

ElecRail

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)



Alberto García Álvarez

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Monografías *ElecRail* / 13

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)

Alberto García Álvarez

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles



Con la subvención del Centro de Estudios y experimentación de Obras Públicas (Ministerio de Fomento), número de proyecto PT-2007-038-20IAPM.

© Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares

© De esta edición, Grupo Gestor del Proyecto ElecRail, 2008

ISBN: 978-84-940054-8-0

Depósito Legal: M-12067-2012



INDICE

INDICE	3
1. CONTENIDO Y FINALIDAD DEL PROYECTO ELECRAIL	5
2. ANTECEDENTES	6
2.1. Problema.....	6
2.2. Justificación del proyecto.....	7
2.3. Estado del conocimiento antes del proyecto.....	8
3. CUANTIFICACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL FERROCARRIL	11
3.1. Energía a la salida de las centrales generadoras	12
3.2. Flujos internos de la energía	16
4. IDENTIFICACIÓN DE LAS ACCIONES ORIENTADAS A LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL FERROCARRIL	19
4.1. Aplicación de materiales compuestos al ferrocarril.....	22
4.2. Acumulación de energía embarcada.....	24
4.3. Almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria.....	27
5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRACCIÓN	35
5.1. Análisis de adherencias disponibles.....	35
5.2. Recuperación de energía en el proceso de frenado.....	38
5.3. RAMS y LCC	38
5.4. Otros aspectos	39
5.5. Conclusiones.....	39
6. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE.....	40
6.1. Propuesta de procedimiento.....	40
7. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL FERROCARRIL E IMPUTACIÓN DE LAS CAUSAS DE LAS QUE DEPENDE.....	42
7.1. Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español	43
7.2. Evaluación de las causas de las que depende el consumo de energía del ferrocarril	44
8. DESARROLLO DE UN SIMULADOR ELÉCTRICO DE LA RED Y DE ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA RED	48
8.1. Caso estudio: línea 3 del Metro de Madrid	49
8.2. Caso estudio: línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza	53
9. DESARROLLO DE MODELOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD.....	58
9.1. Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad	58
9.2. Pruebas de conducciones eficientes guiada	60
10. DESARROLLO DE MODELOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LÍNEAS METROPOLITANAS.....	67
10.1. Modelos para el diseño de la conducción óptima.....	67

10.1.1Definición de los casos de estudio	70
10.2. Modelos para el diseño de horarios	76
10.2.1Optimización	77
Bibliografía	81

1. CONTENIDO Y FINALIDAD DEL PROYECTO ELECRAIL

El proyecto Elecraail tiene por objeto investigar las acciones que pueden dar lugar a una reducción del consumo de energía de las emisiones del ferrocarril de tracción eléctrica.

Por ello, en primer lugar se realiza un inventario y análisis sistemático de todas las acciones posibles de reducción del consumo de energía por el ferrocarril eléctrico y para el aprovechamiento del freno regenerativo. Las acciones se ponen en relación entre ellas, analizando incompatibilidades, ventajas diferenciales y aplicabilidad a cada caso concreto.

El ámbito del estudio es el transporte ferroviario de viajeros, pero incidiendo en los segmentos en los que se producen más tráfico e inversiones: alta velocidad, metropolitanos y sistemas de cercanías.

Se incluyen estudios y modelos específicos sobre los aspectos relacionados con el vehículo (reducción de masa, mejoras aerodinámicas, rediseño y gestión de servicios auxiliares, posibilidades de almacenamiento embarcado de energía y sistemas de control para las consignas de conducción económica).

Se desarrollan en el marco del proyecto modelos de simulación parametrizables para simular y analizar todos los aspectos relacionados con las instalaciones de suministro de energía: tensión de la electrificación, esquema eléctrico, cogeneración, devolución de energía, almacenamiento estático, etc.

Se desarrollan modelos de simulación parametrizables para el análisis de estrategias de reducción de consumos mediante el diseño eficiente de horarios ferroviarios y de la conducción de trenes. En concreto, una modelo para la explotación de líneas de alta velocidad, y modelos específicos para líneas metropolitanas y de cercanías. Los resultados de estos trabajos basados en simulación serán ensayados en dos casos reales.

El presente documento de síntesis se estructura en seis bloques: antecedentes, objetivos detallados del proyecto, resultados alcanzados, beneficios del proyectos, difusión del proyecto y explotación de los resultados del proyecto.

2. ANTECEDENTES

2.1. Problema

Transporte, energía y emisiones

El transporte es el primer consumidor de energía del país (por encima de los “hogares” e “industria”): 40,7% del consumo final energético en España (2004).

El transporte es igualmente responsable de la mayor cantidad de dióxido de carbono emitido a la atmósfera en España, y de las emisiones contaminantes emitidas en las zonas que afectan a la población. Según la OCDE, el transporte es responsable del 36% de las emisiones mundiales de CO₂ y, en una década, las emisiones del transporte han aumentado un 43%. El consumo de energía para el transporte y las emisiones asociadas, no solo son importantes sino que son fuertemente crecientes: El peso del consumo de energía para el transporte ha pasado en España del 25,7% del total en 1985 al 41% en 2004. El consumo absoluto se ha multiplicado por 1,87 en estos años: ha pasado de 19,6 Gtep a 36,7 Gtep.

El transporte tiene una gran dependencia de los derivados del petróleo y de las fuentes no renovables de energía. Ello agrava el problema de la alta cantidad de energía consumida y de su ritmo de crecimiento. Únicamente los ferrocarriles eléctricos y el transporte por tubería pueden evitar actualmente de forma significativa el consumo de derivados del petróleo, pero no debe olvidarse que el 4,7% de la electricidad del sistema peninsular en 2004 se produjo con derivados del petróleo, y el 64% con fuentes de energía no renovables (petróleo, carbón, gas.). Estos son valores medios, pero cualquier incremento del tráfico (y de la demanda de electricidad) producirá un consumo marginal caracterizado por el mayor peso en la generación del petróleo, del carbón y del gas natural.

El actual modelo de transporte no es sostenible desde el punto de vista energético y ambiental, y además solo puede acceder a él la tercera parte de la población mundial (en China, por ejemplo, solo el 10% de la energía consumida se destina al transporte. Siendo el transporte necesario, y considerando que su demanda crecerá previsiblemente en paralelo con el crecimiento de la economía, las autoridades públicas realizan esfuerzos importantes para reducir las externalidades del sistema de transporte, especialmente de las derivadas del uso de la energía.

Potenciación de los servicios de transporte con tracción eléctrica

Los trenes de tracción eléctrica consumieron en España, en 2005, unos 3.400 GWh, lo que representa un 1,4 % de la generación neta peninsular de electricidad (demanda de la red de transporte).

En España, en concreto, el gobierno ha impulsado en “Plan Estratégico de las Infraestructuras y Transporte” (PEIT) que recoge como uno de los objetivos fundamentales el de mejorar la sostenibilidad del sistema de transporte y reducir sus impactos ambientales.

Dentro de este Plan estatal tienen especial importancia las inversiones en ferrocarriles, y en concreto en la red de alta velocidad y en los sistemas de cercanías. A la vez, las autoridades regionales y locales también realizan en España fuertes inversiones en sistemas metropolitanos y tranvías, todo ello con el objeto de reducir el número de viajes en avión (largas distancias) y en coche particular (todas las distancias, pero especialmente en transporte urbano y suburbano), de

forma que se puedan reducir las externalidades del transporte y en especial las vinculadas al consumo de energía (es decir, la contribución al agotamiento de las fuentes no renovables, emisiones de gases efecto invernadero y otras emisiones).

Los sistemas de transporte que se están potenciando, tienen en común el empleo de la tracción eléctrica, con las ventajas que ello representa (alto rendimiento de la cadena de tracción, ausencia de emisiones locales, oportunidad de empleo de fuentes renovables de energía en origen y, sobre todo, con la oportunidad de utilización el freno eléctrico regenerativo).

La expansión de los servicios (alta velocidad, Metro, cercanías) atendidos con tracción eléctrica sugiere que se va a producir un aumento del consumo absoluto de energía eléctrica para el transporte y de las emisiones asociadas (en detrimento del uso directo de los derivados de petróleo), por lo que las medidas a adoptar para reducir el consumo específico parecen especialmente oportunas.

También son oportunas por cuanto el momento de diseño de la línea, del tren o de la operación son oportunidades valiosas para introducir nuevos enfoques que resultarían más costosos y menos eficientes si se implantan en un momento posterior, con las líneas en explotación.

2.2. Justificación del proyecto

En la actualidad se realizan en España, como ya se ha señalado, importantes inversiones en la construcción de nuevas infraestructuras ferroviarias, especialmente en los ámbitos de alta velocidad, metropolitanos, cercanías y tranvías.

En los próximos años se va a aumentar de forma notable el número de vehículos ferroviarios de tracción eléctrica, tanto por la extensión de la red, como por la necesidad de atender el aumento de la movilidad y de participación del ferrocarril en el mercado de transporte y para renovar el parque existente. Así, el parque trenes de alta velocidad que era al finalizar 2006 de 78 unidades, pasó al finalizar 2010 a 186 unidades.

En el futuro además, la cuestión de la regeneración de energía y su devolución a la red va tener una mayor importancia económica: las nuevas líneas de Alta Velocidad están todas electrificadas en corriente alterna (por lo que pueden devolver energía a la red) y todos los nuevos trenes de Alta Velocidad que ha adquirido Renfe (series 102, 112, 103, 104, 114, 120, 121 y 130) tienen freno regenerativo. Además, las nuevas líneas de alta velocidad se construyen con pendientes importantes (25 mm/m) y prolongadas, lo que requerirá frenar con mayor frecuencia.

Estas inversiones presentan la oportunidad de introducir en ellas criterios de eficiencia energética tendentes a reducir los consumos netos de energía (y las emisiones asociadas) en el conjunto del ciclo de vida de la infraestructura y de los vehículos, adoptando los diseños más eficientes en unas y otros, e implantando manuales de buenas prácticas en el diseño de las infraestructuras y de los vehículos y en la operación.

En este sentido, puede destacarse la importancia de la reducción de la masa de los vehículos (posible gracias al empleo de materiales sintéticos que ya se utilizan de forma masiva en la aviación, pero de forma muy reducida en el ferrocarril), especialmente relevante en los sistemas metropolitanos y de cercanías en los que la baja velocidad y el elevado número de paradas hace que el consumo esté dominado por la masa; por otra parte, en el caso de los trenes de alta velocidad es importante la reducción de las resistencias aerodinámicas, responsables de la mayor parte del consumo. Además, en unos y otros trenes, es muy importante el funcionamiento eléctrico del tren: su capacidad de aprovechar en auxiliares la propia energía que generan, las posibilidades de almacenamiento y la configuración y uso de los servicios auxiliares...

En cuando a las infraestructuras, son muy numerosas las acciones que pueden adoptarse para reducir el consumo de los trenes al circular por ellas. Unas medidas se refieren a los trazados

(eliminación de reducciones puntuales de velocidad, ubicación de las estaciones en una cota más elevada, armonización entre el trazado en planta y alzado en las zonas de pendiente para evitar que haya pendientes muy superiores a la pendiente de equilibrio que determina el trazado en planta...); y otras se refieren al sistema eléctrico, tanto en su propia concepción (tensión de electrificación, sección de los conductores, distancia entre subestaciones, forma de conexión eléctrica de las subestaciones, sistemas de alimentación empleados, uso de almacenadores de energía, cogeneración); como a su conexión con la red pública (tensión y puntos de conexión, devolución de energía en corriente continua o alterna) y su operación (adecuación de la longitud de las secciones eléctricas a las características de la circulación en cada caso, forma de uso de los almacenadores, etc.)

2.3. Estado del conocimiento antes del proyecto

Los trenes de tracción eléctrica consumieron en España, en 2005, unos 3.400 GWh, lo que representa un 1,4 % de la generación neta peninsular de electricidad (demanda de la red de transporte).

Concepto del freno regenerativo.- Los trenes de tracción eléctrica, al frenar, pueden convertir la energía cinética y potencial en energía eléctrica. De hecho, lo hacen con frecuencia, pues el freno eléctrico aporta mayor capacidad de frenado y evita el desgaste de los frenos de fricción, produciendo una deceleración más eficiente.

La energía eléctrica producida en el frenado (según los casos) puede: o bien ser disipada en unas resistencias situadas en el propio tren (*freno reostático*) o bien ser aprovechada parcialmente en el propio tren, o bien devuelta a la catenaria (*freno regenerativo* o *de recuperación*). En general, la capacidad de la catenaria para absorber la potencia eléctrica está relacionada con el hecho de que exista uno o varios consumidores capaces de absorber dicha potencia regenerada.

La energía que es devuelta a la catenaria, a su vez, puede ser: o bien aprovechada por otro tren, o bien exportada a la red eléctrica pública a través de las subestaciones. También caben situaciones mixtas entre las anteriores.

Para que se devuelva energía a la red eléctrica pública (como consecuencia del proceso de frenado de los trenes) hace falta que la subestación sea bidireccional. En líneas electrificadas en corriente alterna, el acoplamiento a la red pública se hace mediante transformador y, por lo tanto, las subestaciones son siempre bidireccionales. En líneas electrificadas en corriente continua, según el convertidor electrónico que se emplee para convertir la corriente alterna en continua, la subestación es bidireccional o no (de hecho, lo habitual en España es que las subestaciones de continua no sean bidireccionales).

Aprovechamiento por otros trenes.- El aprovechamiento de la energía generada en el frenado por otros trenes es muy frecuente en los ferrocarriles; de hecho en Metro y Cercanías se alcanzan porcentajes de aprovechamiento del orden del 15 al 30%, pero para que este aprovechamiento sea posible, es necesario que en el mismo instante que un tren frena, haya otro tren demandando energía en la misma sección eléctrica. Por ello, los mayores aprovechamientos de energía se producen cuando las secciones eléctricas son largas, y especialmente cuando hay una gran densidad de tráfico, lo que ocurre en los servicios de Cercanías, tranvías y Metro, y de forma más improbable en servicios de larga distancia y mercancías. Se puede estimar, de forma muy aproximada que, en conjunto del ferrocarril español, se aprovechan al año unos 520 GWh, lo que representa alrededor del 15% de la energía total consumida por el ferrocarril.

Devolución a la red.- Hasta años recientes, la devolución de energía de frenado a la red eléctrica pública en España ha sido limitada: la mayor parte de las líneas están electrificadas en corriente continua y por ello únicamente era posible en la línea de AV Madrid Sevilla

(electrificada en corriente alterna). Pero los trenes serie 100 que circulan por esta línea Madrid Sevilla no disponen de freno regenerativo, por lo que no pueden devolver energía a la red pública; así que lo hacían las máquinas serie 252 que remolcan los trenes Talgo en la línea Madrid Sevilla. La entrada en servicio de la línea de alta velocidad de Madrid a Lleida y Tarragona (2003-06) y de los trenes AVE Talgo de la series 102 (2005), 112 (2010) y Siemens 103 (2007), ha aumentando de forma notable la cantidad de energía devuelta a la red.

La cantidad de energía eléctrica (medida en la entrada de la subestación de tracción) devuelta a la red en una explotación de alta velocidad con una densidad de tráfico media puede ser de alrededor del 6,3% de la energía importada de la red, y en el año 2009 se estima que pudieron generarse 105 GWh por el frenado de los trenes en la red española de alta velocidad. De ellos, después de deducir la parte empleada en auxiliares de los propios trenes (10%) y en auxiliares de las instalaciones fijas y la energía consumida por otros trenes (29%), así como las pérdidas en el transporte y conversión, puede estimarse un potencial de devolución de energía neta devuelta a la red del orden de 61 GWh al año.

Debe señalarse que, en la actualidad, la energía devuelta a la red pública por los ferrocarriles no es remunerada, por lo que el sistema ferroviario no encuentra estímulos o “señales” económicas para realizar este tipo de aprovechamiento o instalar subestaciones bidireccionales, lo que implica que se disipan cantidades importantes de energía en el freno reostático.

Ventajas de freno regenerativo y la devolución a la red.- La generación de energía eléctrica por el frenado de los trenes y su devolución a la red eléctrica pública tiene las siguientes ventajas:

- No supone emisiones, ni consumo de energía procedente de fuentes no renovables.
- La cantidad de energía aportada a la red pública pueden ser conocida con un razonable grado de aproximación.
- El coste marginal de esta generación es nulo.

Por ello, el aumento de la cantidad de energía exportada a la red conducirá a una mejora de la eficiencia del sistema eléctrico y, a la vez, una reducción de las emisiones asociadas a la generación. Por otra parte, la integración de esta energía en el mercado eléctrico evitará la casación en el mercado de tecnologías menos eficientes.

Almacenamiento.- Cuando la energía generada por el freno no puede ser aprovechada por el propio tren o por otros trenes, ni pueden ser devuelta a la red pública, es posible almacenarla para su uso en otro momento: o bien en el mismo tren (almacenamiento embarcado); o bien por otros trenes (almacenamiento en tierra). El almacenamiento de energía de frenado no sólo se emplea para el ahorro de energía, sino también para reducir los puntas de potencia requeridas por el sistema ferroviario y para reducir las caídas de tensión entre subestaciones muy distantes.

El almacenamiento puede ser en baterías (como en los tranvías Citadis Alstom de Niza), en volantes de inercia embarcados (como en los tranvías de Rotterdam y en la red suburbana de París), o en condensadores (como el MITRAC Energy Saver que Bombardier ha instalado en 2003 en el tranvía Mannheim (Alemania). También puede ser en tierra, en volantes de inercia (como en la línea 1 del Metro de Londres o el proyecto ACE2 de Adif) o en supercondensadores (Metro de Madrid).

El almacenamiento de energía excedente del freno regenerativo es, sin embargo, muy poco utilizada, y existen aún grandes incertidumbres sobre la mejor tecnología a emplear en cada caso y la estrategia de su combinación con otro tipo de acciones, así como sobre el mejor destino de este almacenamiento (ahorro de energía, reducción de puntas, alimentación de tramos con subestaciones separadas).

Dificultades para el aprovechamiento del freno regenerativo.- Pese a sus ventajas, diversas dificultades impiden un mayor y más extendido aprovechamiento del freno regenerativo. Entre ellas, pueden citarse la configuración de las redes eléctricas, que limitan las zonas físicas en que

puede aprovecharse la energía por otro tren; las escasas posibilidades de devolución de la energía excedente a la red pública (que además no está remunerada); y la diversidad de tecnologías y escasa experiencia práctica en la acumulación de esta energía, ya sea en tierra o embarcada, ya sea en acumuladores estáticos o cinemáticos. Por otra parte, existen numerosos factores que hacen que los procesos de arranque y frenado no estén sincronizados entre sí, por lo que en vez de aprovecharse la energía del freno, se producen “puntas” de consumo eléctrico que además aumentan las necesidades de dimensionamiento del sistema eléctrico en términos de potencia instalada.

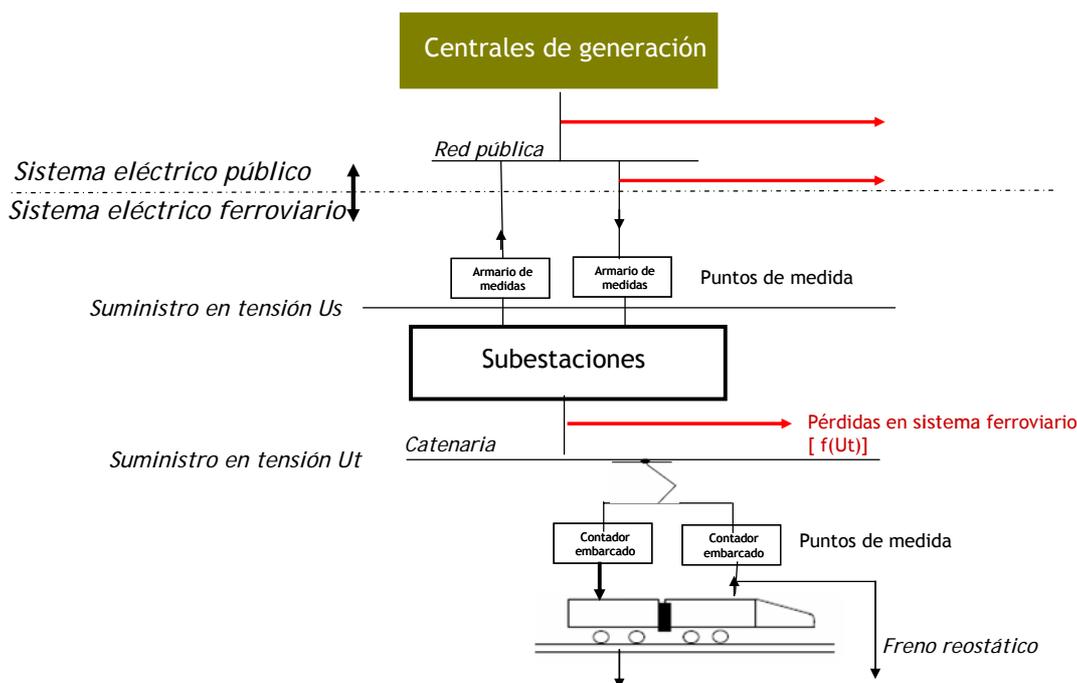
3. CUANTIFICACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL FERROCARRIL

Se han evaluado de forma homogénea los consumos eléctricos de tracción de las distintas empresas ferroviarias que operan en España.

Es importante señalar que la medida de la energía se realiza a la entrada de la subestación; es decir, las pérdidas entre la central generadora y las subestaciones, y entre la salida de la subestación y los trenes no se encuentran descritas.

En la siguiente figura se observa, de forma general, los puntos de medida de energía para el sistema eléctrico ferroviario, lo que es relevante ya que del análisis de los flujos se podrán obtener conclusiones de las medidas.

Figura 1. Puntos de medida de energía



Fuente: García Álvarez, A. (2008)

En la tabla siguiente está consolidado el consumo de energía, tanto de gasóleo como de energía eléctrica, por todas las empresas del ferrocarril español en un año tipo semejante a 2007.

La razón de no emplear los datos de 2007 responde a que a partir de 2008-2009 los consumos de los trenes de alta velocidad crecen de forma importante sobre los consumos de 2007, y a partir de 2009 siguen un crecimiento más vegetativo. Por ello, para alta velocidad se realiza la estimación de un año tipo, y para el resto se emplean los datos de 2007 o el año más próximo conocido.

Las empresas ferroviarias que se han considerado son: Renfe Operadora, Adif, Metro de Madrid, Metro de Barcelona, FGV, FGC y Feve.

Ha sido necesario llevar a cabo un proceso de homogenización de los datos publicados en las Memorias de las distintas empresas que operan dentro del ámbito nacional, pues en muchos

casos, éstas presentan sus datos de forma diferente. Así, se pueden encontrar publicaciones de datos físicos, o bien solamente económicos; incluso teniendo ambos, no resulta evidente si los datos económicos incluyen sólo el precio de la energía o si reflejan, además, la cuota de potencia, o en qué punto está medida la energía.

3.1. Energía a la salida de las centrales generadoras

Las cifras de la energía consumida por las diferentes empresas, se presentan medidas en el punto de suministro y los suministros se realizan a diferentes tensiones. Por ello, es preciso aplicar diversos coeficientes para recoger las pérdidas que se producen entre la salida de la central generadora de energía y el punto de suministro. Solo después de aplicar estos coeficientes se puede sumar la energía eléctrica de todos los consumidores para obtener la energía eléctrica requerida a las centrales de generación del sistema peninsular.

Los coeficientes de pérdidas en el sistema público peninsular en función del nivel de suministro están recogidos de Pilo et. al (2008) y son los que figuran en la segunda columna de la tabla:

Tabla 1. Coeficientes de pérdidas en el sistema eléctrico

Coeficiente de pérdidas (en %), incluyendo transporte y distribución	Tensión acometida	Coef. Distrib + Transp	Coef. Red Ferroviaria	Coef. Total
2x25kV CA	145kV < V	101.5%	101.8%	103.3%
1x25kV CA	145kV < V	101.5%	101.1%	102.7%
3000V CC (Cercanías)	1kV < V < 36kV	105.9%	103.0%	109.1%
3000V CC (tráfico normal)	1kV < V < 36kV	105.9%	104.4%	110.6%
1500V CC	1kV < V < 36kV	105.9%	105.0%	111.2%
750V CC	1kV < V < 36kV	105.9%	107.5%	113.9%
600V CC	1kV < V < 36kV	105.9%	111.0%	117.6%

Fuente: Pilo et al. (2008)

Después de aplicar estos coeficientes, el resultado de los consumos, medidos a la entrada de las centrales de generación es el siguiente:

Tabla 2. Desglose de los flujos de energía dentro del sistema ferroviario

DESGLOSE DE LOS FLUJOS DE ENERGIA DENTRO DEL SISTEMA FERROVIARIO									
	Energía eléctrica a la entrada de la subestación (GWh)	Tensión típica de suministro al tren (kV)	Coef. Pérdidas subestacion y c atenaria	Energía eléctrica importada en pantógrafo proc subestacion (GWh)	Energía eléctrica generada freno (GWh)	Energía elec. Resota. por no reg. (GWh)	Energía regenerada aprovechada otros trenes (GWh)	Energía eléctrica devuelta a la red (GWh)	Energía eléctrica disipada en reostático por falta cons.
TOTAL RENFE 2x25 y 25 kV (a.c.)	555,8	25,00	1,015	562,4	88,9	16,6	12,8	76,1	0,0
Renfe (Grandes Líneas)	150,1	3,00	1,044	143,8	9,1	4,5	2,3	0,0	6,8
Renfe (Regionales No av)	78,6	3,00	10,044	7,8	2,0	2,0	0,0	0,0	2,0
Renfe (Cercanías)	746,2	3,00	1,03	724,4	386,4	58,0	180,6	0,0	205,7
Renfe (Cargas)	581,7	3,00	1,044	557,2	55,7	52,9	0,3	0,0	55,5
TOTAL RENFE d.c.	1.556,7			1.433,3	453,1	117,4	183,2	0,0	270,0
Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya	64,6	1,50	1,05	61,5	32,8	0,0	16,4	0,0	16,4
Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (Sin tranvi	46,3	1,50	1,05	44,1	15,5	0,0	3,9	0,0	11,7
Eusko Trenbideak	36,4	1,50	1,05	34,7	12,2	0,0	3,1	0,0	9,2
FEVE sin regeneracion	11,5	1,50	1,05	10,9	3,0	3,0	0,0	0,0	3,0
FEVE con regeneracion	14,0	1,50	1,05	13,3	3,7	0,0	0,9	0,0	2,8
Ferrocarril de Söllner	1,8	0,75	1,05	1,7	0,5	0,9	0,2	0,0	0,3
TOTAL FERROCARRILES VIA METRICA Y AUTONOMIC	174,5			166,2	67,8	3,9	24,5	0,0	43,3
TOTAL FERROCARRIL	2.287,0			2.161,9	609,8	137,9	220,4	76,1	313,3
Metro de Madrid (600 Vcc)	307,1	0,60	1,111	276,4	197,4	0,0	138,2	0,0	59,2
Metro de Madrid (1500 Vcc)	192,7	1,50	1,05	183,6	131,1	0,0	91,8	0,0	39,3
Ferrocarril Metropolità de Barcelona (con reg.)	175,9	1,20	1,05	167,6	119,7	0,0	83,8	0,0	35,9
Ferrocarril Metropolità de Barcelona (sin reg.)	6,7	1,20	1,05	6,4	4,6	4,6	0,0	0,0	4,6
Metro Bilbao	51,7	1,50	1,05	49,3	35,2	0,0	24,6	0,0	10,6
TOTAL METRO	734,1			683,1	488,0	4,6	338,4	0,0	149,6
Tranvía de Barcelona (TranBaix y Trambesos)	10,5	0,75	1,075	9,8	9,11	0,00	5,5	0,00	3,6
Tranvía de Parla	2,1	0,75	1,075	2,0	1,67	0,00	0,9	0,00	0,8
Tranvías de Valencia y Alicante (con reg)	8,1	0,75	1,075	7,5	6,42	0,00	3,5	0,00	2,9
Tranvías de Valencia y Alicante (sin reg)	6,2	0,75	1,075	5,8	4,98	4,98	0,0	0,00	5,0
Tranvia de Tenerife (L1)	5,2	0,75	1,075	4,8	4,15	0,00	2,3	0,00	1,9
Tranvías de Madrid	7,1	0,75	1,075	6,6	5,66	0,00	3,1	0,00	2,5
Tranvía de Bilbao	7,0	0,75	1,075	6,5	5,58	0,00	3,1	0,00	2,5
TOTAL TRANVIAS	46,2			43,0	37,6	5,0	18,4	0,0	19,2
TOTAL GENERAL	3.067,4			2.888,0	1.135,3	147,4	577,1	76,1	482,1

Fuente: García Álvarez, A. (2008)

