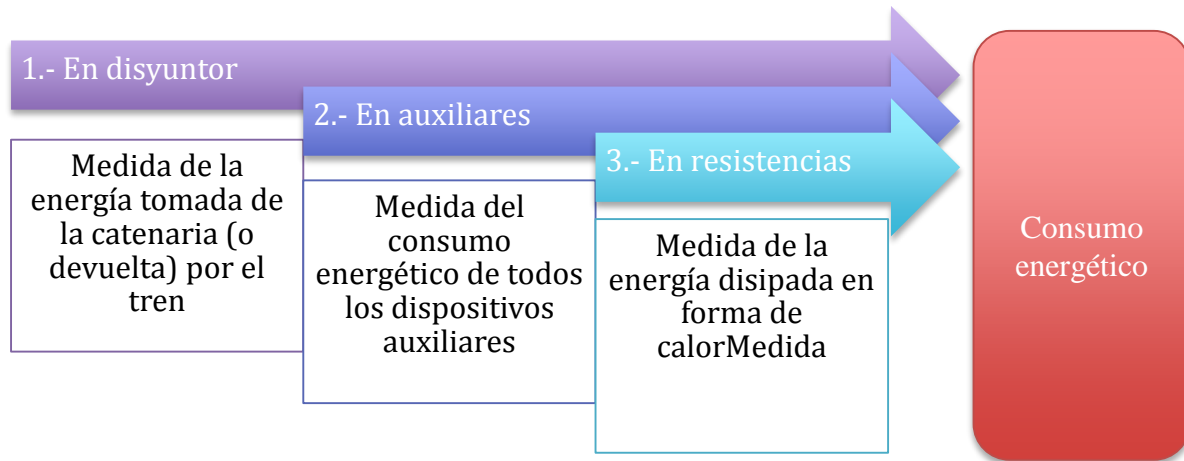
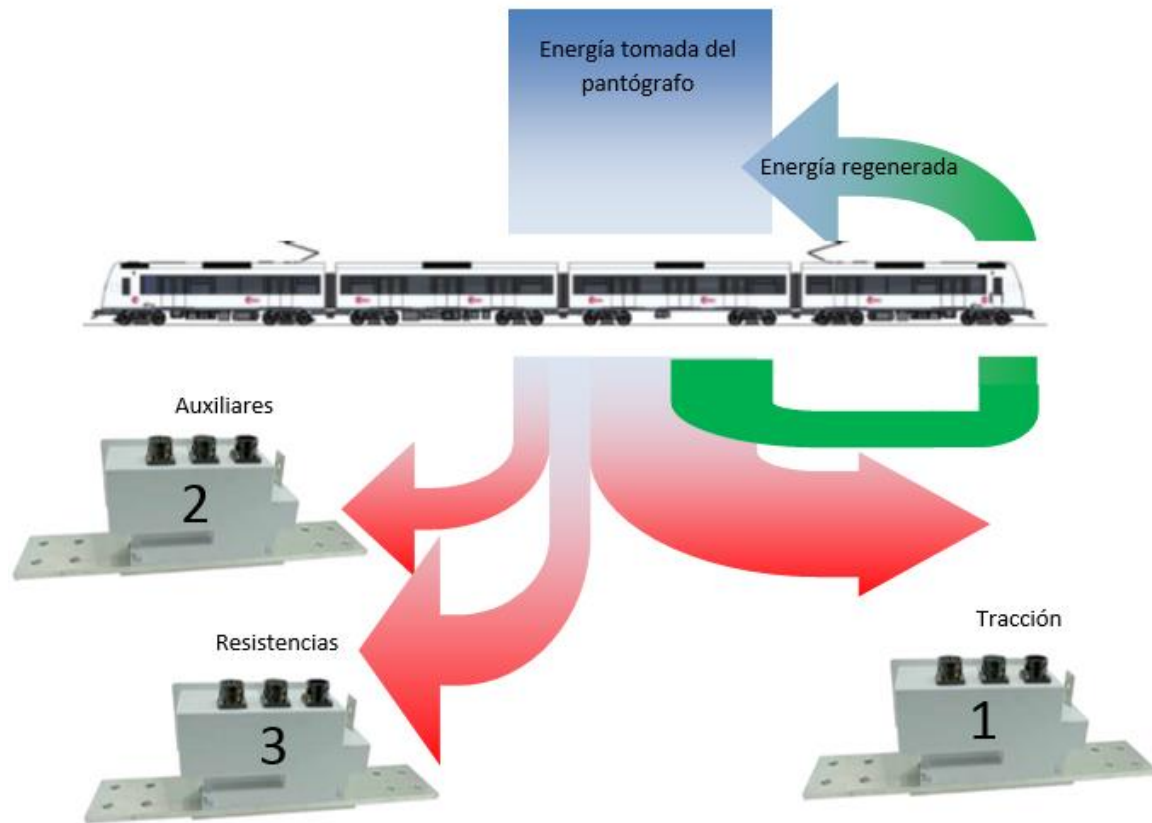
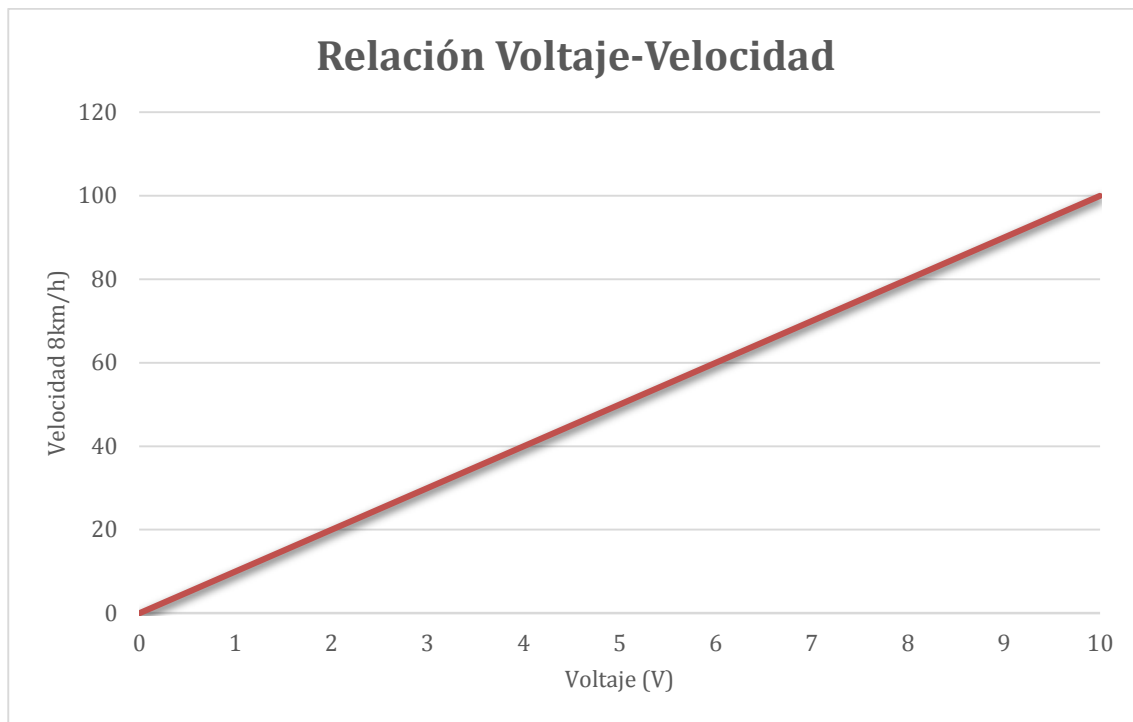


Figura 5.6. Esquema de medida de la energía consumida. Elaboración propia.

Además de los equipos de medida MSAVDC, el sistema instalado cuenta con un odómetro que permite conocer y registrar la velocidad del vehículo en cada instante. Se trata de una sonda Knorr modelo BB0457681100, excitada por una rueda fónica situada en uno de los ejes del coche R2. Para conocer el valor de la velocidad la señal de pulsos cuadrada se convierte en señal continua de 0 V a 10 V, con razón de 1 V - 10 km/h.



*Figura 5.7. Relación entre voltaje y velocidad en la sonda. Elaboración propia.*

Junto a la sonda de velocidad se ha dispuesto de 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, el cual permite registrar y almacenar los datos obtenidos de energía y velocidad.

## 5.2. Descripción de la campaña de medición

Tras comprobar el correcto funcionamiento de los equipos y la no afectación al funcionamiento habitual de la unidad, se procedió a efectuar las mediciones con viajeros, para un funcionamiento regular del vehículo.

Hay que tener presente que el consumo de energía no depende exclusivamente del vehículo, sino también del tipo de servicio que presta, pudiendo obtenerse consumos muy diferentes para un mismo trayecto en función del servicio que realiza. En el trayecto existen una serie de parámetros o condicionantes caracterizados por la infraestructura (velocidad máxima, perfil, curvas) así como por una forma de operación concreta (paradas, holguras y márgenes de tiempo, aceleración y deceleración de servicio, etc.)

Por ello, para tener completamente monitorizado el consumo se han analizado todos los servicios de las líneas 1, 2, 3, 5 y 7, salvo los refuerzos de la línea 3 entre Alboraya-Peris Aragón y Avinguda del Cid. También se ha analizado la diferencia entre conducción manual y automática en los tramos de la red en que se permite la explotación en este último modo.

Durante las campañas de mediciones, se han registrado los siguientes datos:

- Consumo en el pantógrafo (disyuntor) con su correspondiente signo, es decir, signo positivo para la energía consumida y signo negativo para la energía devuelta a la catenaria.
- Consumo a la entrada del convertidor de equipos auxiliares del coche M2.
- Energía disipada en el reostato del coche M2 (resistencias).
- Velocidad del tren, registrada a partir de un odómetro colocado en una de las ruedas del coche R2.

Con todo ello es posible:

- Conocer el consumo bruto, energía devuelta y consumo neto por servicios y tramos de subestaciones.
- Conocer el consumo de equipos auxiliares por servicios.
- Conocer la energía disipada en las resistencias de frenado, por servicio y por tramos de subestaciones.
- Estimar la diferencia de consumos y tiempos de viaje en los tramos de la red en que se circula en modo ATO, respecto a la conducción manual (modo ATP).

En total se han medido 229 servicios de los que 115 se han tomado con gráfico de días intermedios (sábados y laborables de verano) y 114 con gráfico de laborables. Por otro lado, alrededor de la mitad de los trayectos registrados se han llevado a cabo mediante la conducción manual en los tramos en que se circula habitualmente en modo automático, ATO. De forma global, se han realizado más de 230 horas de grabación de datos, obteniéndose de este modo una muestra suficientemente representativa.

En el apartado siguiente se muestran los diferentes servicios agrupados por líneas y los consumos por km registrados.



### 5.3. Datos de consumo energético obtenidos

Los datos de consumo registrados dependen de múltiples variables que condicionan su valor. Por ello, factores como como la temperatura, el grado de llenado del vehículo o el estilo de conducción del maquinista afectan a los valores registrados. Además, en cuanto a la energía devuelta a la red, hay que tener en cuenta tal y como se ha comentado en apartados anteriores que la posibilidad de devolverla está condicionada por la receptividad de la línea en cada momento.

Dicho esto, la comparativa realizada pretende presentar los consumos característicos netos (energía importada – energía devuelta) medidos durante unos días para un mismo vehículo en las diferentes líneas, si bien factores como los citados anteriormente no entran a valorarse puesto que no han sido registradas y presentan una elevada dificultad de determinación.

### 5.3.1 Línea 1. Bétera/Seminari – Torrent/Vilanova de Castelló

La línea 1 de Metrovalencia puede dar servicio desde las estaciones de cabecera (Bétera o Vilanova de Castelló) o realizar trayectos más cortos cuando las estaciones de origen o destino son Seminari y/o Torrent. Por lo tanto, existen 4 diferentes posibilidades de trayecto diferentes en esta línea:

Bétera		Vilanova de Castelló	40 paradas	70,24 km
Bétera		Torrent	24 paradas	28,30 km
Seminari		Vilanova de Castelló	37 paradas	62,30 km
Seminari		Torrent	21 paradas	20,36 km

A continuación se muestran los datos de consumo, en kWh/km, para cada uno de los trayectos anteriores y en función del sentido de circulación del vehículo.

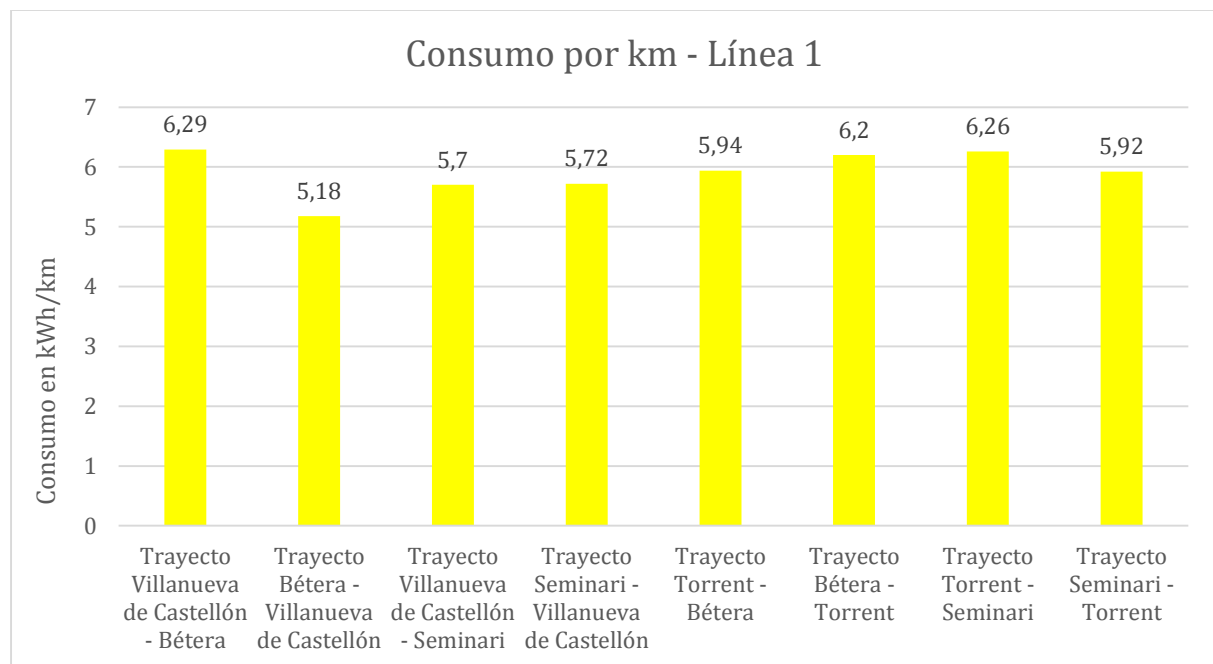


Figura 5.8. Valores de consumo en la línea 1 por km. Elaboración propia.

Como puede observarse, el consumo energético para todos los trayectos se encuentran entre valores de 5,18 kWh/km y 6,29 kWh/km. Debido al gran número de variables que condicionan el consumo energético (como el consumo de auxiliares, número de paradas facultativas, estilo de conducción del maquinista, conducción en ATO o en ATP, grado de

ocupación, perfil de la línea, etc.) la dispersión de los valores obtenidos no puede, a priori, asociarse a un factor en concreto sino a la interacción de todos ellos.

Si se analiza el porcentaje de energía recuperada frente a la energía neta utilizada, se tiene los resultados de la Figura 5.9.

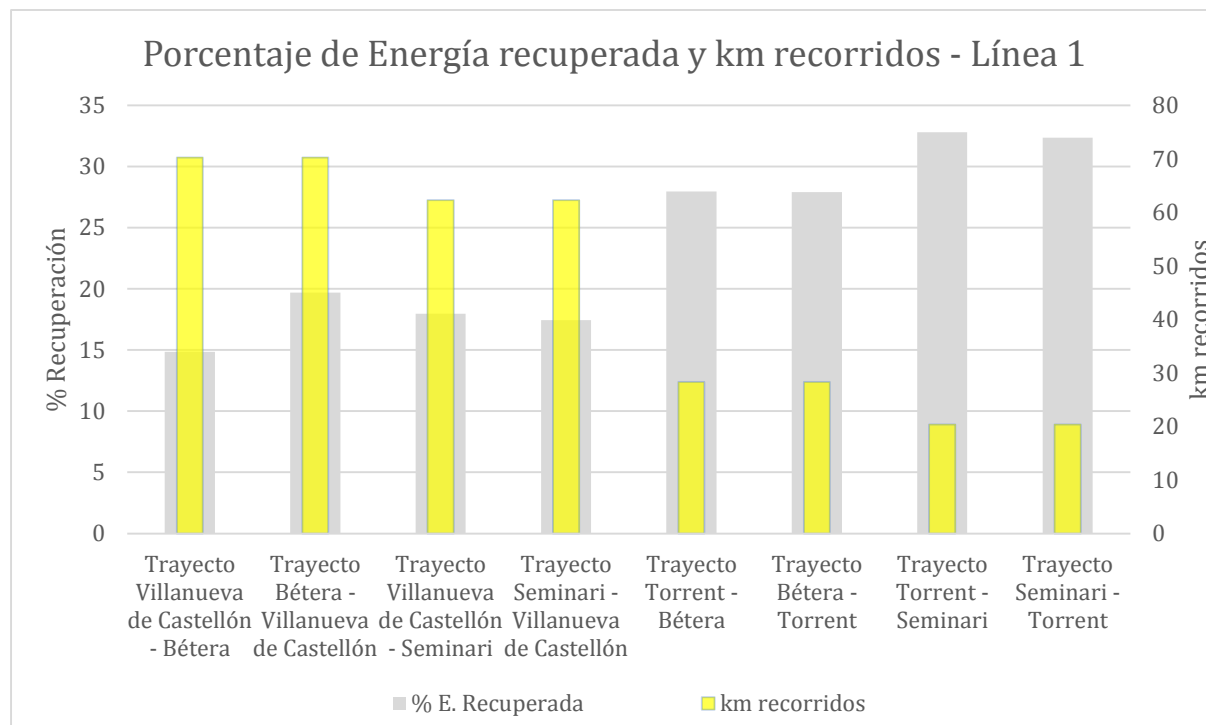


Figura 5.9. Valores de energía regenerada y km en la línea 1, por trayecto. Elaboración propia.

En cuanto al porcentaje de energía regenerada durante los trayectos en la Línea 1, los valores obtenidos se sitúan entre el 15 % y el 33 %, entendiéndose dicho porcentaje como la proporción de energía devuelta respecto a la energía importada por el pantógrafo, durante el trayecto.

Así pues, los resultados muestra que a medida que se recorren más kilómetros el % de energía recuperada desciende, obteniéndose valores por encima del 30 % para los trayectos más cortos, de 20,36 km entre Seminari-Torrent y del 27,5 % para los trayectos entre Torrent-Bétera de 28,30 km, mientras que dicho valor desciende a la mitad, alrededor del 15 % para los trayectos más largos, de 70,24 km, entre Bétera-Villanueva de Castellón.

### 5.3.2 Línea 2. Llíria/Paterna – TorrentAVINGUDA

En cuanto a la línea 2, ésta puede dar servicio desde las estaciones de Llíria o Paterna hasta TorrentAVINGUDA, por lo que existen únicamente 2 trayectos diferentes.

Llíria	←→	TorrentAVINGUDA	33 paradas	39,75 km
Paterna	←→	TorrentAVINGUDA	20 paradas	19,25 km

En valores absolutos y para los trenes con destino Llíria, el consumo medio es de 277,52 kWh, mientras que en el trayecto inverso el consumo desciende a 220,50 kWh. Para los trenes con destino Paterna, el consumo medio se sitúa en los 110,60 kWh, mientras que para los trenes con origen Paterna, el consumo medio es de 94,67 kWh.

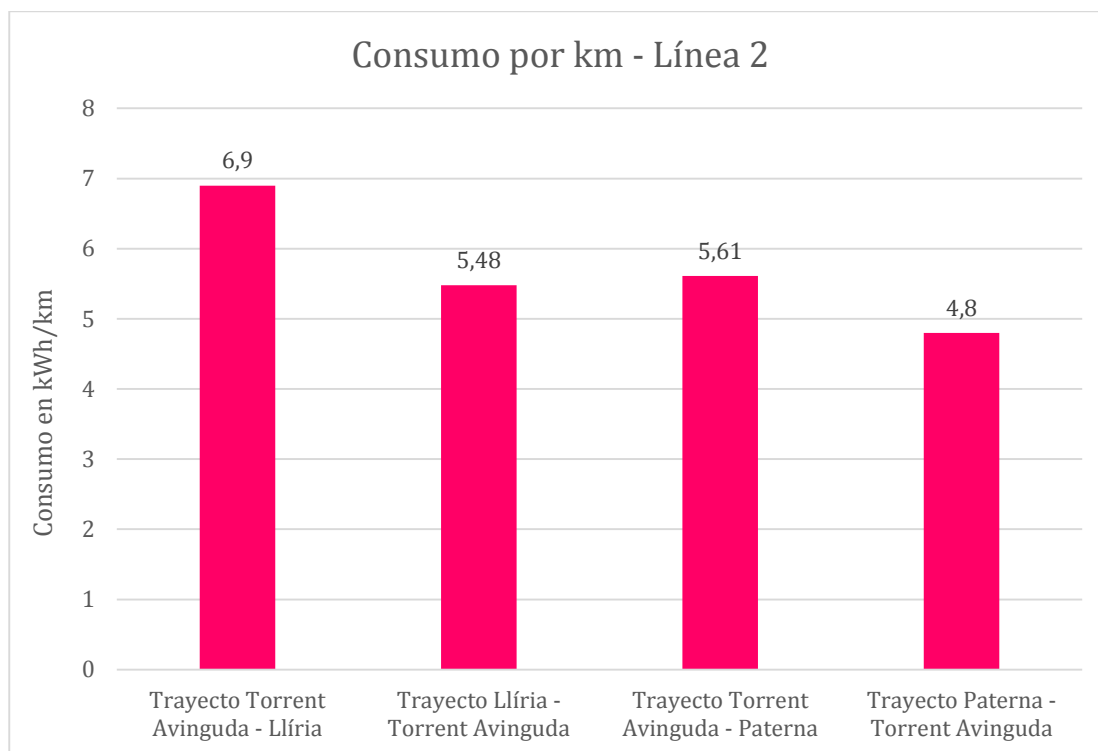


Figura 5.10. Valores de consumo en la línea 2 por km. Elaboración propia.

En cuanto a los valores de consumo energético por km se observan valores de 4,8 kWh/km y 6,9 kWh/km. Es posible también observar un mayor consumo en los trayectos que tienen por origen la estación de TorrentAVINGUDA frente a los mismos trayectos en sentido inverso (alrededor de un 20 % superior). Esto se debe principalmente a que el perfil del trazado, partiendo desde esta estación, es ascendente, lo cual contribuye a una mayor resistencia al avance y un mayor consumo por km.

También es posible observar que en los trayectos más cortos (esto es, los que tienen origen o destino Paterna) se obtienen valores inferiores de consumo por km, lo cual puede deberse en parte a la menor velocidad media de explotación del trayecto y a que existe un mayor número de trenes en la malla, lo cual permite que el porcentaje de energía recuperada en la frenada sea mayor, al poder ser utilizada por otros vehículos en el momento en que se devuelve a la red.

Por lo que respecta al porcentaje de energía recuperada, los valores registrados muestran que en los trayectos de la línea 2 los vehículos son capaces de recuperar entre el 21 % y el 33 %, siendo nuevamente los trayectos más cortos (TorrentAVINGUDA/Paterna) los que mayor porcentaje recuperado registran.

También se observa una menor diferencia por sentido en el trayecto TorrentAVINGUDA/Paterna. Este hecho se debe principalmente a que en este trayecto la diferencia de cotas entre el origen y el final es menor, siendo por tanto la diferencia de energía regenerada similar.

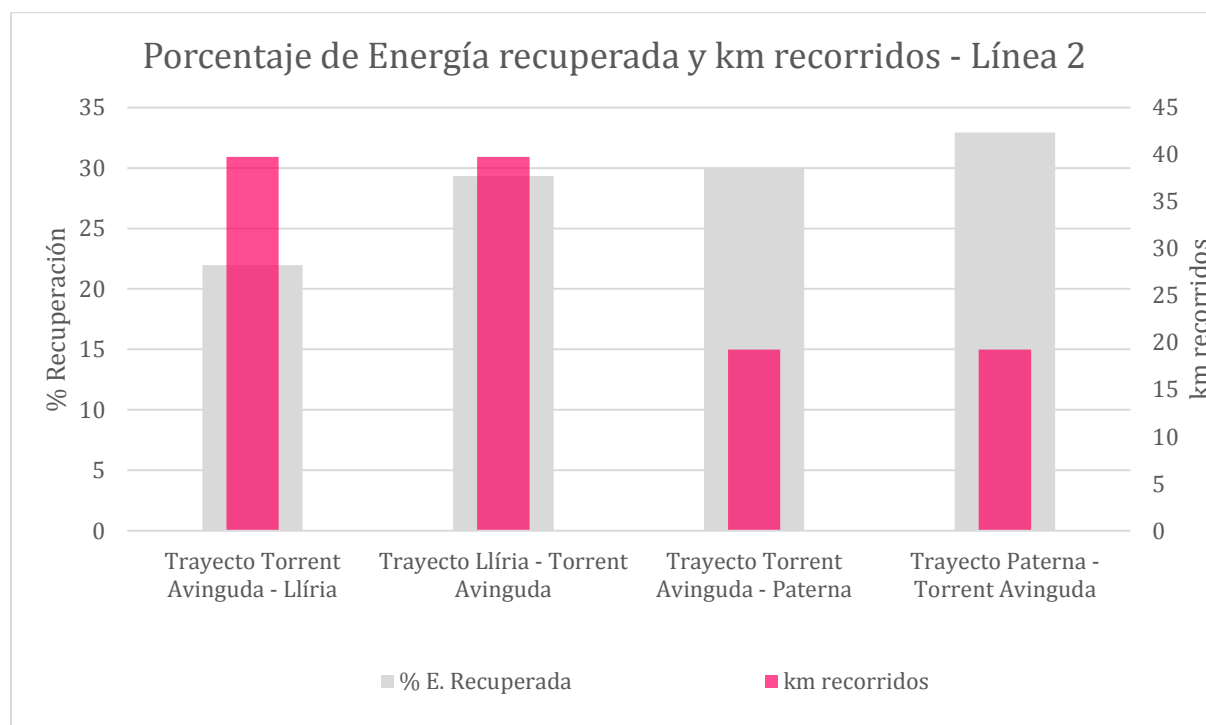


Figura 5.11. Valores de energía regenerada y km en la línea 2, por trayecto. Elaboración propia.

### 5.3.3 Línea 3. Rafelbunyol – Aeroport

La línea 3 únicamente ofrece el servicio entre las estaciones de Rafelbunyol y Aeroport, configurándose un único trayecto.



De los datos obtenidos es posible observar un consumo medio neto en sentido Aeroport de 180,98 kWh mientras que el consumo medio en sentido Rafelbunyol es de 169,15 kWh. En términos de kWh/km se tiene la Figura 5.12.

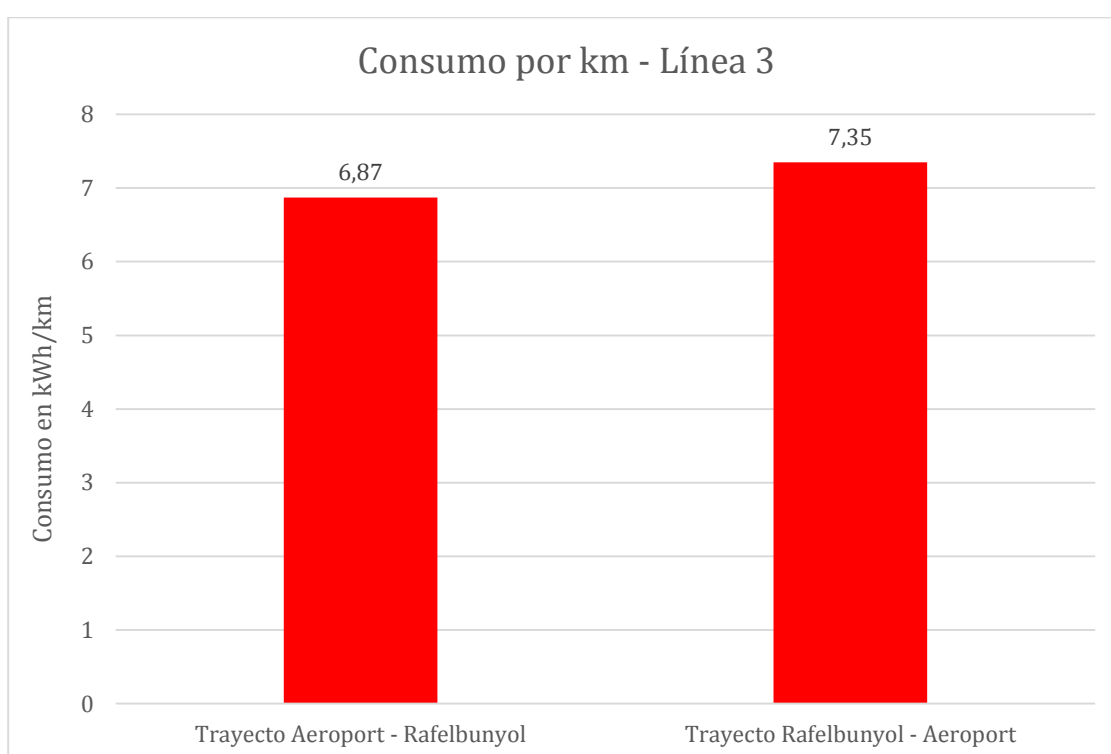


Figura 5.12. Valores de consumo en la línea 3 por km. Elaboración propia.

Así pues, los datos obtenidos por km muestran que el consumo energético de la línea 3 se encuentra entre valores de 6,87 kWh/km y 7,35 kWh/km, existiendo una diferencia alrededor del 8 % en función del sentido de marcha. Si bien las diferencias de consumo no son muy importantes, si es posible destacar que un factor que condiciona en parte la diferencia reside en el hecho de que el perfil de la línea es algo más favorable en sentido Rafelbunyol, así como la variación del tiempo de parada en las estaciones que puede producirse en función del sentido del trayecto.

En cuanto a la energía recuperada, los valores obtenidos en la línea 3 son muy similares para ambos sentidos (la distancia en este caso es la misma, pues solo hay un trayecto y 2 sentidos), situándose los valores entorno al 20,8 % de recuperación para los 24,7 km del trayecto.

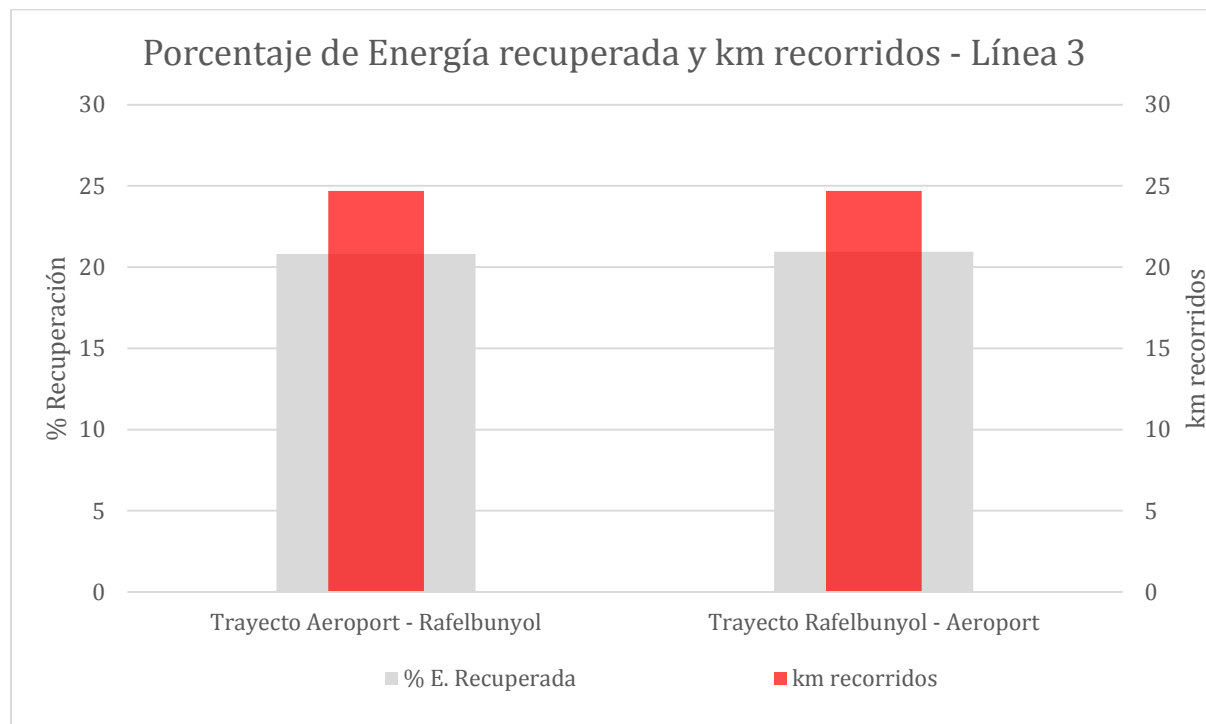


Figura 5.13. Valores de energía regenerada y km en la línea 3, por trayecto. Elaboración propia.

### 5.3.4 Línea 5. Marítim-Serreria – Aeroport

La línea 5 únicamente ofrece el servicio entre las estaciones de Marítim-Serrería y Aeroport, configurándose un único trayecto.



Los datos registrados en cuanto al consumo neto medio son de 105,84 kWh en sentido Aeroport y de 74,35 kWh en sentido Marítim-Serreria.

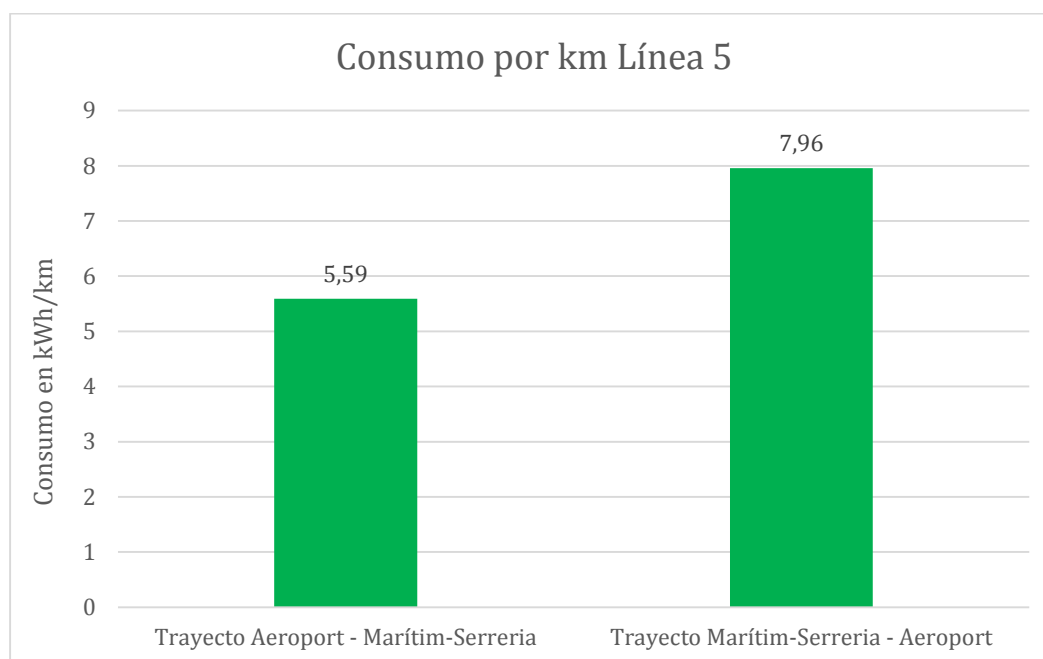


Figura 5.14. Valores de consumo en la línea 5 por km. Elaboración propia.

Por lo que respecta al consumo por km de la línea 5 es posible afirmar que se encuentra entre valores de 5,59 kWh/km y 7,96 kWh/km, existiendo una diferencia alrededor del 40 % en función del sentido de marcha (muy superior al 8% del caso anterior).

Al igual que en el caso anterior, la diferencia de consumo por sentido se debe en gran medida a que el perfil de la línea es más favorable en el sentido Aeroport-Maritim Serrería, si bien para esta línea la influencia del perfil es mucho más significativa.

Por lo que respecta a la energía recuperada, los valores medios obtenidos se sitúan alrededor del 23 %, si bien en este caso se aprecia una diferencia importante en función del



sentido del trayecto, siendo del 27,7 % en sentido Aeroport-Marítim Serrería y del 18,6 % en sentido contrario.

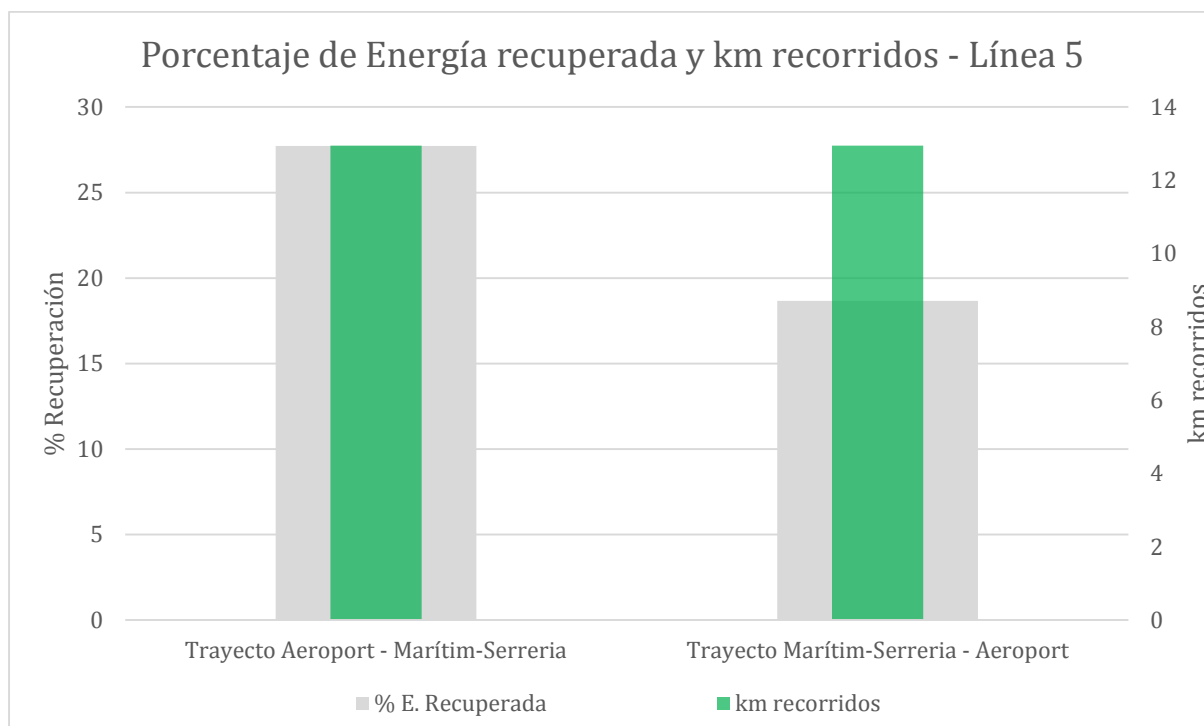


Figura 5.15. Valores de energía regenerada y km en la línea 5, por trayecto. Elaboración propia.

### 5.3.5 Línea 7. Marítim-Serreria – TorrentAVINGUDA

La línea 7 únicamente ofrece el servicio entre las estaciones de Marítim-Serrería y TorrentAVINGUDA, configurándose un único trayecto.

