



**Universidad**  
Zaragoza

## Trabajo Fin de Máster

# **Análisis energético de trolebús. Estudio para la ciudad de Zaragoza.**

**MEMORIA (PARTE 1 DE 2)**

Autor

**MANUEL SANTOS LÓPEZ**

Director

**ANGEL ANTONIO BAYOD RÚJULA**

Escuela de Ingeniería y Arquitectura

Año 2013

## RESUMEN

El trolebús es un vehículo eléctrico de transporte de pasajeros de media capacidad cuya eficiencia en términos energéticos es muy alta comparada con el clásico autobús.

En este trabajo, el principal objetivo es investigar y analizar desde el punto de vista energético los factores que influyen en el consumo del trolebús así como de trolebuses híbridos.

Se realiza un repaso al estado del arte general del vehículo y además se da a conocer el moderno trolebús de la ciudad de Castellón, único en España.

Además, se profundiza tanto en los factores de los vehículos como en los factores del sistema de potencia, así como en factores ajenos al propio vehículo pero que inciden en el consumo del mismo.

También se ha realizado una comparativa tanto de los consumos reales de los diversos sistemas de trolebuses como de los tipos de vehículos comerciales a día de hoy.

La comparativa de transportes de media capacidad analizada en el presente trabajo permite pronosticar los costes de los consumos de los mismos.

Por último, se ha realizado el estudio de un caso práctico. En dicho estudio se analizan todas las actuales líneas de transporte de autobús urbano de Zaragoza para poder determinar qué línea es la más eficiente desde el punto de vista energético. Posteriormente, se determina el consumo de energía de dicha línea para analizar la sostenibilidad de la misma basada en trolebuses.

# I ÍNDICE GENERAL

<b>1. INTRODUCCIÓN .....</b>	<b>1</b>
1.1 HISTORIA DEL TROLEBÚS.....	2
1.2 TIPOS DE TROLEBUSES ELÉCTRICOS .....	7
1.2.1. <i>Trolebús convencional</i> .....	7
1.2.2. <i>Trolebús híbrido (HEV)</i> .....	7
1.2.3. <i>PHEV</i> .....	8
1.3 ESTADO DEL ARTE.....	9
1.4 TROLEBÚS DE CASTELLÓN. ....	14
<b>2. FACTORES INFLUYENTES EN LOS COSTES ENERGÉTICOS. ....</b>	<b>17</b>
2.1 SISTEMA DE POTENCIA .....	18
2.1.1. <i>Tensión de la catenaria</i> .....	18
2.1.2. <i>Topología de la red</i> .....	19
2.1.3. <i>Subestaciones</i> .....	20
2.2 FACTORES EN LOS VEHÍCULOS. ....	23
2.2.1. <i>Motor</i> .....	23
2.2.2. <i>Freno regenerativo</i> .....	29
2.2.3. <i>Sistemas de almacenamiento energético en el trolebús</i> .....	31
2.2.4. <i>Sistemas de intercambio energético en la subestación</i> .....	35
2.2.5. <i>Convertidor/Inversor</i> .....	36
2.2.6. <i>Peso y carrocería</i> .....	37
2.2.1. <i>Resistencia a la rodadura</i> .....	37
2.2.2. <i>Cargas auxiliares: iluminación y climatización</i> .....	38
2.2.3. <i>Guiado óptico y GPS</i> . ....	38
2.3 OTRAS INFLUENCIAS .....	39
2.3.1. <i>Influencia o efecto de dos trolebuses simultáneos</i> .....	39
2.3.2. <i>Influencia o efecto de la distancia entre paradas</i> . ....	40
2.3.3. <i>Influencia del tipo de carril</i> .....	41
<b>3. COMPARATIVA DE TRANSPORTES DE MEDIA CAPACIDAD.....</b>	<b>43</b>
<b>4. LÍNEA ÓPTIMA.....</b>	<b>47</b>
<b>5. ESTUDIO DE CASO. TROLEBÚS PARA LA CIUDAD DE ZARAGOZA.....</b>	<b>52</b>
5.1 RUTA O LÍNEA ÓPTIMA .....	52
5.1.1. <i>Procedimiento</i> .....	52
5.1.2. <i>Resultados</i> .....	55
5.2 CÁLCULO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE LA LÍNEA ÓPTIMA .....	57
5.2.1. <i>Procedimiento</i> .....	57
5.2.2. <i>Resultados</i> .....	62
5.2.1. <i>Verificación de los cálculos</i> .....	65
<b>6. CONCLUSIONES .....</b>	<b>66</b>
<b>7. BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>67</b>

## II ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 - Distribución de los sistemas de trolebuses en el mundo.....	5
Tabla 1.2 – Viajeros anuales del transporte TRAM de Castellón. ....	15
Tabla 2.1 – Evaluaciones de las características técnicas de los sistemas de tracción.....	25
Tabla 2.2 - Clases de eficiencia para 50hz de acuerdo a IEC 60034-30:2008.....	26
Tabla 2.3 - Características técnicas de motores usados en Rumanía y CIS.....	28
Tabla 2.4 - Características técnicas de algunos convertidores usados para trolebús.....	36
Tabla 2.5 - Características técnicas de los sistemas de transporte público masivo.....	42
Tabla 4.1 – Capacidad de diferentes modos de transporte colectivo urbano. ....	49
Tabla 4.2 – Características de diferentes modos de transporte colectivo urbano. ....	49
Tabla 4.3 – Comparativa de los consumos energéticos de distintos medios de transporte. ....	50
Tabla 5.1 – Análisis de la línea de transporte 23.....	54
Tabla 5.2 – Pequeña muestra de los datos de la línea de óptima (línea 33). ....	57
Tabla 5.3 – Coeficientes de un sistema de trolebuses. ....	58
Tabla 5.4 – Resultados de la energía absorbida y cedida - línea óptima. ....	62
Tabla 5.5 – Energía absorbida y cedida incluyendo la eficiencia del vehículo.....	62
Tabla 5.6 – Energía absorbida y cedida incluyendo eficiencia del sistema de potencia.....	63
Tabla 5.7 – Resultados de la energía absorbida y cedida incluyendo la carga auxiliar.....	63
Tabla 5.8 – Comparativa del coste por pasajero entre autobuses diésel y trolebuses. ....	64

## III ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 – El primer trolebús - ‘Electromote’ de 1882 .....	2
Figura 1.2 – Trolebús Petrol-electric de 1932 .....	2
Figura 1.3 – Cuadro resumen de fechas significativas en ciudades con diversos modos de transporte urbano de superficie en España.....	3
Figura 1.4 – Kilometros de red de los diversos modos de transporte urbano en España. (Hernández Marco, José Luis) .....	4
Figura 1.5 – Trolebús circulando por Zaragoza en los años 60. ....	5
Figura 1.6 –Trolebús de Zaragoza 31 de la línea del Barrio .....	5
Figura 1.7 – Evolución de los sistemas de trolebús en el mundo de 1902 al 2000.....	6
Figura 1.8 – Esquema de propulsión del trolebús.....	7
Figura 1.9 – Esquema de un HEV en paralelo. ....	8
Figura 1.10 – Esquema de un HEV en serie.....	8
Figura 1.11 – Estación de Carga Rápida para un PHEV Bus.....	8
Figura 1.12 – PHEV Bus .....	8
Figura 1.13 - Motor HUB montado (Trolebús modelo Civis).....	10
Figura 1.14 - Motor HUB montado (Trolebús modelo Civis).....	10
Figura 1.15 – Venta de motores en el ámbito del CEMEP/EU en el periodo 1998-2009.....	11
Figura 1.16 – Ahorros potenciales en el ciclo de vida de un motor eléctrico.....	12
Figura 1.17 - Línea T1 del TRAM de Castellón.....	14
Figura 1.18 – Catenaria con sistema de péndulo del trolebús de Castellón.....	16
Figura 1.19 – Trolebús Civis de Castellón.....	16
Figura 2.1 – Topologías de los sistemas de potencias en los sistemas de transporte público. ...	19
Figura 2.2 – Diagrama unifilar de una subestación de tracción convencional.....	20
Figura 2.3 – Circuito de un rectificador de 12 pulsos serie. ....	21
Figura 2.4 – Circuito de un rectificador de 18 pulsos serie. ....	21
Figura 2.5 – Corriente de “fase a” y espectro armónico de un rectificador de 6 (izq.), 12 (centro) y 18 pulsos (derecha). ....	21
Figura 2.6 - Plano en planta de una subestación típica.....	22
Figura 2.7 – Análisis del coste del ciclo de vida (15 años) de un motor de 11kW IE2. ....	23
Figura 2.8 – Potencia requerida del motor para un bus de 20 toneladas.....	24
Figura 2.9 – Potencia requerida del motor para un bus de 18 toneladas.....	24
Figura 2.10 –Curvas de eficiencia de los motores de inducción o asíncronos (IM) y reluctancia (SRM).....	26
Figura 2.11 – Eficiencia de motores de imán permanente y asíncrono en función de la potencia. ....	26
Figura 2.12 – Eficiencia de motores de imán permanente y asíncronos en función de la velocidad. ....	27
Figura 2.13 – Motor de imán permanente MITRAC.....	28
Figura 2.14 – Motor TAD-3.....	28
Figura 2.15 – Ahorro de energía VS tamaño del sistema de almacenamiento. Influencia del peso del vehículo.....	30

Figura 2.16 – Ahorro de energía VS peso vehículo, configuración sistema almacenamiento y servicios auxiliares.....	30
Figura 2.17 – Ahorro de energía en función del ciclo de conducción y del peso vehículo .....	31
Figura 2.18 – Sistemas de almacenamiento energético. ....	31
Figura 2.19 – Diagrama de Ragone para distintas tecnologías de almacenamiento. ....	32
Figura 2.20 – Pesos de las baterías en función de la profundidad de descarga y del tipo de tecnología.....	33
Figura 2.21 – Vida de las baterías NiMH en función de la profundidad de descarga. ....	33
Figura 2.22 – a) Esquema general con dos máquinas, b) Sistema típico con una sola maquina	34
Figura 2.23 – Rendimiento del motor de combustión VS altitud sobre nivel del mar.....	35
Figura 2.24 – Deflexión de los neumáticos. A) Terreno duro y B) Terreno blando.....	37
Figura 2.25 – Efecto de dos trolebuses simultáneos sobre la línea .....	39
Figura 2.26 – Efecto de la distancia entre estaciones sobre el consumo energético .....	40
Figura 2.27 – Carril Bus Mediano. Median Busway (Richmond, British Columbia) .....	41
Figura 2.28 – Carril bus. Calle Gómez de Avellaneda (Zaragoza) .....	41
Figura 2.29 – Carril Mixto. Paseo María Agustín (Zaragoza) .....	41
Figura 2.30 – Autobús Australiano con vía segregada. O-BAHN BUSWAY ADELAIDE.....	42
Figura 2.31- Vía libre. C-58 Barcelona .....	42
Figura 3.1 – Rendimientos de la cadena energética del transporte. ....	43
Figura 3.2 – Evolución del consumo según número de viajeros en ámbito urbano.....	44
Figura 3.3 – Estimación del coste de energía eléctrica, diésel y gas natural. ....	45
Figura 3.4 – Comparativa del coste económico de energía para distintos tipos de buses. ....	45
Figura 3.5 – Comparativa del coste de energía para distintos tipos de transporte según la ocupación media. ....	46
Figura 3.6 – Comparativa del coste de energía para distintos tipos de transporte según la ocupación. ....	46
Figura 4.1 – Costes del trolebús y diésel en función de los kilómetros recorridos.....	47
Figura 4.2 – Costes para distintos medios de transporte en función del número de pasajeros por hora.....	47
Figura 4.3 – Demanda de pasajeros según el medio de transporte en distintas ciudades europeas.....	48
Figura 4.4 – Coste energético por plaza en distintos medios de transporte. ....	51
Figura 5.1 – Pasajeros por kilómetro y expedición por línea. ....	55
Figura 5.2 – Coste energético por persona en cada línea de autobús.....	56
Figura 3.1 – Imagen del vehículo monitorizado. ....	58
Figura 5.3 – Diagrama de cuerpo libre.....	59
Figura 5.4 – Diagrama de eficiencia de un trolebús.....	60
Figura 5.5 – Diagrama de eficiencia de trolebuses PHEV.....	61
Figura 5.6 – Diagrama de eficiencia del sistema completo de transporte mediante trolebuses convencionales.....	61
Figura 5.7 – Comparativa de los consumos de trolebuses reales, autobús y trolebús de la línea óptima. ....	64
Figura 5.8 – Velocidad y potencia calculados en dos ciclos de arranque-parada del vehículo. .	65

Figura 5.9 –Demanda teórica de potencia de tracción según el ciclo ideal de arranque-parada de un vehículo.....	65
Figura 6.1 – Trolebús de la ciudad de Parma (Italia) del fabricante Van Hool.....	66

# 1. INTRODUCCIÓN

Desde hace tiempo se ha demostrado<sup>1</sup> que los gases y partículas procedentes de la combustión de combustibles fósiles, en particular del combustible diésel, aumentan el riesgo de contraer enfermedades cancerígenas. Entre los gases que libera destaca el CO<sub>2</sub> culpable del llamado efecto invernadero.

Los gobiernos están tomando medidas<sup>2 3</sup> para reducir estas emisiones, sin embargo, se sigue observando que aumentan año tras año al aumentar el número de vehículos. Una de las medidas que ha destacado, aunque con un objetivo poco ambicioso, es la Estrategia 2020. Esta medida entre los objetivos marcados se encuentra la reducción en un 20% de los gases contaminantes.

Una alternativa al aumento de estas emisiones es el transporte eléctrico. Aunque el modelo energético de producción de electricidad todavía se basa principalmente en combustibles fósiles, la tendencia se está cambiando gracias a las energías renovables y la generación distribuida.

El trolebús es un vehículo, con tracción eléctrica, destinado al transporte público masivo. Se conecta a un circuito de líneas aéreas por medio de un sistema de captación conocido como "trole". El trole está en contacto con las líneas aéreas, incluso con el vehículo en movimiento. También se le conoce como Trolleybus en inglés, Obus en alemán y Filobus en italiano.

Este medio de transporte aporta los siguientes beneficios<sup>4</sup>:

- Reducción del consumo total de energía por su mayor eficiencia. Al usar la electricidad en lugar del combustible
- Reducción de los niveles de ruido, ya que los vehículos eléctricos son más silenciosos.
- Reducción de los contaminantes que afectan a la salud, debido a la característica única de cero emisiones en la calle.
- Aumento de la comodidad, porque los autobuses eléctricos tienen menos vibraciones y mejor aceleración.
- Uso de las energías renovables para la alimentación del vehículo.

---

1 Stöber, W.; Ulrich R. Abel. Lung cancer due to diesel soot particles in ambient air?. International Archives of Occupational and Environmental Health July 1996, Volume 68, Issue 1 Supplement, pp S3-S61

<sup>2</sup> Directiva 70/220/CEE del Consejo, de 20 de marzo de 1970, .... medidas contra la contaminación atmosférica causada por los gases de escape de los vehículos de motor.

<sup>3</sup> Reglamento (CE) nº 715/2007 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 20 de junio de 2007. (EURO V)

<sup>4</sup> A. E. Díez et al 2010.

## 1.1 HISTORIA DEL TROLEBÚS.

El primer ferrocarril eléctrico vio la luz en el año 1879, a través de Werner von Siemens quien lo demostró en una exposición industrial en la ciudad de Berlín en 1882. Siemens crearía la primera línea a través de su “Elektromote” (ver Figura 1.1), naciendo el trolebús. El primer trolebús híbrido, Petrol-electric trolleybus (Figura 1.2), fue desarrollado en 1922 por Tilling-Stevens. (Brunton, L. 1992)

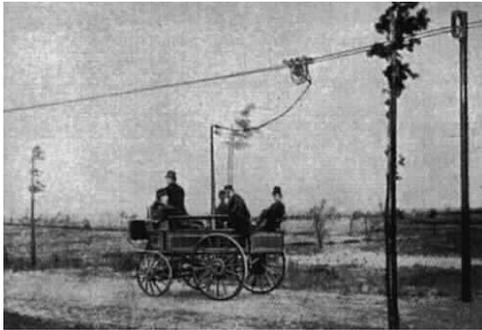


Figura 1.1 – El primer trolebús - ‘Electromote’ de 1882

Fuente: Siemens History (web)  
[http://www.siemens.com/history/en/news/1071\\_trolleybus.htm](http://www.siemens.com/history/en/news/1071_trolleybus.htm) (accedido 10/06/13)

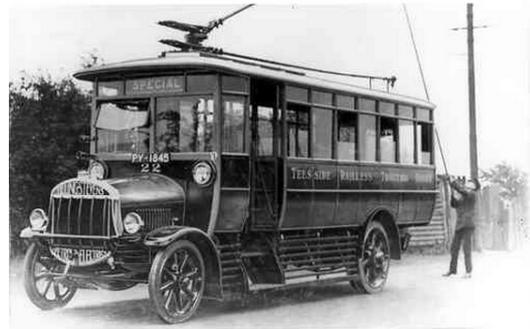


Figura 1.2 – Trolebús Petrol-electric de 1932

Fuente: The 500 Group (web)  
<http://www.tomorrows-history.com/projects/PN0100070001/TRTB.htm> (accedido 10/06/13)

El desarrollo del trolebús se produjo en la década de 1920 debido a los avances de la tecnología. Se logró mejorar su funcionamiento: mayor velocidad y aceleración, menor consumo, uso de neumáticos y el nuevo diseño impulsaron este medio de transporte. Destaca el éxito de las empresas Guy Motors y Sunbeam Commercial Vehicles ubicadas en Wolverhampton (Reino Unido) que llegan a ser los dos mayores fabricantes del mundo de trolebuses. (Grava, S. 2003)

En los sucesivos años llegaría la expansión del trolebús y el declive del tranvía, debido a las mejoras de la propulsión dual (motor eléctrico y de combustión), control automático del trole<sup>5</sup> y operación con trolebuses articulados. Los gobiernos promueven dicho transporte con leyes para la conversión o sustitución de líneas de Tranvía a Trolebús. Antes de iniciarse la Segunda Guerra mundial, Londres disponía de un parque de 1444 trolebuses, en Estados Unidos prestaban servicio 2800 vehículos y Moscú disponía de 1740 unidades. Este crecimiento de vehículos se aceleraba y a principios de la década de 1950 se contaba con un pico de 6.500 vehículos en Estados Unidos, y la mayor flota la poseía la Unión Soviética con 26.000 vehículos.<sup>6</sup>

En España, nace oficialmente la primera línea de trolebús en Junio de 1940 en la ciudad de Bilbao, a la vez que se publicaba la Ley<sup>7</sup> de trolebuses. En el resto de ciudades, la implantación fue progresiva (Figura 1.3) hasta su máxima extensión en 1963 con 276 kilómetros (Figura 1.4), este auge dado en

<sup>5</sup> Trole o pluma: dispositivo de toma de corriente de algunos vehículos con tracción eléctrica, como son los tranvías y los trolebuses, formado por una percha, una rueda y un hilo de contacto.

Mario León (2005), Diccionario de tecnología ferroviaria, p. 442.

<sup>6</sup> Murray, A. 2000; Tartajo J.A. 2006; Vuchic R. 2007

<sup>7</sup> “Ley de 5 de Octubre de 1940 por la que se regula la concesión administrativa de líneas de transporte realizado por trolebuses”. Boletín Oficial del Estado (1940), p. 7034

nuestro país fue debido al embargo de petróleo que se produce a finales de 1940 por parte de Estados Unidos<sup>8</sup> y que finalizaría en 1950. En Zaragoza<sup>9</sup> llegaron a existir tres líneas de trolebuses (Gállego, Ciudad Jardín y Barrio de Jesús) que fueron complementarias a las líneas de tranvías (ver Figura 1.5 y Figura 1.6). (Tartajo J.A. 2006)

CIUDAD	TRANVÍAS			TROLEBUSES		AUTOBUSES
	Inicio	Electrificación	Final	Inicio	Final	Inicio
Alicante	1893	1924	1969			(1924)-1956
Avilés	1903	1921	1960			1957
Badajoz	1889		1912			
Barcelona	1872	1899	1971	1941	1968	(1906)-1922
Bilbao	1876	1896	1955	1940	1978	1955-59
Cádiz	1906	1906	1952	1951	1975	1951
Cartagena	1892	1907	1959			
Coruña (La)	1903	1913	1954	1948	1979	1966¿
Ferrol	1892	1924	1962			
Gijón	1890	1909	1964			(1947) 1953
Granada	1904	1904	1968	1968		(1933) 1959
Madrid	1871	1898	1972	1950	1966	(1924)-1932
Málaga	1885	1905	1961			(1927)1949
Murcia	1896	1906	1929			
Oviedo	1891	1922	1956			1956
Palma de Mallorca	1891	1916	1959			(1930)-1946
Palmas (Las)	1890	1910	1937-4?			1937
Pamplona	1911	1911	¿			1951
Pontevedra	1889	1924	1943	1943	1989	
San Sebastián	1887	1898	1958	1948	1974	1949
Santa Cruz de Tenerife	1901	1901	1956			1942
Santander	1873	1908	1951	1951	1975	1951
Sevilla	1887	1900	1960			(1933)-1954
Valencia	1876	1900	1970	1951	1976	(1925) 1936
Valladolid	1881	1911	1933			(1933) 1956
Vigo	1914	1914	1968	-1962	1962	1968?
Zaragoza	1885	1902	1976	1951	1975	(1925) -1955

Figura 1.3 – Cuadro resumen de fechas significativas en ciudades con diversos modos de transporte urbano de superficie en España.

Fuente: Hernández, J.L. 2006

El declive del transporte colectivo eléctrico comienza en la década de los años sesenta, como consecuencia de varios factores. Primero, los trolebuses tienen una falta de flexibilidad respecto a los costes asociados en la modificación de las líneas, por lo que era difícil realizar la integración con los autobuses de combustión ya que se estaban modificando las rutas, debido al crecimiento demográfico de las ciudades. Otro factor declive fueron las mejoras de las carreteras y el abaratamiento del precio de los vehículos, ya que iniciaron la compra de automóviles por parte de los particulares, y por tanto, se favoreció esta modalidad de transporte en detrimento del transporte

<sup>8</sup> Caruana, Leonardo (2009), Los difíciles orígenes de la industria petrolera española. Revista Empresa y Humanismo Vol. XII, 1/09, pp. 13-62

<sup>9</sup> Peña, Francisco Javier y Valero Jose M<sup>a</sup> (1985). *Los Tranvías de Zaragoza*. Diputación Provincial de Zaragoza.

público. El tercer factor, fue la aparición de una nueva ley<sup>10</sup> que conseguiría favorecer el auge del autobús de combustión. (Hernández, J.L. 2006; Brunton, L.J. 2000)

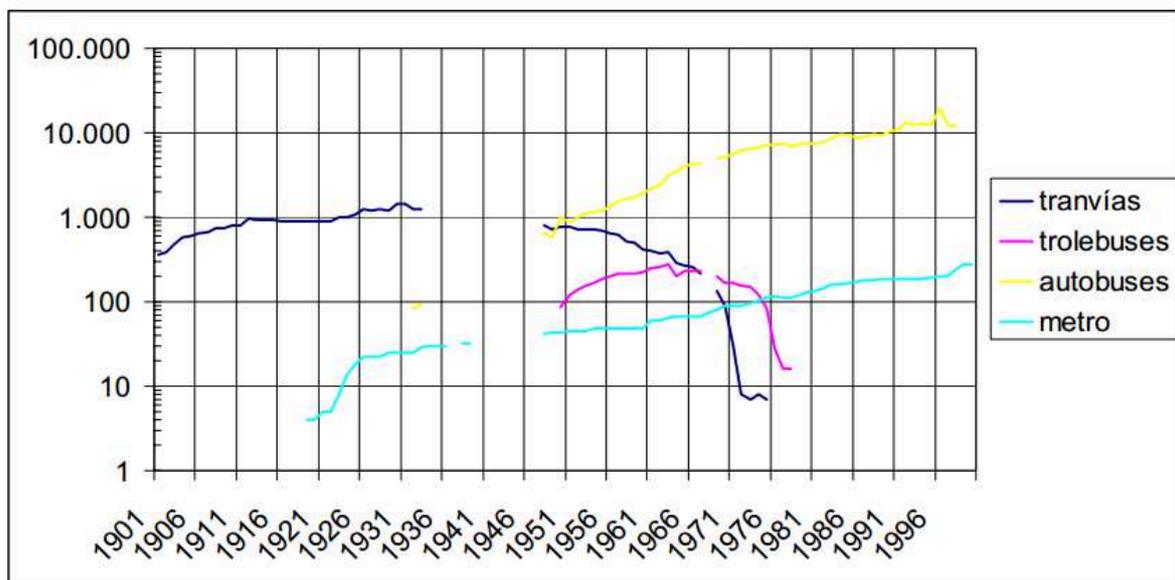


Figura 1.4 – Kilómetros de red de los diversos modos de transporte urbano en España. (Hernández Marco, José Luis)

Se produce un repunte del transporte eléctrico en 1973, debido al inicio de la crisis del petróleo (su precio llegó a duplicarse) y al embargo de petróleo por parte de los miembros de la OPEP a los países que apoyaron a Israel durante la guerra del Yom Kippur, estos fueron EEUU y la Unión Europea. En consecuencia, varios países europeos (Alemania, Holanda y Bélgica) deciden transformar sus medios de transporte adaptando los autobuses existentes para que dispongan además de motor eléctrico o incorporando líneas de trolebús. Sudamérica, la antigua URSS, China y Europa del Este deciden apostar fuerte por este medio de transporte incorporando nuevas líneas de trolebús. Su crecimiento ha ido en aumento desde entonces. Sin embargo, existirán países, como en España (1989) o Gran Bretaña (1972) en los que desaparecerán por el completo.<sup>11</sup>

En 1989 se produce el cierre del trolebús de Pontevedra, siendo el último en España hasta la aparición de una nueva línea en 2008 en la ciudad de Castellón<sup>12</sup>.

Desde el año 1976, el trolebús se sigue extendiendo y actualmente existen más de 300 ciudades del mundo que disponen de este medio de transporte, destaca Corea del Norte, China y Rusia. Este último tiene el mayor de todos los sistemas en la ciudad de Moscú, con una flota de más de 1500

<sup>10</sup> Ley 26/1973, de 21 de Julio, sobre transformación de concesiones de trolebuses en otras equivalentes de autobuses. Boletín Oficial del Estado (1973), p. 15072

<sup>11</sup> García Reyes, M. 2005; Brunton, L.J. 2000

<sup>12</sup> Fabra María (2008). "Es como un tranvía, ¿no?". Publicado en el diario EL PAIS, 27 de junio de 2008.



Figura 1.5 – Trolebús circulando por Zaragoza en los años 60.