Tabla 3. Consumos de energía por el ferrocarril

CONSUMOS DE ENERGIA POR EL FERROCARRIL EN 2014	GASÓLEO			ENERGÍA ELÉCTRICA			% Sobre el total
	Gasóleo Tracción (Mlitros)	Gasóleo UDT (Mlitros)	Total gasóleo (Mlitros)	E.eléctrica Tracción (GWh)	E.eléctrica UDT (GWh)	Total e.eléctrica (GWh)	
Renfe (AV Madrid-Barcelona y Valladolid)			0	345,4		345	8,62
Renfe (AV Madrid-Sevilla y Málaga)			0	217,0		217	5,42
Renfe (Grandes Líneas)			0	150,1		150	3,75
Renfe (Regionales No alta velocidad)			0	78,6		79	1,96
Renfe (Cercanías)			0	1.018,0		1.018	25,40
Renfe (Cargas)			0	573,1		573	14,30
Renfe (Calderines)	12,0						0,00
Renfe (Talleres)			0		48,6	49	1,21
Renfe (no distribuido)	80,7	0,1	81	8,6	84,5	93	2,32
Renfe (total)	92,7	0,1	93	2.390,9	133,1	2.524	62,99
Otros operadores mercancías sobre red Adif	0,7	0,0	1	0,0	0,0	0	0,00
Adif (trenes trabajo)	0,5		0			0	0,00
Adif (maniobras)	3,6		4			0	0,00
Adif (estaciones)			0		149,3	149	3,73
Adif (no distribuido)		1,9	2	29,7	25,0	55	1,37
Adif (total)	4,0	1,9	6	29,7	174,3	204	5,09
Renfe, otros operadores y Adif	97,3	2,0	99	2.420,5	307,5	2.728	68,08
Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya			0	64,6	22,1	87	2,16
Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana (Sin tranvías)	0,5		1	46,3	18,2	64	1,61
Eusko Trenbideak				36,4	0,3	37	0,92
FEVE	10,5		11	25,5	8,7		0,00
Ferrocarril de Sóller	0,0	0,0	0	1,8	0,2	2	0,05
TOTAL FERROCARRIL	108,4	2,0	110	2.595,1	357,0	2.918	72,82
Metro de Madrid (600 Vcc)	0,0	0,0	0	307,1	130,9	438	10,93
Metro de Madrid (1500 Vcc)	0,0	0,0	0	192,7	82,2	275	6,86
Ferrocarril Metropolità de Barcelona	0,0	0,0	0	182,6	61,0	244	6,08
Metro Bilbao	0,0	0,0	0	51,7	17,3	69	1,72
TOTAL METRO	0,0	0,0	0	734,1	291,4	1.026	25,59
Tranvía de Barcelona (TranBaix y Trambesos)	0,0	0,0	0	10,5	2,3	13	0,32
Tranvía de Parla	0,0	0,0	0	2,1	0,5	3	0,06
Tranvías de Valencia y Alicante	0,0	0,0	0	14,3	3,8	18	0,45
Tranvía de Tenerife (L1)	0,0	0,0	0	5,2	0,9	6	0,15
Tranvías de Madrid	0,0	0,0	0	7,1	6,8	14	0,35
Tranvía de Bilbao	0,0	0,0	0	7,0	3,0	10	0,25
TOTAL TRANVÍAS	0,0	0,0	0	46,2	17,4	64	1,59
TOTAL GENERAL	108,4	2,0	110,3	3.375,4	665,8	4.007	100,00

Fuente: García Álvarez, A. (2008)

El origen de cada uno de los datos o la metodología empleada para su estimación está recogido en la tabla siguiente:

Tabla 4. Origen de datos y metodología

	A	B	C	D	E	F
	Gasóleo Tracción (Mlitros)	Gasóleo UDT (Mlitros)	Total gasóleo (Mlitros)	E.eléctrica UT	E.eléctrica UDT	Total e.eléctrica (GWh)
1				2008+176		
2				2.008		
3				REPARTO D10		
4				REPARTO D10-37		
5				REPARTO D10		
6				REPARTO D10		
7	2007			REPARTO D10		
8				REPARTO D10	2.008	
9		2007		REPARTO D10	E10-E8	
10	2.007	2.007		2.007	2.007	
11	2.007	2.007		2.007	2.007	
12	2.007					
13	2.007					
14					2.008	
15		2.007			E16-E14	
16	2.007	2.007		2.007	2.007	
17	A10+A11+A16	B9+B10+B15	C10+C11+C16	D10+D11+D16	E10+E11+E16	F10+F11+F16
18				2.007	2.007	2.007
19	2.007			2.007	2.007	2.007
20				D19	E19	2.007
21	2.006		2.006	2.006	L21*M18/M17	F20
22						2.006
23	SUMA (A17:A22)	SUMA (B17:B22)	SUMA (C17:C22)	SUMA (D17:D22)	SUMA (E17:E22)	SUMA (F17:F22)
24				2.007	N24-L24	2.007
25				2.007	N25-L25	2.007
26				2.007	2.007	2.007
27				N27*L26/N26	N27-L27	2.005
28						
29				2.007	2.007	2.007
30				L29/5	M29/5	
31				2.007	2.007	2.007
32				ML1*5	ML1*5	
33				estimado	estimado	
34				estimado	estimado	
35						
36						

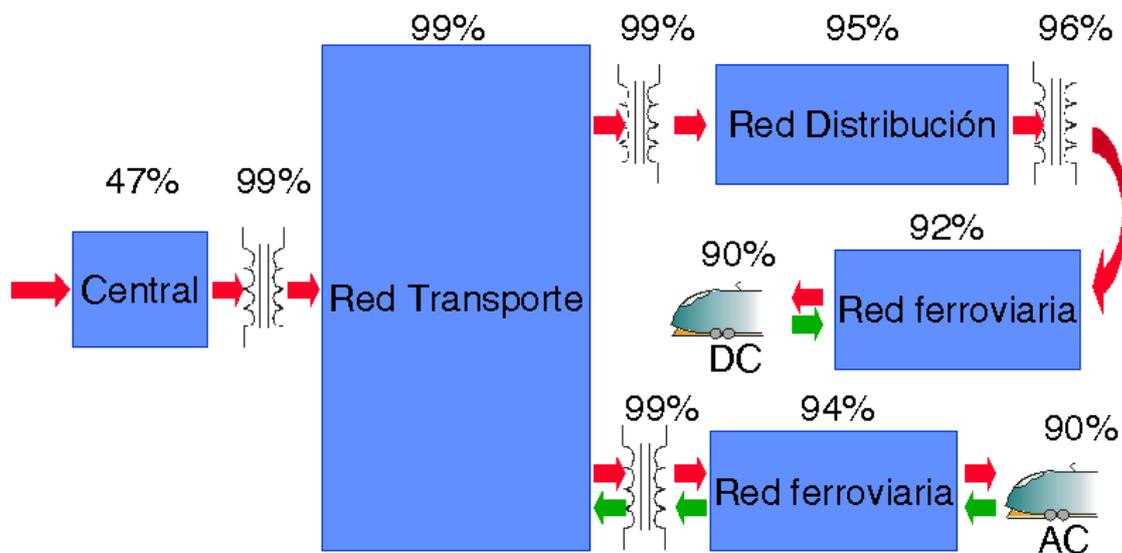
Fuente: García Álvarez, A. (2008)

3.2. Flujos internos de la energía

El consumo de energía se mide a la entrada de la subestación, por lo que las pérdidas “aguas abajo” se producen en la subestación y en la catenaria. Las pérdidas “aguas abajo” son función del nivel de tensión de suministro a los trenes: a más tensión menos pérdidas.

La figura muestra las pérdidas de la energía en forma primaria hasta el pantógrafo, se observa cómo las mayores pérdidas se producen en las centrales de generación y en la red ferroviaria.

Figura 2. Eficiencia energética del ferrocarril electrificado



Fuente: Jornadas técnicas. Estrategias de ahorro y eficiencia energética en el transporte ferroviario

Se plantea la posibilidad de devolver energía a la red pública si el tren dispone de freno regenerativo, la línea está electrificada en alterna, la subestación permite la devolución de energía y no está circulando ningún tren que la requiera.

La aplicación del freno dinámico tiene como objetivo y consecuencia frenar al tren, pero también produce el efecto de generar energía eléctrica, que tiene su importancia en el balance energético del ferrocarril.

El freno regenerativo permite el aprovechamiento y devolución de la energía generada en el frenado. Los trenes que están dotados con este sistema de freno intentan utilizar la energía, en primer lugar, para la alimentación de los servicios auxiliares. Si los servicios auxiliares requieren menos energía de la que el tren está generando en el proceso de frenado, la devuelve a catenaria. Si ésta la acepta, puede servir para el movimiento de otros trenes o para su devolución a la red pública.

La generación de energía eléctrica por el frenado de los trenes y su devolución a la red eléctrica pública tiene las siguientes ventajas:

- No supone emisiones, ni consumo de energía procedente de fuentes no renovables.
- La energía aportada a la red pública pueden ser conocida con un razonable grado de aproximación.
- El coste marginal de esta generación es nulo.

Pese a sus ventajas, diversas dificultades impiden un mayor y más extendido aprovechamiento del freno regenerativo. Entre ellas, pueden citarse la configuración de las redes eléctricas, que limitan las zonas físicas en que puede aprovecharse la energía por otro tren; las escasas posibilidades de devolución de la energía excedente a la red pública (que además no está remunerada); y la diversidad de tecnologías y escasa experiencia práctica en la acumulación de esta energía, ya sea en tierra o embarcada, ya sea en acumuladores estáticos o cinemáticos. Por otra parte, existen numerosos factores que hacen que los procesos de arranque y frenado no estén sincronizados entre sí, por lo que en vez de aprovecharse la energía del freno, se producen puntas de consumo eléctrico que además aumentan las necesidades de dimensionamiento del sistema eléctrico.

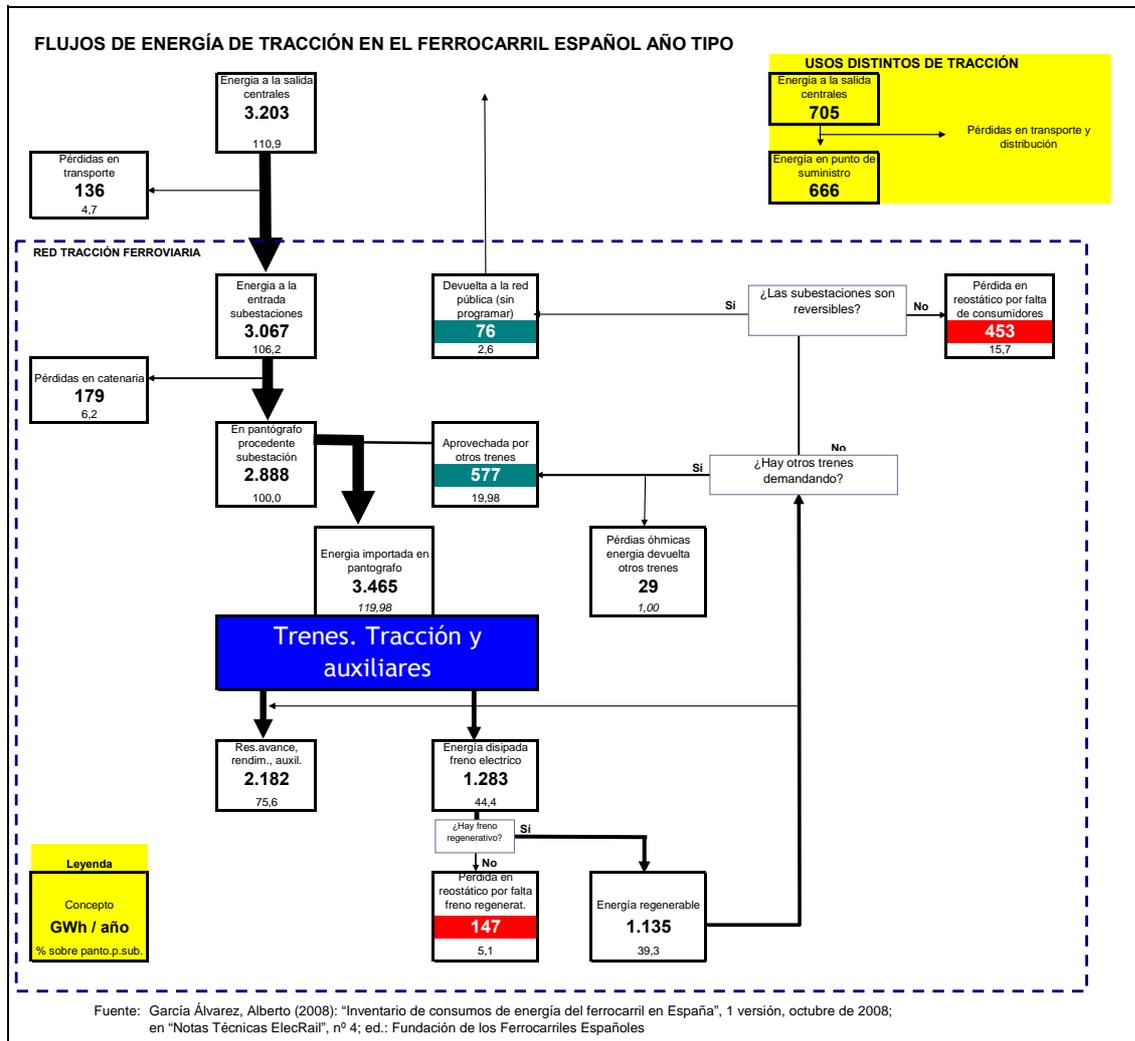
De la aplicación de los coeficientes de recuperación y de su uso que se han estimado como más razonables, resultan los flujos de consumo que se recogen en la tabla:

Tabla 5. Flujos de energía por tipos de ferrocarril

FLUJOS DE ENERGIA POR TIPOS DE FERROCARRIL (VALORES ABSOLUTOS EN GWh AL AÑO)							
	Entrada sub. Sin minorar	Importada en pantografo proced subes.	Generada en freno	Aprovechad a en otros trenes	Devuolta a la red publica	Perdida en Reostatico por falta consumos	Perdida por falta freno regenerativo
Ferrocarriles de alta velocidad (25 kV)	555,8	562,4	88,9	12,8	76,1	0,0	16,6
Ferrocarriles conven. larga y media distancia	228,8	151,6	11,0	2,3	0,0	8,8	6,5
Ferrocarriles cercanias 3 kV	746,2	724,4	386,4	180,6	0,0	205,7	58,0
Ferrocarriles mercancias	581,7	557,2	55,7	0,3	0,0	55,5	52,9
Ferrocarriles autonomicos y v. metrica (<1,5 kV)	174,5	166,2	67,8	24,5	0,0	43,3	3,9
Metros	734,1	683,1	488,0	338,4	0,0	149,6	4,6
Tranvias	46,2	43,0	37,6	18,4	0,0	19,2	5,0
TOTAL	3.067,4	2.888,0	1.135,3	577,1	76,1	482,1	147,4
FLUJOS DE ENERGIA POR TIPOS DE FERROCARRIL (VALORES RELATIVOS)							
Ferrocarriles de alta velocidad	98,8	100,0	15,8	2,3	13,5	0,0	2,9
Ferrocarriles convencionales de larga y media distanc	150,9	100,0	7,3	1,5	0,0	5,8	4,3
Ferrocarriles cercanias 3 kV	103,0	100,0	53,3	24,9	0,0	28,4	8,0
Ferrocarriles mercancias	104,4	100,0	10,0	0,0	0,0	10,0	9,5
Ferrocarriles autonomicos y via metrica	105,0	100,0	40,8	14,7	0,0	26,1	2,3
Metros	107,5	100,0	71,4	49,5	0,0	21,9	0,7
Tranvias	107,5	100,0	87,4	42,8	0,0	44,7	11,6
TOTAL	106,2	100,0	39,3	20,0	2,6	16,7	5,1

Fuente: García Álvarez, A. (2008)

Figura 3. Flujos de energía de tracción en el ferrocarril español año tipo



Fuente: García Álvarez. A (2008)

4. IDENTIFICACIÓN DE LAS ACCIONES ORIENTADAS A LA REDUCCIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA DEL FERROCARRIL

Los parámetros del tren sobre los que se puede actuar en el momento del diseño y que inciden en el consumo de energía son muy numerosos. De todos ellos, los que tiene más incidencia en el consumo específico de energía (por unidad de capacidad) son:

- Masa del tren (y masas rotativas equivalentes) por unidad de capacidad.
- Sección transversal y superficie mojada del tren por unidad de capacidad.
- Coeficiente de transmisión de calor K de la caja del tren.
- Existencia de un sistema de reducción la entrada de aire en el tren.
- Coeficiente de rozamiento entre rueda y carril y empleo de ejes orientados radialmente.
- Número de bogies y de ejes.
- Rendimientos del motor y de la cadena de tracción.

Además, y aún cuando no es algo que incida de forma directa en el consumo, debe señalarse que una buena accesibilidad (que se logra con puertas numerosas, anchas y situadas a la altura del andén) reduce el tiempo de parada. Por ello, para el mismo tiempo de viaje, reduce el consumo de energía.

Relación entre tamaño y eficiencia del tren

Los trenes tienen un menor consumo por unidad de capacidad (por plaza o por superficie útil) cuanto más grande sea el tren; es decir, cuanto mayor sea su capacidad. Se puede afirmar que hay “economías de tamaño” del tren.

Esta propiedad es consecuencia de que cuanto mayor sea el tren, más se “diluyen” ciertas masas y superficies que son necesarias para tren, pero son que independientes de su tamaño (por ejemplo, las cabinas de conducción, o la sección transversal)

Hay ciertas variables (por ejemplo la masa del tren) cuya reducción tiene un efecto en la reducción del consumo de energía, pero si la reducción de la masa es consecuencia de una reducción del tamaño del tren, se puede perder el efecto positivo, precisamente por estas “economías de tamaño”. Por ello, normalmente para reducir el consumo específico lo más correcto será reducir el inductor específico (por ejemplo, la masa por plaza estándar o por metro cuadrado útil; o la sección transversal por plaza).

Mejora de las variables que inciden en el consumo

Reducción de la masa específica de los trenes

En el sistema ferroviario, los vehículos tienen una masa por plaza muy superior a la que se observa en el resto de los modos de transporte. En un tren, la tara por plaza ofrecida suele

estar en el entono de los 800 a 1.200 kilogramos, frente a los 200-300 kilogramos del coche, los 500 kilogramos del autobús o los 300 kilogramos por plaza del avión,

En los trenes mercancías, las cosas no son muy diferentes. En el caso de los trenes, la tara de tren por cada tonelada de capacidad es del orden de 800 kilogramos, frente a los 600 kilogramos del camión.

Además, en el caso de los vehículos ferroviarios, las masas rotativas equivalentes son proporcionalmente mayores que en las de cualquier otro vehículo de transporte, debido a la elevada masa de las ruedas y de los ejes.

Sobre la incidencia de la masa del vehículo en consumo de energía y las emisiones del transporte ferroviario, pueden formularse tres reflexiones:

- Tiene una incidencia especialmente elevada en el caso del transporte urbano y suburbano, con elasticidades de +0,6 y 0,7. La reducción de la masa es importante en los servicios tipo tranvía y tipo cercanías; y es menor en el caso de los servicios de alta velocidad.
- La importancia de la masa en el consumo tiende a disminuir cuando los trenes equipan freno regenerativo y cuando se implantan medidas para el aprovechamiento de la energía generada en el frenado.
- La masa de los viajeros no tiene, en general, incidencia en el consumo energético del tren debido a la elevada proporción entre masa del vehículo y masa de los viajeros. En los servicios de mercancías, y en algunos casos en tranvías, metros y cercanías, sí que puede ser relevante, aunque no tanto como en otros modos de transporte.

La masa incide en el consumo directamente e indirectamente de varias formas:

- La masa aumenta las resistencias mecánicas al avance, tanto en recta (el término independiente de la velocidad en la fórmula de la resistencia al avance puede considerarse proporcional a la masa con constantes de valor 1 a 2 decanewtons por tonelada), como en curva (la resistencia en curva puede considerarse proporcional a la masa con coeficiente de 0,008 a 1,4 decanewtons por tonelada según líneas (véase "Dinámica de los trenes de alta velocidad, García Álvarez, 7^a edición, 2009).
- La masa aumenta la energía cinética que el tren necesita absorber para acelerar y, por lo tanto (y esto es lo relevante desde el punto de vista del consumo), también aumenta la energía que disipa al frenar para reducir la velocidad.
- Análogamente, la masa es proporcional a la energía potencial que el tren necesita para subir las rampas y, por lo tanto, a la que disipa al frenar en las bajadas cuando necesita hacerlo para no rebasar la velocidad máxima.
- Una mayor masa requiere una mayor potencia para tener las mismas prestaciones (velocidad, aceleración), por lo que una mayor masa de la caja de los vehículos puede suponer que la necesidad de aumentar las masas de las locomotoras o coches motores, lo que supone, además, un aumento indirecto del consumo.
- Una mayor masa supone más consumo de energía en la fabricación del vehículo, especialmente por la energía incorporada los materiales del propio vehículo. La energía empleada en la fabricación de un vehículo ferroviario puede ser del orden del 3 al 8% de la energía consumida en su vida útil.

En cuanto a las masas rotativas, un aumento de éstas supone una mayor energía cinética almacenada al acelerar y por ello, un aumento de la energía perdida en freno para reducir la velocidad.

Las pérdidas relacionadas con la energía perdida en el freno para reducir la velocidad (tanto la debida a las masas como a las masas rotativas) y la energía perdida en el freno para bajar las

pendientes pueden reducirse si el tren dispone de freno regenerativo y si existen dispositivos o procedimientos que permitan aprovechar o devolver a la red una parte o la totalidad de la energía regenerada en el freno.

Reducción de pérdidas en los servicios auxiliares

Las pérdidas de energía en los servicios auxiliares pueden reducirse de diversas formas, muchas de ellas relacionadas con la climatización de los trenes de viajeros (que es, con mucho, el mayor consumidor de energía entre los servicios auxiliares). Entre otras pueden citarse las siguientes:

- Mejora del rendimiento de los equipos auxiliares y reducción de la masa de los equipos.
- Reducción de las pérdidas de energía por transmisión al reducir el coeficiente K de transmisión del calor por la caja del vehículo.
- Reducción de cantidad de aire que entra el tren para su ventilación, ya que este aire debe ser acondicionado (cambio de humedad y de temperatura).
- Empleo de “bombas de calor” para la calefacción.
- Utilización del calor o frío del aire que se expulsa del tren en el proceso de renovación.

Reducción de las resistencias aerodinámicas

Las resistencias aerodinámicas al avance (que conllevan un consumo de energía) tienen especial importancia en alta velocidad. Para reducir el consumo de energía asociado, pueden adoptarse varias medidas, entre ellas, las siguientes:

- Reducción de la sección transversal de la cabeza y cola del tren.
- Reducción de la superficie mojada del tren (llamada piel del tren). Esta superficie es el producto del perímetro mojado (dos veces la altura más la anchura del tren) por la longitud del tren.
- Mejora de la forma aerodinámica de la cabeza y de la cola del tren
- Mejora de la calidad superficial y reducción de las discontinuidades (pasos entre coches, etc.)
- Reducción del número de pantógrafos en captación.
- Reducción de la cantidad de aire que entra en el tren (cuya masa debe ser acelerada).

Uso de arquitecturas eficientes del tren

La arquitectura del tren incide de forma importante en el consumo de energía del tren. Hay arquitecturas más eficientes que otras.

Los trenes autopropulsados son más eficientes que los remolcados. Los trenes autopropulsados resultan, en general, más eficientes que los remolcados por locomotora (especialmente para tamaños pequeños del tren). La razón principal es que el peso de la locomotora penaliza el consumo del tren. La masa por unidad de capacidad es normalmente más reducida en los trenes autopropulsados. También son más reducidas en estos trenes la sección transversal por plaza y la “piel del tren” por plaza.

Los trenes de caja ancha y de dos pisos son más eficientes.- Para vehículos de más de 50 metros de longitud normalmente tiene más importancia la resistencia aerodinámica de fricción que la presión, por lo que configuraciones de tren de caja ancha y/o de dos pisos son más

eficientes que las de dimensiones convencionales. Y ello es así porque (para la misma capacidad) aumentan la anchura y/o la altura del tren (y con ellos la sección transversal), pero se reduce la longitud en una proporción mayor, lo que provoca una reducción importante en la *piel del tren* cuyo efecto positivo en el consumo es siempre mayor que el efecto negativo del aumento de la sección transversal.

4.1. Aplicación de materiales compuestos al ferrocarril

La utilización de materiales compuestos en el sector del ferrocarril, incluyendo estructuras resistentes primarios, debería aprovechar las experiencias previas y conocimientos del mundo aeronáutico, dadas las similitudes entre ambos medios de transporte. El uso de materiales compuestos presenta las siguientes ventajas principales: versatilidad de diseño, disminución de número de piezas y uniones, disminución de peso, consumo energético y emisiones, fabricación automática, resistencia a impactos e incremento de carga útil.

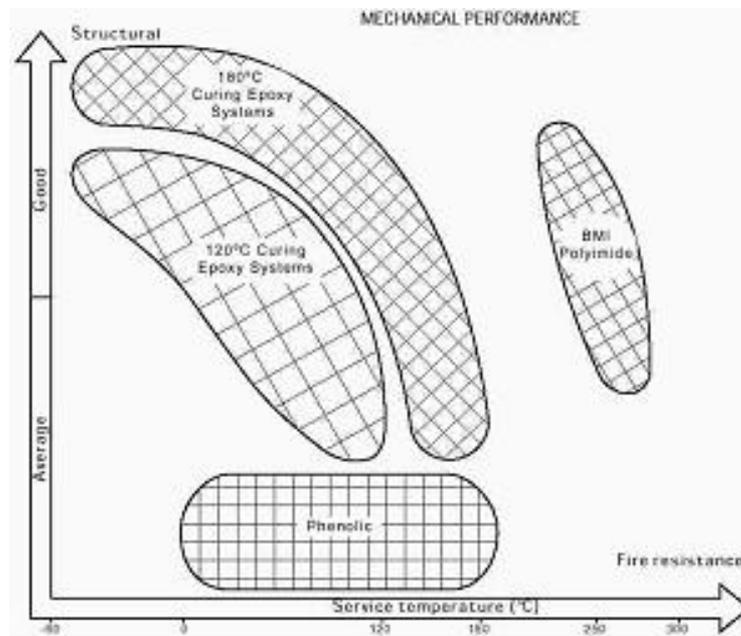
Los materiales compuestos a utilizar en el sector del ferrocarril serán “a medida”, según las solicitudes de cada estructura:

- Resinas fenólicas (resistencia al fuego)
- Resinas poliimidas (resistencia al impacto)
- Resinas de poliéster, viniléster, epoxy con retardantes al fuego
- Utilización sobre todo de fibra de carbono para piezas estructurales.

Ejemplos de aplicaciones en el ferrocarril:

- Vagón con sándwich Nómex/aluminio + epoxy + fibra de vidrio y carbono.
- Vagón con vinilester + fibra de vidrio + espuma de Poliuretano
- Cabina de epoxy + núcleo de PVC

Figura 12. Comportamiento mecánico de diferentes resinas.



Fuente: De Miguel, R. et al. (2008)

4.2. Acumulación de energía embarcada

Existen diversos sistemas de almacenamiento de energía como pueden ser: almacenamiento de aire comprimido (CAES, Compressed Air Energy Storage), bombeo hidráulico, baterías de diversos tipos, volantes de inercia, ultracapacidades... Además de éstas, no debe perderse de vista el Hidrógeno como vector energético.

Entre las diversas posibilidades de almacenamiento de energía que pueden aplicarse en vehículos ferroviarios tenemos como principales los volantes de inercia, las ultracapacidades y las baterías debido al compromiso entre tamaño, peso y capacidad energética.

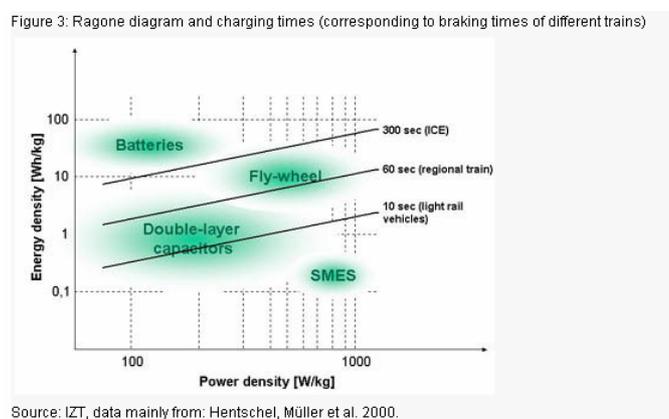
Comparativa entre los diferentes sistemas de acumulación

Es evidente que cada sistema de almacenamiento de energía tiene su aplicación bien definida en cuanto a densidades de energía, densidades de potencia, ciclado y vida del componente.

El coste, la seguridad y el tamaño son también factores a tener en cuenta en cada aplicación.

La Figura 4 sitúa los sistemas de almacenamiento en la aplicación ferroviaria teniendo en cuenta la densidad de potencia y densidad de energía de cada una de ellas.

Figura 4. Situación de los sistemas de almacenamiento de energía con respecto a la densidad de energía y potencia



Fuente: De Miguel, R. et al. (2008)

La tabla resume las principales ventajas e inconvenientes de las tecnologías consideradas en esta nota técnica y la Tabla 7 resume las prestaciones de las diferentes tecnologías.

