

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria



José Conrado Martínez Acevedo

Carlos Tobagas Guerra

Jorge Iglesias Díaz

*Administrador de Infraestructuras
Ferrovias (ADIF)*

Monografías **ElecRail** / 3

Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica en la infraestructura ferroviaria

José Conrado Martínez Acevedo

Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)

Carlos Tobagas Guerra

Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)

Jorge Iglesias Díaz

Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF)



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

© José Conrado Martínez Acevedo, Carlos Tobagas Guerra, Jorge Iglesias Díaz

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

ISBN: 978-84-89649-87-3

Depósito Legal: M-12057-2012



INDICE

INDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	4
2. Tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica	5
2.1. Objeto	6
2.2. Metodología	7
3. ANÁLISIS PREVIO DE LOS DATOS	9
3.1. Datos GranCees	9
3.2. Anuario de Ministerio de Fomento	11
3.3. Diferencias entre datos GranCEES y Ministerio de Fomento	12
3.4. ADIF / Renfe	13
3.5. Datos económicos	15
4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ESPAÑOL	16
4.1. Sistema eléctrico público	16
BIBLIOGRAFÍA	18

1. INTRODUCCIÓN

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.

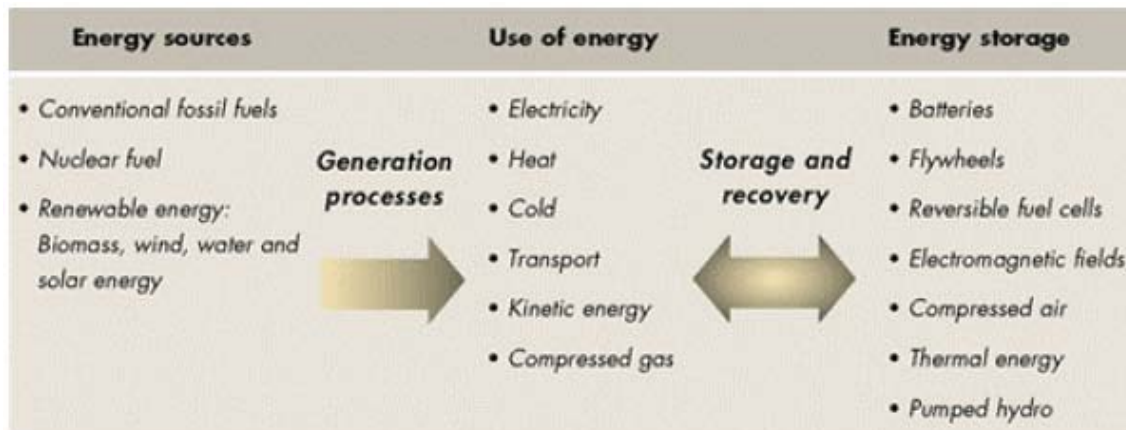
El almacenamiento de la energía eléctrica producida ocasionalmente en periodos de baja demanda y bajo coste, así como la energía generada por fuentes intermitentes como el viento o el sol, permite que se utilice posteriormente en periodos de alta demanda y alto coste o cuando no haya capacidad de generación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

2. 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 1. Fuentes de energía primaria, transformación posterior y diferentes modos de almacenamiento



Fuente: Dirección de Innovación Tecnológica, ADIF

La presente

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 (2004).

El transporte es igualmente responsable de la mayor cantidad de CO₂ 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 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. 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.

El peso de la tracción eléctrica ferroviaria en el consumo de electricidad

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).

Potenciación de los servicios de transporte con tracción eléctrica

En España, en concreto, el actual 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 concreto 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 constituyen 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.

2.1. Objeto

Esta *Nota Técnica* se centra en el análisis del consumo de energía de los sistemas ferroviarios en España, que se puede dividir en dos aplicaciones: tracción (movimientos de los trenes) y equipos auxiliares de los trenes.

Esta Nota Técnica tiene los siguientes objetivos:

- Cuantificar el consumo de energía para la explotación del ferrocarril en España, tomando como referencia el año 2007.
- Ofrecer datos con un nivel de detalle suficiente para evaluar el impacto de mejoras como la acumulación de energía, el mayor uso del freno regenerativo, la conducción económica o devolución de energía a la red pública.
- Homogenizar de los datos publicados en las Memorias de las distintas empresas que operan dentro del ámbito nacional, como Metro de Madrid, Metro de Barcelona, FEVE, Renfe.... 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.
- Analizar y tratar los datos de los consumos de energía publicados, teniendo en cuenta que estos datos normalmente corresponden a valores medidos en la entrada de la subestación. El tratamiento es necesario, ya que como los niveles de tensión "aguas abajo" son diferentes, las cantidades de energía consumidas a la entrada del tren también lo son. Además, dado que la alimentación es distinta, en muchos casos se deben realizar las conversiones oportunas para pasar de los consumos medidos en la entrada de la subestación a los consumos a la salida de la central generadora de electricidad.

