

ElecRail

Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español



Alberto García Álvarez

M^a del Pilar Martín Cañizares

Fundación de los Ferrocarriles Españoles

Monografías *ElecRail* / 1

Monografías **ElecRail** / 1

Cuantificación del consumo de energía eléctrica del ferrocarril español

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: 978-84-89649-85-9

Depósito Legal: M-12055-2012



INDICE

INDICE	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1. Objeto	5
1.2. Metodología	6
2. ANÁLISIS PREVIO DE LOS DATOS	7
2.1. Datos GranCees	7
2.2. Anuario de Ministerio de Fomento	9
2.3. Diferencias entre datos GranCEES y Ministerio de Fomento	10
2.4. ADIF / Renfe	11
2.5. Datos económicos	12
3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ESPAÑOL	13
3.1. Sistema eléctrico público	13
3.2. Sistema eléctrico ferroviario	14
3.3. Tensiones de funcionamiento del tren	15
4. ESTIMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS CONSUMOS	16
4.1. Renfe Operadora	16
4.2. ADIF	18
4.3. Metro de Madrid	19
4.4. Metro de Barcelona	21
4.5. FGV	22
4.6. FGC	23
4.7. FEVE	24
5. CONSUMOS CONSOLIDADOS	25
6. ENERGÍA A LA SALIDA DE LAS CENTRALES GENERADORAS	27
7. FLUJOS INTERNOS DE ENERGÍA	29
8. CONCLUSIONES	32
BIBLIOGRAFÍA	33

1. INTRODUCCIÓN

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.

1.1. 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.

1.2. 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.

2. 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.

2.1. 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		
	Ferrocarril (GWh)	Metro (GWh)	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

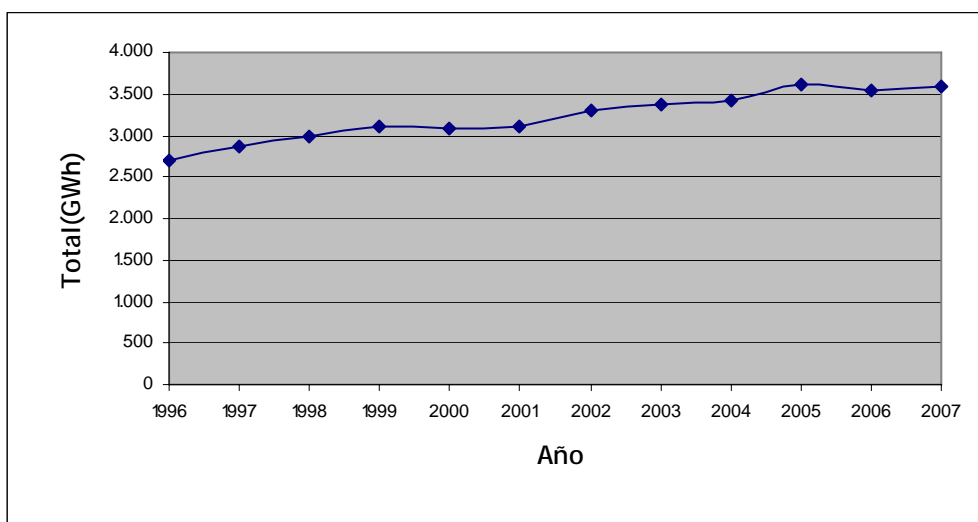
Fuente: GranCees, 2007

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 Söller</i>	2	0,06
<i>Tranvías</i>	8	0,22
Total Grupo Tracción	3.605	100

Fuente: GranCees 2007

2.2. 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.

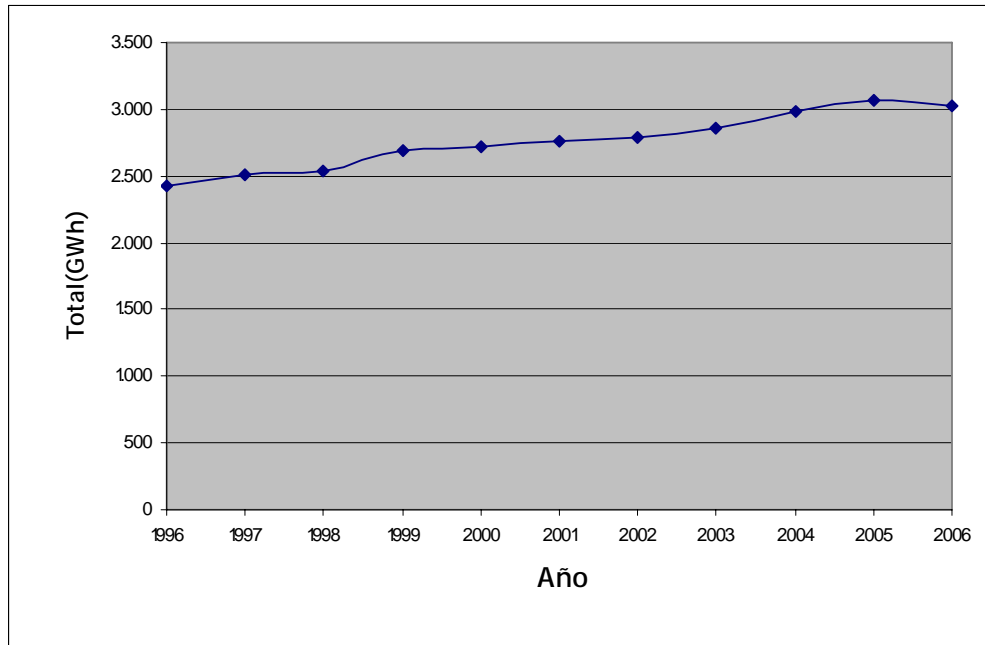
Tabla 3. Consumo de energía del ferrocarril 1996-2006 según datos de Ministerio de Fomento

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

2.3. 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

2.4. 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	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	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	0	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	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	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	0	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

2.5. 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

3. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA ELÉCTRICO DE POTENCIA ESPAÑOL