Tabla 6. Ventajas e inconvenientes de las distintas tecnologías

	Baterías	FlyWheel	Ultracapacidades
Ventajas	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidad de energía - Auto descarga larga - Control sencillo 	<ul style="list-style-type: none"> - Alta densidad de energía - Alto N° de ciclos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Media densidad de energía - Alta potencia - Alto N° de ciclos - Auto descarga media - Control sencillo
Inconvenientes	<ul style="list-style-type: none"> - Bajo N° de ciclos - Potencia baja 	<ul style="list-style-type: none"> - Sistema complejo - Potencia pico limitada, dependiente del nivel de energía. - Auto descarga rápida, depende de auxiliares - Control complejo 	<ul style="list-style-type: none"> - T de trabajo < 60°C. - T de almac. <70°C.

Fuente: De Miguel, R. et al. (2008)

Tabla 7. Comparativa de prestaciones de las diferentes tecnologías

	Baterías	FlyWheel	Ultracapacidades
T carga	1 a 5 horas	1 minuto	0.3 a 30 segundos
T descarga	0.3 a 3 horas	1 minuto	0.3 a 30 segundos
Energía (Wh/kg)	10 a 100	5 a 15	1 a 5
Potencia (W/kg)	<1000	>1000	10000
Ciclos	1000	1.*10 ⁷	1.*10 ⁶
Eficiencia Carga/Descarga	0.7 a 0.85	0.85 a 0.92	0.85 a 0.98
Vida máxima	<5 años	>15 años	>5-10 años
Refrigeración	Agua	Agua	Forzada, Aire

Fuente: De Miguel, R. et al. (2008)

Aplicaciones de los sistemas de acumulación embarcados

Vehículos eléctricos

Algunas aplicaciones se pueden resolver en las propias subestaciones. Sin embargo, en función del tipo de red, explotación o vehículo, puede ser más recomendable instalar el sistema de acumulación embarcado.

- Regeneración de energía. Se puede regenerar hasta el 40% de la energía consumida.

- Vehículo sin catenaria. Bajo impacto ambiental, infraestructura más económica. Es una aplicación orientada a tranvías.
- Reducción de picos de potencia hasta un 50%.
- Estabilización del voltaje y menores pérdidas de conducción: menos subestaciones, más vehículos por subestación, más prestaciones si la subestación es la limitante.

Vehículos Diesel-Eléctricos híbridos

En otro tipo de vehículos se pueden lograr:

- Reducciones de consumo entre un 25 y un 40%.
- Reducción de ruido en estaciones. Se puede apagar el vehículo de forma temporal.
- Reducción de emisiones en túneles
- Utilización para arranque de motores

Combinación de sistemas de acumulación

No se deben descartar, en ningún caso, los vehículos híbridos, que pueden estar basados en tecnologías asentadas (como puede ser el diesel o gas) o las posibilidades que puede dar la tecnología basada en el hidrógeno, unidos a algún tipo de sistema de acumulación, con el doble objetivo de mejorar las prestaciones del vehículo y optimizar el rendimiento energético del sistema.

De esta manera, la fuente primaria de energía puede aportar el valor medio de la potencia mediante un sistema de alta densidad de energía y la fuente secundaria (el sistema de acumulación) aportaría los picos y se encargaría de acumular la energía sobrante de los procesos de frenado regenerativo aumentando la eficiencia del sistema.

Existe otra posibilidad en la que podría analizarse la viabilidad de combinar dos sistemas de acumulación, utilizando de la mejor manera posible las ventajas de cada una de las tecnologías buscando el mejor rendimiento energético, máxima densidad de energía compatible con la aplicación y mínimo coste del ciclo de vida del producto.

Este tipo de combinaciones puede tener potencial en los vehículos ligeros (tranvías y metros ligeros) en los que pueden plantearse trayectos más o menos largos sin catenaria con el objeto de limitar al máximo el impacto visual.

Como posibles opciones estarían las siguientes:

- Baterías y ultracapacidades: las baterías serían la fuente primaria de energía por su alta densidad de energía y las ultracapacidades darían la dinámica al sistema garantizando la regeneración de energía con altos niveles de potencia. Una ventaja adicional de esta combinación es que solventa los imprevistos por paradas de emergencia que harían aumentar en exceso el tamaño del sistema de acumulación de menor densidad de energía específica. Se dispone de este modo de una reserva de seguridad utilizable con una potencia media o baja en casos de emergencia o puntuales (zona de mucho gradiente).
- Baterías y volante de inercia: este caso es similar al anterior y podría tener su aplicación en vehículos algo más pesados, en los que las frenadas son más largas al tener el volante de inercia mayor densidad de energía que las ultracapacidades.
- Volante de inercia y ultracapacidades: en este caso el volante de inercia haría la función de fuente primaria de energía (potencia media de tracción más auxiliares) mientras que las ultracapacidades se encargarían de aportar la dinámica propia del equipo de tracción garantizando la acumulación de energía.

4.3. Almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria

El concepto de almacenamiento juega un papel muy importante en la gestión energética pues bajo su filosofía se busca una optimización de los procesos energéticos. De esta manera, la energía sobrante de un proceso deja de ser un desecho industrial para convertirse en energía utilizable. Así procesos como el frenado de un vehículo cuya energía se disipa en forma de calor, puede ser almacenada para posteriormente ser reutilizada.

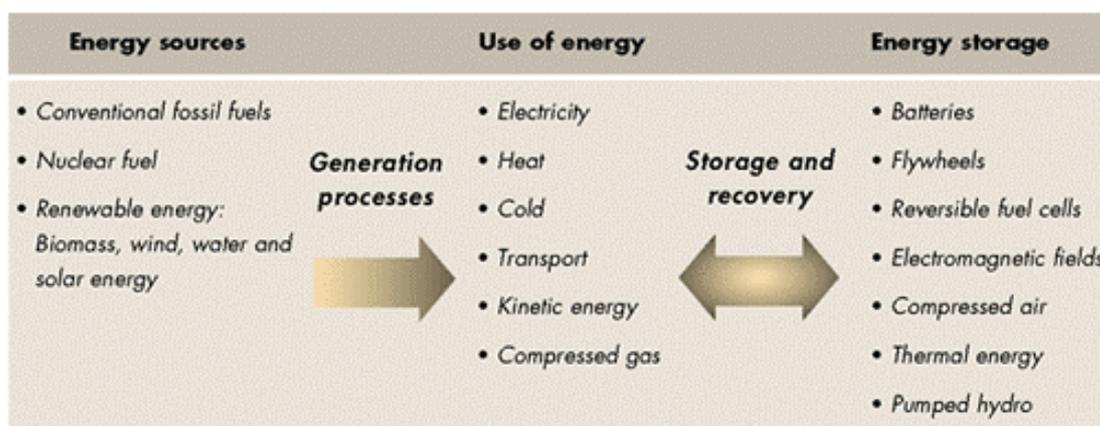
El almacenamiento de la energía eléctrica producida ocasionalmente en periodos de baja demanda y bajo coste, así como la energía generada por fuentes intermitentes como el viento o el sol, permite que se utilice posteriormente en periodos de alta demanda y alto coste o cuando no haya capacidad de generación convencional.

En el caso del sector transporte puede afirmarse que el almacenamiento de energía es una de las tecnologías más prometedoras actualmente para reducir el consumo de combustible.

Tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica

Las tecnologías actuales de almacenamiento son muy variadas, diferenciándose en múltiples factores como la energía almacenada, la potencia necesaria, el volumen disponible, la rapidez de respuesta, etc. La decisión para utilizar un sistema de almacenamiento u otro dependerá de los requisitos del uso y del coste de las soluciones alternativas.

Figura 5. Fuentes de energía primaria, transformación posterior y diferentes modos de almacenamiento



Fuente: De Miguel, R. et al. (2008)

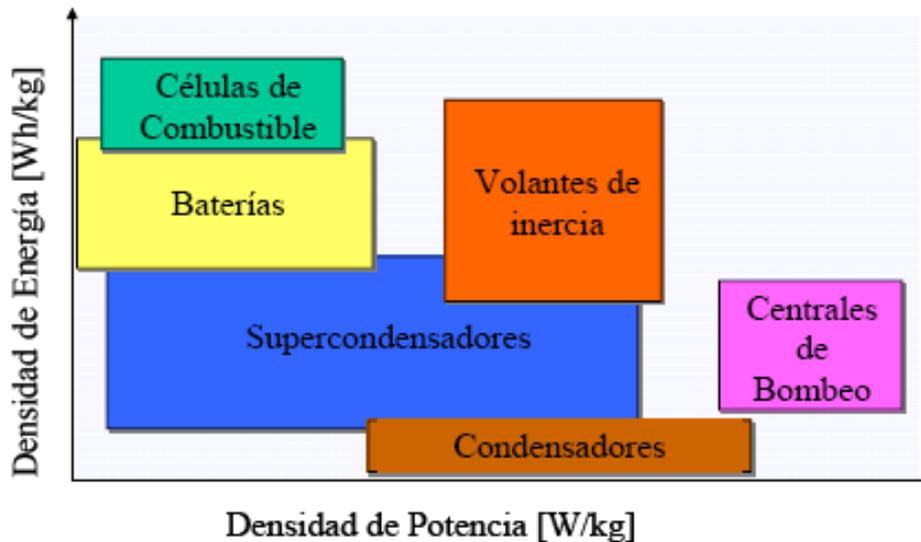
En el proyecto se han estudiado algunas de las principales tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica, en concreto las más usuales:

1. Baterías.
2. Campos electromagnéticos (SMES).
3. Células reversibles de combustible.
4. Supercondensadores.
5. Volantes de inercia.

Estas tecnologías se pueden clasificar en función de la energía específica almacenada, es decir, de la energía por unidad de masa, y en función de la potencia específica, es decir, de la energía capaz de suministrar por unidad de tiempo y por unidad de masa.

En la figura se muestra un gráfico comparativo entre algunas de las tecnologías anteriores respecto a la relación existente entre su energía específica y su potencia específica.

Figura 6. Comparación entre distintas tecnologías de almacenamiento: Relación entre la densidad de energía y densidad de potencia



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

Almacenamiento de energía eléctrica en baterías

Las baterías son los equipos de almacenamiento de energía eléctrica más usados. En ellas se obtiene el almacenamiento de energía en forma química fácilmente recuperable como electricidad. En el proceso se controlan reacciones químicas de tipo *redox* (reducciónoxidación) mediante el potencial eléctrico de los electrodos metálicos inmersos en la disolución correspondiente (proceso electroquímico).

Las ventajas principales de usar baterías se encuentran en la rápida respuesta a los cambios de la demanda de energía (tiempo de microsegundos). Tienen pérdidas en espera muy bajas y pueden, generalmente, tener alto rendimiento energético, dependiendo del uso y de los detalles de la operación.

Entre las desventajas se tiene que la mayoría de las baterías contienen materiales tóxicos, por lo que el impacto ecológico debe ser siempre considerado durante el proceso de recuperación. Otro aspecto a tener en cuenta es su reducida potencia de salida, lo que limita la utilización de estos equipos en aplicaciones en donde la demanda de potencia es pequeña, del orden de decenas de vatios.

Cabe destacar que en los últimos años las posibilidades de los dispositivos electroquímicos se han multiplicado utilizando capas de materiales activos extendidas sobre el contacto metálico, por ejemplo un polímero conductor. En este sentido, la batería de *ion litio* opera según este principio de diseño general, habiéndose convertido en una tecnología de almacenamiento de energía muy extendida, que a su vez ha suscitado un gran interés por las nuevas aplicaciones de la electroquímica para almacenamiento de energía.

Existen diversas experiencias en la aplicación de baterías como dispositivos de almacenamiento en la infraestructura ferroviaria.

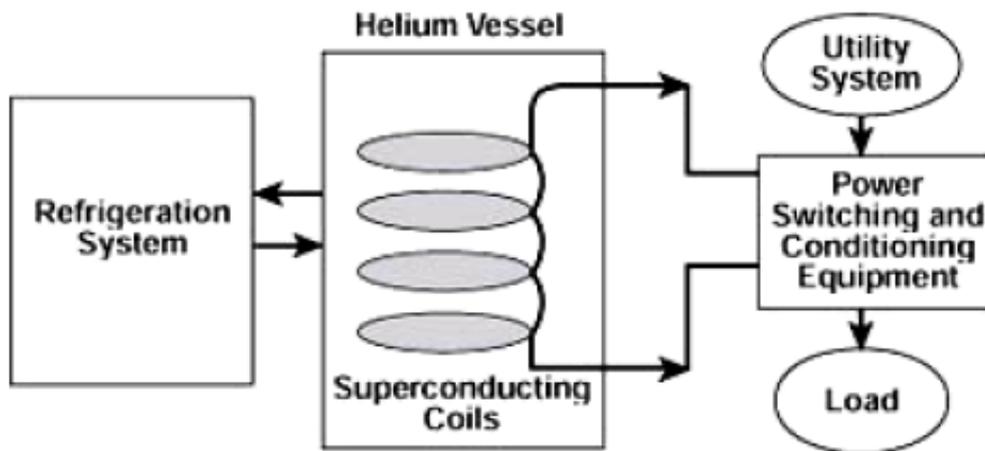
Almacenamiento de energía eléctrica en campos electromagnéticos

En un sistema magnético de almacenamiento de energía de superconductividad (SMES), la energía se almacena dentro de un imán que es capaz de lanzar megavatios de energía dentro de una fracción de un ciclo para sustituir una pérdida repentina de energía en la línea.

La manera de trabajar es la siguiente: En modo espera, la corriente circula continuamente por la bobina superconductora para mantener el campo magnético activo, a través del interruptor normalmente cerrado del regulador de tensión y de la fuente de alimentación. La fuente de alimentación proporciona una carga pequeña para sustituir la energía perdida en las piezas no superconductoras del circuito. Cuando se detecta un hueco de tensión, el regulador dirige energía activa y reactiva del inversor a la carga, en el plazo de milisegundos. Esta transferencia sistemática de la energía del imán a la carga mantiene al sistema en un punto de funcionamiento óptimo.

En la figura se muestra un esquema básico de un sistema de almacenamiento de este tipo.

Figura 7. Almacenamiento en campos electromagnéticos



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

Las recargas de los SMES se realiza en plazos de tiempo muy cortos, del orden de minutos, lo que permite tener el sistema operativo en un breve periodo de tiempo, pudiendo repetir millares de veces la secuencia de carga/descarga sin ninguna degradación del imán. El tiempo de la recarga se puede acelerar para resolver requisitos específicos, dependiendo de la capacidad del sistema.

Estos sistemas utilizan el helio líquido para mantener la bobina a la temperatura requerida para que su material llegue a ser superconductor. Así, en estado superconductor el material conductor que compone el imán no tiene prácticamente ninguna resistencia eléctrica, lo que permite a la bobina llevar corrientes grandes con pérdidas muy pequeñas en períodos de tiempo largos.

No se conocen experiencias en la aplicación de los sistemas SMES como dispositivos de almacenamiento en la infraestructura ferroviaria, sí teniendo referencias en el ámbito de la distribución y el transporte eléctrico.

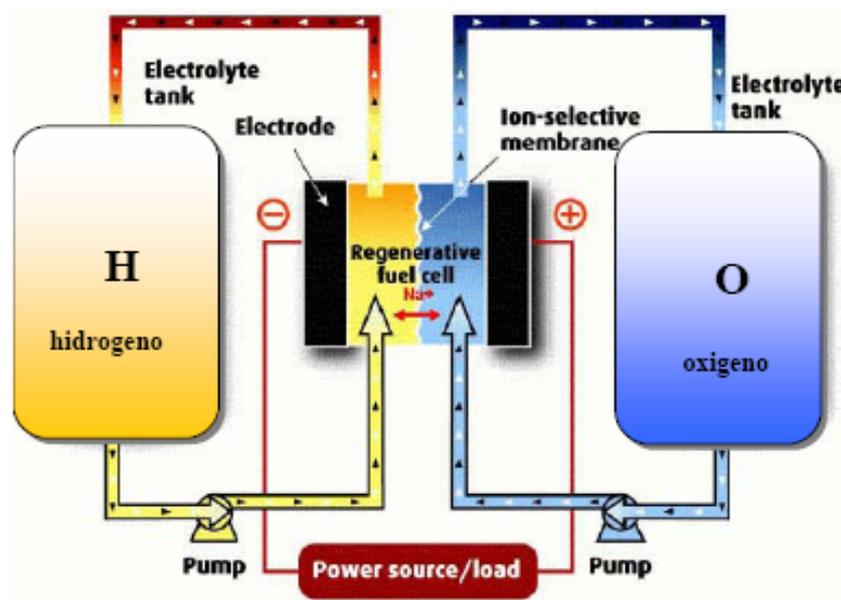
Almacenamiento de energía eléctrica en células de combustible

Las células de combustible convierten el hidrógeno de un tanque de almacenamiento y el oxígeno del aire en agua, generando una corriente eléctrica en un proceso electroquímico. La reacción electroquímica es reversible.

La capacidad de la energía de las células del combustible es determinada por el tamaño de los tanques de almacenamiento, por los materiales activos y por la energía por área de los electrodos y del diseño del reactor. Las pérdidas en espera son bajas porque los materiales activos se mantienen físicamente separados.

Son sistemas que usan el agua como materia prima para obtener hidrógeno y oxígeno de una manera ecológica. Su rendimiento energético es más alto que el de las células reversibles de combustible, pero todavía tienen un rendimiento energético menor que la mayoría de las baterías convencionales.

Figura 8. Almacenamiento en células de combustible



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

No se conocen experiencias en la aplicación de esta tecnología para el almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria.

Almacenamiento de energía eléctrica en supercondensadores

Los supercondensadores son similares a los condensadores, en los que la energía está almacenada electrostáticamente entre dos electrodos separados por un electrolito, pudiendo soportar centenares de miles de ciclos de carga/descarga sin degradarse, al tiempo que proporciona descargas rápidas de energía.

El supercondensador (también conocido como condensador de doble-capa) polariza una solución electrolítica para almacenar energía de forma electrostática. Este mecanismo es altamente reversible y permite que el supercondensador sea cargado y descargado centenares de miles de veces.

El supercondensador se forma por dos placas porosas no reactivas, suspendidas dentro de un electrolito con una diferencia de potencial aplicado a través de los electrodos. En una célula individual del supercondensador el potencial aplicado en el electrodo positivo atrae los iones negativos en el electrolito, mientras que el potencial en el electrodo negativo atrae los iones positivos. Un separador dieléctrico entre los dos electrodos evita que la carga se mueva entre ellos.

Una vez que el supercondensador se carga, almacenándose la energía, una carga puede utilizar dicha energía. La cantidad de energía almacenada es muy grande comparada a un condensador

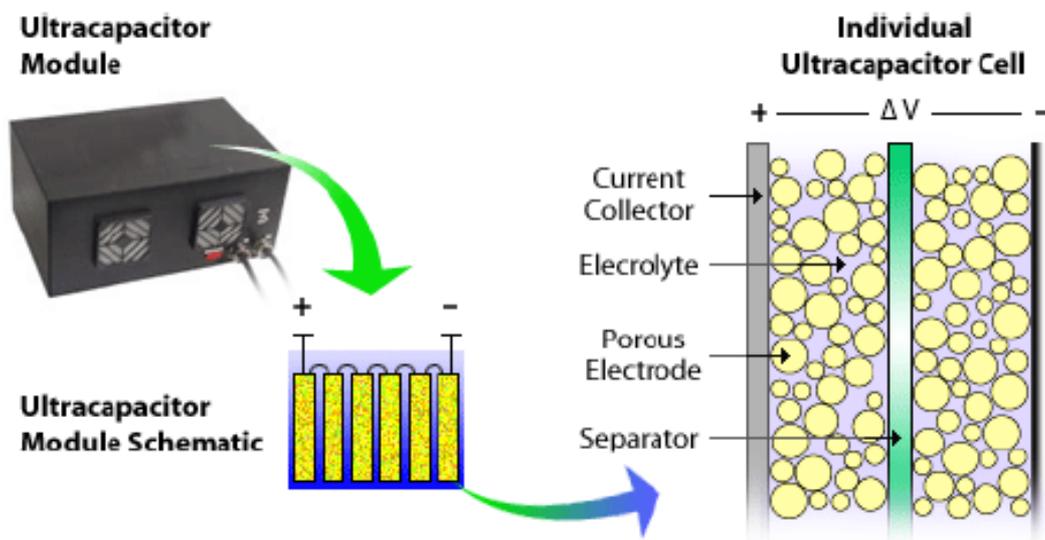
estándar debido al enorme área superficial creada por los electrodos porosos y la pequeña separación entre electrodos creada por el separador dieléctrico.

Puesto que los índices de carga y descarga son determinados solamente por sus características físicas, el supercondensador puede lanzar energía mucho más rápidamente (potencia) que una batería que confíe en reacciones químicas lentas.

Los supercondensadores se agrupan en módulos para resolver los requerimientos de energía, potencia y tensión, todo ello destinado a una amplia gama de usos.

Existen diversas experiencias en la aplicación de supercondensadores como dispositivos de almacenamiento en la infraestructura ferroviaria.

Figura 9. Almacenamiento en células de combustible



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

Almacenamiento de energía eléctrica en volante de inercia

Un volante de inercia está constituido por una masa que rota sobre un eje. El tipo de energía almacenada es energía cinética.

La energía es proporcionada al volante por un motor eléctrico acoplado al mismo eje, mediante el cual el volante eleva su velocidad hasta su valor nominal (proceso de carga).

La devolución de la energía se realiza haciendo funcionar a la máquina eléctrica como generador; En este proceso el volante de inercia reduce su velocidad hasta un valor mínimo de diseño (proceso de descarga).

Además de la densidad de energía y de potencia, los volantes de inercia ofrecen varias ventajas importantes sobre el resto de métodos de almacenamiento de energía: La velocidad con la cual la energía se puede intercambiar (potencia) está limitada solamente por el motor eléctrico acoplado al volante de inercia. Por lo tanto, es posible retirar grandes cantidades de energía en un periodo de tiempo más corto que con las baterías químicas tradicionales.

Por el contrario, existe un cierto riesgo de seguridad debido a su rotor de alta velocidad, pues siempre debe contemplarse la posibilidad de que se rompa desintegrándose y cediendo así toda la energía de una manera incontrolada. Actualmente los volantes son una tecnología menos madura que las baterías químicas, siendo el coste actual elevado.

Existen diversas experiencias en la aplicación de volantes de inercia como dispositivos de almacenamiento en la infraestructura ferroviaria.

Figura 10. Volante de inercia



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

Aplicación de las técnicas de almacenamiento de energía eléctrica a la infraestructura ferroviaria

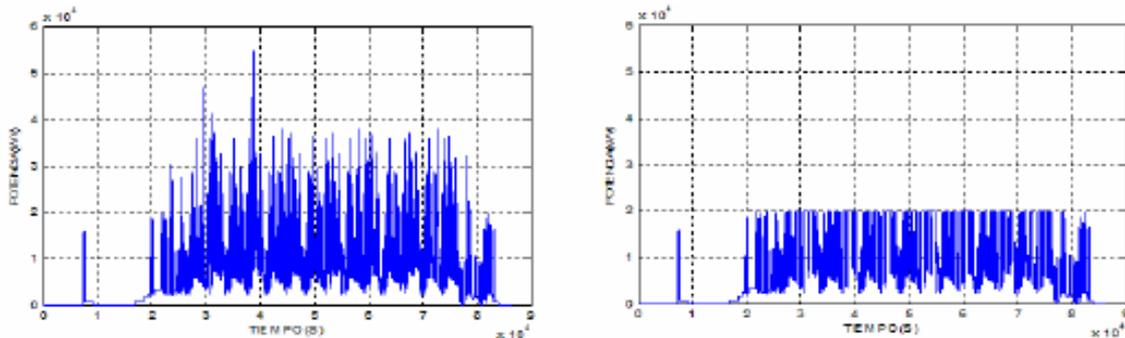
El consumo eléctrico de las subestaciones eléctricas de tracción se caracteriza por la existencia de fuertes puntas de consumo en determinadas condiciones de tráfico de trenes, obligando a un sobredimensionado de la aparamenta eléctrica y a una posible penalización por parte de las compañías eléctricas suministradoras, dado que el perfil dista mucho de ser el que ellas desearían.

El perfil irregular de la curva de carga se produce en cualquier subestación eléctrica ferroviaria, ya que en todos los casos se trata de una o varias cargas variables en el tiempo y en el espacio (es decir, el tren se mueve siendo la demanda de energía de la línea aérea de contacto muy variable).

Para poder mejorar esta situación, desde hace unos años se está analizando por parte de diferentes gestores ferroviarios la instalación en dichas subestaciones de dispositivos de almacenamiento capaces de inyectar potencia en períodos de demanda de energía a costa de la que almacenan cuando uno o varios trenes frenan eléctricamente. El objetivo final es suavizar el perfil y aproximarlos de esta manera a una situación ideal.

Como se acaba de indicar, en la instalación de dispositivos de almacenamiento cobra una gran importancia el frenado eléctrico por recuperación empleado por los trenes pues es precisamente la energía eléctrica devuelta en este proceso la que es almacenada en los dispositivos de almacenamiento, concretamente la que no es aprovechada por otro tren en la línea y que por tanto es disipada en las resistencias de frenado del vehículo. Hay que matizar que este caso se daría siempre en una instalación ferroviaria alimentada en corriente continua, pues en el caso de una instalación de corriente alterna monofásica la energía no recuperada por otro tren no sería disipada en calor sino devuelta a la red eléctrica de alimentación.

Figura 11. Izquierda: Curva de consumo normal. Derecha: Curva teórica de consumo (alisada) tras haber incorporado un sistema de almacenamiento de energía



Fuente: Martínez Acevedo, J.C. et al. (2009)

Objetivo teórico de la instalación de un sistema de almacenamiento de energía

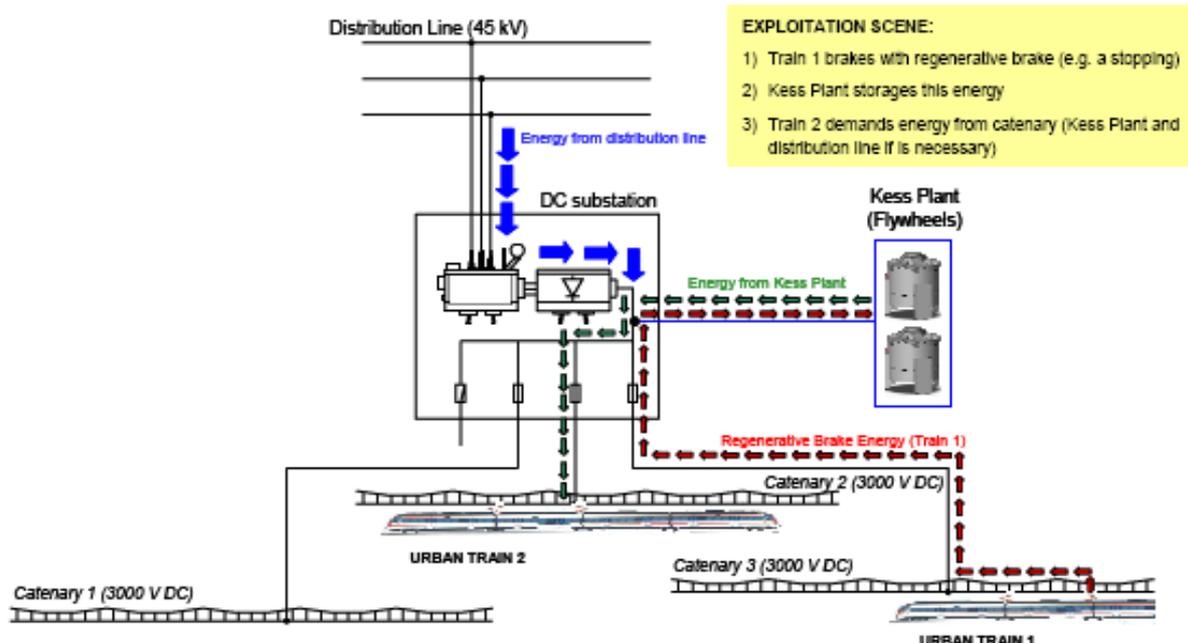
El objetivo fundamental de la instalación de un sistema de almacenamiento de energía es la nivelación de la curva de carga de la subestación. El sistema almacenaría la energía de frenado devuelta por los trenes y la devolvería cuando éstos la demandaran, todo ello de acuerdo a una consigna de explotación relacionada generalmente con la tensión eléctrica de la línea área de contacto. Un posible modo de funcionamiento basado en una planta de almacenamiento mediante volante de inercia sería el siguiente:

Si no hay ningún vehículo usando energía dentro del área de suministro, el voltaje se incrementa por el vehículo que frena. El sistema de almacenamiento pasa al estado de carga. La intensidad de entrada se incrementa hasta que el voltaje cae a un valor por encima del voltaje de alimentación máximo de la subestación. Esto asegura que no se toma potencia eléctrica de la red. Este estado de funcionamiento permanece hasta que no hay más recuperación de energía o se alcanza la máxima velocidad permisible del sistema. Después de la recuperación de energía, si no se toma energía durante un periodo de tiempo, el volante de inercia mantiene la velocidad actual. El convertidor electrónico del almacenador es controlado en el modo rectificador. El voltaje está por encima del voltaje de alimentación máximo del rectificador de la subestación. Si un vehículo que está tomando potencia está localizado dentro de la sección de alimentación, entonces la energía necesaria es suministrada por el volante de inercia hasta que éste haya alcanzado la mínima velocidad de funcionamiento. El voltaje del sistema se reduce y la alimentación es transferida automáticamente al rectificador de la subestación.