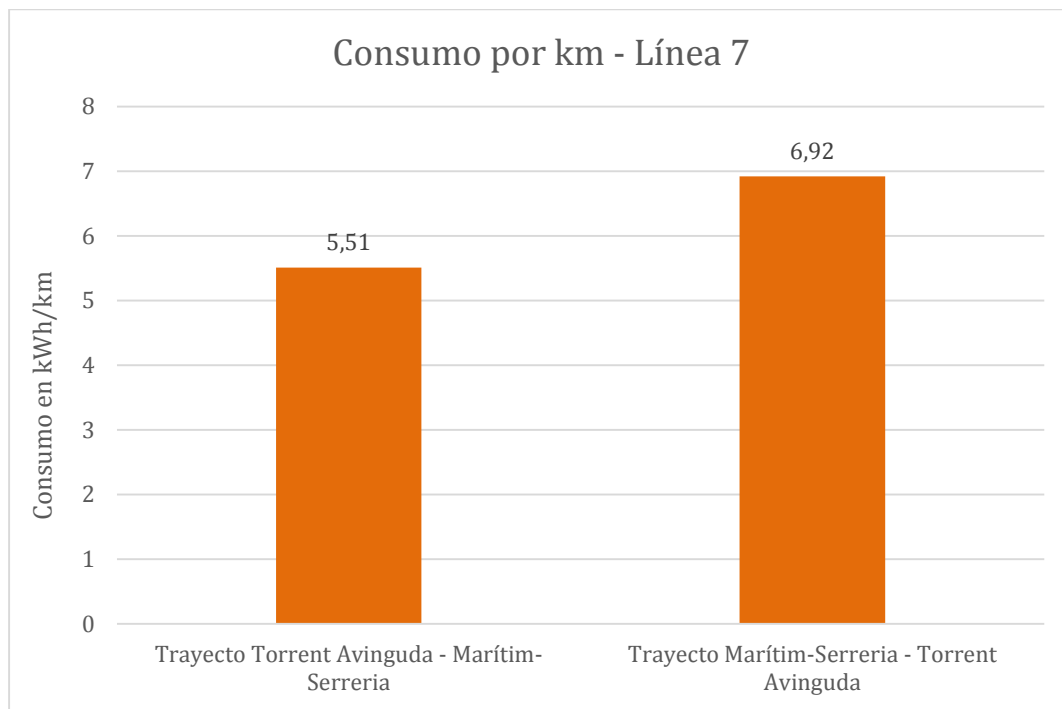


Figura 5.16. Valores de consumo en la línea 7 por km. Elaboración propia.

Los datos obtenidos muestran que el consumo energético de la línea 5 se encuentra entre valores de 5,51 kWh/km y 6,92 kWh/km, por lo que es posible observar una diferencia alrededor del 20 % en función del sentido de marcha.

En este último caso y de la misma forma que se ha citado anteriormente para las líneas estudiadas, la diferencia de consumo por sentido se debe a que el perfil de la línea es más favorable en el sentido TorrentAVINGUDA-Maritim Serrería.

En cuanto al porcentaje de energía recuperada en esta línea, los valores medios registrados son del 28 %, siendo del 31,9 % en sentido TorrentAVINGUDA-Maritim Serrería y del 24,3 % en sentido contrario.

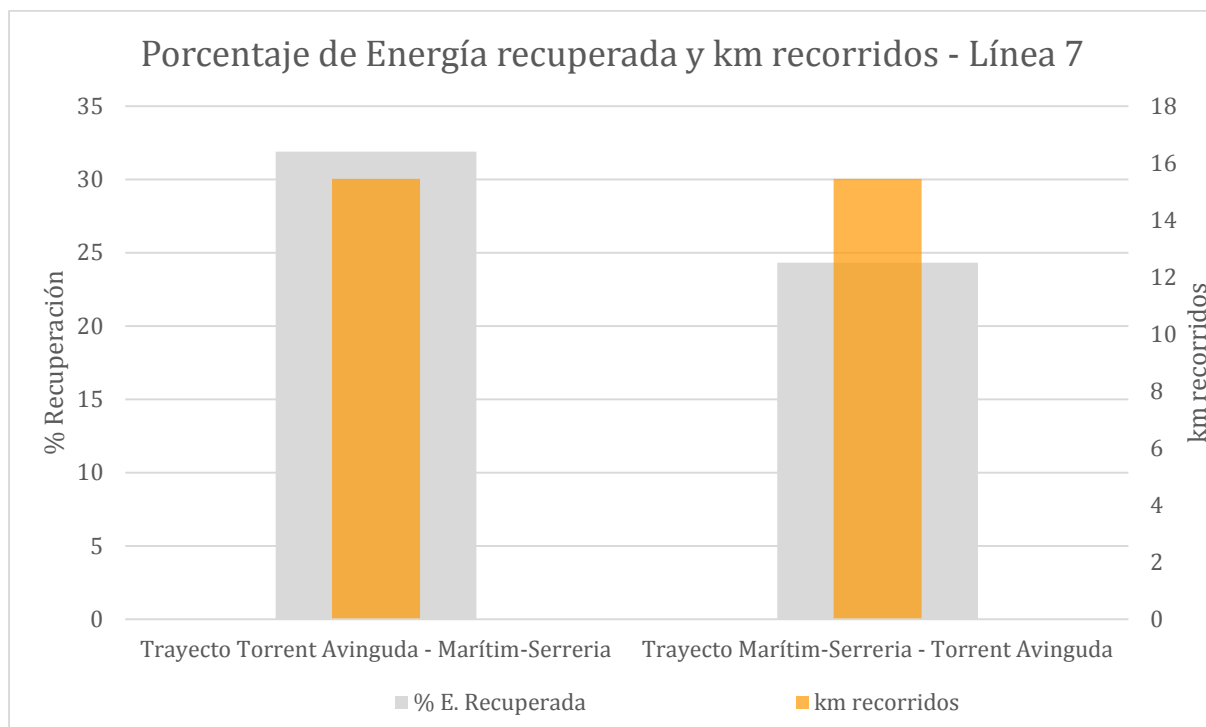


Figura 5.17. Valores de energía regenerada y km en la línea 7, por trayecto. Elaboración propia.

## 5.4. Comparativa entre líneas

Realizando una comparativa entre los consumos energéticos obtenidos para las diferentes líneas de la red de estudio es posible observar como el valor obtenido por km de vía varía sustancialmente. Este resultado establece que el consumo en la red de Metrovalencia está claramente condicionado por el trayecto que realiza el tren, pues características como número de paradas, perfil de la línea o grado de llenado condicionan notablemente la energía necesaria para operar en cada momento.

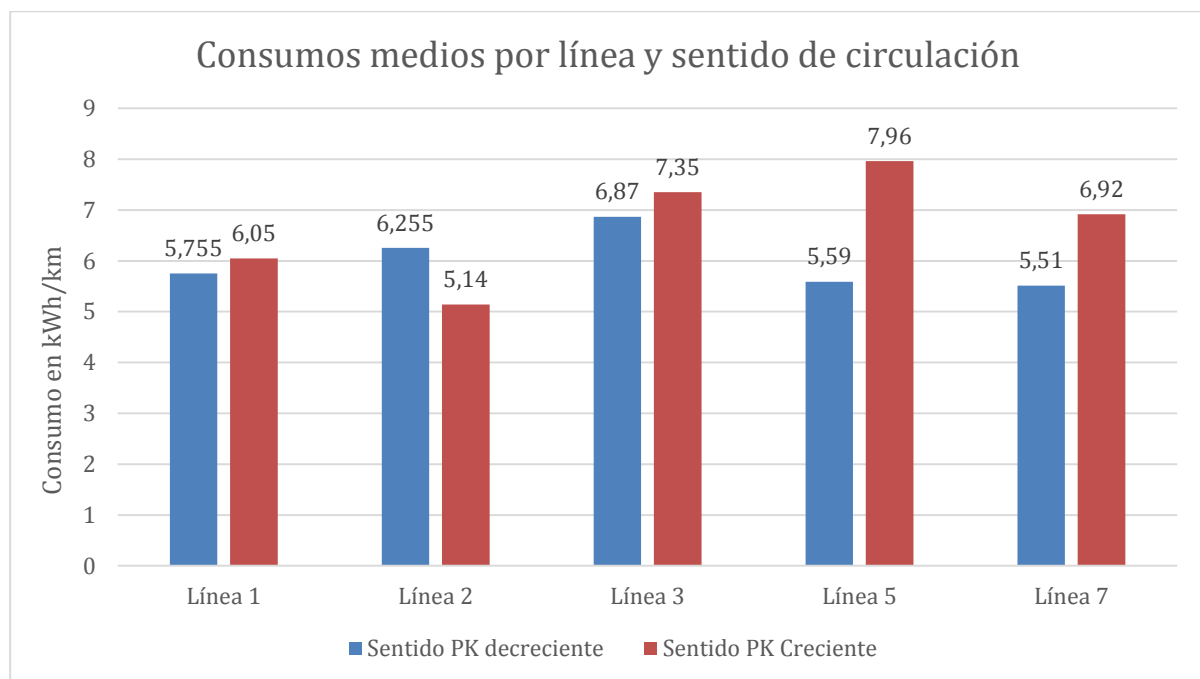


Figura 5.18. Valores de consumo medio por km. Elaboración propia.

En la gráfica anterior se observa pues los consumos registrados en función de cada línea y el sentido de circulación. La media total de la energía neta de tracción obtenida para los trayectos registrados es de 6,33 kWh/km. si bien dicho valor aporta un índice muy genérico que engloba diferentes tipos de servicios, vehículos y trayectos muy dispares. Además, hay que considerar que algunos consumos están relacionados con la distancia recorrida, mientras que otros son proporcionales al tiempo de viaje.

Una comparativa de los resultados obtenidos puede llevarse a cabo mediante el coeficiente que plantea los responsables del metro de Londres (London Underground Annual Report 2010). En el anuario que dicha administración realiza se obtiene el consumo energético

medio en toda su red, el cual equivale a 0,151 kWh/pasajero\*km, expresado en función del número de viajeros. Teniendo en cuenta las plazas ofertadas por FGV en los vehículos Vossloh 4300 (son 116 plazas sentadas y 472 de pie) es posible calcular el consumo por km en función del grado de llenado. Así pues, la Figura 5.19. representa, para el índice aportado por el metro de Londres, el consumo medio, y su comparativa con el valor medio obtenido en la red de Metrovalencia.

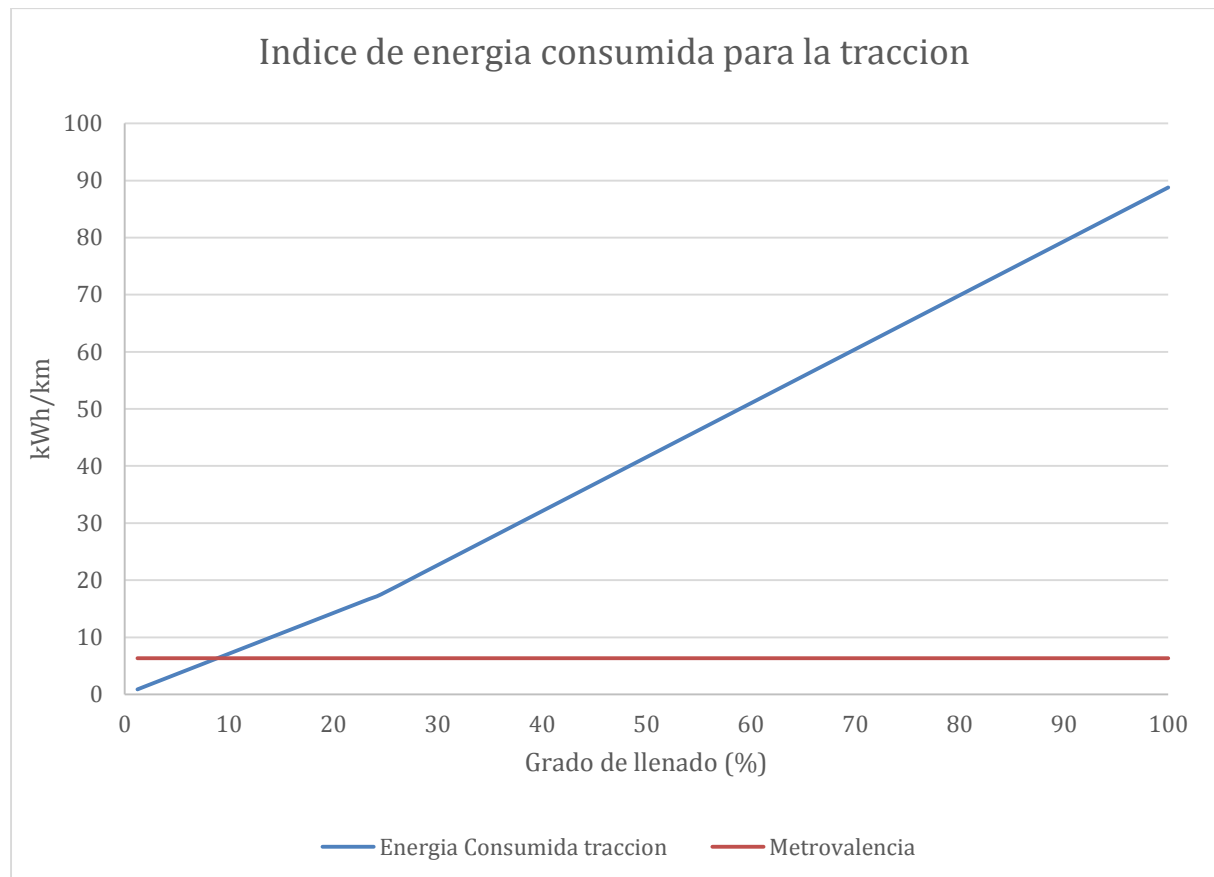


Figura 5.19. Valores de consumo medio por km y viajero. Elaboración propia.

El valor obtenido de consumo energético medio se corresponde, según el índice proporcionado, con una ocupación alrededor del 10 % del total (si se consideran únicamente las plazas sentadas, el grado de llenado se sitúa en entre el 35 % y el 40 %). Si se tiene en cuenta los días de medida, el grado de llenado indicado se corresponde aproximadamente con la afluencia de viajeros observada durante los días de medida.

En cuanto a la energía recuperada en la frenada, los datos obtenidos muestran una dispersión importante entre trayectos y líneas, si bien los datos medios obtenidos para cada

línea se encuentran entre el 20 % y el 28 % respecto de la energía importada por el vehículo, tal y como puede verse a continuación.

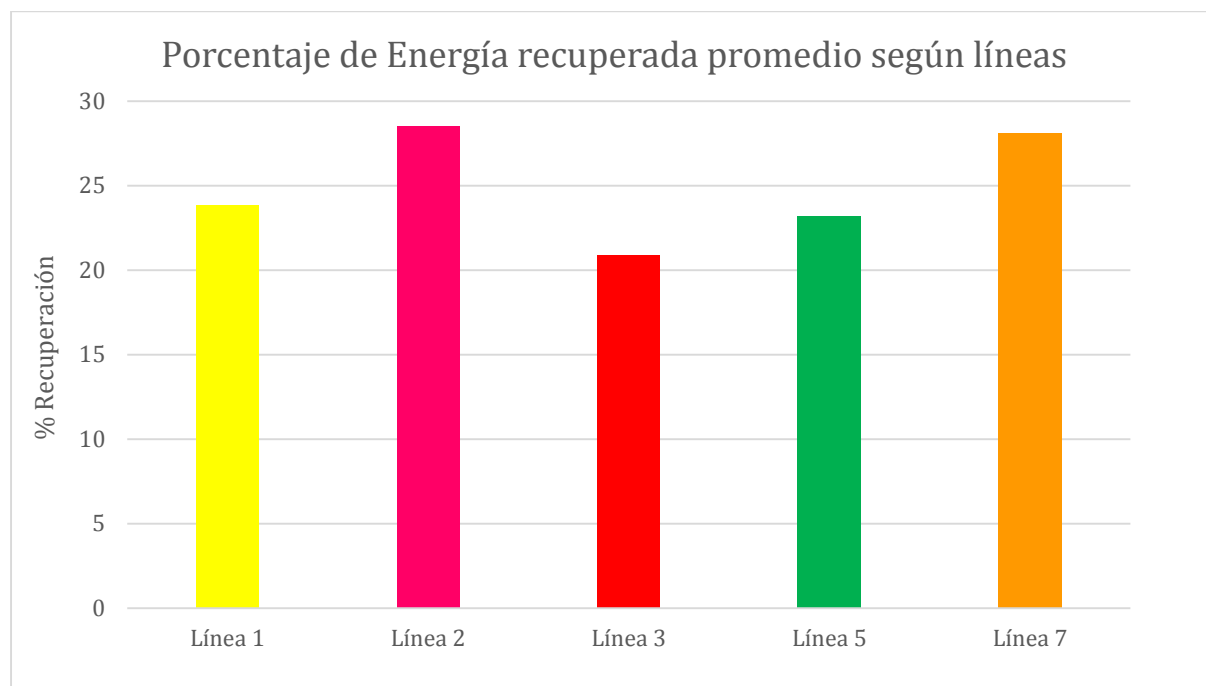


Figura 5.20. Valores de recuperación energética medios por líneas. Elaboración propia.

No obstante, sí es posible afirmar que existe una correlación entre los kilómetros recorridos y el porcentaje de energía que se recupera, siendo menor dicho porcentaje a medida que se aumentan los kilómetros. En cierta medida este hecho se produce pues en los trayectos más cortos las distancias entre paradas son más reducidas, pudiendo recuperarse más parte de la energía que en los trayectos más largos.

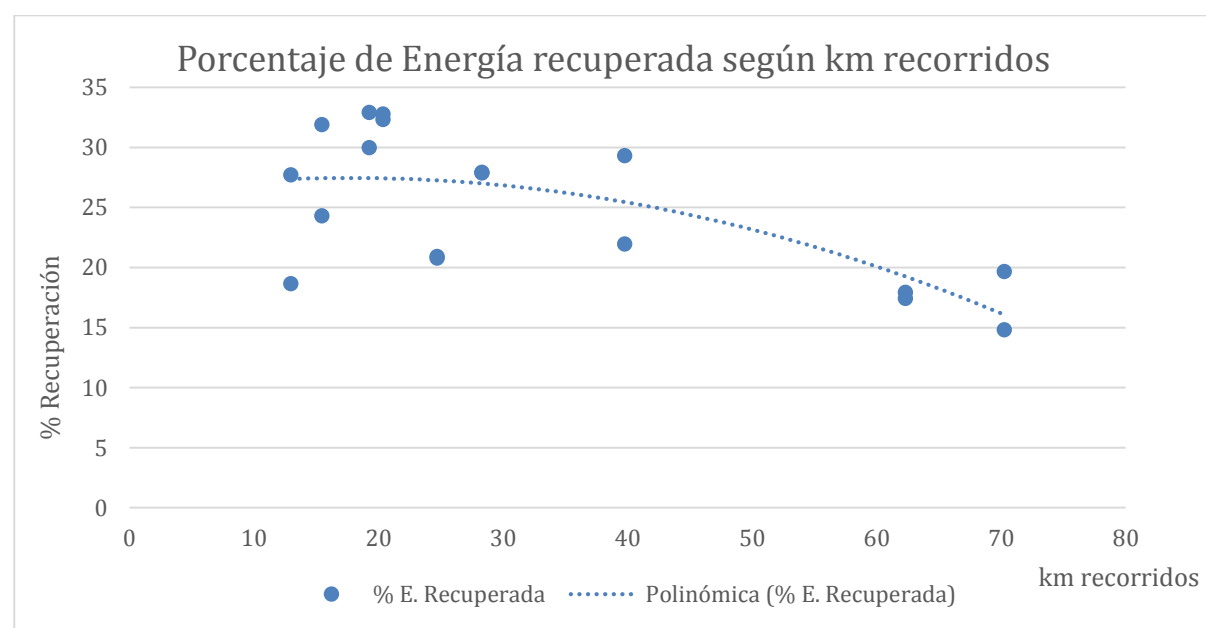


Figura 5.21. Valores de recuperación energética por km. Elaboración propia.

# 6. Desarrollo del modelo de consumo energético

---

## 6.1. Introducción

Desde hace ya algunos años el estudio y simulación de la conducción de ferrocarriles ha sido abordado y tratado por muchos investigadores. Si bien las herramientas informáticas y los algoritmos actuales son muy potentes, todos los modelos elaborados hasta el momento se enfrentan a múltiples dificultades. El principal reto reside pues en poder representar con precisión el movimiento de un vehículo eléctrico desplazándose por un sistema e interaccionando con otros vehículos es un problema especialmente complejo.

Así pues, en cualquier modelo de simulación las variables principales que se consideran a la hora de diseñar una trayectoria son el tiempo de recorrido y el consumo, respetando siempre el confort de los viajeros. Además, para realizar una simulación precisa del funcionamiento de un vehículo es necesario considerar todos los aspectos involucrados en la dinámica del tren y el cálculo de las energías de tracción y regeneración. De entre los diferentes aspectos que es posible analizar, destacan:

- Estudio de las detenciones del tren o reducciones de velocidad innecesarias.
- Reducción del número de frenados.
- Reducción del consumo de energía.
- Reducción de los picos de consumo.
- Reducción del desgaste en ruedas y frenos.
- Mejora la capacidad de las líneas.
- Minimizar los retrasos.
- Mejora de las condiciones de trabajo del personal ferroviario.

Uno de los objetivos para los que pueden ser utilizados este tipo de herramientas es por la valiosa información que puede ser facilitada a los maquinistas (o en la programación de los sistemas automáticos) de forma que puedan conducir de forma más adecuada los trenes.

Dicho esto, para llevar a cabo un modelo suficientemente potente y que permita abordar todos los aspectos anteriores es necesario tener en cuenta diversos factores como son:

- Perfil del terreno y planta del trazado (pendientes y curvas).
- Límites de velocidad (varían en función del punto del trazado).
- Tiempos objetivo establecidos por el operador del sistema.
- Características de la línea de alimentación de la red (tensión, subestaciones, etc.).
- Prestaciones del vehículo (Aceleraciones, equipos auxiliares, resistencias, etc.).
- Resistencia al avance.
- Existencia de freno regenerativo.
- Requisitos de confort del viajero.

Para añadir una mayor dificultad al tratamiento de este tipo de problemas, algunos de los factores descritos anteriormente son característicos y no varían, mientras que otros como son el perfil o los límites de velocidad varían en función de la posición.

Si se analiza los trabajos desarrollados en el campo de la simulación de la operación es posible observar como los trabajos y la bibliografía son muy numerosos. Ya en los años 80 (Asnis et al., 1985) se inician algunos trabajos donde se clasifican trayectorias y perfiles de velocidad en función de diversos factores con un control continuo. Por su parte, en cuanto a los modelos de conducción manual hay que destacar los trabajos realizados por Lukaszewicz para trenes de carga (Lukaszewicz, 2001), donde se considera tanto el trazado como las características de operación manual para crear un modelo.

Algunos estudios más recientes (Khmelnitsky 2000, Bigharaz et al. 2014) han abordado la simulación mediante la elaboración de un algoritmo numérico capaz de minimizar el consumo energético, considerando el consumo y el tiempo como las funciones objetivo a minimizar. Para llevar a cabo esta tarea la idea es optimizar la trayectoria del vehículo a través de una serie de modos de conducción. En (Sicre et al. 2012) se analiza la conducción manual para adoptar estrategias que minimicen el consumo energético, si bien este trabajo está enfocado en el ámbito de la alta velocidad.



Otros estudios llevados a cabo (Calderaro et al 2014) han estudiado la simulación y optimización mediante el estudio de los perfiles de velocidad óptimos que permitan reducir el consumo. Para ello, el estudio se ha llevado a cabo en dos fases. En la primera fase, se ha utilizado un algoritmo dinámico para encontrar los perfiles óptimos de velocidad, tratando de minimizar la energía de tracción. En la segunda fase, se han introducido dichos perfiles en la red para estimar el flujo energético entre los diferentes vehículos, analizando su resultado. Existen además pruebas llevadas a cabo en algunas redes como en la de Shanghai (China), donde los investigadores (Gong et al. 2014) han analizado la efectividad de las medidas propuestas en cuanto a la optimización de la operación, con resultados aparentemente satisfactorios.

Finalmente, algunos autores se han centrado en el estudio de los sistemas acumuladores de energía (Fournier, 2014). Así pues, como ejemplo en este campo están los trabajos realizados por Wang (Wang et al. 2014) el cual ha estudiado el uso de ultra-capacitores, y sus ventajas en una red metropolitana, comprobando los beneficios que dichos sistemas aportan a la red.

Dicho esto, el objetivo de este trabajo es el de realizar un modelado detallado del movimiento del tren y su conducción manual (se deja para futuros desarrollos el sistema ATO de FGV, el cual en la actualidad se está reprogramando y su tratamiento es diferente) para que las simulaciones sean precisas, considerando todos los factores que influyen significativamente, evitando recurrir a simplificaciones que dificultan la utilidad de dichos modelos.

Para ello y a la vista de los trabajos desarrollados, es posible afirmar que la aproximación a la resolución de este tipo de problemas puede llevarse a cabo desde muy diferentes aspectos. Así pues, en el presente trabajo el algoritmo desarrollado emplea información sobre la infraestructura, el trazado y el vehículo para obtener el perfil de velocidad y el consumo asociado a dicha trayectoria, el cual puede ser modificado para analizar y predecir el consumo en diferentes escenarios que se planteen, minimizando dicho valor en los casos donde sea posible.

## 6.2. Modelo de simulación

El modelo de simulación se establece como una herramienta matemática que permite resolver las ecuaciones básicas representativas de un proceso. El diseño del algoritmo se ha realizado de forma modular, por lo que permite que cada uno de los módulos sea analizado y modificado por separado. El objetivo perseguido, tal y como se ha comentado previamente, es el de obtener una herramienta de simulación que permita estudiar y definir la conducción óptima no sólo atendiendo a los tiempos de recorrido objetivo y al cumplimiento de requisitos operativos y de confort, sino que además, sean las de menor consumo energético. Además, se considera que el vehículo circula en hora, es decir, que no acumula ningún retraso en su horario y que, por tanto, la marcha se realiza de forma normal, pudiendo aprovechar los márgenes de tiempo existentes. Para cada uno de los pasos de cálculo y a partir de la velocidad y posición del tren, el modelo calcula la consigna de tracción a aplicar al motor y el consumo asociado.

Dado que existen medidas de tiempos, velocidades y consumos en toda la red de estudio gracias a la campaña de mediciones llevada a cabo, el algoritmo creado se validará en cada una de las líneas comparando los resultados con los valores registrados con suficiente precisión.

Un esquema del tratamiento de los datos se observa en la Figura 6.1.

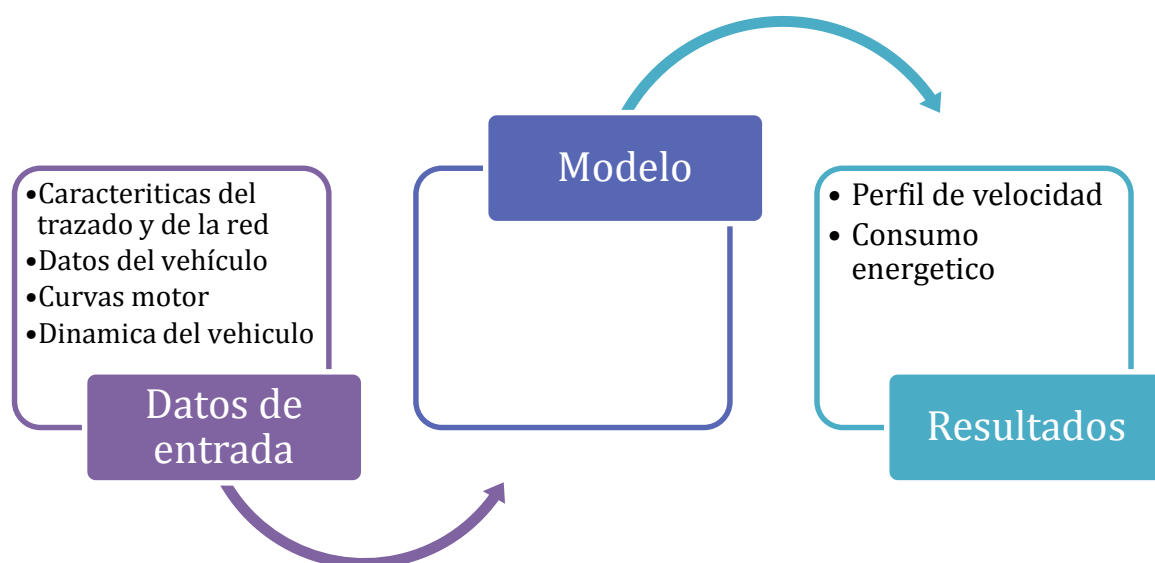


Figura 6.1. Esquema simplificado para llevar a cabo el modelo de simulación. Elaboración propia.

Para llevar a cabo la simulación, el algoritmo se compone de los siguientes bloques o módulos:

- Restricciones del vehículo y del trazado
- Dinámica del vehículo (resistencia al avance, pendientes y curvas).
- Comportamiento del motor.
- Regulador de la conducción.
- Posición, velocidad y aceleración.
- Cálculo del consumo energético.

La precisión y fiabilidad de la simulación depende en gran medida de la exactitud de los datos introducidos. Por ello, para cada uno de los bloques mencionados anteriormente es necesario disponer de las características y valores que los definen de forma precisa.

A continuación se describen cada uno de los bloques citados, en detalle.

### 6.2.1 Restricciones del vehículo y del trazado

Para poder llevar a cabo la simulación es necesario previamente considerar cuales son las prestaciones del material rodante que se quiere estudiar para poder representar su comportamiento real. Uno de los aspectos pues a considerar son las prestaciones del vehículo en cuanto a la velocidad y a su capacidad de acelerar y decelerar, pues estos valores condicionarán el movimiento del vehículo a lo largo de un trayecto.

Los valores característicos son:

- Velocidad máxima (km/h)
- Valor máximo de aceleración en ( $m/s^2$ ).
- Valor máximo de deceleración ( $m/s^2$ ).

CARACTERÍSTICAS	Unidad de 4 coches
Velocidad máxima	80 km/h
Aceleración máxima	1,1 $m/s^2$
Deceleración máxima	1,2 $m/s^2$

Tabla 6.1. Valores de aceleraciones y deceleraciones en servicio para vehículo Vossloh serie 4300.

Por otro lado, además de las limitaciones propias del material rodante que circula hay que tener en cuenta que a lo largo de un determinado trazado las velocidades máximas varían debido a restricciones generalmente impuestas por la geometría del trazado. Por ello, si bien la velocidad máxima para toda la red de FGV está fijada en 80 km/h (es también la velocidad máxima de las unidades que circulan por la red), existen ciertos puntos y tramos (curvas, proximidades a estaciones, etc.) donde la velocidad puede estar limitada por debajo de este valor. Esta limitación es muy importante, pues se trata de límites de velocidad que no pueden ser rebasados bajo ninguna circunstancia.

Para conocer este tipo de valores límites de velocidad se ha recurrido a la información proporcionada por FGV, mediante la cual se ha obtenido el valor de la velocidad máxima en cada punto de la red. En los puntos donde existe un cambio de velocidad se ha obtenido el perfil de velocidades máximas posibles según las características del material rodante, considerando para ello las aceleraciones máximas de tracción y frenado del vehículo.

Por último, hay que destacar que en el modelo desarrollado al valor máximo de velocidad se aplica un cierto margen para mantenerse siempre por debajo de la velocidad máxima permitida y no rebasarla en ningún punto.

Otro aspecto a considerar son las posibles restricciones en la línea por tráfico o alguna incidencia en la misma. Para este trabajo se ha considerado que la circulación entre dos estaciones se realiza libremente sin ninguna incidencia, por lo que no se han considerado posibles paradas o reducciones de velocidad temporales que alteran el normal funcionamiento.

### **6.2.2 Dinámica del vehículo**

Sobre un tren, durante un cierto momento, actúan una serie de fuerzas de naturaleza y dimensión muy diferentes. Así pues, para poder iniciar el movimiento el esfuerzo aplicado por los motores del vehículo y que se transmite a través del contacto de las ruedas con el carril debe vencer a la resistencia que existe en ese momento, la cual está formada por una serie de fuerzas que, generalmente, se oponen a dicho movimiento.

El movimiento del tren, por lo tanto, responde a la ecuación 4:

$$\sum F_{motor} - F_{avance} - F_{curva} - F_{pend} = m_{eq} \cdot a \quad (4)$$

donde:

$F_{motor}$ : fuerza del motor (N).

$F_{avance}$ : fuerzas que se oponen al avance del vehículo (N).

$F_{curva}$ : fuerzas debido a la resistencia en curva (N).

$F_{pend}$ : fuerza debido a la pendiente longitudinal del terreno (N).

$m_{eq}$ : masa equivalente total del vehículo (kg).

$a$ : aceleración del vehículo ( $m/s^2$ ).

En función de la fuerza generada por los motores el esfuerzo resultante  $F_{motor}$  puede ser de tracción (positivo), de frenado (negativo) o nulo (cuando se circula en deriva).

Por otro lado, si se analiza la ecuación 4 es posible observar que existen 3 situaciones diferentes, en función del balance y del valor que adoptan las fuerzas que condicionan el movimiento. De forma simplificada y en función del valor que adopta la aceleración ( $a$ ), es posible diferenciar tres escenarios:

Aceleración positiva ( $a > 0$ ):  $F_{motor} > F_{avance} + F_{curva} + F_{pend}$

Aceleración negativa ( $a < 0$ ):  $F_{motor} < F_{avance} + F_{curva} + F_{pend}$

Aceleración nula (velocidad constante):  $F_{motor} = F_{avance} + F_{curva} + F_{pend}$

Tras describir los posibles escenarios es momento de analizar por separado los diferentes términos de la ecuación 4. En primer lugar y respecto al término referido a la masa cabe destacar que el esfuerzo necesario para desplazar el vehículo comprende no solamente la propia masa del vehículo y la de los viajeros sino que hay que considerar las masas rotatorias del vehículo. Para calcular la inercia total del tren (masa equivalente,  $m_{eq}$ ) se debe tener en cuenta el efecto de las masas rotatorias (ecuación 5).

$$m_{eq} = m_{tren} \cdot (1 + \beta) + m_{viajeros} \quad (5)$$

donde:

$m_{tren}$ : masa en vacío del tren (kg).

$\beta$ : coeficiente de masas rotatorias.

$m_{viajeros}$ : masa de los viajeros (kg).

El valor del coeficiente de masas rotatorias  $\beta$  considerando la tara de las unidades de 4 coches consideradas es igual a 0,10, lo que supone incrementar la masa estática en un 10 % por el efecto de las masas rotativas.

Tras plantear la ecuación que gobierna el movimiento de un vehículo y detallar el término de la masa equivalente ( $m_{eq}$ ), es momento de estudiar en detalle las distintas resistencias que se oponen al avance del mismo y que es necesario vencer para desplazarse ( $F_{avance}$ ,  $F_{curva}$  y  $F_{pend}$ ).

#### a) Resistencias al avance ( $F_{avance}$ )

Una de las principales fuerzas que se oponen al movimiento de un vehículo ferroviario es la resistencia al avance. Esta resistencia está compuesta por todas aquellas fuerzas que se oponen al movimiento del tren en la dirección longitudinal de la vía y que no son de naturaleza gravitatoria ni aquellas propias de la tracción y frenado del vehículo (la resistencia en curva podría considerarse como una resistencia al avance, pero debido a su tratamiento especial se ha considerado de forma aislada). Se trata pues de fuerzas que siempre es necesario vencer, pues son intrínsecas al propio movimiento. Entre las diferentes fuerzas que componen la resistencia al avance es posible destacar las siguientes:

- Rozamiento entre las ruedas y los carriles.
- Rozamientos internos de las partes móviles y giratorias del tren.
- Fuerza para impulsar el aire (necesario para la refrigeración de los motores y la renovación del aire interior).
- Resistencia aerodinámica (de presión y de fricción).

Para tener en cuenta las resistencias descritas anteriormente en el ámbito ferroviario se emplea generalmente la conocida como fórmula de Davis, obtenida en el año 1926 como resultado de los ensayos logrados por el Ing. Davis Jr. de la empresa *General Electric*, para un

tren en recta y con pendiente nula. Esta fórmula es una expresión simplificada de la resistencia al avance y se modela mediante un polinomio de segundo grado, cuyos coeficientes dependen del tipo de material rodante analizado y que han sido calibrados y reajustados a lo largo de los años.

La fórmula de Davis para un trazado en línea recta y horizontal tiene la expresión de la ecuación 6:

$$F_{\text{avance}} = A + B \cdot v + C \cdot v^2 \quad (6)$$

donde:

*A*: coeficiente debido a la resistencia mecánica (N).

*B*: coeficiente debido a la resistencia por la entrada de aire en el tren (N·s/m).

*C*: coeficiente de resistencia aerodinámica (N·s<sup>2</sup>/m<sup>2</sup>).

*v*: velocidad (m/s).

Si bien el uso de la fórmula de Davis está muy extendido, es desaconsejable el uso de esta expresión especialmente cuando se trata de velocidades elevadas, pues se comete un importante error al considerar que los coeficientes *B* y *C* dependen de la masa del tren, ya que en la realidad no dependen de dicho factor. No obstante, en el presente trabajo las velocidades de los vehículos son inferiores a los 80 km/h, por lo que es posible utilizar la fórmula sin un error importante

Cuando es posible, una de las formas más adecuadas para evaluar la resistencia al avance es la de obtener de forma experimental su expresión. Así pues, en el presente trabajo se ha considerado la expresión proporcionada por el fabricante, pues aproxima con mayor precisión la resistencia al avance del vehículo estudiado, la cual adquiere la forma de la ecuación 7.

$$F_{\text{avance}} = 6,4 \cdot m_t + 130 \cdot n + 0,14 \cdot m_t \cdot v + (0,046 + 0,065 \cdot (N - 1)) \cdot A \cdot v^2 \quad (7)$$

donde:

*m<sub>t</sub>*: masa total (t), se calcula con la masa en vacío del tren más la carga de viajeros.

*n*: número total de ejes.

$N$ : número de coches.

$A$ : superficie frontal ( $m^2$ ).

$v$ : velocidad (km/h).

En la Figura 6.2. se observan los valores de resistencia al avance calculados considerando un vehículo de 4 coches y 16 ejes, con una superficie frontal de  $8,66 m^2$ , en función de la velocidad, para los valores de los coeficientes facilitados y en función del grado de llenado del vehículo ( $m_{te}$ ).

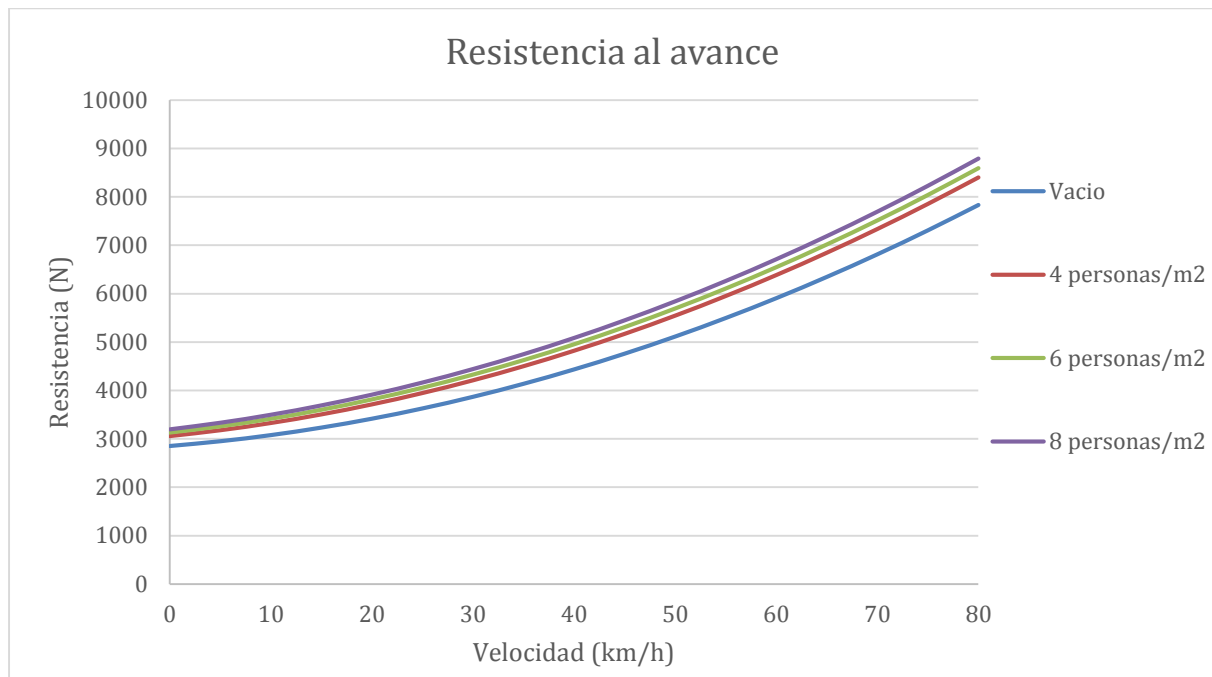


Figura 6.2. Resistencias al en función de la velocidad y la masa estática total. Elaboración propia

### b) Resistencias debido a las curvas ( $F_{curva}$ )

Cuando un vehículo ferroviario circula por una curva se genera una cierta resistencia longitudinal que lo frena debido al rozamiento que se produce entre las pestañas de las ruedas y el propio carril. Además, al rozamiento descrito se le suma el rozamiento que se genera en la rueda externa debido a que dicha rueda recorre una mayor longitud y gira sobre el mismo eje que la rueda interior.