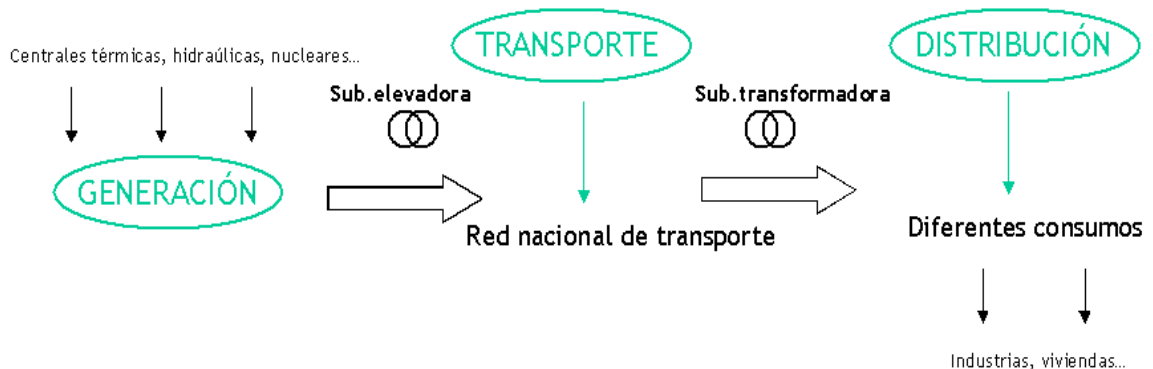
Se entiende por sistema eléctrico de potencia al conjunto de elementos necesarios para generar, transportar y distribuir la energía eléctrica, en el caso del presente estudio, para el ferrocarril. Puede dividirse a efecto de su análisis en dos partes diferenciadas: el sistema eléctrico público, y el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

3.1. 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.

La figura muestra el esquema del sistema eléctrico público de potencia desde su generación hasta la distribución.

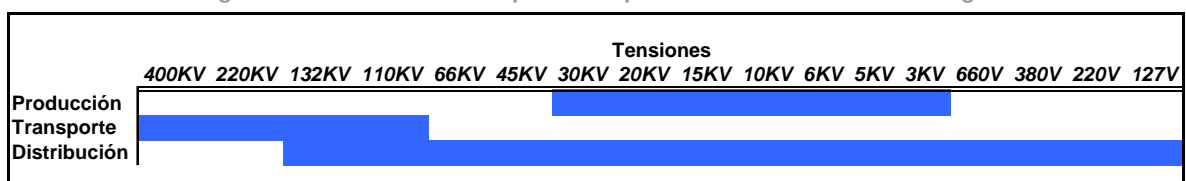
Figura 3. Esquema del sistema eléctrico de potencia



Fuente: Elaboración propia

La figura siguiente muestra un resumen de las tensiones de servicio utilizadas en cada fase. Para el transporte de la energía se utiliza un intervalo de tensiones desde 400kV hasta 127V.

Figura 4. Tensiones empeladas para cada uso de la energía



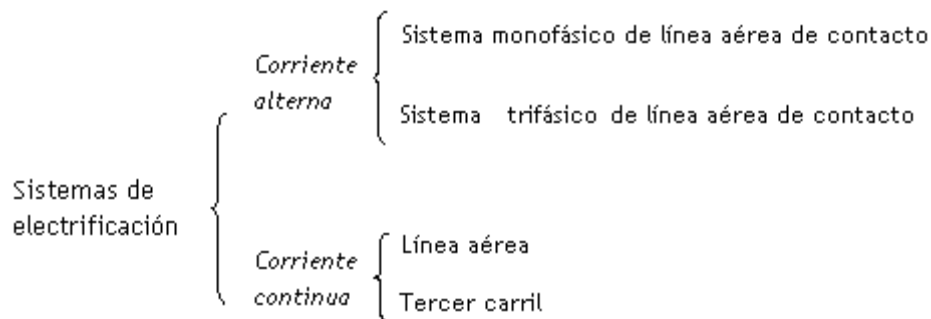
Fuente: Elaboración propia

3.2. Sistema eléctrico ferroviario

El sistema eléctrico ferroviario recibe la energía del sistema eléctrico público, se compone de los elementos necesarios para transportar y distribuir la energía eléctrica.

La electrificación ha sido llevada a cabo por diferentes métodos y sistemas, caracterizados principalmente por la forma de distribuir la energía al material rodante desde la subestación eléctrica. Una clasificación normalmente aceptada sería la siguiente:

Figura 9. Sistema eléctrico ferroviario

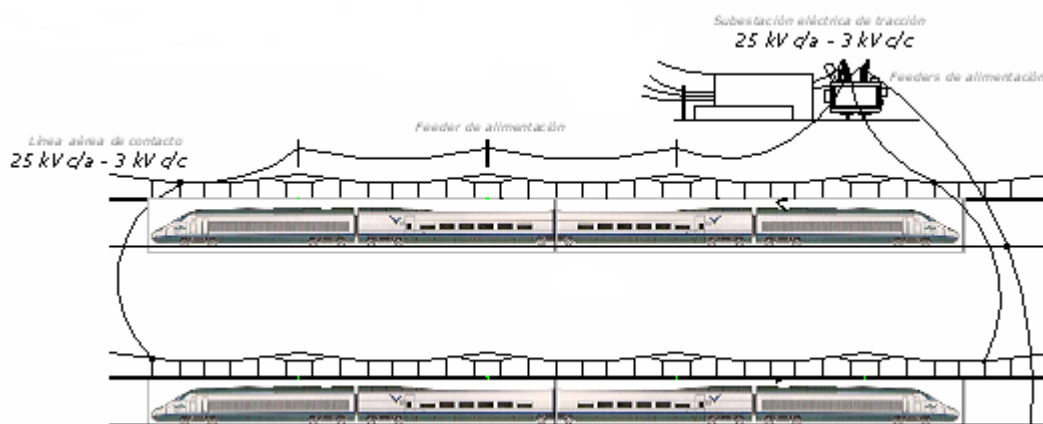


Fuente: ADIF

De los sistemas anteriores, el sistema monofásico de corriente alterna y el sistema de corriente continua son los más utilizados por las administraciones ferroviarias. El sistema trifásico de corriente alterna, aunque ha sido experimentado en algunos países europeos, es un sistema en desuso debido sobre todo a la complejidad existente durante su montaje

En el esquema de la figura se representa el sistema eléctrico ferroviario, así como sus tensiones eléctricas nominales de funcionamiento más frecuentes.

Figura 10. Sistema eléctrico ferroviario



Fuente: ADIF

En España las empresas ferroviarias no son propietarias de centrales eléctricas, la energía que consumen es contratada a las empresas generadoras. En referencia al transporte, en el caso de ADIF, por razones de garantía y continuidad de servicio, se instalan líneas en forma de malla en los sistemas de corriente continua, interconectando entre sí las subestaciones eléctricas rectificadoras con dos o más puntos de suministro.

3.3. Tensiones de funcionamiento del tren

Tradicionalmente, el ferrocarril era alimentado en corriente continua a una tensión que podía variar entre 600 y 1.500V. Debido a los incrementos de velocidad que paulatinamente ha tenido el material móvil en las líneas ferroviarias estas tensiones ha sido necesario aumentarlas con el fin de que las pérdidas, que son proporcionales al cuadrado de la intensidad, no sigan incrementándose y a la vez poder hacer la catenaria más ligera.