Un segundo modo de funcionamiento posible es el mantenimiento de la tensión en la línea aérea de contacto. En este caso, la planta de almacenamiento no está instalada dentro de la subestación, sino en un punto de la vía. En este caso el estado de carga básica es la máxima velocidad de funcionamiento.

Si el voltaje cae por debajo del mínimo voltaje de alimentación -debido por ejemplo a que un vehículo está tomando energía- el sistema de almacenamiento soporta dicha caída estabilizando el voltaje por encima de la mínima velocidad de funcionamiento o hasta que el voltaje haya crecido de nuevo. Con el fin de retornar al estado de carga básica, el volante de inercia es acelerado de nuevo cuando el voltaje vuelve a crecer. En este caso debe especificarse la máxima intensidad, siempre limitada a un valor que previene una reducción excesiva de la tensión. Si se alcanza el voltaje mínimo antes que la tensión haya vuelto a su rango por encima del voltaje de alimentación mínimo, entonces la velocidad de funcionamiento mínima es mantenida por el convertidor electrónico.

Figura 12. Esquema de funcionamiento del sistema eléctrico ferroviario (caso de un sistema en corriente continua) tras haber incorporado una planta de almacenamiento de energía en la subestación



Configuración de la planta de almacenamiento

En la mayor parte de los casos habrá que considerar que la planta de almacenamiento deba ser modular, constando de varios módulos de almacenamiento que trabajen en paralelo y que están definidos individualmente por su potencia y energía. El número de módulos dependerá de las necesidades del gestor ferroviario.

Entre la línea aérea de contacto y los módulos de almacenamiento deberá existir un convertidor electrónico de potencia con el objeto de acondicionar la señal entre ambos elementos así como controlar el trasvase de energía entre ambos.

Ventajas sobre la infraestructura ferroviaria

Las ventajas de esta instalación sobre la infraestructura ferroviaria recaerán sobre las dimensiones de las subestaciones, pudiendo reducir sus dimensiones teóricas y las de sus acometidas, ayudando a mejorar la estabilidad de la red eléctrica en zonas comprometidas y reduciendo el gasto de explotación del tráfico ferroviario, ya que es previsible disminuya la cantidad económica dedicada a energía eléctrica.

Por otro lado, la incidencia indirecta es también considerable: La necesidad de almacenamiento energético está íntimamente ligada a la mejora de calidad del servicio eléctrico y al aumento de estabilidad de redes eléctricas débiles.

5. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LAS TECNOLOGÍAS DE TRACCIÓN

Desde aquellos primeros años al principio de la década de los 70, cuando ABB Tracción comenzó a apostar e impulsar la tecnología trifásica de corriente alterna (AC), frente a la convencional o chopper de corriente continua (DC) en Europa, esta tecnología ha ido consolidándose, llegando a ser a día de hoy la única tecnología aplicada en vehículos de nueva construcción, con alguna rara excepción.

Las razones por las que poco a poco, la tecnología trifásica ha ido imponiéndose desde aquellos primeros años hasta nuestros días han sido muchas, siendo las principales las que se describen a continuación.

5.1. Análisis de adherencias disponibles

El coeficiente de fricción entre rueda y carril en condiciones de vía en buenas condiciones, limpia y seca se sitúa entre un 40% y un 45%, para cualquier tipo de vehículo ferroviario sobre carriles.

La característica de adherencia que presenta una unidad o locomotora, depende de la capacidad del equipo de tracción y su control de convertir el coeficiente de fricción rueda carril disponible en utilizable en cada momento.

Esta capacidad de adhesión rueda carril disponible, varía drásticamente entre las distintas unidades en función del equipo e tracción y control que incorporen, llegando a pasar de entre el 18% y el 20% de las primeras unidades con control y equipo de tracción DC sin sistema antipatinaje hasta valores de entre el 37% y el 40% en unidades dotados de cadena de tracción trifásica controlados por microprocesador.

Existen tres razones fundamentales por las que las cadenas de tracción trifásicas ofrecen valores tan altos de adherencia:

1. Si en una cadena de tracción DC estándar ocurre un patinaje, existe la tendencia del motor de corriente continua con excitación serie a embalsarse, debido a la reducción de corriente y flujo que sufre, llegando incluso a velocidades de rotura mecánica, si no se reduce la carga o esfuerzo rápidamente. Esto es debido a que durante este proceso de patinaje en rueda, la velocidad de la misma se incrementa rápidamente, el coeficiente de fricción cae drásticamente a valores inferiores al 10% y como los motores están conectados entre sí, la única opción de corregir es la reducción de esfuerzo. En consecuencia, la máxima adherencia se consigue operando con unos márgenes de seguridad en adherencia considerables muy por debajo de los valores teóricos posibles. Por esta razón, los valores de adherencia máximos disponibles, dados por las normas como la UIC parecen tan conservadores hoy en día.

Sin embargo, los sistemas de corriente alterna AC, operan de un modo muy distinto, con resultados mucho mejores. La velocidad de la máquina asíncrona viene impuesta por la frecuencia que el control establece en el convertidor de tracción (velocidad de sincronismo) menos el pequeño deslizamiento del entorno del 2% que ésta precisa para dar par. Por lo tanto, como la máquina asíncrona, funcionando como motor, en ningún caso puede exceder la velocidad de sincronismo impuesto desde el convertidor,

cualquier patinaje que se produzca es mínimo (del valor del deslizamiento). Además se detecta muy rápidamente y se realiza una corrección casi instantánea.

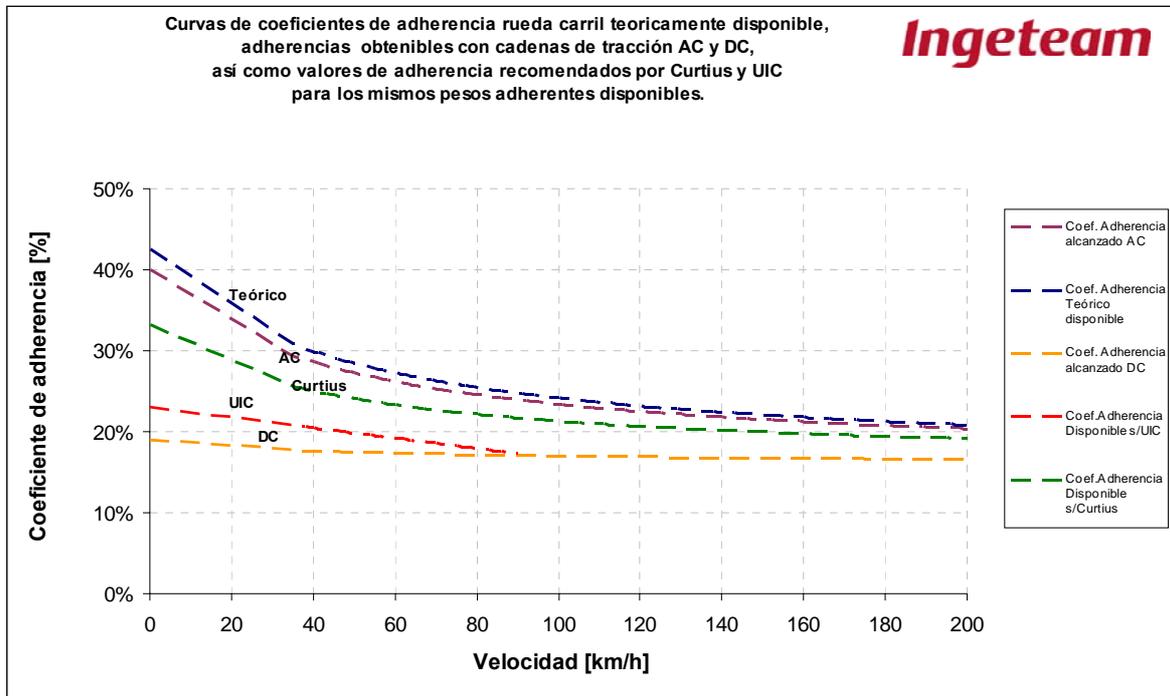
2. Las cadenas de tracción de corriente continua (DC), típicamente operan con un número de muescas en el combinador de mando que imponen una serie de modos y puntos de funcionamiento que corresponden a unos determinados niveles de potencia para cada uno. Sin embargo, este sistema que es sencillo y efectivo a la hora de operar, no produce un par constante del motor de tracción, dado que la potencia es el producto de par por velocidad. Por lo tanto el esfuerzo de tracción varía significativamente para cada uno de las posiciones del combinador de mando, o puntos de potencia, dependiendo de la velocidad, haciendo imposible obtener la máxima adherencia.

Los equipos de tracción de corriente alterna (AC) sin embargo, pueden controlar el par de motor a un nivel concreto establecido por el control, permitiendo que el esfuerzo de tracción en rueda sea prácticamente constante, obteniendo unos rangos de adherencia los más elevados posibles.

3. La tercera razón por la cual los equipos de tracción de corriente alterna (AC) proveen mejoras en la adherencia, sobre todo en las locomotoras y cabezas tractoras, es a través de la compensación de transferencia de peso entre bogies. Cuando una locomotora está arrastrando una carga, el peso tiende a transferirse desde los ejes del bogie delantero hacia los ejes del bogie trasero, debido al momento que ejercen los motores de tracción sobre el total de la estructura del bastidor. Cuando se alcanzan los valores máximos del esfuerzo de tracción, el peso en el bogie delantero pueden ser reducido sobre un 20%. El esfuerzo de tracción aplicable, es proporcional al peso adherente disponible en las máquinas, luego en un sistema DC donde los motores son alimentados por una fuente común, el esfuerzo de tracción será limitado por la capacidad de adhesión del bogie más ligero. De esta manera, en efecto, el peso equivalente de la locomotora es reducido en más o menos un 20%.

Como conclusión de este apartado, se puede afirmar que la combinación de la eliminación del patinaje en rueda junto con la compensación de la transferencia de peso provee al sistema AC de tracción, una adherencia de entre el 37% y el 39% contra el 18% al 20% del viejo sistema DC. Por lo tanto, las cadenas de tracción AC pueden garantizar el mismo esfuerzo tractor que las cadenas DC con la mitad de peso adherente o dicho de otro modo con la misma carga por eje, pueden ofrecer el doble de esfuerzo tractor.

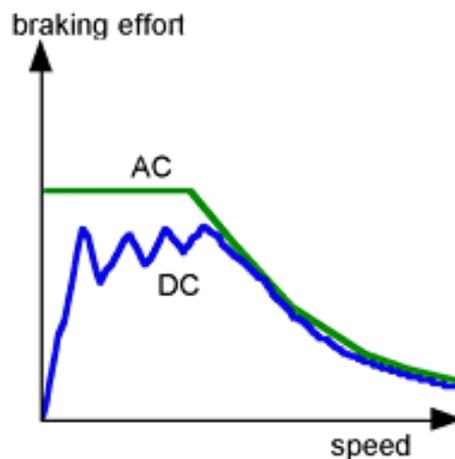
Figura 13. Curvas de adherencia disponibles y obtenidas con cadenas de tracción AC y DC y DC



Fuente: Olea Unamuno, F.J. (2008)

El esfuerzo de freno disponible en llanta de las unidades, también es función de la adherencia disponible. Por esta razón, el freno electrodinámico en locomotoras y unidades de tracción dotados de cadenas de tracción de alterna (AC) pueden garantizar el mismo esfuerzo de freno que las cadenas de corriente continua con la mitad de peso adherente o dicho de otro modo con la misma carga por eje, pueden ofrecer el doble de esfuerzo de frenada. Además, las cadenas de tracción AC permiten ir decelerando hasta velocidad cero con freno eléctrico, cosa que era imposible con las cadenas de tracción DC.

Figura 14. Comparativa del esfuerzo de freno obtenido con cadenas de tracción AC y DC en función de la velocidad.



Fuente: Olea Unamuno, F.J. (2008)

5.2. Recuperación de energía en el proceso de frenado

En el caso de de las cadenas de tracción en corriente continua (DC), se precisan una serie de contactores de potencia que maniobren para permitir cambiar el sentido de la corriente de excitación del motor de tracción DC, cada vez que la unidad deba frenar con freno electrodinámico, con la pérdida de fiabilidad que ello supone. Por otro lado, la energía recuperada en la frenada, habitualmente es disipada en las resistencias de freno, dado que el equipo de tracción DC, no puede imponer una tensión constante a lo largo de todo el proceso de frenada en Bornes de las maquinas. Por esta razón, las cadenas de tracción en corriente continua se desconectan o aíslan de la catenaria durante dicho proceso de frenado.

En las cadenas de tracción trifásicas de corriente alterna, la energía cinética del tren es trasformada en energía eléctrica a través de los motores de tracción y el convertidor asociado a los mismos, sin la necesidad de ningún dispositivo electromecánico que maniobre. Con solo modificar la consigna de frecuencia y par impuestas a las maquina de tracción en el control del convertidor de tracción, el equipo cambia el signo de la potencia y comienza a frenar. De este modo, el tren tiene la capacidad de devolver toda la energía regenerada durante el frenado a catenaria (a excepción de las perdidas por los rendimientos de la cadena de tracción), si la catenaria (y las cargas que cuelguen de la misma) pueden absorber dicha energía.

En una unidad de tren dotado de una cadena de tracción de corriente alterna trifásica, aproximadamente el 66% de la energía de tracción es regenerada en la frenada, en forma de energía devuelta a la red.

En este análisis, se omite voluntariamente, de qué otras formas se puede aprovechar dicha energía regenerada a la catenaria, cuando ésta no es receptiva, aunque cabe resaltar que Ingeteam dispone de soluciones muy novedosas y energéticamente eficientes para dar solución a dicha problemática.

La recuperación de la energía de frenado y su reutilización por otras unidades, supone una significativa mejora del rendimiento energético de los trenes dotados de sistemas de tracción de corriente alterna (AC) y contribuye además con la adecuación de las entidades explotadoras de material ferroviario a las políticas medioambientales y de ahorro energético de la Comunidad Europea de los últimos años.

5.3. RAMS y LCC

En cuanto a la Fiabilidad, Disponibilidad, Mantenibilidad, Seguridad (RAMS) y costes del ciclo de vida de un vehiculo ferroviario (LCC), tan solo se quiere dar una pincelada indicando que en los vehículos ferroviarios dotados de cadenas de tracción de corriente alterna trifásica (AC), la ventaja es considerable frente a los vehículos dotados de cadenas de tracción de corriente continua DC,. Para cada tipo de vehiculo, Locomotoras, EMU's, LRV's, Tranvías etc, los valores cambian y en este documento no se pretende entrar a analizarlos, pero en cualquier caso, sí cabe decir que los índices de RAMS para los vehículos dotados de cadenas de tracción AC superan a los vehículos dotados con cadenas de tracción DC con creces, mientras que con los costes de mantenimiento y LCC ocurre lo contrario.

Las cadenas AC ofrecen:

- Mayores índices de fiabilidad MTBF o MKBF, dado que los sistemas AC tienen muchos menos componentes electromecánicos, carecen de árbol de levas, motores con

dispositivos de conmutación mecánicos, etc., cuya fiabilidad es muy inferior a los componentes de estado sólido utilizados en tecnologías de corriente alterna.

- Mayores índices de disponibilidad de unidades, dado que además de que las cadenas de tracción AC ofrecen mayores índices de fiabilidad, el mantenimiento es más simple y la reparación de averías es mucho más rápido debido a los sistemas de diagnóstico que disponen y que apoyan y centran al mantenedor de un modo eficaz.
- Menores costes de mano de obra de mantenimiento y piezas de parque dado que desaparecen la mayoría de contactores, árboles de levas motores con colector y dispositivos de conmutación mecánica, etc., frente a los motores asíncronos que apenas tienen más mantenimiento que un engrasado de rodamiento cada 500.000 o 1.000.000 de kilómetros. Un sistema DC en una de locomotora podría pasar de costar entorno a 2,5 €/km frente a 0,7 €/km para una locomotora AC moderna.
- Mayor seguridad

5.4. Otros aspectos

Por último, cabe citar que las cadenas de tracción de corriente alterna (AC) pueden mantener altas prestaciones en largos periodos de tiempo a bajas velocidades, mientras que las cadenas de tracción DC se recalientan seriamente si operan largos periodos de tiempo dando altas prestaciones a baja velocidad. Las cadenas de tracción DC pueden trabajar en régimen continuo a partir de velocidades de entorno a 20km/h y las DC prácticamente desde 0 km/h

5.5. Conclusiones

Tomando en consideración el hecho de los sistema AC de tracción, eliminan en gran medida la posibilidad de producirse patinajes en rueda, junto con la compensación de la transferencia de peso, que los controles de dicha tecnología realizan entre los ejes delanteros y traseros, se provee a los vehículos con adherencias rueda-carril de entre el 37% y el 39% contra el 18% al 20% de los vehículos dotados con el viejo sistema de tracción DC.

Por otro lado desde el punto de vista de RAMS y LCC en la actualidad los vehículos dotados de sistema de tracción AC son mucho más eficientes (mejores RAMS y menores LCC), tal y como se cita en párrafos anteriores.

Además, el solo hecho de que los vehículos dotados de tracción AC sean más ligeros que los vehículos dotados de tracción DC, para dar las mismas prestaciones, hace que en la vida útil de 30 años, se ahorren cantidades de energía enormes, por el simple hecho de no consumir en acelerar y decelerar masas adicionales, incrementando y incrementando su energía cinética inútilmente.

Por último, si a las razones anteriormente citadas, le añadimos que en los vehículos dotados de cadenas de tracción de corriente continua, raras veces son capaces de devolver la energía cinética que recuperan en la frenada a catenaria, esta tecnología queda en clara desventaja frente a la trifásica de corriente alterna.

Por lo tanto, se concluye que los nuevos vehículos ferroviarios deben estar dotados de equipos de tracción trifásicos de corriente alterna sin lugar a dudas. Otra discusión que no era objeto de este informe, pero que se aborda parcialmente en el siguiente apartado, es qué tipo de tecnología trifásica es la más óptima (sincronía, asíncrona, síncrona de imanes permanentes, etc...)

6. ESTIMACIÓN DE LA RESISTENCIA AL AVANCE

Hasta la fecha cuando se realizaba un protocolo de ensayo para la obtención de la fórmula de resistencia al avance, se utilizaba un único tren y a diferentes velocidades retomaban los datos de deceleración y velocidad en tramos concretos de alguna línea. La fórmula empleada es la habitual polinómica de 2º grado $r = a + b \cdot V + c \cdot V^2$ en daN/t ó $R = A + B \cdot V + C \cdot V^2$ en kN (normalmente V se utiliza en km/h). Utilizar “r” en daN/t es útil ya que la declividad expresada en ‰ es sumable directamente a “a”; y para trenes de composición variable permite un más fácil tratamiento al hacerlo independiente de la masa del tren (siempre que la resistencia al avance sea totalmente lineal con la masa y no varíe por distinta configuración de la suspensión y contacto rueda carril).

Por la experiencia adquirida en España se detectan divergencias en los resultados de dichas pruebas que inducen a pensar que o bien no se han elegido suficientemente bien los tramos de líneas, o bien ha habido condiciones climatológicas diferentes que modifican los resultados, o ambas cosas a la vez. Otro factor importante es la precisión de las medidas.

Estas cuestiones llevaron a pensar en el desarrollo de un procedimiento que esté sustentado en la estadística, realizando un gran número de medidas; lo que llevaría a obtener unos valores mucho más precisos y coherentes con la realidad física del fenómeno.

6.1. Propuesta de procedimiento

Para minimizar los posibles errores expuestos anteriormente se propone desarrollar un proceso de validación del procedimiento que quiere implantarse. Este proceso se ha dividido en tres etapas, con la intención de minimizar las pruebas específicas y obtener datos de servicios comerciales acompañados que no tengan repercusión en la explotación y supongan un mínimo coste en la toma de medidas.

1ª Fase de validación del procedimiento

Se realizaran pruebas sobre un tren de un tipo determinado en condiciones climatológicas conocidas para distintos tramos de velocidad, y con una masa determinada en todas las pruebas a realizar.

Las condiciones climatológicas deben ser anotadas y no se darán por válidas pruebas cuando la velocidad del viento sea superior a 10 km/h. La comprobación de dicha velocidad se realizará o bien por datos que se puedan obtener de estaciones meteorológicas próximas o por estimación haciendo constar cual ha sido dicha comprobación. En cuanto a temperatura y presión atmosférica se deben medir en la zona más próxima a los ensayos. Se debe evitar realizar pruebas con lluvia, nieve, etc. Haciendo constar este meteoro cuando se realicen en dichas condiciones.

Los tramos elegidos deben ser en alineación recta y de rasante constante y no superior a 5 ‰. Se podrían admitir curvas muy amplias, ≥ 5.000 m (siempre que la velocidad de circulación sea próxima a la de equilibrio de dicha curva) y declividades > 5 ‰ pero como medidas de contraste cuando no haya otros tramos de medida. No es posible que en el tramo haya cambios de rasante por muy pequeños que sean. Si la rasante no es 0 se debe corregir restando a “a” las rampas (subidas) o sumando las pendientes (bajadas) ambas en ‰. La corrección de curvas es más

complicada, pero se puede usar 800/R para ancho 1.668 mm y 600/R para ancho 1.435 mm (si aceptamos 660 para 1.435 debería usarse 700 para 1.668).

El proceso a seguir será acelerar el tren hasta la velocidad inicial que se necesite, dejar el tren en deriva (sin tracción ni freno) y anotar la velocidad inicial, la distancia recorrida (ya fijada por el tramo seleccionado) y la velocidad final. Para aumentar la precisión de la medida se debe registrar la aceleración longitudinal y las velocidades intermedias así como el tiempo transcurrido.

Este proceso se debe repetir para al menos tres intervalos de velocidad en toda la gama de velocidades posibles del tren. Si se considera conveniente se puede realizar este proceso en varios trenes de velocidades máximas muy distintas; por ejemplo para 100 km/h, 200 km/h y 300 ó 350 km/h.

Con los datos obtenidos se debe proceder a identificar los parámetros ya mencionados (“a”, “b”, “c” ó “A”, “B”, “C”) mediante algún procedimiento matemático de obtención de una función partiendo de una nube de puntos observados.

2ª Fase de comprobación de la función obtenida

Con el mismo tipo de tren, o tipo de trenes en el caso de haber utilizado más de uno, se deben efectuar varios recorridos utilizando servicios comerciales de dicho tipo de tren.

En cada comprobación, además de anotar la condiciones climatológicas (con las mismas limitaciones y condicionantes de la fase 1), debe anotarse la masa real del tren lo más precisa posible evaluando el número de viajeros y sus equipajes (normalmente en trenes de largo recorrido esta evaluación es suficientemente precisa ya que la masa variable aportada al tren en tara no es muy significativa; en cercanías y metropolitanos esto no es cierto y hay que precisar lo mejor posible).

La toma de datos se debe realizar en los tramos de la fase 1 o adicionalmente en otros que sean lo más parecidos a los del ensayo tipo de la fase 1. Si no es posible registrar las aceleraciones al menos hay que tomar la velocidad inicial y final y el tiempo transcurrido lo más preciso posible.

Esta segunda fase debe valer para validar el procedimiento comprobando que los parámetros de la función polinómica son suficientemente iguales a los de la fase 1. En este caso se pueden utilizar más tramos de velocidad ya que conocemos la función polinómica.

3ª Fase de extensión a todos los trenes

Las condiciones mínimas que se den aplicar son las climatológicas, como en la fase 1, las de declividad y curva, también como en la fase 1, pero ahora se pueden utilizar más tramos e incluso si se comprueba su validez admitir tramos de más declividad siempre que sea constante.

Como en la fase 2 los tramos de velocidad deben ser más de los utilizados para la fase 1 ya que nos interesa que la nube de puntos sea lo más amplia y densa posible para poder asegurar que la aproximación matemática ha sido suficientemente precisa.

En caso de duda o para obtener una mayor confianza en la aproximación polinómica realizada se puede volver a realizar alguna comprobación como las realizadas en la fase 1 para asegurar algún tramo de la gama de velocidades.

De la comparación de los diferentes trenes se deben obtener conclusiones coherentes como la afectación de la longitud del tren en un mayor esfuerzo resistente u otras de similar estilo. Así como la comparación con las formulas realizadas en otros países con diferentes trenes. A su vez sería muy interesante utilizar estos parámetros en programas de simulación de marchas tipo y consumos energéticos para compararlos con medidas de consumo y obtener una validación contar otro tipo de observaciones.

7. ESTIMACIÓN DEL CONSUMO DE ENERGÍA ELÉCTRICA EN EL FERROCARRIL E IMPUTACIÓN DE LAS CAUSAS DE LAS QUE DEPENDE

Se ha definido un método homogéneo y comúnmente aceptable para atribuir a cada tren, en uno o en varios tipos de servicio e infraestructura, sus consumos de energía y las emisiones de CO₂ asociadas.

Para la elaboración del trabajo se partió de la metodología desarrollada en FFE e IDAE (2009) la monografía ElecRail Rendimientos de la tracción eléctrica (Olea Unamuno, F.J. (2008)):

También se empleó la metodología y estructura del simulador de consumos de trenes ALPI 2810 versión 6.

El modelo de simulación se basa en el balance de energías del tren:

$$\text{Energía que entra al tren} = \text{Energía que sale del tren} + \text{Pérdidas}$$

Y ello:

- En un recorrido circular (con origen y final en el mismo punto y, por ello, sin diferencia de altitud entre los extremos del recorrido),
- Con las características del ciclo teórico de que se trate, y
- Con salida y llegada a velocidad de 0 km/h

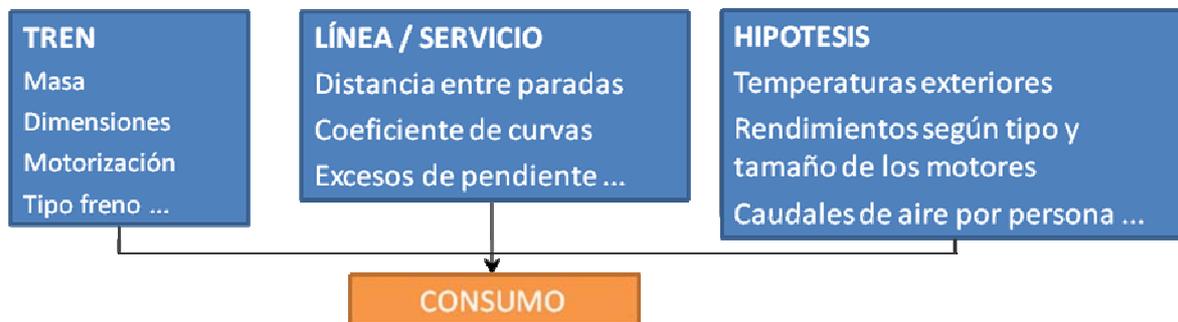
La energía que entra en el tren en el recorrido es la suma de:

- Energía necesaria para vencer las resistencia al avance en recta y en curva
- Energía perdida en el rendimiento de la cadena de tracción y auxiliares
- Energía disipada en el freno
- Energía consumida por los servicios auxiliares (incluyendo los tiempos de parada asociados al ciclo).

En el caso de los trenes de tracción eléctrica con freno regenerativo, a esta suma hay que restar:

- Energía eléctrica generada en el freno, tanto si se emplea para la alimentación de equipos, como si se devuelve a la catenaria o a la red, o si se disipa en las resistencias de frenado por no admitirla la red.

Figura 15. Estructura del simulador de consumos



Fuente: García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2008)

7.1. Caracterización de los perfiles operacionales del ferrocarril español

Se han establecido los perfiles operacionales (servicios) representativos de los trenes de cercanías, larga y media distancia.

Las variables consideradas relevantes para la caracterización de los perfiles operacionales de los trenes son:

- *Recorrido total del tren*: longitud del recorrido comercial expresada en kilómetros.
- *Paradas comerciales en cien kilómetros*: para cada tren a partir de sus paradas comerciales se ha determinado el número de paradas comerciales en cien kilómetros sin tener en cuenta la parada inicial ni la final.
- *Paradas técnicas en cien kilómetros*: para cada tren a partir de sus paradas técnicas se ha determinado el número de paradas técnicas en cien kilómetros. Se denominan paradas técnicas a aquellas que realiza el tren para esperar cruces y adelantamientos, cambiar de locomotora y pasar por cambiadores de ancho en el caso de trenes autopulsados
- *Velocidad media sin paradas*: es la velocidad del tren considerando sólo el tiempo que está en movimiento.