Fuente: Heraldo Aragon (web - accedido 14/06/13)  
[http://www.heraldo.es/multimedia/galerias-imagenes/el\\_trolebus\\_abandonado.html?imagen=7](http://www.heraldo.es/multimedia/galerias-imagenes/el_trolebus_abandonado.html?imagen=7)

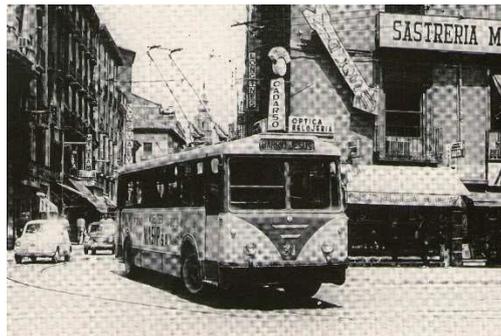


Figura 1.6 –Trolebús de Zaragoza 31 de la línea del Barrio de Jesús, saliendo de D. Jaime al Coso en 1967.

Fuente: Heraldo Aragon (web - accedido 14/06/13)  
[http://www.heraldo.es/multimedia/galerias-imagenes/el\\_trolebus\\_abandonado.html?imagen=7](http://www.heraldo.es/multimedia/galerias-imagenes/el_trolebus_abandonado.html?imagen=7)

vehículos<sup>13</sup>. A continuación, se muestra un resumen de los datos del año 2000 (Tabla 1.1) y la evolución de los mismos en la Figura 1.7.

Tabla 1.1 - Distribución de los sistemas de trolebuses en el mundo.

Fuente: Propia, datos de: Murray, A. (2000). World Trolleybus Encyclopaedia

ZONA	SISTEMAS	VEHICULOS
Europa del Este	64	4.482
Europa del Oeste	48	1.893
Eurasia (Rusia y Asia)	189	26.666
Norteamérica	9	1.926
Suramérica	13	828
África	0	0
Australasia (Australia, Melanesia y Nueva Zelanda)	1	60
Asia	39	4.810
TOTAL=	363	40.665

Se puede observar como la evolución es constante hasta la década de los años cincuenta, donde el desmantelamiento de los sistemas eléctricos de transporte era una meta perseguida por las grandes compañías norteamericanas según apuntan muchos expertos. (Díez Andrés et al 2010)

También se aprecia como a partir de la crisis del petróleo de 1973 experimenta un aumento que ha consolidado el número de sistemas que tenemos a día de hoy.

<sup>13</sup> Fuente(web - accedido 14/06/13): <http://www.trolleymotion.ch>

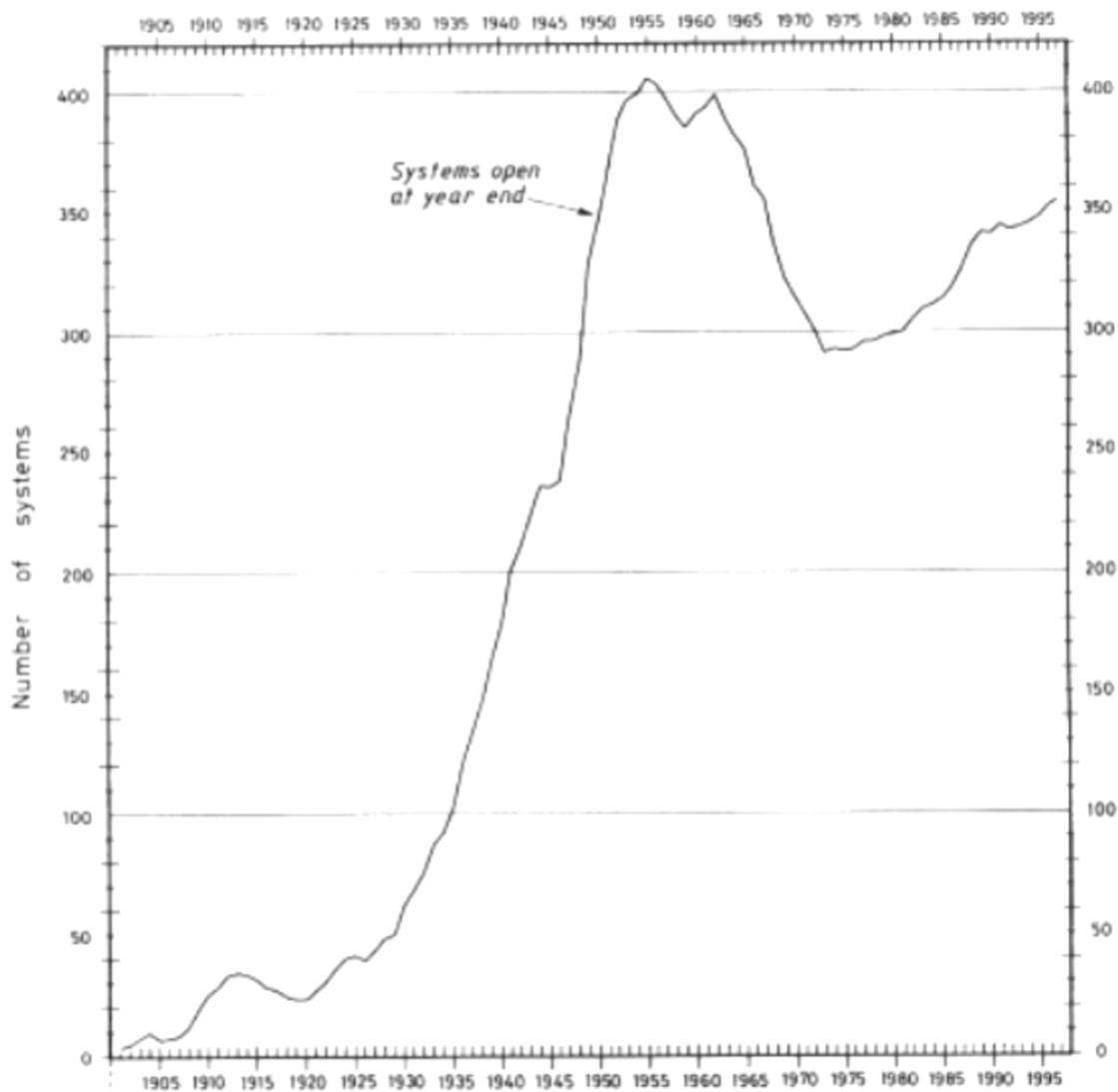


Figura 1.7 – Evolución de los sistemas de trolebús en el mundo de 1902 al 2000.  
Fuente: Murray, A. 2000

En los capítulos que veremos a continuación, se investigará y analizará los factores energéticos que dependen de dichos sistemas, que podrían dar las claves para un exitoso medio de transporte.

## 1.2 TIPOS DE TROLEBUSES ELÉCTRICOS

Existen tres tipos diferentes de trolebuses: clásico o convencional, híbrido y PHEV. Estas diferencias radican en la fuente de energía que suministra energía al motor. Los modelos PHEV son un caso particular de trolebuses ya que pueden tener o no el sistema de alimentación a través de los troles, ver Figura 1.8.

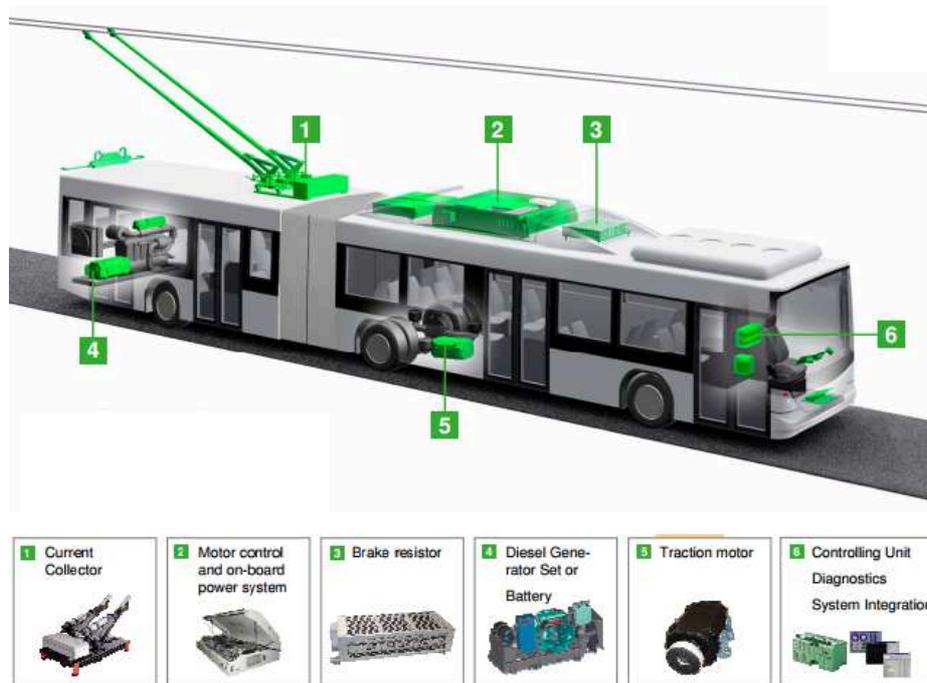


Figura 1.8 – Esquema de propulsión del trolebús.

Fuente: Lenz, E. 2013

En el anexo I del trabajo podemos ver la tabla comparativa de diversos modelos de trolebuses actuales.

### 1.2.1. Trolebús convencional.

A diferencia del híbrido, un trolebús con una sola fuente de energía puede operar siempre y cuando exista catenaria desde los aparcamientos hasta el circuito por el cual circulará. El vehículo, desde el punto de vista del control, será mucho más sencillo que para el resto de modelos.

### 1.2.2. Trolebús híbrido (HEV).

Un vehículo híbrido es aquel que dispone de dos fuentes de energía para la tracción, que funcionan mancomunadamente. Si al menos una de las fuentes de energía es eléctrica se tiene un vehículo eléctrico híbrido (HEV). Los vehículos híbridos proporcionan un mayor rendimiento de combustible en comparación con los convencionales

El sistema de tracción en un HEV puede albergar uno o más motores, un generador y un medio de almacenamiento de energía. (Emiro, A. et al 2010).

En función del modo de tracción de las fuentes obtendremos dos tipos comunes de configuraciones: serie y paralelo. (Figura 1.9 y Figura 1.10)

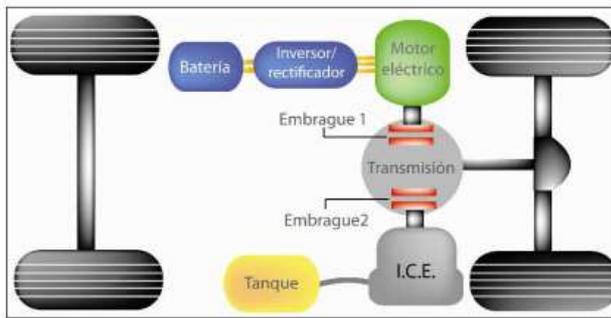


Figura 1.9 – Esquema de un HEV en paralelo.  
Fuente: Emiro, A. et al 2010.

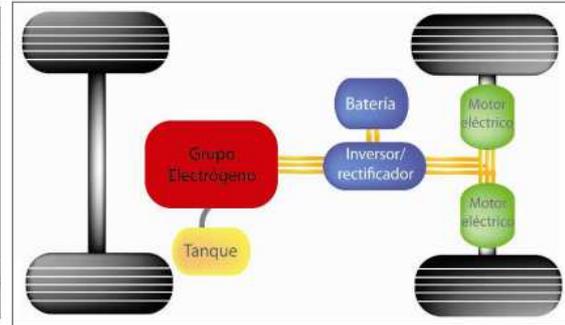


Figura 1.10 – Esquema de un HEV en serie.  
Fuente: ibis

Las fuentes de energía secundarias pueden ser: carburante, gases licuados, celdas de combustible, baterías, supercondensadores y volante de inercia. Estos se verán con mayor detalle en el apartado 2.2.3.

### 1.2.3. PHEV

Los Vehículos Eléctricos Híbridos Plug-in (PHEV) son aquellos HEV cuya batería se puede recargar al conectarlos a la red eléctrica. Un PHEV, por definición, debe cumplir con los siguientes mínimos: capacidad de 4 kWh para la batería destinada al sistema eléctrico de tracción, y 10 millas de autonomía por medios solo eléctricos<sup>14</sup>.



Figura 1.11 – Estación de Carga Rápida para un PHEV Bus  
Fuente: Opbrid (web - accedido 17/06/13)  
<http://www.opbrid.com>



Figura 1.12 – PHEV Bus  
Fuente: Opbrid (web - accedido 17/06/13)  
<http://www.opbrid.com>

A diferencia de los dos modelos anteriores de trolebuses, los PHEV disponen de una holgada autonomía para poder circular sin utilizar la alimentación de la catenaria. Pueden recargar completamente la energía diariamente o bien realizarlo parcialmente en periodos cortos a lo largo del día. Esta segunda opción requiere necesariamente subestaciones de recarga.

<sup>14</sup> IEEE-USA. "Board of directors, position statement: plug-in electric hybrid vehicles".

Fuente: (web - accedido 17/06/13) [http://www.engr.uvic.ca/~mech459/Pub\\_References/PHEV0607.pdf](http://www.engr.uvic.ca/~mech459/Pub_References/PHEV0607.pdf)

## 1.3 *Estado del arte*

El trolebús ha sufrido varias transformaciones importantes desde su aparición en 1882. Diversos autores<sup>15</sup> recogen esta evolución a lo largo de la historia en tres generaciones diferenciadas, ligadas al desarrollo de nuevos motores eléctricos:

- 1ª Generación (1890-1960)

Se utilizaron en un comienzo motores conmutados generalmente alimentados con corriente continua, los cuales, gracias a su elevado par característico y fácil regulación de velocidad, constituyeron la mejor opción. Al principio, el control de arranque y velocidad se hacía con sistemas de resistencias variables conectadas en serie, hasta que posteriormente la electrónica de potencia permitió el uso de control tipo “chopper”.

Debido a las limitaciones técnicas para almacenar grandes cantidades de energía eléctrica, en los primeros trolebuses la energía captada era consumida instantáneamente por los motores para lograr el movimiento, de manera que una desconexión implicaba necesariamente la interrupción inmediata de la energía motriz, y consecuentemente, de la tracción. Cuando esto ocurre, los vehículos mantienen su movimiento por unos metros más gracias a la inercia, pero finalmente se detienen, y deben ser reconectados manualmente por un operario, para poder continuar en circulación

- 2ª Generación (desde 1961)

El inicio de la segunda generación de trolebuses proviene del éxito de los motores de corriente alterna (inducción con rotor de jaula de ardilla) controlados por inversores de electrónica de potencia. Se pueden equipar con dispositivos de almacenamiento de energía tales como baterías, condensadores e incluso volantes de inercia, permitiendo la operación del bus desconectado de la catenaria por varios kilómetros.

Pueden estar equipados con pequeños motores de combustión de respaldo, generalmente de menor potencia que el motor eléctrico. Se debe a que el motor de combustión incorporado puede efectuar tracción en conjunto con el motor eléctrico de manera similar a como operan los denominados vehículos híbridos tipo paralelo o simplemente puede ser utilizado para producir electricidad de manera muy similar a como opera un vehículo tipo serie.

- 3ª Generación

Recientemente, la disminución del costo de los materiales magnéticos y el desarrollo de controladores electrónicos de alta velocidad ha impulsado el uso de motores de imán permanente. Estos motores presentan un par motor mayor que los de rotor de jaula de ardilla, además de ser más ligeros y eficientes. Son diseñados de manera que no se requiere ni de transmisión ni de una caja

---

<sup>15</sup> Andrés Emiro Diez, Armando Bohórquez, Edder Velandia, Luis Fernando Roa (2010). Modern Trolleybuses on Bus Rapid Transit: key for electrification of public transportation. ANDESCON, 2010 IEEE

reductora, pudiendo ser acoplados directamente a las ruedas. En inglés a este tipo de motor se le conoce como “hub”, al estar ubicado directamente en el eje de la rueda.

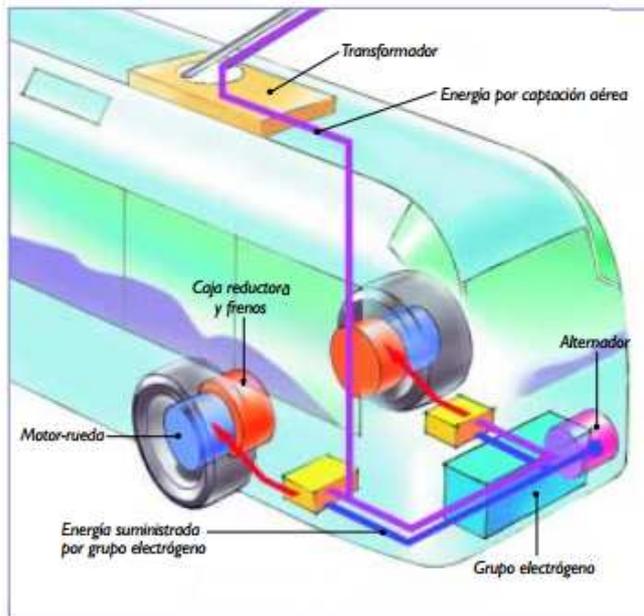


Figura 1.13 - Motor HUB montado (Trolebús modelo Cívica)  
Fuente: GRAND, Phillipe. "UITP Trolleybuses Salzburg."  
[http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user\\_upload/documents/uitp/Grand\\_Irisbus.pdf](http://www.trolley-motion.ch/fileadmin/user_upload/documents/uitp/Grand_Irisbus.pdf)  
(Accedido 18/06/13)



Figura 1.14 - Motor HUB montado (Trolebús modelo Cívica)  
Fuente: web  
<http://www.tbus.org.uk/article.htm>  
(Accedido 18/06/13)

En los últimos 20-30 años el progreso técnico ha experimentado un cambio radical en el transporte eléctrico público. Los vehículos eléctricos son diseñados para la seguridad y confortabilidad de los pasajeros, con el mínimo consumo posible y sin contaminación. (Petru T. et al 2012).

Los principales avances y actuales líneas de investigación son:

- Motores de tracción

Los avances se están produciendo en dos tipos de motores, asíncrono o de inducción y motores síncronos de imanes permanentes, además de los motores “hub” mencionados anteriormente. Para las potencias entre 150-300 kW la eficiencia de un motor IE3<sup>16</sup> debe ser superior al 95%. (Almeida, A. et al 2008)

Estos avances ligados nuevamente a modificaciones en la legislación aprobada en la Unión Europea consiguen el objetivo de reducir el consumo energético y, como consecuencia, las emisiones de dióxido de carbono. El uso de la energía y la eficiencia de los motores de inducción en la industria se discuten en el punto 11 de la Directiva EuP (EuP = Energy Using Products) y en la Directiva europea

<sup>16</sup> Clase internacional de eficiencia energética - IEC 60034-30

2005/32/CE, respectivamente. En dicha directiva se establecen fechas para fabricar con un nivel mínimo de eficiencia.<sup>17</sup>

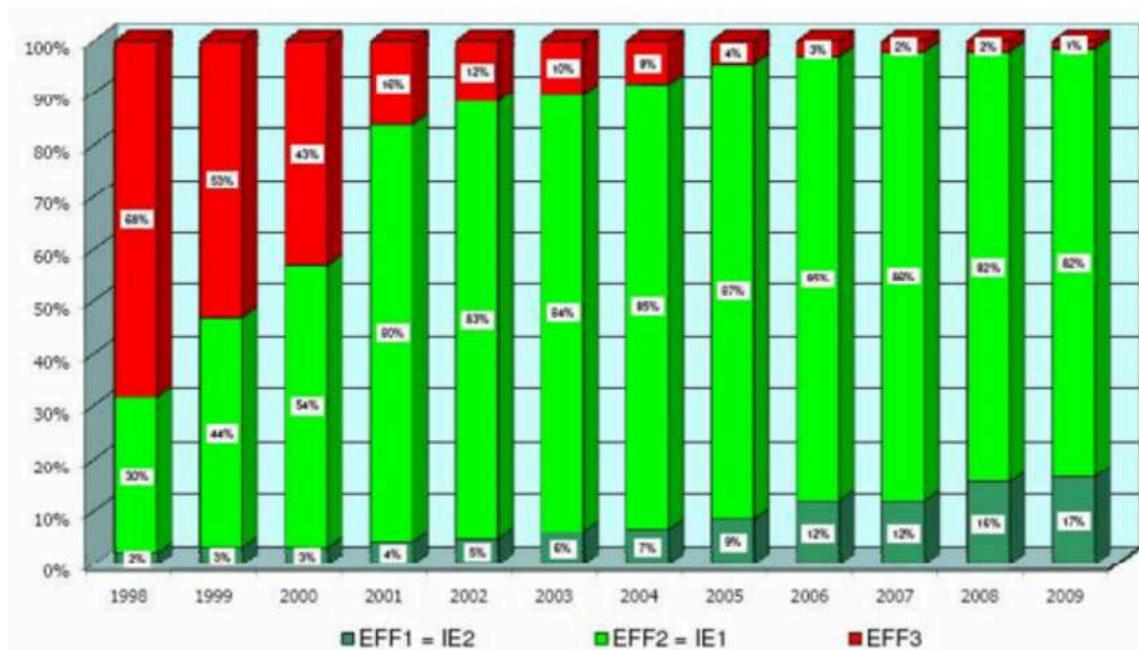


Figura 1.15 – Venta de motores en el ámbito del CEMEP/EU en el periodo 1998-2009  
Fuente: (Almeida, A. 2008)

- Convertidores electrónicos de tracción

Estos equipos se adaptan a los cambios de velocidad, aceleración y freno además de reducir el consumo de energía. También reducen el estrés mecánico de los elementos de transmisión.

Comparando dichos equipos entre 1990-2000, los actuales convertidores se construyen con módulos inteligentes de potencia (transistores IGBT), obteniendo unas mejoras en: menor peso y volumen además de unas mínimas pérdidas por conmutación. (Petru T. et al 2012). En la Tabla 2.4, pueden verse las características de un convertidor IGBT (SDMC-103 – Inbus-103).

Las últimas tecnologías de control utilizan inversores para alimentar motores de corriente alterna. Las catenarias se encuentran a una tensión de 600 a 750 VCC y los inversores crean tensión y frecuencia variables en corriente alterna.

<sup>17</sup> Directiva EuP Basada en la norma IEC 60034-30 (Directiva EuP aprobada en 07/2009; EuP = Energy Using Products). Fuente: Siemens. Motores de inducción de baja tensión de acuerdo a la nueva norma sobre medición de eficiencia y a las nuevas clases de eficiencia.

<http://www.industry.siemens.com/topics/global/en/energy-efficient-production/standards-and-legislation/efficiency-classes-for-motors/Documents/ws-ie-flyer-es.pdf> (web - accedido 19-06-13)

- Métodos y sistemas de control.

Son aquellos sistemas cuya principal misión es la de asegurar el algoritmo de arranque, la propulsión y freno del motor eléctrico con las mínimas pérdidas de energía.

Probablemente sea una de las partes que más han cambiado a lo largo del tiempo, debido a los avances de la electrónica. Estos sistemas deben adaptarse a los nuevos sistemas de almacenamiento rápido de energía (supercondensadores), uso de comunicación con fibra óptica, geoposicionamiento, redes CAN, guiado automático (óptico o magnético). (Ibis)

En la siguiente Figura 1.16, podemos observar como los sistemas de control son un factor fundamental para el ahorro energético.

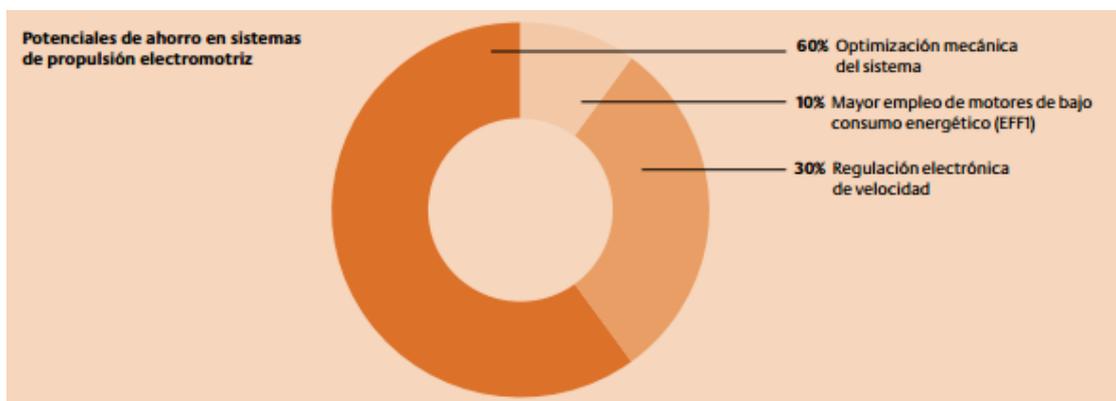


Figura 1.16 – Ahorros potenciales en el ciclo de vida de un motor eléctrico

Fuente: Ministerio Federal de Economía y Tecnología de Alemania.

<http://www.efficiency-from-germany.info> (web - Accedido 19/06/13)

Así mismo, están influyendo los sistemas de alimentación (tensiones de catenaria, subestaciones), almacenamiento energético (baterías y supercondensadores) y freno regenerativo. (Diez, A.E. et al 2008)

- Sistemas de almacenamiento energético:

Se trata de un campo prometedor para los vehículos eléctricos y por este motivo se están investigando actualmente (Van den Bossche, P., 1998).

Las baterías y los supercondensadores están consiguiendo aportar cada vez más energía a la tracción de los vehículos. Los supercondensadores almacenan la gran cantidad de energía generada en el frenado (freno regenerativo) permitiendo reducir el consumo de energía. Las baterías permiten que el vehículo quede desconectado de la catenaria, es decir, disponga de una amplia autonomía y pueda transitar libremente por zonas donde es inviable la electrificación.

Actualmente se están realizando investigaciones sobre batería de Litio. IBM está investigando sobre las baterías litio-aire que disponen de una densidad energética teórica de 11 kWh/kg, Phinergy ha desarrollado una batería de Aluminio-aire que posee una densidad de 8kWh/kg

Existen muchos artículos científicos acerca del almacenamiento de energía.

- Sistemas de alimentación:

Existen diversos trabajos de investigación sobre la tensión de alimentación, número de fases y conductores, corriente continua o alterna. En ellos, determinan la opción más eficiente siempre que esté dentro de la actual normativa<sup>18</sup>.

Trabajar con tensiones elevadas permite eliminar la resistencia serie (ballast) e incrementa la energía proporcionada por el freno regenerativo. Aumentar el número de polos de la catenaria de 2 a 3 permite incrementar la eficiencia y doblar la distancia entre subestaciones (V.I. Sopov)

El uso de corriente alterna o continua viene determinada por los convertidores y el motor. Existen convertidores en fase de estudio que pueden adaptarse a ambos modelos (Melo, G.A. et al 2010)

---

<sup>18</sup> CEI EN 50 163 Railway applications - Supply voltages of traction systems (Foreign Standard) y CEI EN 50329 (CEI 9-23) Railway applications - Fixed installations -. Traction transformers.