En España se utiliza la corriente continua como forma de alimentación en suburbanos, tranvías y líneas ferroviarias convencionales, y la corriente alterna en las nuevas líneas de alta velocidad.

En la tabla se observa el nivel de tensión con que se alimenta en el ferrocarril en España según el área de aplicación.

Tabla 9. Tensiones nominales de alimentación a los trenes en España

Tensión nominal de alimentación	Áreas de aplicación
600-750 Vc.c.	Metro y tranvías
1.200-1500 Vc.c.	Suburbanos y Metros
3000 Vc.c.	Líneas convencionales
25.000 Va.c. 50Hz	Líneas de Alta Velocidad ⁽¹⁾

Fuente: Elaboración propia

⁽¹⁾ En alta velocidad en España se usan dos sistemas de electrificación 1x25 kV y 2x25 kV a una frecuencia de 50 Hz. En el sistema 2x25 kV, la salida de la subestación es 50 kV, aunque la alimentación a los trenes es de 25 kV.

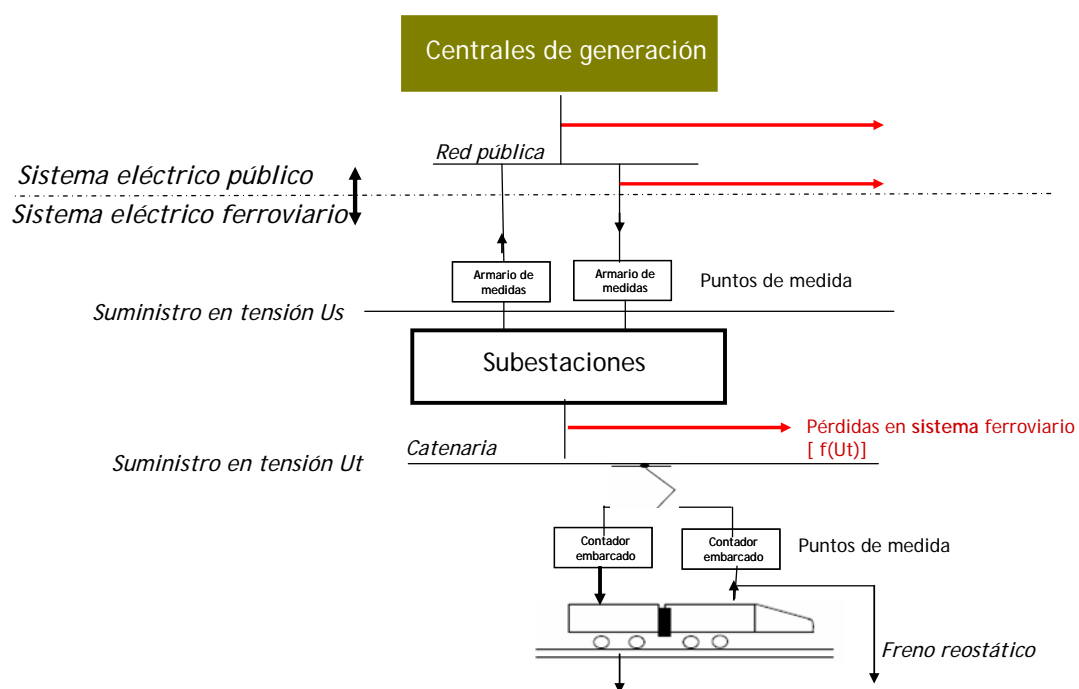
4. ESTIMACIÓN HOMOGÉNEA DE LOS CONSUMOS

En este capítulo, se pretende evaluar de forma homogénea los consumos eléctricos de tracción de las distintas empresas 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 11. Puntos de medida de energía



Fuente: Elaboración propia

4.1. Renfe Operadora

Renfe-Operadora es una entidad pública empresarial, dependiente del Ministerio de Fomento de España con el fin de ofrecer servicios ferroviarios de viajeros y mercancías. Comenzó su actividad el 1 de enero de 2005.

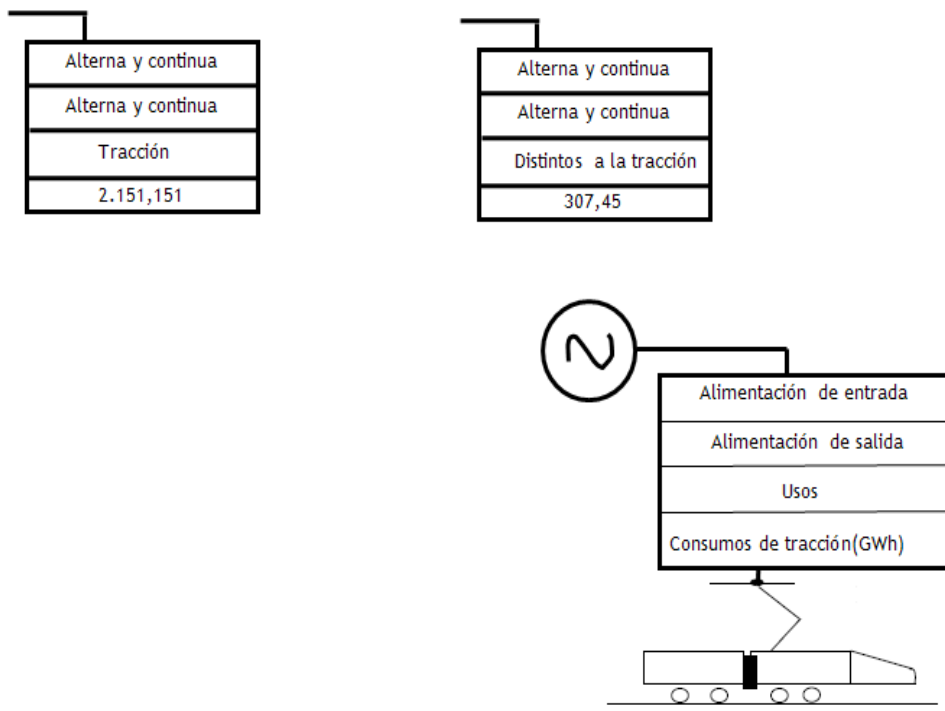
La creación de Renfe Operadora fue fijada por la Ley del Sector Ferroviario (39/2003), de 17 de noviembre de 2003 por la que se decidió la separación en dos empresas de los activos, pasivos y actividades de RENFE (Red Nacional de los Ferrocarriles Españoles, la empresa nacionalizada creada en 1941). Según la Ley del

Sector Ferroviario Renfe Operadora se ocupa de los servicios de transporte de viajeros y mercancías así como al negocio del mantenimiento y construcción de trenes y ADIF de ampliar, mantener y explotar la Red Ferroviaria de Interés General (RFIG).