Los servicios tipo de los trenes de cercanías son:

Tabla 8. Servicios tipo de cercanías

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100km	Paradas técnicas en 100km	Velocidad sin paradas (km/h)
CER1	L'Alcudia-Valencia Nord	62,40	17,63	0,00	63,46
CER2	El Caleyo-S.Juan de N.	38,40	36,46	0,00	50,09
CER3	Muskiz-Bilbao	21,20	75,47	0,00	53,45
CER4	Santander-Renedo	19,40	36,08	5,15	53,39

Fuente: García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2008)

Del mismo modo, los servicios de media y larga distancia identificados se resumen en la tabla:

Tabla 9. Servicios tipo de larga y media distancia

	TREN TIPO	km/tren	Paradas comerciales en 100 km	Paradas técnicas en 100 km	Velocidad sin paradas (km/h)
MD1	Regional Ourense - Puebla de Sanabria	142,00	9,86	1,41	67,19
MD2	Regional León - Ponferrada	128,60	11,66	0,00	71,58
MD	Regiona Barcelona - Mora la N.	158,30	10,11	0,63	69,23
REX1	Regional Express Sevilla - Jaén	263,70	3,03	0,38	91,04
REX2	R598 Ourense - Coruña	193,70	2,58	0,00	89,95
REX	Regional Soria - Mad. Chamartín	247,20	3,64	0,40	86,33
REG	Regional Express Valencia - Tortosa	192,30	6,24	0,52	76,92
LD	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
NOC	Estrella Gijón - Barcelona	1.023,40	1,86	0,20	101,70
LD+NOC	Altaria Cartagena - Mad. Chamartín	530,10	1,70	0,19	107,82
AVE	AVE Madrid - Málaga	512,50	0,59	0,00	185,46
AV LD	Altaria Madrid P.A. - Granada	577,60	0,35	0,17	138,51
AVANT	Avant Valladolid - Mad. Chamartín	178,40	0,56	0,00	156,95

Fuente: García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2008)

7.2. Evaluación de las causas de las que depende el consumo de energía del ferrocarril

A partir del consumo calculado para los trenes de superficie homogénea por kilómetros en distancia ortodrómica, estudiaremos el peso de cada uno de los factores. Para ello se desglosa la energía importada en diversos sumandos:

- *Energía para vencer las resistencias mecánicas*, que agrupa:
 - o Energía para vencer la resistencia mecánica al avance en recta.
 - o Energía para vencer la resistencia adicional al avance en curvas.
- *Energía disipada en el freno*, que agrupa:
 - o Energía cinética disipada en las reducciones de velocidad, menos la empleada para vencer la resistencia al avance.
 - o Energía potencial disipada en el freno en pendientes sin conducción económica.
 - o Energía potencial consumida por diferencia de altitud entre los extremos

De esta energía una parte se pierde y otra se recupera mediante el freno regenerativo.

- *Energía para vencer las resistencias aerodinámicas*, que comprende:
 - o Energía para vencer la resistencia de la entrada de aire
 - o Energía para vencer la resistencia aerodinámica en cielo abierto.
 - o Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica en túnel
 - o Energía adicional para vencer la resistencia aerodinámica debida al viento exterior.

- *Consumo de auxiliares*, que comprende:

- Energía consumida por los auxiliares comerciales, iluminación.
- Energía consumida por los auxiliares comerciales, climatización.
- Energía consumida por los auxiliares técnicos.
- *Pérdidas en el vehículo*, que agrupa:
 - Pérdidas en la locomotora, es decir, las pérdidas en la cadena de tracción por rendimiento.
 - Pérdidas en la alimentación de los equipos auxiliares, tanto comerciales como técnicos.

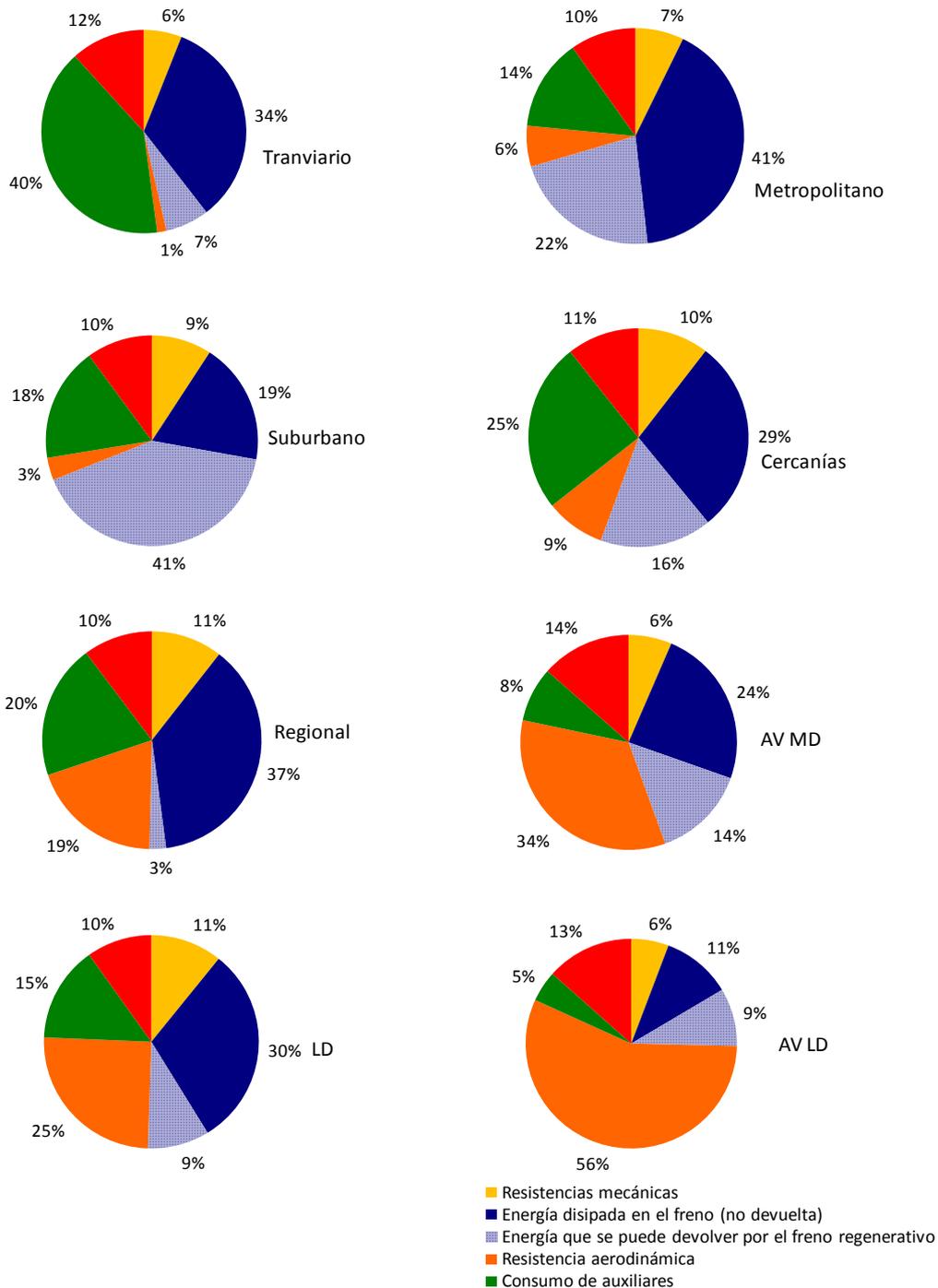
La tabla muestra el peso de cada uno de los componentes del consumo sobre la energía importada:

Tabla 10. Peso de cada componente del consumo de energía

TREN SERVICIO	SE Citadis 302 Tranviario	SE MM 7000B Metropolitano	SE FGC UT-112 Suburbano	SE Civia 465 Cercanías	SE 449 Regional	SE 104 AV MD	s130 LD	SE s/102 AV LD
Resistencias mecánicas	6%	7%	9%	10%	11%	6%	11%	6%
Energía disipada en el freno	34%	41%	19%	29%	37%	24%	30%	11%
Energía devuelta por el freno reg.	7%	22%	41%	16%	2%	14%	9%	9%
Resistencia aerodinámica	1%	6%	3%	9%	19%	34%	25%	56%
Consumo de auxiliares	40%	14%	18%	25%	20%	8%	15%	5%
Pérdidas en el vehículo	12%	10%	10%	11%	10%	13%	10%	13%

Fuente: García Alvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2008)

Figura 11. Peso de cada componente del consumo de energía



Fuente: García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2008)

De estos gráficos del desglose de la energía importada podemos extraer las siguientes conclusiones:

1. Las resistencias mecánicas se encuentran en torno al 10% en todos los trenes, aunque este término se compone de dos sumandos, resistencia al avance en recta y resistencia al avance en curva, que no tienen el mismo peso en todos los casos.

2. Las resistencias aerodinámicas suponen el 56% del consumo en alta velocidad larga distancia, 34% en alta velocidad media distancia y 25% en larga distancia. En el resto de servicios se encuentran entre el 19 y el 1%.
3. El consumo de auxiliares alcanza el 40% en el servicio tranviario. En el resto de servicios se encuentra entre el 25 y el 5%. El consumo de los servicios auxiliares es proporcional al tiempo de funcionamiento de los equipos.
4. Las pérdidas en el vehículo debidas a los rozamientos son en todos los servicios próximas al 11%.
5. La energía disipada en el freno supone el 41% en metropolitano, 37% en regional y 34% en tranviario. En el resto de servicios oscila entre el 29 y el 11%.
6. La energía devuelta por el freno regenerativo alcanza el 41% en suburbano. En el resto de servicios oscila entre el 22 y el 2%.

En general:

1. En los servicios con muchas paradas (tranviario, metropolitano, suburbanos, cercanías y regional) la energía disipada en el freno tiene un peso alto debido a que la componente de la energía cinética disipada en las reducciones de velocidad. Ello es debido a las reducciones de velocidad en las que se disipada energía cinética.
2. En los servicios que discurren por tramos urbanos la energía disipada en el freno tiene un peso elevado debido a que la componente de energía potencial tiene mucho peso porque suelen tener pendientes muy fuertes (tranviario, metropolitano y suburbano).
3. El consumo de los servicios auxiliares (directamente relacionado con el tiempo de viaje) es más elevado en metropolitano, suburbanos, cercanías y regional. En el caso del servicio tranviario esta cifra se duplica debido a las numeras puertas con que cuenta el vehículo (5,5 metros de longitud de puertas por costado) que se abren cada muy poco tiempo en las paradas.
4. En el servicio de alta velocidad y larga distancia la componente que predomina es la energía para vencer las resistencias aerodinámicas, que son proporcionales al cuadrado de la velocidad. En el caso de alta velocidad y media distancia sucede lo mismo, aunque también la energía cinética y potencial es elevada debido a la parada intermedia en la que el tren tiene que frenar desde la velocidad máxima hasta su detención.
5. En servicios de velocidad baja (al contrario que en los de alta velocidad) la componente de la resistencia mecánica es mayor (tranviario, cercanías) o muy similar (metropolitano) que la aerodinámica. En estos trenes por tanto, tiene mayor influencia la masa que la aerodinámica.

8. DESARROLLO DE UN SIMULADOR ELÉCTRICO DE LA RED Y DE ESTUDIO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA DE LA RED

El simulador eléctrico de la red es una pieza fundamental para el estudio del consumo de energía y su gestión en líneas ferroviarias en las que se emplea tracción eléctrica.

El simulador permite analizar líneas ferroviarias electrificadas en corriente continua, en corriente alterna y mixta (circuitos acoplados con partes en corriente continua y partes en corriente alterna).

En la parte de continua el simulador incorpora el modelo eléctrico de los elementos más relevantes desde el punto de vista del consumo de energía:

- Frenado regenerativo. Se contempla la posibilidad de que la energía de frenado del tren sea disipada en reóstatos (sin devolverse a la red) o bien de que sea devuelta a la catenaria si las condiciones de la red lo permiten.
- Subestaciones reversibles. La mayor parte de las subestaciones existentes hoy en día en líneas electrificadas en corriente continua sólo permiten el flujo de energía desde la red de suministro hacia la línea férrea. Las subestaciones reversibles permiten también el flujo de energía en la dirección contraria. El simulador permite configurar las subestaciones de ambas maneras.
- Acumuladores. El almacenamiento de energía es un elemento clave para el ahorro, ya que el consumo en un sistema ferroviario es por naturaleza irregular en el tiempo. Los acumuladores pueden ser embarcados o estar fijos en tierra en puntos de la red ferroviaria.

En la parte de corriente alterna, del mismo modo, el simulador incorpora los elementos fundamentales para poder realizar estudios de consumo de energía:

- Frenado regenerativo.
- Sistemas de alimentación diferentes. La alimentación puede ser monotensión (p. ej. 25kV) o bi-tensión (2x25kV). Además se pueden estudiar sistemas con sistemas de alimentación novedosos, por ejemplo alimentación bi-tensión asimétrica +25kV/-75kV.
- Bancos de condensadores. Es una estrategia habitual en sistemas eléctricos para controlar la potencia reactiva y, en consecuencia, las pérdidas y los niveles de tensión.

El simulador resuelve el problema eléctrico planteado en cada caso (más exactamente, la sucesión de problemas eléctricos planteados a medidas que los trenes se mueven) y genera los resultados necesarios para realizar el análisis del ahorro de energía:

- Consumo eléctrico en subestaciones y trenes.
- Regeneración en trenes (energía de frenado) y consumo en reóstatos.
- Pérdidas en líneas de transmisión, catenaria, subestaciones, autotrafos, etc.
- Tensiones mínimas y máximas alcanzadas en la línea.
- Factores de aprovechamiento de la red (se definirán más adelante).

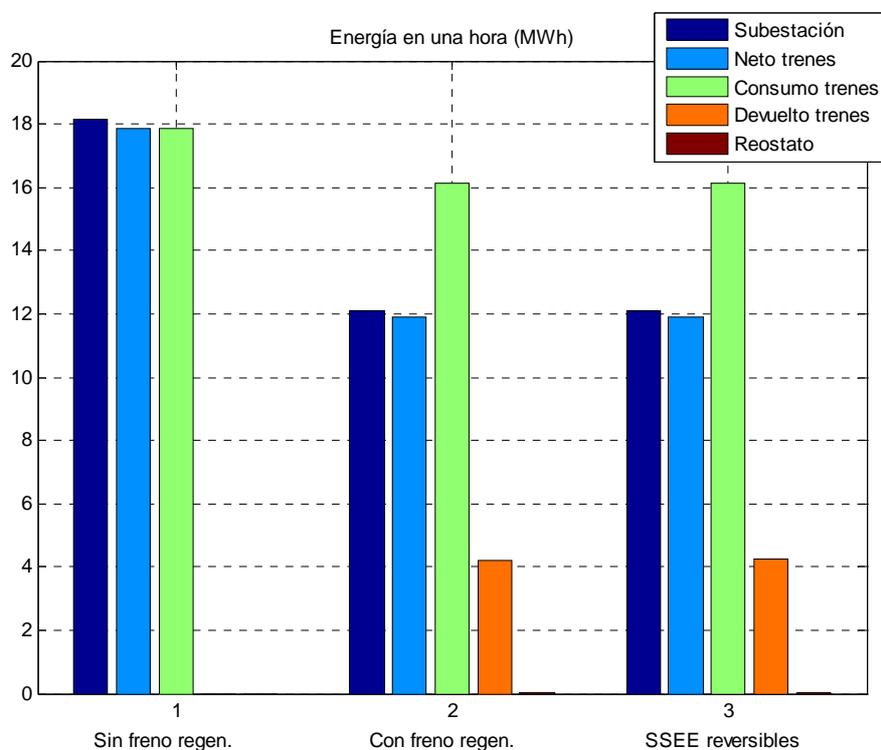
Mediante la herramienta de simulación se han analizado dos casos prácticos: la línea 3 del Metro de Madrid y la línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza.

8.1. Caso estudio: línea 3 del Metro de Madrid

Análisis de energía

Las siguientes gráficas y tablas permiten destacar las principales conclusiones de los análisis realizados.

Figura 16. Balance de energía en una hora. Hora punta.

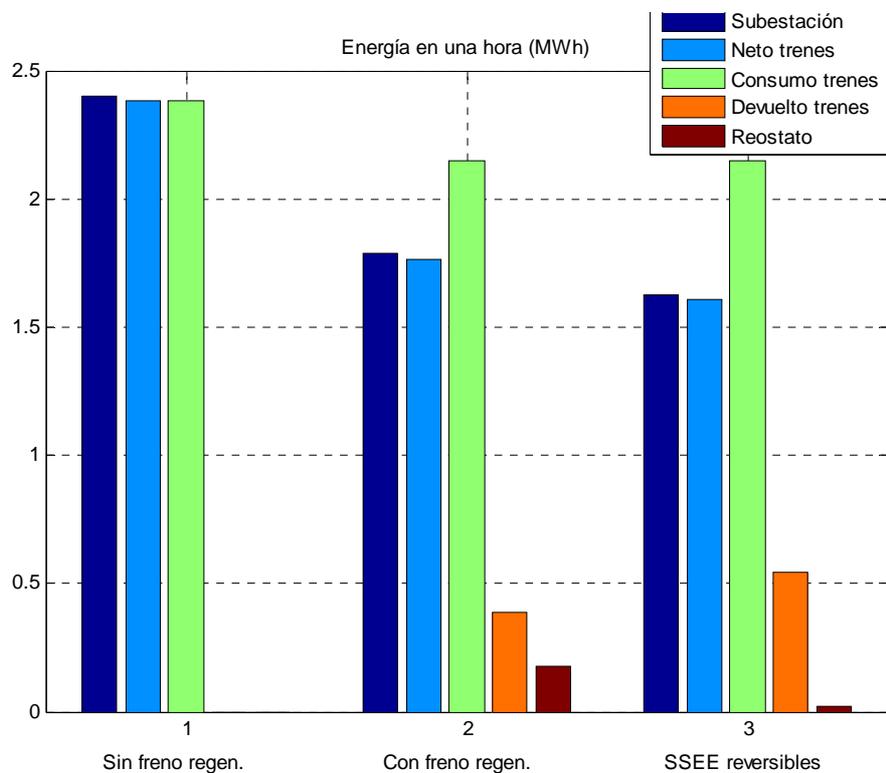


Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

La figura muestra el balance de energía en una hora para el caso de hora punta (tren cada dos minutos). Se puede observar lo siguiente:

- La energía consumida en la subestación disminuye apreciablemente al introducir freno regenerativo (aproximadamente un 30%) y apenas se nota cambio al introducir subestaciones reversibles.
- Lo mismo se puede decir del consumo neto del conjunto de trenes (después de auxiliares). El freno regenerativo hace posible devolver la mayoría de la energía sobrante del frenado a la catenaria, con el consiguiente ahorro.
- El consumo de los trenes es la suma del consumo de tracción y el de auxiliares. Por eso, cuando hay frenado regenerativo disminuye el consumo de los trenes: parte de los auxiliares procede del frenado. La energía devuelta indicada en la figura es sólo parte de la real, porque ya se ha descontado previamente lo que va a auxiliares.

Figura 17. Balance de energía en una hora. Hora valle.

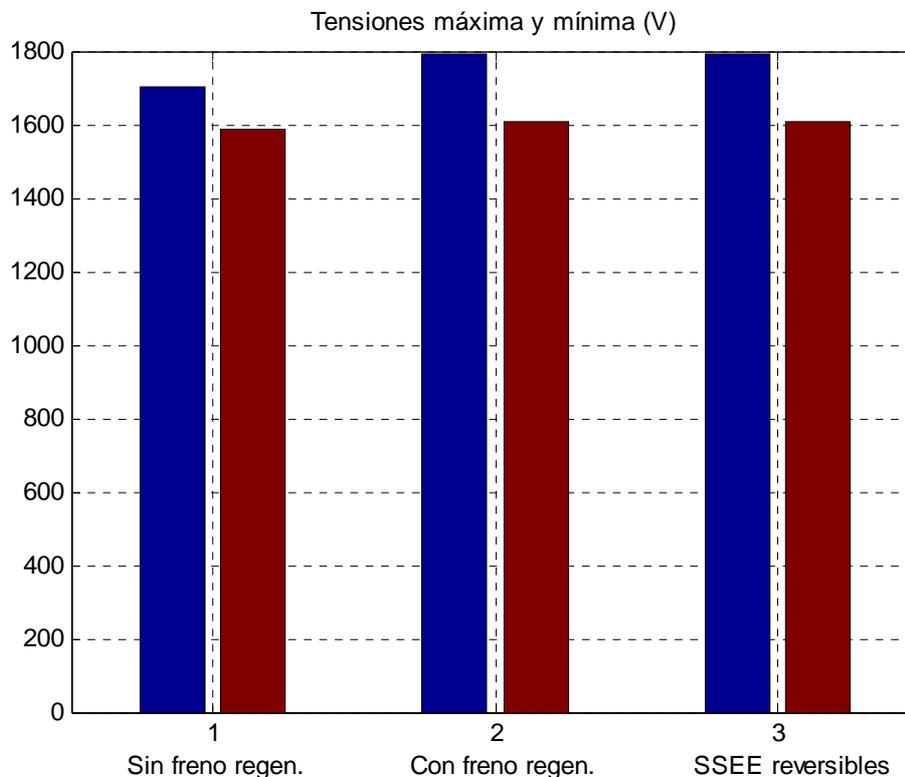


Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

La figura muestra el balance de energía en una hora para el caso de hora valle (tren cada 15 minutos). Se pueden observar las siguientes cuestiones:

- La energía involucrada en el proceso es lógicamente mucho menor que en el caso de hora punta.
- Al igual que en el caso de hora punta, la introducción del freno regenerativo supone una disminución importante de la energía consumida por los trenes; y consecuentemente, de la energía consumida en las subestaciones (del orden del 25%).
- A diferencia del caso de hora-punta, ahora sí es apreciable en términos relativos el ahorro conseguido con la introducción de subestaciones reversibles (pasa del 25% al 30% aproximadamente). El ahorro es importante en términos relativos, aunque no tanto en términos absolutos al tratarse de horas-valle.
- Esta mejora se debe fundamentalmente a que sin subestaciones reversibles quedaba un porcentaje no despreciable de energía que se quemaba en reóstatos y que, por ser hora valle no se empleaba en otros trenes. En este caso, las subestaciones reversibles prácticamente eliminan esta pérdida en reóstatos.

Figura 18. Tensiones en la línea. Hora punta.



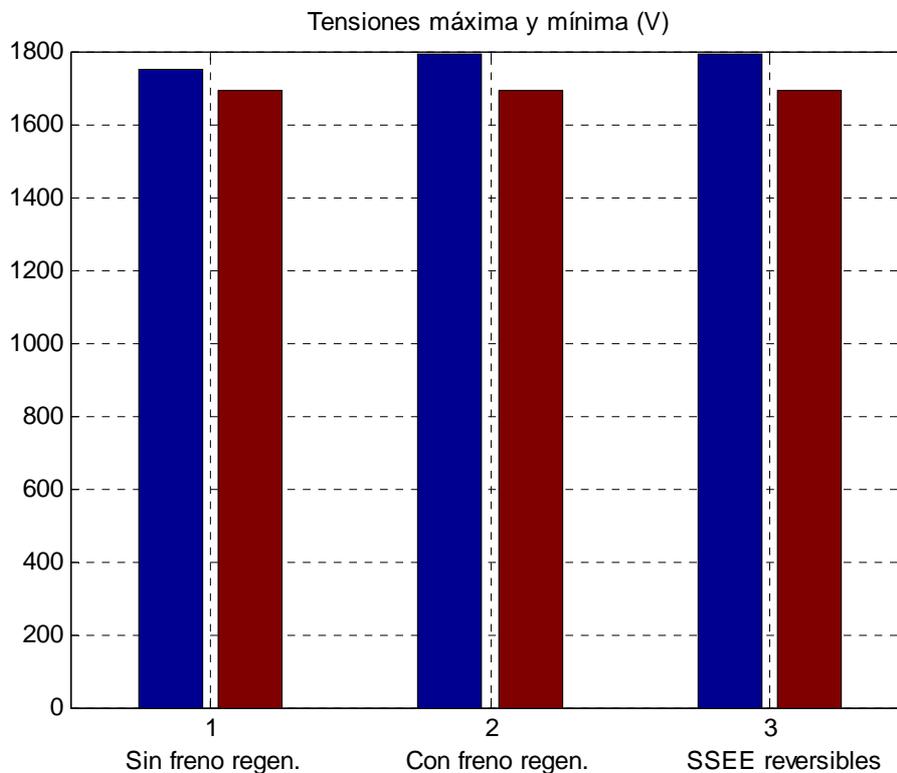
Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

Análisis de tensión

El nivel de tensión alcanzado en cada momento en la catenaria es un elemento clave del funcionamiento del sistema. La Figura 18 muestra el valor mínimo y el valor máximo de tensión alcanzados en la catenaria en cada uno de los escenarios considerados. Las principales conclusiones de la gráfica son las siguientes:

- La tensión máxima sin freno regenerativo es muy cercana a la tensión de vacío (1.750V). Cuando se introduce el frenado regenerativo (con o sin subestaciones reversibles) la tensión alcanza en ocasiones el valor máximo permitido, que es de 1.790V.
- La tensión mínima sube ligerísimamente al introducir el frenado regenerativo.

Figura 19. Tensiones en la línea. Hora valle.



Fuente: Rodríguez Pecharromás et al.(2009)

Las conclusiones sobre las tensiones para el caso de hora valle son las mismas que para el caso de hora punta. La única diferencia apreciable es que en conjunto son más altas en el caso de hora valle debido al menor consumo.

Tabla 12. Caso estudio Metro de Madrid, Línea 3.

		Hora punta (tren cada 2 min)			Hora valle (tren cada 15 min)		
		Sin freno reg.	Con freno reg.	SSEE reversibles	Sin freno reg.	Con freno reg.	SSEE reversibles
Energía (MWh)	Consumo en SSEE	18,16	12,11	12,10	2,40	1,79	1,03
	Ahorro obtenido		33,30	33,37		25,67	32,25
	Consumo trenes	17,87	18,11	18,11	2,38	2,15	2,15
	Devolución a catenaria	0,00	4,22	4,23	0,00	0,39	0,54
	Neto trenes	17,87	11,90	11,88	2,38	1,76	1,60
E. pérdidas (MWh)	Reostato	0,00	0,02	0,00	0,00	0,18	0,02
	Catenaria	0,16	0,15	0,15	0,02	0,02	0,02
	SSEE	0,12	0,06	0,06	0,00	0,00	0,00
E. Pérdidas (% de SSEE)	Reostato		0,38	0,09		10,06	1,28
	Catenaria	0,88	1,27	1,28	0,70	1,12	1,25
	SSEE	0,88	0,50	0,50	0,13	0,14	0,17
	Rendimiento (Neto trenes / SSEE)	0,084	0,082	0,082	0,082	0,087	0,088
Tensión (V)	Máxima	1703,975	1790,075	1790,075	1749,300	1790,075	1790,075
	Mínima	1586,9675	1606,850	1606,850	1693,3675	1693,300	1693,300

Fuente: Rodríguez Pecharromás et al.(2009)

La tabla muestra los resultados numéricos del caso estudio, donde se pueden observar con más detalle las conclusiones analizadas mediante las figuras anteriores. Las principales conclusiones globales que se pueden extraer del caso estudio (téngase en cuenta que no se pueden extrapolar en general a otros casos) son:

- El empleo de freno regenerativo aporta un gran ahorro de energía, entre un 25% y un 35% aproximadamente para los escenarios considerados en el estudio.
- Las subestaciones reversibles no suponen una aportación significativa adicional en hora punta o en escenarios de tráfico denso, pero sí que aportan en hora valle. Dado que en hora valle la energía involucrada es menor es necesario hacer un estudio detallado para concluir si globalmente la mejora compensa la instalación de las subestaciones reversibles.

8.2. Caso estudio: línea de alta velocidad Madrid-Zaragoza

La tabla muestra los resultados numéricos del caso estudio de alta velocidad, donde se pueden observar con más detalle los diferentes escenarios considerados.

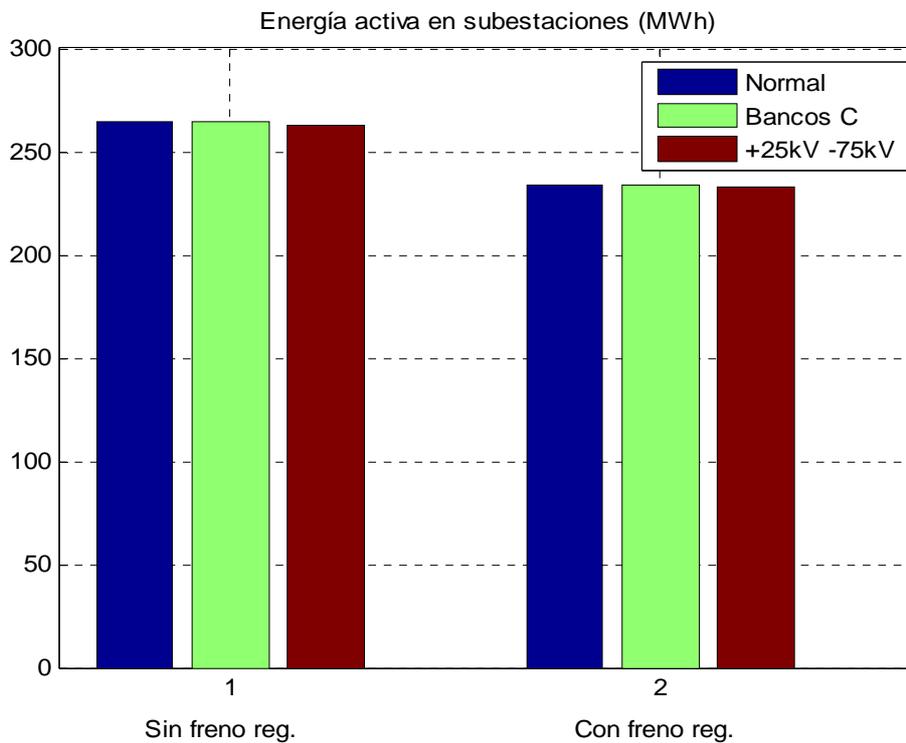
Tabla 13. Caso estudio Línea Alta Velocidad Madrid-Zaragoza.