Para considerar la resistencia generada por dichos rozamientos en una curva se usan expresiones obtenidas empíricamente, que varían en función del ancho de vía. Para el



presente trabajo y considerando el ancho de la red de estudio es de 1 000 mm, la expresión considerada toma la forma simplificada de la ecuación 8.

$$F_{curva} = 0,01 \cdot \frac{K}{R} \cdot m_{te} \quad (8)$$

donde:

$K$ : Coeficiente en función del ancho de vía y del tipo de tren, el cual toma valores entre 500 y 1 200 (N·m/kg).

$R$ : Radio de la curva (m).

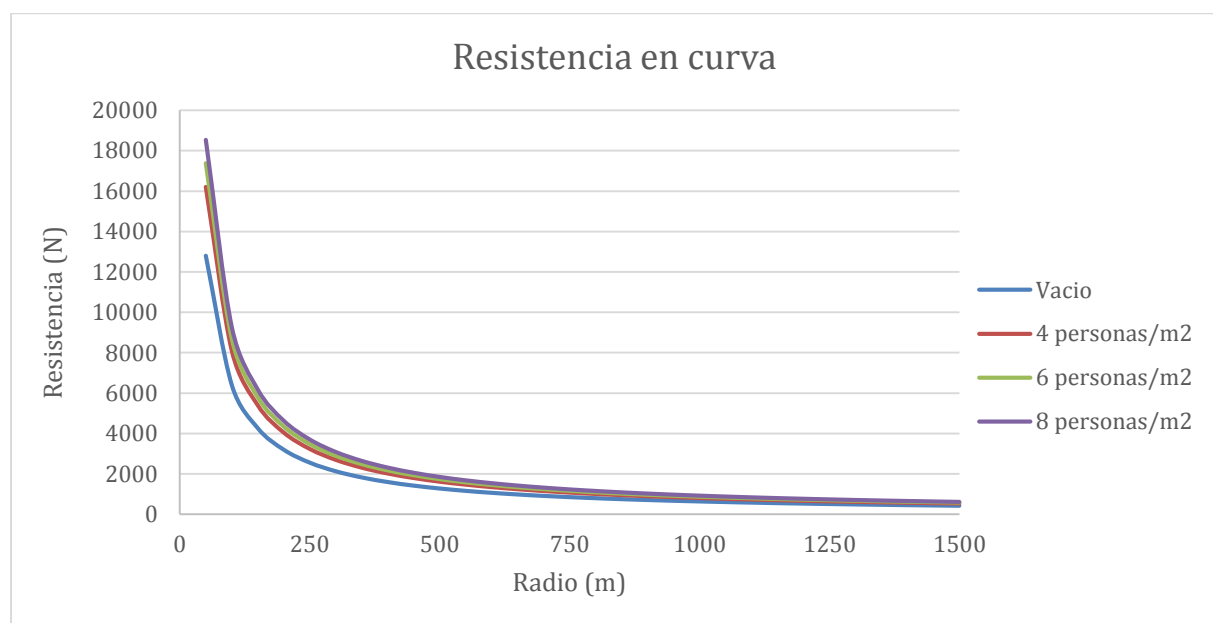


Figura 6.3. Resistencias en curva en función del radio y de la masa estática. Elaboración propia

En la Figura 6.3. se observa como la resistencia en curva para radios por encima de los 250 m es prácticamente constante, mientras que por debajo de dicha cifra y especialmente para valores por debajo de 200 m la resistencia en curva aumenta considerablemente.

### c) Resistencias debido a la pendiente del terreno ( $F_{pend}$ )

Además de los términos expresados anteriormente, para considerar el efecto de la gravedad sobre el movimiento del tren, hay que añadir a las resistencias anteriores otra resistencia ( $F_{pend}$ ) debida a pendiente del terreno (que puede ser positiva o negativa) y que se expresa según la ecuación 9:

$$F_{pend} = m_{te} \cdot \sin(\alpha) \cong m_{te} \cdot \tan(\alpha) \cong m_{te} \cdot \frac{p_t}{1000} \quad (9)$$

donde:

$\alpha$ : Angulo que forma el terreno con la horizontal (°).

$p_t$ : es la pendiente del terreno (mm/m).

Para considerar la resistencia debido a la pendiente a lo largo del trazado se ha obtenido de los perfiles del trazado la inclinación del terreno y los puntos kilométricos de comienzo y fin de la pendiente o rampa. En la Figura 6.4. se observa el valor de la resistencia debido a la inclinación del terreno, en función del valor de la inclinación.

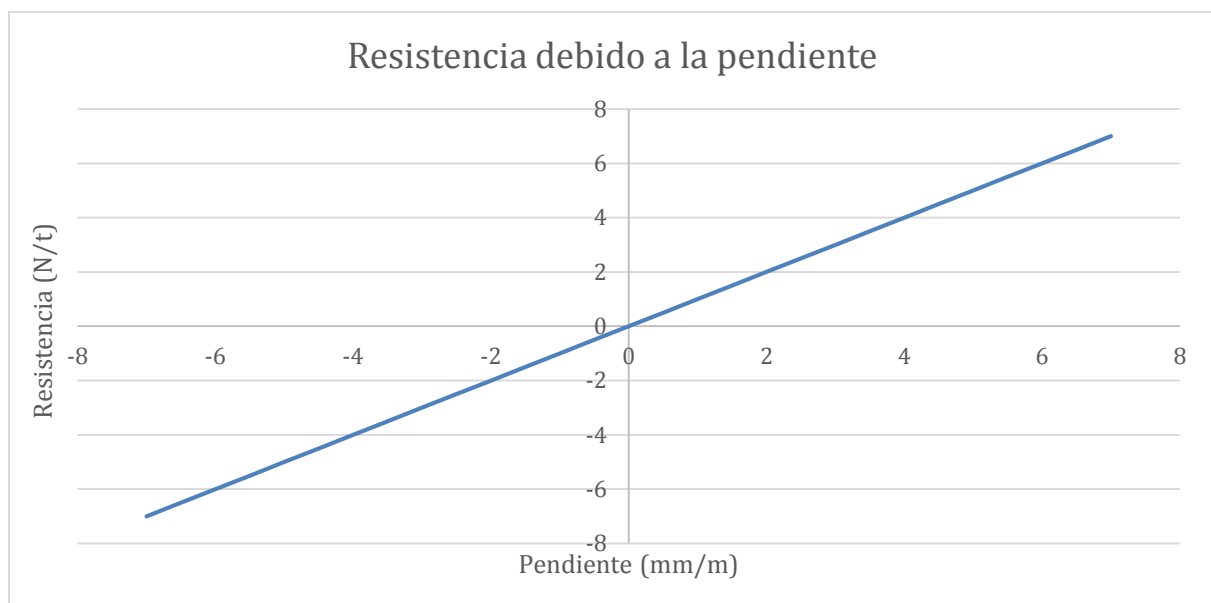


Figura 6.4. Valores de resistencia en función de la pendiente. Elaboración propia

### 6.2.3 Comportamiento del motor

Como se ha citado previamente, el correcto modelado del comportamiento del vehículo es imprescindible para poder representar el movimiento del mismo a lo largo de un determinado trayecto. Por ello, es necesario conocer las características del equipo de tracción, así como otras características del tren.

Las fuerzas de tracción proporcionadas por los motores se transmiten a través de las ruedas motoras para vencer la resistencia al avance. Supuesta una potencia constante, la fuerza de tracción se calcula como la potencia dividida por la velocidad. Entonces, para valores de

velocidad pequeños, la fuerza que puede entregar el motor es muy grande (la curva de potencia constante es una hipérbola equilátera).

Sin embargo, debido a las condiciones en el contacto, existe un valor máximo de fuerza de tracción que se puede transmitir (el límite de adherencia). Este valor se calcula como  $\tau P$ , donde  $\tau$  es el coeficiente de tracción y  $P$  es la carga por eje.

Así, las curvas características de tracción para un motor presentan una primera zona donde el esfuerzo máximo es igual al límite de adherencia y una segunda zona donde la curva sigue la hipérbola equilátera dada por la condición de potencia constante (Figura 6.5.).

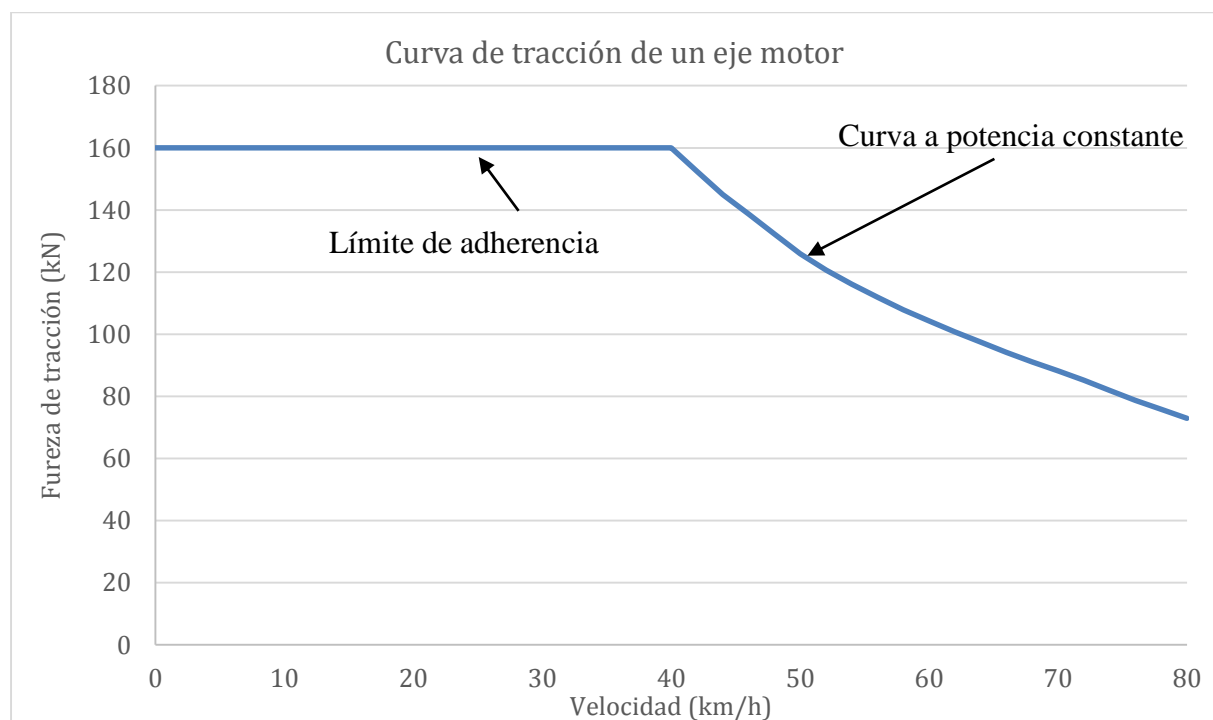


Figura 6.5. Curva de fuerza de tracción para una locomotora. Elaboración propia

Para considerar el comportamiento real de un motor se debe incluir el rendimiento ( $\eta$ ), que expresa la relación entre la potencia eléctrica del motor ( $P_{ot}$ ) y la potencia mecánica que es capaz de desarrollar:

$$P_{ot} = \eta \cdot F_{motor} \cdot v \quad (10)$$

Además, el comportamiento del motor puede ser reversible; de esta forma pueden funcionar como freno. En esta situación la fuerza de frenado tendría signo contrario a la fuerza motor de la Figura 6.5.

#### 6.2.4 Regulador de conducción

En los modelos de simulación de la conducción es importante considerar el comportamiento humano para poder comprender adecuadamente la operación de conducción. Así pues, para conducir un tren generalmente el maquinista dispone de una palanca la cual acciona en función de la operación que desee realizar. Así pues, para cada una de las posiciones posibles de la palanca se envía la señal adecuada a los equipos electrónicos de tracción y freno los cuales envían las órdenes oportunas para aplicar el esfuerzo deseado (tracción, frenado o nulo).

Considerando este aspecto, el esfuerzo seleccionado a través de la palanca tomará siempre valores entre el 100 % de freno (desplazando la palanca hacia detrás) y el 100 % de la tracción (desplazando la palanca hacia delante), siendo dichos valores las posiciones extremas del regulador de conducción. La palanca de los vehículos Vossloh 4300 puede accionarse manualmente entre varias posiciones de tracción y de frenado (considerando además la posición neutra).

En el modelo, para cada una de las posiciones se considera que el valor de la fuerza aplicada es proporcional a la posición del regulador.

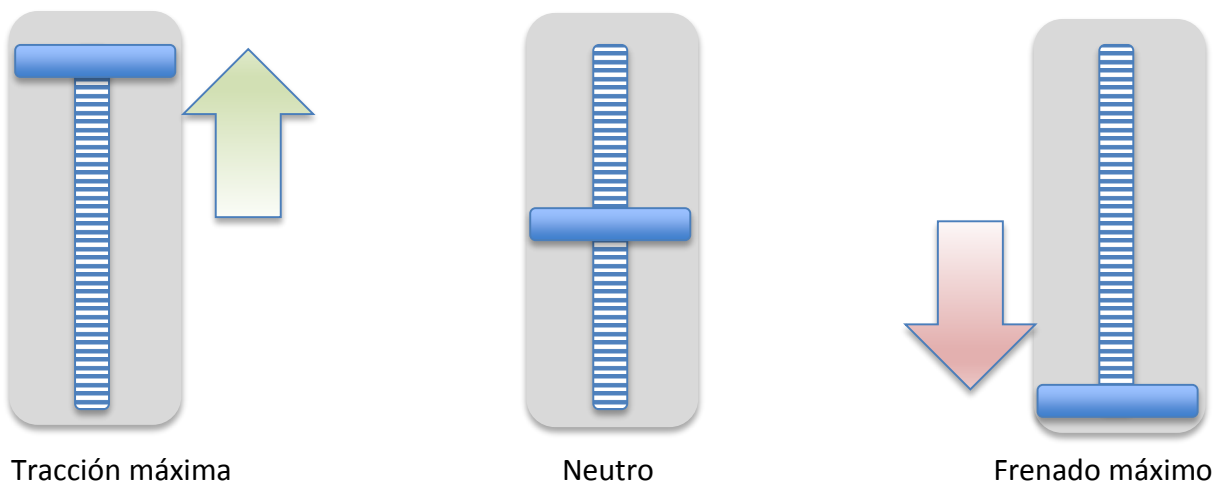




Figura 6.6. Imágenes de posición de la palanca del regulador. Fuente: <http://todotrenesarg.com.ar/>

Además de las consideraciones descritas anteriormente, en la forma de conducción hay que tener en cuenta que la percepción, reconocimiento y aplicación de rutinas por parte de un humano es un aspecto que debe ser abordado con precaución. La fatiga es uno de los aspectos que más condiciona, reduciendo considerablemente la capacidad de operación y reacción. Por ello, para mejorar la receptividad de los maquinistas y facilitar su trabajo las consignas y cambios en la conducción deben ser las mínimas necesarias.

Otro aspecto a considerar es el confort de los viajeros. Este aspecto determina la sensación de molestia en la circulación del tren se relaciona con la variación de la aceleración (conocida como jerk), por lo que se limita alrededor de 0,6 m/s<sup>3</sup>. La limitación de jerk introducida por tanto en el modelado del motor limita la variación de fuerza en cada ciclo para evitar los cambios bruscos de aceleración.

### 6.2.5 Posición, velocidad y aceleración

El cálculo planteado se realiza en un determinado instante, obteniéndose todos los valores para dicho estado. El siguiente paso de cálculo se realiza incrementando el tiempo ( $\Delta t$ ) y mediante las siguientes ecuaciones 11-13.

$$a_i = \frac{\sum F}{m_{eq}} = \frac{F_{motor} - F_{ravance} - F_{curva} - F_{pend}}{m_{eq}} \quad (11)$$

$$v_{i+1} = v_i + a_i \cdot \Delta t \quad (12)$$

$$x_{i+1} = x + v_i \cdot \Delta t + \frac{1}{2} \cdot a_i \cdot \Delta t^2 \quad (13)$$

donde:

$a_i$ : aceleración para el instante  $i$  ( $m/s^2$ ).

$v_i$ : velocidad para el instante  $i$  ( $m/s^2$ ).

$\Delta t$ : incremento de tiempo (s).

$x_i$ : posición para el instante  $i$  (m).

El resultado obtenido de la simulación más interesante puede presentarse en un gráfico Espacio-Velocidad con el perfil de velocidades, la posición del regulador, la energía consumida y el perfil del trazado.

### **6.2.6 Cálculo del consumo energético**

La energía que entra en el tren en el recorrido es la suma de la energía necesaria para vencer las resistencias al avance (en recta, pendiente y curva), consumida por los equipos auxiliares, la generada en el freno regenerativo y disipada en el freno convencional.

Así pues, la energía eléctrica que consumen o generan los motores en cada instante de cálculo se obtiene mediante el producto entre el esfuerzo aplicado y la velocidad, según la ecuación 14.

$$E_{motor} = \int F_{motor} \cdot v \cdot dt \quad (14)$$

donde  $E_{motor}$  es el consumo o generación de energía eléctrica durante la marcha (W).

A nivel práctico el consumo/generación se expresa en kWh, unidad utilizada en la discusión de resultados.

Para finalizar cabe destacar que el modelo desarrollado no considera el cálculo del consumo que suponen los equipos auxiliares, siendo dicho valor más o menos constante a lo largo del trayecto. Para el caso del frenado, todo el esfuerzo desarrollado en el freno no se traduce, como se ha visto anteriormente, en generación de energía eléctrica por lo que para obtener el valor de energía regenerada se le aplica un cierto factor de frenado que considera únicamente la parte de la energía se aprovecha.

### 6.3. Obtención de resultados

Para cada instante de tiempo desde el inicio del recorrido hasta llegar a la estación final del tramo se puede dar diferentes situaciones y en función de las mismas, se determina si es necesario acelerar, frenar o circular en deriva, hasta completar el recorrido dentro del margen de tiempo que existe. Con la posición en la que se encontraba el vehículo, la velocidad y la aceleración, se actualizan la posición y la velocidad un instante de tiempo posterior, de forma sucesiva hasta que se llega a la distancia final.

Un aspecto a destacar es el hecho de que el tiempo de cálculo para una simulación entre dos puntos es de unos pocos segundos, por lo que el tiempo de resolución no plantea ningún inconveniente a la hora de realizar los cálculos.

Así pues, con estos datos es posible representar cada variable en diferentes gráficas, para todo el tiempo de simulación. Los parámetros que se obtienen mediante el modelo son los siguientes:

- Tiempo (s)
- Distancia recorrida (km)
- Velocidad (km/h)
- Aceleración ( $m/s^2$ )
- Esfuerzo de tracción (kN)
- Posición del regulador (entre -4 y 4)
- Consumo instantáneo (kWh)
- Consumo acumulado (tracción – frenado) (kWh)
- Resistencia al avance (kN)
- Rpm del motor (rpm)

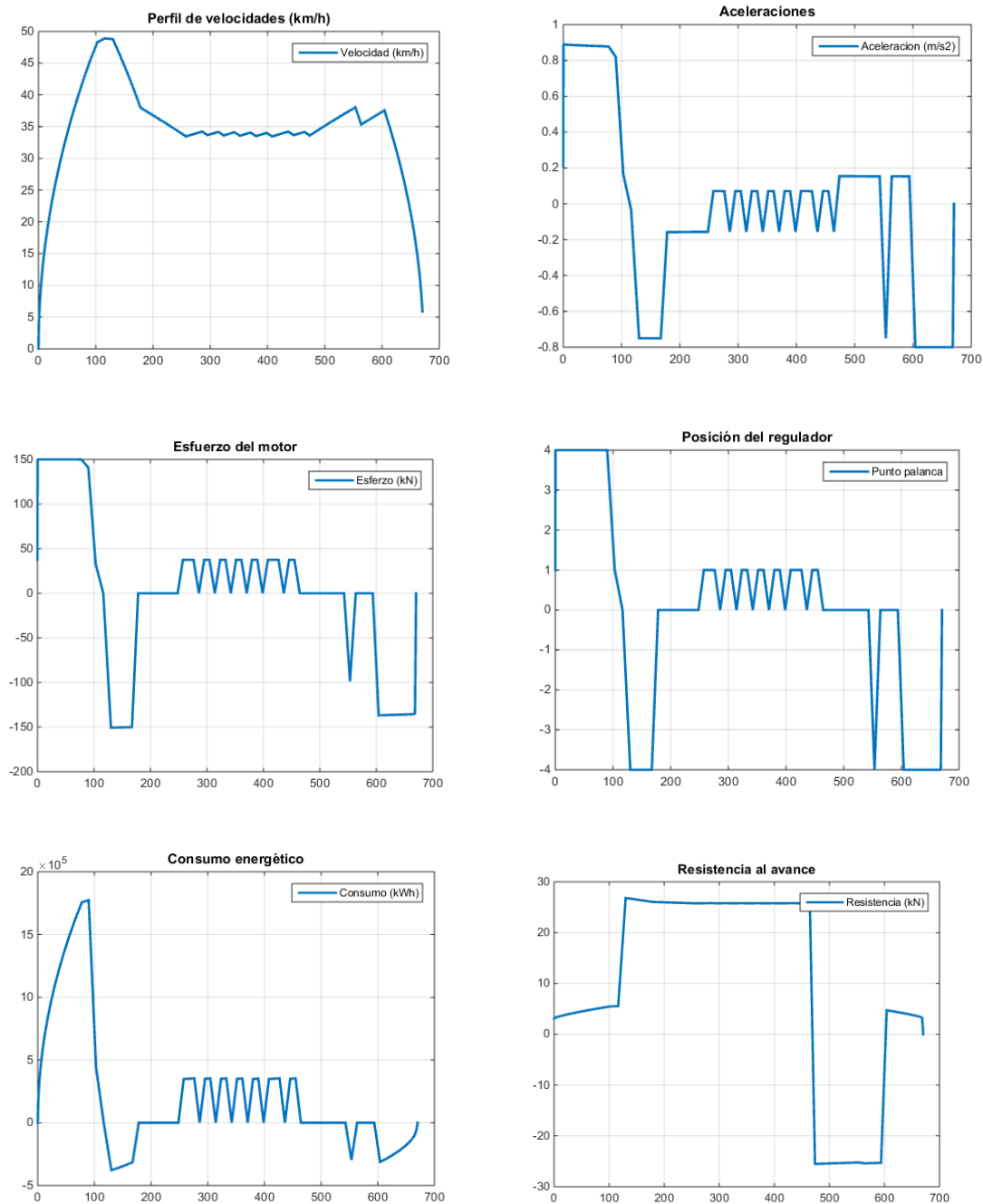


Figura 6.7. Ejemplo de resultados obtenidos con el modelo planteado. Elaboración propia.

Para obtener estos resultados en cada instante hay que conocer la pendiente, la curvatura y la resistencia al avance del punto de la vía en la que se encuentra el tren para la velocidad a la que circula. Además, se calcula el esfuerzo de tracción máximo del material motriz para dicha velocidad, interpolando linealmente en los valores disponibles de la curva de esfuerzo máximo del material rodante analizado.

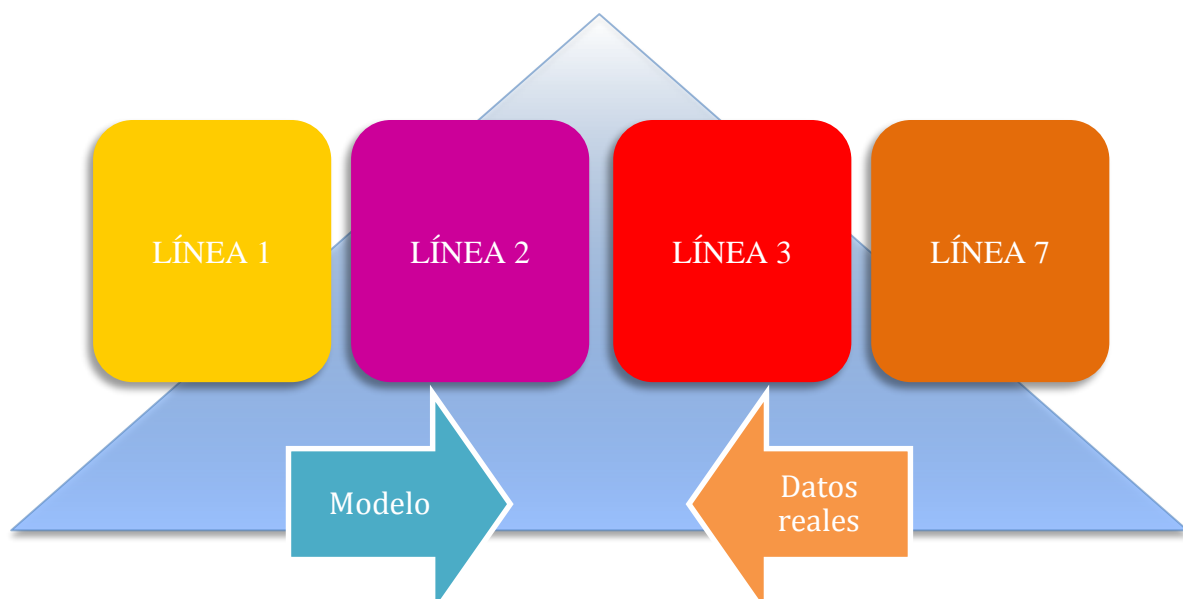


### 6.3.1 Validación de resultados.

Hasta el momento se ha realizado un estudio detallado del modelo planteado y de los factores considerados en el mismo, así como los aspectos involucrados en el cálculo de las energías de tracción y regeneración. Para conocer la bondad o precisión de dicho modelo es necesario pues contrastar los resultados que se obtienen con los datos medidos en la red de FGV.

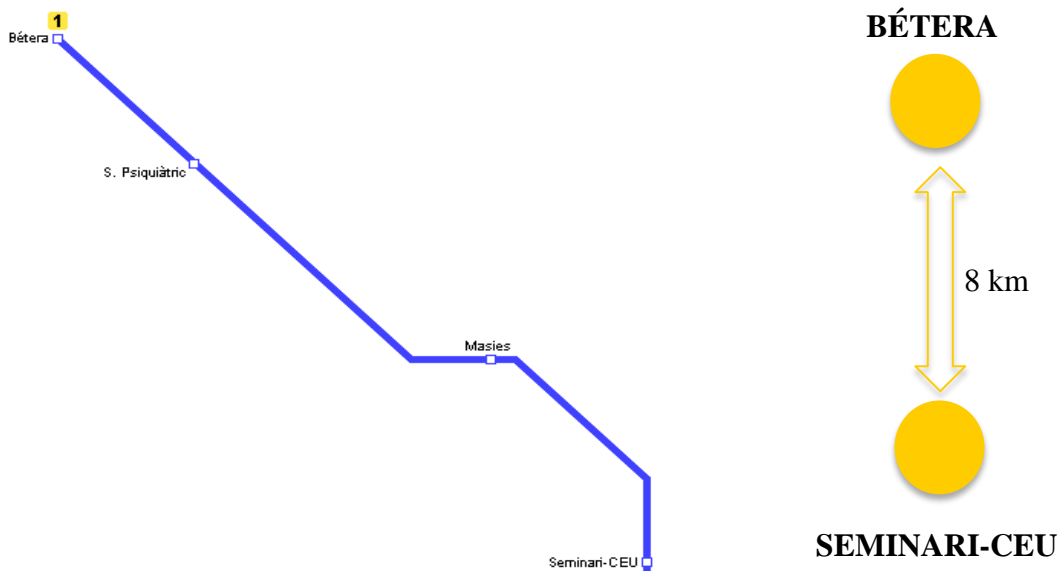
Por ello, el modelo descrito anteriormente se ha aplicado en diferentes líneas y trayectos de la red de FGV (entre varias estaciones contiguas) donde en la actualidad se realiza la conducción de forma manual (se excluye de la validación la línea 5 donde toda se conduce de forma automática, sistema ATO), a fin de comprobar la precisión y ajustarlo para la correcta definición de los parámetros que definen la operación. El objetivo es que el modelo sea capaz de simular casos reales de operación para poder posteriormente tener una herramienta de simulación válida y, en su caso, ser capaz de modificar la conducción para conseguir un ahorro energético, siendo mínimas las pruebas en reales.

Para poder llevar a cabo la validación es necesario contar con todos los datos estructurales de la vía, los límites operativos de cada tramo, las posibles restricciones, etc. los cuales han sido introducidos en el modelo. En cuanto a las pendientes y curvas cabe destacar que no se han tenido en cuenta los acuerdos de transición que se asocian a los cambios de valor de estos factores, por lo que se ha considerado únicamente las pendientes sin acuerdos verticales y las curvas sin las clotoides típicas del trazado ferroviario.



### Línea 1

Para la validación del modelo desarrollado se ha escogido, en el caso de la línea 1, el trayecto comprendido entre las estaciones de Bétera y Seminari-CEU. Este trayecto cuenta con una longitud de unos 8 km y 2 estaciones intermedias, con un tiempo de recorrido de unos 10 minutos. A continuación se observa un esquema del trayecto analizado.



A lo largo del trayecto es posible observar que las pendientes longitudinales son preferentemente favorables en el sentido de circulación Bétera-Seminari, por lo que a priori cabe esperar que el consumo sea menor en este sentido de circulación. En la siguiente imagen se muestra el perfil del trayecto, en cuanto a sus pendientes y radios de curvatura.

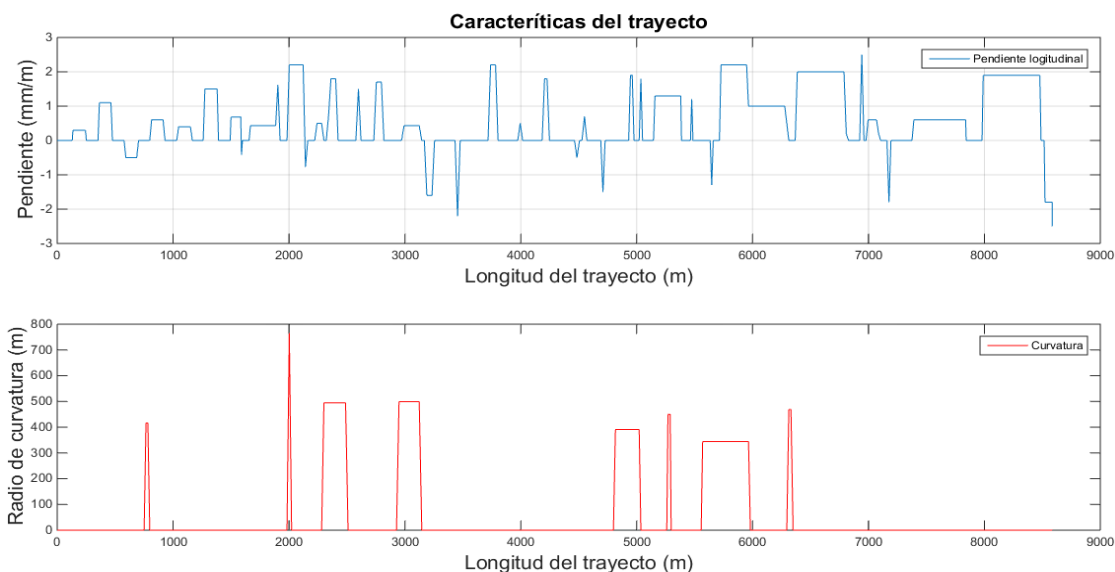


Figura 6.8. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 1 analizado (sentido Bétera-Seminari CEU). Elaboración propia.

En la tabla 6.2. es posible observar los resultados obtenidos entre estaciones, para el trayecto considerado, en ambos sentidos de circulación (en el Anejo I es posible encontrar los valores de tracción, frenado y neto para cada simulación realizada):

Línea 1 Trayecto Bétera-Seminari CEU / Seminari CEU-Bétera			
TRAYECTO	Consumo Real (kWh)	Consumo Calculado (kWh)	Error (%)
Bétera-S.Psiquiàtric	5,687	5,574	-2,00 %
S.Psiquiàtric-Masies	7,018	7,035	0,25 %
Masies-Seminari-CEU	2,779	2,782	0,12 %
<b>TOTAL</b>	<b>15,48</b>	<b>15,39</b>	<b>-0,60 %</b>
Seminari-CEU-Masies	22,209	21,370	-3,78 %
Masies- S.Psiquiàtric	21,370	22,209	3,93 %
S.Psiquiàtric-Bétera	10,409	10,425	0,15 %
<b>TOTAL</b>	<b>53,99</b>	<b>54,00</b>	<b>0,03 %</b>

Tabla 6.2. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 1. Elaboración propia.

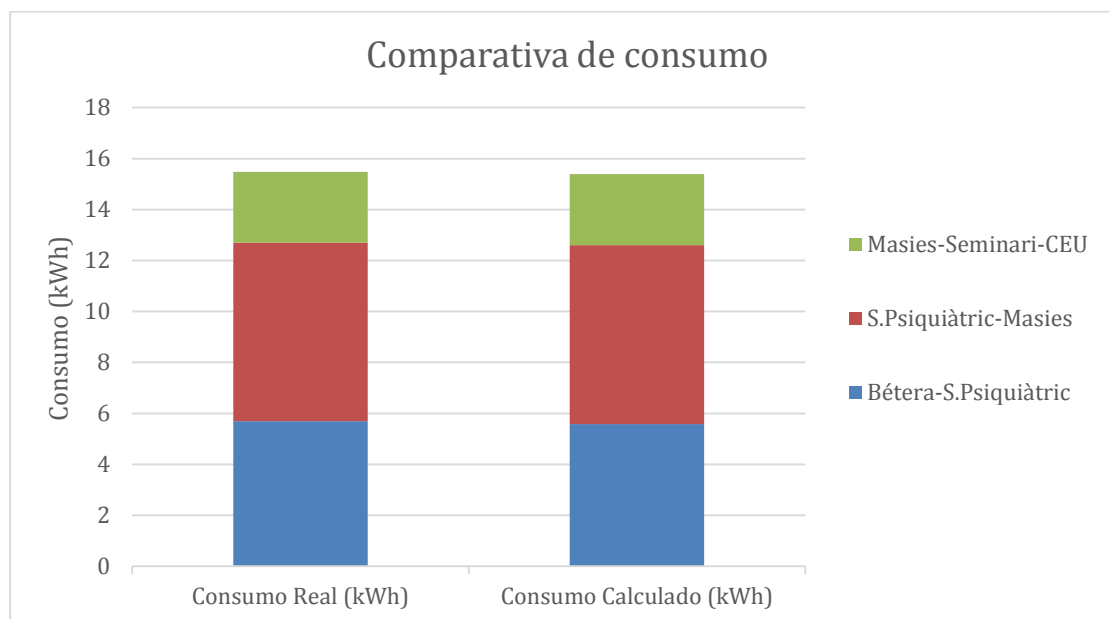


Figura 6.9. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Bétera-Seminari\_CEU. Elaboración propia.

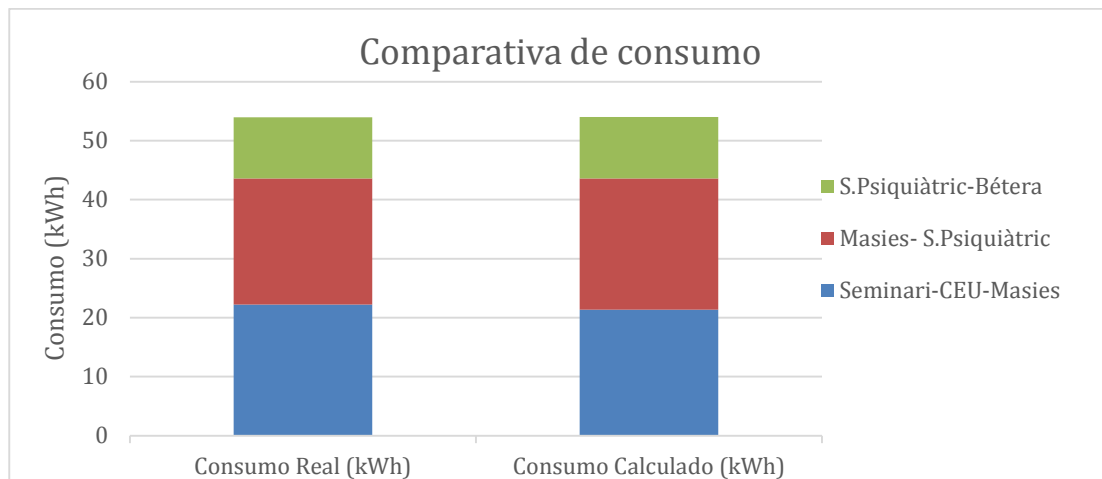


Figura 6.10. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Seminari\_CEU-Bétera. Elaboración propia.

El primer aspecto que es posible destacar es el hecho de que los valores de consumo neto obtenidos entre estaciones son bastante diferentes entre ellos. Esto hecho se debe especialmente a dos aspectos principales que son el perfil del trazado y a la distancia que existe entre estaciones.

Si se analizan los valores medidos y se comparan con los obtenidos mediante el modelo se observa un buen ajuste, pues el mayor error cometido en toda la simulación (tramo Masies-S.Psiquiàtric) es inferior al 4 %, mientras que si se considera todo el tramo se reduce hasta valores inferiores al 1 %.

En cuanto a la diferencia de consumo obtenida por sentido, es posible destacar que el modelo consigue representar con buen resultado el efecto e influencia del trazado, pues dicha diferencia se debe principalmente a que el trayecto entre Bétera y Seminari es mucho más favorable que en sentido contrario. El consumo específico por km pues obtenido en sentido Bétera-Seminari CEU es de 1,93 kWh/km, mientras que en sentido contrario el consumo alcanza el valor de 6,75 kWh/km.

A continuación es posible observar los valores medios por sentido obtenidos.

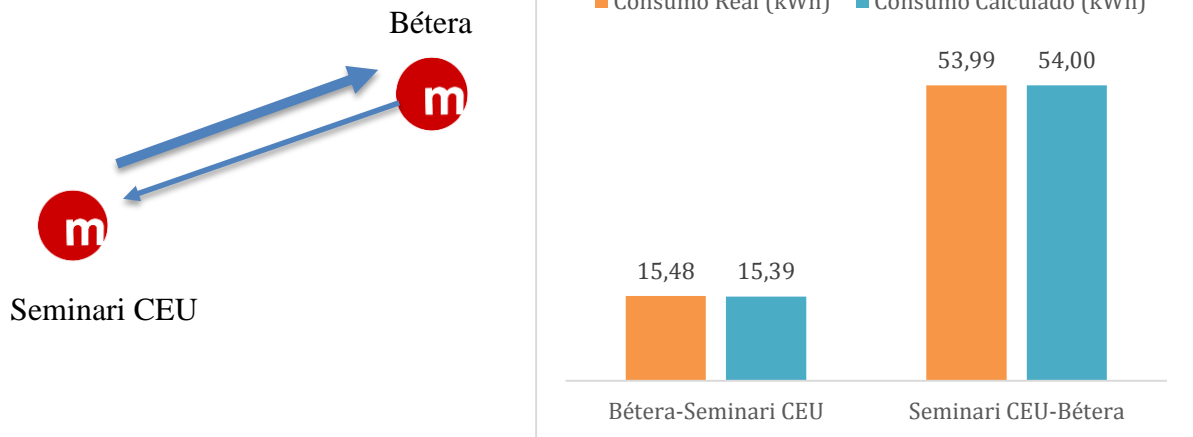


Figura 6.11. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos es posible afirmar que el modelo es capaz de reproducir de forma adecuada el comportamiento en cuanto al consumo energético para el tramo analizado. En las siguientes imágenes se observa los perfiles de velocidad obtenidos para dos de los tramos comprendidos en el tramo analizado, donde se observa un buen ajuste excepto en algunos puntos donde existe una cierta desviación.