2.2. Metodología

La metodología empleada para elaborar esta *Nota Técnica* es la siguiente:

- Se recopila y analiza la información publicada sobre los consumos en ferrocarril español en los últimos años.
- Se describe la topología del sistema eléctrico peninsular y del sistema de los ferrocarriles para la alimentación de los trenes.
- Se homogenizan los datos de los consumos medidos en puntos homotéticos, partiendo de los consumos conocidos (normalmente, a la entrada de la subestación) y de los niveles de tensión de entrada y salida.
- Se hace la corrección por los flujos internos de energía dentro del sistema ferroviario debidos al freno regenerativo.

Es preciso tener en cuenta que, genéricamente, todos los consumos de los trenes, tanto los propiamente de tracción como los auxiliares se denominan habitualmente "consumos de tracción" y, por otra parte, que en ocasiones cuando se hacen referencia a "consumos de auxiliares", se incluyen tanto los auxiliares de los trenes como los de la infraestructura. Todo ello requiere un adecuado deslinde para su análisis.

El ferrocarril recibe la energía en tiempo real desde el sistema eléctrico nacional a diferentes tensiones. En España no existen centrales de producción de electricidad específicas para el ferrocarril (sin embargo, en otros países, como Alemania, al utilizar la frecuencia ferroviaria 16 2/3 Hz, existen centrales destinadas exclusivamente a este consumo). Por ello, para analizar el detalle de los consumos del ferrocarril, será necesario realizar referencias a la estructura del sistema eléctrico nacional español; y más en concreto, al sistema peninsular, ya que con la

excepción del tranvía de Tenerife, el Metro de Palma y el tren de Soller, el resto del ferrocarril español se alimenta del sistema eléctrico peninsular.

3. ANÁLISIS PREVIO DE LOS DATOS

Para el análisis de los datos se relacionan los consumos publicados en varias fuentes.

En cada uno de los casos, se presentan los datos de la forma más detallada posible, explicando las fuentes y las observaciones metodológicas que se hayan podido obtener.

3.1. Datos GranCees

La Asociación de Grandes Consumidores de Electricidad del Sector Servicios (GranCEES) recopila, en su Memoria anual, los datos de consumos de las empresas ferroviarias que se muestran en la tabla. La columna "Metro" engloba el consumo total de tracción y auxiliares de Metro de Madrid, Metro de Bilbao y Ferrocarril Metropolità de Barcelona; y la columna "Ferrocarril", el consumo de ADIF-Renfe, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana, Eusko Trenbideak, FEVE y el Ferrocarril de Sóller.

Tabla 1. Consumo de energía eléctrica del ferrocarril 1996-2007 según datos de GranCees

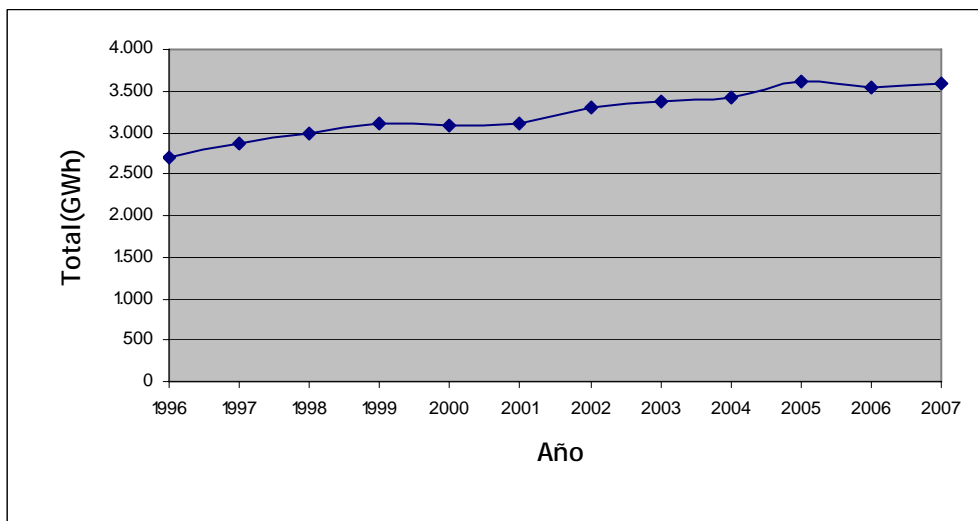
AÑO	Consumo eléctrico		
	<i>Ferrocarril (GWh)</i>	<i>Metro (GWh)</i>	TOTAL (GWh)
1996	2.147	559	2.706
1997	2.274	605	2.879
1998	2.359	637	2.996
1999	2.392	715	3.107
2000	2.353	731	3.084
2001	2.367	749	3.116
2002	2.513	786	3.299
2003	2.475	898	3.373
2004	2.513	916	3.429
2005	2.681	931	3.612
2006	2.620	932	3.552
2007	2.547	1.050	3.597