		Sin freno regenerativo			Con freno regenerativo		
		Sin Dispositivos	Bancos C	Eficiencia +25kV -75kV	Sin Dispositivos	Bancos C	Eficiencia +25kV -75kV
Energía (MWh)	Subestaciones	257.9	257.5	256.1	234.1	233.8	232.5
	Tren (neta)	254.2	254.2	254.2	230.8	230.8	230.8
	Tren (consumo)	254.2	254.2	254.2	251.1	251.1	251.1
	Tren (regenerada)	0.0	0.0	0.0	30.3	30.3	30.3
	Pérdidas catenaria	3.7	3.3	1.9	3.3	2.9	1.7
Rendimiento		0.988	0.987	0.993	0.988	0.987	0.993
Energía reactiva (MVARh)	Subestaciones	118.7	63.1	115.4	102.3	47.3	99.4
	Banco condensadores	0.0	51.2	0.0	0.0	51.2	0.0
	Tren (neta)	86.8	86.8	86.8	75.9	75.9	75.9
	Tren (consumo)	86.8	86.8	86.8	85.8	85.8	85.8
	Tren (regenerada)	0.0	0.0	0.0	10.0	10.0	10.0
	Consumo subestaciones	20.0	17.7	19.3	16.1	14.1	15.6
	Consumo catenaria	9.6	8.6	5.0	8.5	7.6	4.5
	Consumo autotrafico	2.2	2.0	4.2	1.9	1.7	4.5
Temperaturas (Kv)	Máxima	27.408	27.898	27.467	27.775	28.050	27.775
	Mínima	23.498	24.613	24.998	23.568	24.695	25.058

Fuente: Rodríguez Pecharromás et al.(2009)

Las principales conclusiones que se pueden extraer del caso estudio (téngase en cuenta que no se pueden extrapolar en general a otros casos) se destacan a continuación con ayuda de las figuras.

Figura 20. Energía activa en subestaciones (MWh)

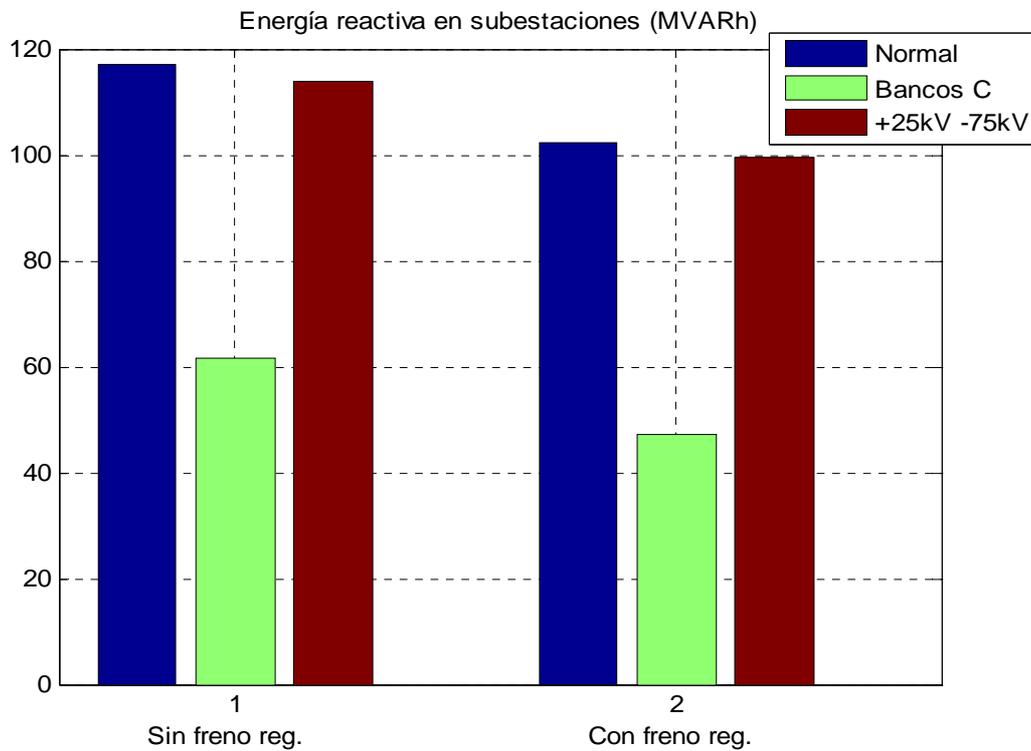


Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

La figura muestra la energía activa consumida en las subestaciones en los diferentes escenarios. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El frenado regenerativo supone un ahorro importante, del orden de un 12%.
- La línea está dimensionada con mucha holgura y emplea alta tensión, lo que hace que las pérdidas sean muy pequeñas (inferiores al 2%).
- Las distintas alternativas mostradas sólo afectan a las pérdidas, por lo que apenas se nota la diferencia en la energía consumida.

Figura 21. "Energía reactiva" en subestaciones (MVARh)

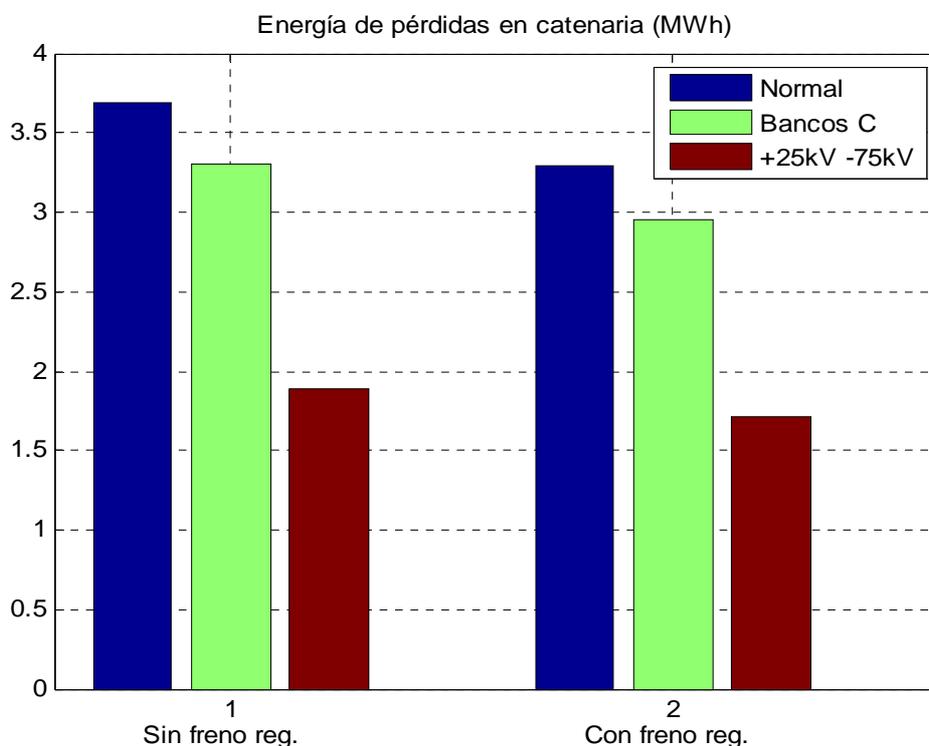


Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

La figura muestra la "energía reactiva" (entendida como acumulación de la potencia reactiva) consumida en las subestaciones en los diferentes escenarios. Las principales conclusiones son las siguientes:

- El frenado regenerativo supone una reducción apreciable de la energía reactiva.
- El uso de bancos de condensadores reduce de manera muy importante la reactiva consumida en las subestaciones. Esto es lógico ya que es el efecto directo de los mismos.
- La alimentación bitensión asimétrica reduce también la reactiva como consecuencia indirecta de reducir las corrientes.

Figura 22. Energía de pérdidas en catenaria (MWh)

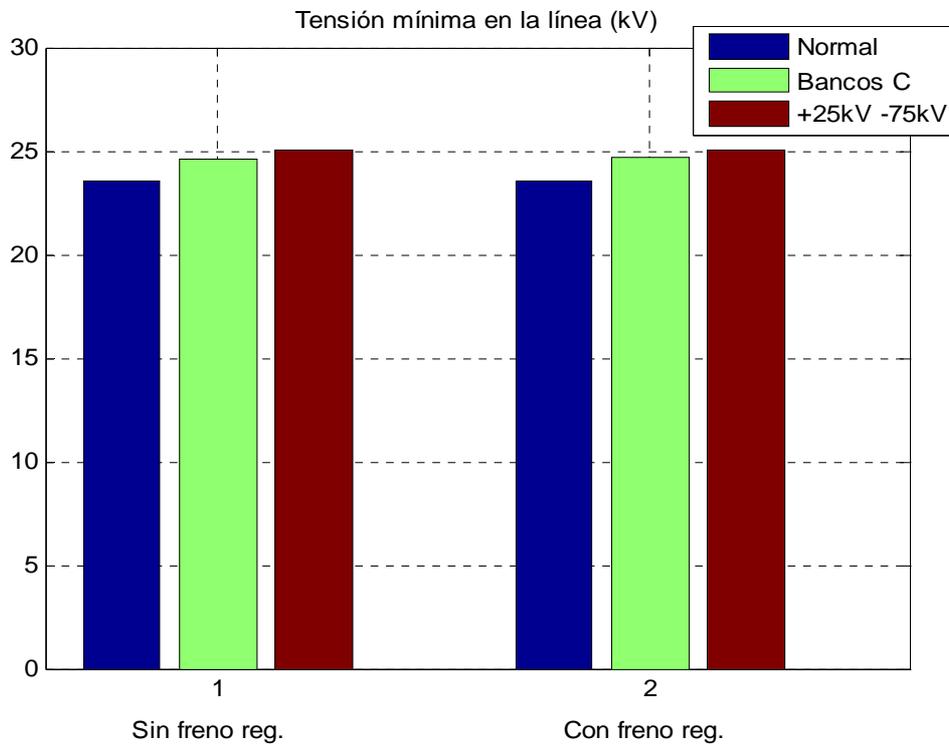


Fuente: Rodríguez Pecharromás et al. (2009)

La figura muestra la energía perdida en la catenaria en los diferentes escenarios. Hay que recordar que, debido al dimensionamiento holgado de la electrificación en este caso, las pérdidas son muy pequeñas (inferiores al 2%). Por tanto, las principales conclusiones extraídas son claras en términos relativos, pero poco significativas respecto a la energía global involucrada en el sistema:

- Los bancos de condensadores aportan la reactiva que consumen los trenes desde puntos de la línea más cercanos que las subestaciones en promedio, lo que hace que las pérdidas en catenaria se reduzcan aproximadamente un 10%.
- La alimentación bitensión asimétrica reduce también las pérdidas en catenaria en un 50% aproximadamente como consecuencia indirecta de reducir las corrientes.

Figura 23. Tensión mínima en la línea (kV)



Fuente: Rodríguez Pecharrromán et al. (2009)

La figura muestra la tensión mínima en la catenaria en los diferentes escenarios. Hay que recordar que, debido al dimensionamiento holgado de la electrificación en este caso (que hace que las pérdidas en catenaria sean pequeñas) y a la alta tensión de vacío (27,5kV), las tensiones no caen mucho respecto a la tensión de vacío y son por tanto bastante altas en general. Las principales conclusiones son las siguientes:

- Los bancos de condensadores hacen que suba algo la tensión mínima.
- La alimentación bitensión asimétrica hace subir también la tensión mínima obtenida.
- El aumento de la tensión mínima supone un aumento de la capacidad de tráfico en la línea.

9. DESARROLLO DE MODELOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LÍNEAS DE ALTA VELOCIDAD

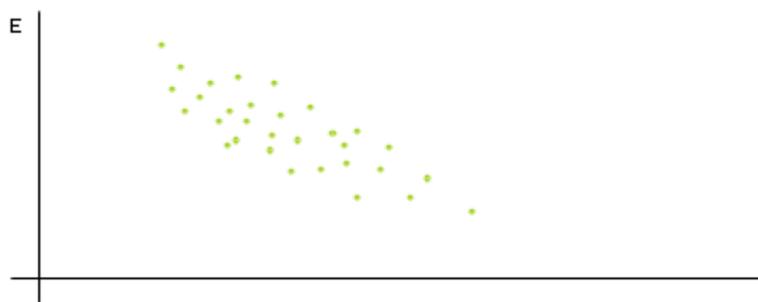
9.1. Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad

Los modelos que se han desarrollado para líneas de alta velocidad cumplen funciones bien diferenciadas; el diseño de la conducción óptima y el diseño de horarios.

Modelos para el diseño de la conducción óptima

Estos modelos están basados en simulación. Mediante esta técnica se generaron conducciones alternativas entre dos paradas consecutivas, cada una de las cuales quedará caracterizada por su tiempo de recorrido y consumo energético asociado. Al representar un gran número de estos pares de valores en unos ejes “tiempo-consumo”, el resultado es una nube de puntos como la de la figura. Esto permite seleccionar, una vez establecido el horario a cumplir por un determinado trayecto, la conducción con el mínimo consumo energético asociado.

Figura 24. Nube de puntos tiempo-consumo.

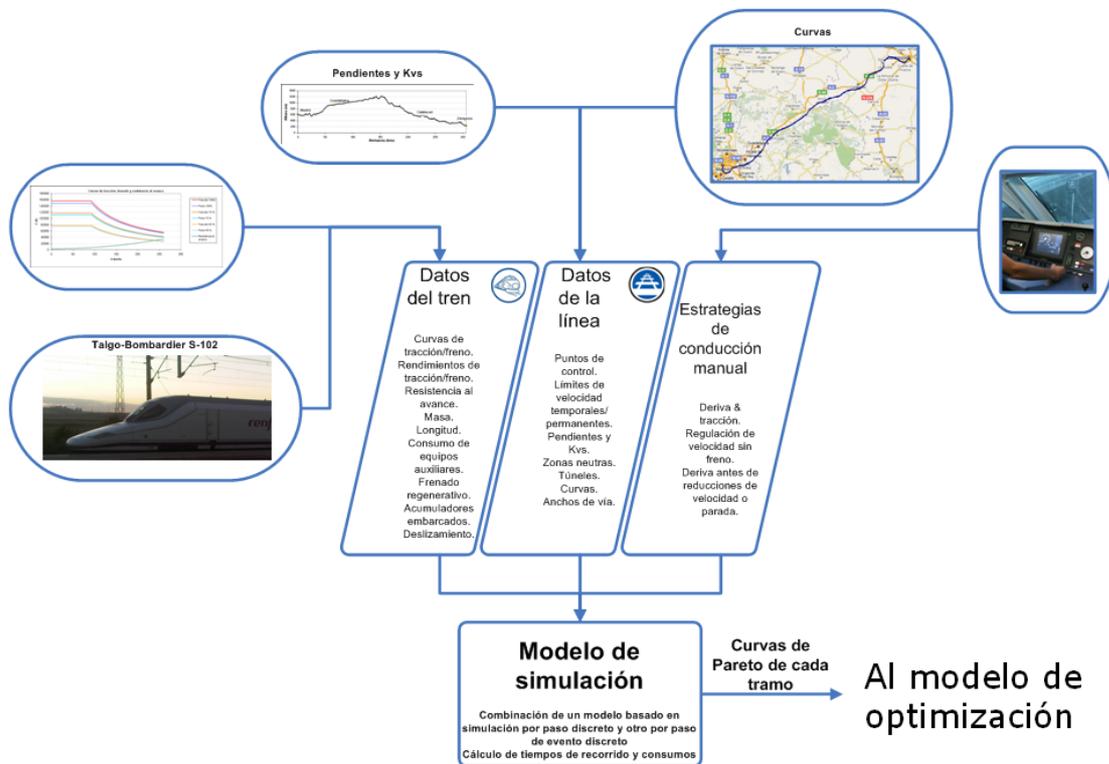


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica - UPComillas (2009)

Para diseñar conducciones eficientes se ha empleado un simulador de la dinámica del tren con capacidad para calcular tiempos de recorrido y consumos energéticos con gran precisión, ya que fue validado con medidas reales

En la figura se muestra el diagrama de bloques del modelo del simulador. Los tres bloques superiores representan los datos de entrada; tren, línea y parámetros de la conducción manual respectivamente, bloques que fueron detallados en el documento “Diseño de los modelos de conducción en alta velocidad”. El bloque inferior contiene los algoritmos de simulación propiamente dichos, donde se realizan todos los cálculos.

Figura 25. Simulador ferroviario



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica - UPComillas (2009)

Modelos para el diseño de horarios

El objetivo de estos modelos es el diseño de horarios comerciales. El punto de partida para la elaboración de dicho horario es la *marcha mínima*, es decir, el mínimo tiempo en el que un determinado tren es capaz de cubrir un determinado trayecto respetando todas las restricciones relacionadas con el problema (motor, velocidades máximas, etc.), y con sus porcentajes de tracción y freno máximos, es decir, el tren acelerará y frenará lo más rápido que le sea posible.

A esta *marcha mínima* se le añaden colchones de tiempo adicionales para recuperación de retrasos, atendiendo tanto a requisitos de eficiencia energética como de puntualidad.

Los modelos emplean información obtenida del sistema de alimentación que se ha modelado en la fase 2 del proyecto ElecRail. Por ejemplo, los parámetros que determinan el porcentaje de aprovechamiento de la energía que regenera el tren durante el proceso de frenado se extraerán de dicho modelo.

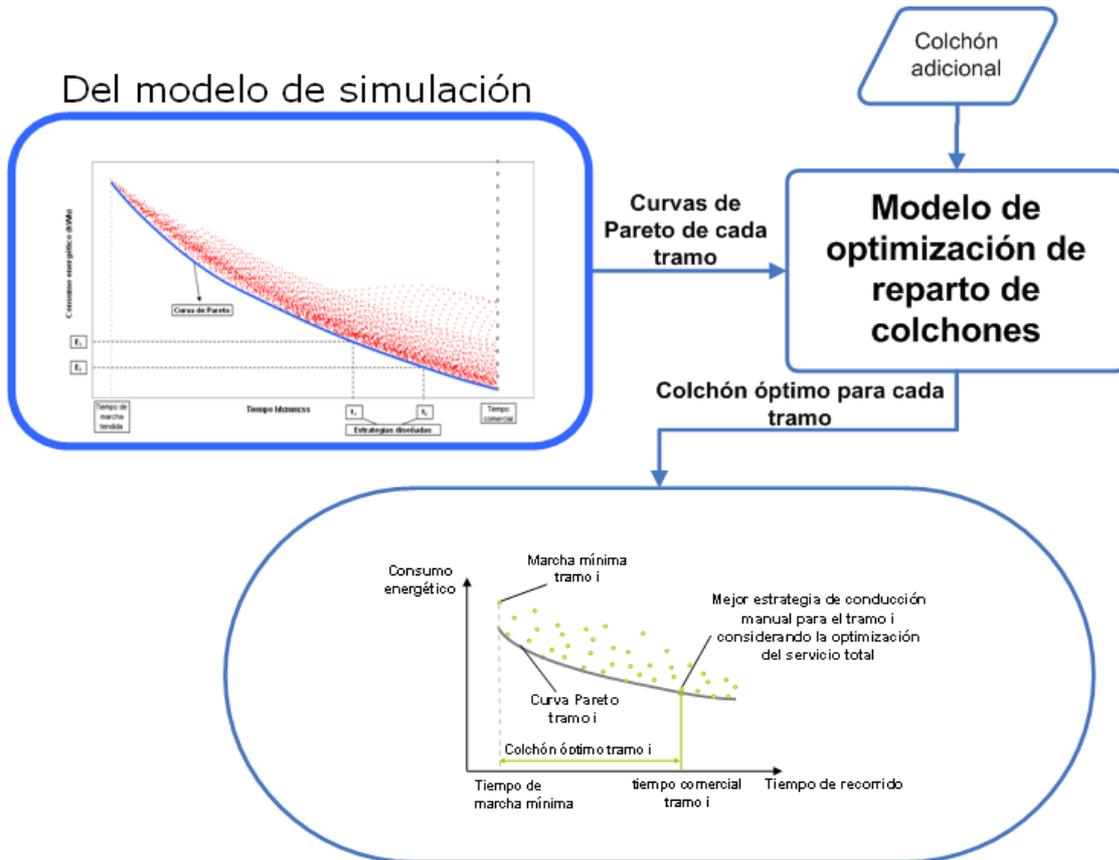
Para optimizar el horario de un servicio comercial se ha desarrollado un modelo que trabaja conjuntamente con el simulador ferroviario.

En general, un servicio comercial tiene una serie de paradas intermedias, de tal manera que se puede dividir en un conjunto de tramos independientes, cada uno de ellos con una estación de salida y otra de llegada. Pues bien, el simulador ferroviario se encargaba de obtener conducciones eficientes en cada uno de los tramos que componen un servicio, de tal manera que su resultado final son las "curvas de Pareto" de cada uno de ellos, curvas que están formadas, para cada tiempo de recorrido posible, por la conducción más eficiente que da lugar a dicho tiempo.

Los datos de entrada del modelo de optimización, por tanto, son las "curvas de Pareto" del servicio que esté siendo optimizado, y margen total de tiempo disponible para todo el servicio.

Este tiempo de margen se calcula restando a cada tiempo comercial de cada tramo el correspondiente tiempo de la marcha mínima. El objetivo del modelo de optimización será el reparto de dicho margen de manera que se minimice el consumo total del servicio

Figura 26. Modelo de optimización de horarios



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica - UPComillas (2009)

9.2. Pruebas de conducciones eficientes guiada

Una vez construido el modelo de simulación, y después de ajustarlo y validarlo mediante las pruebas detalladas anteriormente, éste puede ser empleado para el propósito para el cual se construyó; el diseño de conducciones manuales eficientes.

Para ello se eligieron dos servicios en los que posteriormente se aplicarían las conducciones diseñadas, los cuales fueron los siguientes:

- Tren AVE 3393. Madrid-Huesca, con paradas en Guadalajara, Calatayud, Zaragoza y Tardienta.
- Tren AVE 3272. Huesca-Madrid, con paradas en Tardienta, Zaragoza, Calatayud y Guadalajara.

El diseño de conducciones manuales se realizó para el tramo de alta velocidad en ambos servicios, es decir, desde Madrid hasta Zaragoza y viceversa, de manera que se diseñó la conducción manual en tres tramos para cada servicio:

- Tren AVE 3393. Tramos Madrid-Guadalajara, Guadalajara-Calatayud y Calatayud-Zaragoza.

- Tren AVE 3272. Tramos Zaragoza-Calatayud, Calatayud-Guadalajara y Guadalajara-Madrid.

Esta nueva fase consistió primeramente en el diseño de conducciones manuales eficientes a lo largo de los citados seis tramos, y su posterior aplicación tanto en servicios comerciales como en horario nocturno. También se midieron servicios comerciales sin guiar para poder establecer una base de comparación.

Para cada uno de los tramos, se eligió un diseño de marcha de tal modo que el tiempo empleado en realizarla fuera ligeramente inferior al horario comercial vigente, con el fin de tener cierto margen de recuperación ante posibles incidencias o retrasos.

Hay que mencionar que el diseño de las marchas varió ligeramente dependiendo si las pruebas iban a ser realizadas en horario comercial o en horario nocturno, y esto fue debido fundamentalmente al peso adicional que supusieron los viajeros en la primera situación. Otra de las causas fue que después de la primera fase de medidas, se ajustaron las rutinas de velocidad de entrada y salida de estación y la distancia efectiva de las zonas neutras, es decir, la longitud total en que el tren no recibe alimentación eléctrica.

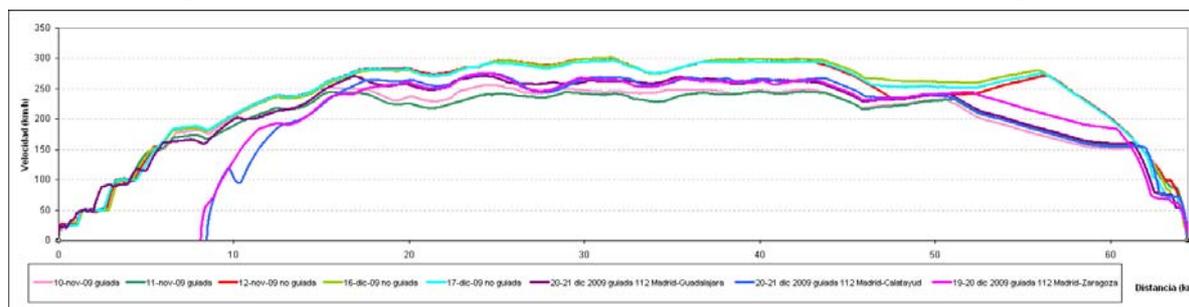
Trayecto Madrid-Zaragoza

Las siguientes figuras muestran las curvas espacio-velocidad para cada una de las pruebas que se realizaron en este recorrido, y cada una de ellas está relacionada con un par tiempo-consumo en la Figura. Los diseños que se detallan corresponden a los aplicados en las pruebas nocturnas.

Tramo Madrid-Guadalajara

El diseño de la conducción en este tramo consistía en realizar una regulación de velocidad sin frenado a 263 km/h combinado con una deriva final desde el P.K. 51,000.

Figura 27. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Madrid-Guadalajara

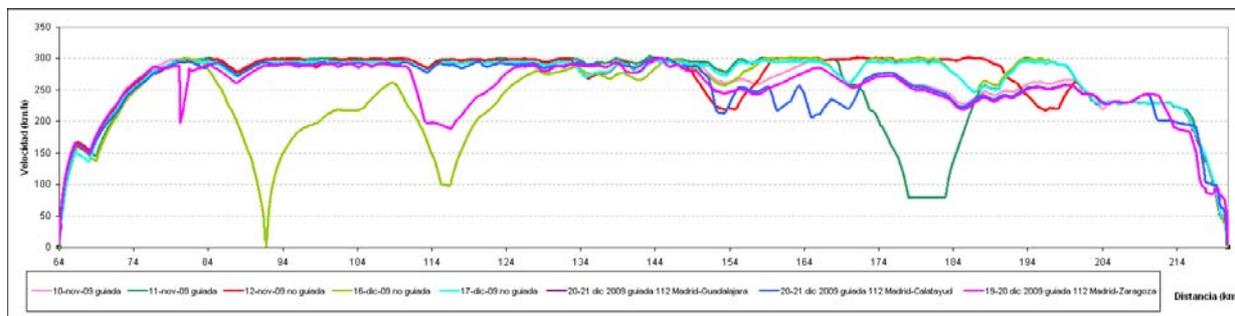


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tramo Guadalajara-Calatayud

Este tramo, además de ser el más largo de los tres que se estudiaron, es el que menos margen de tiempo dispone respecto a la marcha mínima, de manera que la conducción que se diseñó consistía en una regulación de velocidad sin freno a 290 km/h combinado con una deriva final desde el kilómetro 150,000 aprovechando el perfil descendente, totalizando alrededor de 70 km con el regulador cerrado hasta el inicio del freno a la llegada a Calatayud.

Figura 28. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Guadalajara-Calatayud.

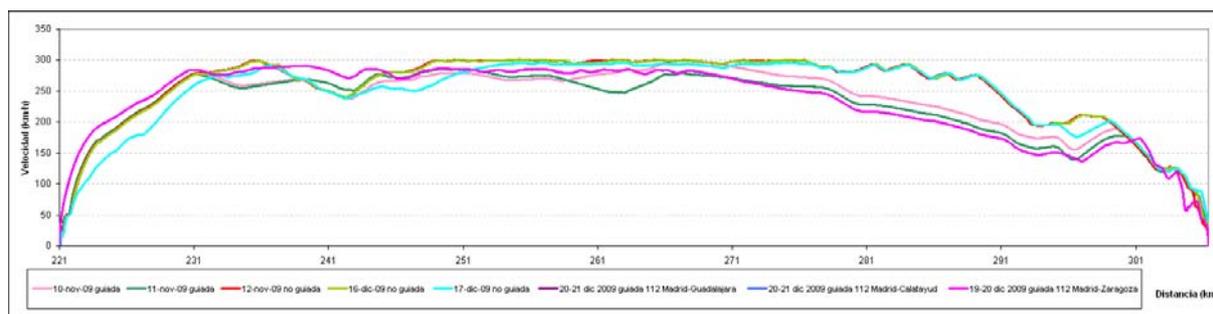


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tramo Calatayud-Zaragoza

En este tramo se propuso una regulación de velocidad a 282 km/h con una deriva final desde el P.K. 268,000. Se aprecia claramente la diferencia entre las marchas guiadas y las no guiadas, donde el tren suele ir a la velocidad máxima de la línea.