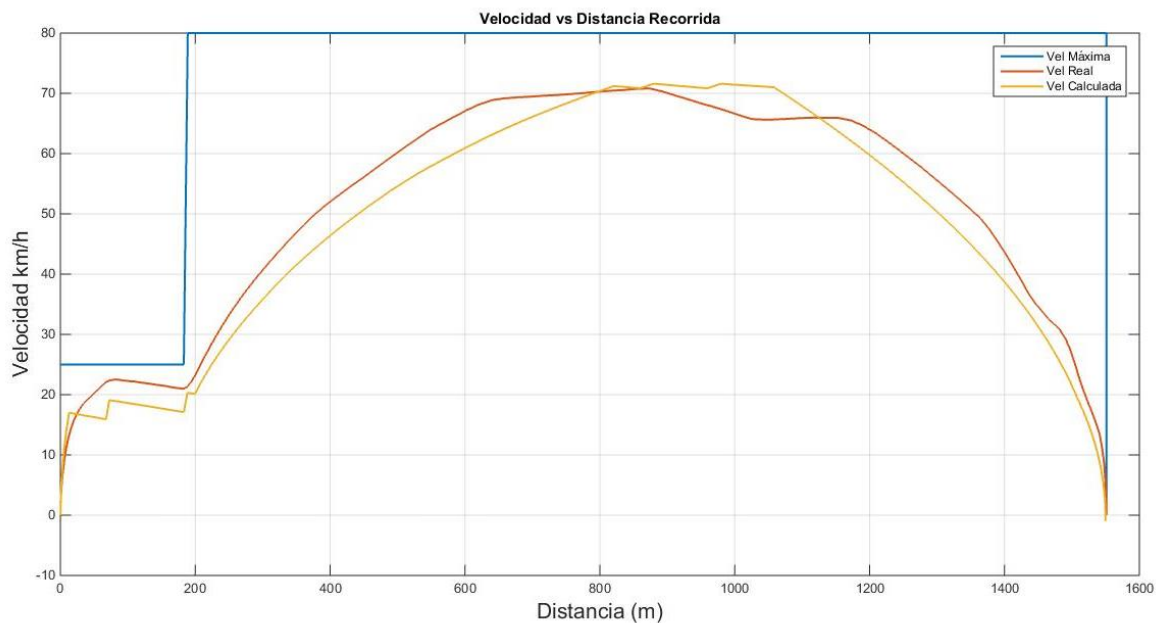


Figura 6.12. Comparativa de velocidades, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.

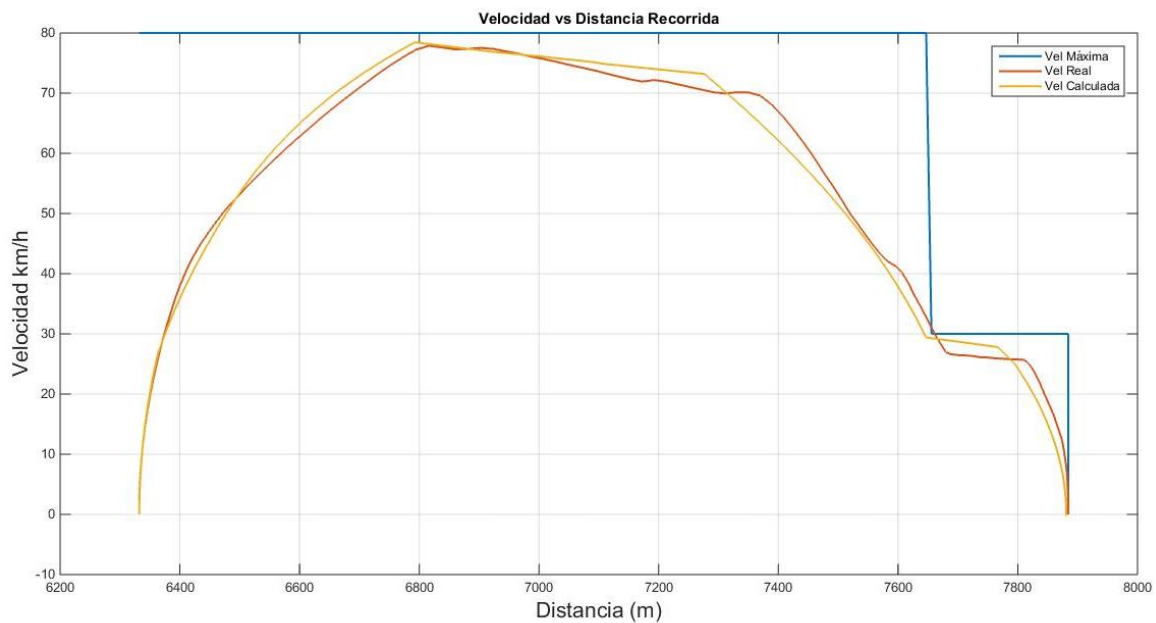


Figura 6.13. Comparativa de velocidades, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia.

## Línea 2

En el caso de la nueva línea 2 de Metrovalencia (antigua línea 1 hacia Lliria) el escenario de estudio se ha centrado en uno de los tramos de dicha línea donde se lleva a cabo la conducción manual. En el presente trabajo se ha escogido para su estudio el tramo comprendido entre las estaciones de Lliria y L'Eliana, teniendo una longitud de unos 9 km a lo largo de 6 estaciones, para el que se ha realizado la validación del modelo.

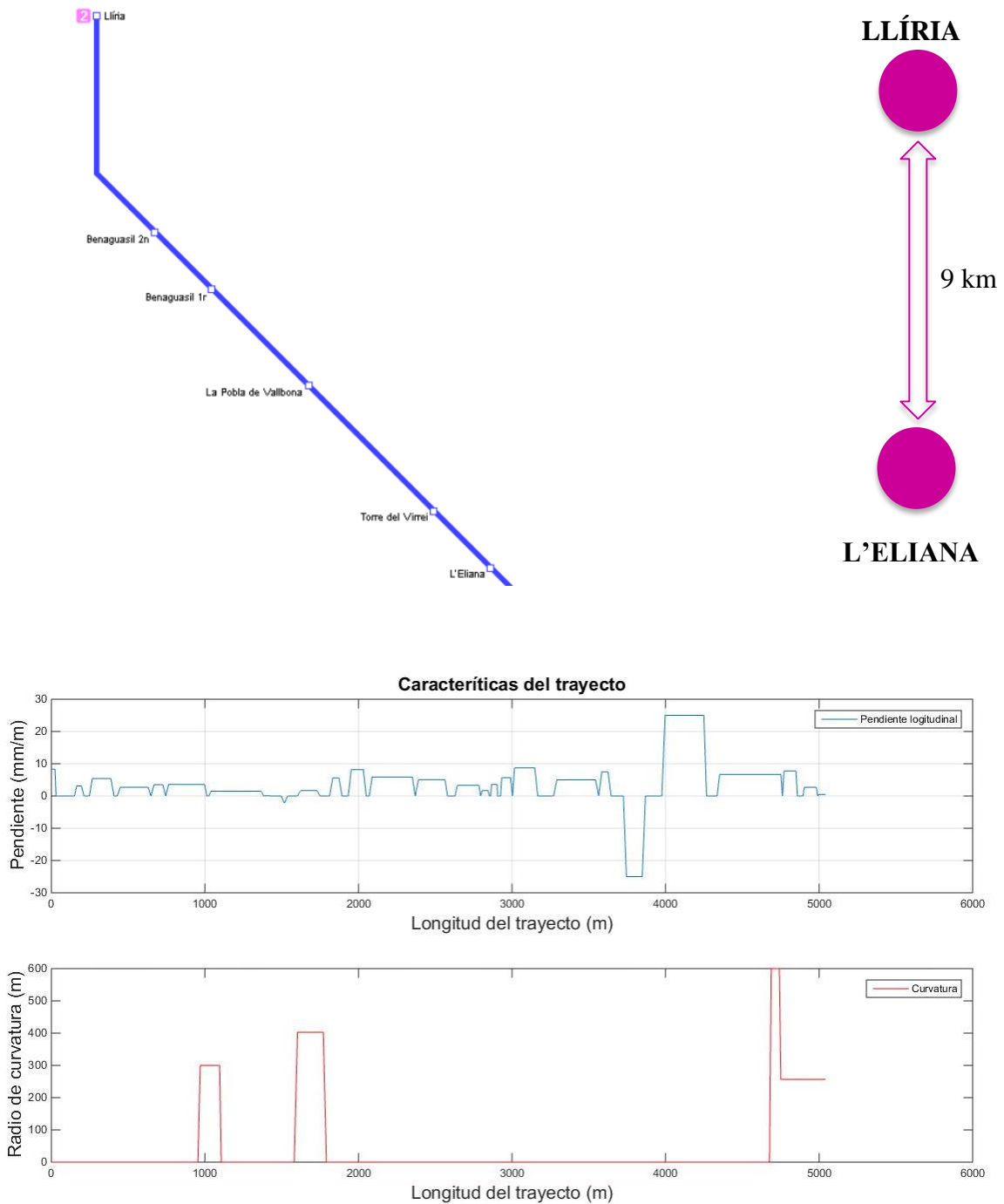


Figura 6.14. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 2 analizado, (sentido Lliria-L'Eliana). Elaboración propia.

Visto el tramo de estudio, a continuación se presentan los resultados obtenidos entre estaciones, para el trayecto considerado de la línea 2 en ambos sentidos de circulación:

Línea 2 Trayecto Llíria-L'Èliana / L'Èliana-Llíria			
TRAYECTO	Consumo Real (kWh)	Consumo Calculado (kWh)	Error (%)
Llíria-Benaguasil 2n	7,561	7,464	-1,29 %
Benaguasil 2n-Benaguasil 1r	1,064	1,042	-2,09 %
Benaguasil 1r-Pobla de Vallbona	2,347	2,432	3,63 %
Pobla de Vallbona-Torre del Virrei	5,955	6,119	2,76 %
Torre del Virrei-L'Èliana	1,015	1,028	1,26 %
<b>TOTAL</b>	<b>17,94</b>	<b>18,08</b>	<b>0,79 %</b>
L'Èliana-Torre del Virrei	1,367	1,388	1,52 %
Torre del Virrei-Pobla de Vallbona	10,995	11,155	1,45 %
Pobla de Vallbona-Benaguasil 1r	6,139	5,889	-4,07 %
Benaguasil 1r-Benaguasil 2n	2,836	2,762	-2,63 %
Benaguasil 2n-Llíria	10,181	10,076	-1,03 %
<b>TOTAL</b>	<b>31,52</b>	<b>31,27</b>	<b>-0,79 %</b>

Tabla 6.3. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 2. Elaboración propia.

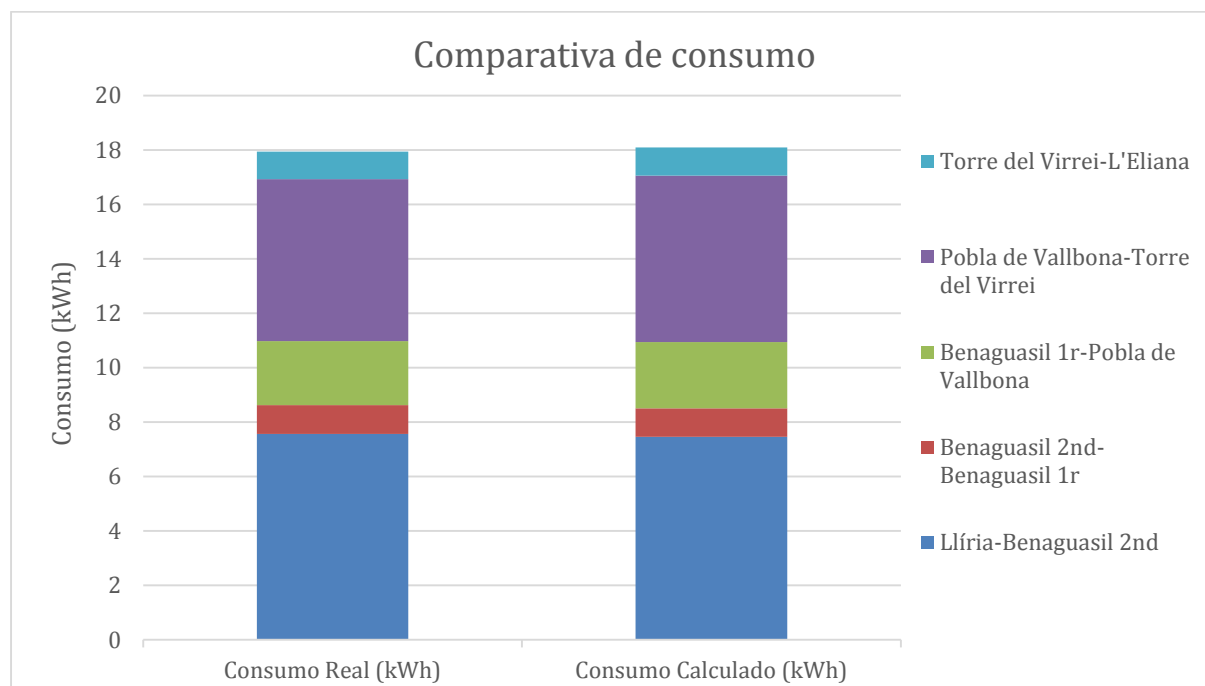


Figura 6.15. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Llíria-L'Èliana. Elaboración propia.



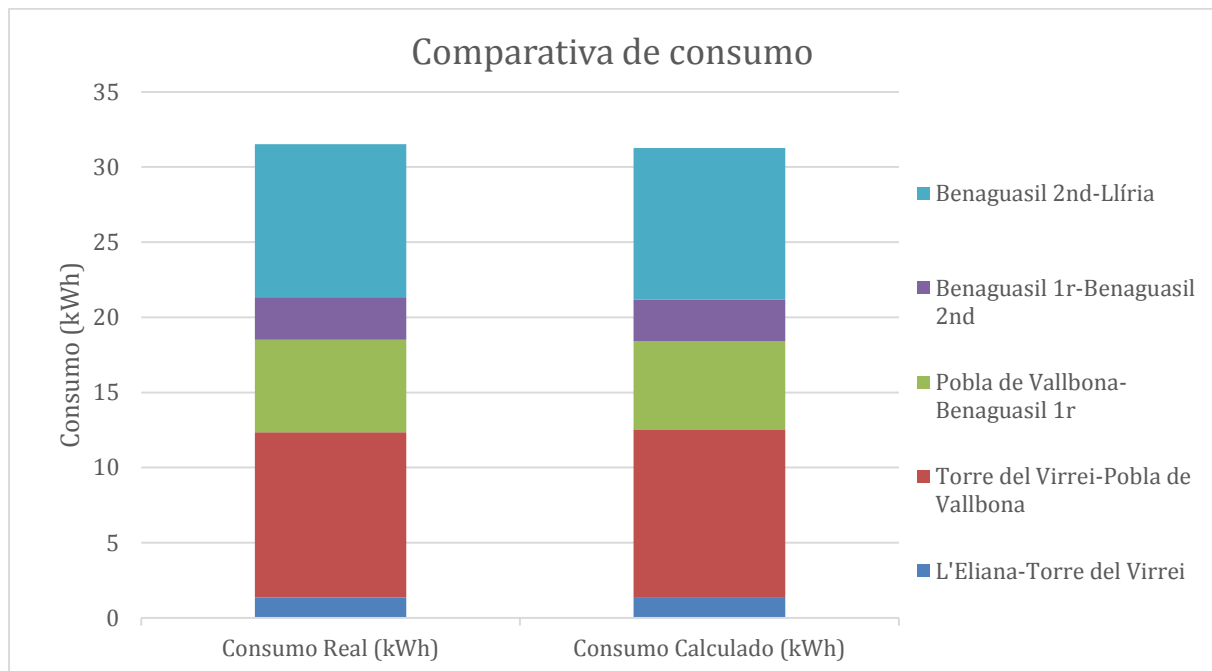


Figura 6.16. Comparativa de consumo por estaciones, tramo L'Eliaana-Llíria. Elaboración propia.

En cuanto a los valores de consumo energético obtenido para el tramo de la línea 2 analizado es posible observar que la diferencia de consumo por sentido no es tan significativa como en el caso de la línea 1, pues el perfil no es tan pronunciado y su influencia es menor. A su vez es posible destacar que los tramos donde mayor consumo se produce son los comprendidos entre Llíria-Benaguasil 2n y Pobla de Vallbona-Torre del Virrei, pues son los tramos con mayor longitud.

Considerando los valores medidos y simulados de nuevo se observa un buen ajuste, siendo el mayor error (tramo Pobla de Vallbona-Benaguasil 1r) ligeramente superior al 4 %, mientras que si se considera todo el tramo el error cometido es de 0,79 % en ambos sentidos. En cuanto al consumo específico por km obtenido, se obtiene un consumo de 1,99 kWh/km en sentido Llíria-L'Eliaana, mientras que en sentido contrario el consumo alcanza el valor de 3,5 kWh/km.



Figura 6.17. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.

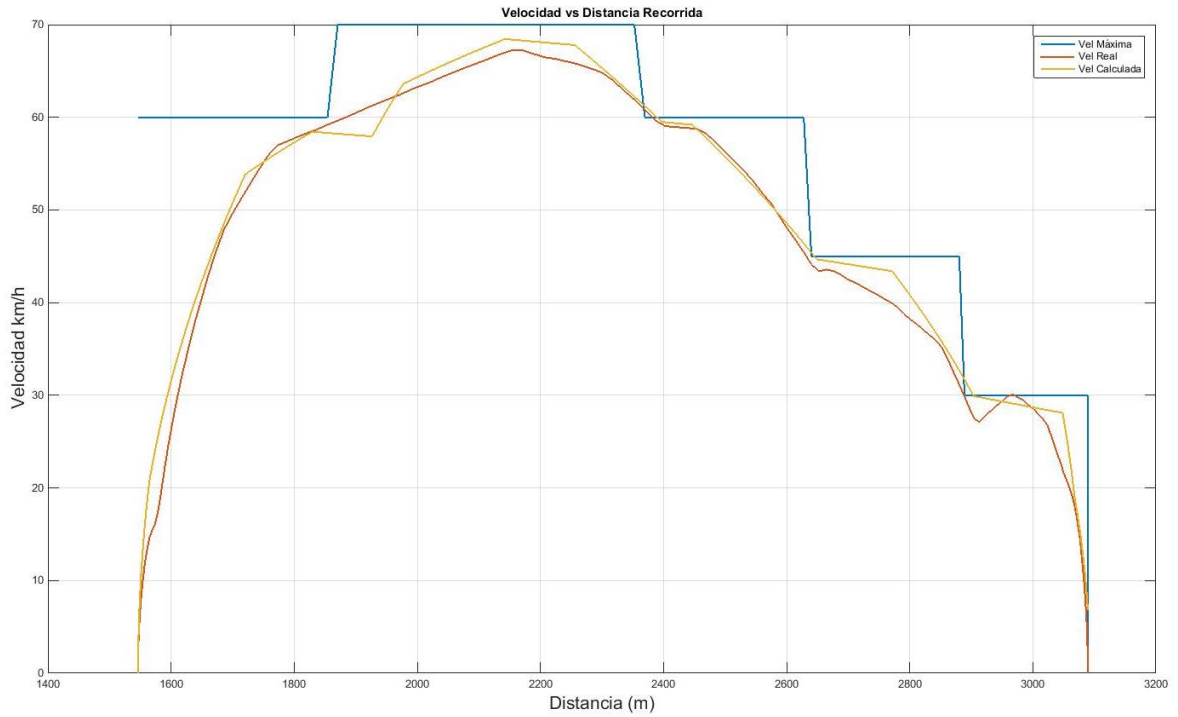


Figura 6.18. Comparativa de velocidades, tramo Benaguasil 2n-Benaguasil 1r. Elaboración propia.

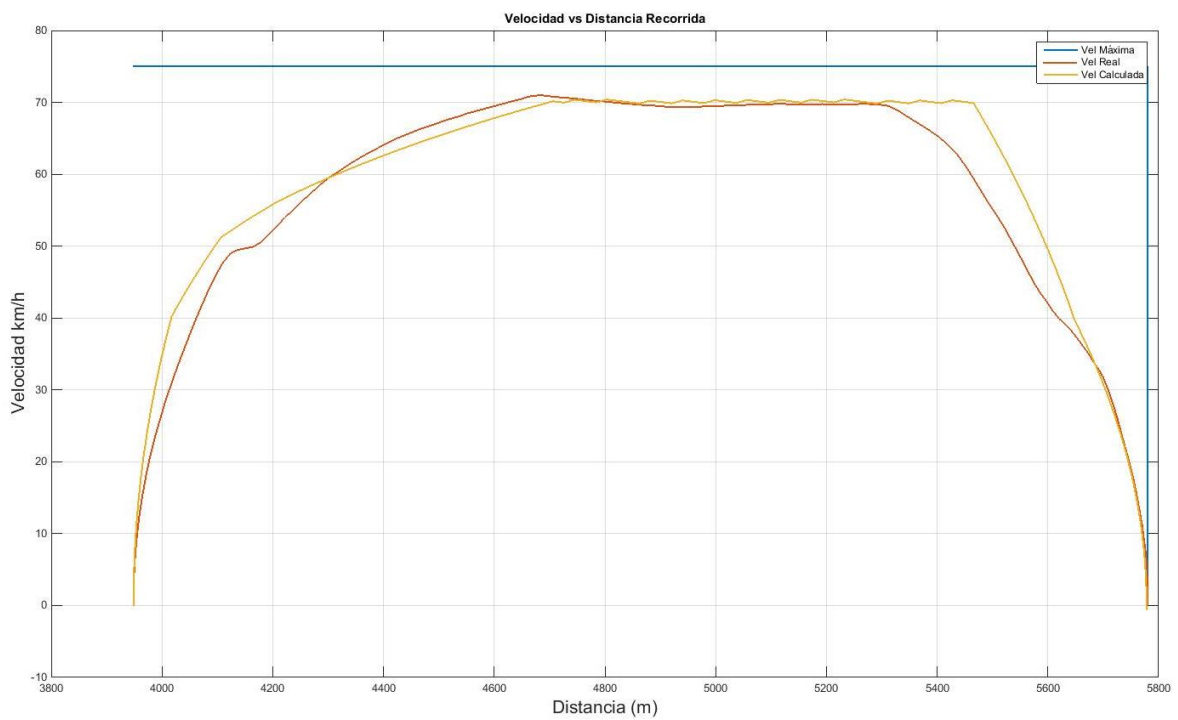
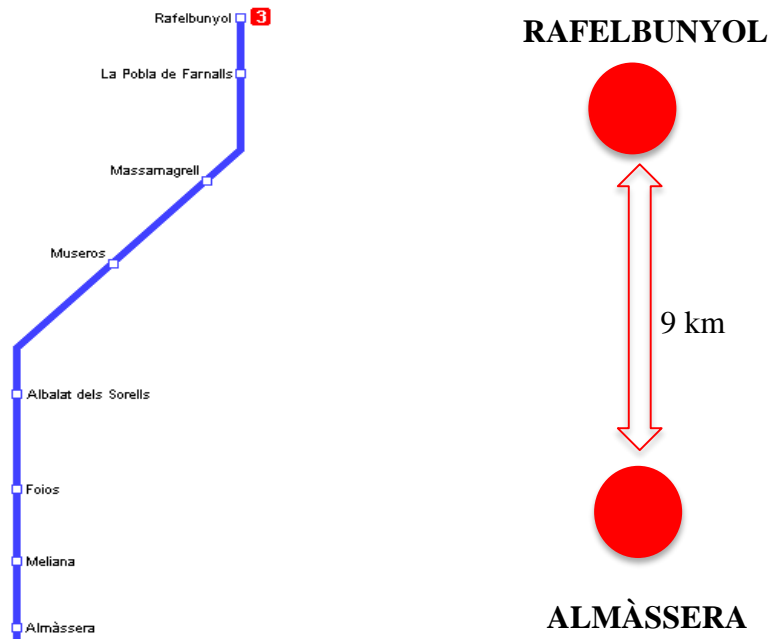


Figura 6.19. Comparativa de velocidades, tramo Pobla de Vallbona-Torre del Virrei. Elaboración propia.

### Línea 3

A lo largo de la línea 3 se conduce de forma manual entre las estaciones de Rafelbunyol y Almàssera, trayecto entre el cual existen 8 paradas, considerando en éstas las dos citadas anteriormente, con un tiempo de unos 18 minutos. En este caso se ha considerado para la validación del modelo todo el trayecto citado previamente y para el que se conduce de forma manual (el resto del trayecto de la línea 3 se conduce de forma automática mediante ATO).



Así pues, el trayecto analizado tiene una longitud de algo más de 9 km (por lo que la distancia entre estaciones es de alrededor 1 km) con una serie de curvas de radios alrededor de los 500 m y pendientes longitudinales inferiores al 10 ‰.

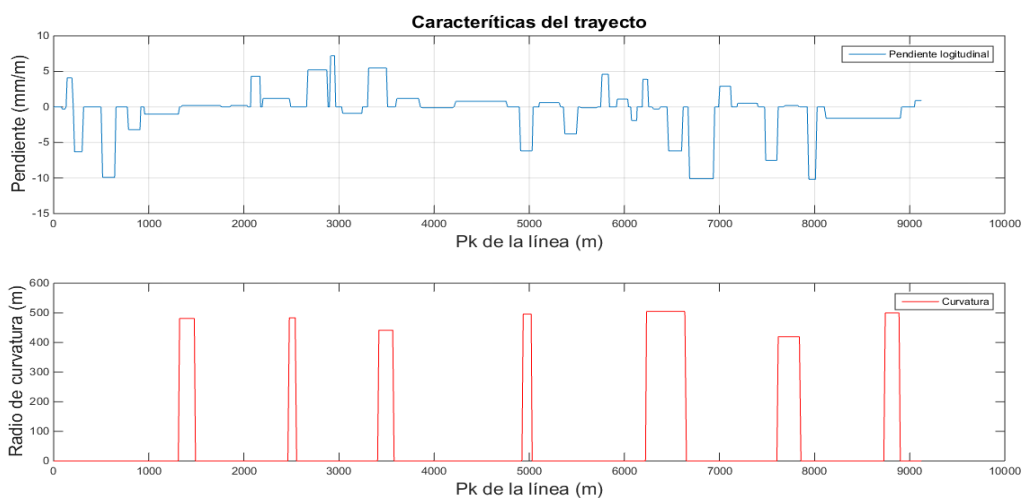


Figura 6.20. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 3 analizado (sentido Rafelbunyol-Almàssera). Elaboración propia.

A continuación pueden observarse los resultados obtenidos entre estaciones, para el trayecto considerado, tanto en un sentido como en el opuesto:

Línea 3 Trayecto Rafelbunyol-Almàssera / Almàssera-Rafelbunyol			
TRAYECTO	Consumo Real (kWh)	Consumo Calculado (kWh)	Error (%)
Rafelbunyol-La Pobla de Farnals	4,464	4,368	-2,16 %
La Pobla Farnals-Massamagrell	3,603	3,737	3,73 %
Massamagrell-Museros	6,578	6,753	2,67 %
Museros-Albalat dels Sorells	10,701	10,982	2,62 %
Albalat dels Sorells-Foios	5,775	5,743	-0,56 %
Foios-Meliana	5,647	5,896	4,42 %
Meliana-Almàssera	5,660	5,802	2,50 %
<b>TOTAL</b>	<b>42,43</b>	<b>43,28</b>	<b>2,01 %</b>
Almàssera-Meliana	10,881	10,939	0,53 %
Meliana-Foios	7,583	7,292	-3,84 %
Foios-Albalat dels Sorells	7,676	8,040	4,75 %
Albalat dels Sorells-Museros	12,822	12,968	1,14 %
Museros-Massamagrell	5,037	5,108	1,43 %
Massamagrell-La Pobla Farnals	8,530	8,236	-3,45 %
La Pobla Farnals-Rafelbunyol	9,955	9,539	-4,18 %
<b>TOTAL</b>	<b>62,48</b>	<b>62,12</b>	<b>-0,58 %</b>

Tabla 6.4. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 3. Elaboración propia.

De los resultados obtenidos puede observarse como las diferencias de consumo registradas entre estaciones son inferiores en todos los casos al 5 %, considerándose un buen ajuste. Por su parte, el error medio en cada trayecto (considerando todas las estaciones) es del 2,01 % en sentido Rafelbunyol - Almàssera y del -0,58 % para la circulación en sentido opuesto.

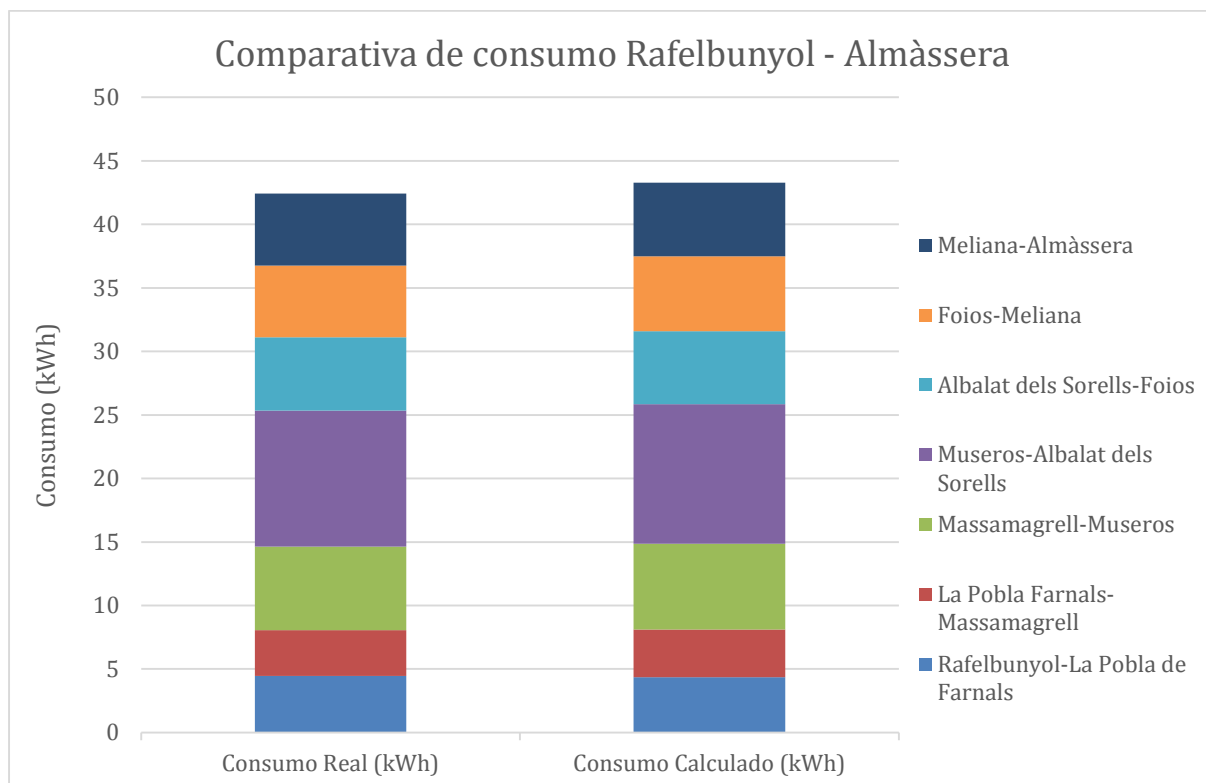


Figura 6.21. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Rafelbunyol - Almàssera. Elaboración propia.

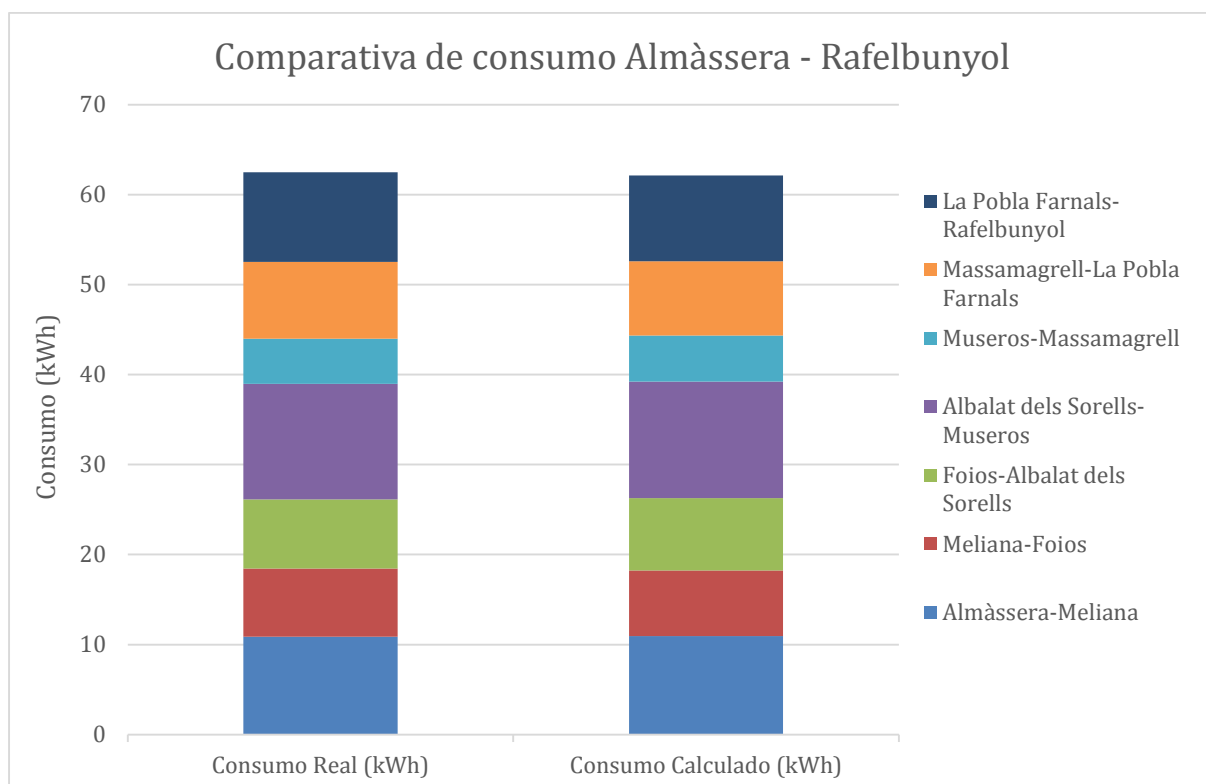


Figura 6.22. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Almàssera - Rafelbunyol. Elaboración propia.

Otro de los aspectos que es posible observar es la diferencia de consumo existente en función del sentido en que se recorra el tramo estudiado, como ocurre en casos anteriores. Esto es debido, fundamentalmente, al perfil longitudinal del trayecto, el cual es más favorable si se recorre en dirección Rafelbunyol-Almàserra que al contrario, siendo la diferencia por sentidos de un 45 %. Los consumos específicos obtenidos por km son de 4.71 kWh/km en sentido Rafelbunyol-Almàserra y de unos 6.94 kWh/km en sentido contrario.

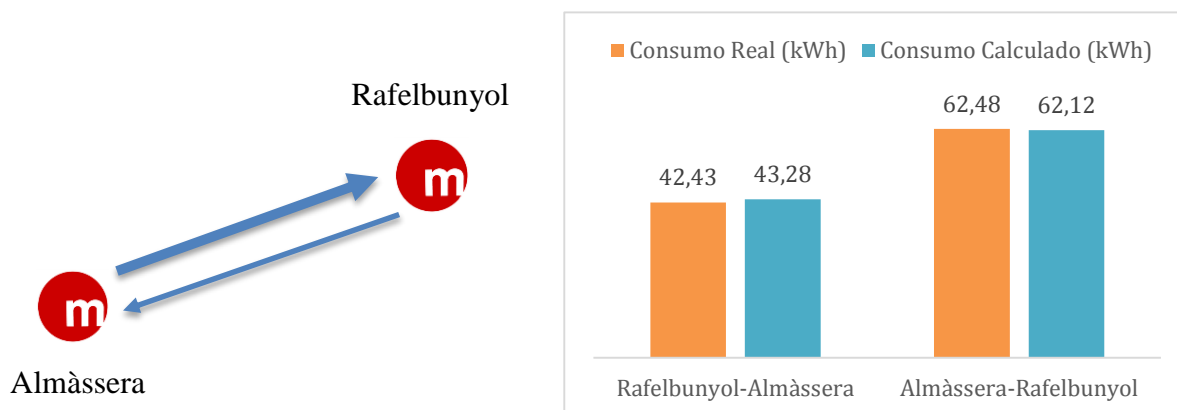


Figura 6.23. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.

A continuación se observa un ejemplo de una simulación completa de velocidades entre dos estaciones (Rafelbunyol – Pobla de Farnals) en comparación con la marcha real registrada, y para la se observa la buena aproximación que realiza el modelo.

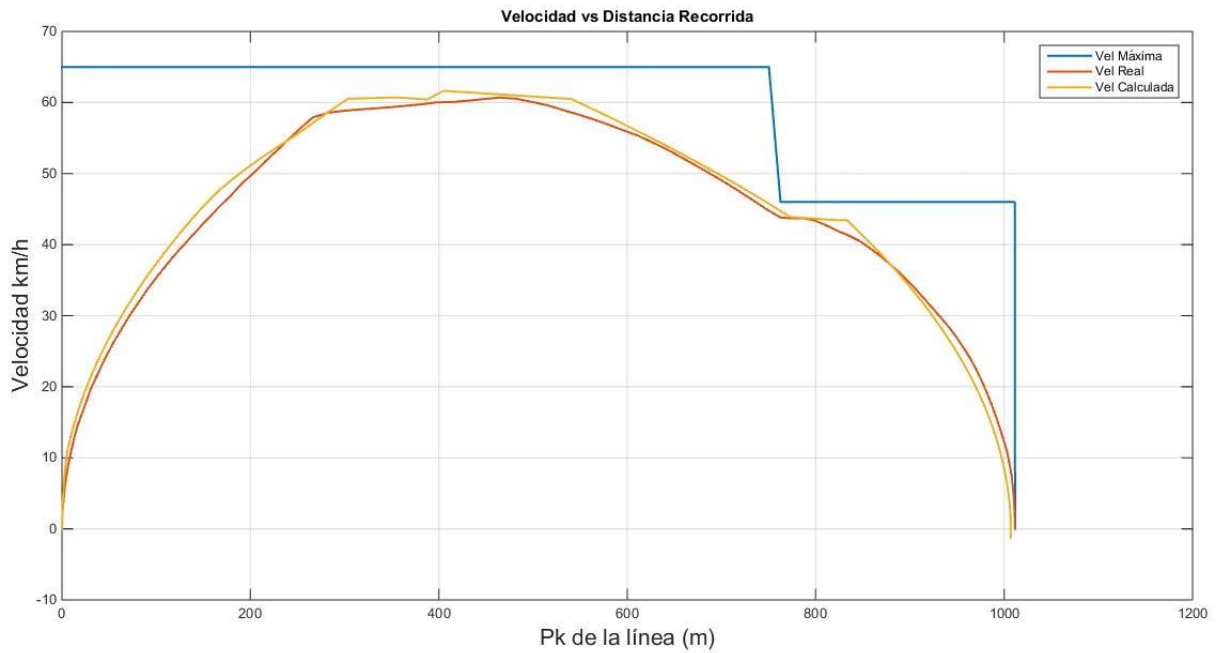


Figura 6.24. Comparativa de velocidades, tramo Rafelbunyor-Pobla de Farnals. Elaboración propia.