La Ley del Sector Ferroviario, siguiendo directivas de la Comunidad Europea, prevé un mercado liberalizado en el que diferentes operadoras pueden acceder a la infraestructura ferroviaria de ADIF. Así, Renfe Operadora ya compete con otras empresas en el tráfico de mercancías y está previsto que ocurra lo mismo en pocos años en el mercado de tráfico de pasajeros.

La siguiente figura muestra un resumen del consumo eléctrico total de Renfe operadora en el año 2007.

Figura 12. Resumen del consumo total en 2007. Renfe Operadora



Fuente: Elaboración propia

4.2. ADIF

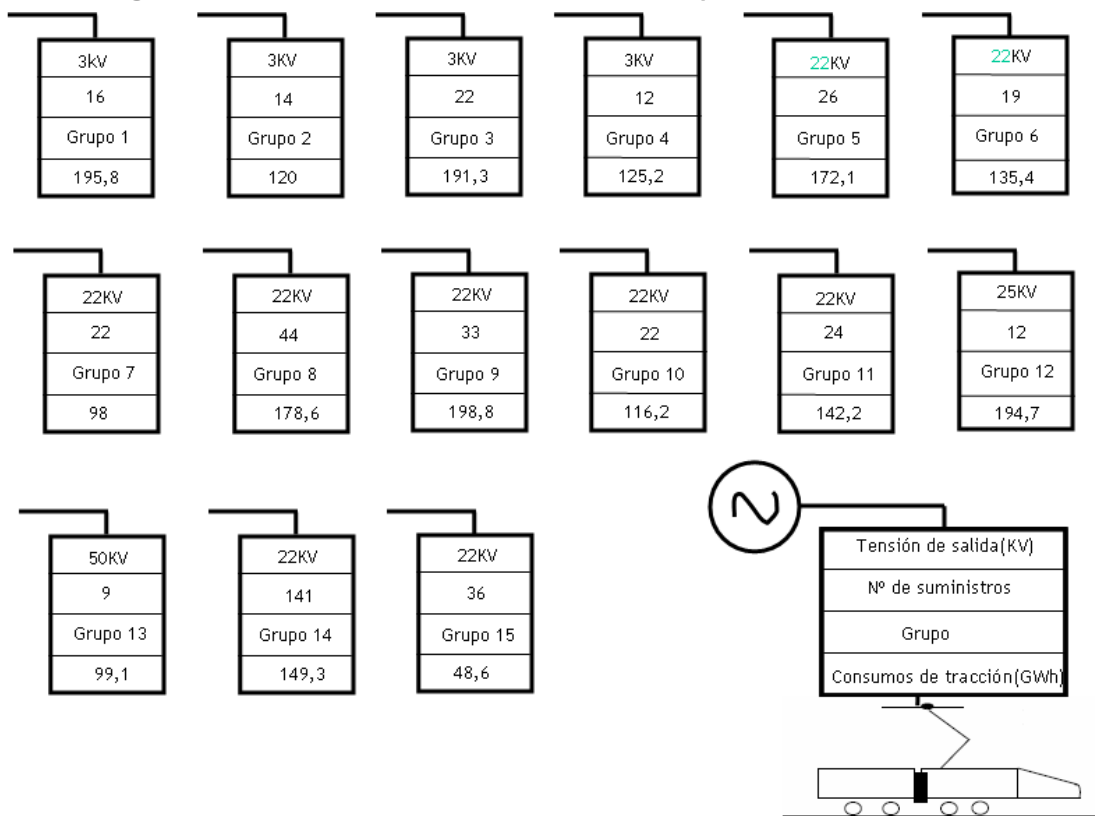
El Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) es una entidad pública empresarial surgida tras la entrada en vigor de la Ley del Sector Ferroviario, el día 1 de enero de 2005. Esa Ley contemplaba la creación de una nueva entidad empresarial, Renfe Operadora, y que la entidad RENFE pasase a denominarse Administrador de Infraestructuras Ferroviarias.

ADIF nace con vocación de servicio público, al cual atenderá con la aplicación de criterios empresariales que optimicen los recursos disponibles para asegurar el interés público, satisfacer las necesidades sociales con la máxima calidad y garantizar la seguridad de los usuarios y la eficacia global del sistema ferroviario.

La misión de ADIF incluye la gestión del tráfico ferroviario, la administración de la infraestructura, el cobro de cánones y la realización de infraestructura que le encargue el gobierno de la Nación.

La siguiente figura muestra un resumen del consumo estimado para ADIF para el año 2008.

Figura 12. Resumen del consumo estimado para el año 2008. ADIF



Fuente: Elaboración propia

4.3. Metro de Madrid

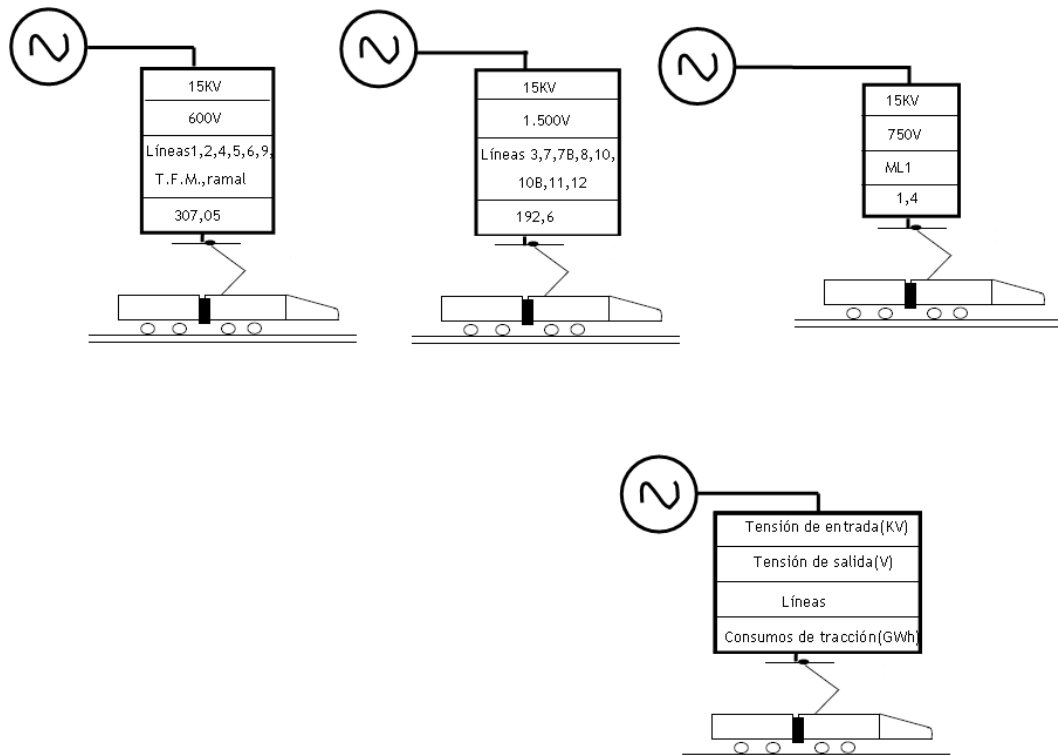
Metro de Madrid es la red de ferrocarriles metropolitanos que da servicio de transporte público colectivo a la ciudad de Madrid y a parte de su área metropolitana. Explota 227 kilómetros de línea, con un ancho de vía de 1.445 mm. En dicha longitud no están todavía incluidas las catorce ampliaciones en curso dentro del plan 2003-2007.