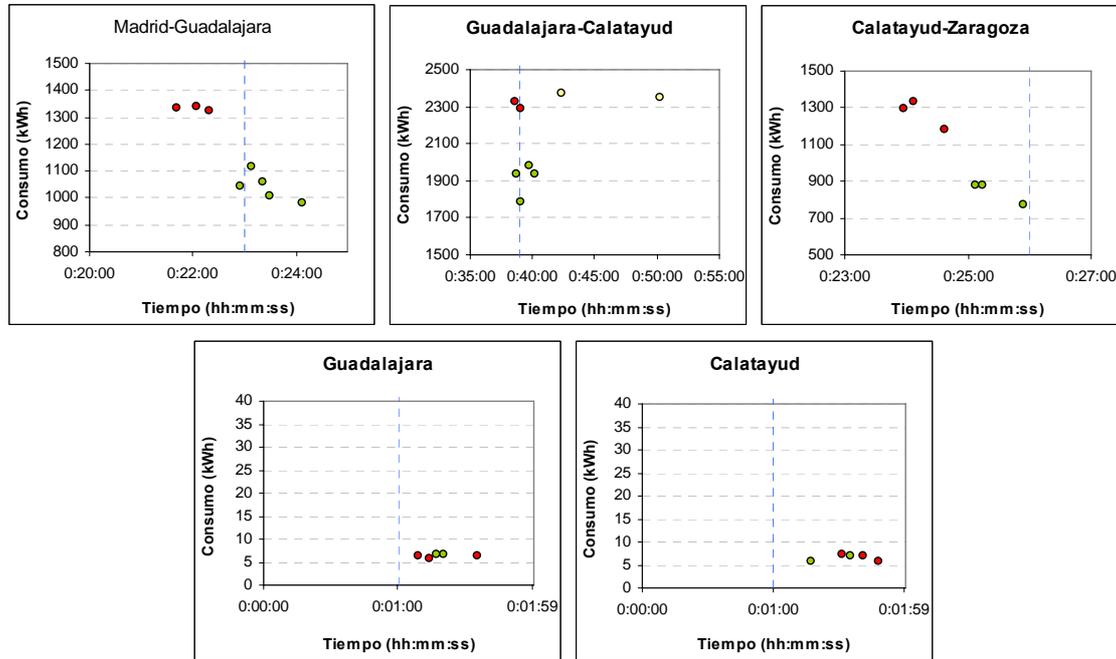
Figura 29. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Calatayud-Zaragoza.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

La Figura muestra en abscisas el eje de tiempo de recorrido, y en ordenadas el de consumo energético para comparar las marchas guiadas y no guiadas mostradas en los gráficos anteriores. Los puntos con fondo rojo indican conducciones no guiadas, que se suelen caracterizar por tiempos de recorrido menores que los comerciales y altos consumos energéticos. Los puntos con fondo verde corresponden a las marchas guiadas, y los de fondo amarillo a marchas no comparables por haberse producido situaciones anómalas durante las mismas como una parada no deseada o un límite de velocidad temporal no previsto en el diseño. Se aprecia que se han conseguido marchas guiadas que se ajustan perfectamente al tiempo comercial, consumiendo considerablemente menos que las marchas no guiadas correspondientes. Los resultados numéricos pueden analizarse en la Tabla , donde se compara entre marchas guiadas y no guiadas.

Figura 30. Gráficos tiempo-consumo del trayecto Madrid-Zaragoza. La línea punteada azul indica el horario comercial planificado. Los puntos amarillos indican marchas anómalas no comparables.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

La Tabla se divide en dos bloques; uno superior que muestra separadamente cada tramo, y otro inferior en que resume la media del trayecto total. La primera columna muestra la distancia de cada uno de los tramos. La segunda indica el tiempo comercial planificado para cada tramo y cada parada. En la tercera y la cuarta se muestran las medias de tiempos de recorrido y parada obtenidos para las marchas guiadas y no guiadas respectivamente. Las dos siguientes columnas muestran la media de incremento o decremento de tiempo con respecto al tiempo planificado en el horario de las marchas guiadas y no guiadas respectivamente. Por último, en las tres últimas columnas se muestran las medias de consumos en recorrido y parada y para las marchas guiadas y no guiadas respectivamente, y el porcentaje de ahorro de las conducciones guiadas respecto a las no guiadas.

Tabla 14. Tabla resumen horario comercial/real, Madrid-Zaragoza.

	Distancia	Horario	Tiempo guiado	Tiempo no guiado	%Δ tiempo guiado/no guiado	%Δt guiado/horario	%Δt no guiado/horario	Consumo guiado	Consumo no guiado	Ahorro guiado/no guiado
	km	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	%	%	kWh	kWh	%
Madrid - Guadalajara	64,400	0:23:00	0:23:25	0:22:02	5,90%	1,78%	-4,23%	1040,74	1333,02	21,93%
Guadalajara		0:01:00	0:01:18	0:01:19	-1,06%	30,83%	32,22%	6,69	6,20	-7,97%
Guadalajara - Calatayud	156,900	0:39:00	0:39:25	0:38:53	1,33%	1,07%	-0,28%	1910,65	2334,66	18,16%
Calatayud		0:01:00	0:01:26	0:01:40	-16,28%	43,33%	66,67%	6,41	6,71	4,39%
Calatayud - Zaragoza	85,400	0:26:00	0:25:26	0:24:14	4,70%	-2,20%	-6,79%	840,51	1269,85	33,81%
Total	306,700	1:30:00	1:31:00	1:28:08	3,14%	1,11%	-2,06%	3805,01	4950,44	23,14%
Recorrido		1:28:00	1:28:15	1:25:09	3,51%	0,29%	-3,24%	3791,90	4937,54	23,20%
Parada		0:02:00	0:02:44	0:02:59	-9,02%	37,08%	49,44%	13,10	12,90	-1,55%

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

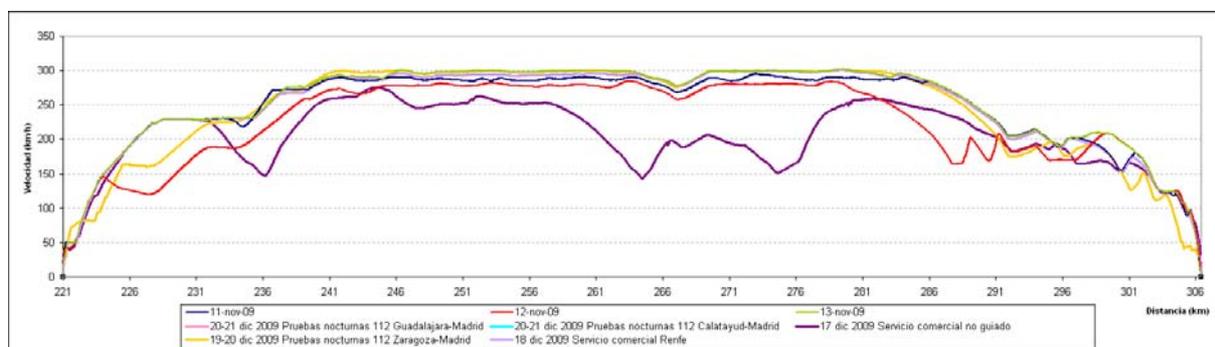
Trayecto Zaragoza-Madrid

Las siguientes 3 gráficas deben ser vistas de derecha a izquierda ya que el sentido de la marcha es de Zaragoza a Madrid.

Tramo Zaragoza-Calatayud

Este tramo dispone de muy poco margen de tiempo, de manera que la conducción manual diseñada se asemeja mucho a la marcha de tiempo mínimo. Ésta consistió en circular a la velocidad máxima de la línea (300 km/h) y realizar una deriva final desde el P.K. 237,700.

Figura 31. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Zaragoza-Calatayud

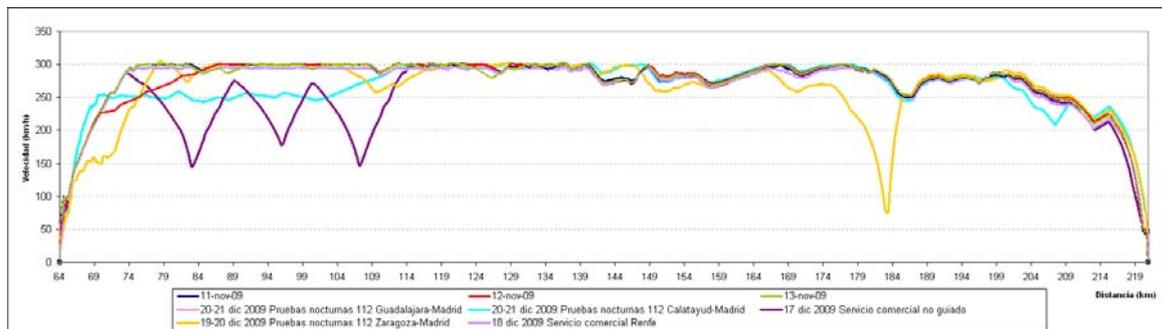


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tramo Calatayud-Guadalajara

Este tramo, al igual que el anterior dispone de muy poco margen de tiempo, de manera que se decidió recorrerlo sin realizar ningún tipo de conducción económica en las pruebas nocturnas. No obstante, en las diurnas, al no haber ajustado aún zonas neutras y rutinas de velocidad, sí se realizaron conducciones guiadas, pero ocasionaron tiempos de recorrido mayores a los comerciales.

Figura 32. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Calatayud-Guadalajara.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

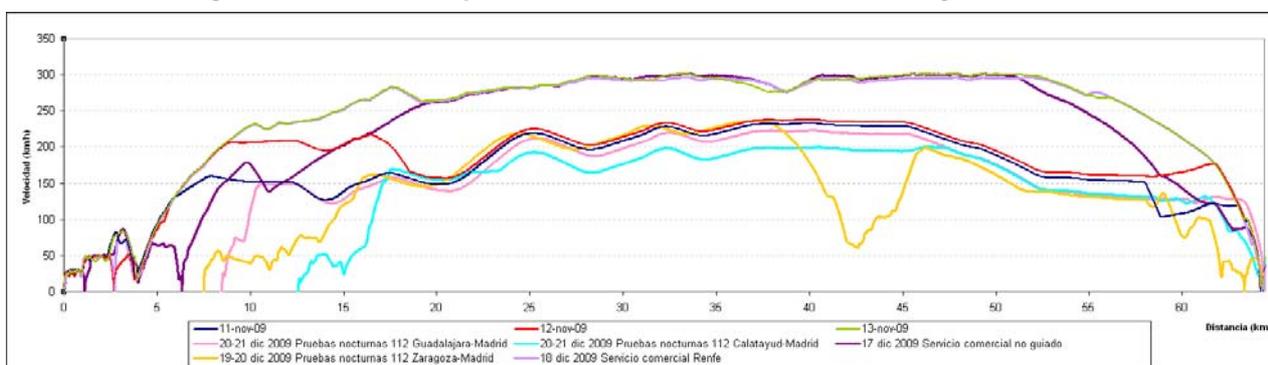
Guadalajara-Madrid

Es en este tramo donde más posibilidades hay de ahorro energético, al disponer de un margen de tiempo holgadísimo para una distancia tan corta (64,4 km). La marcha diseñada consistió en salir de Guadalajara a tracción máxima hasta alcanzar los 125 km/h, momento en que se comenzaría a regular dicha velocidad sin frenar. Una vez alcanzado el P.K. 58,664 se procede a realizar una deriva que se prolongará durante todo el tramo aprovechando el perfil de la línea, que solo se ve interrumpida para cumplir con los límites de velocidad en la entrada a Madrid.

La marcha rosa del 20-21 de diciembre de 2009 (Figura) reproduce fielmente el diseño propuesto, salvo por el hecho de que se realizó en unas pruebas nocturnas en las que el tramo de vía autorizado llegaba solo hasta Madrid Sur. Para poder comparar todas las marchas correctamente, a estas marchas truncadas se les ha extrapolado el tiempo y consumo adicional de haberse completado.

Se aprecia que las conducciones no guiadas (13 de noviembre, 17 y 18 de diciembre) realizan regulaciones de velocidad a 300 km/h, lo que provoca un consumo mucho mayor no solo por ir más rápido, sino porque normalmente los maquinistas regulan con un mecanismo automático de velocidad prefijada, que aplica el esfuerzo de tracción/frenado necesario en cada momento para mantener dicha velocidad, de tal forma que el tren se ve obligado a frenar continuamente para no excederla, derrochando una cantidad adicional de energía. Con estas conducciones los tiempos de recorrido son mucho menores a los indicados en el horario, produciéndose una llegada prematura a Atocha o bien una parada por señalización en las inmediaciones.

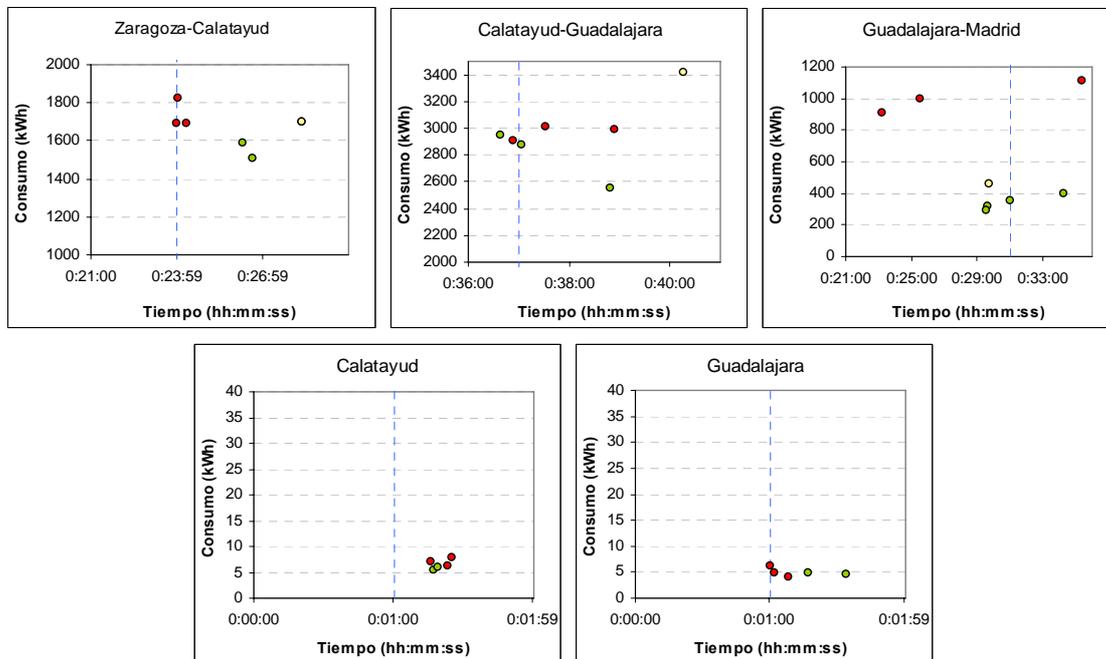
Figura 33. Curvas Espacio-Velocidad del tramo Guadalajara-Madrid.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

La Figura muestra los valores de tiempo de recorrido y consumo energético asociado de las conducciones guiadas y no guiadas registradas, y en la Tabla se muestra el resumen de los resultados numéricos para este trayecto.

Figura 34. Gráficos tiempo-consumo del trayecto Zaragoza-Madrid. La línea punteada azul indica el horario comercial planificado. Los puntos amarillos indican marchas anómalas no comparables.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tabla 15. Tabla resumen horario comercial/real, Zaragoza-Madrid.

	Distancia	Horario	Tiempo guiado	Tiempo no guiado	%Δ tiempo guiado/no guiado	%Δt guiado/horario	%Δt no guiado/horario	Consumo guiado	Consumo no guiado	Ahorro guiado/no guiado
	km	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	hh:mm:ss	%	%	kWh	kWh	%
Zaragoza - Calatayud	85,400	0:24:00	0:26:27	0:24:07	8,80%	10,21%	0,51%	1545,65	1734,61	10,89%
Calatayud		0:01:00	0:01:18	0:01:21	-4,27%	30,00%	35,56%	5,69	7,03	19,10%
Calatayud - Guadalajara	156,900	0:37:00	0:37:31	0:37:47	-0,70%	1,40%	2,10%	2793,95	2971,32	5,97%
Guadalajara		0:01:00	0:01:25	0:01:03	25,93%	42,50%	5,56%	4,72	5,04	6,34%
Guadalajara - Madrid	64,400	0:31:00	0:31:09	0:28:02	9,99%	0,48%	-9,55%	342,12	1005,64	65,98%
Total	306,700	1:30:00	1:37:51	1:32:21	5,61%	8,71%	2,61%	4892,13	5723,64	18,02%
Recorrido		1:28:00	1:35:07	1:29:56	5,44%	8,09%	2,20%	4681,72	5711,57	18,03%
Parada		0:02:00	0:02:44	0:02:25	11,52%	36,25%	20,56%	10,41	12,07	13,77%

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

10. DESARROLLO DE MODELOS PARA LA MEJORA DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA EN LA OPERACIÓN DE LÍNEAS METROPOLITANAS

Los modelos que se han desarrollado para líneas metropolitanas cumplen funciones bien diferenciadas; el diseño de la conducción óptima y el diseño de horarios.

10.1. Modelos para el diseño de la conducción óptima

En líneas metropolitanas equipadas con sistema de conducción automática ATO, por cada interestación se diseñan varias marchas de regulación con distintos tiempos de recorrido cada una, de manera que permitan recuperar retrasos o realizar conducciones más lentas según las necesidades de regulación en cada momento. El objetivo de los modelos para el diseño de la conducción óptima es diseñar dichas marchas 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.

Se han desarrollado modelos basados en simulación que generarán todas las conducciones posibles entre cada dos estaciones de acuerdo con las características del equipo ATO, y que proporcionarán las estrategias de selección de marchas óptimas.

Para realizar una simulación realista de la marcha del tren se han modelado todos los aspectos involucrados en la dinámica del tren y el cálculo de las energías de tracción y regeneración: características del material móvil, de la vía, de la red de alimentación y las características funcionales del sistema ATO.

Los modelos incorporarán como dato de entrada resultados del simulador del sistema eléctrico de alimentación, correspondiente a la fase 2 del proyecto. En concreto los coeficientes necesarios que permitan modelar el grado de aprovechamiento de la energía regenerada, la cogeneración y los acumuladores.

Caso ejemplo. Aprovechamiento del freno regenerativo

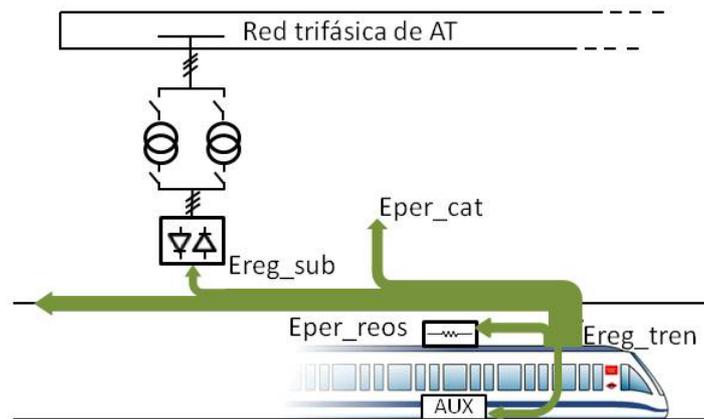
Con el diseño adecuado de las marchas ATO del tren se consigue ahorrar energía puesto que se disminuye el consumo de tracción del tren combinando estrategias de regulación y derivaremotor. Si además tenemos en cuenta las ventajas del freno regenerativo para la generación de energía en los frenados, el consumo neto del tren podría disminuir considerablemente si aprovechamos la energía que él o los trenes cercanos generan. Por lo tanto se hace a continuación el estudio del impacto de la incorporación de la red al modelo, es decir, se asume la posibilidad de que la energía que el tren pone en catenaria se aproveche, ya sea porque un tren cercano traccionando la utilice, porque las subestaciones sean reversibles y admitan la absorción de la corriente continua procedente del tren, o porque se disponga de acumuladores de energía en las subestaciones que almacenen dicha energía para otro momento posterior. Además, se investiga también la conveniencia de que los trenes dispongan de acumuladores de energía embarcados que almacenen su propia energía de frenando y puedan utilizarla en el siguiente arranque sin depender de la red.

Por lo tanto, la metodología a seguir será la siguiente: en primer lugar se estudiarán diferentes configuraciones de la red de alimentación que permitan el aprovechamiento de la energía regenerada por el tren. Esto dará lugar a diferentes escenarios que dependerán además de la demanda, es decir, del número de trenes circulando por la línea. Cada escenario se definirá mediante un factor de aprovechamiento y otro de pérdidas. Posteriormente sobre estos escenarios, se incorporarán además, acumuladores de energía embarcados en los trenes y se estudiará las mejoras esperables si las hubiere. Por último se realizará un nuevo rediseño de las marchas de regulación ATO, esta vez teniendo en cuenta el aprovechamiento de la energía regenerada según los escenarios anteriores considerados.

Definimos como factor de aprovechamiento (1) al porcentaje de la energía regenerada que el tren pone en catenaria y que la red es capaz de aprovechar. Será diferente en función de la configuración de la red que exista.

$$(1) \quad \eta_{\text{aprovechamiento}} = \frac{E_{\text{cons_sub}}^{\text{tren aislado}} - (E_{\text{cons_sub}}^{\text{escenario}} - E_{\text{reg_sub}}^{\text{escenario}})}{E_{\text{reg_tren}}}$$

Figura 35. Regeneración.

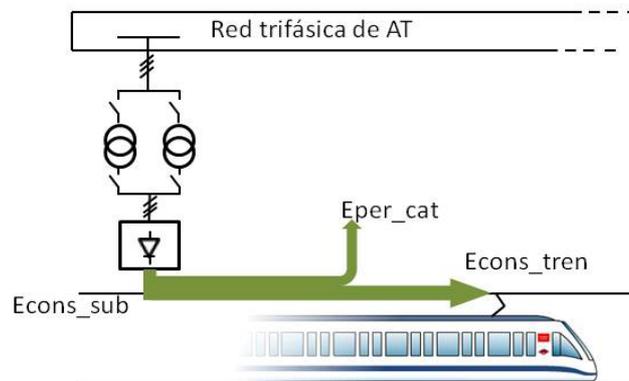


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Por otra parte, la energía que viaja por la red sufre pérdidas en la catenaria, en las subestaciones, en los acumuladores fijos si los hay y en los reóstatos cuando no toda la energía regenerada es aprovechada por la red. Todo esto lo caracterizamos con un rendimiento que representa dichas pérdidas en la red (2).

$$(2) \quad \eta_{\text{pérdidas}} = \frac{E_{\text{cons_tren}}}{E_{\text{cons_sub}}}$$

Figura 36. Alimentación del tren.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Estos factores se han hallado realizando la simulación de toda la línea y teniendo en cuenta además el sistema eléctrico mediante un simulador eléctrico diseñado para el proyecto ElecRail.

Definidos los factores el consumo de energía de los trenes a tener en cuenta a partir de ahora será el medido en subestaciones, no únicamente el consumo de tracción. Es decir, que se tendrán en cuenta gracias a los factores anteriores, tanto el freno regenerativo como el consumo de los servicios auxiliares. Dicho consumo en subestaciones se calcula según (3).

$$(3) \quad \text{Consumo en subestación} = \frac{E_{\text{cons_tren}}}{\eta_{\text{perdidas}}} - E_{\text{reg_tren}} \cdot \eta_{\text{aprovechamiento}}$$

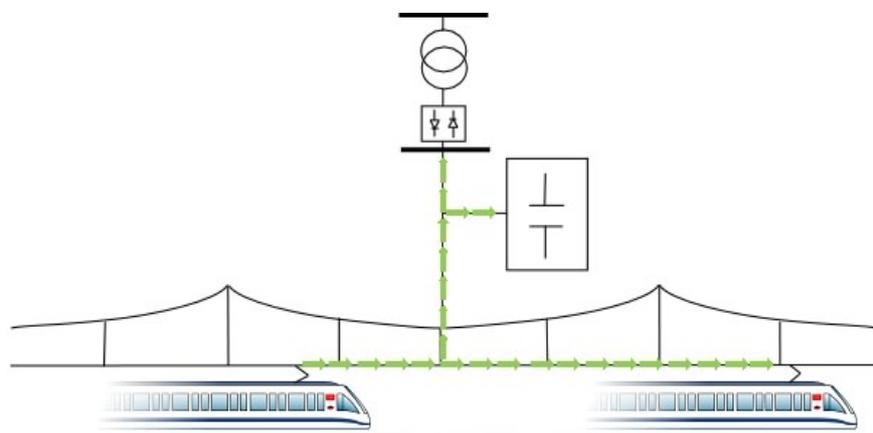
Se han definido posteriormente diferentes escenarios posibles. Como se resume en la tabla se ha simulado un escenario de hora punta con alto número de trenes circulando, lo que dará lugar a factores de aprovechamiento altos. Por el contrario en un escenario de hora valle con pocos trenes próximos, el aprovechamiento de la energía regenerada será más bajo. Los casos base de comparación serán dos: un escenario en el que el tren no tiene frenado regenerativo y otro en el que sí que lo posee pero únicamente le sirve para alimentar sus propios servicios auxiliares, mientras que la energía sobrante se quemará en los reóstatos de freno. El ahorro que se consigue en el resto de escenarios se calcula frente estos dos casos, pero también se calcula la diferencia de energía aprovechada entre ambos dos, es decir el ahorro que se consigue únicamente incorporando frenado regenerativo. Los escenarios posibles en la red se representan en la figura.

Tabla 16. Escenarios contemplados.

	Alimentación Auxiliares	Regeneración entre trenes	Subestación reversible	Acumulador fijo
Hora Punta	NO	NO	NO	NO
	SÍ	NO	NO	NO
	SÍ	SÍ	NO	NO
	SÍ	SÍ	SÍ	NO
	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ
Hora Valle	NO	NO	NO	NO
	SÍ	NO	NO	NO
	SÍ	SÍ	NO	NO
	SÍ	SÍ	SÍ	NO
	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Figura 37. Aprovechamiento del frenado regenerativo



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

10.1.1 Definición de los casos de estudio

Las simulaciones para el estudio de la conveniencia de invertir en las distintas posibles configuraciones de la red, se han realizado utilizando los datos de la Línea 3 de Metro de Madrid. La línea está formada por 17 interestaciones. Tiene una tensión nominal de 1500V, sin embargo opera a una tensión mayor, de aproximadamente 1750V y que ha sido la empleada en las simulaciones. En hora valle se ha supuesto una frecuencia de trenes de un tren cada 15 min mientras que en hora punta el intervalo se reduce a 2min. En un primer ejemplo se ha supuesto un consumo de auxiliares alto, de 500kW, que se resume en la tabla. Posteriormente se realizó otro ejemplo con un consumo de 200kW de auxiliares cuyos resultados se ven en la Tabla .

Tabla 17. Simulación de escenarios con consumo de elementos auxiliares de 500kW.

	Alimentación Auxiliares	Regeneración entre trenes	Subestación reversible	Acumulador fijo	Factor de aprovechamiento	Ahorro frente a alimentación de auxiliares	Ahorro frente a NO regeneración
Hora Punta	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		17.71%
	SÍ	SÍ	NO	NO	101.80%	9.50%	24.63%
	SÍ	SÍ	SÍ	NO	101.80%	9.50%	24.63%
	SÍ	SÍ	NO	SÍ	98.70%	9.21%	24.42%
Hora Valle	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		17.71%
	SÍ	SÍ	NO	NO	88.60%	8.35%	23.79%
	SÍ	SÍ	SÍ	NO	97.90%	9.23%	24.43%
	SÍ	SÍ	NO	SÍ	92.70%	8.74%	24.07%

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

En la tabla debe tenerse en cuenta que la columna “Ahorro frente a alimentación de auxiliares” de color azul es el ahorro calculado de cada uno de los escenarios (filas) frente al segundo caso de hora punta y hora valle, mientras que la columna “Ahorro frente a NO regeneración” de color rojo calcula el porcentaje frente al primero de los casos también de color rojo que contempla un escenario sin freno regenerativo.

Si comparamos los dos casos base, es decir, el escenario en el que hay freno regenerativo únicamente aprovechado por los auxiliares y el escenario en el que no existe regeneración, vemos que el ahorro de energía es ya el 17.71%. Es decir, conseguimos aprovechar un 17.71% de la energía que se quemaría en reóstatos. Este resultado es independiente del escenario de hora valle o punta considerado puesto que la red no llega a intervenir.

En hora punta existen algunos factores de aprovechamiento mayores que el 100%. Esto significa que no sólo no se quema energía en reóstatos puesto que toda es aprovechada en la red por otros trenes cercanos, sino que además, al poder alimentarse el propio tren también de trenes próximos, las pérdidas son menores. En este caso, añadir otras tecnologías a la red es innecesario puesto que ya el mallado de la red aprovecha al máximo la regeneración. Además, si al caso de la subestación reversible o simplemente la regeneración entre trenes, le añadimos el acumulador fijo en la red, el ahorro no sólo no aumenta sino que además empeora. El factor de aprovechamiento es menor en este caso debido a las pérdidas del propio acumulador y sus ciclos de funcionamiento. Por tanto, en el ejemplo estudiado, en el escenario de hora punta, se podría decir que no merecería la pena invertir en ningún tipo de nueva tecnología en la red mientras se permita y favorezca la regeneración y transferencia de energía entre trenes.

En hora valle sin embargo, sí existe una ligera diferencia entre el caso de incorporar inversores en las subestaciones o permitir únicamente transferencia entre trenes. Aproximadamente un 1% de la energía no aprovechada por otros trenes podría devolverse a la red gracias a la incorporación de inversores en la subestación. La incorporación de un acumulador fijo en ella sin embargo, aumentaría el ahorro respecto al caso de transferencia entre trenes únicamente pero en menor medida que los inversores.