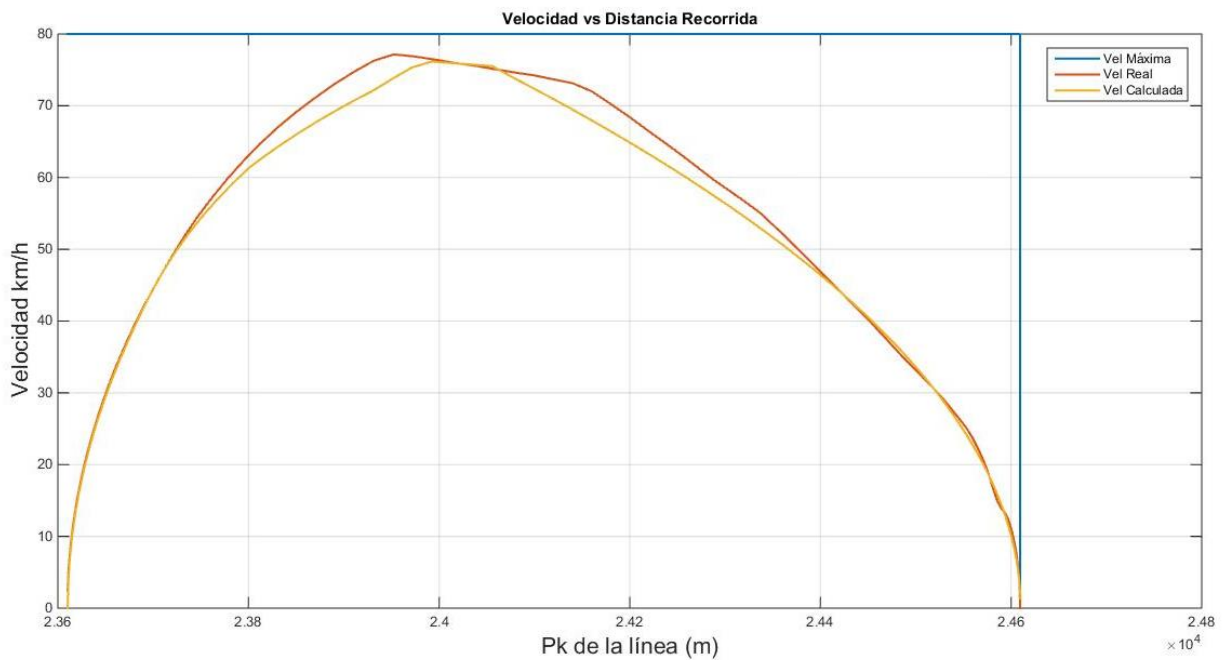
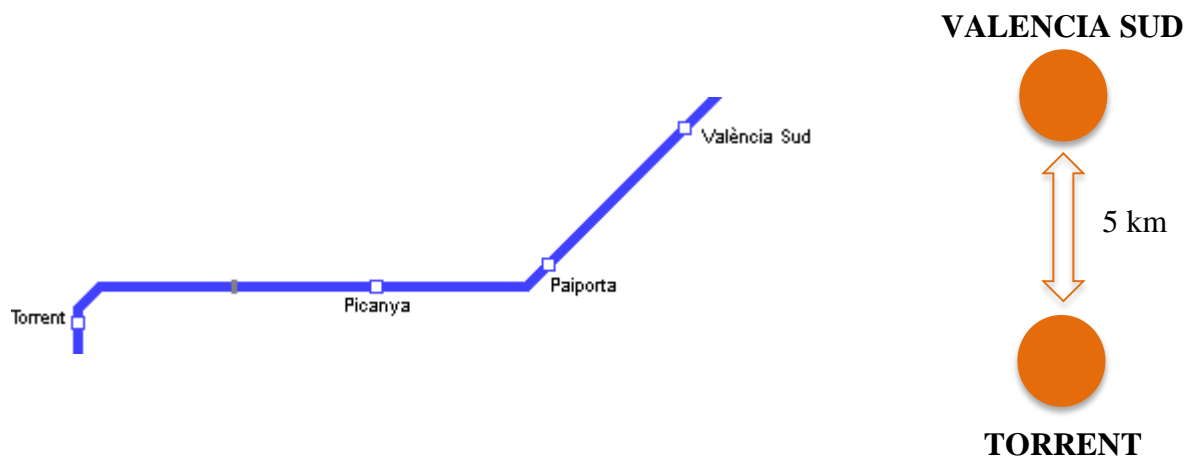


Figura 6.25. Comparativa de velocidades, tramo Pobla de Farnals-Rafelbunyor. Elaboración propia.

### Línea 7

A lo largo de la línea 7 se circula mediante conducción manual en el tramo final entre las estaciones de Valencia Sud y Torrent. En este tramo existen 4 estaciones (considerando entre ellas la de Valencia Sud y Torrent), para las cuales se emplea alrededor de 8 minutos en recorrer dicho tramo, según los horarios de explotación de FGV.



El trayecto comprendido entre las estaciones citadas anteriormente posee una longitud de unos 5 km, con un trazado que cuenta con 3 curvas principales de radios de 300 m, 400 m, 600 m aproximadamente (en sentido Valencia sud – Torrent) y pendientes longitudinales alrededor del 10 ‰ mayoritariamente positivas en sentido Val.sud-Torrent (trayecto más desfavorable en cuanto al trazado), con una rampa y una pendiente consecutivas del 25 ‰ en las inmediaciones de la estación de Paiporta.

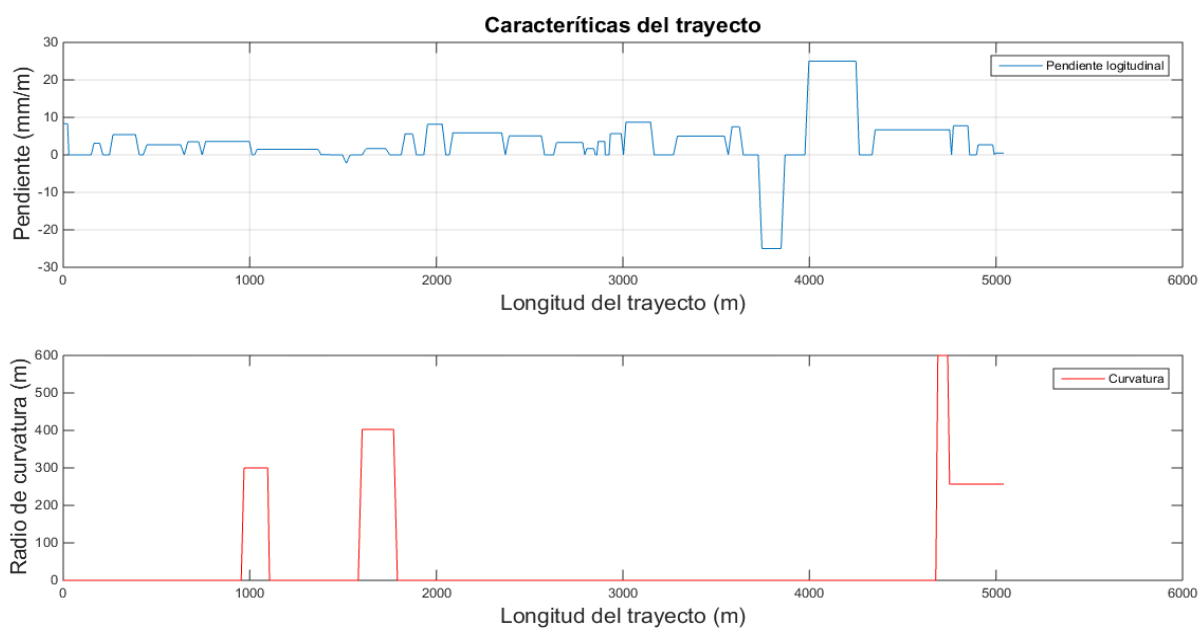


Figura 6.26. Diagrama de pendientes y curvaturas para el trayecto de la línea 7 analizado (sentido Valencia Sud-Torrent). Elaboración propia.



Como en el resto de trayectos analizados, a continuación pueden observarse los resultados obtenidos entre estaciones, en ambos sentidos de circulación:

Línea 7 Trayecto Valencia Sud-Torrent / Torrent-Valencia Sud			
TRAYECTO	Consumo Real (kWh)	Consumo Calculado (kWh)	Error (%)
Valencia Sud-Paiporta	9,155	9,496	3,72 %
Paiporta-Picanya	11,951	11,943	-0,07 %
Picanya-Torrent	10,849	11,239	3,59 %
<b>TOTAL</b>	<b>31,95</b>	<b>32,68</b>	<b>2,26 %</b>
Torrent-Picanya	6,082	6,169	1,43 %
Picanya-Paiporta	8,297	8,056	-2,91 %
Paiporta-Valencia Sud	5,631	5,701	1,24 %
<b>TOTAL</b>	<b>20,01</b>	<b>19,92</b>	<b>-0,42 %</b>

Tabla 6.5. Valores medidos y calculados entre estaciones, para la línea 7. Elaboración propia.

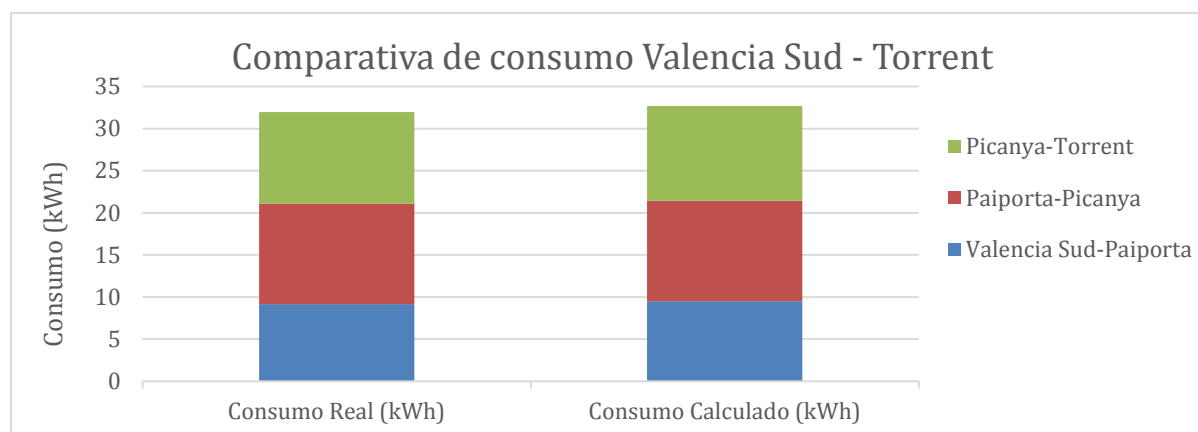


Figura 6.27. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Valencia Sud-Torrent. Elaboración propia.

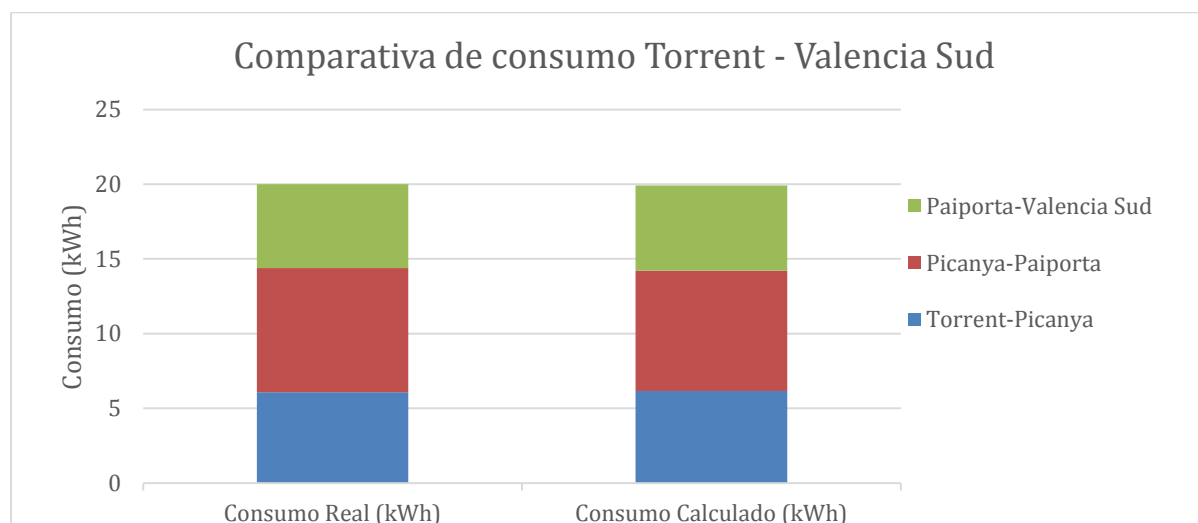


Figura 6.28. Comparativa de consumo por estaciones, tramo Torrent-Valencia Sud. Elaboración propia.

Tras los ajustes necesarios y considerando los resultados obtenidos puede decirse el modelo propuesto reproduce de forma adecuada el consumo energético, pues las máximas diferencias observadas son inferiores al 4 % (3,72 % entre Valencia Sud y Paiporta).

Es posible observar, como cabía esperar inicialmente, que tanto los consumos calculados y medidos en sentido Valencia Sud-Torrent son superiores a los que se obtienen en sentido opuesto, debido al perfil longitudinal del trayecto analizado.

Específicamente, el consumo en sentido Valencia Sud-Torrent es un 50 % superior al que se obtiene en sentido contrario (20 kWh en sentido Torrent-Valencia Sud frente a 32 kWh en sentido opuesto), por lo que se pone de manifiesto la importancia del trazado y su repercusión en el consumo energético. Si se obtienen los valores por km recorrido se tienen unos 6,39 kWh/km en sentido Valencia Sud-Torrent y unos 4 kWh/km en sentido contrario.

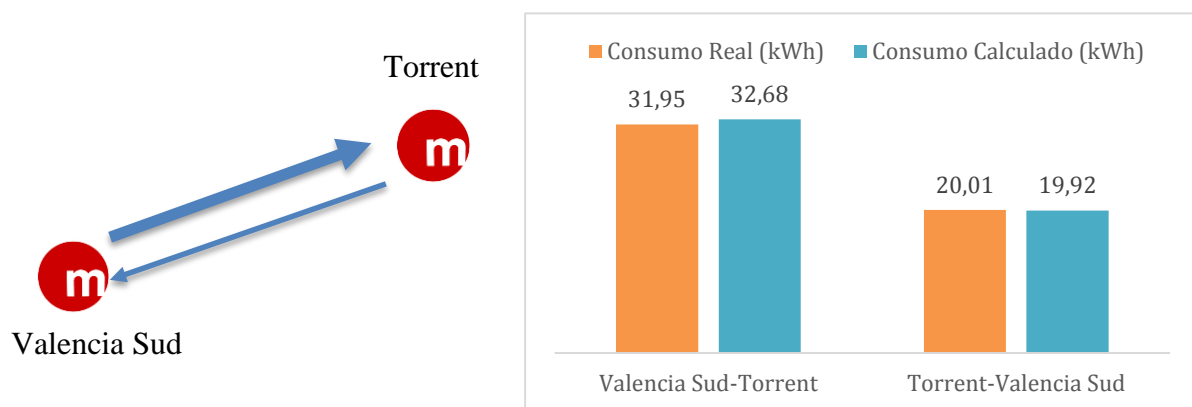


Figura 6.29. Comparativa de consumos por sentido. Elaboración propia.

Para finalizar, a continuación se observan al igual que anteriormente dos imágenes ejemplo de los resultados obtenidos en cuanto al perfil de velocidades, tanto simulado como medido, observándose un buen ajuste.

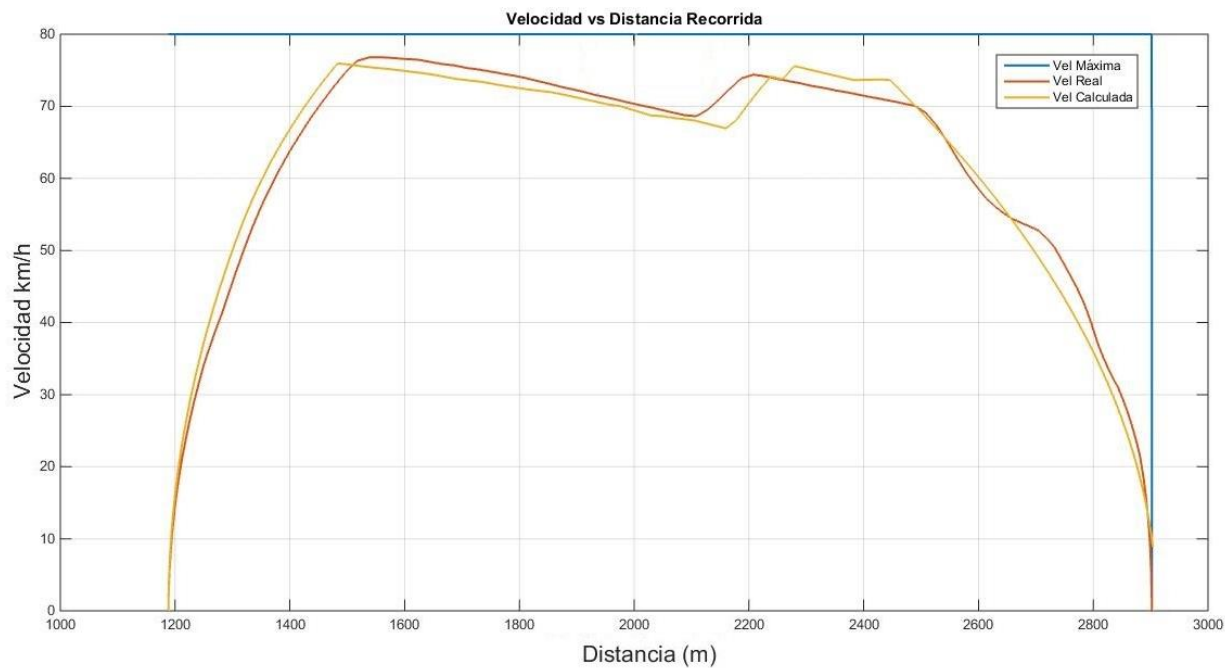


Figura 6.30. Comparativa de velocidades, tramo Paiporta-Picanya. Elaboración propia.

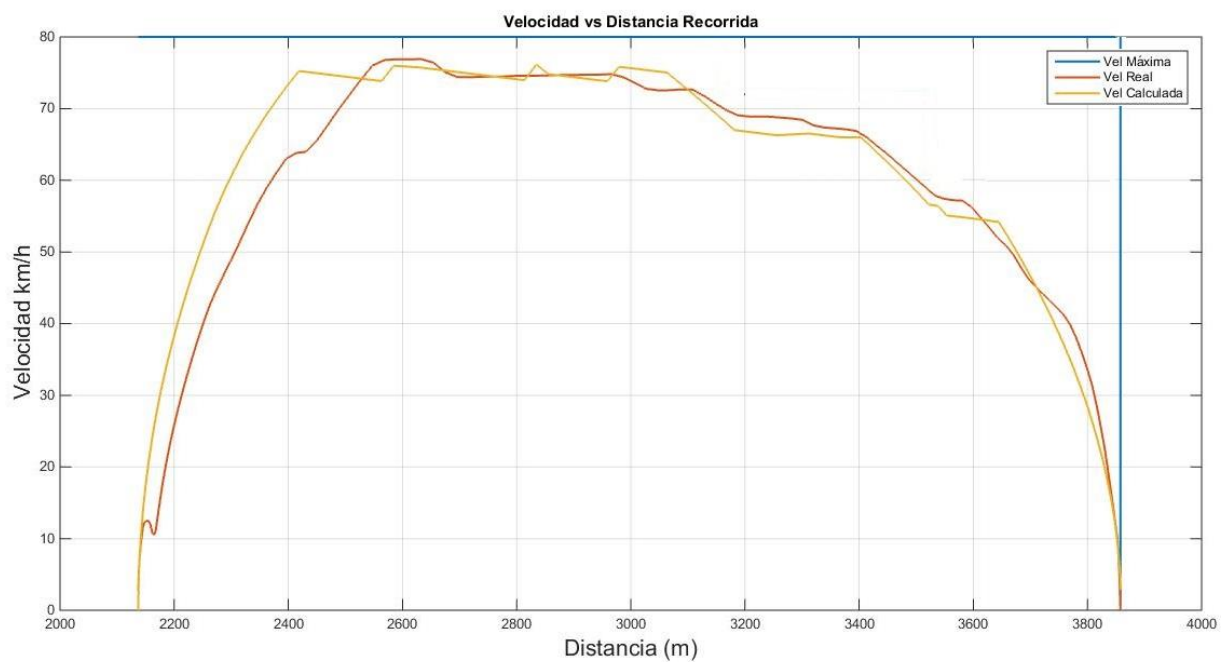


Figura 6.31. Comparativa de velocidades, tramo Picanya-Paiporta. Elaboración propia.

## 7. Simulación de escenarios y cálculo del consumo energético

---

Tras el estudio del consumo energético y de la validación del modelo de consumo se está en grado de poder utilizarlo en diferentes escenarios, pudiendo calcular el consumo asociado. El objetivo principal pues llegados a este punto es el de ser capaz de reducir el actual consumo energético registrado en las líneas de la red de Metrovalencia, sin alterar los tiempos de recorrido actuales.

Para llevar a cabo este objetivo existen múltiples aproximaciones y formas de abordar el problema planteado. Así pues, una de las estrategias más comunes para minimizar el consumo energético se basa en el uso de modelos de simulación, los cuales están basados en métodos y técnicas muy diversas. De entre los múltiples estudios realizados en los últimos años es posible destacar los trabajos realizados por Franke (Franke et al. 2000) en los que la optimización del consumo se realiza mediante un algoritmo dinámico considerando las ecuaciones del movimiento (al igual que se ha realizado en el modelo del presente trabajo). Los resultados obtenidos tienen en cuenta técnicas de deriva, obteniéndose ahorros entre el 10 % y el 30 %, si bien dicho estudio está basado en líneas de largo recorrido o de cercanías.

Por su parte, en (Liu et al 2003) se analiza y optimiza el consumo energético de forma analítica, mediante la cual se proporciona los puntos donde se debe cambiar el tipo de conducción considerando todos los parámetros que afectan al consumo (perfil de velocidades máximas, curvaturas, pendientes longitudinales, etc). Los resultados obtenidos muestran que es posible obtener reducir el consumo energético sin aumentar el tiempo de trayecto en valores que dependen principalmente de la línea estudiada.

Otro de los estudios realizados son los llevados a cabo por Bocharnikov (Bocharnikov et al. 2007), en los que se estudia la posible reducción del consumo para un trayecto simple en detrimento del tiempo de viaje, el cual aumenta para poder llevar a cabo una conducción más eficiente. Para ello se analizan los valores de aceleración y frenado a lo largo del

trayecto, así como el uso de la deriva durante ciertos tramos mediante el uso de la lógica difusa y algoritmos genéticos. Los resultados obtenidos para un trayecto de 8,5 km entre las estaciones de London Paddington y Bristol son de un potencial ahorro del 31 % en la energía de tracción con un aumento del tiempo de viaje del 12 % (o de un 10 % de ahorro con sólo un aumento del 4 % en el tiempo).

Considerando estudios más específicos en cuanto a la forma de conducción es posible destacar los trabajos desarrollados por Howlett (Howlett 2007) donde se calcula las estrategias de conducción óptima y los puntos de deriva adecuados para reducir el consumo energético en trenes Australianos, con resultados aparentemente satisfactorios.

Por su parte, en los estudios realizados por Wang (Wang et al. 2011) se analiza la trayectoria óptima bajo diferentes restricciones, considerando un tiempo máximo de viaje permitido. Para ello se considera el perfil del terreno, las curvas y las restricciones de velocidad, entre otros aspectos. El objetivo es determinar la mejor trayectoria con el menor consumo, considerando además el confort experimentado durante la marcha. Para ello se utiliza una integración lineal, donde la posición se establece como variable independiente del tiempo.

También en el año 2011 se desarrollan los trabajos de Li (Li et al. 2011) donde la reducción energética se aborda mediante la lógica difusa y se optimiza a través de un algoritmo iterativo basado en las condiciones de Karush-Kuhn-Tucker (las cuales son una generalización del método de los Multiplicadores de Lagrange).

Además de los trabajos citados, en el campo de la conducción automática existen muchas investigaciones y trabajos con el objetivo común de optimizar las consignas y marchas (la conducción automática introduce otras restricciones que los modelos de conducción manual no consideran, a priori). No obstante, en el presente trabajo se ha optado por simplificar el análisis y llevar a cabo un ajuste “manual” (evitando de esta forma la necesidad de simular todo el espacio de soluciones posibles que resulta de la combinación de todos los parámetros considerados), entendiéndose tal ajuste como la determinación de los valores más adecuados con la intervención del usuario que aplica el modelo, de tal forma que se determina el valor más adecuado cada uno de los parámetros que condicionan la marcha

del vehículo entre dos estaciones de estudio, cumpliendo siempre con las restricciones establecidas.

Así pues, para posteriores estudios en basados en este trabajo se plantea la necesidad de introducir un método de optimización numérico que permita la búsqueda de soluciones óptimas en cuanto a la energía.

## 7.1. Criterios para el diseño de marchas económicas

Las diferentes estrategias de operación utilizadas para conseguir un ahorro energético pueden clasificarse en estrategias en la planificación de servicios, en la regulación del tráfico en tiempo real y, finalmente, en la conducción económica. Si bien los dos primeros aspectos permiten mejorar y optimizar la red y la eficiencia global del servicio, en el presente trabajo se analiza una red en servicio con la premisa de mantener las condiciones de explotación y regulación actuales (horarios, frecuencias, número de servicios, etc.) por lo que únicamente se tratará el aspecto de la conducción económica. Este tipo de actuaciones consisten, de forma simplificada, en circular a velocidades inferiores a la máxima permitida, reducir los valores de aceleración y deceleración y utilizar la deriva (permitiendo circular al tren gracias a la inercia), aprovechando el perfil longitudinal del terreno para favorecer el desplazamiento con el mínimo empleo de energía y la recuperación de la mismas (hay que recordar aquí que la cantidad de energía regenerada depende de muchos factores).

A priori el uso de una conducción económica ofrece una importante ventaja en cuanto al consumo si bien hay que tener presente que generalmente este tipo de conducción supone un mayor tiempo de viaje si se compara con una conducción más tendida o agresiva, en la que generalmente se circula cercano a la velocidad máxima (respetando siempre un cierto margen de seguridad) y para la que se utiliza el freno de forma intensiva, no haciendo uso pues de la deriva.

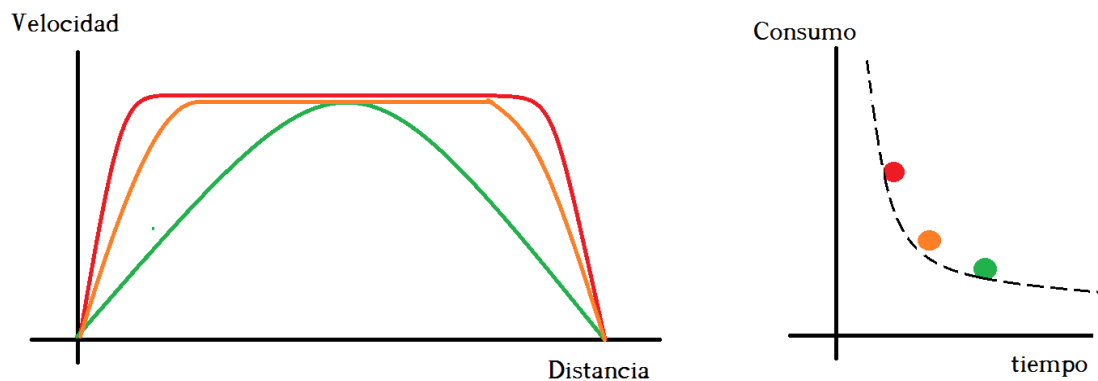


Figura 7.1. Ejemplo de consumo energético en función del tiempo de viaje. Elaboración propia.

Considerando estos aspectos, la búsqueda de soluciones energéticamente óptimas que se plantea en el presente apartado trata de encontrar aquella solución que emplea la menor cantidad de energía posible para un determinado tiempo de viaje preestablecido, cumpliendo siempre con los requisitos operativos y de confort (queda patente que si se aumenta el tiempo de viaje el consumo energético se reduce, pero se altera el servicio prestado).

Para obtener las soluciones se aplicará el modelo previamente desarrollado. Las variables de decisión a la hora de obtener un trayecto eficiente serán, por tanto, el tiempo de recorrido (el cual vendrá fijado por el servicio actual) y el consumo.

En cuanto a la determinación del tiempo de viaje, para cada caso se establecerá una ventana de trabajo (o intervalo de tiempos), en la que se considera que las soluciones obtenidas cumplen con el tiempo de viaje establecido en los horarios. Además, se considerará en el cálculo la conducción en tiempo mínimo, la cual consiste en la circulación a la máxima velocidad posible, con las máximas aceleraciones y deceleraciones, la cual será utilizada como referencia (es la que proporciona el mínimo tiempo entre dos estaciones).

## 7.2. Casos de estudio

Una ventaja más de la simulación es la posibilidad de representar en un gráfico espacio-velocidad cualquier marcha calculada. En consecuencia, el modelo se ha aplicado a diferentes tramos entre estaciones para cada una de las 4 líneas estudiadas obteniéndose una serie de resultados.

Para poder comparar de forma simplificada los valores simulados con los medidos en la campaña de medida se han elaborado una serie de gráficos tiempo-consumo en los que cada punto representa una solución del problema definida por el tiempo de viaje y su consumo energético asociado, tanto para los datos reales como para aquellos simulados mediante el modelo (véase ejemplo en Figura 7.2.).

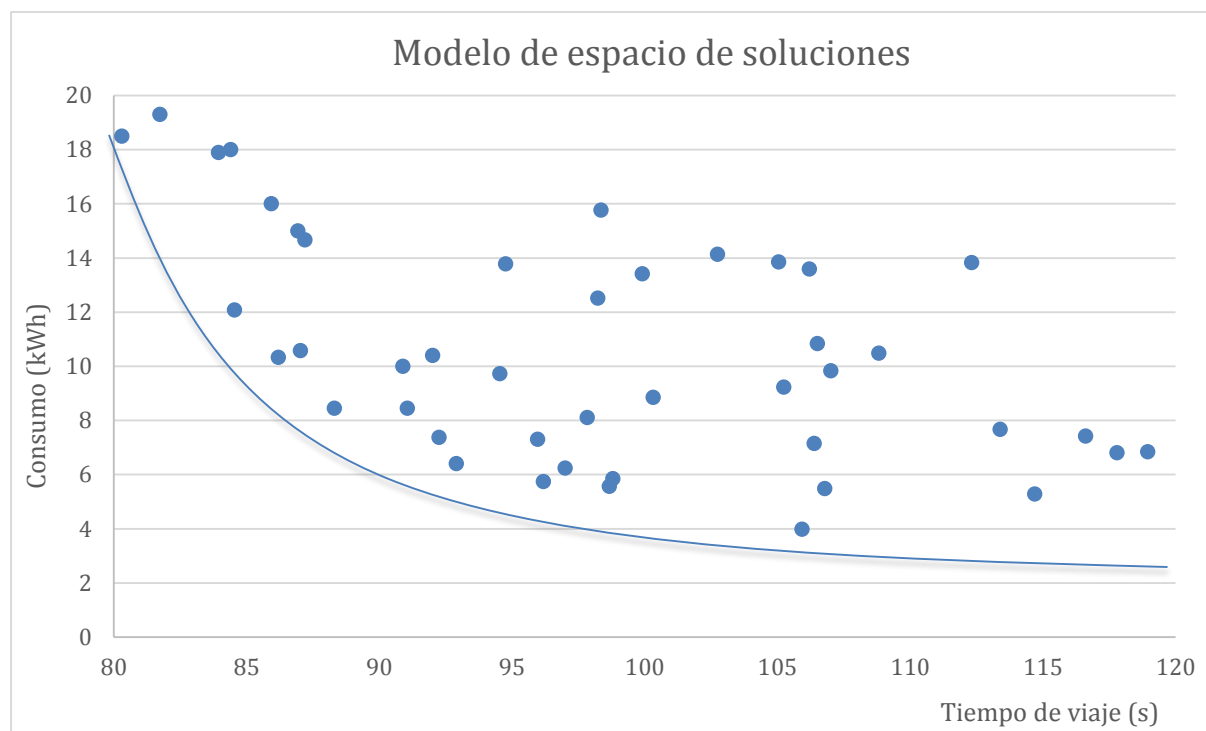


Figura 7.2. Espacio de soluciones. Elaboración propia.

Por su parte, los valores reales del consumo y del tiempo de recorrido durante el servicio normal se han obtenido gracias a los datos tomados por los equipos de registro embarcados en la unidad durante una circulación normal. De esta forma es posible comparar los datos registrados con los valores calculados. Este procedimiento permite identificar las fuentes de error durante la aplicación del modelo y modificar sólo aquellos parámetros que sean necesarios.

Cabe destacar a su vez que los valores de ahorro energético mostrados se obtienen considerando que el vehículo circula a tiempo y sin problemas de horario. Por lo tanto, el valor real de ahorro para la red en realidad es algo menor, pues todos los trenes no circulan en la realidad en su horario (debido a múltiples causas que pueden alterar el servicio).



### Tramo Bétera-S.Psiquiàtric (Línea 1)

El tramo entre Bétera y S.Psiquiàtric corresponde al tramo inicial desde la estación de cabecera de la línea 1. En la Figura 7.3. es posible analizar los resultados obtenidos en un espacio de soluciones, donde tal y como se ha citado anteriormente cada punto representa el tiempo de viaje con su correspondiente consumo asociado.

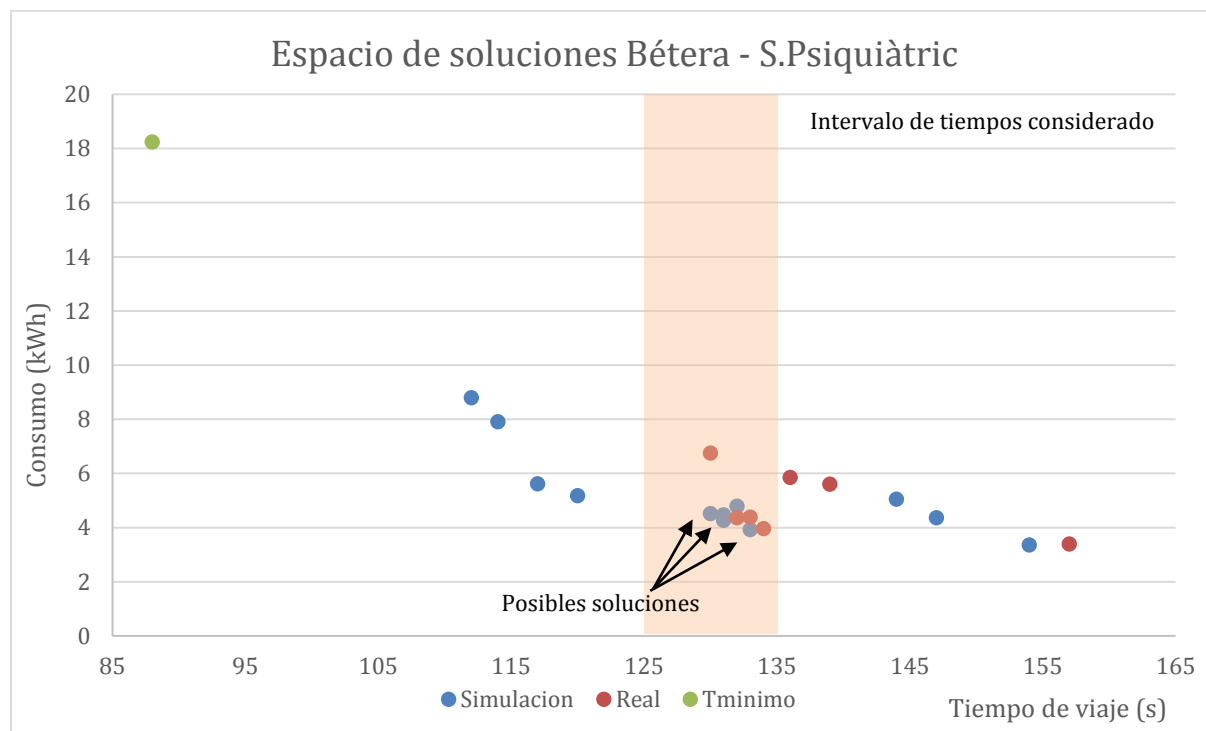


Figura 7.3. Espacio de soluciones, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.

A través de las medidas registradas y con la modificación de ciertos parámetros (curvas de aceleración, velocidades, puntos de parada y deriva, etc.) ha sido posible ajustar el modelo de consumo de energía para obtener soluciones con un menor consumo de energía. Considerando el intervalo de tiempos donde la solución cumple con los horarios y comparando los valores medidos con los calculados se consigue únicamente un 1% de ahorro, siendo los tiempos de recorrido de las soluciones obtenidas similares a los tiempos de recorrido actuales (se observa una nube de puntos muy compacta).

Este resultado muestra que para el tramo considerado existe muy poco margen de mejora en la conducción, pues ya presenta un gran ajuste en cuanto a la energía consumida, no siendo por tanto posible mejorar la situación a través de una mejor conducción. En la Figura 7.4. se observa la comparativa entre los perfiles de velocidades medidas y calculadas (para

un mismo tiempo de viaje), donde puede observarse que no existe un gran cambio en la forma y valores de ambas curvas, resultando un consumo similar.

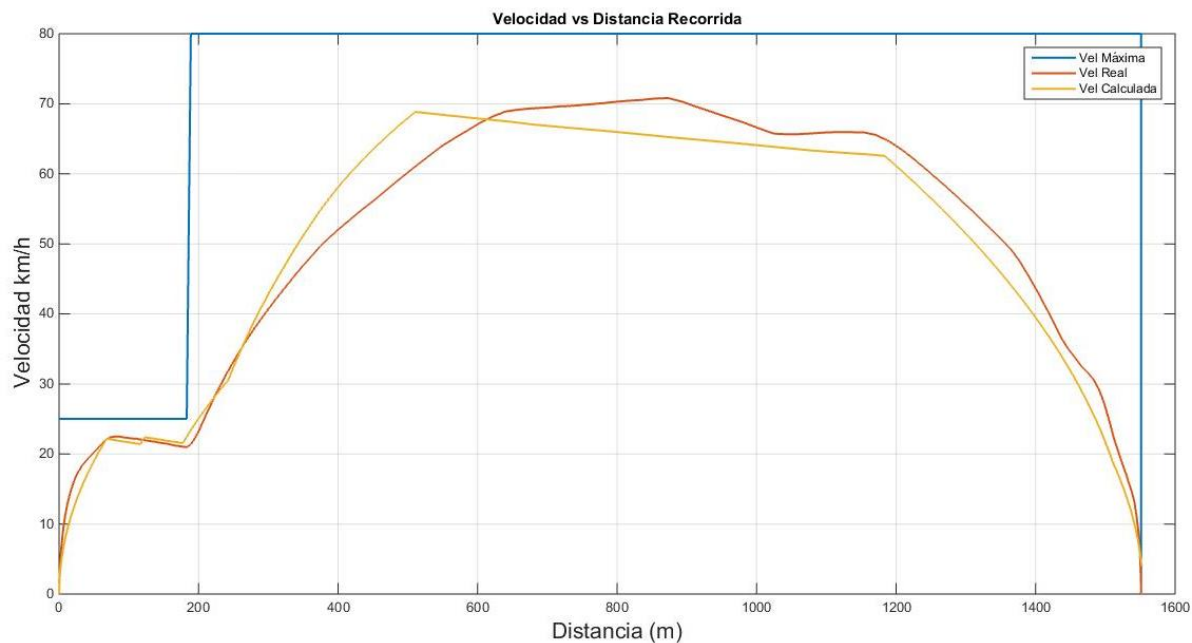


Figura 7.4. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.

### Tramo S.Psiquiàtric-Bétera (Línea 1)

El tramo analizado en este caso es el mismo que para el caso anterior, pero esta vez recorrido en sentido opuesto. A diferencia del caso anterior, donde el ahorro conseguido es prácticamente inexistente, en este caso puede observarse como los ajustes realizados consiguen obtener soluciones mucho más eficientes. Estas soluciones se manifiestan en el desplazamiento de la nube de puntos hacia la parte inferior en el eje de ordenadas por el hecho de considerar la conducción económica y permitir reducir el consumo energético.

Las soluciones obtenidas se observan en la Figura 7.5.

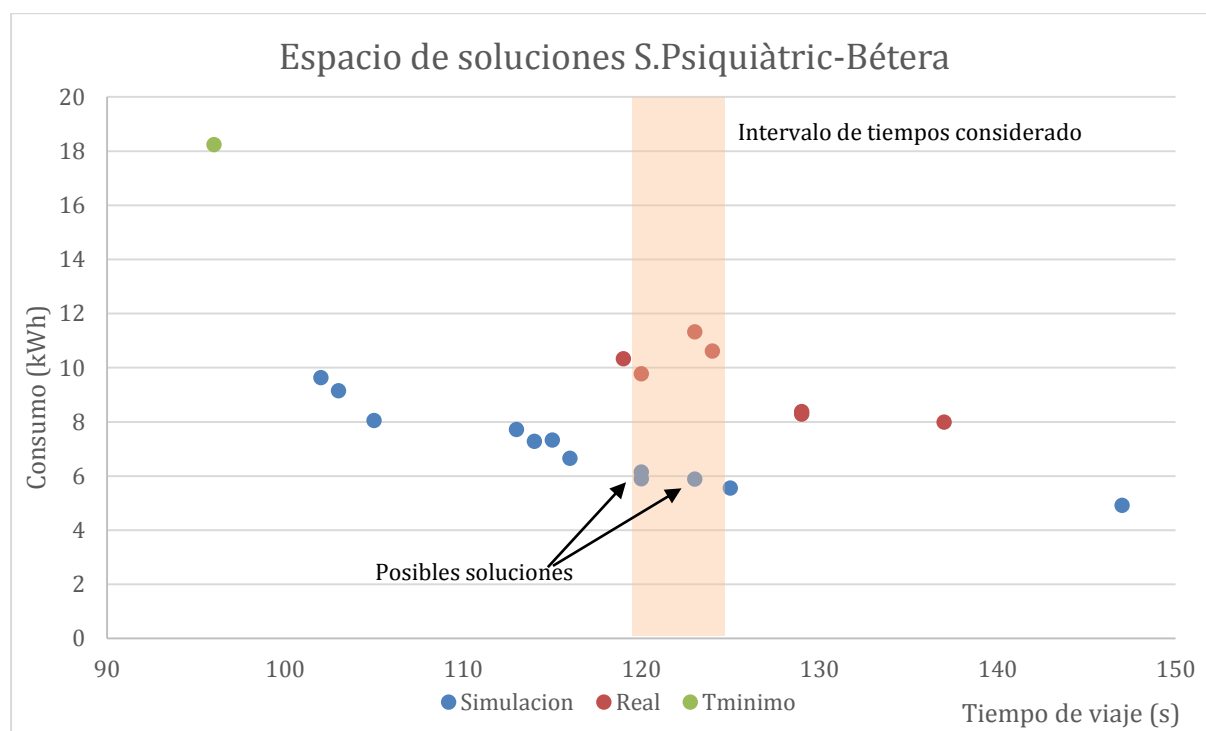


Figura 7.5. Espacio de soluciones, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia.