Fuente: GranCees, 2007

Nota: Los datos del año 2007 estimados partiendo de años anteriores para Eusko Trenbideak, Metro de Bilbao y Ferrocarril de Sóller.
Incluye tanto energía de tracción y como UDT.

En la siguiente gráfica se observa el aumento progresivo del consumo total de energía eléctrica en el ferrocarril desde el año 1996 hasta el 2007 según la Asociación de Grandes Consumidores de Electricidad del Sector Servicios (GranCEES).

Figura 1. Evolución del consumo de energía eléctrica del ferrocarril según datos de GranCees



Fuente: GranCees 2007

Los datos de consumo del año 2007 han sido estimados según datos publicados y datos de años anteriores. La siguiente tabla muestra de forma detallada el consumo total para dicho año. En los casos de Metro de Madrid, Eusko Trenbideak y FEVE no se incluye el consumo en baja tensión.

Tabla 2. Consumos por empresas ferroviarias en el año 2007 según GranCEES

	Consumo eléctrico 2007(GWh)	Porcentaje sobre el total(%)
Adif-Renfe	2.313	64,16
Metro de Madrid	737	20,44
<i>Ferrocarril Metropolità de Barcelona</i>	244	6,75
Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya	87	2,40
Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana	82,5	2,29
<i>Eusko Trenbideak</i>	39	1,08
<i>Metro Bilbao</i>	69	1,91
FEVE	24,6	0,68
<i>Ferrocarril de Söll</i>	2	0,06
<i>Tranvías</i>	8	0,22
Total Grupo Tracción	3.605	100

Fuente: GranCees 2007

3.2. Anuario de Ministerio de Fomento

El Ministerio de Fomento publica cada año un "Informe sobre los Transportes y Servicios Postales", en el que analizan los aspectos técnicos, económicos y normativos, tanto en el ámbito nacional como internacional, a través de referencias documentales y de datos de procedencia diversa.

La siguiente tabla muestra en la columna "Metro" los consumos eléctricos del Metro de Madrid, Barcelona y Bilbao; y en la columna "Ferrocarril", de Adif-Renfe, Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya, Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana, Eusko Trenbideak y FEVE.

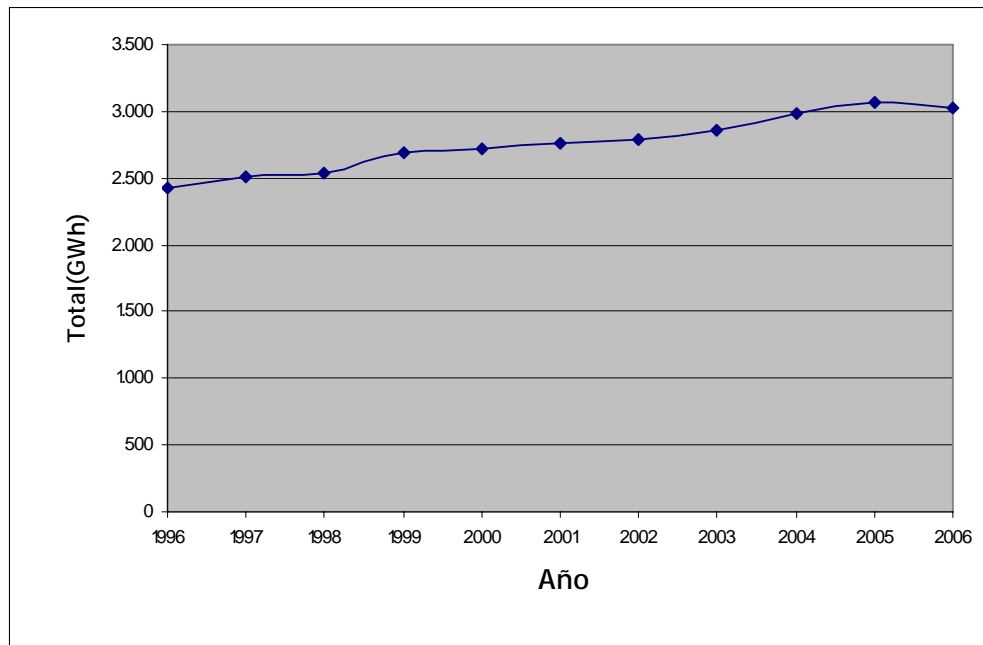
Tabla 3. Consumo de energía del ferrocarril 1996-2006 según datos de Ministerio de Fomento