Tenemos tres tipos de tensiones de alimentación que se presentan cada uno en un esquema:

- El primero corresponde a las líneas 1, 2, 4, 5, 6, 9, T.F.M. y Ramal Norte a una tensión de salida de 600V y consumo total en 2007 de 307,05 GWh.
- El segundo, a las líneas 3, 7, 7B, 8, 10, 10B, 11 y 12 con una tensión de salida de 1.500V con un consumo total, en 2007, de 192,6 GWh
- El último, a una tensión de 750V, para ML1, con un consumo total en 2007 de 1,4 GWh.

En la siguiente figura se observa de forma general el consumo total para las tensiones de entrada de 600V y 1.500V.

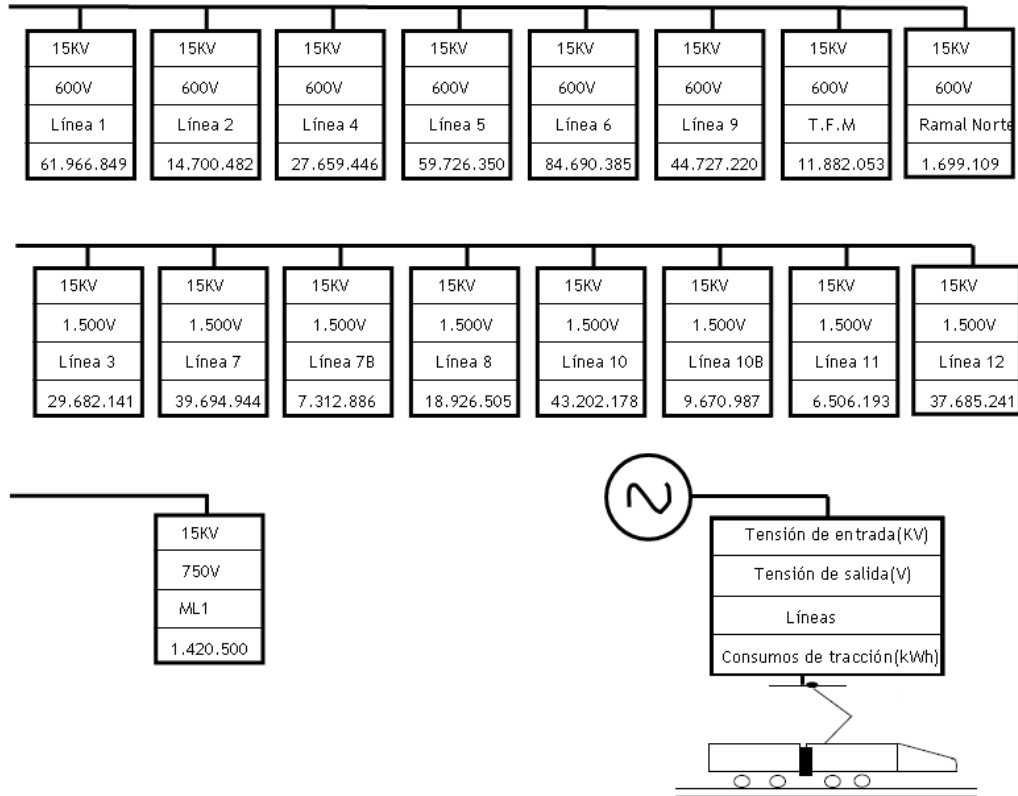
Figura 13. Resumen de los consumos totales en 2007. Metro de Madrid.



Fuente: Elaboración propia

En la figura siguiente podemos observar, de forma detallada, la tensión de entrada y de salida para cada línea del Metro de Madrid, con sus respectivos consumos en 2007.

Figura 14. Distribución detallada de consumos de tracción. Metro de Madrid.



Fuente: Elaboración propia

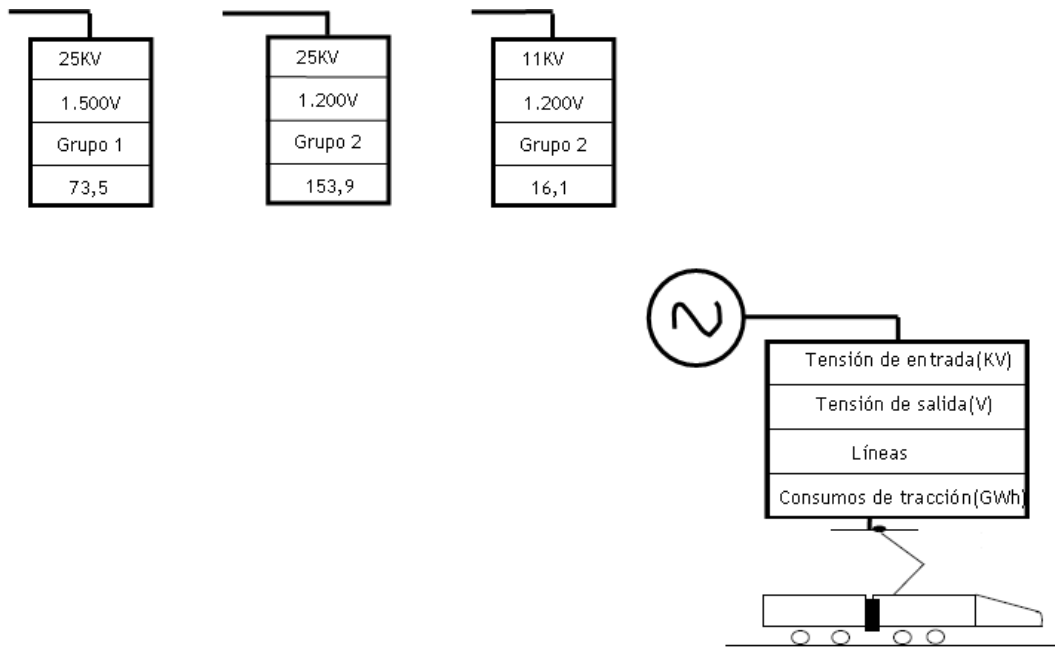
4.4. Metro de Barcelona

El Metro de Barcelona cuenta con 86,6 kilómetros de líneas y su parque de material es de 666 vehículos: 534 coches motores y 132 remolques (año 2007).