En este caso, el posible ahorro (para valores de tiempo entre los 120 s y los 125 s) llega a valores de hasta el 42 %, siendo un valor bastante considerable. Además, se observa como los valores medidos se encuentra muy por encima de las soluciones obtenidas, por lo que es posible afirmar que existe un potencial importante de ahorro energético para dicho tramo.

En la Figura 7.6 se muestra un ejemplo comparativo, como en el caso anterior, de los perfiles de velocidad real y simulado, donde se aprecia la deriva y la curva de frenado aplicada.

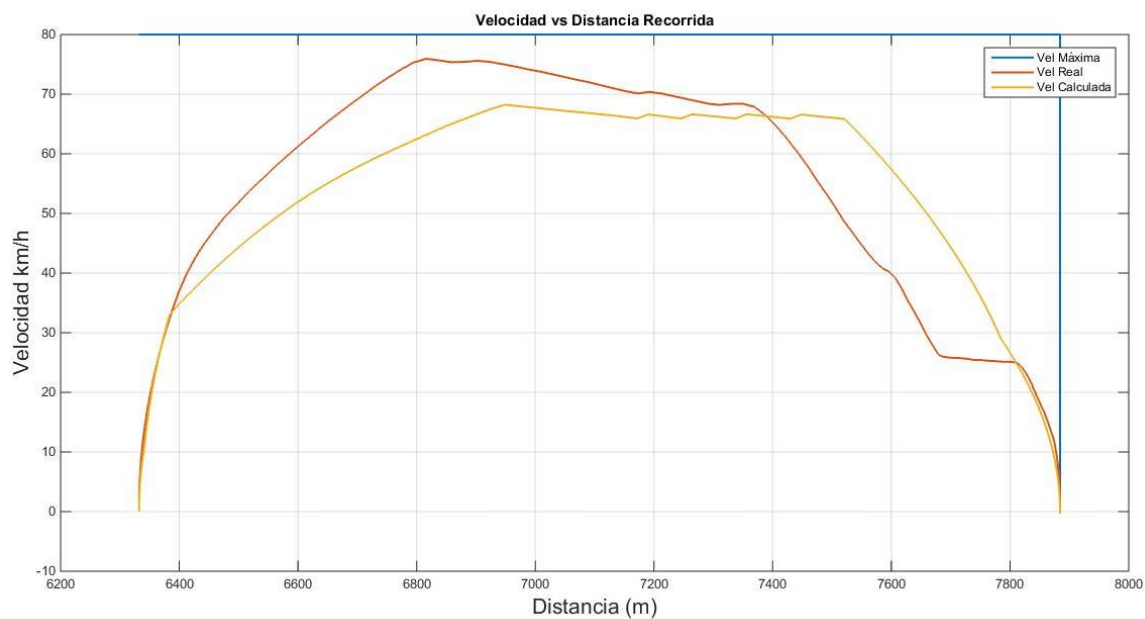


Figura 7.6. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia.

### Tramo Lliria-Benaguasil 2n (Línea 2)

Al igual que para la línea 1, el tramo entre las estaciones analizadas corresponde al tramo de inicial partiendo desde la estación de cabecera de Lliria. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 7.7.

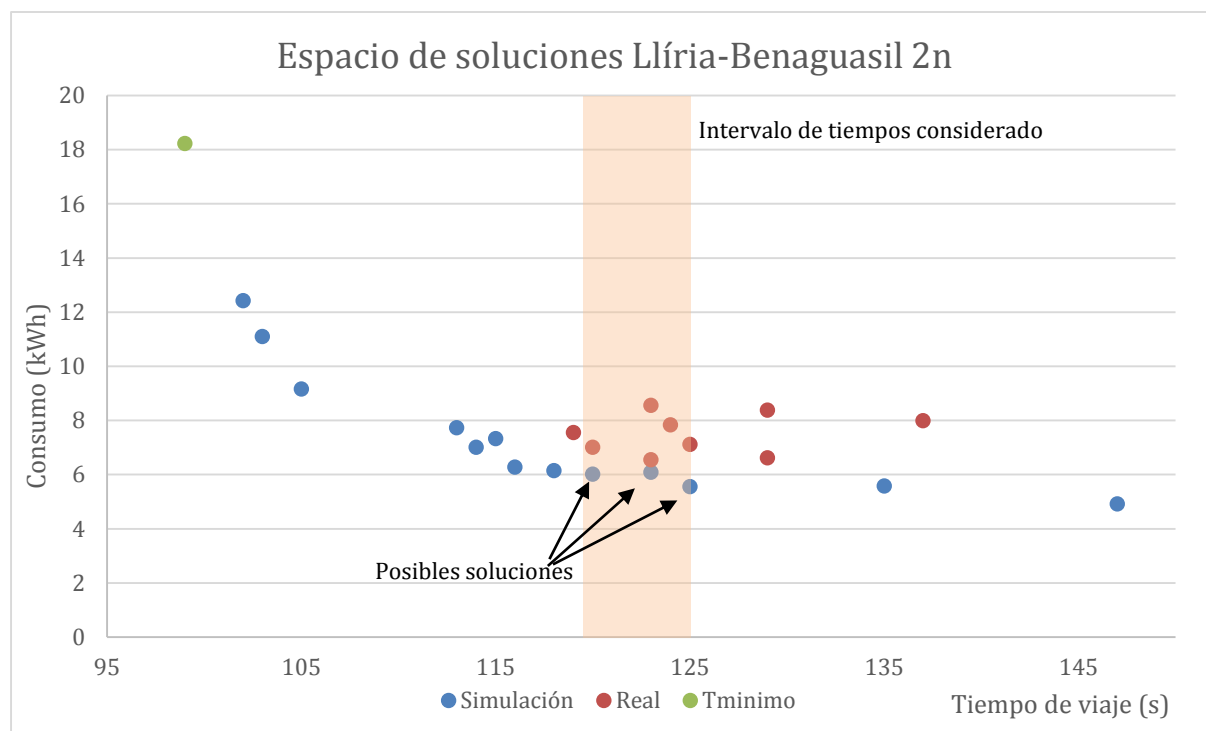


Figura 7.7. Espacio de soluciones, tramo Lliria-Benaguasil 2n. Elaboración propia.

Analizando los resultados es posible observar como el modelo es capaz de proporcionar soluciones algo más eficientes que las medidas. Concretamente para el intervalo considerado (entre los 120 s y los 125 s) y respecto a los valores medidos los resultados muestra potencial de ahorro del 15 %.

Si bien dicho valor no es tan elevado como en el caso anterior, sigue siendo un valor más que razonable para que se pueda llevar a cabo ajustes e incentivos para que sean aplicadas mejoras en la conducción. En la Figura 7.8. se observa la comparativa de perfiles real y simulado, donde se puede analizar la diferencia entre los perfiles de velocidad obtenidos y los medidos.

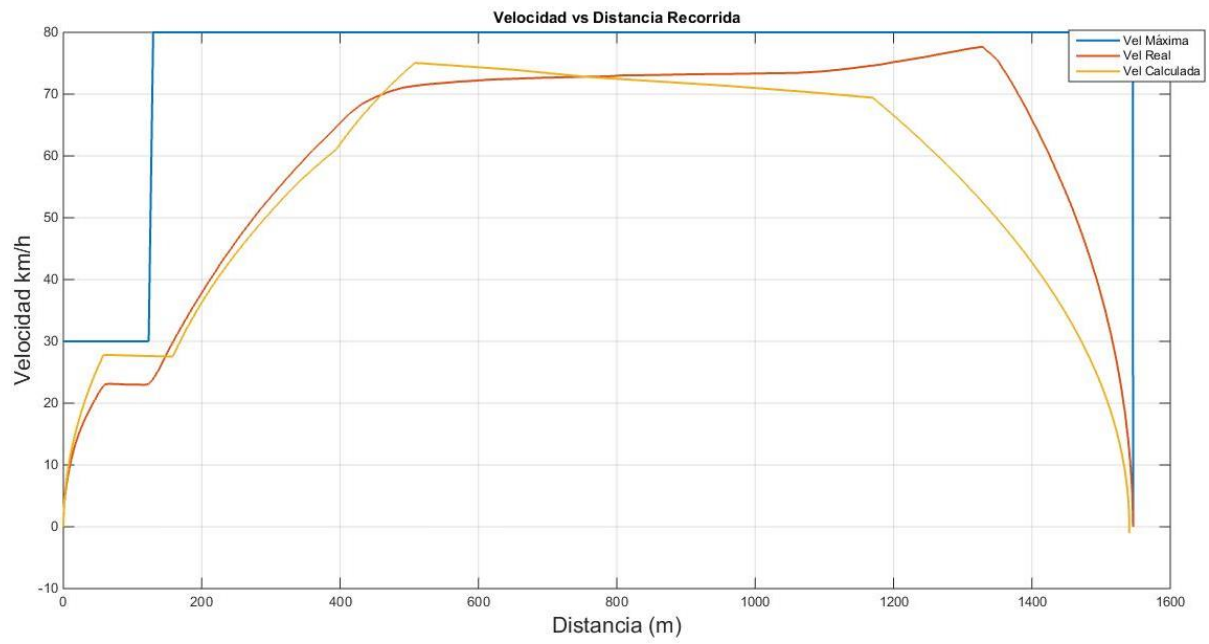


Figura 7.8. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Llíria-Benaguasil 2n. Elaboración propia.

### Tramo Benaguasil 2n-Llíria (Línea 2)

En este caso el tramo analizado es el mismo que en el apartado anterior, cuando es recorrido en sentido contrario al anterior. Los resultados se muestran en la Figura 7.9.

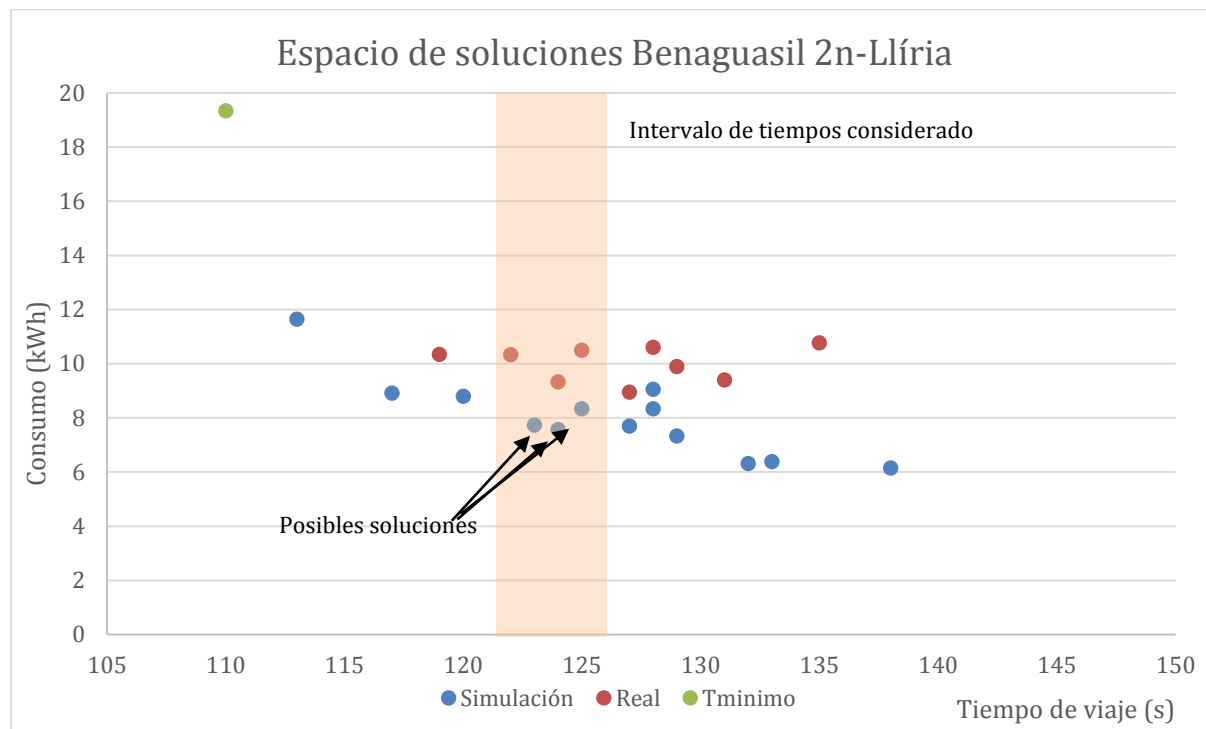


Figura 7.9. Espacio de soluciones, tramo Benaguasil 2n-Llíria. Elaboración propia.

A la vista de los resultados obtenidos, se observa que los valores obtenidos mediante el modelo permiten obtener de nuevo soluciones más eficientes que aquellas medidas. Así pues, para el intervalo de estudio (entre los 122 s y los 127 s) el ahorro alcanza a llegar al 21 %.

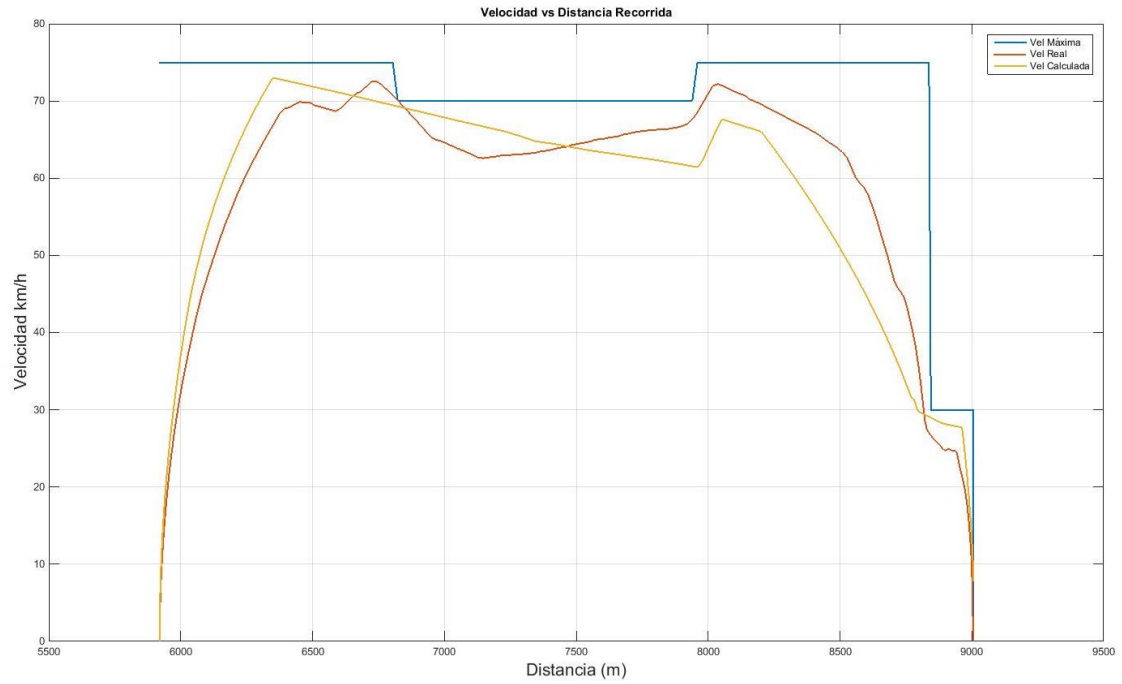


Figura 7.10. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Benaguasil 2n-Llíria. Elaboración propia.



### Tramo Pobla de Farnals-Massamagrell (Línea 3)

En cuanto a la línea 3, a continuación pueden observarse en la Figura 7.11 el espacio de soluciones obtenido para el tramo considerado y su consumo asociado.

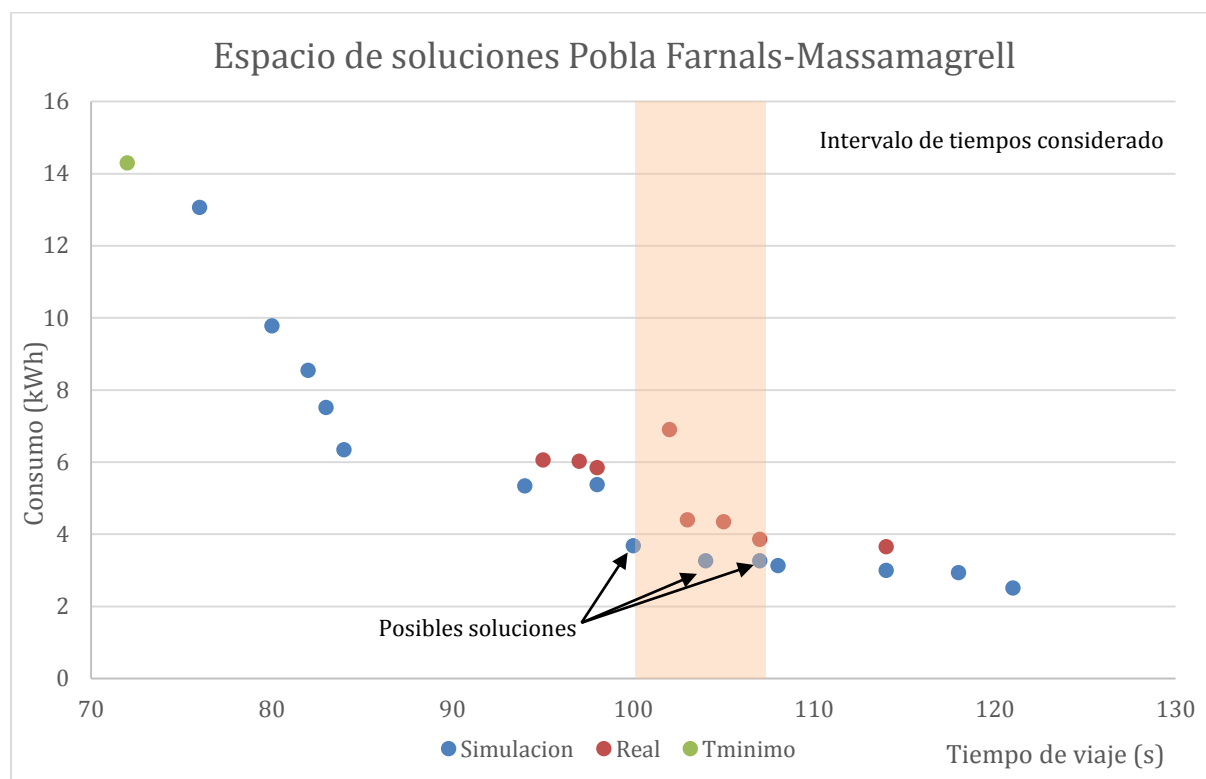


Figura 7.11. Espacio de soluciones, tramo Pobla de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia.

En este caso, se ha considerado como soluciones óptimas las situadas en el arco temporal entre los 100 s y 107 s, localizándose la totalidad de las soluciones encontradas siempre por debajo de los valores medidos, con el consiguiente ahorro que ello supone. Para dicho tiempo es posible determinar que el porcentaje medio de ahorro medio conseguido es del orden del 19 %.

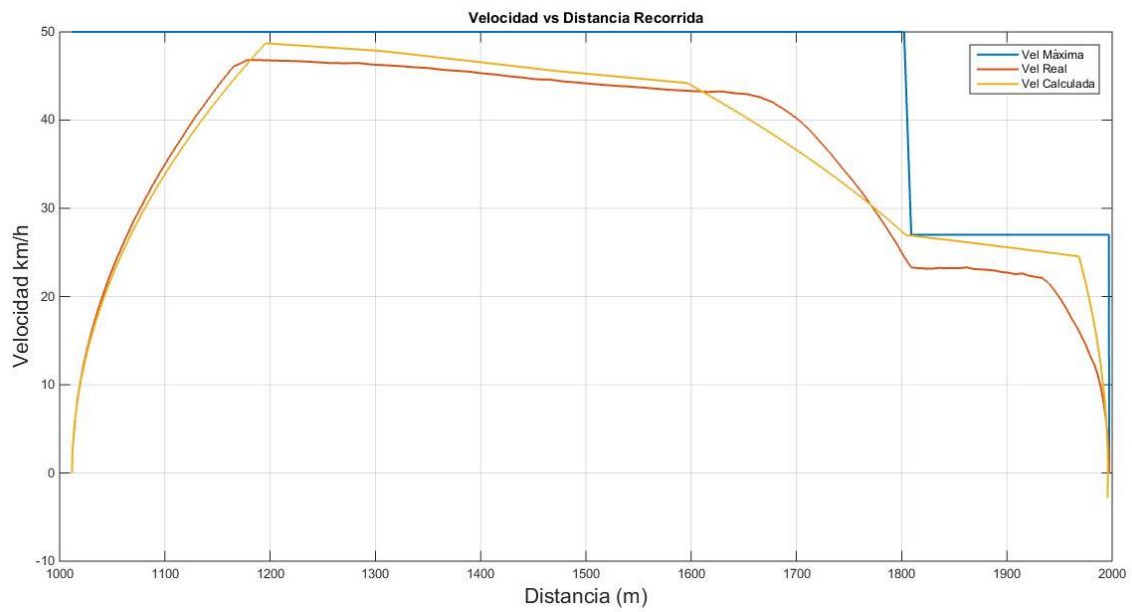


Figura 7.12. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Poble de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia.

### Tramo Foios-Meliana (Línea 3)

Al igual que en los apartados anteriores, en la Figura 7.13. se muestran los resultados obtenidos para el tramo considerado.

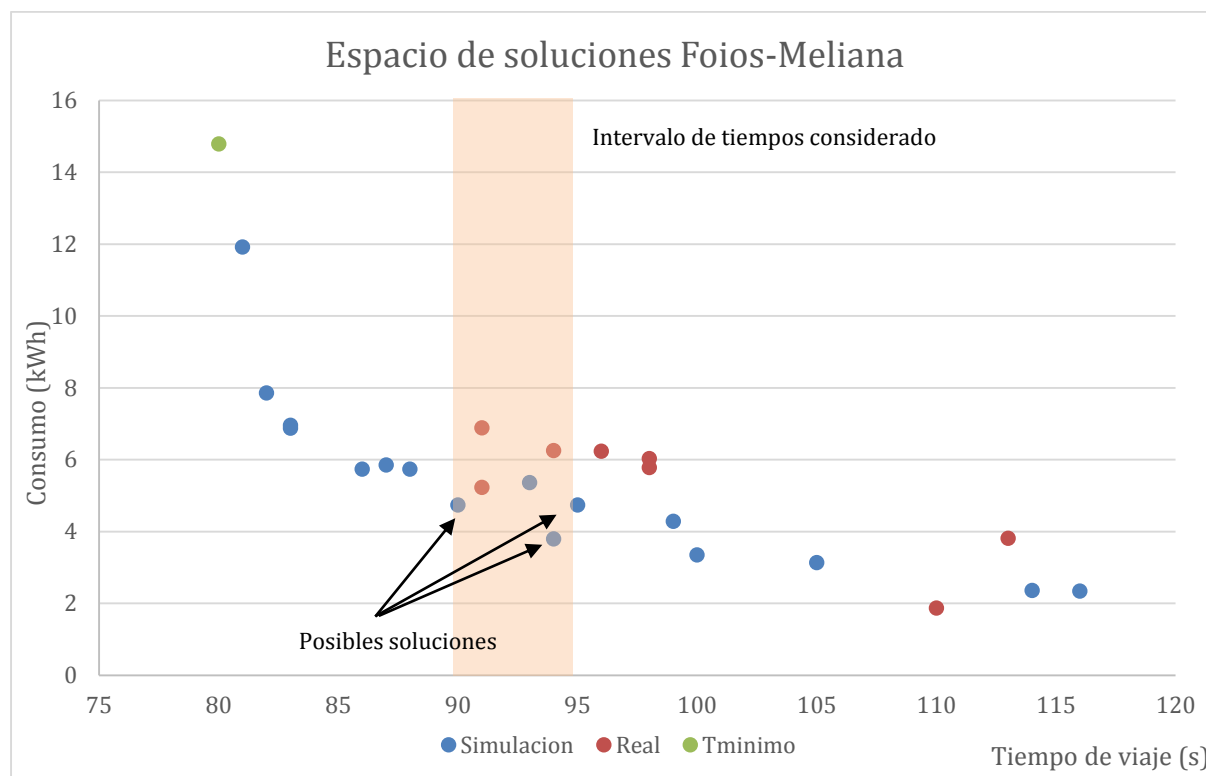


Figura 7.13. Espacio de soluciones, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia.

Tras la implementación del modelo y considerando un arco temporal entre 90 y 95 segundos, las soluciones encontradas permiten un ahorro medio del 23 % respecto los consumos registrados. También se observa como las soluciones obtenidas se sitúan por debajo de los valores registrados, mostrando un mejor comportamiento respecto al consumo energético para cualquiera de los tiempos de recorrido obtenidos.

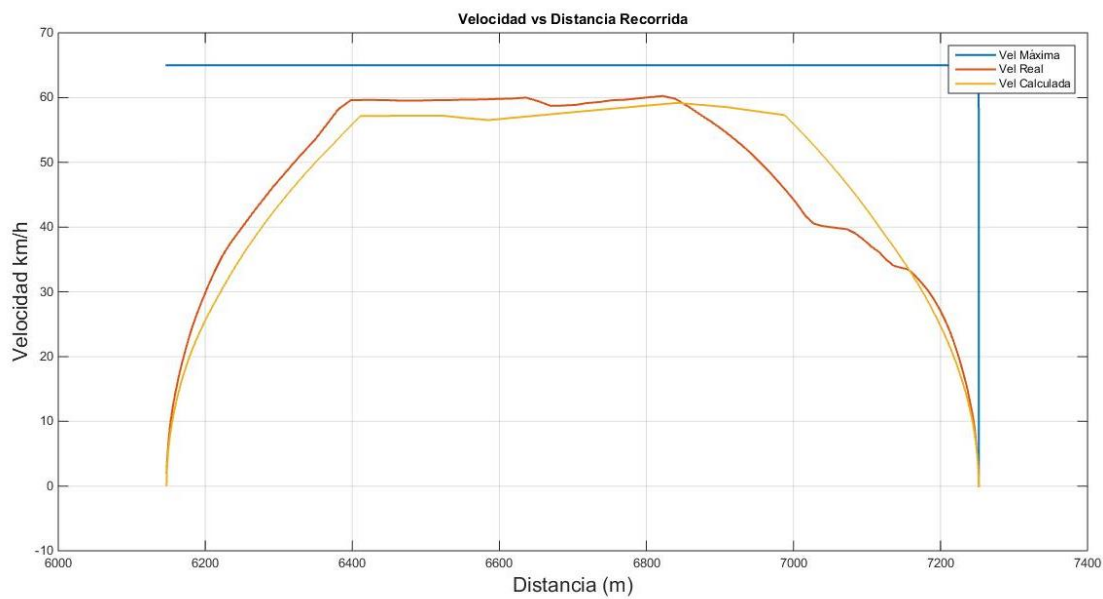


Figura 7.14. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia.

### Tramo Valencia Sud-Paiporta (Línea 7)

Para la línea 7 el tramo seleccionado corresponde al comprendido entre las estaciones de Valencia Sud y Paiporta. Los resultados son los mostrados en la Figura 7.15.

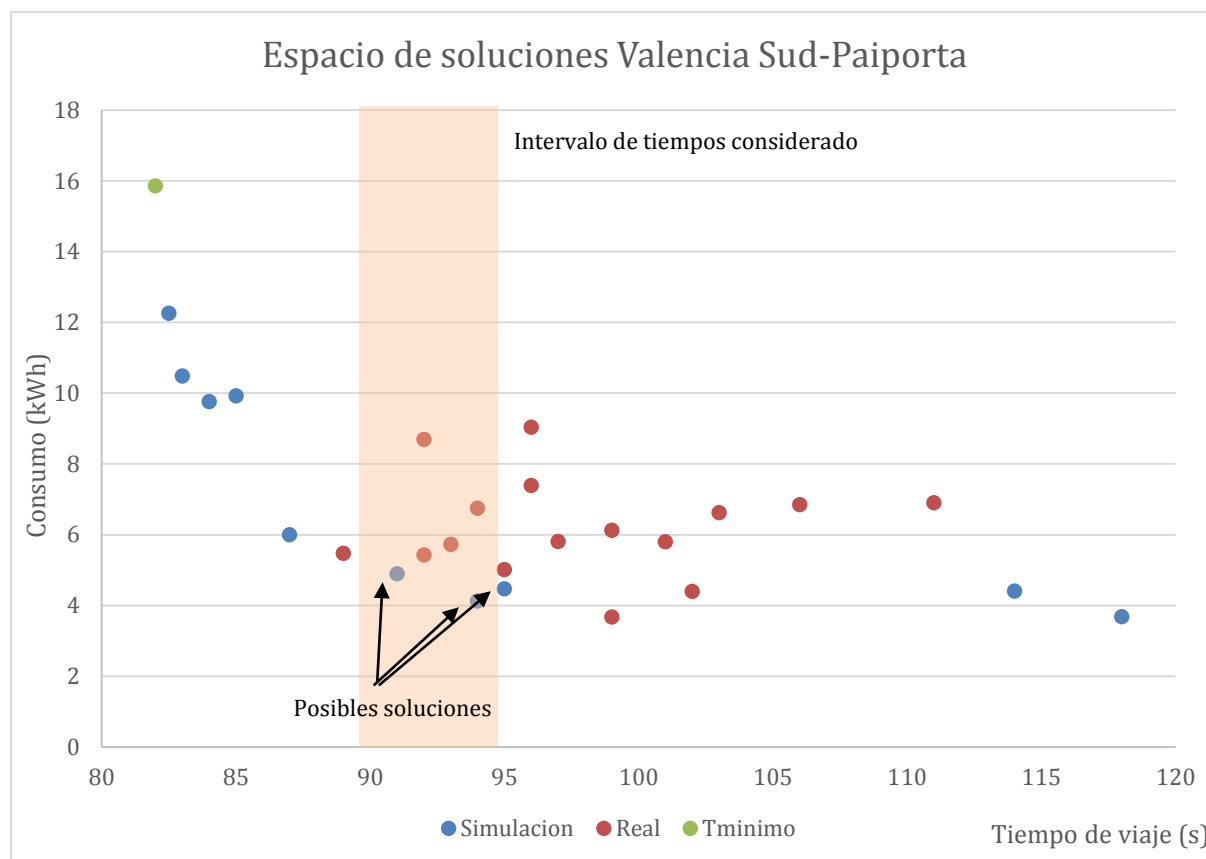


Figura 7.15. Espacio de soluciones, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboración propia.

Considerando las soluciones comprendidas entre 90 y 95 segundos, los valores simulados permiten un ahorro medio del 16 %. También se observa como en los casos anteriores que las soluciones obtenidas se sitúan por debajo de los valores registrados, mostrando un mejor comportamiento respecto al consumo energético.

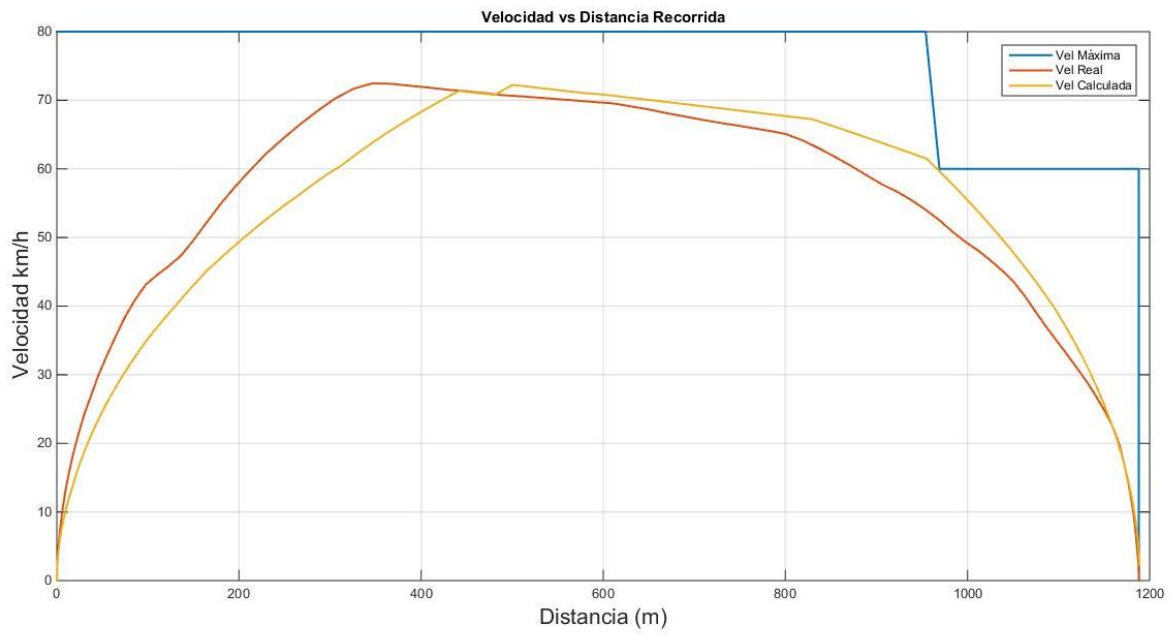


Figura 7.16. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboraci3n propia.

### Tramo Paiporta-Valencia Sud (Línea 7)

El tramo estudiado corresponde al mismo que en el caso anterior, esta vez recorrido en sentido contrario. Los resultados son los representados en la Figura 7.17.

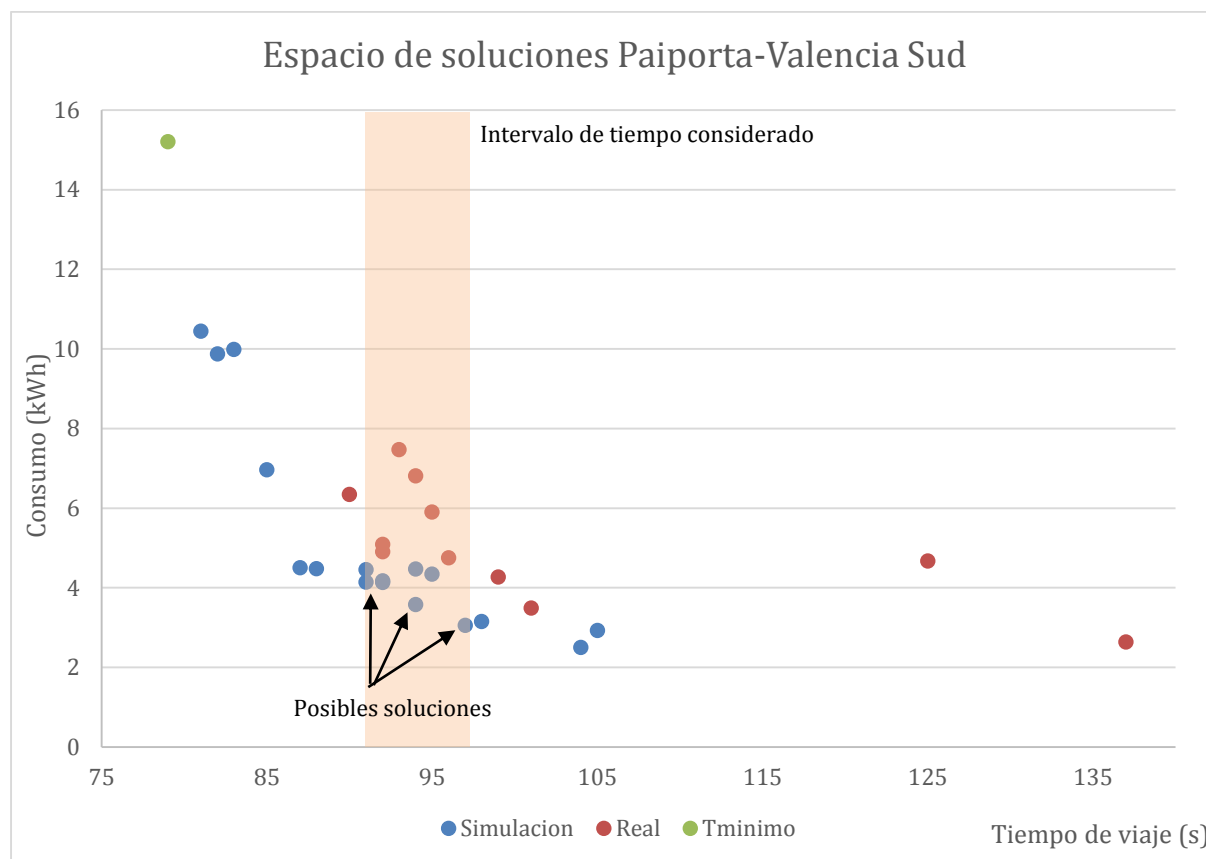


Figura 7.17. Espacio de soluciones, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia.

Para aquellas soluciones comprendidas entre 92 s y 97 s, los valores simulados permiten un ahorro medio del 19 %. A su vez, como en los tramos anteriores las soluciones obtenidas se sitúan por debajo de los valores registrados, mostrando un mejor comportamiento respecto al consumo energético.

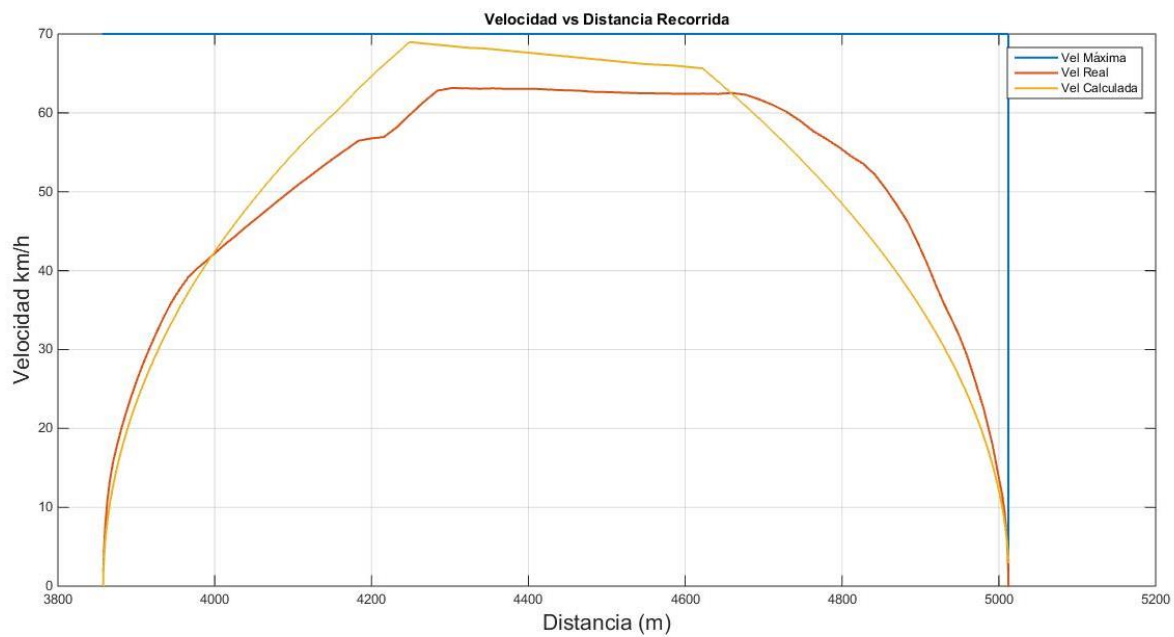


Figura 7.18. Perfiles de velocidad real vs calculado, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia.



## 8. Conclusiones y futuras líneas de investigación

---

En el marco actual y siendo el sector del transporte un gran consumidor de energía cada vez son más necesarias las actuaciones y medidas que permitan mejorar la eficiencia energética y, por lo tanto, reducir la contaminación y las emisiones asociadas.

Así pues, el presente trabajo aborda la mejora de la eficiencia energética del ferrocarril metropolitano mediante la optimización de los perfiles de velocidad con la ayuda de un modelo del comportamiento de un tren durante su marcha bajo una conducción manual, manteniendo las condiciones de explotación. La red de estudio considerada en este caso es la de Metrovalencia.