AÑO	Consumo eléctrico		
	Ferrocarril (GWh)	Metro (GWh)	TOTAL (GWh)
1996	1.972	452	2.424
1997	2.065	440	2.505
1998	2.076	463	2.539
1999	2.176	519	2.695
2000	2.181	535	2.716
2001	2.223	544	2.767
2002	2.213	571	2.784
2003	2.200	660	2.860
2004	2.307	681	2.988
2005	2.392	673	3.065
2006	2.372	653	3.025
2007			

Fuente: Ministerio de Fomento

La gráfica muestra el aumento progresivo del consumo total de energía desde el año 1996 hasta el 2006 según el Ministerio de Fomento.

Figura 2. Consumo de energía del ferrocarril según datos de Ministerio de Fomento



Fuente: Ministerio de Fomento

3.3. Diferencias entre datos GranCEES y Ministerio de Fomento

A continuación, y como los datos de ambas fuentes son diferentes, se muestran en la siguiente tabla las diferencias para su análisis. Puede observarse que los datos de GranCees son siempre superiores a los del Ministerio de Fomento, tanto en ferrocarriles como en Metros, eso descarta que las diferencias se deban a diferente clasificación de una empresa como ferrocarril o Metro. La segunda cuestión que se observa, es que como siempre es mayor el consumo eléctrico para GranCEES, y en su mayor parte no incluye usos distintos de tracción, no se puede justificar estos valores por incluirlos.

La diferencia en porcentaje es sensiblemente mayor en Metro que en ferrocarril y para el Metro la diferencia oscila entre el 25% y 30%.

Tabla 4. Diferencia de consumo entre los datos proporcionados por GranCEES y el Ministerio de Fomento

Ferrocarril		Metro		Total	
Diferencia (GWh)	Diferencia en porcentaje (%)	Diferencia (GWh)	Diferencia en porcentaje (%)	Diferencia (GWh)	Diferencia en porcentaje (%)
175	8,15	107	19,14	282	10,42
209	9,19	165	27,27	374	12,99
283	12,00	174	27,32	457	15,25
216	9,03	196	27,41	412	13,26
172	7,31	196	26,81	368	11,93
144	6,08	205	27,37	349	11,20
300	11,94	215	27,35	515	15,61
275	11,11	238	26,50	513	15,21
206	8,20	235	25,66	441	12,86
289	10,78	258	27,71	547	15,14
248	9,47	279	29,94	527	14,84

Fuente: Ministerio de Fomento

3.4. ADIF / Renfe

ADIF da a conocer todos los años los consumos de energía de tracción. En las siguientes tablas se puede observar los consumos eléctricos entre los años 2004 y 2007, tanto para la tracción eléctrica como diésel.

Tabla 5. Consumo de energía eléctrica del ferrocarril según datos de Adif

	Usos de tracción (GWh)	Usos distintos de tracción (GWh)
2004	1.971	298
2005	2.082	273
2006	2.079	285
2007	2.056	307

Fuente: Adif

Tabla 6. Consumo de gasóleo B exento del ferrocarril para usos de tracción según datos de Adif