Nótese también que el ahorro es menor que en el mismo escenario de hora punta como era de esperar. Con intervalos mayores entre trenes, existen más pérdidas en catenaria y menos capacidad de aprovechamiento de la energía regenerada.

Por tanto, en hora valle de nuevo podría aprovecharse la energía regenerada mediante la transferencia de ella entre los distintos trenes. A pesar de que sí se puede mejorar algo el ahorro con la incorporación de inversores en la subestación, quizá el poco margen de beneficio no justifique la inversión en esta nueva tecnología.

Tabla 18. Simulación de escenarios con consumo de elementos auxiliares de 200kW.

	Alimentación Auxiliares	Regeneración entre trenes	Subestación reversible	Acumulador fijo	Factor de aprovechamiento	Ahorro frente a alimentación de auxiliares	Ahorro frente a NO regeneración
Hora Punta	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		12.90%
	SÍ	SÍ	NO	NO	100.50%	29.59%	36.58%
	SÍ	SÍ	SÍ	NO	100.80%	29.68%	36.65%
Hora Valle	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		12.72%
	SÍ	SÍ	NO	NO	67.70%	20.06%	28.80%
	SÍ	SÍ	SÍ	NO	95.70%	28.35%	35.45%

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

En este caso se consigue un ahorro de casi el 13% por el hecho de, únicamente, disponer de frenado regenerativo para alimentar a los servicios auxiliares.

A diferencia del caso de 500kW, ahora los factores de aprovechamiento para los casos de regeneración entre trenes con y sin inversores son diferentes y menores. Al disminuir el consumo de auxiliares los factores de aprovechamiento disminuyen. Se pone más energía en catenaria que es más difícil de aprovechar. El consumo total del tren disminuye gracias a la menor potencia de auxiliares, por lo tanto se envía más energía regenerada a la red. En hora punta es llamativo el descenso del valor del factor de aprovechamiento. Al haber más energía regenerada puesta en catenaria (se alimentan menos auxiliares) se aprovecha peor.

En hora punta existe un pequeño ahorro adicional por incorporar inversores en la subestaciones de red. El ahorro llega a ser un 6.5% si nos encontramos en un escenario de hora valle.

Luego con un consumo de auxiliares de 200kW (13% potencia del tren) podría ser ventajoso instalar inversores en las subestaciones ya que se consigue bastante ahorro tanto en hora punta como en hora valle.

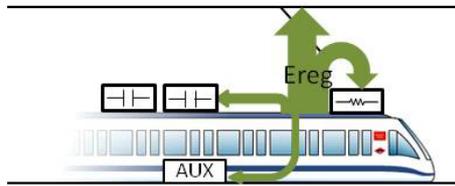
Incorporación de acumulador embarcado en el tren

Una vez estudiada la influencia de una red receptiva de energía regenerada en el consumo de energía de los trenes, se considerará la posibilidad de añadir también, un elemento de acumulación de energía embarcado en el tren para aprovechar toda aquella energía que aún se sigue perdiendo en reóstatos.

De nuevo se trata de comparar los consumos de los trenes en contadores de subestación una vez consideradas pérdidas en la red y aprovechamiento de energía regenerada. Esto significa que en la ecuación (3) la energía consumida y regenerada por el tren debe ser aquella que quede tras tener en cuenta el acumulador embarcado. Es decir, en este caso sería la ecuación (4).

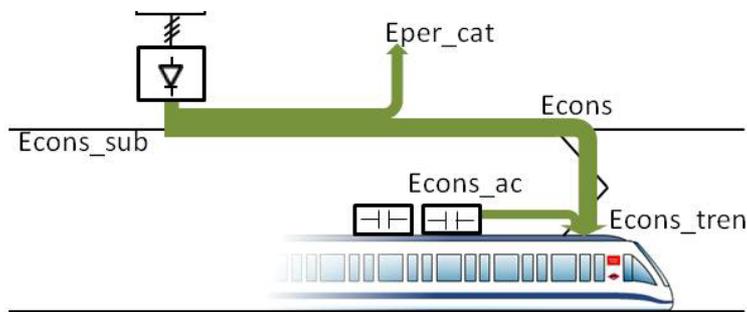
$$(4) \quad \text{Consumo en subestación} = \frac{E_{cons}}{\eta_{perdidas}} - E_{reg} \cdot \eta_{aprovechamiento}$$

Figura 38. Energía regenerada en un tren con acumulador embarcado.



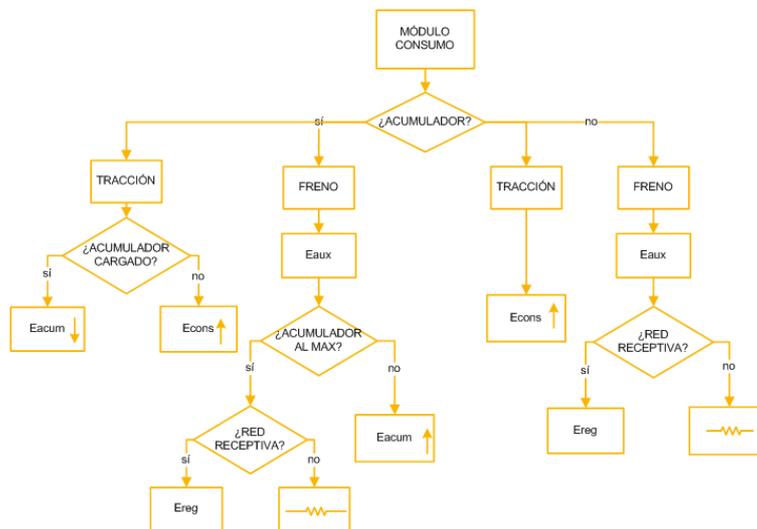
Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Figura 39. Energía consumida por un tren con acumulador embarcado.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Figura 40. Consumo del tren con acumulador embarcado.



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Acumulador embarcado de referencia

Para simular un caso realista con un acumulador embarcado en el tren de características reales, se ha consultado la bibliografía. Finalmente la tecnología existente que se ha empleado en el modelo ha sido el acumulador “MITRAC Energy Saver” de Bombardier que se encuentra en servicio desde septiembre de 2003 en un LRV en Mannheim. Está formado por 640 UltraCaps (condensadores de doble capa) con capacidad de 1800F cada uno. Tiene unas dimensiones de 1900mm x 950mm x 455 mm, una masa de 477kg y una potencia máxima de 300 kW. Además existen simulaciones en un metro europeo con un tren de 8 vagones de 165 t en vacío y 45 t de

carga media, incorporando 6 acumuladores con 1.5 kWh cada uno, en una red de 600-750V. Se han obtenido unos resultados de 14-21% de ahorro esperado.

La aplicación a nuestro caso de estudio ha sido de 4 acumuladores embarcados con una masa total de $M=477 \times 4=1908$ kg, una potencia máxima de 300 kW cada uno y energía almacenable $4 \times 1.5 = 6$ kWh. Además se ha supuesto un rendimiento del 95%.

Escenarios

Recuperamos ahora algunos de los escenarios simulados sin tener en cuenta el acumulador embarcado y considerando potencia de auxiliares de 200kW. Realizamos de nuevo las simulaciones, esta vez teniendo en cuenta el acumulador embarcado en el tren. La comparación de ambas situaciones puede verse en la tabla.

Tabla 19. Escenarios simulados con acumulador embarcado.

	Alimentación Auxiliares	Regeneración entre trenes	Subestación reversible	Acumulador embarcado	Factor de aprovechamiento	Ahorro frente a alimentación de auxiliares	Ahorro frente a NO regeneración
Hora Punta	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		12.90%
	SÍ	SÍ	NO	NO	100.50%	29.59%	36.58%
	SÍ	SÍ	NO	SÍ	100.50%	24.86%	33.73%
Hora Valle	NO	NO	NO	NO	0		
	SÍ	NO	NO	NO	0		12.72%
	SÍ	SÍ	NO	NO	67.70%	20.06%	28.80%
	SÍ	SÍ	NO	SÍ	67.70%	24.77%	33.51%
	SÍ	SÍ	SÍ	NO	95.70%	28.35%	35.45%
	SÍ	SÍ	SÍ	SÍ	95.70%	24.85%	33.58%

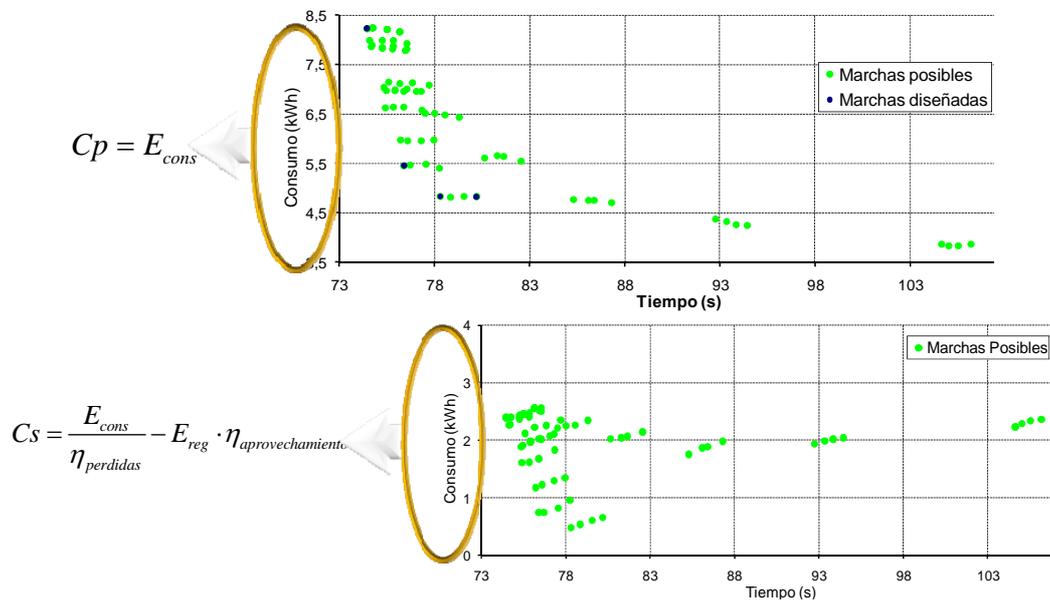
Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Si recordamos, en hora punta teníamos un alto aprovechamiento de la energía regenerada simplemente con la transferencia de energía entre trenes. Incorporando un acumulador embarcado en el tren empeoramos la situación, el ahorro esperado decrece. Esto puede deberse a dos motivos: a el aumento de masa que el acumulador supone en el tren y que implica un mayor consumo y al rendimiento del acumulador menor que el de la red considerada que supone más pérdidas de energía si acumulamos y alimentamos desde el acumulador que desde la red.

En hora valle sin embargo, debido a la poca densidad de tráfico que hace que la transferencia de energía entre trenes sea baja, es más ventajoso acumular la energía regenerada sobrante tras alimentar auxiliares, que devolverla a la red. Se aprovecha hasta un 12% más de energía que con transferencia entre trenes únicamente. Por el contrario, si añadimos inversores en las subestaciones, el ahorro cae incorporando un acumulador embarcado. Con inversores la red ya aprovecha la energía suficiente como para que el rendimiento del acumulador dé lugar a pérdidas mayores.

Por lo tanto, en el sistema de estudio el acumulador embarcado sólo añade ventajas en escenarios de hora valle sin más aprovechamiento de la red que la transferencia entre trenes pero incluso en ese caso se puede optar por subestaciones reversibles que proporcionan ahorros similares.

Figura 41. Modificación de las nubes de puntos.

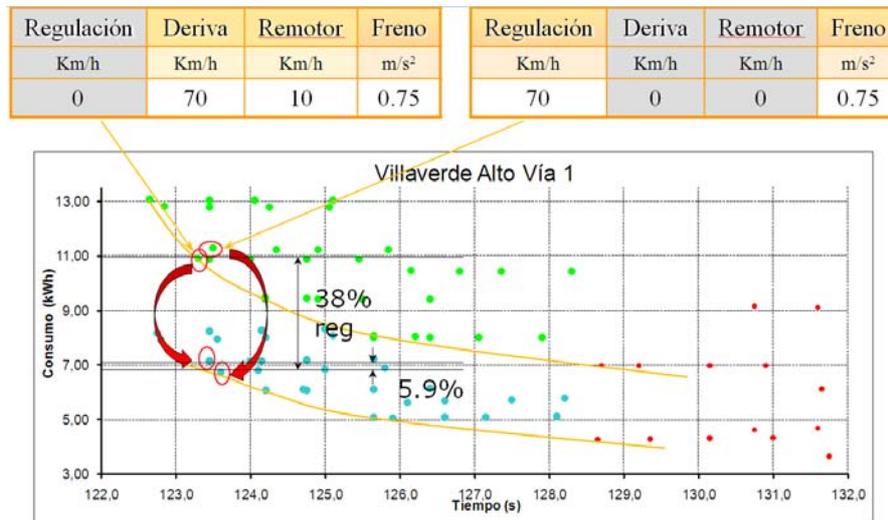


Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Incorporando ahora la energía regenerada en las marchas de ATO, se pueden realizar nuevos diseños que consigan aún, ahorros mayores de energía. Si hasta ahora realizábamos la simulación de todas las combinaciones de parámetros de ATO posibles y representábamos las marchas en un gráfico tiempo de recorrido - consumo de tracción (más auxiliares), ahora el eje de ordenadas será el consumo medido en subestaciones. Es decir descontando la energía regenerada que se ha podido aprovechar y añadiendo las pérdidas en la red.

Como se ve, existe un primer ahorro que se manifiesta en el desplazamiento de la nube de puntos y por lo tanto, de la curva de Pareto, en el eje de ordenadas por el hecho de incluir el aprovechamiento del frenado regenerativo. Pero además, puede darse el caso de que las conducciones que se consideraban óptimas en los diseños sin considerar el freno regenerativo, dejen de estar ahora en la nueva curva de Pareto y sean otras ahora las óptimas.

Figura 42. Modificación de las conducciones



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

En el ejemplo de la figura se ve cómo en el diseño sin red receptiva ni acumulador, una de las marchas óptimas por encontrarse sobre la curva de Pareto, es una marcha con consigna de deriva - remotor. En la nueva nube de puntos que tiene en cuenta el aprovechamiento de la energía regenerada, esta conducción no cae sobre la curva de Pareto, sino que está dominada por una nueva marcha con consigna de regulación a una velocidad constante de 75km/h. Al ahorro del 38% que se consigue solamente con el desplazamiento de la nube de puntos, se le suma un 5.9% adicional de las ventajas de la nueva curva y nuevo diseño de marchas.

Este resultado no extraña. Sin considerar freno regenerativo, es lógico que por lo general, las conducciones óptimas sean aquellas que incluyen periodos de deriva en los que el tren no consume nada (solamente auxiliares). Sin embargo, si aprovechamos la energía del freno eléctrico, habrá conducciones de regulación a velocidad constante más ventajosas, puesto que en estas marchas se debe de frenar parte del tiempo (sobre todo en perfiles con pendiente negativa) para ajustarse a la velocidad de regulación consigna de ATO. De esta manera, el consumo neto del tren disminuye y por tanto su posición en el eje de consumo de la nube de puntos es más baja.

10.2. Modelos para el diseño de horarios

El objetivo de estos modelos es el diseño de la marcha nominal de toda la línea que permita una conducción económica con un tiempo de reserva tal que facilite la recuperación de retrasos en el caso de que haya alguna incidencia en el recorrido. El punto de partida para su elaboración es la *marcha mínima o tendida*, es decir, el mínimo tiempo en el que un determinado tren es capaz de cubrir la distancia entre dos estaciones respetando todas las restricciones relacionadas con el problema (motor, velocidades máximas, etc.), y con sus porcentajes de tracción y freno máximos, es decir, acelerando y frenando lo más rápido que le sea posible. También hay que conocer el tiempo total de viaje entre estaciones cabecera, cuya diferencia con el tiempo mínimo resultará en el tiempo de reserva total a repartir en los recorridos a marcha nominal entre estaciones. Para la adición de los colchones de tiempo en cada interestación, hay que atender también a requisitos de eficiencia energética.

Los modelos emplean información obtenida del sistema de alimentación modelados en la fase 2 del proyecto ElecRail. Por ejemplo, los parámetros que determinan el porcentaje de

aprovechamiento de la energía que regenera el tren durante el proceso de frenado se extraerán de dicho modelo.

Caso ejemplo. Metro de Madrid

Una vez implementado el modelo y la herramienta de simulación, se ha diseñado un caso reducido de prueba con el objetivo de estudiar en detalle los horarios calculados y validar el modelo.

A continuación se parametriza y ejecuta un caso realista, en concreto en vía 2 de Línea 3 de Metro de Madrid, con el objetivo de verificar la robustez del modelo de optimización.

10.2.1 Optimización

La línea está compuesta por 17 estaciones. Se conocen, de cada una de ellas, la curva de Pareto tiempo-consumo y los datos de tiempos de recorrido máximo y mínimo de cada una de las interestaciones. En la tabla se muestran los parámetros de la línea y distribución de retrasos de las estaciones que se han introducido en el optimizador.

Tabla 20. Nombre de las variables y parámetros utilizados

$\bar{t}_{pi}, \underline{t}_{pi}$	Tiempo máximo y mínimo de parada en la estación i
$\bar{t}_{ri}, \underline{t}_{ri}$	Tiempo máximo y mínimo de viaje entre la estación $i-1$ y la i
S_i	Hora de salida de la estación i en el horario diseñado
H_i	Holgura de tiempo asignada al recorrido entre la estación $i-1$ y la i
C_i	Consumo del recorrido de la estación $i-1$ a la i
Np_i	Nivel de puntualidad que es posible obtener a la salida de la estación i
np_i	Nivel de puntualidad requerido a la salida de la estación i
p^w	Probabilidad del evento w
r_i^w	Retraso en la salida de la estación i en el escenario w
a_{ij}, b_{ij}	Pendiente y ordenada de la curva de Pareto en el gráfico tiempo-consumo de la estación i

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tabla 21. Datos de tiempos de recorrido y parada, tramos de las curvas de Pareto y distribución de probabilidad en algunas estaciones

i	Estación	PARÁMETROS				COEFICIENTES POLIGONAL PARETO					
		\bar{t}_{pi} (s)	\bar{t}_{pi} (s)	\bar{t}_{pi} (s)	\bar{t}_{pi} (s)	a _{ij} tramos			b _{ij} tramos		
1	M2	15	30	48.6	60.75	0.00	-0.04	-0.04	10.27	12.03	12.52
2	AR2	15	30	52.65	67.95	-1.10	0.00	-0.02	62.54	2.44	3.76
3	VR2	15	30	51.25	53.65	-1.32	-0.89	0.00	71.94	49.26	2.31
4	PE2	15	30	61.85	64.3	-0.14	-0.08	-0.01	23.61	19.75	15.30
5	C2	15	30	51.65	55.1	-1.50	0.00	0.00	81.40	2.54	2.54
6	S2	15	30	87.25	94.25	-1.20	-0.39	0.00	112.94	38.49	2.54
7	LV2	15	30	56.75	67.55	-1.46	0.00	-0.04	86.54	2.30	4.44
8	EM2	15	30	72.2	74.7	-0.13	-0.02	0.00	16.88	8.96	7.54
9	PF2	15	30	59.95	62.5	-1.39	0.00	0.00	86.78	2.33	2.33
10	DL2	15	30	74	79.7	-1.19	-0.48	0.00	94.20	39.91	2.37
11	L2	15	30	95.2	96.75	-0.09	-0.09	0.00	18.47	18.40	10.03
12	AL2	15	30	89.8	92	-0.24	-0.24	0.00	34.69	35.07	12.93
13	DO2	15	30	60.35	62.75	-0.68	0.00	0.00	48.08	6.57	6.57
14	SF2	15	30	90.7	105.2	-0.78	-0.10	0.00	91.69	27.26	16.40
15	CL2	15	30	76.05	87.95	-0.90	0.00	-0.26	78.69	3.17	25.77
16	VC2	15	30	84	92.65	-0.45	-0.15	-0.11	52.95	25.09	21.43
17	SC2	15	30	129.6	131.2	-0.03	-0.04	-0.02	23.87	25.89	22.93

DISTR. PROBABILIDAD	
r ^w	p ^w
0.85	0
0.95	15
1	30

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

En primer lugar se ha ejecutado el modelo de puntualidad con 500 escenarios para conocer el nivel de puntualidad (por encima del mínimo establecido) que es posible exigir en cada interestación. En la misma tabla se pueden ver los resultados obtenidos, entre ellos el nivel de puntualidad máximo exigible en cada interestación (Np_i). Conocido este dato, se puede ejecutar ahora el modelo de minimización de consumo para obtener el horario óptimo en la línea. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla.

Tabla 22. Resultados obtenidos con el modelo de puntualidad

i	Estación	PARÁMETROS	RESULTADOS			
		np _i (%)	T _{pi} (s)	H _i (s)	S _i (s)	Np _i (%)
1	M2	0.8	0	0	0	1
2	AR2	0.8	30	0	78.6	0.95
3	VR2	0.8	30	2.4	161.25	0.89
4	PE2	0.8	30	0	244.9	0.82
5	C2	0.8	30	0	336.75	0.8
6	S2	0.8	20.6	7	409	0.8
7	LV2	0.8	30	0	533.25	0.81
8	EM2	0.8	30	0	620	0.81
9	PF2	0.8	30	0	722.2	0.81
10	DL2	0.8	30	5.7	812.15	0.82
11	L2	0.8	15	0	906.85	0.82
12	AL2	0.8	15	0	1017.05	0.82
13	DO2	0.8	15	0	1121.85	0.83
14	SF2	0.8	15	0	1197.2	0.83
15	CL2	0.8	15	0	1302.9	0.83
16	VC2	0.8	15	0	1393.95	0.81
17	SC2	0.8	15	1.6	1492.95	0.82

Tiempo total de vuelta	1492.95 s
Tiempo máximo	1858.95 s
Tiempo mínimo	1481.85 s

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Tabla 23. Resultados obtenidos con el modelo de minimización del consumo

PARÁMETROS			RESULTADOS			
i	Estación	np _i (%)	Tp _i (s)	H _i (s)	S _i (s)	C _i (kWh)
1	M2	1	0	12.15	0	10.27
2	AR2	0.95	30	15.3	90.75	2.44
3	VR2	0.89	30	2.4	188.7	2.31
4	PE2	0.82	30	2.45	272.35	14.57
5	C2	0.8	30	3.45	366.65	2.54
6	S2	0.8	30	5.5	451.75	2.54
7	LV2	0.81	30	9.5	574.5	2.3
8	EM2	0.81	30	1.8	670.75	7.54
9	PF2	0.81	30	0.9	774.75	2.33
10	DL2	0.82	30	3.8	865.6	2.37
11	L2	0.82	30	1.55	973.4	10.03
12	AL2	0.82	30	2.2	1100.15	12.93
13	DO2	0.83	30	0.85	1222.15	6.57
14	SF2	0.83	30	11.95	1313.35	16.54
15	CL2	0.83	30	9.55	1446	3.17
16	VC2	0.81	30	8.65	1561.6	11.48
17	SC2	0.82	30	1.6	1684.25	20.06

Consumo	129.98 kWh
Tiempo total de vuelta	1815.45 s
Tiempo máximo	1858.95 s
Tiempo mínimo	1481.85 s

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Se obtiene un consumo de 129.98 kWh en el recorrido de la vuelta. Si en lugar de haberse realizado con las marchas que propone el optimizador, se hubiera realizado con la marcha 1 de cada interestación (considerada normalmente la nominal), el consumo habría sido de 133.33kWh, por lo que el ahorro conseguido es del 2.5% además de la puntualidad deseada.

Simulación

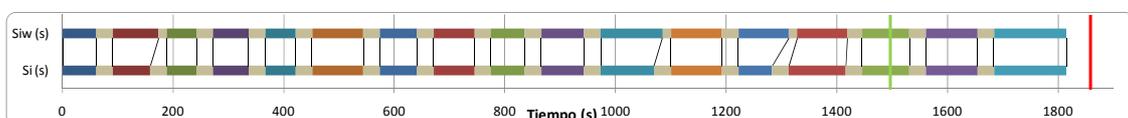
Para poder ilustrar los escenarios se ha desarrollado un simulador que permita visualizar y validar los resultados que se obtienen del modelo de optimización. En la tabla se muestra un caso concreto donde los tiempos de retraso aleatorios se obtienen de la distribución dada. Con estos retrasos se puede determinar el horario real, que se compara con el programado en la misma tabla. En la segunda interestación existe una demora de 15s que se aprecia también en la llegada a la estación. Sin embargo, gracias al margen de tiempo en la parada, el tren consigue salir puntual. Lo mismo ocurre en la interestación 11. Por el contrario, en la 13 existe un retraso de 30s que no es posible recuperar en la parada. En la figura se ve cómo la incidencia se propaga hasta la estación 15, saliendo de ella puntual. Finalmente, el tiempo de vuelta total es el mismo en ambos horarios (1815.45s).

Tabla 24. Caso ejemplo

Estación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17																	
r _i [*] (s)	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	30	0	0	0	0																	
L _i (s)	0	48.6	15	52.65	15	51.25	15	61.85	15	51.65	15	87.25	15	56.75	15	72.2	15	59.95	15	74	15	95.2	15	89.8	15	60.35	15	90.7	15	76.05	15	84	15	129.6
S _i (s)	0	60.75	30	67.95	30	53.65	30	64.3	30	55.1	30	92.75	30	66.25	30	74	30	60.85	30	77.8	30	96.75	30	92	30	61.2	30	102.65	30	85.6	30	92.65	30	131.2
S _i ^{**} (s)	0	60.75	30	82.95	15	53.65	30	64.3	30	55.1	30	92.75	30	66.25	30	74	30	60.85	30	77.8	30	111.75	15	92	30	91.2	30	90.7	26.95	85.6	30	92.65	30	131.2
∑(S _i ^{**} +T _{pi} ^{**}) (s)	60.75	173.7	242.35	336.65	421.75	544.5	640.75	744.75	835.6	943.4	1085.15	1192.15	1313.35	1419.05	1531.6	1654.25	1815.45																	
∑(S _i +T _{pi}) (s)	60.75	158.7	242.35	336.65	421.75	544.5	640.75	744.75	835.6	943.4	1070.15	1192.15	1283.35	1416	1531.6	1654.25	1815.45																	

Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

Figura 43. Distribución de tiempos en el caso ejemplo



Fuente: Instituto de Investigación Tecnológica

BIBLIOGRAFÍA

García Álvarez, A. (2008): “*Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril y línea de trabajo para su reducción*”. Monografías ElecRail.

García Álvarez, A. y Martín Cañizares, M.P. (2010): “*Metodología de cálculo del consumo de energía de los trenes de viajeros y actuaciones para su reducción*”. Monografías ElecRail.

García Álvarez, A. et al. (2008): “*Metodología para la evaluación de las prestaciones y eficiencia de los trenes de viajeros*”.

García Álvarez, A. (2010): “*Energía y emisiones en el transporte por ferrocarril*”. Fundación de los Ferrocarriles Españoles

De Miguel, R. et al. (2008): “*Aplicación de los materiales compuestos en el sector ferroviario*”. Notas técnicas ElecRail.

FFE e IDAE (2009): “*Metodología de evaluación de la eficiencia energética del material móvil ferroviario*”.

Instituto de Investigación Tecnológica - UPComillas (2009): “*Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad*”. Monografías ElecRail.

Martinez Acevedo, J.C. et al. (2009): “*Almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria*”. Monografías ElecRail.

Olea Unamuno, F.J. (2008): “*Rendimientos de la tracción eléctrica*”. Monografías ElecRail.

Pilo et al. (2008): “*Flujos de la energía de la electricidad para el transporte*”. Monografías EnerTrans.

Rodríguez Pecharromán (2009): “*Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red*”. Monografías ElecRail.

Publicaciones del Proyecto [ElecRail](#)

Monografías:

Monografía 1: *“Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 2: *“Rendimientos de la cadena de tracción eléctrica”*: Francisco Javier Olea.

Monografía 3: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria”*: José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tovagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz.

Monografía 4: *“Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica embarcados en los trenes”*: Pedro Estévez Irizar, Maider Varela Cuadrado, Egoitz Iturritxa Zubiri.

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”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 6: *“Diseño de los vehículos ferroviarias para la mejora de su eficiencia energética”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.

Monografía 7: *“Alimentación eléctrica, cogeneración, almacenamiento y diseño de la red”*: Ramón R. Pecharromán, Eduardo Pilo, Álvaro López.

Monografía 8: *“Requisitos de los modelos para líneas metropolitanas y de alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas, Instituto de Investigación Tecnológica de Metro de Madrid.

Monografía 9: *“Diseño de los modelos de simulación en líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 10: *“Diseño de los modelos de simulación en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 11: *“Resultados de conducciones eficientes en alta velocidad”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 12: *“Implementación, resultados y pruebas de los modelos para líneas metropolitanas”*: Instituto de Investigación Tecnológica de la Universidad Pontificia de Comillas.

Monografía 13: *“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)”*: Alberto García Álvarez, M^a del Pilar Martín Cañizares.