## 1.4 Trolebús de Castellón.

La decisión de adoptar el trolebús y **sobre vía reservada (TVR)**, llamado TRAM, en la ciudad de Castellón es promovida por un estudio de los parámetros de movilidad llevada a cabo entre 2003-2004<sup>19</sup>. En diciembre de 2004 se presentó el proyecto básico de red de plataformas reservadas al transporte público en Castellón, Fase I, en el cual se definen las características del primer tramo.

El proyecto se dividió en varias fases de construcción. Desde el 22 de Junio de 2008<sup>20</sup>, está en marcha una parte de una de dos líneas proyectadas, tramo Universidad Jaime I – Ribalta. Este tramo posee una longitud de 2037 metros, cuenta con cinco paradas, priorización semafórica y guiado óptico.

Se prevé que la línea este completa (hasta GRAO) a finales de 2013. Para entonces, esta tendrá una longitud de 7.540 metros en sentido Grao y 7.977 en sentido Universidad. Asimismo, existirán 5 tramos libres de catenaria, por lo que es necesario que los vehículos se alimenten a través del grupo electrógeno.

El nuevo contrato de explotación<sup>21</sup>, licitado en Mayo de 2013, ha previsto una media diaria entre 7273 y 9.031 pasajeros. Serán necesarios siete vehículos para satisfacer la demanda diaria y la frecuencia del servicio estará entre 5-8 minutos los días lectivos, 15 minutos los no lectivos y 30 minutos los sábados y domingos. En total recorrerán una distancia de 366.640 km (215.107 km en días lectivos)

Desde su inauguración hasta diciembre de 2012 ha transportado un total de 3.235.624 pasajeros, situándose de media diaria los días laborables en 3.770 y laborables no lectivos 1.292, sábados 511



Figura 1.17 - Línea T1 del TRAM de Castellón

Fuente: Wikipedia

[http://es.wikipedia.org/wiki/TRAM\\_Transporte\\_Metropolitano\\_de\\_la\\_Plana](http://es.wikipedia.org/wiki/TRAM_Transporte_Metropolitano_de_la_Plana) (web - Accedido 19/06/13)

<sup>19</sup> Dómine Redondo, Vicente (2009). El sistema de transporte en vía reservada de Castellón.

Fuente: Web - <http://www.amtu.cat> (accedido – 19/06/13)

<sup>20</sup> FABRA, MARÍA. "Es como un tranvía, ¿no?". Diario EL PAIS, 27/06/2008.

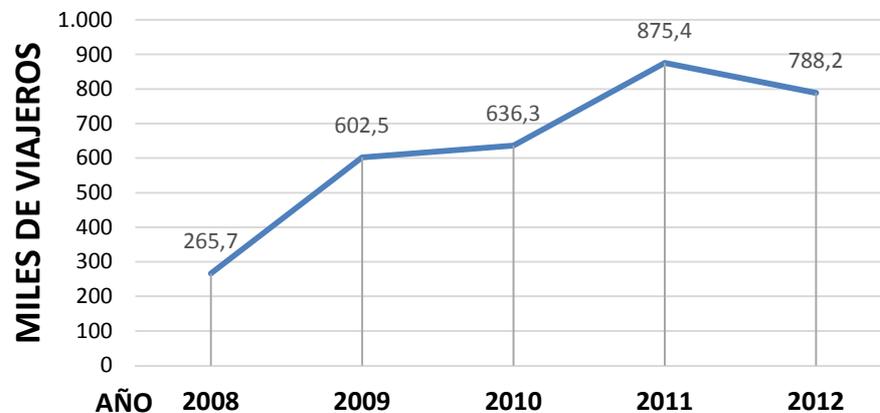
Accedido (19/06/2013): [http://elpais.com/diario/2008/06/27/cvalenciana/1214594287\\_850215.html](http://elpais.com/diario/2008/06/27/cvalenciana/1214594287_850215.html)

<sup>21</sup> Sustaeta Llombart, Ángel (2012).

y domingos 265 pasajeros.<sup>22</sup> El número de pasajeros aumenta cada año desde entonces y se prevé un aumento considerable al completar la línea y al modificar las líneas de bus.

**Tabla 1.2 – Viajeros anuales del transporte TRAM de Castellón.**

Fuente: Propia



Características de la línea:

TRAM. Tramo UJI - El Grao:

- Longitud de un ciclo completo 15,72 km
- Longitud del tramo con catenaria 10,71 km
- Longitud del tramo sin catenaria 5,01 km
- Tramos sin catenaria 5 tramos por ciclo
- Distancia entre paradas: 500 m

Itinerario UJI – Grao (longitud 7.540 metros)

- Velocidad comercial:18,0 km/h
- Tiempo de recorrido: 25minutos y 10 segundos

Itinerario Grao – UJI (longitud 7.977 metros)

- Velocidad comercial:17,8 km/h
- Tiempo de recorrido: 27minutos

Características técnicas:

- Una de las características que lo hace novedoso es la catenaria, ya que posee un sistema de suspensión flexible del hilo de contacto (Figura 1.15), aportando las siguientes ventajas sobre el hilo rígido: mayor seguridad en el funcionamiento y menor coste de mantenimiento y operación.
- El modelo de trolebús elegido es CIVIS de la empresa IRISBUS, cuyas características destacables son las siguientes:

- Capacidad: 83 personas
- Alimentación: Híbrida (grupo electrógeno)
- Velocidad Máxima: Urbana 50 km/h, Interurbana 70 km/h
- Consumo eléctrico 2.65 kWh/km

- Adaptado para personas con movilidad reducida
- Guiado óptico
- Puertas Deslizantes

<sup>22</sup> Web: <http://www.castelloninformacion.com/tram-castellon-viajeros-2012/>



Figura 1.18 – Catenaria con sistema de péndulo del trolebús de Castellón

Fuente: Dómine Redondo, Vicente

Figura 1.19 – Trolebús Civis de Castellón

Fuente: Ayuntamiento de Castellón (web – accedida en 20/06/13)

[http://www.castello.es/web30/pages/area\\_web20.php?cod0=1](http://www.castello.es/web30/pages/area_web20.php?cod0=1)

#### Conclusiones:

En el año 2012, tres vehículos realizaban el recorrido de la línea UJII-Ribalta, realizando un total de 121.737 kilómetros y la media diaria se situaba en 4183 pasajeros en los días lectivos. **A falta de concluir la línea completa, las cifras son relativamente bajas para un sistema de transporte de vía reservada (6.47 pasajeros/kilometro) y por tanto con una eficacia muy baja.**

Tras el análisis realizado en el proyecto de servicio público de transporte-línea 1 del TRAM de Castellón (2012) se define la reordenación de las líneas de transporte. Esta reordenación supone suprimir varias líneas con las rutas coincidentes al trolebús, esto supone una elevación automática de la demanda de la línea y por tanto una mejora de la eficiencia de este sistema de transporte.

Cabe destacar el bajo consumo del sistema que compararemos en los capítulos siguientes pero se debe resaltar que la distancia entre paradas se sitúa en 500 metros por lo que si se compara con un sistema con paradas a 300 metros el consumo aumentará, en torno al 30%.

## ***2. Factores influyentes en los costes energéticos.***

El presente capítulo analiza los factores que influyen sobre los costes energéticos en los trolebuses. Además de los elementos relacionados con el sistema eléctrico de los vehículos, se estudian diversos factores externos que influyen indirectamente y el sistema de potencia que alimenta a los trolebuses convencionales.

La eficiencia del sistema completo de una red de trolebuses está en el 40%, incluyendo las pérdidas en la red (mix del sistema eléctrico), subestaciones, transmisión, refrigeración y los ahorros por frenado regenerativo. Para el caso de los autobuses diésel la eficiencia se sitúa en el 25%.<sup>23</sup>

David Checkel realizó una comparativa real entre los autobuses híbridos (diésel-eléctricos) y trolebuses en la ciudad de Edmonton. En este estudio se obtuvo que el consumo de energía eléctrica de un trolebús dependía de:

1. Cargas: iluminación y climatización (calefacción o ventilación)
2. Potencia de tracción y la eficiencia con lo que se produce.
3. Pérdidas de energía en las líneas
4. Potencia regenerada y devuelta al sistema para usarse por otros vehículos.
5. Consumo de potencia de las subestaciones.

El documento además analiza el impacto de emisiones de gases contaminantes, así como la contaminación del ruido y realiza un análisis económico del sistema. Este documento puede servir de base para analizar e investigar otros factores, como el económico, que no abordan el presente trabajo.

A continuación, se exponen los distintos factores encontrados, fruto del presente trabajo de investigación, y que se refuerzan el trabajo realizado por David Checkel.

---

<sup>23</sup>Irvine Bell. Fuente: <http://www.tbus.org.uk/efficiency.htm> (web accedida 10/07/2013).

## 2.1 *Sistema de potencia*

El sistema de potencia lo componen todos los elementos o equipos que intervienen para la transformación de energía eléctrica, desde el punto de suministro hasta los vehículos.

Según Biryukov V. V et al (2007). Existen tres caminos para reducir o minimizar las pérdidas que se producen durante la transformación de energía:

- Incrementando la tensión de la catenaria.
- Reduciendo la resistencia de los circuitos con un aumento de la sección de los conductores o por la derivación de ramas paralelas.
- Cambiando la topología del sistema de potencia.

A continuación, se ve con detalle todos los parámetros que afectan al sistema de potencia, que complementan a los de Biryukov. Siendo estos factores la tensión, topología y subestaciones. Dentro de este último apartado se profundiza en los rectificadores.

A día de hoy, las pérdidas por transmisión de la energía o pérdidas de línea son aproximadamente el 10%, es decir, la eficiencia es del 90%. (Falvo, M. et al 2012)

### 2.1.1. *Tensión de la catenaria*

La tensión de los trolebuses normalmente ha sido de 600 V en corriente continua pero actualmente se están empleando 750 Voltios<sup>24</sup>, incluso existen estudios de líneas de 1500 voltios. (Pham, K. et al. 2000)

Los factores que influyen considerablemente en la tensión de la catenaria son los siguientes:

**Menores pérdidas en las líneas:** Un aumento de la tensión del 25% (de 600 a 750 V) permite disminuir las pérdidas en los mismos conductores en un 36%, pero si se aumenta la tensión a 1500 V permitiría reducir las pérdidas en un 84%. Para el planteamiento de un sistema nuevo, elegir una tensión mayor permitiría disminuir la sección de la catenaria.

Un incremento de la tensión entre un 20 a un 50% permite utilizar el mismo equipamiento tanto en el sistema de distribución como en los vehículos. (Sopov, V.I. et al, 2006)

**Reducción del número de subestaciones.** Al reducirse las pérdidas de potencia también se reducen la caída de tensión y por tanto puede aumentar la distancia entre subestaciones. (Sopov, V.I. et al, 2006)

**Reducción de efectos de las interferencias electromagnéticas.** En el caso de sistemas de 1500 V, supone una reducción del 50%. (Pham, K. et al. 2000)

---

<sup>24</sup> <http://www.tbush.org.uk/article.htm> (web - accedido 20/06/2013)

### 2.1.2. Topología de la red

Dependiendo del sistema de potencia adoptado, las pérdidas energéticas será mayores o menores, tal y como veremos en este apartado. Según Sopov, V.I. et al 2008, existen típicamente tres tipos de topologías:

- **Separado.** De dos o tres hilos.
- **Paralelo** (bipolar). Si observamos en la Figura 2.1-b) se muestran dos motores o trolebuses compartiendo un mismo hilo común (hilo central - 0'').
- **Dos hilos con un hilo adicional de tensión elevada.** A través de un convertor (CU), similar a los sistemas de corriente alterna de 2x25kV usados en sistemas de transporte de rail.

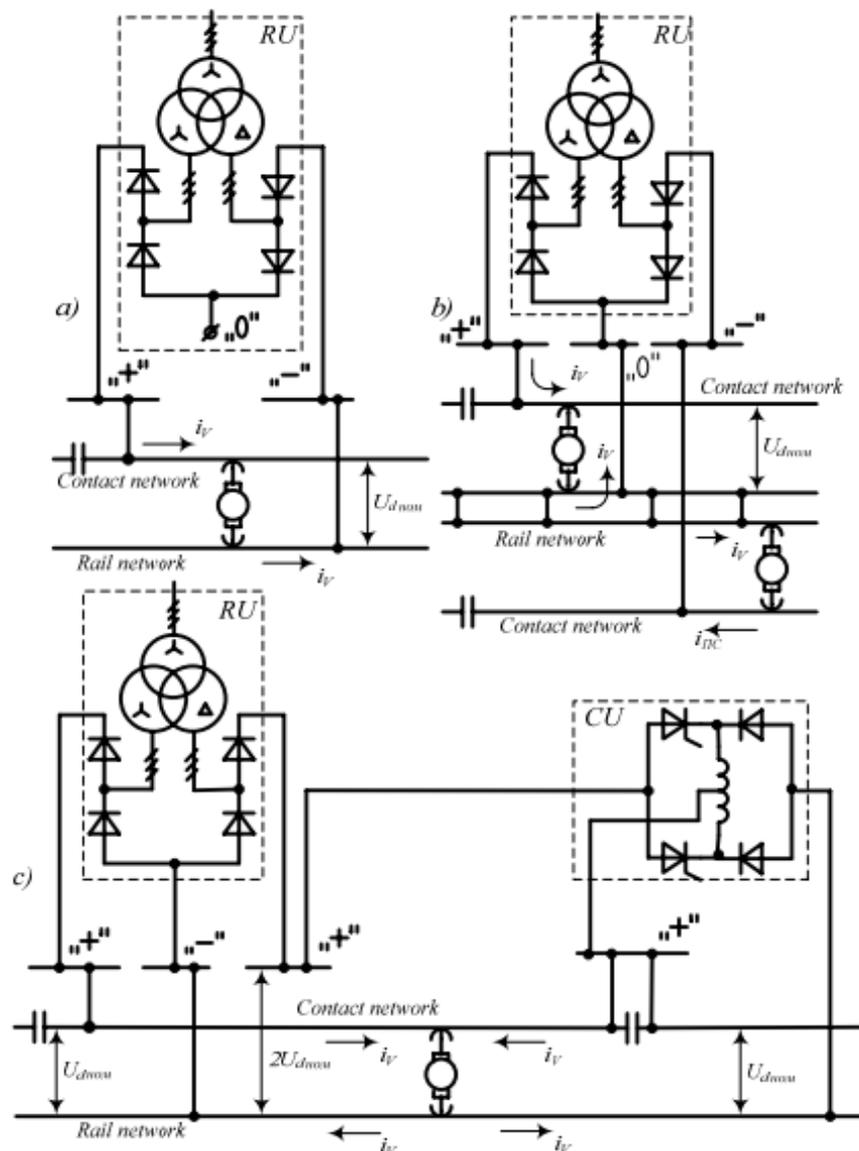


Figura 2.1 – Topologías de los sistemas de potencias en los sistemas de transporte público.  
 a) Separado, b) Paralelo, c) Dos hilos con cable de tensión elevada (con convertor)

Fuente: Sopov V.I et al (2008).

También influye el número de subestaciones que alimentan a la sección o tramo del recorrido de la línea, pueden existir una o dos subestaciones, es decir, un lado o dos lados de alimentación respectivamente.

Sopov, V.I. et al 2008, demuestran que la topología que menores pérdidas presenta, es la llevada a cabo con hilo o cable adicional (Figura 2.1-C). Existiendo unas diferencias del orden de dos a cuatro veces respecto a la topología de tipo separado. Sin embargo, desde el punto de vista de la fiabilidad, al utilizar un convertor ubicado en el extremo de la línea, el uso de esta topología es la menos indicada ya que un fallo en la subestación supone un *blackout* en esa sección de la línea. Sopov también demuestra que la topología en paralelo presenta menores pérdidas respecto a la separada.

En definitiva, el uso de una topología dependerá en gran medida del grado de seguridad que se requiera al sistema de transporte.

### 2.1.3. Subestaciones

Las subestaciones tienen como finalidad la transformación y rectificación de la energía eléctrica para alimentar las líneas eléctricas de los trolebuses. Están compuestas, principalmente, por: celdas de entrada de línea, equipo de medida, transformador-rectificador con filtros y celdas de corriente continua. También pueden contener sistemas de almacenamiento energético si los vehículos disponen de freno regenerativo. En este apartado profundizaremos en los rectificadores, ya que los transformadores o celdas de protección son elementos comunes de cualquier sistema de distribución eléctrica y su estudio escapa del objetivo del presente trabajo.

Un diagrama real se representa en la Figura 2.2, en el cual figuran dos rectificadores. La instalación de dos grupos rectificadores en una subestación añade más seguridad o fiabilidad al sistema.

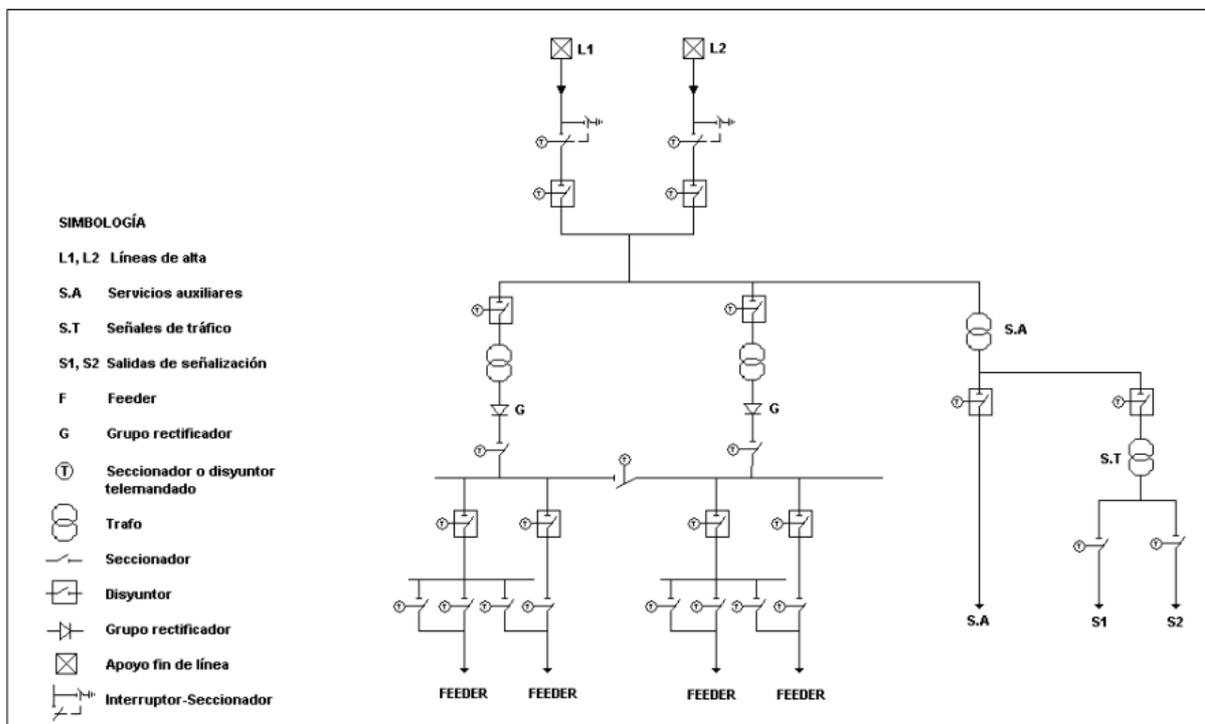


Figura 2.2 – Diagrama unifilar de una subestación de tracción convencional.

Fuente: NARANJO, H; MARTINEZ, S.. Configuración general de subestaciones de tracción en corriente continua.: Montajes e instalaciones: Revista técnica sobre la construcción e ingeniería de las instalaciones, Año nº 24, Nº 276, 1994, págs. 65-72 Universidad de La Rioja.

Los rectificadores convierten la corriente alterna, normalmente de 10 ó 15 kV, a corriente continua 750V. Existen dos tipos actualmente: los basados en diodos y los rectificadores de tiristor. En el primer caso, son utilizados para crear una tensión constante. Los tiristores son usados para crear una tensión regulada.

Uno de los parámetros de los rectificadores es el número de pulsos, dicho número es múltiplo de 6, por lo que tenemos rectificadores de 6, 12, 18...pulsos. Un mayor número de pulsos mejora la calidad de tensión en el lado de corriente continua (se reduce el coeficiente sinusoidal de la tensión) y la calidad de corriente (eliminan los armónicos) en el lado de corriente alterna. (Pineda, C. 2011).

Cabe destacar que los rectificadores de tiristores hacen reducir entre un 30-40% el número de subestaciones respecto a los antiguos rectificadores de diodos. Esto se debe a una reducción de las pérdidas en la catenaria de los trolebuses y al frenado regenerativo, pudiendo devolver la energía a la red eléctrica. (Andersson, P. y Neergaard, K. 1999)

La siguiente figuras muestran los circuitos de un rectificador de 12 pulsos y 18 pulsos, así como la las corriente y el espectro armónico de una fase en el lado de entrada del rectificador.

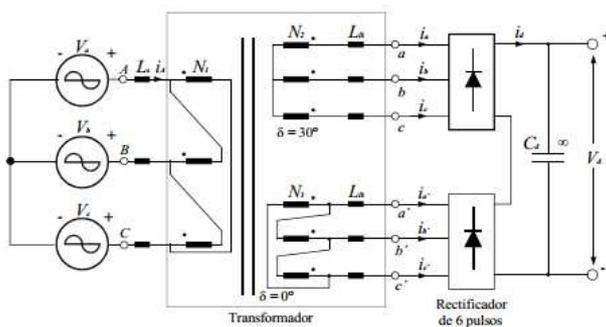


Figura 2.3 – Circuito de un rectificador de 12 pulsos serie. Fuente: Pineda, C. 2011

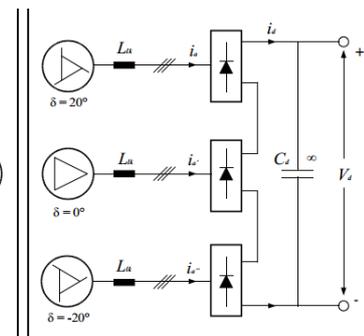


Figura 2.4 – Circuito de un rectificador de 18 pulsos serie. Fuente: Pineda, C. 2011

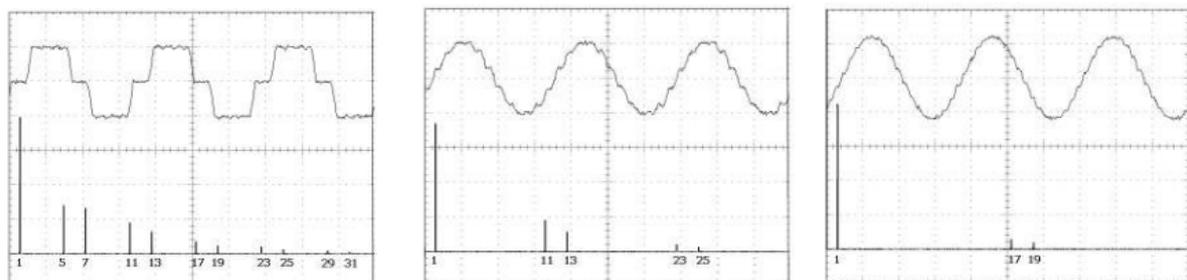


Figura 2.5 – Corriente de “fase a” y espectro armónico de un rectificador de 6 (izq.), 12 (centro) y 18 pulsos (derecha). Fuente: Ibis.

Realizando una comparación, se observa que a mayor número de pulsos se reducen los armónicos y aumenta el valor del fundamental y, por tanto, aumenta el valor de la eficiencia. **Un rectificador de 6 pulsos posee una eficiencia teórica de 95.2%, uno de 12 pulsos posee 97.1%** (Visintini, R. 2004)

La potencia de las subestaciones (de los rectificadores), así como el número de ellas necesarias para un sistema de transporte, debe ser determinada durante la fase preliminar de diseño con ayuda de

cálculos y simulaciones realizados por un software específico. Un informe<sup>25</sup> realizado para la implantación de un sistema de transporte eléctrico en la ciudad americana de Providence en 2011, analiza diversas alternativas de instalación después de haber estudiado diversos sistemas de transporte funcionando en distintas ciudades. En dicho informe se explica que normalmente los sistemas se configuran con subestaciones de baja potencia o alta potencia, obteniendo que:

1. Mediante subestaciones de alta potencia (>500kW)

Por regla general se instala una subestación de 1000 kW cada 1.5 km de vía doble y se añade una más para reducir la distancia hasta el final de la línea en caso de fallo de una de ellas.



Figura 2.6 - Plano en planta de una subestación típica

Fuente: Providence Core Connector Study (2011). Technical report f: streetcar traction power supply and distribution.

2. Mediante subestaciones de pequeña potencia (<500kW).

Se instala una por cada 2.5 km o el doble que las necesarias de alta potencia. Suelen montarse en casetas prefabricadas o enterradas cuya tensión de entrada de la red es baja tensión. Presentan las siguientes ventajas:

- No es necesario alimentación mediante hilos en paralelo
- La tensión es la utilizada por los servicios públicos.
- Menor tensión de retorno y corriente de fuga.
- Gran flexibilidad para su ubicación.
- Menor adquisición de terreno.

<sup>25</sup> Providence Core Connector Study.(2011). Technical report f: streetcar traction power supply and distribution. Disponible en: <http://providencecoreconnector.com/wp-content/uploads/2010/09/Providence-Conceptual-Traction-Power-Supply-Distribution-FINAL-Tech-Rpt-F.pdf>

## 2.2 Factores en los vehículos.

Dentro de los trolebuses existen distintos elementos que afectan al consumo energético del mismo. Mientras que los sistemas de almacenamiento energético reducen el consumo del sistema, mediante el aprovechamiento de la energía generada durante el frenado, una mejora en el sistema de tracción permite una reducción del consumo del vehículo. También podemos encontrar otra clase de elementos o equipos (guiado óptico o sistemas GPS) que mejoran la eficiencia del sistema, aumentando la capacidad de transporte y, por tanto, reducen el coste energético de transporte por persona.

### 2.2.1. Motor

El motor es uno de los principales elementos de consumo de un trolebús, ya que, estará funcionando prácticamente las 24 horas diarias. Una mejora de su eficiencia implicará una reducción importante de pérdidas de energía.

#### A. Coste del Ciclo de Vida.

Según diversas fuentes consultadas<sup>26 27 28</sup>, los costes del ciclo de vida de un motor se reparten aproximadamente de la siguiente manera: 97% consumo energético, 1% mantenimiento y 2% precio de compra.