El motivo de considerar los trayectos de conducción manual reside en dos aspectos fundamentales. En primer lugar, la conducción automática del tren mediante ATO incluye restricciones y particularidades que dificultan mucho su modelado, siendo necesario conocer en detalle la programación de los equipos para poder modelar su comportamiento. En segundo lugar, tal y como se ha comentado en el trabajo, en más del 80 % de los kilómetros de la red de Metrovalencia se conduce de forma manual, puesto que la conducción automática únicamente se utiliza en los tramos en subterráneo de la propia ciudad.

Por otro lado, el hecho de analizar el comportamiento de un vehículo aislado y no el conjunto de la infraestructura (con la posibilidad de utilizar la energía regenerada por el frenado de un tren en otro que en ese momento esté acelerando) permite mantener la actual explotación si modificar su configuración, únicamente variando los perfiles de velocidad mientras que se mantienen los horarios.

Así pues, una vez establecido los criterios el trabajo se ha dividido en dos fases o aspectos principales. En primer lugar se ha desarrollado un modelo de simulación del movimiento del tren mediante el que es posible calcular el consumo energético entre estaciones para un

sistema donde se realiza la conducción manual. Para validar y comprobar la precisión del mismo se ha comparado los datos obtenidos en una campaña de medición con los resultados del modelo, permitiendo ajustar y comprobar el comportamiento del mismo, para los tiempos de viaje observados.

Posteriormente, el modelo validado se ha aplicado en diferentes escenarios y líneas de la red de Metrovalencia para valorar la mejora que existe mediante la optimización de los perfiles de velocidades, calculando el potencial de ahorro que existe. Para llevar a cabo la mejora la tarea fundamental reside en ajustar los perfiles de velocidad para minimizar el consumo, usando la deriva y las pendientes favorables para reducir el consumo.

## 8.1. Conclusiones

A lo largo del presente trabajo se ha abordado el problema de la optimización de los perfiles de velocidad mediante un modelo de simulación. El objetivo final es el de diseñar unas marchas o perfiles de velocidades que cumplan no sólo con los tiempos de recorrido objetivo y los criterios de confort, sino que permitan realizar el trayecto con el menor consumo energético posible.

En primer lugar se ha analizado el consumo en las líneas 1, 2, 3, 5 y 7 de la red de Metrovalencia gracias a la campaña de medición realizada durante varias semanas. La información recopilada ha permitido obtener el consumo en cada una de las líneas y por sentido de circulación.

Tras el estudio de la energía consumida y para poder abordar el problema se ha desarrollado un modelo basado en el movimiento de un vehículo, considerando tanto la dinámica del tren como el cálculo de las energías de tracción y regeneración resultantes (la resultante de la resta entre la energía de tracción y la de regeneración permite obtener el consumo neto de energía). Los datos de entrada de dicho modelo lo componen el trazado (pendientes y radios de curvaturas), las velocidades máximas en cada punto así como las características y prestaciones del vehículo analizado.

ha sido posible analizar y comparar el modelo desarrollado con datos reales de consumo. Los resultados obtenidos proporcionan valores de consumo neto con un error máximo inferior al 5 %.

Tras validar el modelo el paso siguiente ha sido aplicar el mismo para calcular el potencial de ahorro energético que existe en las líneas citadas. Para llevar a cabo esta tarea se ha tratado de aprovechar aquellas formas de conducción que incluyen velocidades máximas algo inferiores a la máxima permitida, periodos de deriva en los que el tren no consume energía (únicamente para los equipos auxiliares), además de aprovechar el la regeneración energía durante el frenado regenerativo, siendo especialmente importante la energía recuperada a través de este tipo de freno.

A través de los resultados obtenidos es posible afirmar que se obtiene un ahorro energético el cual se ve reflejado en el desplazamiento hacia la parte inferior de la nube de puntos calculada en el eje de ordenadas, para cada uno de los casos. Únicamente en uno de los tramos analizados (Bétera-S.Psiquiàtric) no se ha conseguido reducir el consumo, pues la conducción que se realiza en dicho tramo está ya muy cercana a la óptima en términos energéticos.

El potencial de ahorro energético calculado se sitúa como media aproximadamente en el 19 % del consumo neto registrado, llegando a valores cercanos al 40 % en el tramo entre S.Psiquiàtric-Bétera. Considerando dicho valor de reducción global en la red de Metrovalencia donde se lleva a cabo una conducción manual el potencial ahorro energético se sitúa en un valor de unos 11 GWh/año, lo que supondrían en términos económicos un ahorro de más de 5 000 000 €.

Así pues, los ahorros energéticos obtenidos muestran la importancia de poder llevar a cabo una conducción económica, siempre que los horarios y la regulación del tráfico estén diseñadas considerando este aspecto.

Si bien por si sola esta medida permite obtener un valor de ahorro que puede ser muy interesante, la combinación con otro tipo de medidas se plantea como la estrategia

necesaria para llegar a obtener un transporte mucho más eficiente y respetuoso con el medio ambiente. No obstante, más allá de los resultados obtenidos en este estudio hay que tener presente que cuando se aborda este tipo de problemas las características de la red, de los vehículos estudiados, de las hipótesis realizadas y de las condiciones de contorno condicionan en notablemente los resultados obtenidos.

## 8.2. Futuras líneas de investigación

A lo largo del trabajo se ha utilizado algunas hipótesis y simplificaciones para poder llevar a cabo el estudio. A continuación se apuntan una serie de futuros desarrollos a esta investigación con la idea de ampliar y mejorar el desarrollo llevado a cabo.

En primer lugar el paso lógico en el desarrollo del modelo es implementar e introducir las modificaciones oportunas para que el modelo pueda ser aplicado en los tramos donde se realiza la conducción automática (ATO), donde el sistema de regulación de tráfico selecciona una de las marchas previamente programada en el sistema de conducción. De esta forma, a través del modelo sería posible evaluar el consumo de dichas marchas y mejorar, si es posible, la conducción mediante al reprogramación de las mismas. En este sentido cabe destacar que este tema está siendo actualmente desarrollado por FGV en colaboración con el Área de Sistemas Ferroviarios de la Universidad Pontifica de Comillas bajo el proyecto “Estudio del diseño óptimo de las marchas de conducción ATO del metro de Valencia”, el cual tiene prevista su finalización en el mes de Septiembre del 2015.

Por otro lado, a lo largo del trabajo se ha destacado la importancia que posee la correcta determinación del comportamiento del vehículo en cuanto a la energía consumida y devuelta a la red. Para ello se ha realizado un ajuste experimental a partir de datos obtenidos del vehículo, pudiendo llevarse a cabo un modelo detallado del sistema de control del tren, especialmente en cuanto a la gestión de la energía recuperada a través del freno regenerativo. Además, existen otros parámetros como las curvas de transición de planta y perfil longitudinal o la temperatura exterior e interior del vehículo que no se han considerado de forma explícita, mientras que otros factores como el grado de llenado se han considerado de forma aproximada. La mejora pues del modelo incluyendo estos aspectos permitiría mejorar en la precisión del modelo desarrollado.

En cuanto a la minimización del consumo, el ajuste realizado se ha llevado a cabo a través del estudio de la situación real (medida con los equipos de registro) y la modificación bajo el criterio del usuario de los parámetros del modelo para mejorar la operación, en cuanto al consumo energético se refiere. No obstante, en la actualidad existe un gran número de algoritmos y herramientas matemáticas que permiten la resolución de problemas mediante la minimización de una función objetivo, como en este caso es el consumo energético. Por ello, una de las futuras mejoras en el modelo reside en la aplicación de un método de optimización numérico que permita prescindir de la intervención del usuario y de su conocimiento de la red para reducir el consumo.

Otro de los aspectos a considerar en cuanto al uso del modelo desarrollado reside en el intervalo o incremento de tiempo considerado, el cual se ha fijado en 1 segundo en los cálculos realizados. Esto se debe a que los resultados se obtienen tras un ajuste del modelo con los datos obtenidos en la campaña de medida con datos cada segundo, estableciéndose para ambos el mismo valor de tiempo. Este valor, especialmente si se quiere aplicar el modelo a casos de conducción automática, puede ser poco preciso, siendo necesario mejorar la precisión mediante la reducción del mismo. De la misma forma, es previsible poder mejorar los resultados con el aumento de las medidas realizadas, reajustando con mayor precisión el modelo.

También se considera interesante la posibilidad de contemplar en el modelo la existencia de acumuladores de energía (bien sea embarcados o en la infraestructura), para poder evaluar el potencial ahorro de energía que pueden aportar este tipo de sistemas y, por lo tanto, evaluar su uso en la red. Para ello es necesario contemplar en el modelo las ecuaciones y características que gobiernan el comportamiento de estos elementos, aspecto que en el trabajo no se ha tenido en cuenta pues en la red de estudio no existen dichos sistemas.

Si bien las líneas descritas anteriormente pueden mejorar la precisión y eficacia del modelo, hay que destacar la posibilidad de evaluar la efectividad del mismo realizando pruebas reales en vía. Para ello un pequeño esquema del procedimiento sería el siguiente:

- Implementación de los nuevos perfiles de velocidad obtenidos.
- Campaña de medidas con el nuevo escenario.



- Comparación de consumos, verificación del ahorro y realización de los reajustes necesarios por aspectos en vía no considerados previamente.
- Implementación final de las marchas.

Como último aspecto y de cara a proporcionar una herramienta sencilla se plantea la posibilidad de desarrollar un entorno que permita el manejo del modelo de forma simple, bajo un aspecto intuitivo y cómodo.

## 9. Bibliografía

---

- ANDERSSON, E., LUKASZEWICZ, P. (2006). “Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains”, Report KTH/AVE 2006:46 Estocolmo, Suecia.
- Annual Report and Statement of Accounts 2009/10. (2010). Transport for London.
- ASNIS, I. A., DMITRUK, A. V. & OSMOLOVSHII, N. P. (1985). “Solution of the problem of the energetically optimal control of the motion of a train by the maximum principle”. *USSR Comput. Math. Math. Phys.*, 25, 37-44.
- BIGHARAZ M. H. et al. (2014). “Simultaneous Optimization of Energy Consumption and Train Performances in Electric Railway Systems”. *19th IFAC World Congress*, Cape Town, South Africa. August 24-29, 2014.
- BOCHARNIKOV et al. (2007). “Optimal driving strategy for traction energy saving. on DC suburban railways”. *IET Electric Power Application*, 1 (5) 675-682.
- CALDERARO, V. et al. (2014). “An Algorithm to Optimize Speed Profiles of the Metro Vehicles for Minimizing Energy Consumption”. *International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion (SPEEDAM 2014)*, Ischia, Italy.
- CUCALA, P., FERNÁNDEZ, A., RODRÍGUEZ, R. (2013). “Reducción del consumo energético en el ferrocarril”. *Anales de mecánica y electricidad*.
- DAVIS JR, W. (1926). “Tractive resistance of Electric Locomotives and cars”. *General Electric Review*, Vol 29, October 1926, pp 685-708.
- *Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas*. Instituto de Investigación Tecnológica. Universidad Pontificia de Comillas. (2012).
- DOMÍNGUEZ, M. et al. (2010). “Efficient design of Automatic Train Operation speed profiles with on board energy storage devices” *WIT Transactions on the Built Environment*, vol. 114, pp. 509-520. Conference paper.
- DOMÍNGUEZ, M. et al. (2011). “Optimal design of metro automatic train operation speed profiles for reducing energy consumption”. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. vol. 225, no. 5, pp. 463-474, September 2011.

- DOMÍNGUEZ, M., *et al.* (2012). "Energy savings in metropolitan railway substations through regenerative energy recovery and optimal design of ATO speed profiles". *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 9 (3), pp. 496-504.
- DOMINGUEZ, M. (2013). "Conducción eficiente de trenes metropolitanos con ATO". Tesis. Madrid: Universidad Pontificia Comillas de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingeniería (ICAI).
- DOMÍNGUEZ, M., *et al.* (2014). "Multi objective particle swarm optimization algorithm for the design of efficient ATO speed profiles in metro lines". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 29, pp. 43-53.
- FOURNIER, D. (2014). "Metro Regenerative Braking Energy Optimization through Rescheduling: Mathematical Model and Greedy Heuristics Compared to MILP and CMA-ES" *Computer Science*. Paris-VIII <tel-01102408>.
- FRANKE, R., TERWIESCH, P. & MEYER, M. (2000). "An algorithm for the optimal control of the driving of trains". *Proceedings Of The 39th IEEE Conference On Decision And Control*, Vol 1-5, Sydney, Australia. 2123-2128.
- GARCÍA, A. (2007). "Consumo de energía y emisiones del tren de alta velocidad en comparación con otros modos". *Anales de Mecánica y Electricidad* Vol. LXXXIV, Fas. V, Sept-Oct.
- GARCÍA, A. (2008). "Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril y línea de trabajo para su reducción". *Monografías ElecRail*.
- GARCÍA, A., MARTÍN, M<sup>º</sup>. (2008). "Análisis sistemático del consumo energético en líneas ferroviarias metropolitanas, de cercanías y de alta velocidad, con valoración del impacto energético y del resultado económico, incluyendo el desarrollo y contraste de modelos y simuladores parametrizables (ELECRAIL)". *Fundación de los Ferrocarriles Españoles*.
- GONG, C. *et al.* (2014). "An Integrated Energy-Efficient Operation Methodology for Metro Systems Based on a Real Case of Shanghai Metro Line One" *Energies* 7, no. 11: 7305-7329.
- GONZÁLEZ-GIL, R. *et al.* (2014). "A systems approach to reduce urban rail energy consumption", *Energy Conversion and Management*, vol. 80, Pages 509-524



- IEC (2006). IEC 62290-1, Railway applications - Urban guided transport management and command/control systems - Part 1: System principles and fundamental concepts. IEC, 2006.
- KHMELNITSKY, E (2000). "On an Optimal Control Problem of Train Operation". *IEEE Transactions on automatic control*, vol. 45, no. 7, July 2000.
- LI, X. & TANG, T. (2011). "Fuzzy Train Energy Consumption Minimization Model and Algorithm", *Iranian Journal of Fuzzy Systems*, 8, 77-91.
- LI, X., LO, H.K. (2014). "An energy-efficient scheduling and speed control approach for metro rail operations". *Transportation Research Part B: Methodological*, 64, pp. 73-89.
- LIU, R., GOLOVITCHER, I. (2003). "Energy-efficient operation of rail vehicles", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 37, issue 10, p. 917-932.
- LUKASZEWICZ, P. (2001). "Energy Consumption and Running Time for Trains". *Royal Institute of Technology KTH*, June 2001; Stockholm.
- LUKASZEWICZ, P. (2007). "A simple method to determine train running resistance from full-scale measurements". *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. ISSN 0954-4097. pp. 331-337. Vol. 221, Number 3 / 2007.
- MAYET, C. *et al.* (2014). "Comparison of different models and simulation approaches for the energetic study of a subway". *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Volume 63 (2), art. no. 6589180, pp. 556-565.
- MELIS, M. *et al.* (2008). "Doce años de investigación, desarrollo y tecnología ferroviaria en Metro de Madrid". *Revista de Obras Públicas*, Abril 2008, Nº 3.487.
- *Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*. FFE e IDEA, 2009.
- PAGE, C. R. (2009). "Advances in Communications Based Train Control for Metro Railways". *Urban Rail 2009 - CBTC for Metro Railways*.
- PEÑA, M. *et al.* (2012). "Optimal underground timetable design based on power flow for maximizing the use of regenerative-braking energy" *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, vol. 226, pp. 397-408.

- PILO DE LA FUENTE, E. (2006). “*Jornadas de Eficiencia energética en el ferrocarril*”, FFE.
- PILO DE LA FUENTE, E. *et al.* (2008). “*Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*”, Monografías EnerTrans.
- POWELL, J.P., GONZÁLEZ-GIL, A., PALACIN, R. (2014). “Experimental assessment of the energy consumption of urban rail vehicles during stabling hours: Influence of ambient temperature”, *Applied Thermal Engineering*, Volume 66, Issues 1–2, Pages 541-547.
- RAMOS, A. *et al.* (2008). “Mathematical programming approach to underground timetabling problem for maximizing time synchronization”, *CEPADE*. (35), Junio de 2008, p. 88 – 95; Madrid.
- RATÉS, S. (2012). “Modelización de los sistemas de electrificación ferroviaria, en corriente alterna y continua, con sistemas recuperadores de energía para el estudio de la eficiencia energética”. Tesis. Universitat Politècnica de Barcelona.
- RIOL, R., LUJAN, X. (2013). “*TREN 2020. Propuesta ferroviaria para una nueva realidad*”. PTP - Asociación para la Promoción del Transporte Público.
- SALVADOR Z., P. (2008). “Estrategias para el ahorro de energía en la explotación ferroviaria”. Proyecto Final de Carrera. Universitat Politècnica de València, septiembre de 2008.
- SHEU, J.-W., LIN, W.-S. (2011). “Automatic train regulation with energy saving using dual heuristic programming” *IET Electrical Systems in Transportation*, 1 (2), pp. 80-89.
- SICRE, C. *et al.* (2012). “Modelling and optimizing energy-efficient manual driving on high-speed lines”, *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering*. vol. 7, no. 6, pp. 633-640, November 2012.
- WANG, Y. *et al.* (2011). “Optimal trajectory planning for trains using mixed integer linear programming” *Proceedings of the 14th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC 2011)*, Washington, DC, pp. 1598–1603.
- WANG, Y. *et al.* (2014). “An Improved Genetic Algorithm for Optimal Stationary Energy Storage System Locating and Sizing”. *Energies 2014*, 7, 6434-6458.
- XUN, J., *et al.* (2012). “Coordinated train control in a fully automatic operation system for reducing energy consumption”. *Computers in Railways XIII*, pp. 3–13.



### **Páginas web consultadas:**

- <<http://todotrenesarg.com.ar/>> [Consulta: 14 de Mayo de 2015]
- <<https://ruedaycarril.wordpress.com/>> [Consulta: 16 de Mayo de 2015]
- <[www.toshiba.co.jp](http://www.toshiba.co.jp)> [Consulta: 16 de Mayo de 2015]
- <[www.treneando.com](http://www.treneando.com)> [Consulta: 25 de Mayo de 2015]
- <[www.urbanrail.net](http://www.urbanrail.net)> [Consulta: 5 de Junio de 2015]
- <[www.vivireltren.es](http://www.vivireltren.es)> [Consulta: 5 de Junio de 2015]



# 10. Anejos

## Anejo I: Consumos específicos entre estaciones (kWh)

### Línea 1

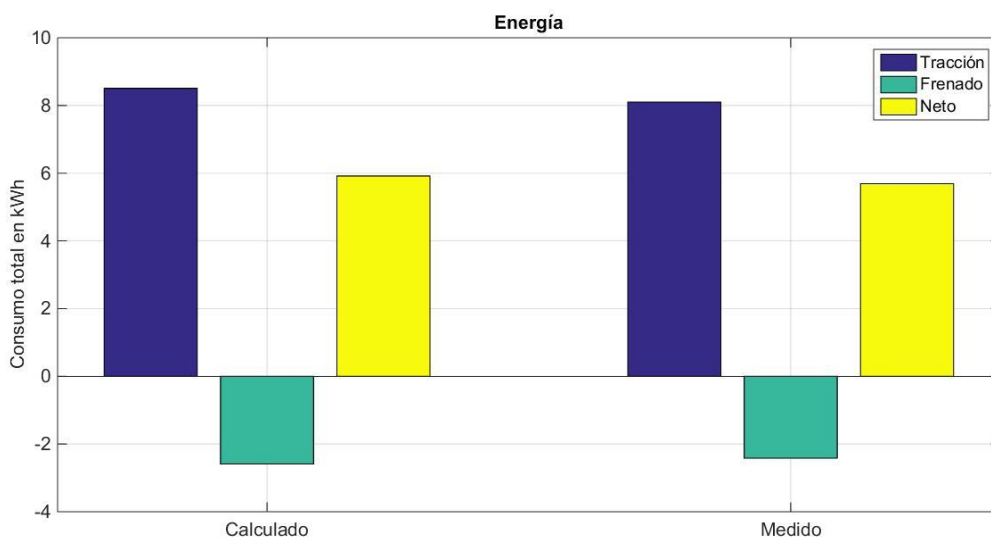


Figura A.1. Consumos, tramo Bétera-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.

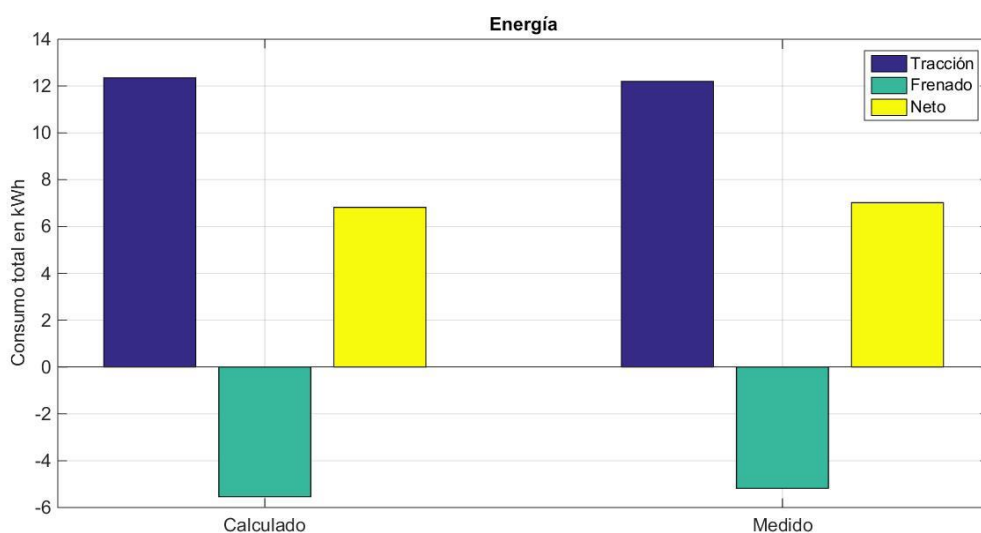


Figura A.2. Consumos, tramo S.Psiquiàtric-Masies. Elaboración propia.

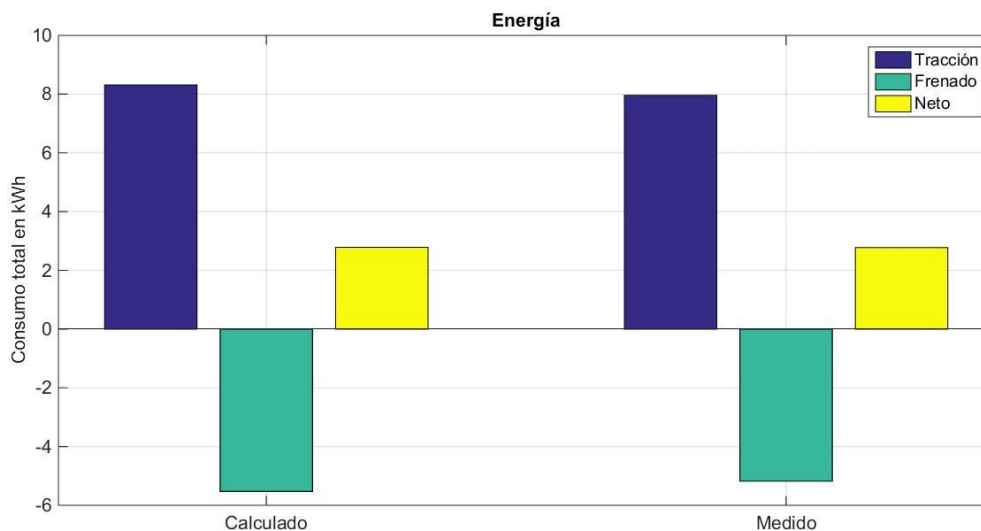


Figura A.3. Consumos, tramo Masies-Seminari\_CEU. Elaboración propia.

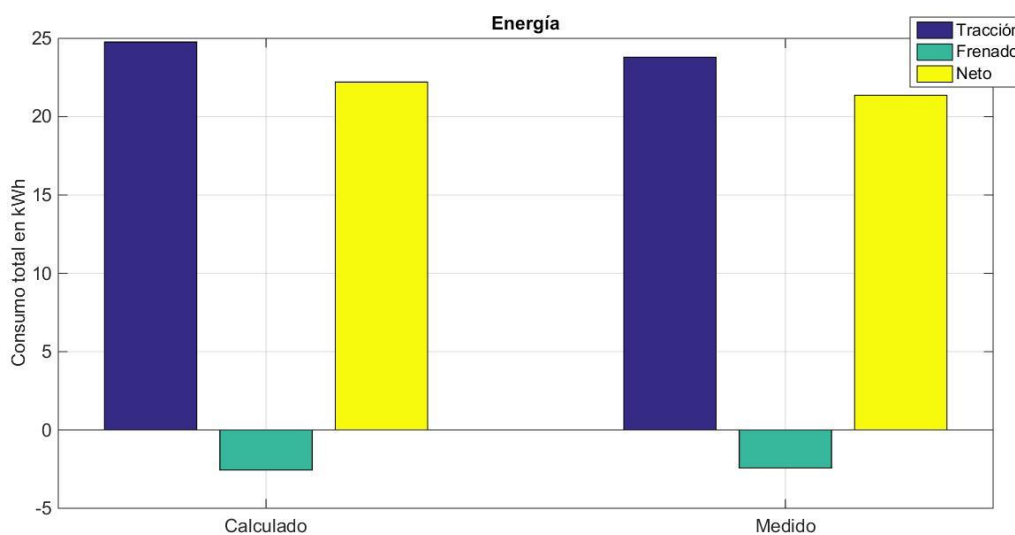


Figura A.4. Consumos, tramo Seminari\_CEU-Masies. Elaboración propia.

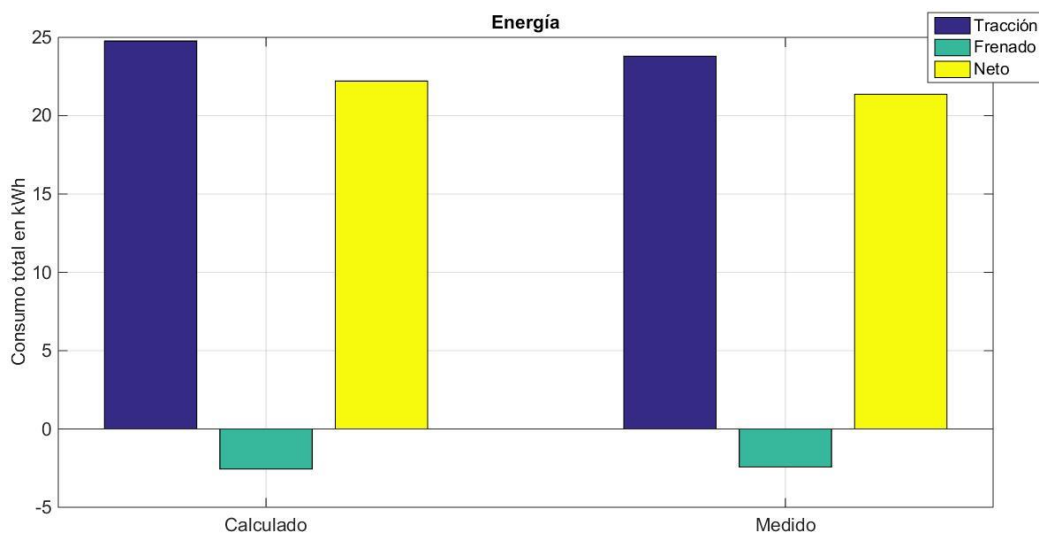


Figura A.5. Consumos, tramo Masies-S.Psiquiàtric. Elaboración propia.

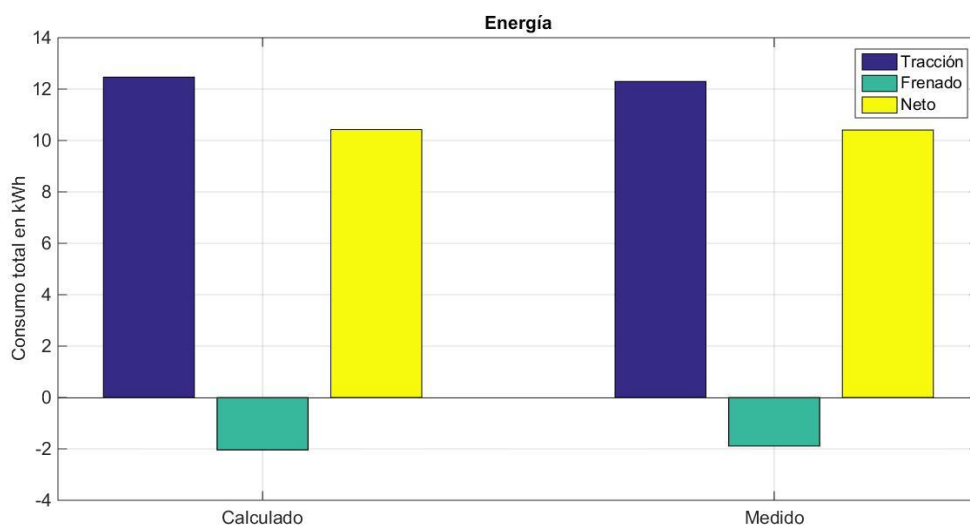


Figura A.6. Consumos, tramo S.Psiquiàtric-Bétera. Elaboración propia.

## Línea 2

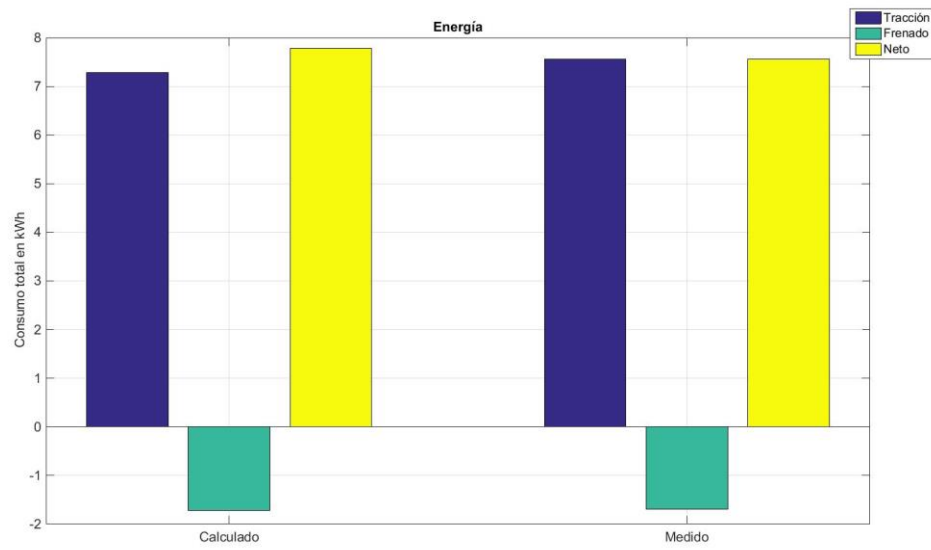


Figura A.7. Consumos, tramo Lliria-Benaguasil 2n. Elaboración propia.

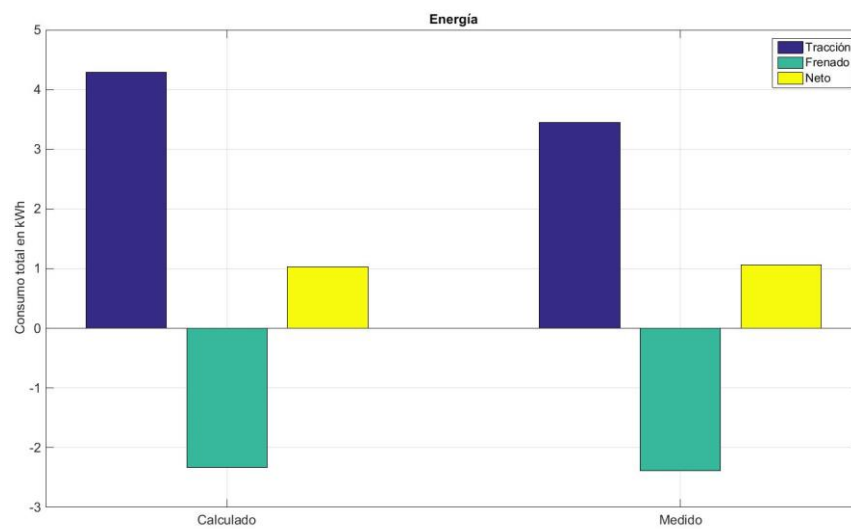


Figura A.8. Consumos, tramo Benaguasil 2n-Benaguasil 1r. Elaboración propia.

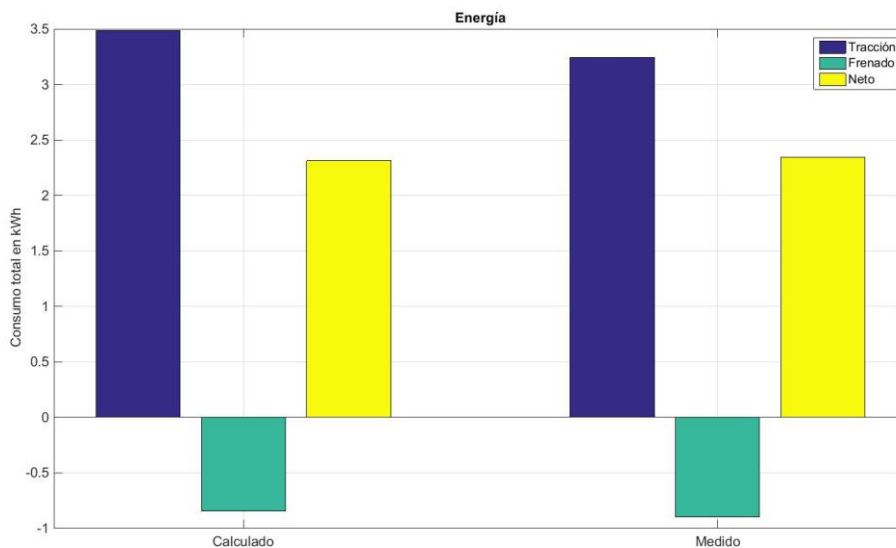


Figura A.9. Consumos, tramo Benaguasil 1r-Pobla de Vallbona. Elaboración propia.

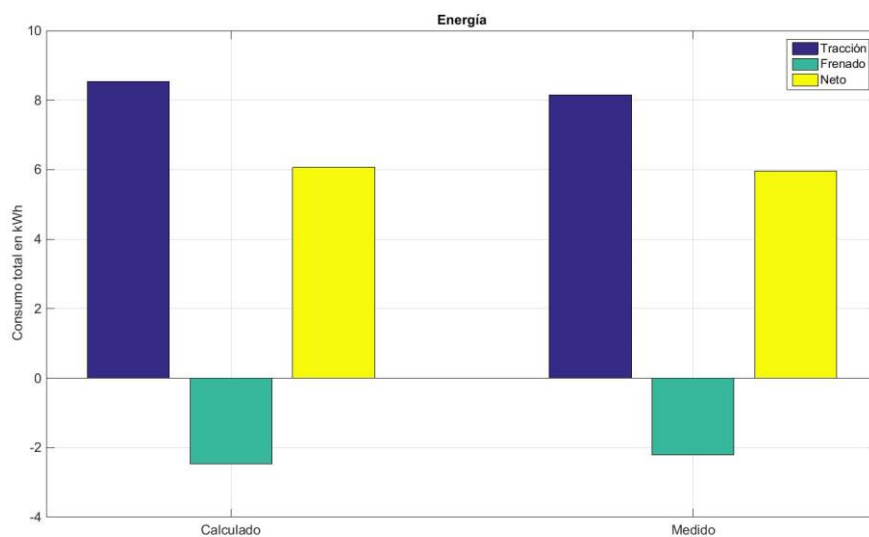


Figura A.10. Consumos, tramo Pobla de Vallbona-Torre del Virrei. Elaboración propia.



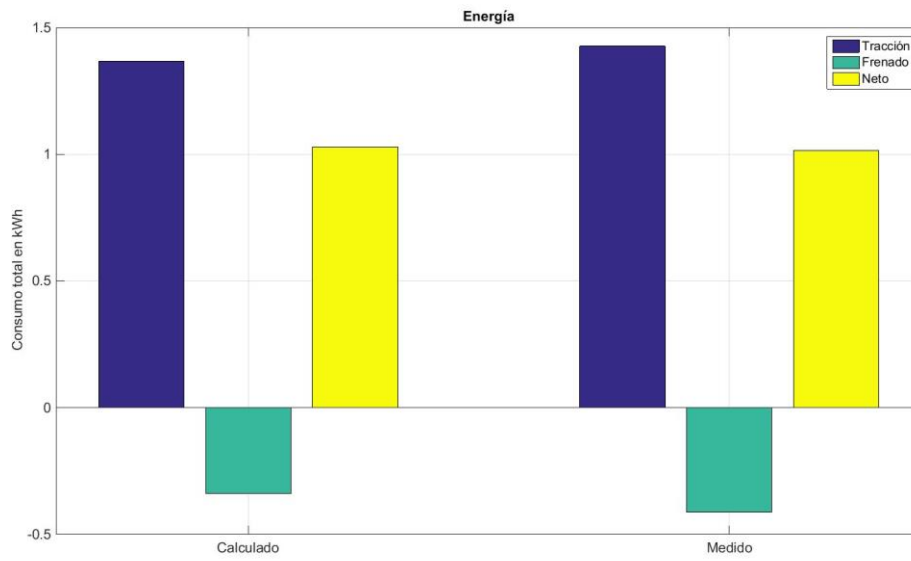


Figura A.11. Consumos, tramo Torre del Virrei-L'Èliana. Elaboración propia.

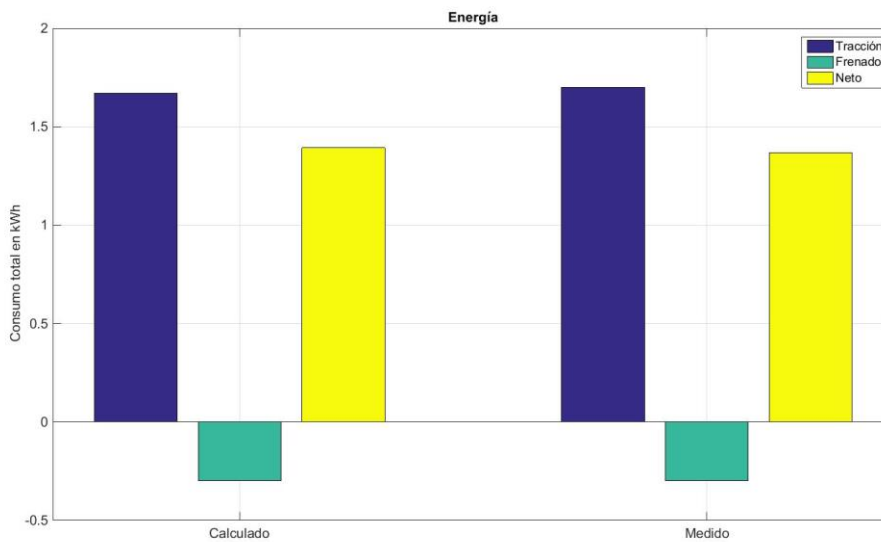


Figura A.12. Consumos, tramo L'Èliana-Torre de Virrei. Elaboración propia.

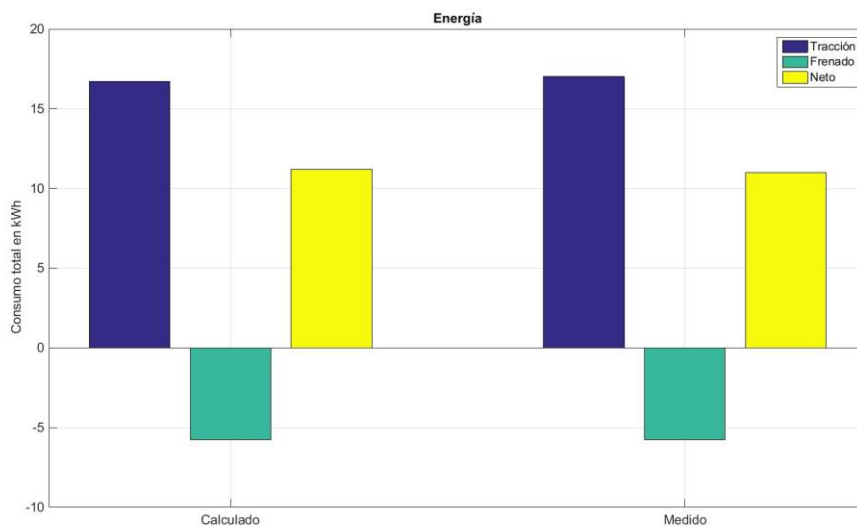


Figura A.13. Consumos, tramo Torre de Virrei-Pobla de Vallbona. Elaboración propia.