La siguiente figura muestra, para el Metro de Barcelona, los dos grupos existentes para la tensión de entrada de subestación.

Se observa que para la tensión de entrada en la subestación de 25kV existen dos grupos uno de 1.500V y otro de 1.200V con unos consumos de 73,5 GWh y 153,9 GWh, respectivamente. Además, existe una alimentación a 11kV con un consumo menor correspondiente a 16,1 GWh.

Figura 15. Distribución de consumos de tracción. Metro de Barcelona.



Fuente: Elaboración propia

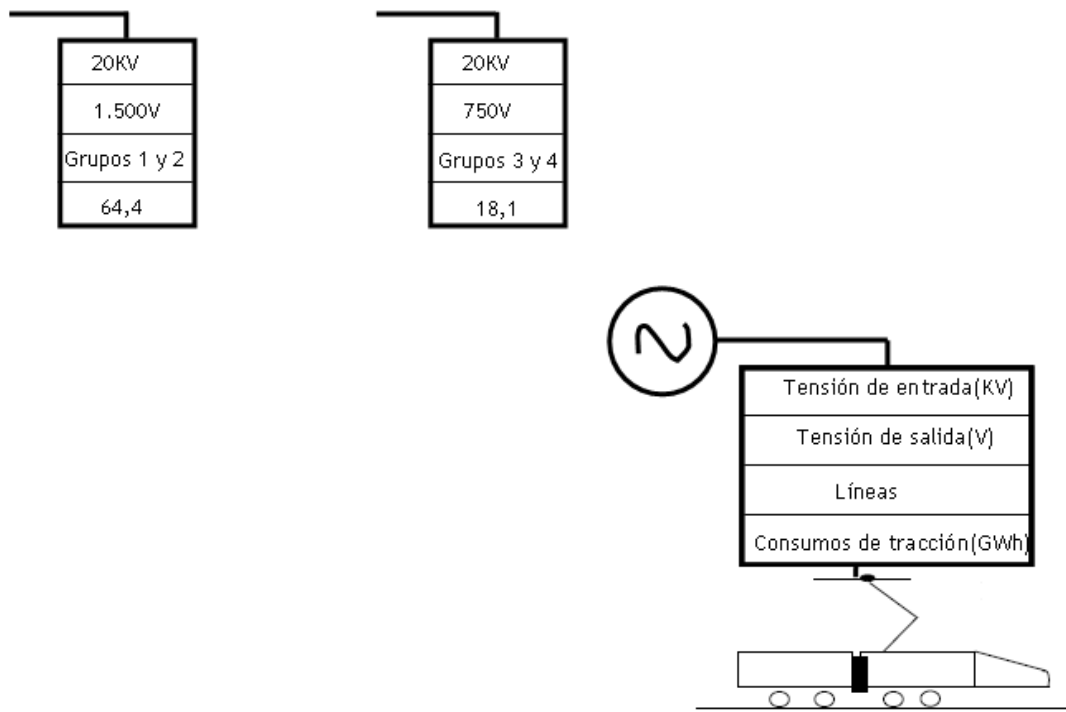
4.5. FGV

Los Ferrocarrils de la Generalitat Valenciana explotan 231 kilómetros de vías de ancho métrico repartidas en dos grupos: Metro y Tranvía de Valencia.

En la siguiente figura podemos observar los consumos existentes para los distintos grupos en los Ferrocarriles de la Generalitat Valenciana.

Sólo existe una única tensión de entrada a las subestaciones de 20KV y aguas abajo dos tensiones diferentes de salida, 1.500V y 750V, con unos consumos anuales de 64,4 GWh y 18,1 GWh, respectivamente.

Figura 16. Distribución de consumos de tracción. FGV



Fuente: Elaboración propia

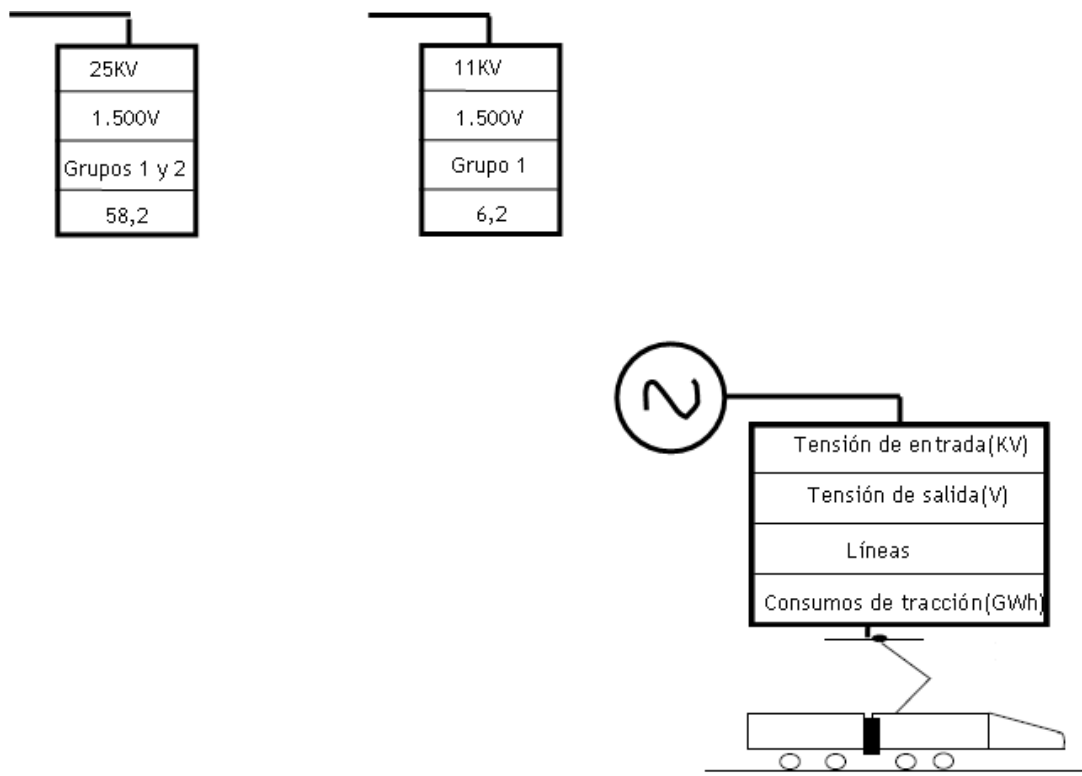
4.6. FGC

Los Ferrocarrils de la Generalitat de Catalunya explota 202 kilómetros de líneas, de las que 139 son de ancho métrico (1.000 mm), más de 45 kilómetros de ancho estándar (1.435 mm) y dos ferrocarriles de cremallera (Nuria y Montserrat).