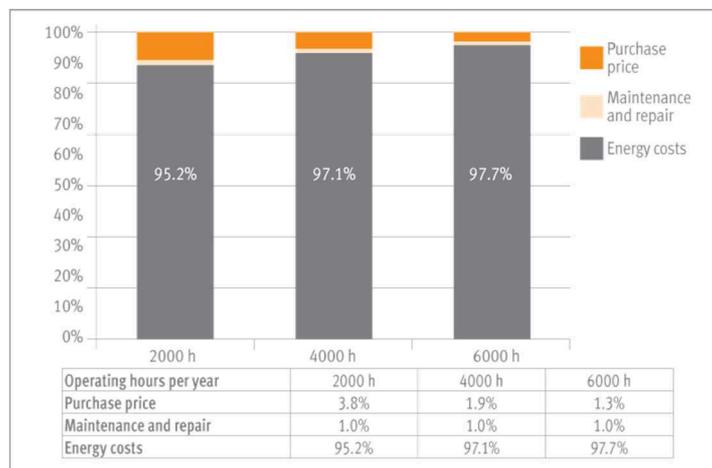


Figura 2.7 – Análisis del coste del ciclo de vida (15 años) de un motor de 11kW IE2. Fuente: European Committee of Manufacturers of Electrical Machines and Power Electronics (2010). Electric Motors and Variable Speed Drives Standards and legal requirements for the energy efficiency of low-voltage three-phase motors

<sup>26</sup> Siemens. Our energy-saving motors making a profit for you. Disponible en: [http://www.siemens.com.tr/i/assets/content/brosur/eff1brosur\\_1278149.pdf](http://www.siemens.com.tr/i/assets/content/brosur/eff1brosur_1278149.pdf) (web - Accedido 20/07/13)

<sup>27</sup> Almeida, A. et al 2008

<sup>28</sup> Ministerio Federal de Economía y Tecnología de Alemania. <http://www.efficiency-from-germany.info> (web - Accedido 20/07/13)

Realmente es importante la selección de un motor adecuado, ya que como hemos podido observar en la Figura 2.7, aproximadamente el 97% del coste en la vida de un motor se debe al consumo energético del mismo. El empleo de motores con alta eficiencia permite ahorrar grandes cantidades de energía a lo largo de su vida útil, siendo muy probablemente que exista una compensación entre los costes de compra y la reducción de pérdidas energéticas.

Para el caso de los trolebuses suponemos que el número de horas en funcionamiento anuales es:  $16 \text{ horas/días} \times 365 \text{ días/años} = 5840 \text{ horas/año} \approx 6000 \text{ horas/año}$ .

Suponemos un horario del funcionamiento de 7:00 a 23:00 (16 horas) para todos los vehículos.

**B. Potencia del Motor.**

Los requisitos de potencia del motor necesario así como del sistema de trolebús pueden determinarse analizando el diagrama de cuerpo libre tal y como recoge Avilés F. et al 2005 o Khanipour et al 2008 y también Ehsani, M. G et al 2010. Esto se verá con mayor detalle en el cálculo del consumo (Figura 5.4)

Diez A.E. y Khanipour et al 2008 recogen la potencia necesaria del motor en función de la pendiente de inclinación (Figura 2.8 y Figura 2.9).

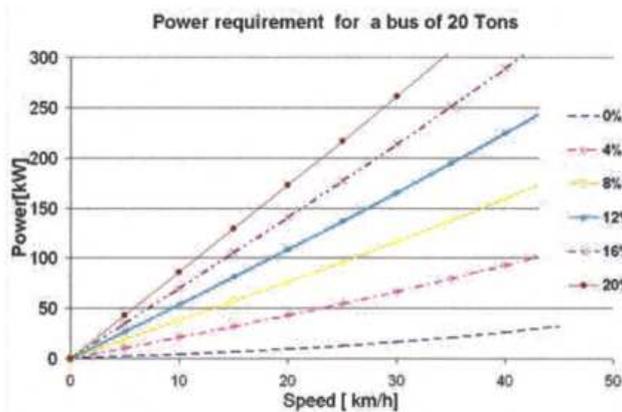


Figura 2.8 – Potencia requerida del motor para un bus de 20 toneladas.

Fuente: Restrepo, A.E.D et al (2008)

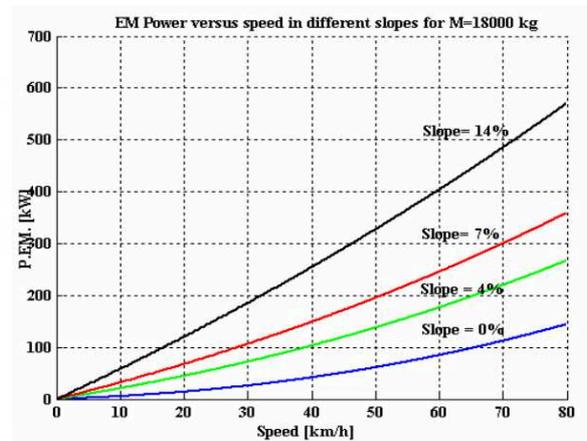


Figura 2.9 – Potencia requerida del motor para un bus de 18 toneladas.

Fuente: Khanipour, A. et al (2008)

**Resulta de gran interés**, como puede observarse, **conocer la pendiente máxima de la línea** a recorrer por los vehículos. Podemos llegar fácilmente a la conclusión que una ciudad con poco desnivel de terreno tendrá unos menores consumos energéticos que una ciudad con grandes desniveles, pero lo que realmente es importante, el sistema tendrá unos requisitos de potencia nominal inferiores. Esto último permitirá que haya menores pérdidas en la transformación, distribución, etc.

**C. Tipos de motores**

Actualmente, los mejores motores para los vehículos eléctricos son: asíncronos, síncrono de imanes permanentes (excitados en alterna) y de reluctancia conmutada.

Khwaja M. et al 2000 determinan que los motores de reluctancia conmutada son los mejores para la tracción de vehículos eléctricos e híbridos, pero distintos autores<sup>29</sup> los relegan a una tercera opción debido a sus desventajas en control, densidad de potencia y eficiencia.

Respecto a los términos de eficiencia como a la densidad de potencia (kg/kW), el motor de imanes permanentes ocupa el primer puesto, podemos verlos en las siguientes tablas.

**Tabla 2.1 – Evaluaciones de las características técnicas de los sistemas de tracción.**  
Izquierda - Fuente: Maggetto, G y Van Mierlo, J. 2000.  
Derecha - Fuente: Zeraoulia, M et al 2006.

	ASM	PM	SRM	DCM	SYM
Motor size mass	0	+	0	-	0
High speed	+	+	+	-	-
Endurance maintenance	+	0	+	-	-
Efficiency	0	+	0	-	0
Controller size mass	0	0	0	+	0
Controllability	+	+	-	+	0
Number power devices	0	0	+	+	0
Reliability	0	0	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>+++</b>	<b>++++</b>	<b>++</b>	<b>--</b>	<b>--</b>

Propulsion Systems				
	DC	IM	PM	SRM
Power Density	2.5	3.5	5	3.5
Efficiency	2.5	3.5	5	3.5
Controllability	5	5	4	3
Reliability	3	5	4	5
Technological maturity	5	5	4	4
Cost	4	5	3	4
<b>Σ Total</b>	 <b>22</b>	 <b>27</b>	 <b>25</b>	 <b>23</b>

**ASM ó IM:** Motor de asíncrono  
**PM:** Motor de Imanes permanentes.  
**SRM:** Motor de Reluctancia Conmutada  
**DCM ó DC :** Motor de corriente continua  
**SYM:** Motor Síncrono

Si comparamos los motores de imán permanente con los asíncronos, para la misma potencia, la eficiencia aumenta entre 1-2% en el 80% del rango de operación<sup>30</sup>, debido al alto factor de potencia que desarrollan los primeros y son un 25% más pequeños o ligeros. Por otro lado, los motores de corriente continua, así como los de reluctancia conmutada (SRM) tienen una ventaja sobre los

<sup>29</sup> Zeraoulia, M et al 2006.

Maggetto, G y Van Mierlo, J. 2000.

<sup>30</sup> Hillmansen, S., Schmid, F., Schmid, T. (2011) "The Rise of the Permanent Magnet Traction Motor", Railway Gazette International, pp30- , 34, February 2011.

asíncronos, la curva característica mecánica es hiperbólica, es decir, para variaciones de la velocidad entre el 30-100%, la eficiencia permanece constante. (ibis)

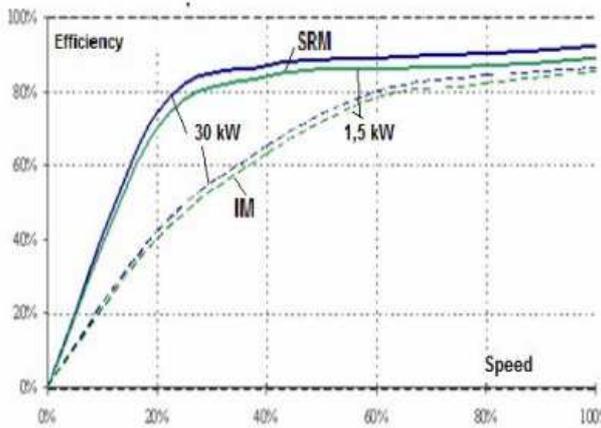


Figura 2.10 –Curvas de eficiencia de los motores de inducción o asíncronos (IM) y reluctancia (SRM).  
Fuente: Ibis

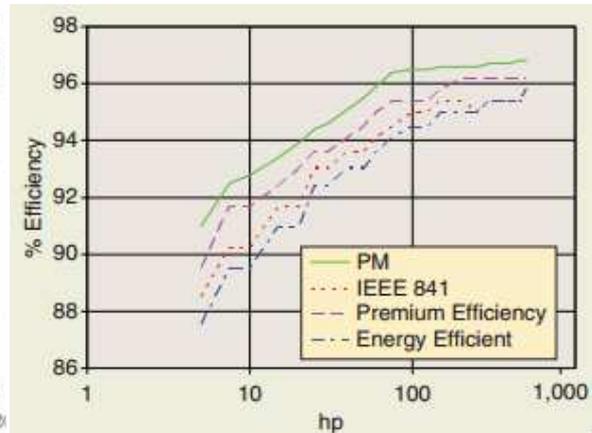


Figura 2.11 – Eficiencia de motores de imán permanente y asíncrono en función de la potencia.  
Fuente: Melfi, M.J. et al (2009).

Tal y como mencionamos en el apartado del estado del arte, según la Directiva EuP basada en la norma IEC 60034-30, los motores deben fabricarse con unos mínimos porcentajes de eficiencia. Dicha norma los ha dividido en tres clases denominadas IE1, IE2 e IE3<sup>31</sup> y según el número de polos y frecuencia, la eficiencia debe ser siempre mayor a la indicada en las tablas.

La Tabla 2.2 muestra la eficiencia para los motores asíncronos trifásicos de 50 Hz, cuyos rangos son los utilizados para los modernos trolebuses.

Tabla 2.2 - Clases de eficiencia para 50hz de acuerdo a IEC 60034-30:2008  
Fuente: Ibis.

P <sub>N</sub> in kW	IE1, 50 Hz			IE2, 50 Hz			IE3, 50 Hz		
	Number of Poles								
	2	4	6	2	4	6	2	4	6
75	92.7	92.7	92.6	93.8	94.0	93.7	94.7	95.0	94.6
90	93.0	93.0	92.9	94.1	94.2	94.0	95.0	95.2	94.9
110	93.3	93.3	93.3	94.3	94.5	94.3	95.2	95.4	95.1
132	93.5	93.5	93.5	94.6	94.7	94.6	95.4	95.6	95.4
160	93.8	93.8	93.8	94.8	94.9	94.8	95.6	95.8	95.6
200 – 375	94.0	94.0	94.0	95.0	95.1	95.0	95.8	96.0	95.8

La Figura 2.11 muestra la eficiencia de los motores en función de la potencia (1 HP ≈ 746 W). Se incluye también la eficiencia de los motores de imanes permanentes (PM), que como podemos deducir, es muy superior en cualquiera de las potencias.

Por otro lado, debemos de comparar el par motor que desarrollan los motores. La Figura 2.12 compara la eficiencia de dos motores de la misma potencia, inducción e imán permanente, en función de la velocidad del motor, en distintos pares de potencia.

<sup>31</sup> IE1-standar efficiency; IE2-high efficiency; IE3-premium efficiency.

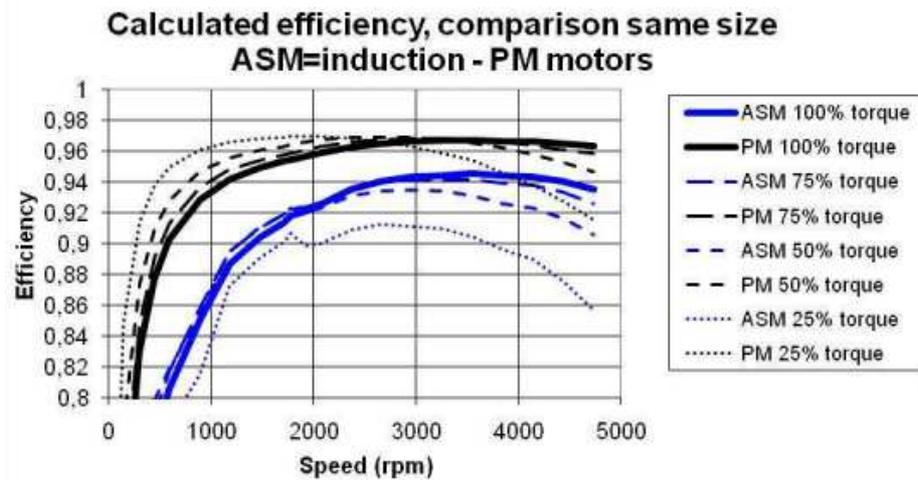


Figura 2.12 – Eficiencia de motores de imán permanente y asíncronos en función de la velocidad.  
Fuente: Sandberg, A. (2012)

En definitiva, como hemos podido estudiar, los motores de imanes permanentes deberían ser la primera opción para la instalación en los trolebuses, debido a las siguientes ventajas:

- Elevada eficiencia en todas las potencias, velocidades y par motor.
- Alta densidad de potencia permite una reducción del peso del conjunto completo, con lo que permite reducir el consumo del trolebús.

**D. Reflexión de un caso real.**

Ilie Nuca et al 2012, analizan los motores instalados en los trolebuses de Rumania y CIS<sup>32</sup>, obteniendo la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 - Características técnicas de motores usados en Rumanía y CIS.

Fuente: Ilie, Nuca et al 2012

Indices		Motor type				
		DC motors		Asynchronous Motors		
Name	u.m.	EK-213	MCT-39	TAD-3	MABT6	20ML 3550K/4
Manufacturer	-	TatElectromash, Kazan	Electro-putere	Electromash, Pscov	Electro-putere	Škoda
Country	-	Russia	Romania	Russia	Romania	Czech
Nominal power	kW	115	120	120	155	155
Nominal line voltage	VDC/ VAC	550	750	450	500	420
Number of poles	-	4	4	4	4	4
Number of phases	-	-	-	3	3	3
Frequency	Hz	-	-	50	50	50
Nominal current	A	232	176	184	228	279
Power factor	-	-	-	0,9	0,85	0,8
Efficiency	%	90	91	93	91,5	95
Nominal speed	rpm	1430	1370	1470	-	-
Mass	kg	700	975	450	700	595
Relative mass	kg/kW	6,06	8,125	3,75	4,516	3,84

Como podemos observar, en los motores asíncronos (los de mayor eficiencia), el motor Scoda-20ML se haya en la clase IE2 pero el resto de motores están por debajo del nivel exigido para ser un IE1. Esta marcada diferencia de porcentaje sugiere que sería necesario realizar un análisis o estudio para determinar si un cambio de dicho motor produciría una compensación energética a lo largo de su vida útil en aquellos vehículos donde estén montados.



Figura 2.13 – Motor de imán permanente MITRAC.  
Fuente: [www.bombardier.com](http://www.bombardier.com) (accedido – 5-07-2013)



Figura 2.14 – Motor TAD-3.  
Fuente: Ilie, Nuca et al 2012

<sup>32</sup> Commonwealth of Independent States, Comunidad de Estados Independientes. Es una organización regional formada por países de la república soviética, entre ellos se encuentra Rusia.

### 2.2.2. Freno regenerativo

Los modernos trolebuses, al igual que otros vehículos, utilizan el motor como generador. Esto permite transformar parte de su energía cinética y potencial en energía eléctrica cuando el vehículo este decelerando (frenando), enviando la energía a:

- Un Sistema de almacenamiento del propio trolebús (batería o banco de condensadores electrolíticos).
- La catenaria, para que otro vehículo pueda disponer de ella.
- La subestación, donde un sistema de baterías la almacenará.
- La red eléctrica.

Para determinar la cantidad de energía cinética que podemos recuperar, debemos tener en cuenta el máximo y multiplicarle por un factor K. El factor K depende de cada vehículo y concretamente se corresponde con las pérdidas internas, rozamiento, resistencia aerodinámica, consumo de los servicios auxiliares... (Barrero, R. et al 2008)

$$E_{\text{cinética recuperable}} \approx k \cdot E_{\text{cinética}}$$

El máximo corresponde con la energía cinética que posee el vehículo, que se expresa mediante la fórmula:  $E_{\text{cinética}} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2$  Donde: E cinética: expresado en Julios [J]

\*Nota: 1 kWh = 3,6×10<sup>6</sup> J.

m: masa del vehículo con pasajeros en [kg]

v: Velocidad del vehículo en [m/s]

k: varía entre 0.5 y 0.6<sup>33</sup>.

Si toda la energía cinética de un trolebús se almacena en un sistema de supercondensadores, propio del vehículo, se obtienen ahorros de consumo energético alrededor del 25%. **La tecnología de almacenamiento a través de supercondensadores es actualmente es la más idónea, ya que, permite almacenar una cantidad de energía elevada generada en un tiempo corto (tiempo de frenado) y presenta una vida útil elevada.**

Según Barrero et al 2008, quienes realizaron un estudio para tranvías, la energía procedente del freno regenerativo o el ahorro energético varía en función del:

- **Peso del vehículo y capacidad del sistema de almacenamiento**

Con la misma capacidad de almacenamiento, si aumenta el número de pasajeros, el ahorro energético aumenta. Si el sistema de almacenamiento aumenta de capacidad, se consiguen mayores porcentajes de ahorro (ver Figura 2.15)

<sup>33</sup> Falvo, M.C. et al 2012 confirma, para el trolebús de la ciudad italiana Cosenza, que la energía recuperable es del 54.9%, es decir, K=0.549.

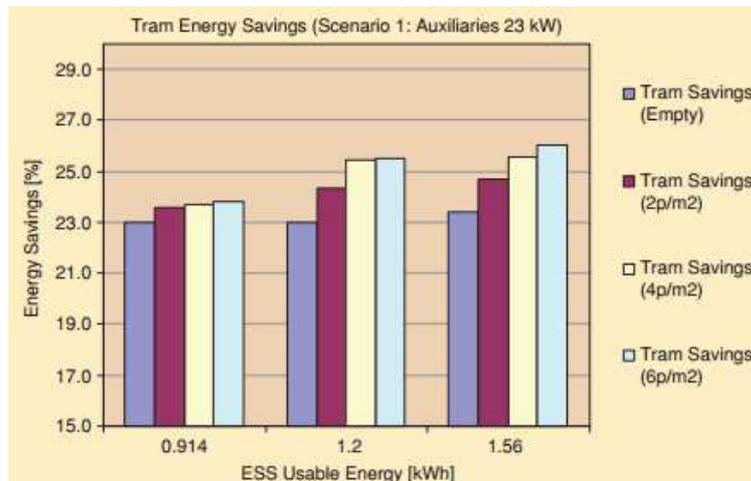


Figura 2.15 – Ahorro de energía VS tamaño del sistema de almacenamiento. Influencia del peso del vehículo  
Fuente: Barrero, R. et al 2008

- **Configuración del sistema de almacenamiento**

Con la misma capacidad de almacenamiento, si la corriente es menor (opción A) se producen menores pérdidas y aumenta la eficiencia del sistema. Si observamos la Figura 2.16, las curvas inferiores incluyen los servicios auxiliares y las dos superiores indican el sistema de tracción.

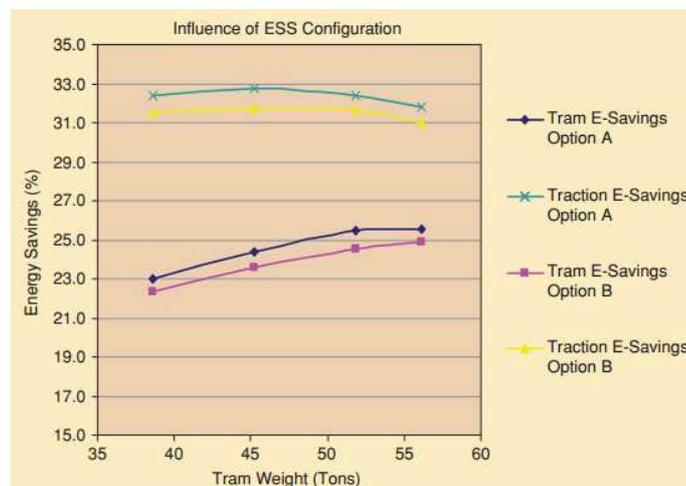


Figura 2.16 – Ahorro de energía VS peso vehículo, configuración sistema almacenamiento y servicios auxiliares  
Fuente: ibis.

- **Ciclo de conducción**

Se demuestra que el vehículo al aumentar la aceleración entre paradas permite conseguir mayores ahorros energéticos. Esto es debido a la obtención de un aumento de la velocidad, y por tanto, con una mayor energía cinética. En la Figura 2.17, se distinguen los ciclos bajos de los altos por una menor aceleración ( $0.7\text{m/s}^2$  y entre  $0.84$  and  $1.17\text{m/s}^2$ , respectivamente y en función del peso del vehículo). La opción C indica un mayor tamaño del sistema de almacenamiento energético (1.56kWh) que la opción D (0.91 kWh).

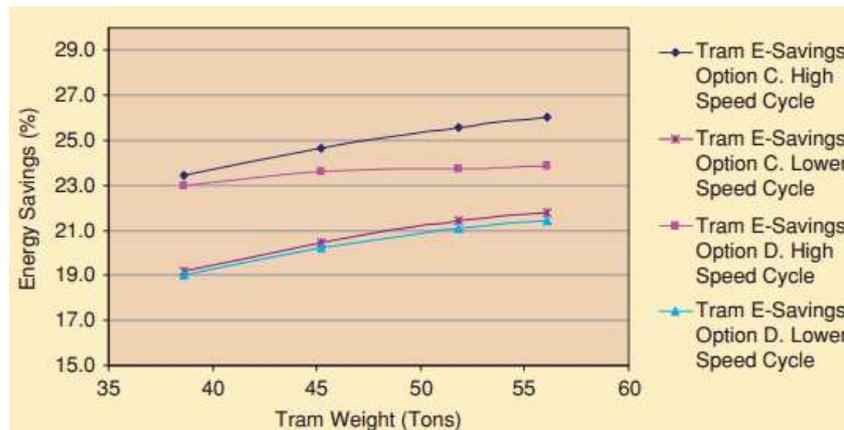


Figura 2.17 – Ahorro de energía en función del ciclo de conducción y del peso vehículo  
Fuente: ibis.

### 2.2.3. Sistemas de almacenamiento energético en el trolebús.

Existen diversos sistemas de almacenamiento energético que permiten funcionar a los trolebuses en aquellos tramos largos de línea que no se dispone de catenaria o que no existe en todo el recorrido.

Entre los sistemas más eficientes se encuentran: el volante de inercia que actualmente posee una potencia entre 50 y 100 kW para estos vehículos, supercondensadores y las baterías eléctricas cuyo avance tecnológico está permitiendo desarrollar el coche eléctrico y el trolebús PHEV.

TECNOLOGIA	TIPO	EFICIENCIA ENERGETICA (%)	DENSIDAD ENERGETICA (Wh/kg)	DENSIDAD DE POTENCIA (W/kg)	CICLOS DE VIDA (ciclos)	AUTO-DESCARGA
BATERIAS	Pb-Acido	70–80	20–35	25	200–2000	Baja
	Ni-Cd	60–90	40–60	140–180	500–2000	Baja
	Ni-MH	50–80	60–80	220	< 3000	Alta
	Li-Ion	70–85	100–200	360	500–2000	Media
	Li-Polimero	70	200	250–1000	> 1200	Media
	NaS	70	120	120	2.000	–
	VRB	80	25	80–150	> 16.000	Despreciable
SUPERCONDENSADORES	EDLC (DOBLE CAPA ELECTROLITICO)	95	< 50	4.000	> 50.000	Muy alta
VOLANTE DE INERCIA	Volante Inercia (acero)	95	5–30	1.000	> 20.000	Muy alta
	Volante Inercia (composite)	95	> 50	5.000	> 20.000	Muy alta

Figura 2.18 – Sistemas de almacenamiento energético.  
Fuente: Vázquez, S. et al 2010.

### A. Baterías.

Las baterías desde el punto de vista del coste energético deben tener las siguientes cualidades:

- **Alta densidad de potencia (kWh/kg).** Es la energía que será almacenada y por tanto deben ser lo más ligeras y voluminosas posibles.
- **Suficiente potencia específica.** Con ella se alimenta el arranque del trolebús (alrededor de 300kW)<sup>34</sup>.
- **Alto número de ciclos o vida útil.** Este factor desde el punto de vista económico es muy importante, ya que un mal diseño del sistema hará que se tengan que sustituir anticipadamente las baterías.

En la Figura 2.19 podemos observar el diagrama de Ragone que muestra los dos factores mencionados. Los supercondensadores tienen alta potencia específica y muy baja energía específica por lo que son adecuados para cargas y descargas rápidas de energía, es decir, en los arranques y frenadas del vehículo.

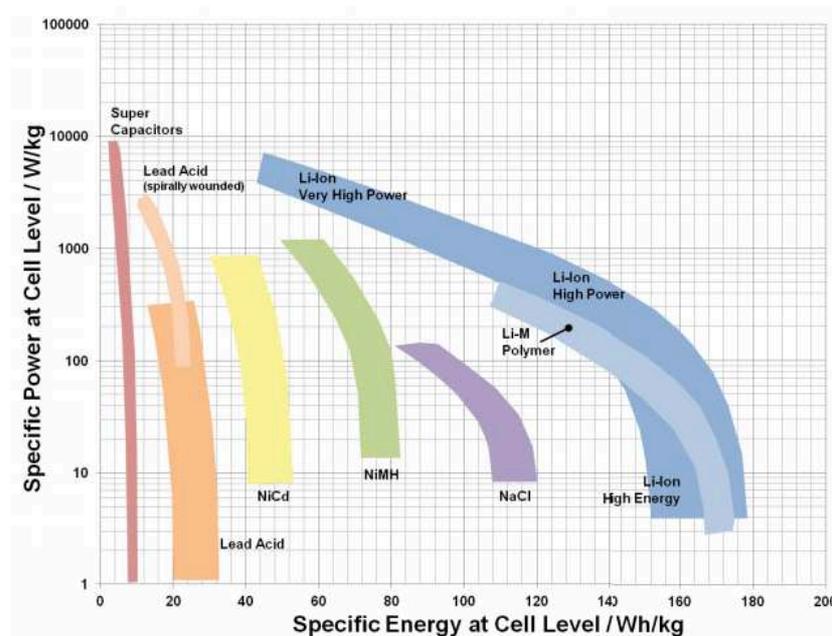


Figura 2.19 – Diagrama de Ragone para distintas tecnologías de almacenamiento.  
Fuente: Kuhn H., Sizmann A. (2012)

Por ejemplo, si queremos calcular que baterías necesitamos para un trolebús que posea una autonomía de 100 Km y cuyo consumo es de 2.5kWh/Km, entonces será necesario:  
 $100\text{km} \times 2.5\text{kWh/km} = 250 \text{ kWh}$  de energía. Si aplicamos una profundidad de descarga del 60% y usamos baterías de Litio (155Wh/kg),  $250 \text{ kWh} / (0.6 \times 155 \text{ Wh/kg}) = 2688 \text{ kg}$ .