	2004		2005		2006			2007				
	RENFE	RENFE OPER.	ADIF	TOTAL	RENFE OPER.	ADIF	TOTAL	RENFE OPER.	ADIF	RAIL	COMSA	TOTAL
Locomotoras	54.898.688	52.954.188	374.454	53.328.642	52.433.832	521.138	52.954.970	49.880.541	492.420	676.695	2.285	51.051.941
Automotores	27.650.406	28.909.524	0	28.909.524	29.720.090	0	29.720.090	30.354.316	0	0	0	30.354.316
Subtotal	82.549.094	81.863.712	374.454	82.238.166	82.153.922	521.138	82.675.060	80.234.857	492.420	676.695	2.285	81.406.257
Maniobras	5.419.632	573.253	4.318.776	4.892.029	840.671	3.791.309	4.631.980	422.717	3.550.257	0	0	3.972.974
Generadores	7.954.526	7.664.296	17.225	7.681.521	6.902.648	18.775	6.921.423	7.080.844	0	0	0	7.080.844
Generadores Automotores	4.672.882	5.902.930	0	5.902.930	5.434.686	0	5.434.686	4.919.625	0	0	0	4.919.625
Subtotal	18.047.040	14.140.479	4.336.001	18.476.480	13.178.005	3.810.084	16.988.089	12.423.186	3.550.257	0	0	15.973.443
TOTAL	100.596.134	96.004.191	4.710.455	100.714.646	95.331.927	4.331.222	99.663.149	92.658.043	4.042.677	676.695	2.285	97.379.700

Fuente: Adif

Nota: Datos expresados en litros de gasóleo

Tabla 7. Consumo de gasóleo B exento del ferrocarril para usos distintos de tracción según datos de Adif

	2004			2005			2006			2007		
	RENFE	RENFE OPER.	ADIF	TOTAL	RENFE OPER.	ADIF	TOTAL	RENFE OPER.	ADIF	TOTAL		
Locotractor talleres(exento)	118.996	391	100.903	101.294	2.259	51.209	53.468	2.085	9.713	11.798		
Mantenimiento de vía(exento)	1.365.167	0	1.404.859	1.404.859	0	1.341.086	1.341.086	419	1.147.788	1.148.207		
Mantenimiento de trenes(exento)	9.068	1.030	5.655	6.685	5.675	17.507	23.182	6.498	7.777	14.275		
Grúas de carga y manutención(bonificado)	688.044	142	562.544	562.686	3.410	633.360	636.770	48.723	742.791	791.514		
Total	2.181.275	1.563	2.073.961	2.075.524	11.344	2.043.162	2.054.506	57.725	1.908.069	1.965.794		

Fuente: Adif

Nota: Datos expresados en litros de gasóleo

3.5. Datos económicos

Renfe publica en sus memorias el coste económico que ha supuesto la energía de tracción en cada una de las unidades de negocio; conociendo el precio unitario del kWh, esta información debería ser proporcional a los consumos en kWh por unidades de negocio y además, al conjunto de tracción a fin de comparar con otras fuentes.

Tabla 8. Coste en los años 2006 y 2007 del consumo eléctrico Renfe Operadora

	2006 (M€)	2007(M€)
Cercanías y MD	100,89	115,59
AVE LD	52,96	58,20
Mercancías	62,53	59,89
Energía tracción TOT Renfe Op	216,45	233,75

Fuente: Renfe

4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ESPAÑOL

Se entiende por sistema eléctrico de potencia al conjunto de elementos necesarios para generar, transportar y distribuir la energía eléctrica, en el caso del presente estudio, para el ferrocarril. Puede dividirse a efecto de su análisis en dos partes diferenciadas: el sistema eléctrico público, y el sistema eléctrico de las compañías ferroviarias.

4.1. Sistema eléctrico público

Las formas de generar energía eléctrica son mediante fuentes de energía renovables (energía hidráulica, solar, eólica, mareomotriz...) o fuentes no renovables (nuclear, carbón, gas natural...). Esta energía generada es transportada en alta tensión por REE para minimizar las pérdidas; y distribuida luego en tensiones más bajas para suministrar a los consumos finales. También existen grandes consumidores en alta tensión y pequeños generadores en baja tensión.

BIBLIOGRAFÍA

Apuntes Máster de Sistemas Ferroviarios de ICAI.

Anuario del Ferrocarril (2007), Fundación de los Ferrocarriles Españoles/ Vía Libre.

Arenillas Melendo, J. (1986): *La tracción en los ferrocarriles españoles. Evolución histórica y situación actual*. Col: Monografías ferroviarias 2. Ed.: Gire-Renfe, Madrid.

Conrado, José (2007): *El sistema eléctrico ferroviario*. Ed: ADIF.

García Álvarez, A. (2005): *Dinámica de los trenes en alta velocidad*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

García Álvarez, A. (2006): *Consumos de energía y eficiencia energética en el transporte. El caso del ferrocarril*, Fundación de los Ferrocarriles Españoles, Madrid

Ministerio de Fomento (1996, 2003 y 2006). *Informe anual: Los transportes y los servicios postales*.

Renfe: *Memoria energética 2006*. Madrid

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.