En la siguiente figura podemos observar los consumos existentes para los distintos grupos en los Ferrocarriles de la Generalitat Catalana.

Se observa que para la tensión de entrada en la subestación de 25KV existen dos grupos de 1.500V con un consumo en 2007 de 58,2 GWh. Además existe una alimentación a 11KV con un consumo menor correspondiente a 6,2 GWh.

Figura 17. Distribución de consumos de tracción. FGC



Fuente: Elaboración propia

4.7. FEVE

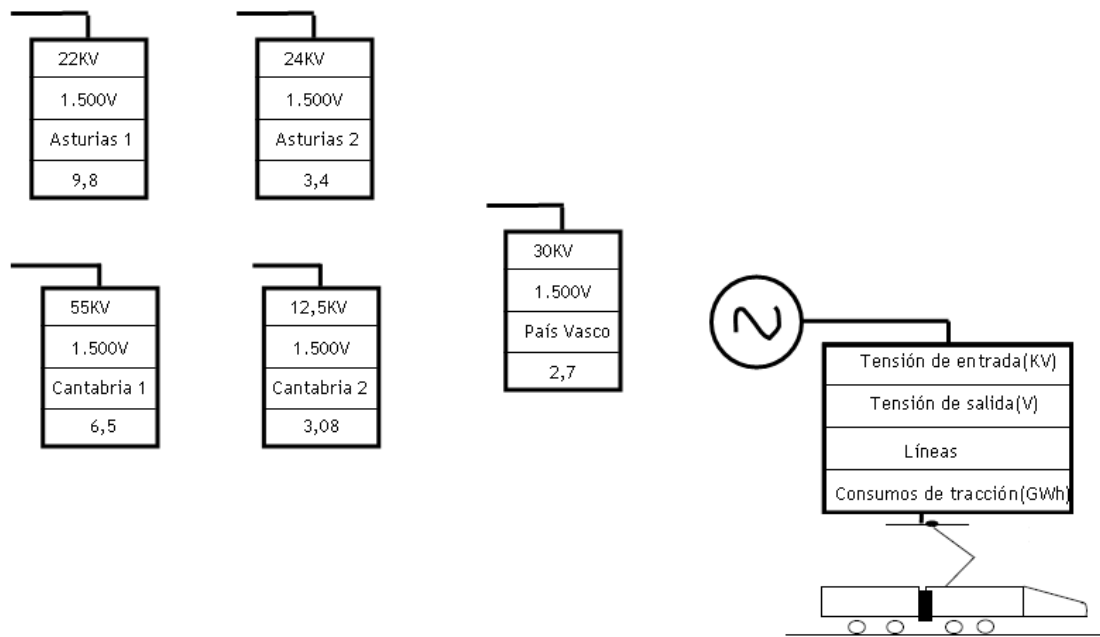
Ferrocarriles de Vía Estrecha (FEVE) es una entidad pública empresarial dependiente del Ministerio de Fomento. Cuenta con la red ferroviaria de ancho métrico más extensa de Europa, unos 1200 km de vía recorriendo 9 provincias de 6 comunidades autónomas y unos 2000 empleados.

En la figura siguiente podemos observar las distintas tensiones de entrada para FEVE, con sus respectivos consumos.

Tenemos cinco tipos de esquemas:

- El primero corresponde a las subestaciones de Santiago del Monte, Avilés, Regueral, Gijón, El Berrón, Colloto, Udrión y Pravia con una tensión de suministro de de 22KV con un consumo de 9,8 GWh.
- El segundo corresponde a las subestaciones de El Entrego y Nava con una tensión de suministro de 24KV con un consumo de 3,4 GWh.
- El tercero corresponde a las subestaciones de Puente de San Miguel y Orejo con una tensión de suministro de 55KV con un consumo de 6,5 GWh.
- El cuarto corresponde a la subestación de Santader con una tensión de suministro de 12,5KV con un consumo de 3,08 GWh.
- Por último, corresponde a las subestaciones de Aranguren y Zorroza con una tensión de suministro de 30KV con un consumo de 2,7 GWh.

Figura 18. Distribución de consumos de tracción. FEVE



Fuente: Elaboración propia

5. CONSUMOS CONSOLIDADOS

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 empelar los datos de 2007 responde a que a partir de 2008-2009 los consumos de los trenes de alta velocidad van a crecer de forma importante sobre los consumos de 2007, y a partir de 2009 seguirán 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.

CONSUMOS DE ENERGIA POR EL FERROCARRIL EN	GASÓLEO			ENERGÍA ELÉCTRICA			% Sobre el total
	Gasóleo Tracción (Militros)	Gasóleo UDT (Militros)	Total gasóleo (Militros)	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 Trambesós)	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

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

	A	B	C	D	E	F
	Gasóleo Tracción (Militros)	Gasóleo UDT (Militros)	Total gasóleo (Militros)	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						

6. 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, como se ha expuesto, 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:

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%

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

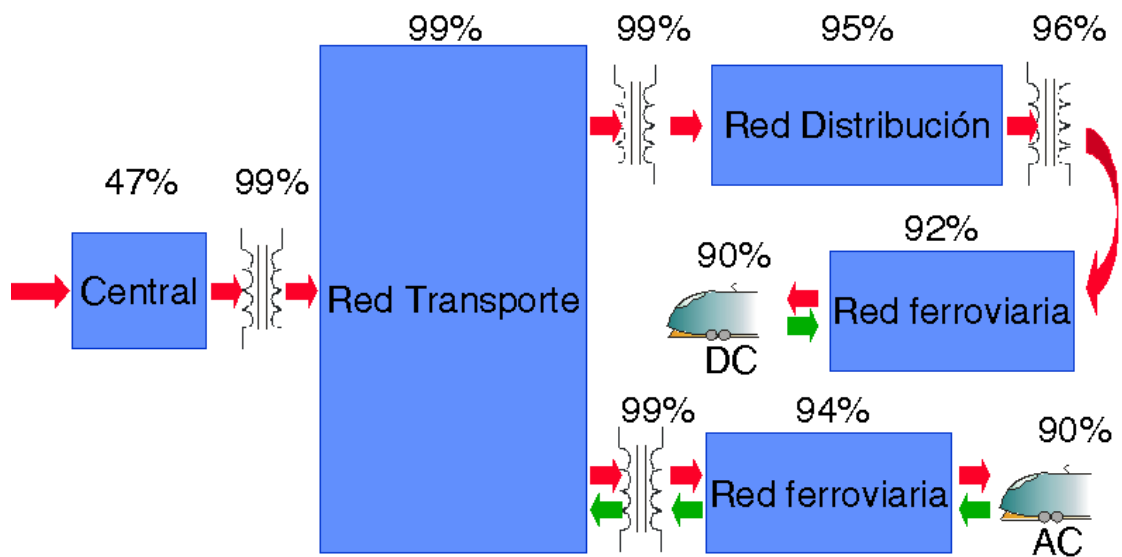
DESGLOSE DE LOS FLUJOS DE ENERGIA DENTRO DEL SISTEMA FERROVIARIO									
	Energía eléctrica a la entrada de la subestación (GWh)	Tensión típica de suministro al tren (kV)	Coef. Pérdidas subestación y catenaria	Energía eléctrica importada en pantógrafo por subestación (GWh)	Energía eléctrica generada 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 tranv)	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 Sóller	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
Tranvía 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

7. FLUJOS INTERNOS DE 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 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 como los peores rendimientos se producen en las centrales de generación y en la red ferroviaria.

Figura 19. 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:

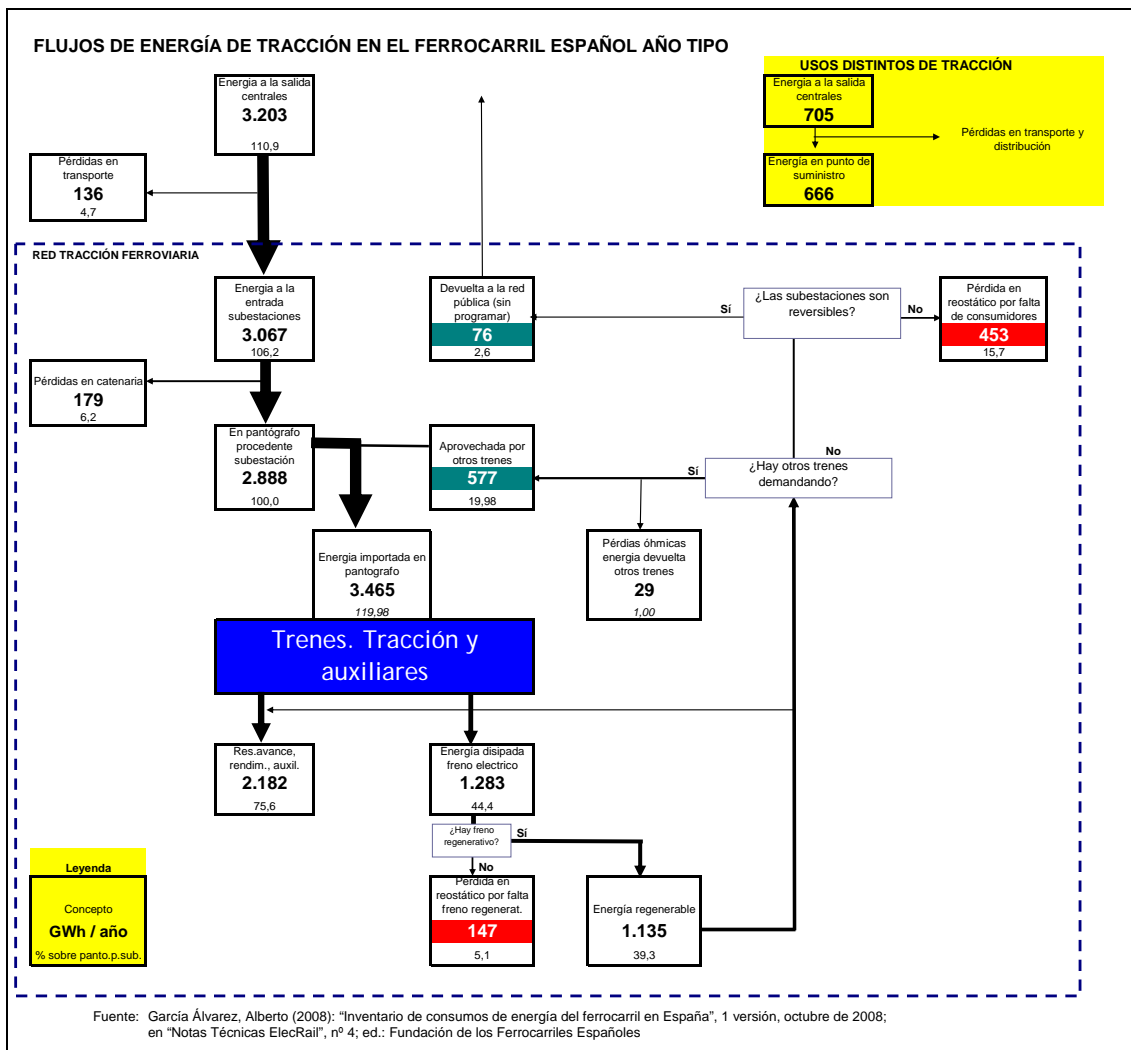
- No supone emisiones, ni consumo de energía procedente de fuentes no renovables.

- 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 las 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:

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	Devolta 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 mercancías	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 mercancías	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



8. CONCLUSIONES

Las principales conclusiones de la presente Nota Técnica son las siguientes:

1. Debido a la heterogeneidad de los datos dados a conocer por las diferentes fuentes, no se puede concretar un valor exacto de consumo eléctrico, tanto para tracción como para otros usos, pero sí un valor de consumo aproximado.
2. Se observa un incremento progresivo del consumo eléctrico desde el año 1996 hasta 2007, que se ve reflejado en las distintas gráficas.
3. El balance energético cambia de forma sustancial según que el tren disponga o no de freno regenerativo y de cómo lo use.
4. Debido a que la medida de energía se realiza a la entrada de la subestación, por lo que, las pérdidas "aguas abajo" se producen en la subestación y en la catenaria. Como los niveles de tensión "aguas abajo" son diferentes, las cantidades de energía consumidas a la entrada del tren también lo son, lo que necesita un tratamiento de los datos más preciso para poder saber el consumo exacto por operador.

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, Mainer 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.