<sup>34</sup> Buzzoni, L; Pede, G. (2012).

Se debe tener en cuenta el peso y volumen de las baterías ante trolebuses de tipo PHEV, un peso elevado producirá un consumo energético elevado. Podemos observar en la Figura 2.20 el peso de las baterías de Ni-MH en función de la autonomía y la profundidad de descarga.

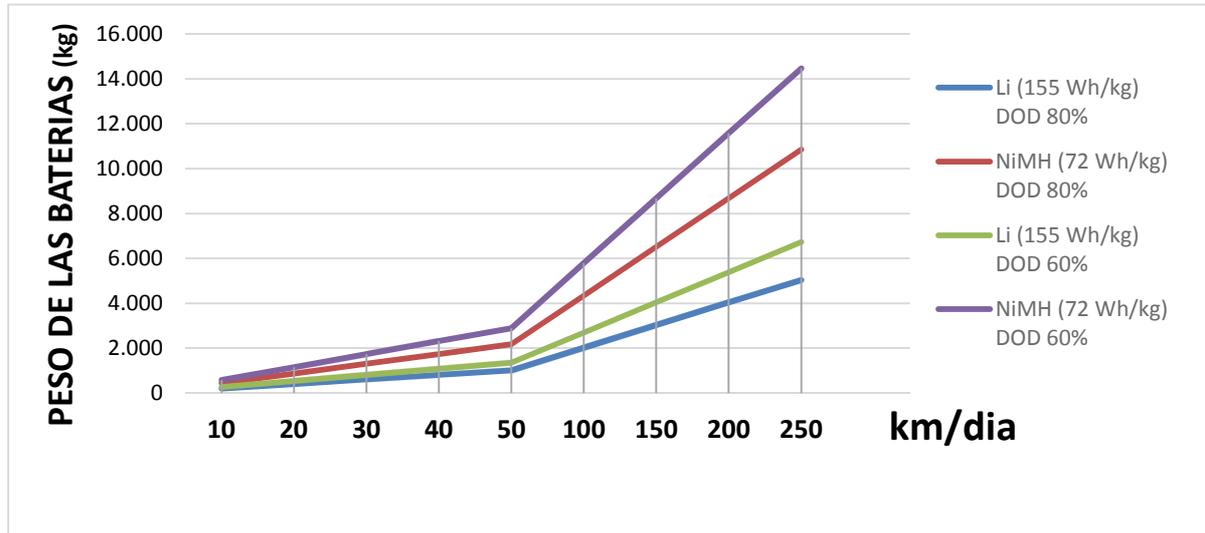


Figura 2.20 – Pesos de las baterías en función de la profundidad de descarga y del tipo de tecnología. Fuente: propia.

Una combinación perfecta estaría formada por un conjunto de supercondensadores y baterías de Litio junto con un sistema de gestión de energía que permita alimentar al trolebús con supercondensadores en el arranque, y posteriormente, con las baterías.

El tercer factor importante a tener en cuenta son los ciclos de carga/descarga. Están determinados por la profundidad de descarga que sometemos a las baterías, es decir, de la cantidad de energía que extraemos en cada descarga. Para las baterías de NiMH, si cada día extraemos el 100% de la energía el número de ciclos será de 4000, aproximadamente 11 años, como se puede ver en la Figura 2.21.

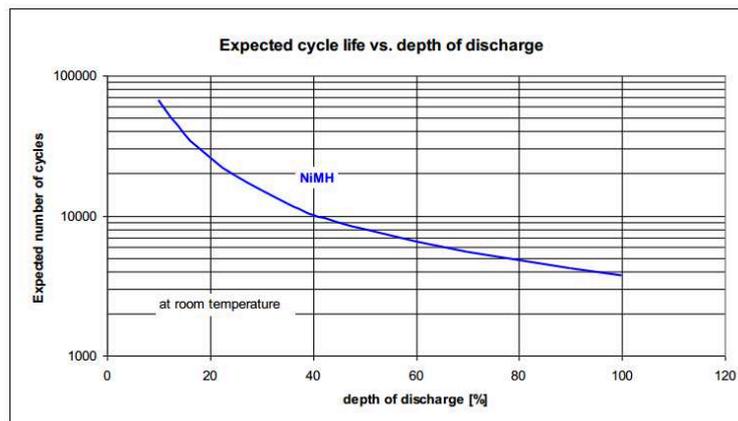


Figura 2.21 – Vida de las baterías NiMH en función de la profundidad de descarga. Fuente: Gunter Schädlich. 2012

### B. Supercondensadores

Como ya vimos en el apartado anterior 2.2.2, los factores que influyen en los sistemas con almacenamiento con supercondensadores son los siguientes:

- **Peso del vehículo.** Con la misma capacidad de almacenamiento, si aumenta el número de pasajeros, el ahorro energético aumenta.
- **Capacidad del sistema de almacenamiento.** Si el sistema de almacenamiento aumenta de capacidad, se consiguen mayores porcentajes de ahorro
- **Configuración del sistema de almacenamiento.** Con la misma capacidad de almacenamiento, si la corriente de carga es menor, se producen menores pérdidas y aumenta la eficiencia del sistema.

### C. Volantes de Inercia.

La moderna tecnología de los volantes de inercia, tanto en su fabricación con materiales compuestos como en su control, permite introducirla en los vehículos eléctricos debido a su alta densidad de potencia y vida útil.

Este sistema es independiente del estado de carga, por lo que es una característica a tener en cuenta sobre los sistemas de baterías. Además la potencia pico de salida de estos sistemas está limitada por la potencia del convertidor. (Hebner, R et al 2002)

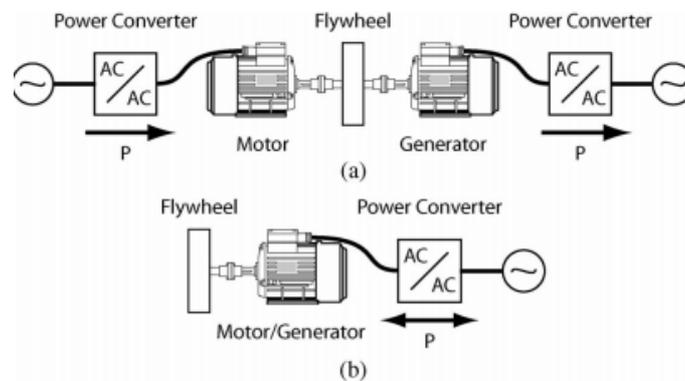


Figura 2.22 – a) Esquema general con dos máquinas, b) Sistema típico con una sola máquina  
Fuente: Vázquez, S. et al (2010).

### D. Motor de combustión interna

Si equipamos al trolebús con un motor de combustión interna (motor o generador) y un depósito de combustible obtendremos un sistema de almacenamiento energético.

En general y según Alberto Cillero et al 2008, los motores de combustión interna, independientemente del tipo de combustible que utilicen, tienen un rendimiento energético muy bajo, alrededor del 20%. No obstante destaca la elevada densidad energética del combustible diésel 12.6 kWh/kg.

Además de la eficiencia del motor y si consideramos que solo empleamos este sistema de almacenamiento como sistema de seguridad o para aquellos tramos donde se prescinde de catenaria, deberíamos de considerar el incremento de consumo del vehículo por el sobrepeso de todo el equipamiento durante el recorrido que no estará en funcionamiento. Un APU rectificador de 55kW, montado en un AG 300 T del fabricante Vossloh, posee un peso de 540kg<sup>35</sup>.

Una de las desventajas energéticas es la disminución del rendimiento por la altitud. En la Figura 2.23 podemos observar como el factor de corrección (sobre la eficiencia nominal) de los motores eléctricos permanece prácticamente constante y por contra el motor de combustión decae aproximadamente un 7% por cada 500 metros de altitud sobre el mar.

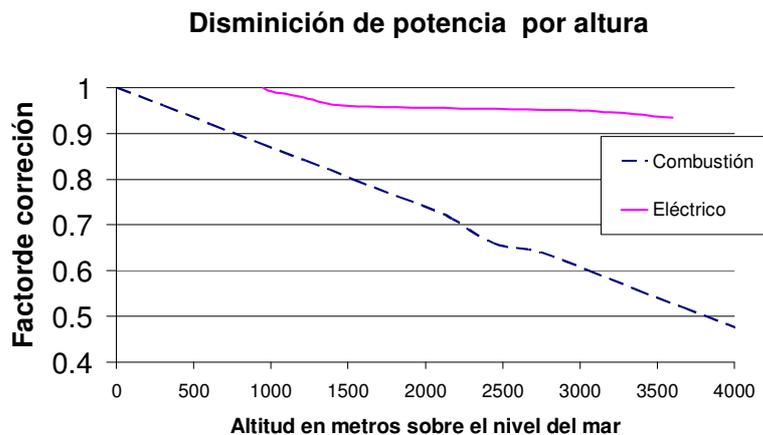


Figura 2.23 – Rendimiento del motor de combustión VS altitud sobre nivel del mar.

Fuente: Emiro A. La electrificación de los buses de tránsito rápido - BRT y la gran oportunidad para los distribuidores de energía. VI jornada de distribución de energía eléctrica.

#### 2.2.4. Sistemas de intercambio energético en la subestación.

En las subestaciones podemos optar a dos estrategias de intercambio de la energía generada por los vehículos: devolver la energía directamente a la red eléctrica o instalar un sistema de almacenamiento (en la subestación).

- Directamente a la red.

A través de inversores permite el traspaso de la energía.

- Sistema de Almacenamiento

La principal ventaja es la estabilización de tensión de la línea (puede ayudar a líneas débiles) y solo se recomienda este tipo de sistema cuando no es posible el almacenamiento en el propio vehículo o

<sup>35</sup> Fuente – web : <http://www.vossloh-kiepe.com/electric-buses/trolleybuses/references> (accedido 05/10/13)

intercambiarla con otros. Meinert, M. et al 2008 indican que es posible sustituir este sistema por una subestación completa.

Este tipo de sistemas permiten conseguir ahorros del 30% de energía.

### 2.2.5. Convertidor/Inversor

El uso de los convertidores llega a ser necesario por los cambios frecuentes de velocidad, aceleración, etc., logrando un ahorro de energía y un menor estrés mecánico en los sistemas de transmisión. (Ilie Nuca et al 2012).

Existen dos tipos de conversores en función de la alimentación del motor, si el motor es de corriente continua son chopper y si es alimentado en alterna entonces son inversores.

Como se puede ver en la Tabla 2.4 existen grandes diferencias entre los dos tipos de conversores y además entre los distintos fabricantes. Entre el caso del Inbus-13 cuyo peso es de 84 kg y el CAC1200NF de 410 kg, permitirá ligeramente ahorrar energía como veremos en el apartado 2.2.6.

Tabla 2.4 - Características técnicas de algunos convertidores usados para trolebús.  
Fuente: Ilie N. et al 2012

Indices		Converter types								
		DC/DC (chopper)				DC/AC (inverter)				
Name	u.m	<i>VTCL 220 FR</i>	<i>CAC 1200NF</i>	<i>PTKD-203M-170</i>	<i>SDMC-103</i>	<i>IVP 250FR</i>	<i>CAC 1200NF</i>	<i>IRBI PTA-180</i>	<i>DPU-402</i>	<i>InBus-103</i>
Manufacturer	-	SAERP SA	CEGELEC	Chergos	Inform-business	SAERP SA	CEGELEC	IRBIS	Vossloh Kiepe	Inform-business
Country	-	Romania	Czech	Russia	R. Moldova	Romania	Czech	Russia	Germania	R. Moldova
Line voltage	VDC	600/750	600/750	600/750	600/750	600/750	600/750	550	600/750	600/750
Line voltage variation	%V	-30..+25%	400-900V	-30..+25%	400-900V	-30..+25%	400-900V	300-800V	+20..-30%	400-900V
Output power	kW/kVA	120..200	200	0-330	200	120..200	240	220	220	250
Maximum current	A	440	330	400	500	450	600	400	-	600
Dimension	mm		1010x880x403	1000x760x240	730x330x320	1200x800x300	1703x1503x440	1052x930x346	1100x420x455	750x325x560
Mass	kg	145	220	250	45,2	180	410	130	170	84

La eficiencia de los convertidores basados en transistores IGBT es mayor del 90%<sup>36</sup>. Tienen un consumo energético de un 40%, incluyendo el uso de la energía regenerativa, inferior a los primeros convertidores de resistencias utilizados para la tracción del trolebús. (Zavada, J. et al 2010)

<sup>36</sup> Fuente web: [http://www.medcom.com.pl/dl/17\\_11\\_2011/A\\_trams\\_troleibusses.pdf](http://www.medcom.com.pl/dl/17_11_2011/A_trams_troleibusses.pdf) (accedido 05/10/13)

### 2.2.6. *Peso y carrocería*

Es obvio pensar que cuanto menor peso del vehículo o de los pasajeros transportados se produce un menor consumo energético. En el apartado 2.2.1 vimos que el peso influye negativamente según el coeficiente de rozamiento y en el 2.2.2 influía en el ahorro energético. Ricard Riol Jurado (2012) ha calculado que por cada kilogramo de peso menos transportado, se produce un ahorro energético de 0.158 W cada kilómetro recorrido.

En cuanto a la carrocería al igual que cualquier vehículo se debe en tener en cuenta la resistencia aerodinámica, que vimos en el diagrama de fuerzas del apartado 2.2.1. Esta depende de la sección frontal del vehículo, de la forma del vehículo, de la densidad del aire y de la velocidad.

Donde: 
$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$$

$\rho$ : densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

S: sección frontal (m<sup>2</sup>)

C<sub>x</sub>: coeficiente de forma (adimensional)

V: velocidad (m/s)

### 2.2.1. *Resistencia a la rodadura*

Se debe al contacto entre las ruedas y la superficie causada principalmente por la histéresis del material de las ruedas en terrenos duros y a la deformación del terreno cuando estos son blandos.

Donde: 
$$F_{RO} = m \cdot g \cdot f_r \cdot \cos \alpha$$

m: masa del vehículo (kg)

g: gravedad (9.8 m/s<sup>2</sup>)

f<sub>r</sub>: coeficiente de rodadura (adimensional)

$\alpha$ : ángulo de inclinación

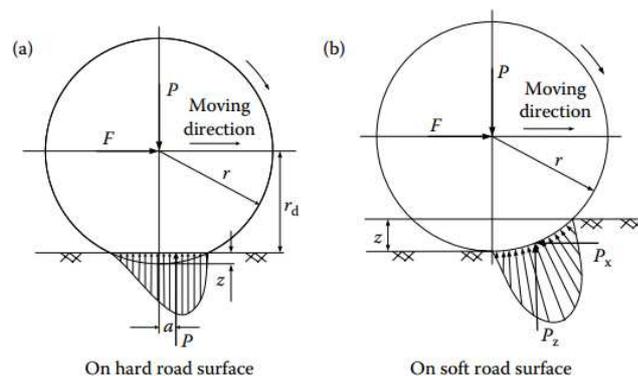


Figura 2.24 – Deflexión de los neumáticos. A) Terreno duro y B) Terreno blando.

Fuente: Ehsani, M. G et al 2010.

Helmut Eichseder corrige el coeficiente de rodadura con la temperatura ambiente (debido a la presión de los neumáticos) y Eddy Versonnen la corrige en función de la velocidad y el cambio de dirección. Khanipour et al 2008 distinguen dos tipos de coeficientes de rodadura

### 2.2.2. *Cargas auxiliares: iluminación y climatización.*

Las cargas auxiliares se deben tener en cuenta a la hora del diseño de una línea de trolebús. Entre estas cargas, las de mayor importancia son la climatización e iluminación.

Respecto a la iluminación, el uso de la tecnología led respecto al tubo fluorescente permite tener ahorros de consumo energético del 60%. Ejemplo: si un trolebús de 18 metros está equipado aproximadamente con 24 tubos fluorescentes (dos tubos cada 1500 mm y 58W), el consumo total es de 1.392W, si equipamos con tecnología led (tubos de 20W) el consumo total pasaría a 480W.

La climatización puede tener un consumo muy elevado por lo que es necesario realizar un estudio de las necesidades energéticas en cada caso.

### 2.2.3. *Guiado óptico y GPS.*

Disponer de un sistema de guiado óptico o un sistema GPS mejora la eficiencia de los trolebuses, ya que, se consigue eliminar en gran parte el factor humano. Entre los factores que afectan a la eficiencia tenemos:

**Climatológicos (Lluvia, nieve,...).** No afecta directamente al consumo pero debido a las medidas de seguridad tomadas por el conductor hacen que la conducción sea más lenta que en condiciones de pavimento seco. Trabajar a menores velocidades incrementa el consumo energético. (Cillero, A. et al 2008).

**Obstáculos.** Un sistema de visión artificial que controle, mediante mediciones, el sistema de tracción y que actúe en los casos en que se encuentre un obstáculo (peatón, vehículo,...) permitiría reducir el consumo energético del vehículo, de la misma forma que los factores climatológicos.

**Factores psicológicos.** El estado anímico de las personas influye directamente en la conducción. Un sistema de guiado permitiría reducir este tipo de factores.

**GPS.** Un sistema de posicionamiento global permitiría sincronizar y planificar la ruta de los vehículos, así como los tiempos de paradas. El éxito reside en evitar los picos de consumos instantáneos de los vehículos en los arranques, ya que es el momento donde mayor energía se requiere al sistema. El encargado de la gestión de la tracción estaría ubicado en un centro de control de mando.

## 2.3 Otras influencias

### 2.3.1. Influencia o efecto de dos trolebuses simultáneos.

Un estudio realizado por Emiro, A. et al en 2010, muestra el impacto sobre el consumo energético de la línea de dos trolebuses circulando simultáneamente. Se analizan tres ciudades (Quito, Genf y Salzburgo) y a diferentes distancias de separación entre los vehículos.

Como se puede observar en la Figura 2.25, **se observa que es despreciable el efecto sobre el consumo** energético en la línea, teniendo simultáneamente dos trolebuses energizados por la misma línea sin importar la distancia entre ellos.

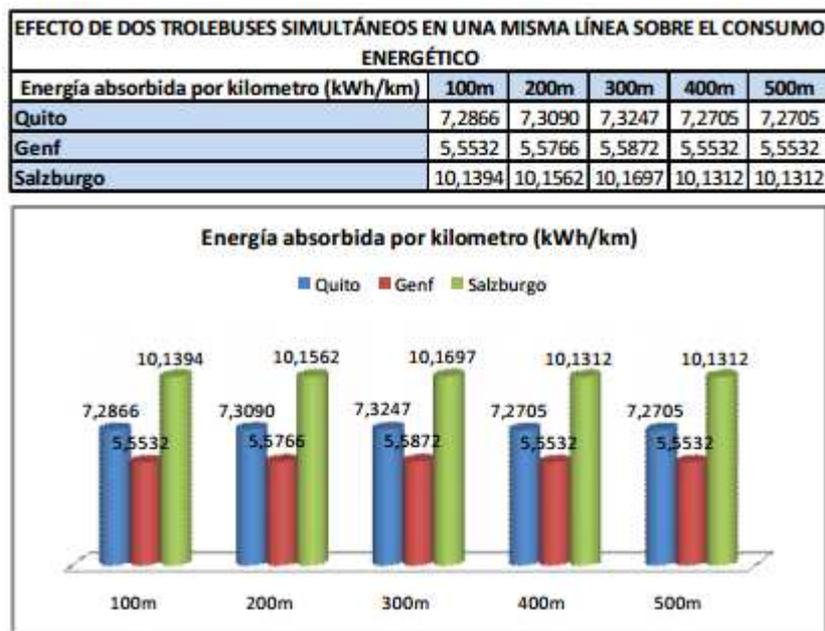


Figura 2.25 – Efecto de dos trolebuses simultáneos sobre la línea  
Fuente: Emiro, A. et al en 2010.

### 2.3.2. Influencia o efecto de la distancia entre paradas.

Sobre el mismo estudio que el comentado en el apartado anterior de Emiro, A. et al 2010, también se analizó el efecto que se producía al aumentar la distancia entre las paradas o estaciones del recorrido del trolebús.

Los resultados efectivamente muestran que al **aumentar la distancia entre paradas permite que el consumo energético disminuya**. Para la ciudad de Quito, aumentar la distancia de 300 metros a 500 metros, produce una disminución del consumo energético del 26.3%, si aumentamos a 600m se reduce otro 8.27%. Para Salzburgo, el primer salto permite reducir 20,8% y pasar a 600m se reduce un 5.3%.

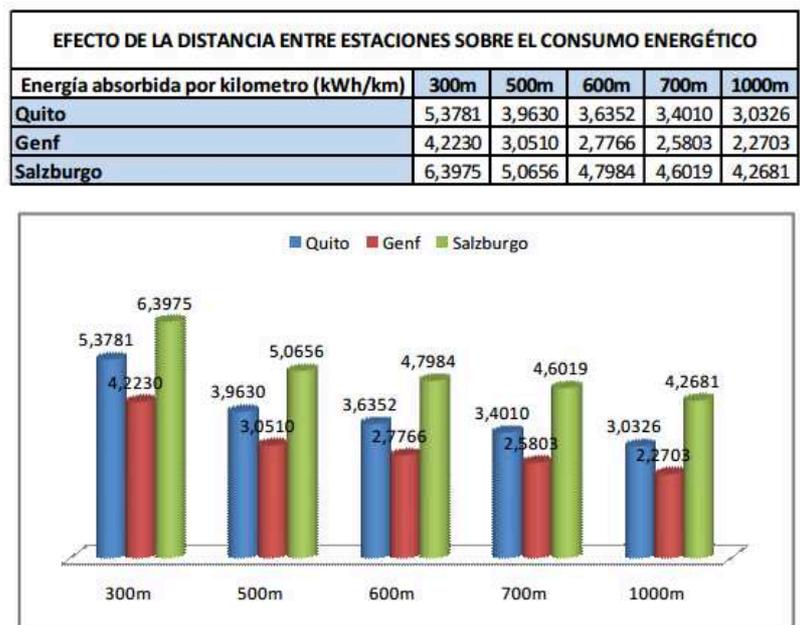


Figura 2.26 – Efecto de la distancia entre estaciones sobre el consumo energético  
 Fuente: por Emiro, A. et al en 2010.

### 2.3.3. Influencia del tipo de carril

El trolebús o autobús en función del carril (o plataforma) puede discurrir de diversas formas que afectarán principalmente a la capacidad del número de pasajeros<sup>37</sup>.

1. Si está dentro de la ciudad, puede discurrir de tres formas:
  - Carril bus mediano: son carriles de alta ocupación para los buses u otros vehículos prioritarios que a menudo están físicamente separados del resto del tráfico con alguna forma de priorización del tráfico.
  - Carril bus: es similar al anterior pero localizada en la parte exterior de la calzada, a veces compartida con otros vehículos de alta ocupación. Normalmente este carril se encuentra junto con los carriles de tráfico general. (Figura 2.28)
  - Carril de uso mixto: mezcla entre carril de tránsito y tráfico general.(Figura 2.29)



Figura 2.27 – Carril Bus Mediano. Median Busway (Richmond, British Columbia)  
Fuente: U.S Department of Transportation (web - accedido 17/06/13)  
[http://www.fta.dot.gov/12351\\_4374.html](http://www.fta.dot.gov/12351_4374.html)



Figura 2.28 – Carril bus. Calle Gómez de Avellaneda (Zaragoza)  
Fuente: Google Map (web - accedido 17/06/13)



Figura 2.29 – Carril Mixto. Paseo María Agustín (Zaragoza)  
Fuente: Google Map (web - accedido 17/06/13)

2. Fuera de la ciudad:
  - Carril segregado (o separado): es aquel que se encuentra separado del resto de vías, libres de intersecciones o cruces.(Figura 2.30)
  - Vía libre: es un carril dedicado, con o sin separación, pero puede estar compartido con otros vehículos. En horas punta puede tener restricciones, por ejemplo, de velocidad máxima (Figura 2.31)

<sup>37</sup> APTA (2010). APTA-BTS-BRT-RP-003-10. Designing Bus Rapid Transit Running Ways.



Figura 2.30 – Autobús Australiano con vía segregada. O-BAHN BUSWAY ADELAIDE  
Fuente: web  
<http://www.baulderstone.com.au/project-portfolio/project-details/o-bahn-busway-adelaide>  
(Accedido 17/06/13)



Figura 2.31- Vía libre. C-58 Barcelona  
Fuente: El Periódico. 29/10/12.  
<http://www.elperiodico.com/es/noticias/barcelona/grandes-colas-estreno-del-carril-bus-vao-2236407>  
(Accedido 17/06/13)

En función del carril por el que discurre, cuanto mayor independencia del tráfico mayores beneficios tendrá: aumento de la velocidad comercial, mayor capacidad de transporte, seguridad, comodidad, y por tanto, un menor consumo.

La siguiente Tabla 2.5 muestra una comparativa entre los distintos medios de transporte. Se incluye además la distinción entre los diferentes tipos de carriles para el bus (carril bus, vía segregada y guiado).

Tabla 2.5 - Características técnicas de los sistemas de transporte público masivo<sup>38</sup>.

Modo	Tren Ligero	Metro	Tren suburbano	Carril-bus	Bus en vía segregada	Bus Guiado <sup>(3)</sup>	PT/RT Personal <sup>(4)</sup>
<b>Característica</b>							
<b>Max. Capacidad del sistema (pas. por hora)</b>	21,000 (2 unidades)	12,000 - 40,000	10,000 - 30,000	4,500 - 7,500	4,500 - 25,000	4,500 - 7500 (9,600)	7,200
<b>Velocidad operativa (km/h)</b>	21 - 45 (60 <sup>(2)</sup> )	25 - 60	40 - 70	17 - 25	22 - 50	30 - 50 (no info)	20 - 25
<b>Anchura (2 carriles) (m)</b>	5-6.5	5-6.5	5.5 - 7	6 - 8	8 - 13	5.8 - 6.2 (7)	4 - 5
<b>Diseño: piso bajo</b>	No	No	No	Sí	Sí	Sí (Sí)	Sí
<b>Seguridad</b>	Alta	Alta	Alta	Media	Media	Alta (Media)	Alta
<b>Impactos ambientales<sup>(1)</sup></b>							
-calidad del aire	+	+	0	0	0	0 (+)	+
-cambio climático	0	0	0	0	0	0 (+)	0/+
-ruido	+	+	0	0	0	+	+

<sup>(1)</sup> Al compararlo con buses convencionales, '+' significa mucho mejor, '0' sin cambios significativos, '-' significativamente peor

<sup>(2)</sup> Trenes de modo dual en vías férreas suburbanas

<sup>(3)</sup> La información entre paréntesis se refiere al sistema GLT (*Guided Light Transit*)

<sup>(4)</sup> PT=transporte público, RT= Tránsito Rápido. Basado en datos teóricos pues aún no se han instalado sistemas de este tipo

38 Brand, Christian y PRESTON, John (2003). "The Supply of Public Transport: A Manual of Advice." University of Oxford

### 3. Comparativa de transportes de media capacidad.

Existen multitud de trabajos que realizan comparativas entre los distintos medios de transporte, en cambio el trolebús queda al margen en la mayor parte.