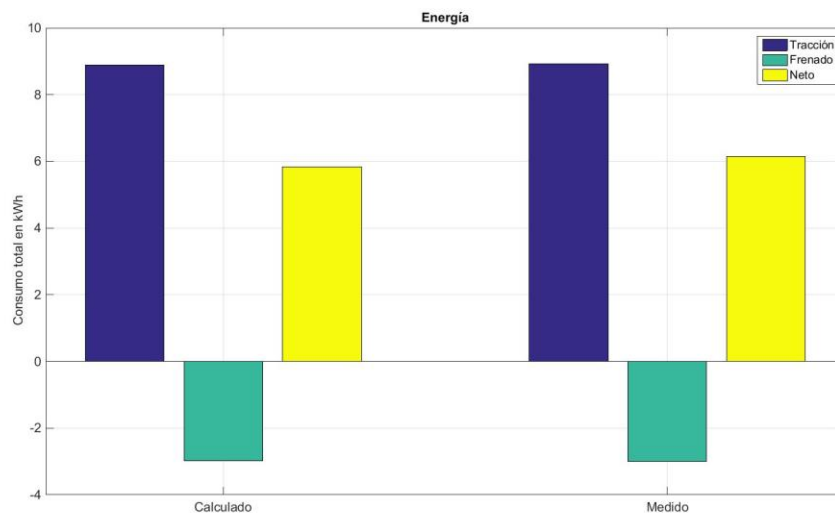


Figura A.14. Consumos, tramo Pobla de Vallbona-Benaguasil 1r. Elaboración propia.

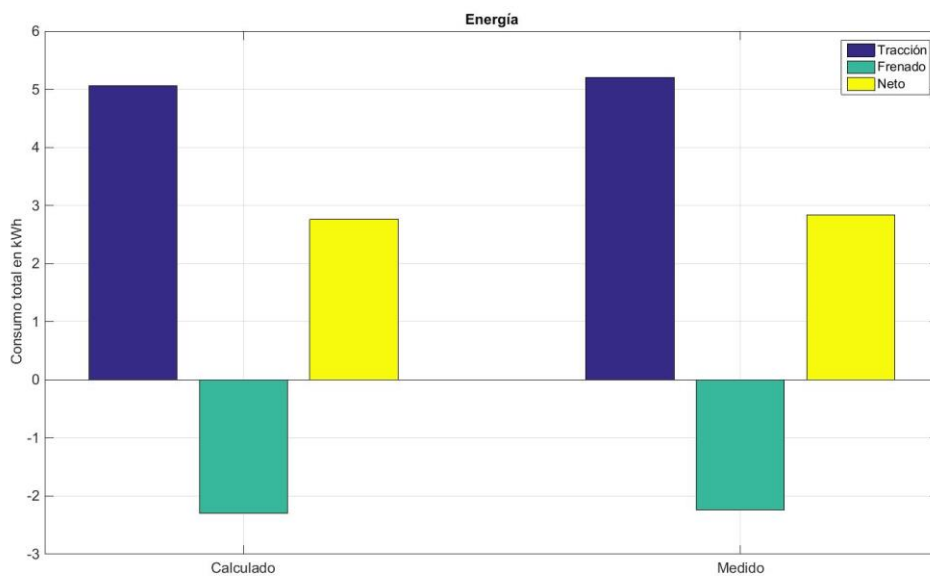


Figura A.15. Consumos, tramo Benaguasil 1r-Benaguasil 2n. Elaboración propia.

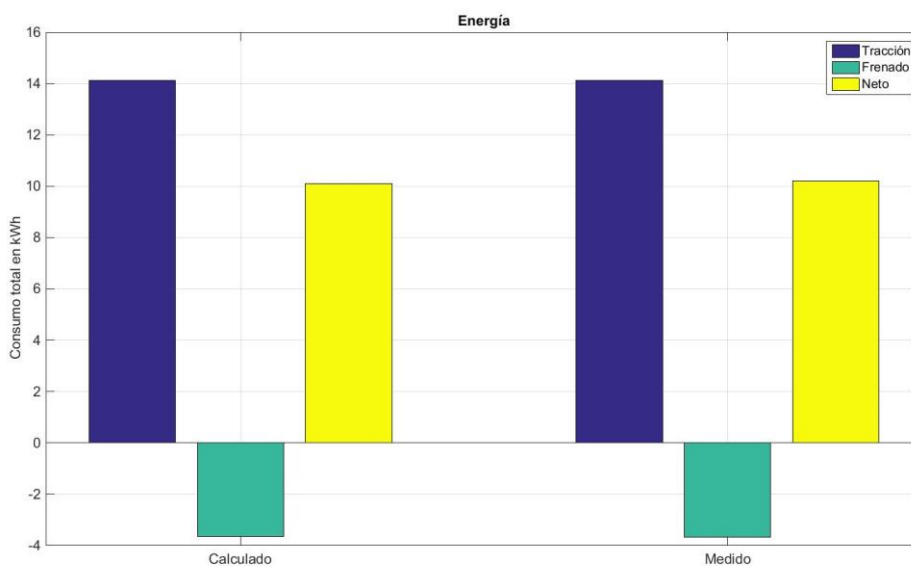


Figura A.16. Consumos, tramo Benaguasil 2n-Lliria. Elaboración propia.

### Línea 3

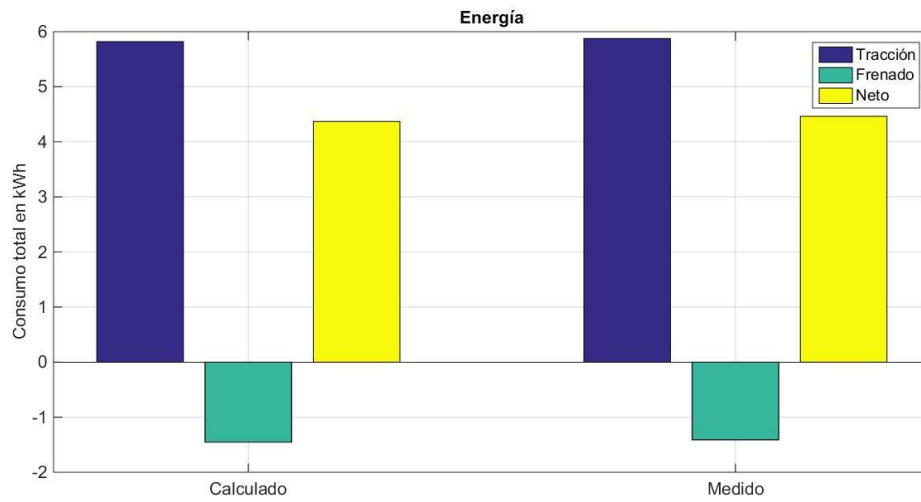


Figura A.17. Consumos, tramo Rafelbunyol-Pobla de Farnals. Elaboración propia.

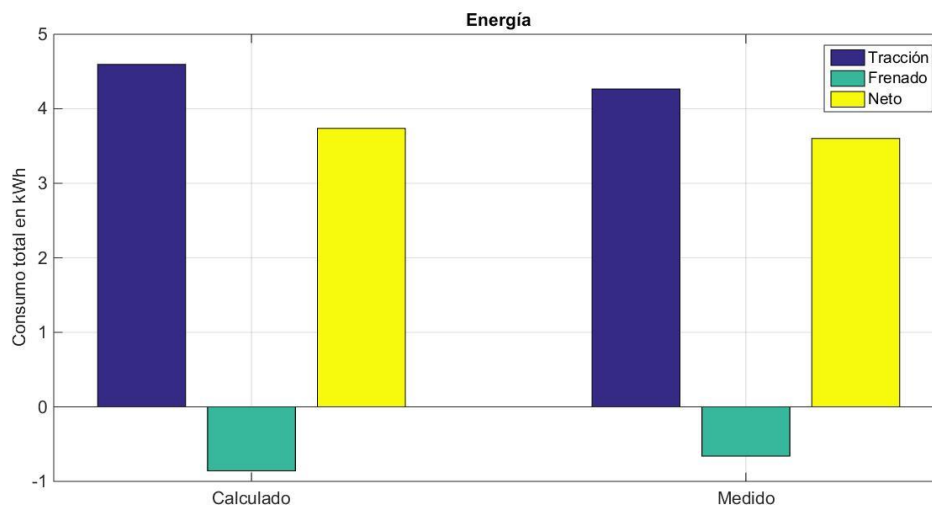


Figura A.18. Consumos, tramo Pobla de Farnals-Massamagrell. Elaboración propia.

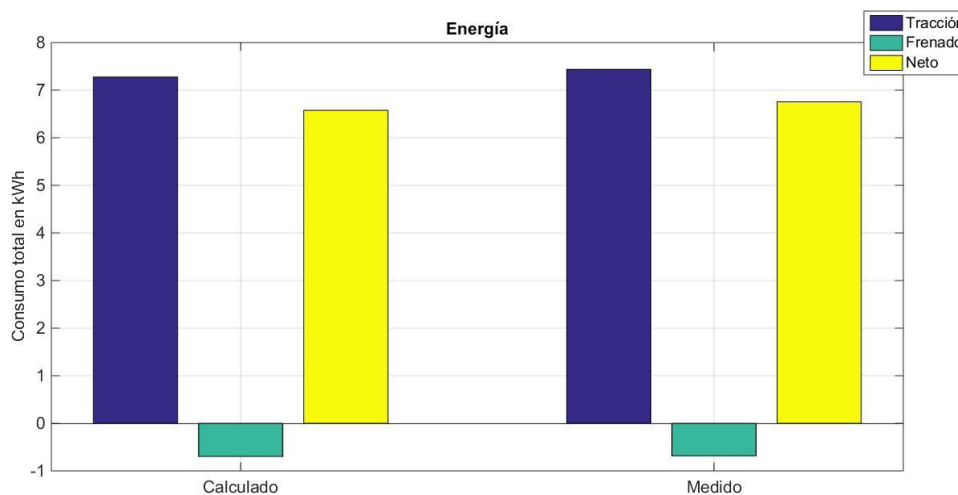


Figura A.19. Consumos, tramo Massamagrell-Museros. Elaboración propia.

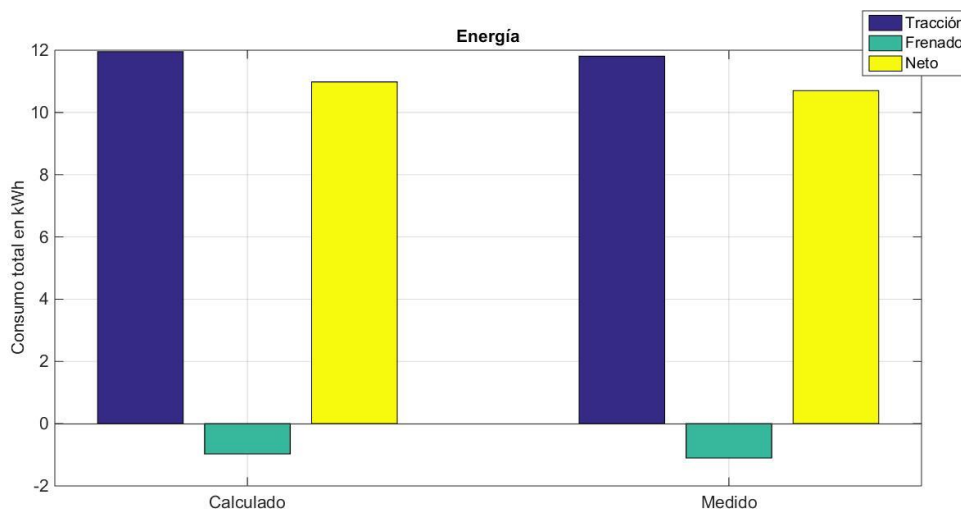


Figura A.20. Consumos, tramo Museros-Albalat dels Sorells. Elaboración propia.

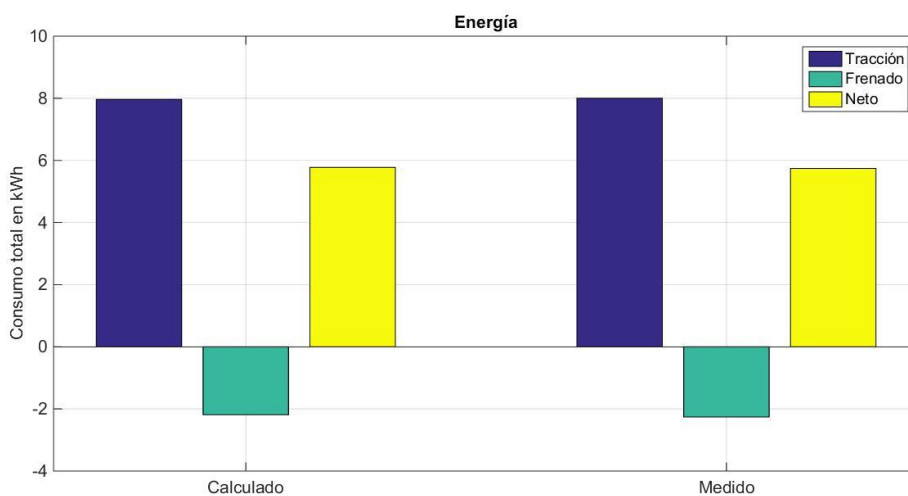


Figura A.21. Consumos, tramo Albalat dels Sorells-Foios. Elaboración propia.

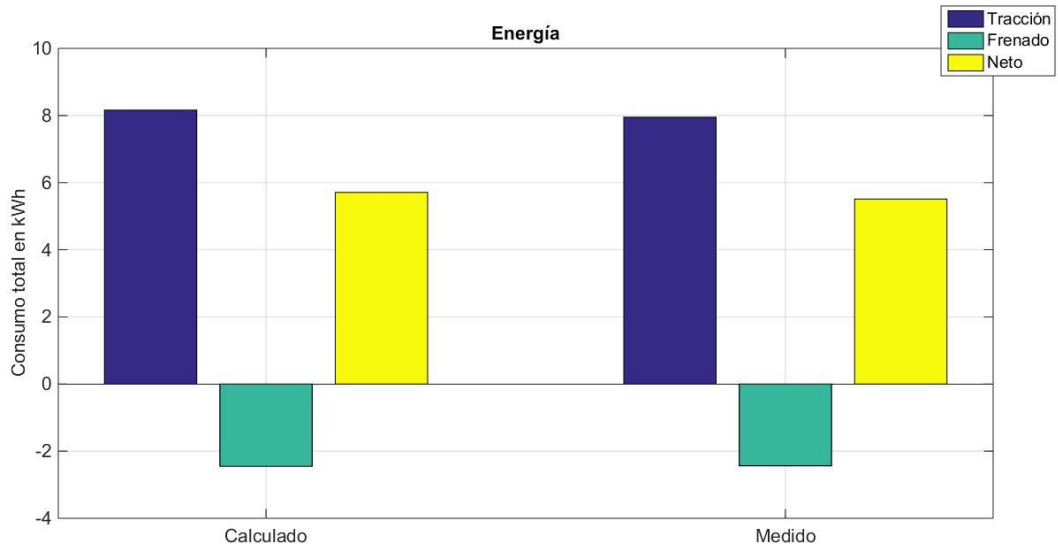


Figura A.22. Consumos, tramo Foios-Meliana. Elaboración propia.

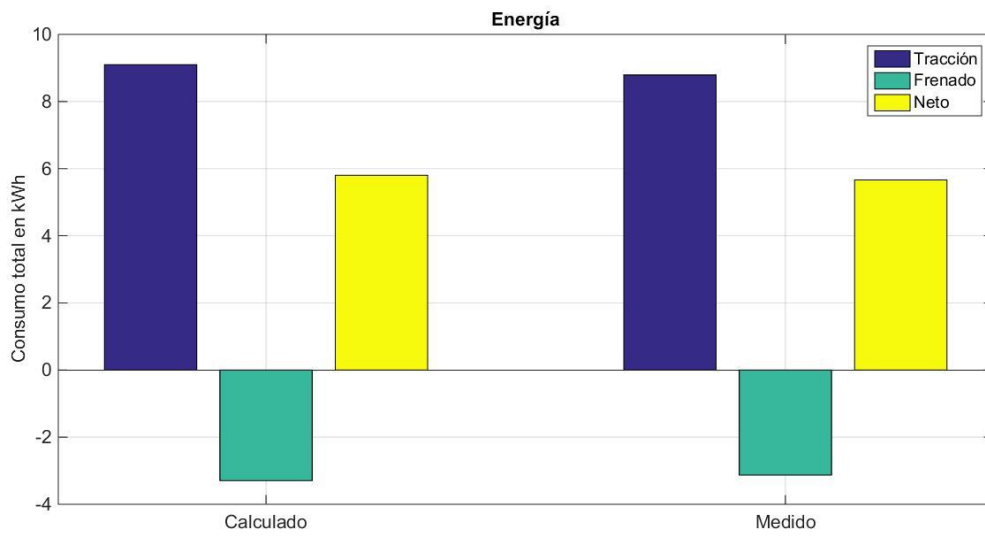


Figura A.23. Consumos, tramo Meliana-Almàssera. Elaboración propia.

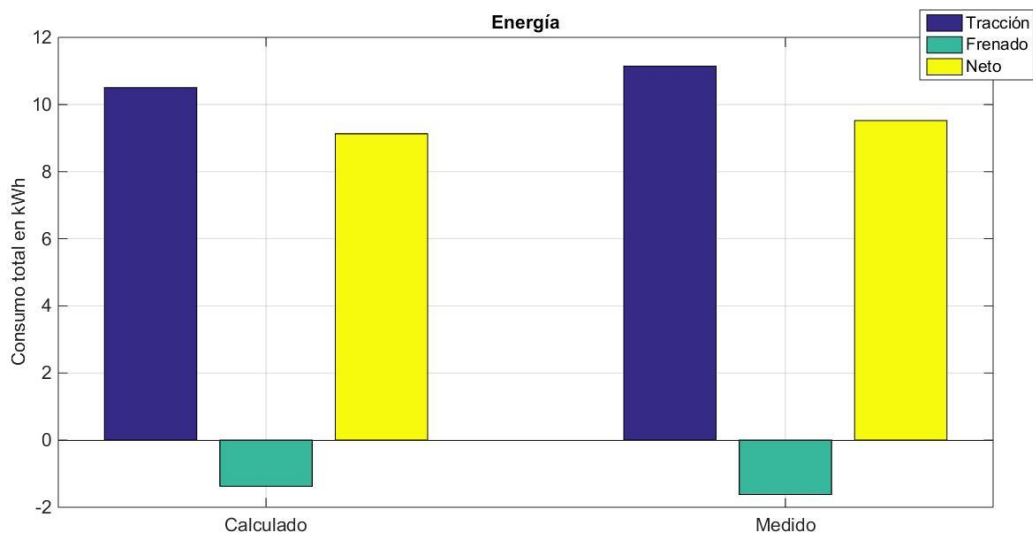


Figura A.24. Consumos, tramo Pobra de Farnals-Rafelbunyol. Elaboración propia.

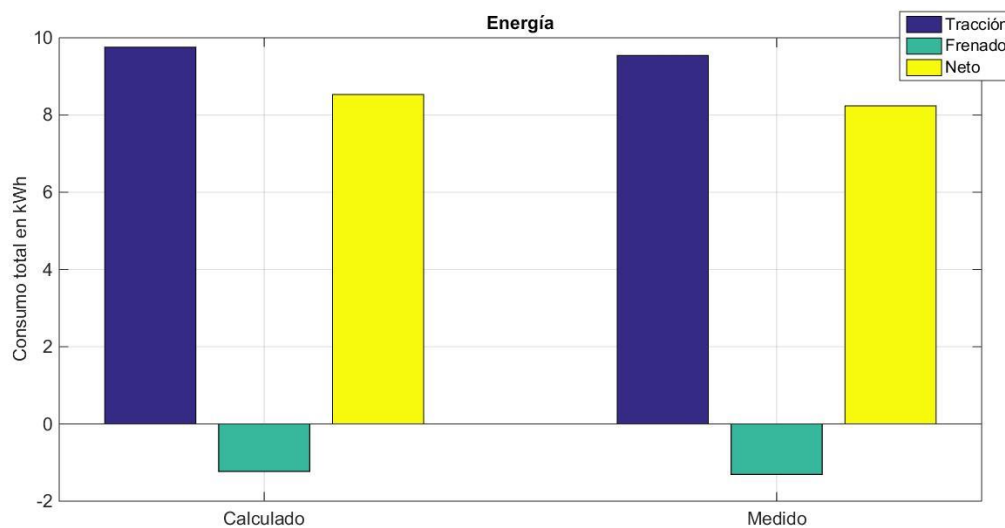


Figura A.25. Consumos, tramo Massamagrell-Pobra de Farnals. Elaboración propia.

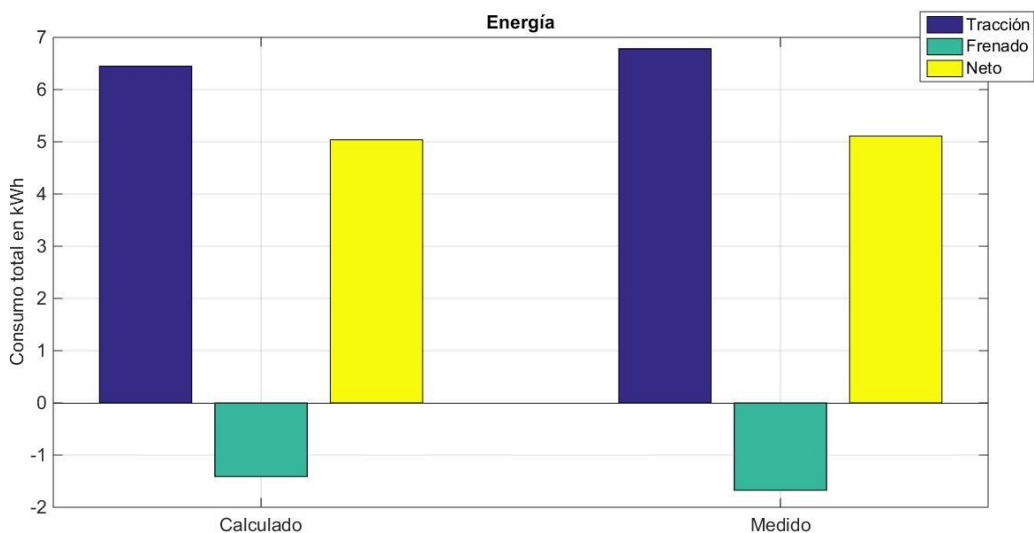


Figura A.26. Consumos, tramo Museros-Massamagrell. Elaboración propia.

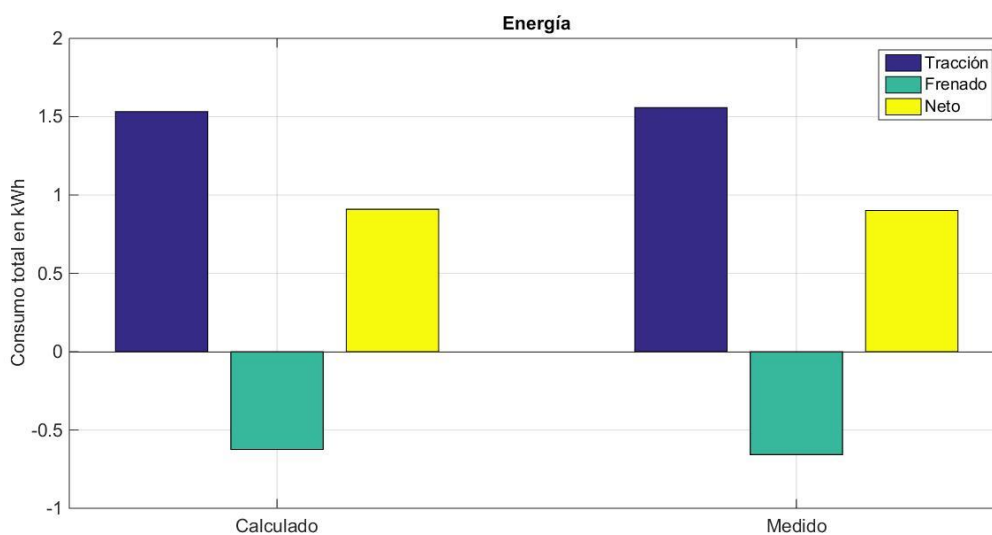


Figura A.27. Consumos, tramo Albalat dels Sorells-Museros. Elaboración propia.



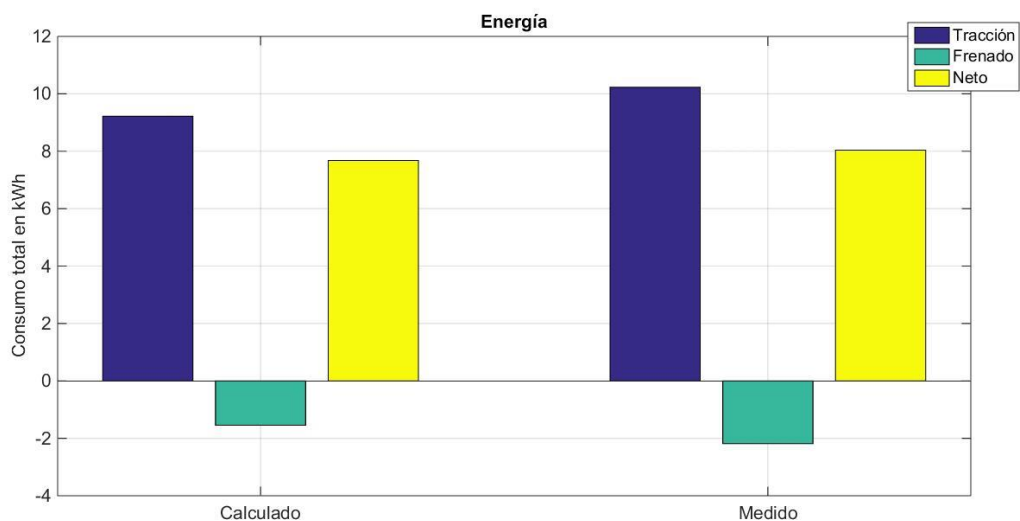


Figura A.28. Consumos, tramo Foios-Albalat dels Sorells. Elaboración propia.

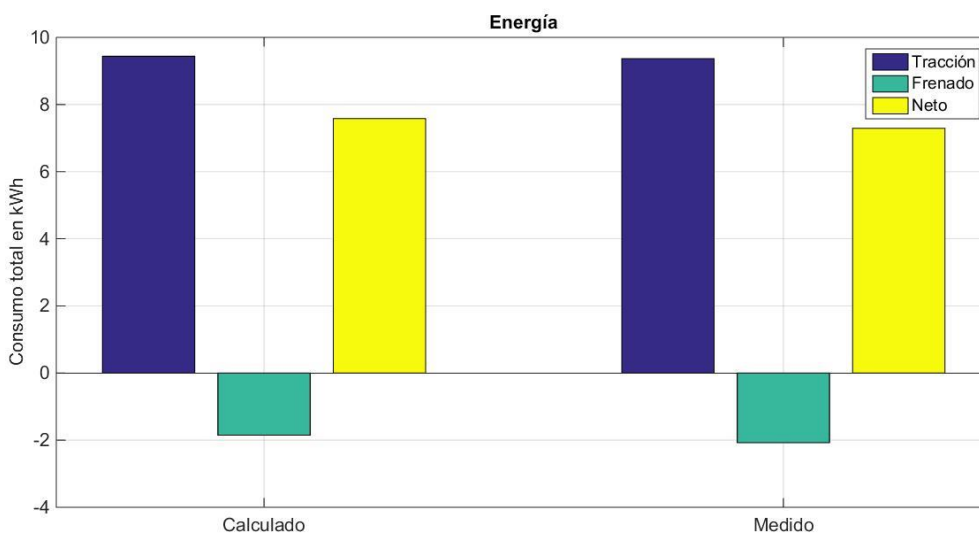


Figura A.29. Consumos, tramo Meliana-Foios. Elaboración propia.

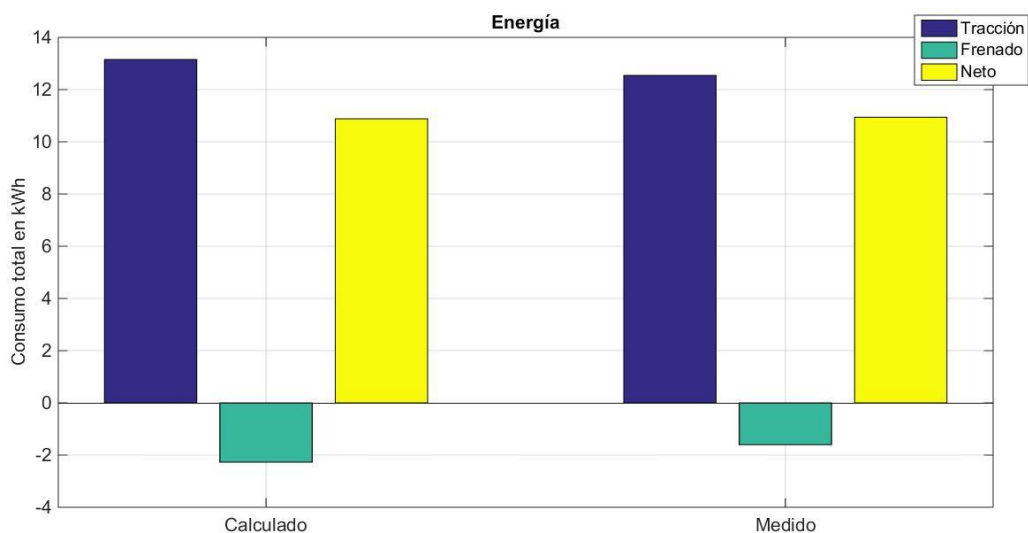


Figura A.30. Consumos, tramo Almàssera- Meliana. Elaboración propia.

**Línea 7**

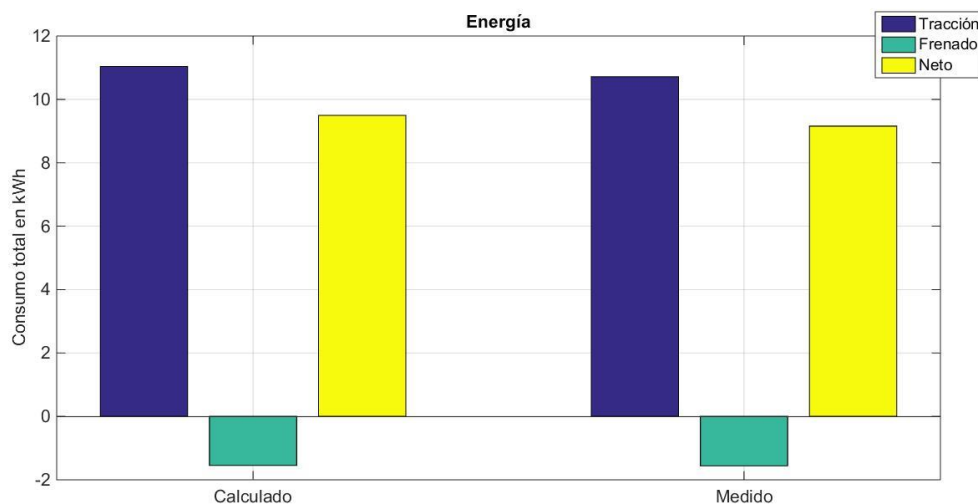


Figura A.31. Consumos, tramo Valencia Sud-Paiporta. Elaboración propia.

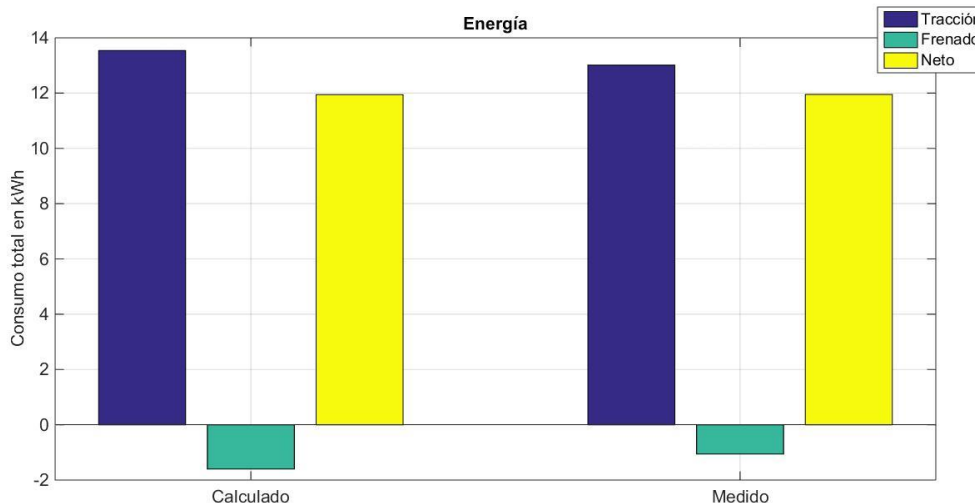


Figura A.32. Consumos, tramo Paiporta-Picanya. Elaboración propia.

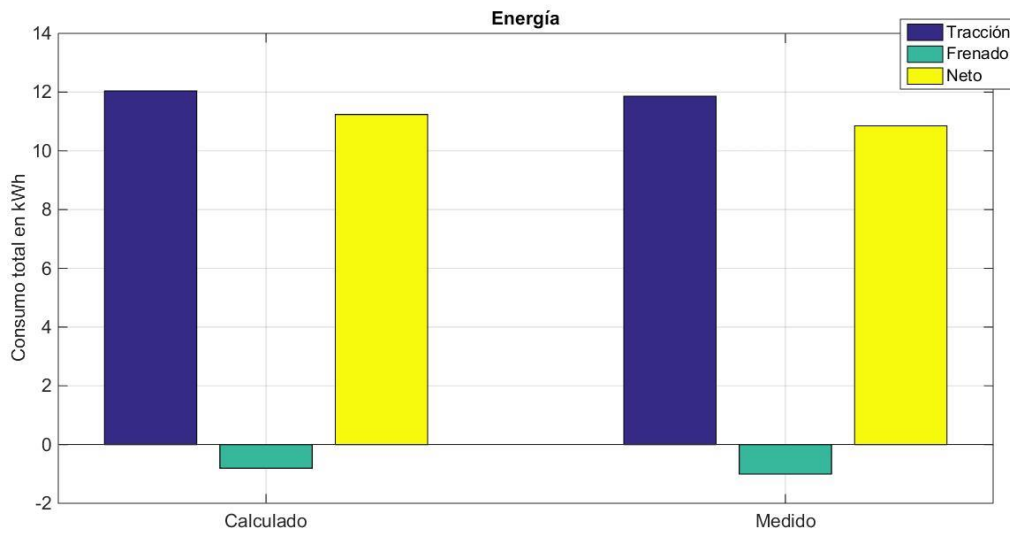


Figura A.33. Consumos, tramo Picanya-Torrent. Elaboración propia.

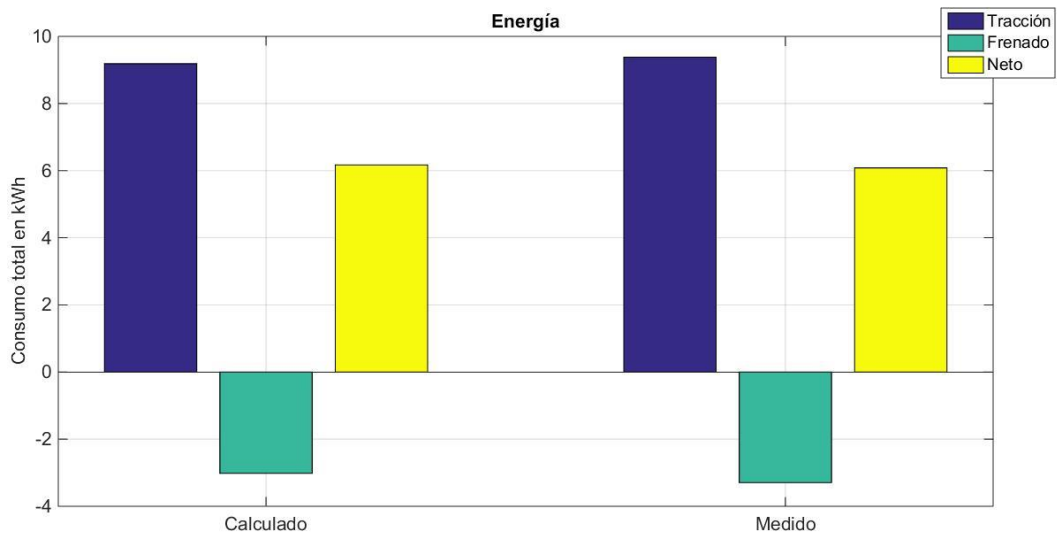


Figura A.34. Consumos, tramo Torrent-Picanya. Elaboración propia.

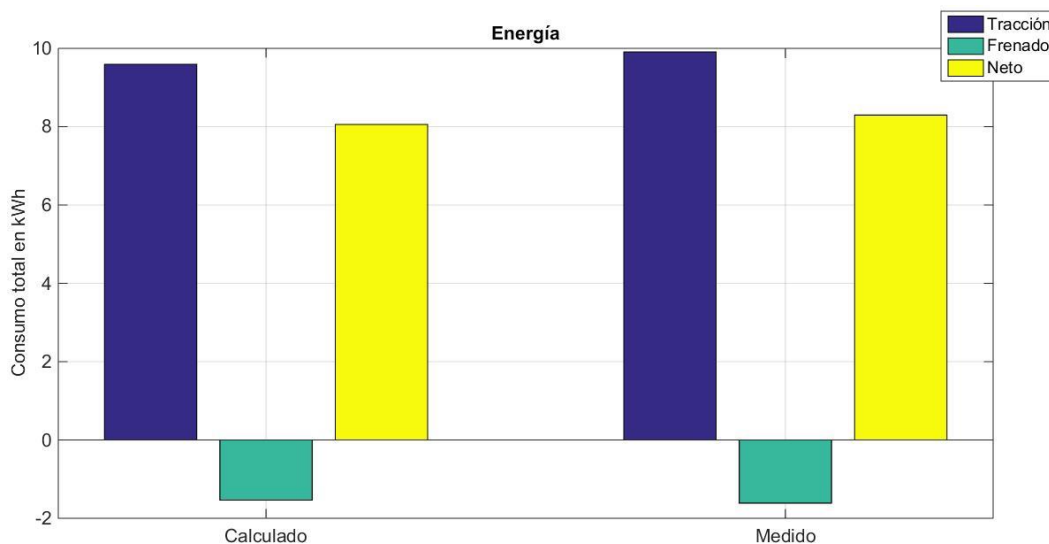


Figura A.35. Consumos, tramo Picanya-Paiporta. Elaboración propia.

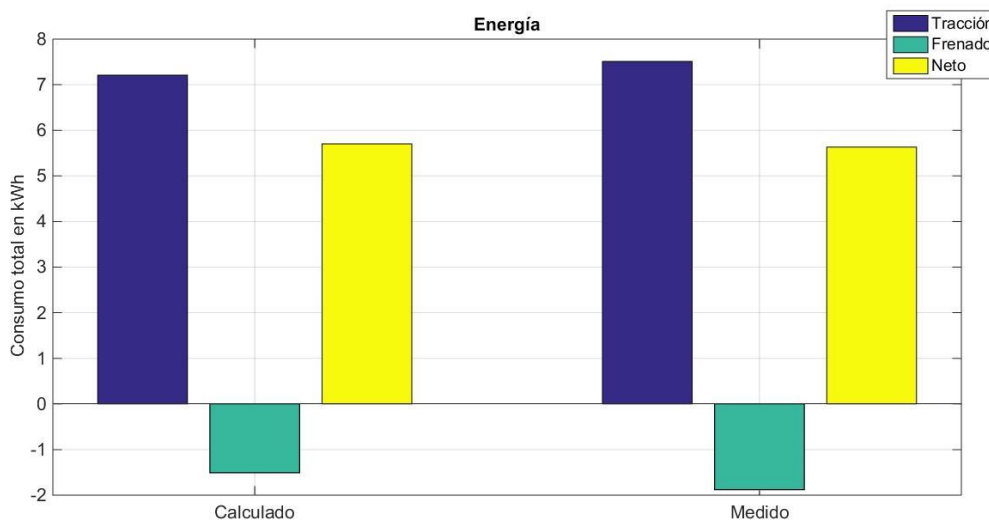


Figura A.36. Consumos, tramo Paiporta-Valencia Sud. Elaboración propia.