Desde un punto de vista general, debemos observar la eficiencia en la cadena energética de transporte (Figura 3.1). **La eficiencia del mix eléctrico proporcionado por REE en 2010 es del 67,66%.** Este dato relativamente bajo se debe principalmente al aporte de las fuentes de origen no renovable, perjudicando a cualquier sistema o equipo con alimentación eléctrica convencional, en términos de eficiencia global. A medida que ingresen nuevos sistemas de generación distribuida, el porcentaje se irá elevando y por tanto la eficiencia global de los sistemas.

También se puede observar que cualquier vehículo con motor de combustión resulta ineficaz en términos energéticos. Un vehículo eléctrico tiene una eficiencia alrededor del 90%<sup>39</sup> frente al motor de combustión que posee un rendimiento del 34%. Esta diferencia radica en las pérdidas por calor originadas en la combustión.

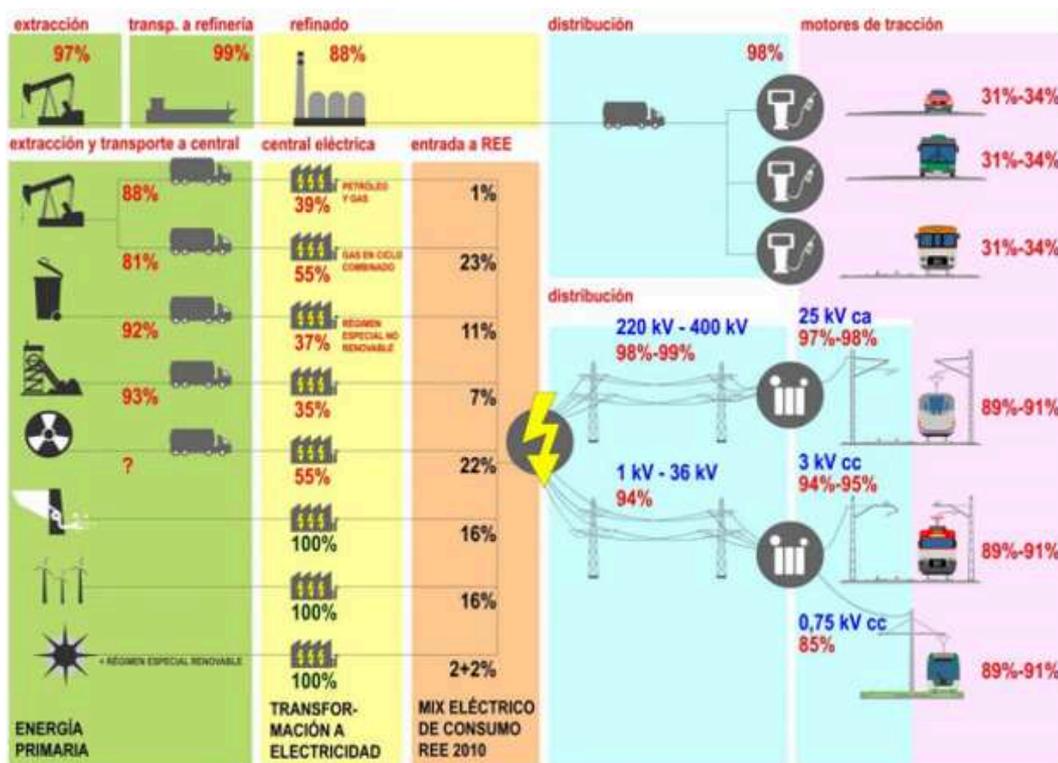


Figura 3.1 – Rendimientos de la cadena energética del transporte. Fuente: Riol, R. (2012).

<sup>39</sup> Según Díez, A. et al 2008 la eficiencia global de un trolebús es aproximadamente del 91%.

Desde el punto de vista del transporte de personas, debemos tener en cuenta el número de pasajeros, ya que, los vehículos tienen consumos mínimos para poder moverse y aumentan a medida que aumenta el número de pasajeros.

En la Figura 3.2, vemos como el trolebús y el tranvía son los vehículos con menor consumo por pasajero para el transporte de hasta 35 personas y el tren de cercanías consigue el menor consumo para un mayor número. Evaluar la tabla siguiente asegura la eficiencia del medio de transporte elegido entre uno de los principales factores a tener en cuenta.

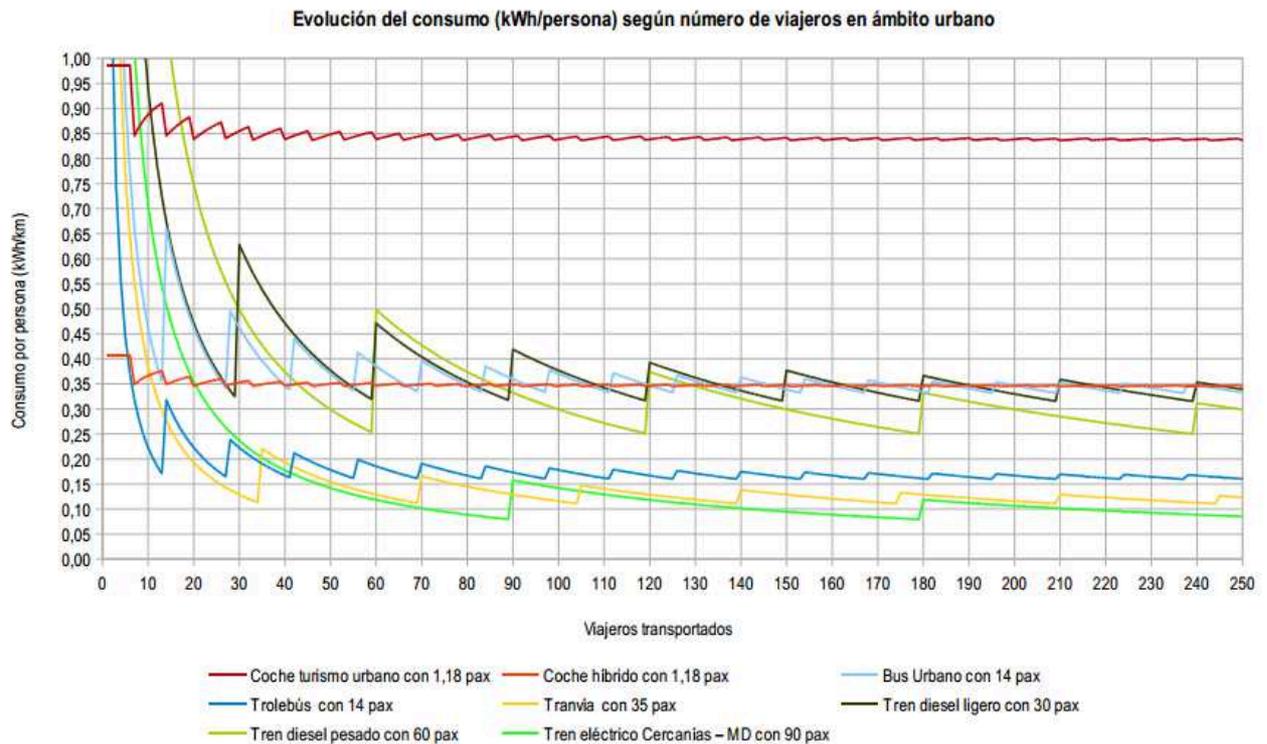


Figura 3.2 – Evolución del consumo según número de viajeros en ámbito urbano. Fuente: Riol Jurado, Ricardo (2012).

El principal factor a considerar es el número de pasajeros/hora que debe transportarse, ya que, se reducirán problemas de saturación y circulación en la ciudad. Por ejemplo, a partir de los 6000 pasajeros/hora el medio de transporte óptimo es el tranvía (Tabla 2.5) o los 8000 (Tabla 4.1).

Un punto de vista económico y fundamental para todo proyecto de transporte es el coste energético. A la vista de la evolución que está experimentando el precio de las energías, y en especial el petróleo, debemos tener en cuenta el coste energético a lo largo de la vida útil del mismo. Para la ciudad de Salzburgo, el coste de energía para el sistema de trolebuses representa el 9.8%, mientras que para los autobuses diésel es del 23.2%<sup>40</sup>. Si echamos una mirada al futuro a través de los datos de la EIA<sup>41</sup>,

<sup>40</sup> Mackinger, G. (2006). Trolleybuses – transport of the future. Eurobus Expo 2006 Conference

<sup>41</sup> EIA: Administración de información de energía de Estados Unidos.

tenemos tres posibles escenarios del precio del petróleo: alto, referencia, y bajo. Como vemos en la Figura 3.3, en el año 2028 las diferencias de costes son muy elevados, mientras que el coste de la electricidad se estima que se duplique, el coste diésel puede variar entre el 100-275%. Teniendo en cuenta solo la variación del coste de energía, el porcentaje sobre el coste total en la ciudad de Salzburgo pasarían a ser 18% para los trolebuses y el 50.7% en los diésel.

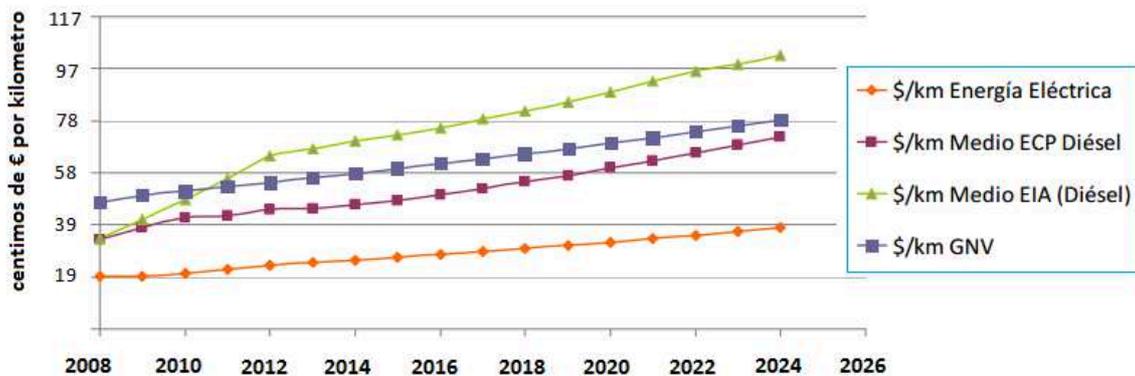


Figura 3.3 – Estimación del coste de energía eléctrica, diésel y gas natural.  
Fuente: Emiro, A. et al 2010.

También tenemos los autobuses cuya fuente principal de energía es el gas natural en formato comprimido, en inglés CNG, las proyecciones indican que los precios se duplicarán. Los CNG buses tienen un consumo elevado de energía 6.6 kWh/km<sup>42</sup> mientras que los buses híbridos (diésel con baterías) presentan un consumo de 4.4 kWh/km, es decir, entre un 20 a un 30% inferiores a los autobuses convencionales (diésel) según distintos estudios.

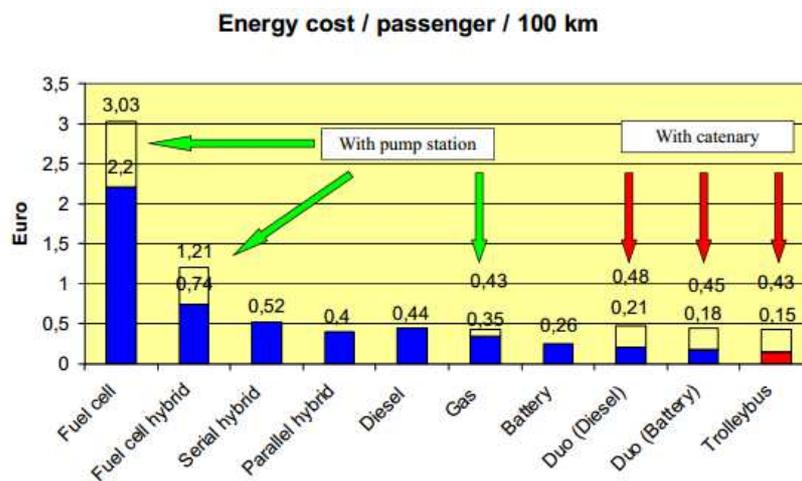


Figura 3.4 – Comparativa del coste económico de energía para distintos tipos de buses.  
Fuente: Ádám, Z. (2010). Trolleybuses the forgotten the forgotten experience experience in electromobility

La Figura 3.4 muestra el coste económico de energía por pasajero y kilómetro para distintos tipos de tecnología de autobuses. En la Figura 3.5 puede verse una comparativa de los distintos medios de transporte en función del tipo de recorrido (urbano o interurbano) en España.

<sup>42</sup> Emiro, A.; Bohórquez, A. et al 2010.

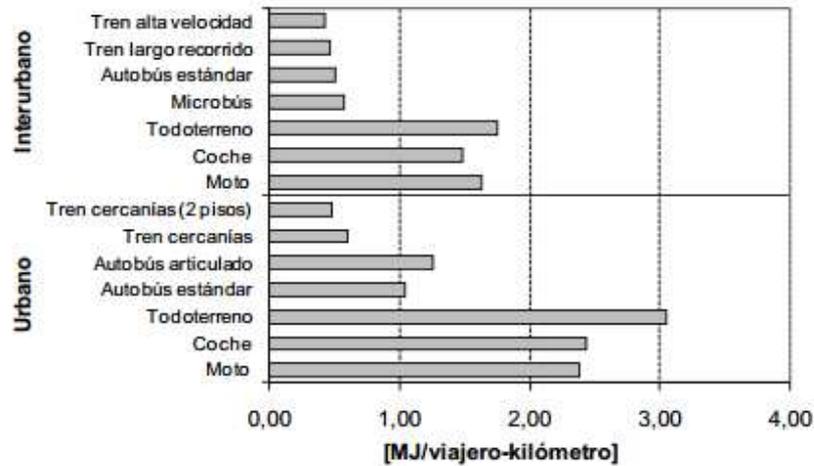


Figura 3.5 – Comparativa del coste de energía para distintos tipos de transporte según la ocupación media. Fuente: Monzón, A. et al (2009). La eficiencia energética y ambiental de los modos de transporte en España.

Podemos observar que los costes energéticos, en el ámbito urbano ( $\approx 1.2 \text{ MJ} = 0.33 \text{ kWh}$ ), para los autobuses son excesivamente elevados comparándolos con la Figura 3.2, es decir, la sustitución de estos autobuses por trolebuses permitiría reducir drásticamente el consumo energético por pasajero.

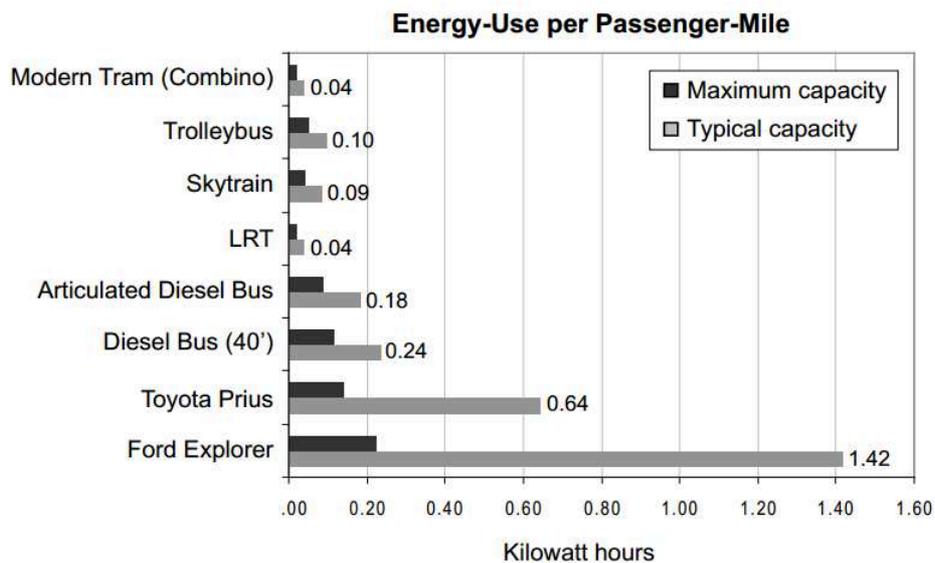


Figura 3.6 – Comparativa del coste de energía para distintos tipos de transporte según la ocupación. Fuente: Condon, P.; Dow K. (2008)

La similitud de las dos figuras anteriores muestra como los tranvías o trenes de cercanías son los transportes con el menor coste energético por persona, el trolebús ocuparía el segundo lugar. Pero como hemos visto en la Figura 3.2, es necesario ver realmente los pasajeros transportados por kilómetro para determinar realmente el coste energético por viajero desplazado por kilómetro.

## 4. Línea Óptima

Optimizar una línea de transporte para un trolebús, desde el punto de vista energético, depende de los factores que hemos visto en capítulo 2. Estos factores están acotados y pueden determinarse con exactitud, no obstante difieren desde el punto de vista económico.

Dependiendo de las materias primas y por tanto de las fuentes de energía que posea el país, prevalecerá el apartado económico sobre la eficiencia. España posee un 76.4% de dependencia energética, principalmente debidas a la importación de productos derivados del petróleo (hidrocarburos y gases). También hemos observado que tal dependencia puede ser perjudicial de cara a los próximos años, cuando se estima que los costes de estos productos al menos se dupliquen. Sin duda, la Unión Europea busca amortiguar el impacto a través de la citada estrategia 2020.

En primer lugar, desde el punto de vista económico y sin entrar en mucho detalle, el trolebús debe tener un uso intensivo (más de 50.000 km al año) y debe transportar al menos 1000 pasajeros por hora. Puede verse en las Figura 4.1 y Figura 4.2.

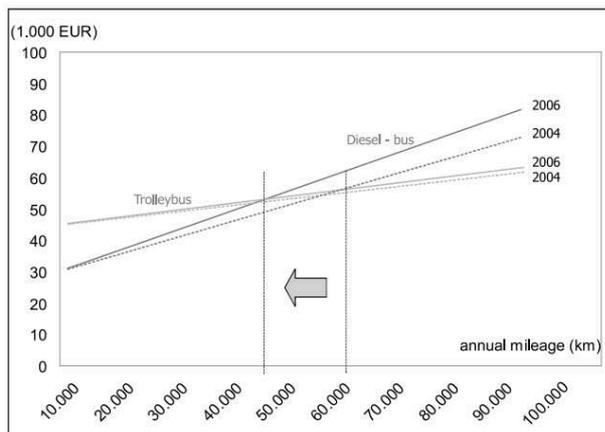


Figura 4.1 – Costes del trolebús y diésel en función de los kilómetros recorridos.

Fuente: Tica1, S et al 2011.

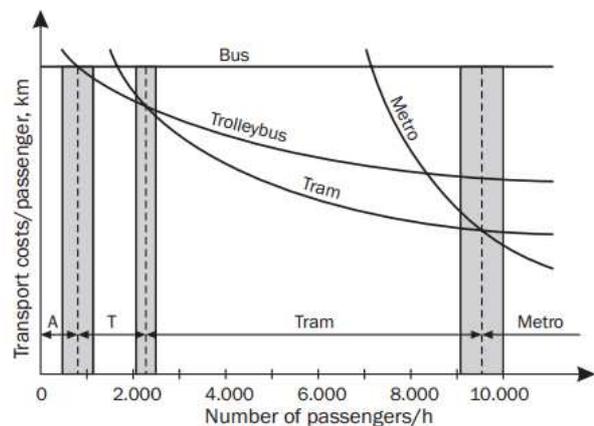


Figura 4.2 – Costes para distintos medios de transporte en función del número de pasajeros por hora.

Fuente: Zavada, J. et al 2010.

Desde el punto de vista energético y tal y como hemos visto en el capítulo 2. Extraemos las siguientes conclusiones que nos indican las claves de la eficiencia en este medio de transporte:

- Tensión de la Catenaria. A mayor tensión resulta en menores pérdidas, se debería utilizar la tensión de 750V actualmente la más elevada en el mercado.
- Topología de la red a dos hilos con cable de tensión elevada. Es la que menores pérdidas presenta pero se necesita realizar un buen estudio para evitar el *blackout*.
- En las subestaciones utilizar rectificadores de tiristores con el mayor número de pulsos posibles (18 pulsos) puesto que presentan mayor eficiencia.

- Los trolebuses deberían poseer las siguientes características para conseguir ser lo más eficientemente posible: motor de alta eficiencia, freno regenerativo con almacenamiento, optar por un convertidor de alta eficiencia y menor peso y estar equipado con un sistema de guiado óptico.
- Sobre la línea. Para que fuera lo más eficiente posible, el trazado debería carecer de pendientes y por tanto el desnivel debería ser prácticamente nulo. También se hace constar que aumentar la distancia entre paradas disminuye el consumo.
- Respecto a las cargas auxiliares. Debería utilizarse iluminación led y estudiarse en cada caso la climatización.

Desde el punto de vista de la utilización del medio de transporte, incluido lo comentado anteriormente en el aspecto económico, si se utiliza una vía reservada (carril bus mediano) con priorización semafórica y guiado óptico la línea debería tener una demanda entre 4500 y 7500 pasajeros hora.

En la Tabla 4.3 podemos ver los datos obtenidos clasificados por medio de transporte. Esta tabla ha sido realizada en base a los datos obtenidos y/o analizados en documentos científicos, proyectos y trabajos de investigación.

Podemos observar en la Figura 4.4 el coste energético por plaza en cada medio de transporte, efectivamente coincide con la comparativa de medios de transporte analizada en el capítulo 3. **El tranvía es el sistema de transporte más económico desde el punto de vista energético por plaza, pero realmente el consumo debe medirse respecto a la ocupación real ya que será la realmente consumida.**

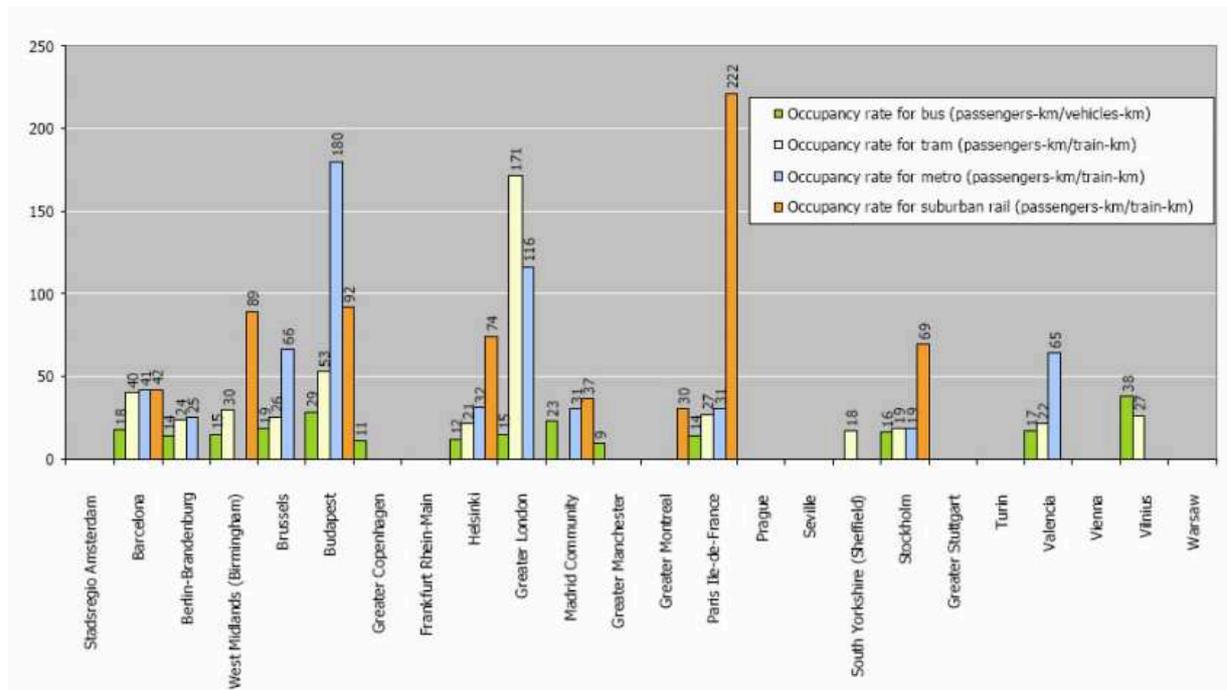


Figura 4.3 – Demanda de pasajeros según el medio de transporte en distintas ciudades europeas. Fuente: Secretaría de Estado de Transportes, Ministerio de Fomento (2010).

En la Figura 4.3 podemos denotar como existen muchas ciudades cuya ocupación media es inferior a 27 pasajeros por kilómetro por lo que se encuentra en los márgenes de mínimo coste energético del trolebús.

Teniendo en cuenta el dato anterior y observando los datos de la Tabla 4.3 y Tabla 4.3, un autobús o trolebús guiado puede albergar hasta 29 pasajeros por kilometro

$$Máx \frac{pas}{hora \cdot sentido} = \frac{8000 \text{ pasajeros} \cdot hora \cdot sentido}{9 \text{ km línea} \cdot 30 \text{ vehículos}} = 29 \frac{\text{pasajeros} \cdot hora \cdot sentido}{km}$$

Tabla 4.1 – Capacidad de diferentes modos de transporte colectivo urbano.

Fuente: Propuesta de red de tranvía-metro ligero y autobuses urbanos, suburbanos y comarcales.

TOMO I: Memoria y Anejos 1-6. PLAN DE MOVILIDAD SOSTENIBLE DE ZARAGOZA 2006

Modo o medio	Capacidad (viajeros/h/sentido)	Capacidad diaria (viajeros)	Capacidad anual (millones de viajeros)
Microbús	1.200-1.800	16.000-25.000	4'5-7'0
Autobús	3.000-4.500	40.000-62.000	10'0-15'0
Autobús articulado	4.500- 6.700	62.000-90.000	15'0-23'0
Autobús guiado	6.000-8.000	80.000-110.000	20'0-30'0
Tranvía	8.000-12.000	110.000-160.000	30'0-45'0
Metro ligero	11.000-15.000	150.000-200.000	42'0-55'0
Metro	15.000-30.000	200.000-400.000	55'0-110'0
Ferrocarril de cercanías	30.000-50.000	400.000-700.000	110'0-190'0

Tabla 4.2 – Características de diferentes modos de transporte colectivo urbano.

Fuente: ibis.

Modo o medio	Longitud (km/sentido)	Velocidad (km/h)		Distancia entre paradas (m)	Frecuencia máxima (vehículos /hora)	Intervalo mínimo (minutos)
		En conflicto	Vía propia			
Microbús	5-7	12-15	14-17	200-250	30	2
Autobús	6-8	9-12	13-15	250-350	30	2
Autobús articulado	6-9	9-11	14-14	300-400	25	2'4
Autobús guiado	6-9		14-17	250-350	30	2
Tranvía	7-10		16-20	400-600	40	1'5
Metro ligero	8-12		20-25	500-700	40	1'5
Metro <sup>4</sup>	12-20		20-35	500-1.000	45	1'33
Ferrocarril de cercanías	60-80		40-70	>2.000	20	3

Por tanto, para que un sistema de transporte basado en trolebuses sea, energéticamente, el más eficiente debería de estar comprendido entre los 7 y los 29 pasajeros por hora-sentido y kilómetro.

Tabla 4.3 – Comparativa de los consumos energéticos de distintos medios de transporte.

Fuente: Propia.

TIPO	MODELO	PESO (TARA+PASJ.) (T)	CAPACIDAD		CONSUMO		CONSUMO REFERIDO A MASA, ASIENTOS Y PLAZAS (kWh)		
			ASIENTOS	PLAZAS	kWh / km	MJ / km	Energía/Masa	Energía/Asiento	Energía/Plaza
BUS	Barcelona	13,1	29	75	4,50	16,2	0,34	0,16	0,060
	Mercedes O530 Citaro.Zaragoza	12,8	32	106	4,85	17,5	0,38	0,15	0,046
	Man NG-313F.Zaragoza	17,3	42	139	7,07	25,5	0,41	0,17	0,051
BUS PHEV	EcoPower. Turin	7,5	30	37	0,95	3,4	0,13	0,03	0,026
	Artic.Umea	19,0	29	95	1,27	4,6	0,07	0,04	0,013
	Ultracap Bus.Shanghai	13,0	41	75	1,50	5,4	0,12	0,04	0,020
TROLEBUS	New Flyer E40LFR.Vancouver.FR	14,6	34	77	2,70	9,7	0,18	0,08	0,035
	TVRcas.Castellón.	14,2	29	70	2,65	9,5	0,19	0,09	0,038
	Landskrona *FR	13,9	29	70	1,80	6,5	0,13	0,06	0,026
	Irisbus Critalis. Milan.	20,4	30	132	3,98	14,3	0,20	0,13	0,030
	AG 300T.Milan. *FR	19,7	31	152	2,64	9,5	0,13	0,09	0,017
	Roma. FR	19,0	30	155	2,40	8,6	0,13	0,08	0,015
	MB O405 G HC.Quito	17,8	42	138	3,63	13,1	0,20	0,09	0,026
	MB O405 G HC.Quito.*FR-2	17,8	42	138	2,26	8,1	0,13	0,05	0,016
	Hess LighTram. Ginebra	24,0	68	161	2,77	10,0	0,12	0,04	0,017
	AG 300T. Salzburgo	27,4	37	160	5,06	18,2	0,18	0,14	0,032
AG 300T. Salzburgo.*FR-2	27,4	37	160	3,42	12,3	0,12	0,09	0,021	
Salvador Caetano-Efacec. Coimbra	11,7	29	75	3,63	13,1	0,31	0,13	0,048	
TRANVIA	Skoda	26	42	154	1,84	6,6	0,07	0,04	0,012
	Alstom Citadis 302. Barcelona FR	40	64	220	4,50	16,2	0,11	0,07	0,020
	Alstom Citadis 302. Barcelona	40	64	220	5,25	18,9	0,13	0,08	0,024
	Roma. FR	40	54	260	2,99	10,8	0,07	0,06	0,012
	Urbos 3.Zaragoza.FR	59,5	52	206	3,93	14,1	0,07	0,08	0,019

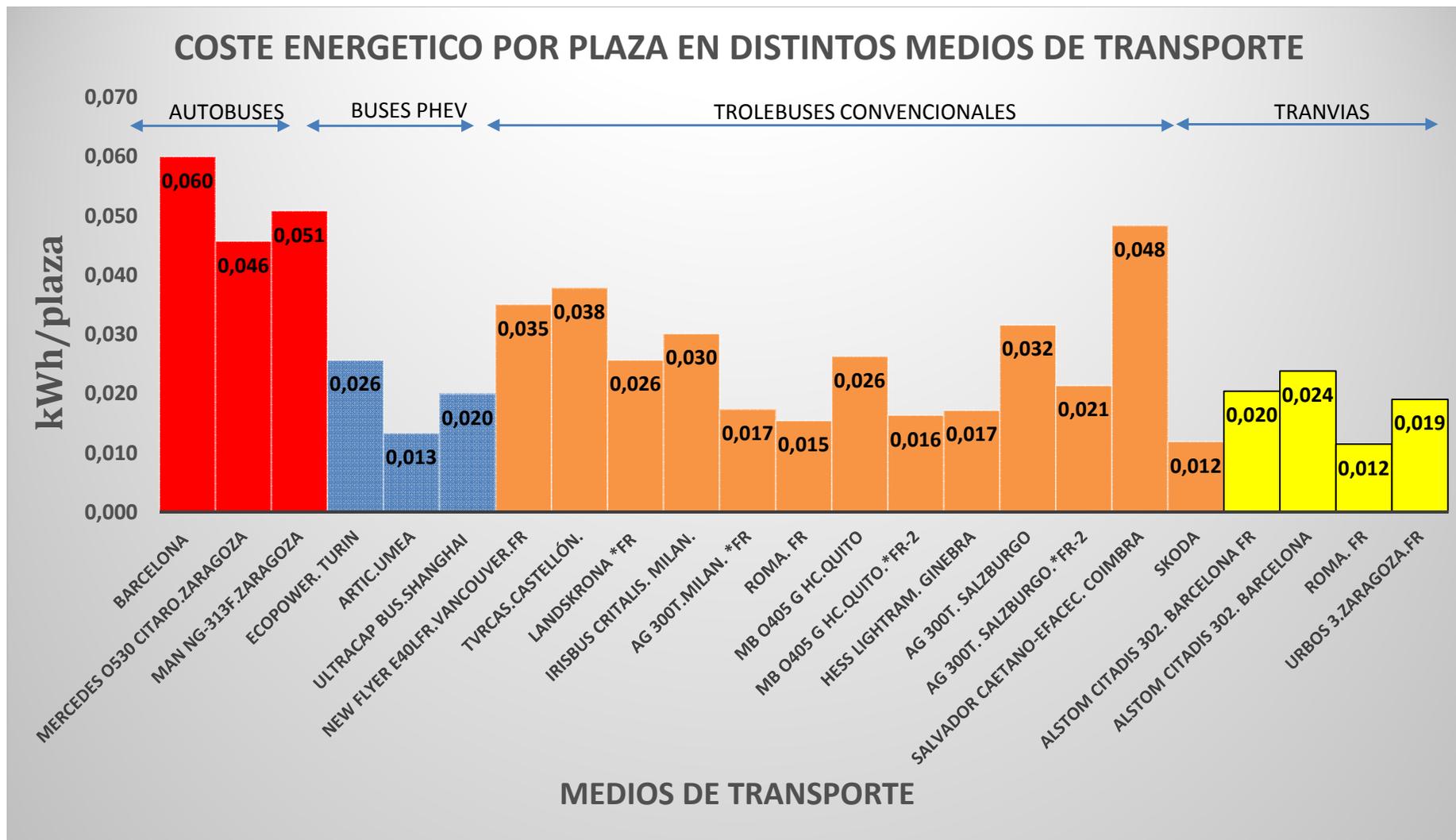


Figura 4.4 – Coste energético por plaza en distintos medios de transporte.

Fuente: propia.

## 5. Estudio de caso. Trolebús para la ciudad de Zaragoza

Este estudio pretende determinar qué línea o líneas actuales de autobús son óptimas para una futura línea de trolebuses en la ciudad de Zaragoza y obtendremos el consumo energético eléctrico de la misma.

### 5.1 Ruta o línea óptima

Para determinar la línea óptima, he tomado la siguiente premisa:

*Debe ser, en términos de energía, la más eficiente desde el punto de vista del transporte de personas y satisfacer la demanda óptima de la Figura 3.2. Esto significa que debe poseer la mayor tasa de viajeros transportados por kilómetro y expedición, y además, desde el punto de vista del coste energético, debe ser la línea de mayor eficiencia.*

Según el anterior criterio adoptado, este permite rechazar aquellas líneas que son deficitarias energéticamente. Podemos observar en la Figura 3.2 que el punto óptimo de trabajo de un trolebús, se encuentra aproximadamente entre 7 y 14 personas por kilómetro y expedición.

Entre aquellas líneas que con el punto óptimo, elegiremos aquella que obtenga el menor coste energético (la más eficiente).

#### 5.1.1. Procedimiento

##### 1. Recogida de datos.

El primer paso es recoger los datos de las líneas (viajeros transportados, kilómetros realizados al año, kilómetros de recorrido de cada expedición, horas de funcionamiento, etc.) y datos del calendario de transporte (tipos de periodos y de días).

Para el presente trabajo, han sido obtenidos de los pliegos del nuevo contrato del transporte urbano<sup>43</sup>. Al ser los datos más recientes, estos tienen incorporadas las modificaciones (cambios y supresiones de líneas) originadas por la integración completa del tranvía.

---

<sup>43</sup> Ayuntamiento de Zaragoza (2013). Anejo nº 1: descripción del servicio. Pliego de prescripciones técnicas particulares del contrato de gestión del servicio público de transporte urbano de viajeros en la modalidad de concesión.

## 2. Distribución de la demanda.

El siguiente paso es obtener de cada línea el dato de pasajeros por kilómetro y expedición, y para ello, necesitamos conocer la distribución de la demanda. Esta última exige tomar una serie de pautas por falta de información, que son las siguientes:

-Según Garrido, J. (1998), la movilidad urbana está más condicionada por razones sociales y económicas que las debidas a la variación del día o la noche, es decir, tomaremos la misma distribución horaria.

-La variación mensual de la demanda de transporte está ligada principalmente a los días festivos. Podemos asumir que cada mes tiene un peso del 8.56% de transporte de pasajeros, mientras que el mes de Agosto posee un peso del 5.8%. En las fiestas de Nuestra Señora del Pilar (10 días), contemplamos una demanda de ocupación del 30%<sup>44</sup> superior a una semana normal.

-Respecto a las variaciones producidas en el fin de semana (sábado y festivo), al desconocer los datos reales, se realizará una ponderación respecto al número de expediciones.

-El consumo de los vehículos diésel para cada una de las líneas ha sido obtenido del trabajo de Rodríguez, A. (2006). Cabe destacar que mayoría de los vehículos del contrato actual de 2013 fueron adquiridos con anterioridad al año 2006 por lo que los consumos prácticamente apenas habrán sufrido alteraciones.

Teniendo en cuenta las pautas anteriores y los datos facilitados en el pliego, elaboramos las tablas de cada línea de autobús. Un ejemplo es la

Tabla 5.1, esta muestra en la parte superior los datos ofrecidos por el pliego y en la parte inferior los cálculos realizados para obtener de la demanda. En el anexo podremos ver las tablas de todas las líneas de transporte urbanas.

En el apartado siguiente tomaremos los valores del número de pasajeros por hora, kilómetro y expedición de cada una de las líneas para obtener la línea óptima.

---

<sup>44</sup> Calculado a partir de los datos:

<http://tuzsa.wordpress.com/2012/10/17/cifras-pilar-2012/> (accedido 28/10/2013)

Tabla 5.1 – Análisis de la línea de transporte 23.

Fuente: Propia.

DATOS LINEA	23	Tipo de Red	Id	Sentidos	Nº Paradas	Distancia Media entre Paradas (m)	Longitud (Km)	Tiempo Recorrido (min)	Velocidad (Km/h)	Hora Inicio primer servicio	Hora Final último servicio	Intervalo Paso FMLab.	Dota ción Laborales (vehículos)	
		Diurna	23	2	48	283	13,6	1:04	12,7	5:05:00	1:02:00	5	13	
		Kilometros anuales totales		Viajeros TOTALES			Demanda Resto Año (85,6%)		Demanda Estival (01-07 al 31/08) - (14%)		Horas funcionamiento		Tipo de Vehículo	
		841.125		6.272.235			5.371.542		900.693		19:57		Articulado de 18m	
CALCULOS	Expediciones al día	Días al año	Expediciones al año	km día	km totales	Demanda		Demanda/hora	Pass. / Km * Exp.	Coste Energético / Persona		CONSUMO ANUAL		
				longitud / sentidos	Exp.año x long. /sentidos	Anual	Diaria			kWh/km	litros diesel / km	kWh	litros	
Día Laboral	369	205	75.645	2.509	514.386	3.752.383	18.304	990	7,29	1,05	0,11	3.927.954	401.221	
Día Sabado	328	39	12.792	2.230	86.986	634.549	16.270	990	7,29	1,05	0,11	664.239	67.849	
Día Festivo	293	51	14.943	1.992	101.612	741.250	14.534	990	7,29	1,05	0,11	775.933	79.258	
Día Laboral S.Pilar	369	6	2.214	2.509	15.055	143.910	23.985	1.297	9,56	0,80	0,08	114.965	11.743	
Día Sabado S.Pilar	369	2	738	2.509	5.018	47.970	23.985	1.297	9,56	0,80	0,08	38.322	3.914	
Día Festivo S.Pilar	396	2	792	2.693	5.386	51.480	25.740	1.297	9,56	0,80	0,08	41.126	4.201	
Día Laboral Estival	295	43	12.685	2.006	86.258	657.268	15.285	1.034	7,62	1,00	0,10	658.683	67.281	
Día Sabado Estival	262	9	2.358	1.782	16.034	122.179	13.575	1.034	7,62	1,00	0,10	122.442	12.507	
Día Festivo Estival	234	10	2.340	1.591	15.912	121.246	12.125	1.034	7,62	1,00	0,10	121.507	12.411	
											TOTAL=	6.465.170	660.385	

### 5.1.2. Resultados

La Figura 5.1 representa el análisis obtenido de los datos de las líneas (ver en anexo) correspondientes a la estimación del año 2013. **Como podemos deducir, las líneas que cumplen con la condición son: 23,24 y 33.**

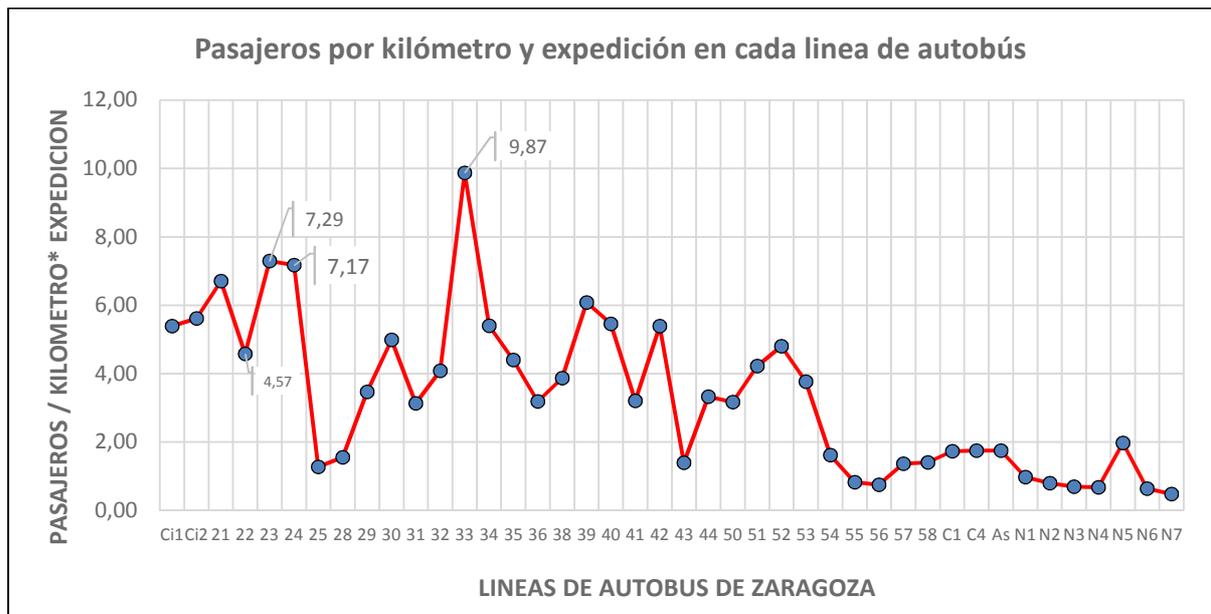


Figura 5.1 – Pasajeros por kilómetro y expedición por línea.  
Fuente: Propia.

Si comparamos de nuevo con la Figura 3.2, podemos observar que todas las líneas con valores inferiores a 5 pasajeros/km\*exp. tienen una eficiencia similar a la de un coche híbrido.

También destaca la gran cantidad de líneas que tienen un valor inferior a 2 pasajeros/km\*exp, ya que su eficiencia es comparable a la de un turismo.

Respecto al coste energético, la línea 33 es la más eficiente en cualquier tipo de día (Figura 5.2) con 0.72 kWh/pasajero\*km. Seguida de la línea 24 y posteriormente de la 23.

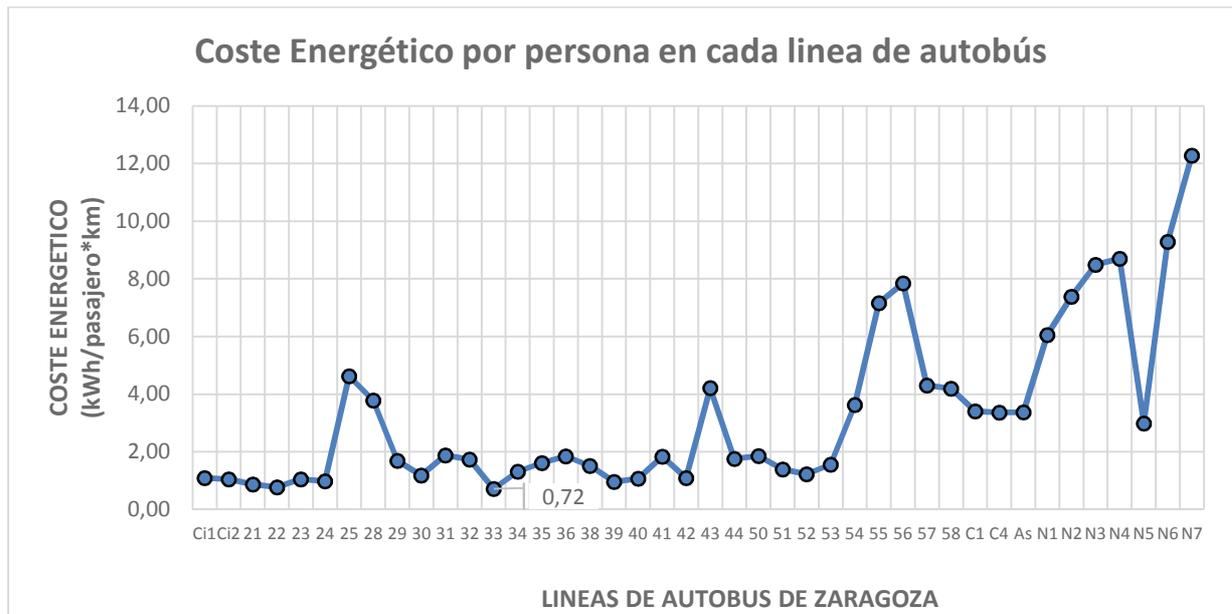


Figura 5.2 – Coste energético por persona en cada línea de autobús  
Fuente: Propia.

En conclusión, la línea 33 es la línea más eficiente y que cumple con los parámetros para ser sostenible desde el punto de vista energético.

## 5.2 *Cálculo del consumo energético de la línea óptima*

El cálculo de la energía eléctrica de la línea del trolebús está determinado por los siguientes aspectos:

- Potencia del motor, que incluye: demanda y peso del conjunto, pendiente de la ruta y velocidad.
- Planificación de la ruta: número de expediciones programadas según frecuencia y día.

Para determinarlo, suele realizarse por medio de un software comercial como pueden ser: OpenTrack, Sitras Sidytrac, Rail Power o Elbas Sinanet. Las licencias tienen un coste elevado pero tienen multitud de variables para poder realizar un estudio en profundidad.

En este trabajo utilizaremos el procedimiento descrito a continuación.

### 5.2.1. *Procedimiento*

Mediante una aplicación móvil (**GPS logger Pro** del autor Peter Ho) he realizado una monitorización a lo largo de toda la expedición o recorrido de la línea óptima (línea 33), en ambos sentidos. Los datos instantáneos obtenidos del programa son los de posición GPS, velocidad, altitud y distancia recorrida.

Posteriormente estos datos se importan a una hoja de cálculo para poder manejarlos. Un pequeño fragmento de los datos aportados por el programa se muestra en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 – Pequeña muestra de los datos de la línea de óptima (línea 33).

Fuente: Propia.

Hora	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Velocidad (m/s)	Distancia total (km)	Potencia (kW)
11:29:57	41,645127	-0,911431	303,6	0,00	0	0,00
11:29:58	41,645214	-0,911462	303,6	2,94	0,01	51,03
11:29:59	41,645306	-0,911453	292,1	5,67	0,02	-148,42
11:30:00	41,645351	-0,911517	292,2	5,11	0,028	-9,57
11:30:01	41,645421	-0,911603	290,5	5,64	0,038	-32,44
11:30:02	41,645488	-0,911656	285,6	6,89	0,047	-130,93
11:30:03	41,645522	-0,911735	285	7,53	0,054	-3,73
11:30:04	41,645554	-0,911812	282,2	7,39	0,062	-137,58
11:30:05	41,645578	-0,911898	280,2	7,61	0,069	-102,34
11:30:06	41,645609	-0,91199	278,2	8,33	0,078	-61,27
11:30:07	41,645652	-0,912077	276,9	8,67	0,086	-55,45
11:30:08	41,645729	-0,912141	275,7	10,08	0,096	21,26
11:30:09	41,645828	-0,912201	274,6	12,17	0,109	96,26
11:30:10	41,645934	-0,912252	273,6	12,42	0,121	-30,36

El conjunto de datos fue recogido el día 26/10/2013 a partir de las 11:29 horas en un modelo IVECO CITELIS ART-EUROV.



Figura 5.3 – Imagen del vehículo monitorizado.

Fuente: propia.

El consumo de energía se determina aplicando la segunda ley de Newton y una serie de coeficientes de eficiencia. Tomando como los datos de peso y dimensiones de un trolebús muy común, Irisbus Cristalis Alstrom, además de los coeficientes y factores obtenidos de los artículos Khanipour, A et al 2008 y Falvo, M.C. et al 2012, formamos la Tabla 5.3

Tabla 5.3 – Coeficientes de un sistema de trolebuses.

Fuente: Propia.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS		
SIMBOLO	COMPONENTE	VALOR
$C_d$	Coeficiente de Resistencia al aire	0,79
$f_r$	Coeficiente de Rodamiento	0,01
$C_w$	Coeficiente de Velocidad del viento	0,2
$m$	Masa del Vehículo (kg)	19100
$A_f$	Area frontal del vehículo (m <sup>2</sup> )	8,55
$\delta$	Factor de masa	1,035
$\eta_c$	Eficiencia convertidor	0,9
$\eta_m$	Eficiencia motor	0,95
$\eta_t$	Eficiencia transmisión mecánica	0,93
$\eta_s$	Eficiencia Subestación	0,95
$\eta_l$	Eficiencia líneas	0,9

Respecto de la masa del vehículo, se debe tener en cuenta también, la masa de los pasajeros por kilómetro y expedición de media, en este caso son ≈10 pasajeros a 70kg/pasajero por lo que se deberá sumar a la masa del vehículo.

Por otro lado, se han establecido las siguientes premisas para llevar a cabo el cálculo del consumo de energía:

- El Estado del tráfico y de las señales semafóricas se tienen en cuenta.
- Se tiene en cuenta la ocupación (peso), ya que, como hemos demostrado, el consumo se ve alterado proporcionalmente.
- Se respetarán los parámetros de la misma como son: frecuencia, margen horario de inicio y fin, distancia de las paradas y calendario de transporte para realizar el cálculo anual.

**1. Cálculo del consumo del movimiento.**

Aplicaremos la segunda ley de Newton mediante el diagrama de fuerzas utilizado que se muestra en la Figura 5.4.

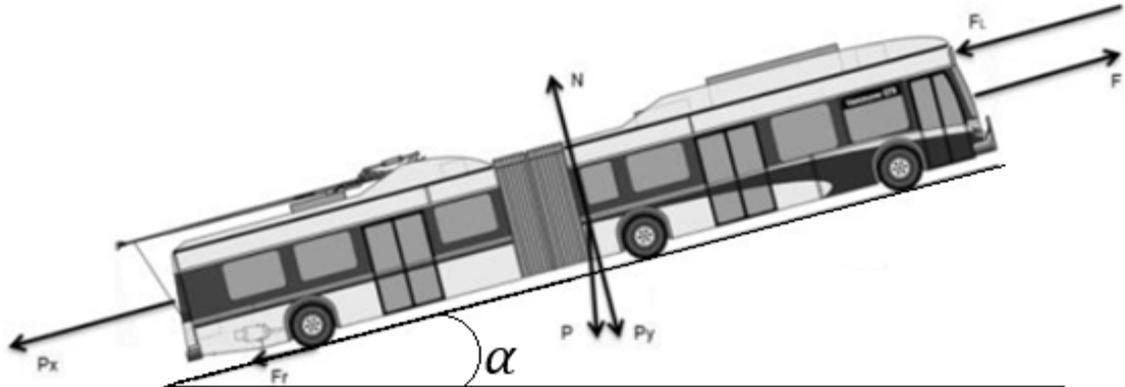


Figura 5.4 – Diagrama de cuerpo libre.  
Fuente: Vossloh kiepe, modelo E40LFR (2010).

**2ª Ley de Newton**

$$\sum F = m * a$$

**Ecuación 1**

$$F = P_x + F_{RO} + F_L + m * a * \delta$$

**Ecuación 2**

$$F = m * g * \sin(\alpha) + m * g * f_r * \cos(\alpha) + \frac{1}{2} * \rho * A * C_d * V^2(1 + C_W) + m * a$$

**Ecuación 3**

$$Potencia = Fuerza * Velocidad$$

Donde:

<i>F</i> : fuerza a aplicar al vehículo (fuerza tractora)	<i>m</i> : masa del vehículo cargado (kg)
<i>F<sub>L</sub></i> : fuerza debida a la resistencia del aire	<i>g</i> : gravedad (9.8 m/s <sup>2</sup> )
<i>F<sub>RO</sub></i> : fuerza debida a la rodadura	<i>A</i> : área (m <sup>2</sup> )
<i>P</i> : peso del vehículo	<i>C<sub>d</sub></i> : coeficiente de resistencia al aire
<i>P<sub>x</sub></i> : componente del peso en el eje horizontal	<i>V</i> : velocidad (m/s)
<i>P<sub>y</sub></i> : componente del peso en el eje vertical	<i>ρ</i> : densidad del aire (kg/m <sup>3</sup> )
<i>f<sub>r</sub></i> : coeficiente de rodadura	<i>C<sub>W</sub></i> : coeficiente de la velocidad del viento
<i>α</i> : pendiente (radianes)	<i>a</i> : aceleración (m/s <sup>2</sup> )
	<i>δ</i> : factor de masa (inercia rotacional)

Si multiplicamos los resultados de la **Ecuación 2** (desarrollada de la **Ecuación 1**) por la velocidad en cada instante de tiempo obtendremos la **Ecuación 3**, que es la potencia necesaria en cada instante de tiempo. Para obtener la energía, multiplicaremos el valor de la potencia por el tiempo en cada instante.

$$Consumo\ Energía\ de\ Tracción_{por\ expedición} = \sum Potencia * Tiempo$$

Para determinar la energía necesaria de tracción a lo largo de la expedición bastará con sumar los términos positivos. Los términos negativos indican la potencia que debe ser absorbida por parte de los frenos, en caso de que el trolebús contase con frenado regenerativo parte de esta energía podría aprovecharse como ya hemos comentado en capítulos anteriores.

**2. Cálculo del consumo del vehículo.**

El siguiente paso consiste en obtener el consumo del vehículo (**Ecuación 4**), para el caso del trolebús convencional. Aplicaremos los coeficientes de eficiencia del mismo (Falvo, M.C. et al 2012):

- $\eta_c$  = Convertidor: 90%
- $\eta_m$  = Motor: 95%
- $\eta_t$  = Transmisión mecánica: 93%

**Ecuación 4**      **Consumo Energía Vehículo**<sub>total por expedición</sub> =  $\frac{\text{Energía de Tracción}_{\text{por expedición}}}{\eta_c * \eta_m * \eta_t}$

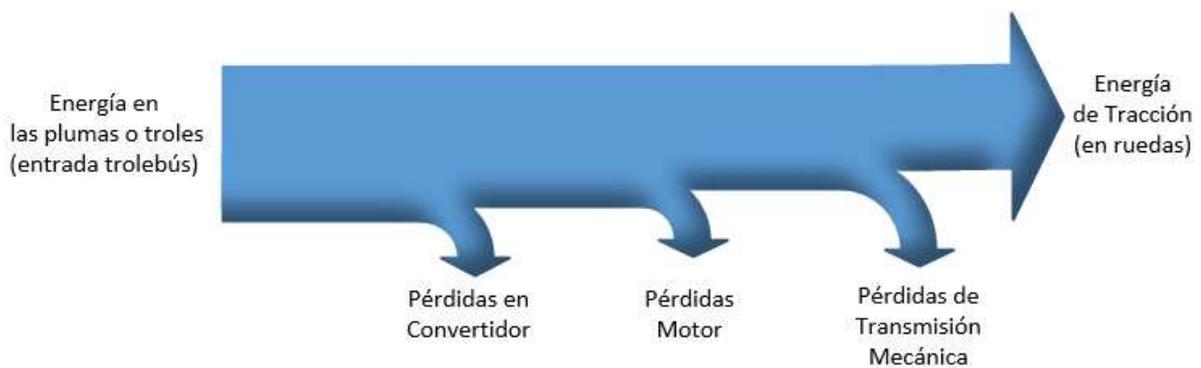


Figura 5.5 – Diagrama de eficiencia de un trolebús.  
Fuente: propia.

Si el trolebús es híbrido y dependiendo del esquema del mismo, debemos aplicar una ecuación distinta. Dependiendo del sistema de propulsión que esté funcionando en cada periodo de tiempo utilizaremos la ecuación con los coeficientes de eficiencia de cada tipo de sistema.

$$\text{Consumo Energía Vehículo}_{\text{total por expedición}} = E. \text{Tracción Baterías} + E. \text{Tracción Diesel}$$

Si los vehículos son PHEV debemos tener en cuenta que no existen pérdidas en la línea, puesto que no existe, en su lugar aparecen unas pérdidas debido a las baterías. Estas pérdidas son debidas a la incompleta transferencia entre el proceso de carga y descarga de las baterías, denominada eficiencia Coulomb o aceptación de la carga. Los coeficientes varían en función del tipo de baterías (ver Figura 2.18),  $\eta_b$  = Baterías Li-Ion: 85%.

$$\text{Consumo Energía Vehículo}_{total\ por\ expedición} = \frac{\text{Energía de Tracción}_{por\ expedición}}{\eta_c * \eta_m * \eta_t * \eta_b}$$

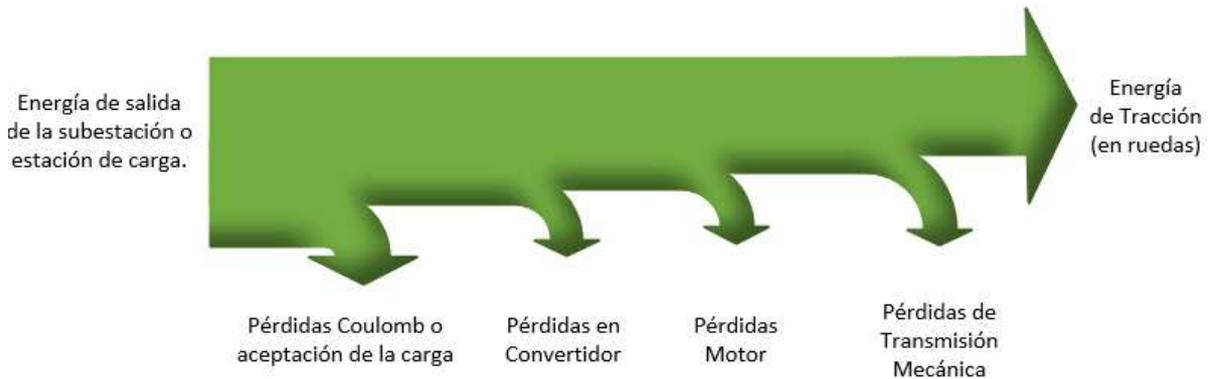


Figura 5.6 – Diagrama de eficiencia de trolebuses PHEV.  
Fuente: propia.

### 3. Cálculo del consumo del sistema

El último paso es determinar el consumo de energía en la entrada de la subestación transformadora. Debemos aplicar los coeficientes de eficiencia de las líneas o catenaria y subestación en el caso de los trolebuses convencionales:

- $\eta_s$ = Subestación: 95%
- $\eta_l$ = Líneas: 90%

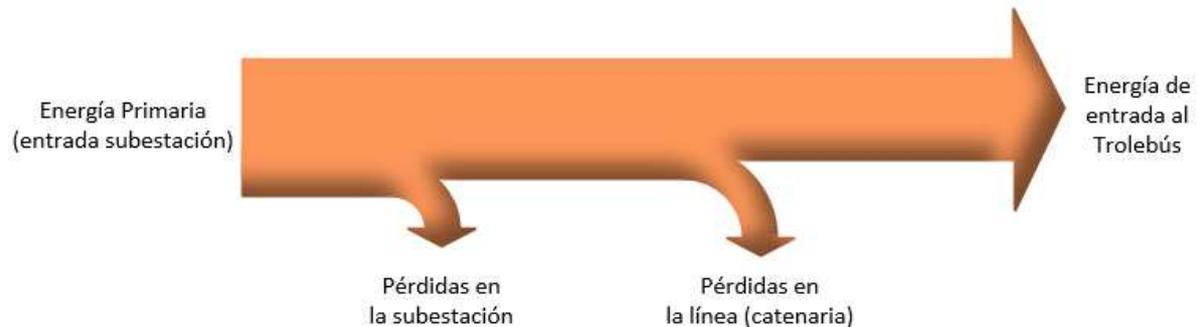


Figura 5.7 – Diagrama de eficiencia del sistema completo de transporte mediante trolebuses convencionales.  
Fuente: propia.

Ecuación 5  $\text{Consumo del sistema}_{por\ expedición} = \frac{\text{Energía de Vehículo}_{por\ expedición}}{\eta_s * \eta_l}$

El consumo diario o anual del sistema está determinado por la siguiente ecuación.

$$\text{Consumo del sistema}_{diario/anual} = \text{Energía de Vehículo}_{por\ expedición} * \text{Expediciones}_{diarias/anales}$$

### 5.2.2. Resultados

Una vez obtenido la potencia instantánea (y por tanto la energía para cada segundo de tiempo) debemos diferenciar entre la energía absorbida de la red (positiva) que absorbe el motor del trolebús y la energía cedida (negativa) que debe ser absorbida por algún tipo de freno (resistivo o regenerativo). Obtenida la división, pasamos a realizar la suma de cada una de las partes, obteniendo la Tabla 5.4

Tabla 5.4 – Resultados de la energía absorbida y cedida - línea óptima.  
Fuente: Propia.

RESULTADOS OBTENIDOS DEL MOVIMIENTO			
Energía de tracción	63275,30 kW	17,58 kWh*línea	1,28 kWh/km
Energía de frenado	-31735,33 kW	-8,82 kWh*línea	-0,64 kWh/km

\*Línea= 13.73 km

Aplicando los factores de eficiencia del trolebús vistos anteriormente y el factor K (0.5) para el cálculo de la energía cinética recuperable, obtenemos la Tabla 5.5.

$$\text{Consumo Energía Vehículo}_{total\ por\ expedición} = \frac{\text{Energía de Tracción}_{por\ expedición}}{\eta_c * \eta_m * \eta_t}$$

Tabla 5.5 – Energía absorbida y cedida incluyendo la eficiencia del vehículo.  
Fuente: Propia.

RESULTADOS INCLUYENDO LA EFICIENCIA DEL VEHICULO	
Consumo energía del vehículo por recorrido de línea (kWh)	22,10
Consumo energía del vehículo por km (kWh/km)	1,61
Energía recuperada por freno regenerativo (kWh)	-4,41
Energía recuperada por FR por km (kWh/km)	-0,32
TOTAL ((kWh/km)=	1,29
Ahorro (%)	19,9%

Si queremos obtener el consumo de energía incluyendo las pérdidas del sistema de potencia, aplicaremos los factores de eficiencia de sistema para elaborar la Tabla 5.6

$$\text{Consumo del sistema}_{\text{por expedición}} = \frac{\text{Energía de Vehículo}_{\text{por expedición}}}{\eta_s * \eta_l}$$

Tabla 5.6 – Energía absorbida y cedida incluyendo eficiencia del sistema de potencia.

Fuente: Propia.

RESULTADOS INCLUYENDO LA EFICIENCIA DEL SISTEMA DE POTENCIA	
Consumo energía del Sistema por recorrido de línea (kWh)	25,85
Consumo energía del Sistema por kilómetro (kWh/km)	1,88
Consumo energía del Sistema por línea incluyendo FR (kWh)	20,70
Consumo energía del Sistema por kilómetro con FR (kWh/km)	1,51

Según los resultados obtenidos para la línea óptima, **un trolebús consumiría 1.61 kWh/km (1.88 kWh/km incluyendo las pérdidas del sistema de potencia)** con las mismas condiciones, siendo este consumo el debido al movimiento. Para obtener el consumo completo del trolebús es necesario añadir el originado por las cargas auxiliares.

El único dato encontrado acerca del consumo de los sistemas auxiliares es el proporcionado por David Checkel (2008). En dicho estudio indica que la potencia consumida por las cargas auxiliares se situaba de media continua en 2.5 kW. Si añadimos dicho dato al resultado obtenido, obtenemos que **el consumo medio es de 4.11 kWh/km (1.61+2.5), si incorporamos el frenado regenerativo el consumo sería de 3.79 kWh/km (1.29+2.5).**

Tabla 5.7 – Resultados de la energía absorbida y cedida incluyendo la carga auxiliar.

Fuente: Propia.

RESULTADOS INCLUYENDO CARGAS AUXILIARES	
Consumo energía del Sistema por recorrido de línea (kWh)	66,00
Consumo energía del Sistema por kilómetro (kWh/km)	4,81
Consumo energía del Sistema por línea incluyendo FR (kWh)	60,86
Consumo energía del Sistema por kilómetro con FR (kWh/km)	4,43

Debe constar que **la distancia media de paradas de la línea óptima es de 275 metros.** Si aumentamos dicha distancia a 500 metros, al igual que los tranvías y el trolebús de Castellón, tal y como vimos en el apartado 2.3.2, la reducción de consumo sería de al menos del 20%, por lo que pasaríamos a tener un consumo de 3.28 kWh/Km y 3.03 kWh/km con frenado regenerativo.

Tomando los datos de consumo de los trolebuses reales y el anteriormente calculado obtenemos la Figura 5.8. Se debe destacar que estos consumos solo incluyen la eficiencia del vehículo.

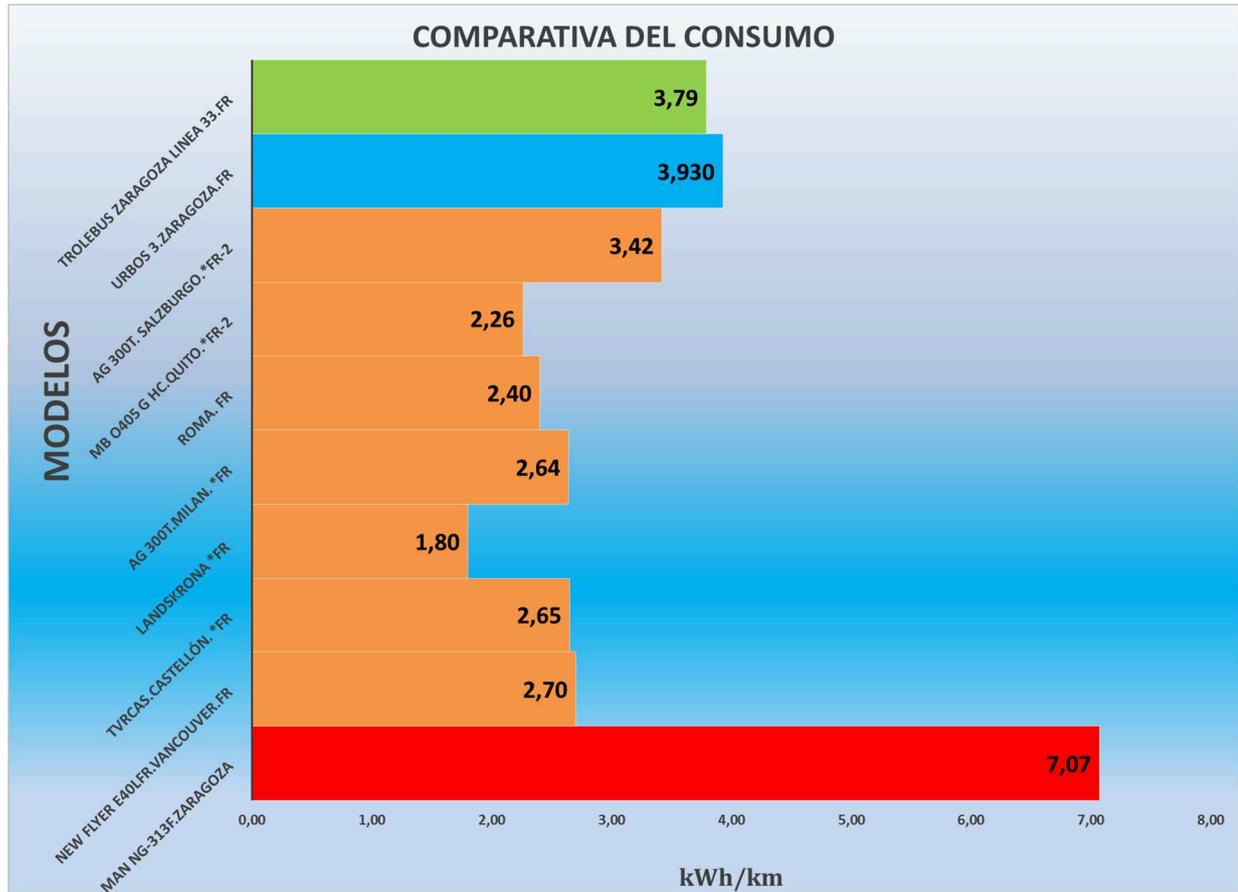


Figura 5.8 – Comparativa de los consumos de trolebuses reales, autobús y trolebús de la línea óptima.  
Fuente: propia.

Respecto al consumo de la línea realizado con trolebuses, puede observarse en la tabla siguiente como el consumo se ha reducido en aproximadamente un 40%. Se incluyen la eficiencia del vehículo, sistema de potencia, cargas auxiliares y se toma en cuenta el frenado regenerativo.

Tabla 5.8 – Comparativa del coste por pasajero entre autobuses diésel y trolebuses.  
Fuente: Propia.

	DIESEL	TROLEBUS
COSTE PASAJERO (kWh/km*pasaj.)	0,72	0,45
CONSUMO ANUAL (kWh)	4.510.985	2.821.911

### 5.2.1. Verificación de los cálculos.

Para verificar la coherencia de los datos obtenidos de potencia instantanea, se ha realizado la gráfica de la Figura 5.9 que corresponde a dos ciclos consecutivos de arranque-parada. Comparándola con la Figura 5.10 extraída del artículo de Khanipour, A. et al 2008 se puede verificar que los datos obtenidos del software son correctos. También puede compararse con las gráficas del artículo de Yepes, O. y Diez, A. de 2012.

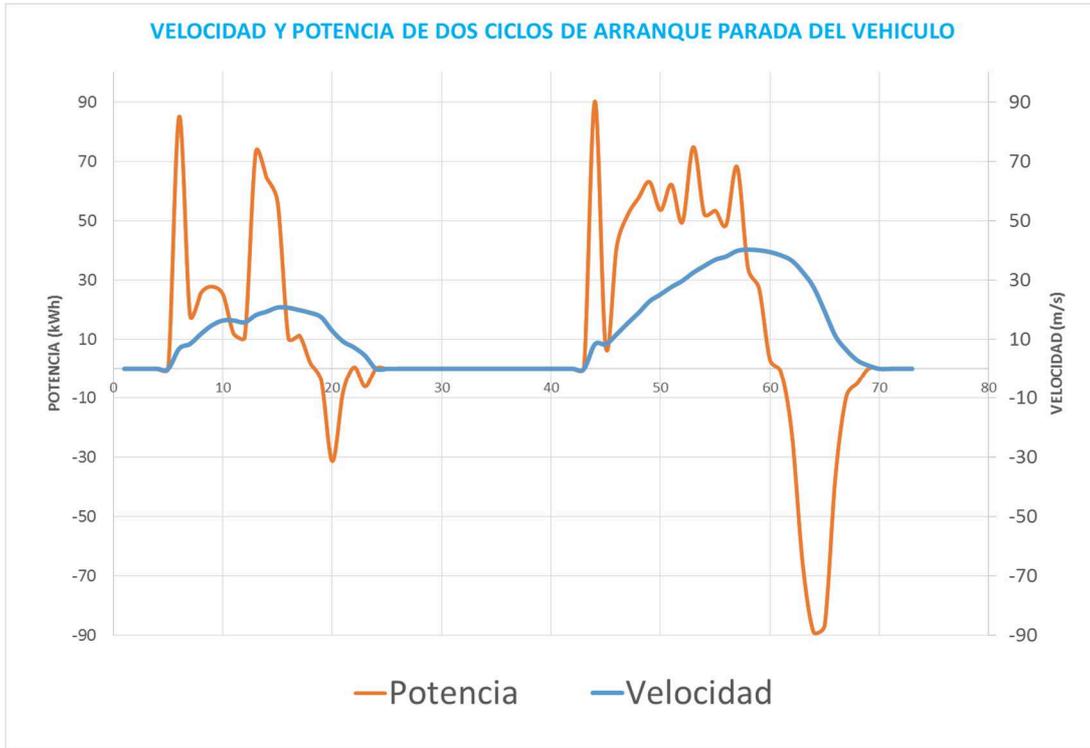


Figura 5.9 – Velocidad y potencia calculados en dos ciclos de arranque-parada del vehículo. Fuente: propia.

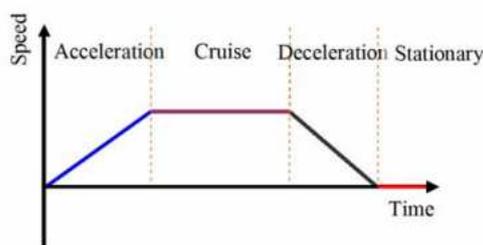


Fig. 1 Ideal speed profile for stop/start cycle

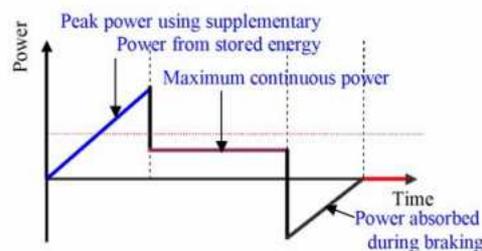


Figura 5.10 –Demanda teórica de potencia de tracción según el ciclo ideal de arranque-parada de un vehículo. Fuente: Khanipour, A. et al 2008

## 6. Conclusiones

En este trabajo se ha recordado al viejo y olvidado trolebús desde el punto de vista energético y además se ha realizado un caso de estudio para la ciudad de Zaragoza. La revisión del estado del arte nos muestra cómo ha tenido un periodo de decadencia, no atribuible a decisiones técnicas.

Se ha realizado una intensa investigación que determina los factores que influyen en los costes energéticos del trolebús así como en vehículos híbridos.

La comparativa realizada ha demostrado que tanto el tranvía como el trolebús son los sistemas más eficientes para el transporte de media capacidad de personas.

También se ha llevado una exhaustiva búsqueda para elaborar una comparativa de consumos en las distintas ciudades que disponen de este medio de transporte.

Por último, se ha realizado un estudio de la ruta o línea más eficiente de la actual red de transporte de autobús de Zaragoza para poder implementar un sistema de basado en trolebuses. Incluso se ha calculado mediante un sistema no intrusivo, el consumo del movimiento de un vehículo de dicha línea para proceder a determinar el consumo del sistema completo.

Como trabajo futuro, pueden abordarse los siguientes temas:

- Proyecto técnico y económico.
- Estudio de Impacto ambiental.
- Sistemas de gestión/reguladores de la energía



Figura 6.1 – Trolebús de la ciudad de Parma (Italia) del fabricante Van Hool.

Fuente: Tbus (web - accedido 13/10/13) <http://www.tbus.org.uk/news2011.html>

## 7. BIBLIOGRAFIA

- [1] **Brunton, L.J (1992).** *The trolleybus story*. IEE Review Volume: 38, Issue: 2. Pp. 57 – 61.
- [2] **Brunton, L.J (2000).** Why not the trolleybus?. *Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles* (Ref. No. 2000/050), IEE Seminar
- [3] **Grava, S. (2003).** "Trolleybuses," *Urban Transportation Systems: Choices for Communities*. New York: McGraw-Hill. Pp 421-436.
- [4] **Tartajo Garrid, J.A. (2006).** El ocaso de los tranvías españoles. IV Congreso de Historia Ferroviaria. 20,21 y 22 de septiembre de 2006. Málaga
- [5] **Murray, A. (2000).** *World Trolleybus Encyclopaedia*, Yateley, Hampshire, UK: Trolleybooks
- [6] **Hernández, J.L. (2006).** La derrota provisional de los ferrocarriles urbanos frente al automóvil: la eliminación del tranvía y el triunfo del autobús en España a mediados del siglo XX. IV Congreso de Historia Ferroviaria. 20,21 y 22 de septiembre de 2006. Málaga
- [7] **Vuchic Vukan R. (2007).** *Urban Transit – Systems and Technology*. John Wiley & Sons
- [8] **García Reyes, M. (2005).** Estados unidos, petróleo y geopolítica: las estrategias petroleras como un instrumento de reconfiguración geopolítica. *Icaria*. Pp 161
- [9] **Emiro, A.; Bohórquez, A.; Edder V., Roa L.F. (2010).** Modern Trolleybuses on Bus Rapid Transit: key for electrification of public transportation. ANDESCON, 2010 IEEE
- [10] **Emiro, A.; Bohórquez, A.; Figueroa M.; Andrés J. (2010).** Análisis de la factibilidad de implementación de una solución de transporte masivo eléctrico de mediana capacidad en la ciudad de Bogotá mediante trolebuses. Universidad Pontificia Bolivariana. Medellín, 26 de abril de 2010.
- [11] **Khanipour, A.; Ebrahimi, K.M.; Seale W.J. (2008).** Conventional Design and Simulation of an Urban Hybrid Bus. *International Journal of Engineering and Applied Sciences* 4:2 2008
- [12] **Petru T., Ilie N.; Esanu, V. (2012).** Urban Electric Vehicles Traction: Achievements and Trends. 2012 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering (EPE 2012), 25-27 October, Iasi, Romania.
- [13] **Almeida, A.; Falkner, H.; Fong J.; Jugdoyal, K.. (2012).** EuP Lot 30: Electric Motors and Drives. ISR-University of Coimbra. 2012.
- [14] **Versonnen, E. (2011).** Rolling Resistance. Powering the future with zero emission and human powered vehicles. Terrassa 2011.
- [15] **Eichlleder, H. (2011)** Evaluation of fuel efficiency improvements in the Heavy-Duty Vehicle (HDV) sector from improved trailer and tire designs by application of a new test procedure. Institute for internal combustion engines and thermodynamics. Report No. I-24/2011 Hb-Em 18/11/679 from 15.12.2011.
- [16] **Almeida, A.; Ferreira, F.; Fong J.; Fonseca, P. (2008).** EUP Lot 11 Motors. ISR-University of Coimbra.
- [17] **Živanović, Z.; Nikolić, Z. (2012).** The Application of Electric Drive Technologies in City Buses. InTech, *New Generation of Electric Vehicles*, capítulo 6. December 19, 2012 under CC BY 3.0 license.
- [18] **Díez, A. E.; Díez, I.C.; Lopera, J.A.; Velandia, E.; Albarracín, A.; Restrepo, M. (2012).** "Trolleybuses in Smart Grids as effective strategy to reduce greenhouse emissions". *Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International*.

- [19] **Van den Bossche, P. (1998)**. Power sources for hybrid buses: comparative evaluation of the state of the art. *Journal of Power Sources* 80 (1999) 213–216.
- [20] **Lenz, E. (2013)**. Propulsion Systems for New Generation Trolley Buses. *Electric Bus and Natural Gas-Based Transport Seminar*. Tel Aviv, 14.01.2013.
- [21] **Sopov V.I.; Biryukov V.V.; Vorfolomeyev, G.N. (2006)**. Increase of Efficiency of the Power Supply System of a Trolleybus. *Strategic Technology, The 1st International Forum on*. (18-20 Oct. 2006).
- [22] **Sopov V.I.; Biryukov V.V.; Prokushev Y.A.; Rylov Y.A. (2008)**. Electric Transport Vehicle Power-Supply System Analysis with Various Traction Networks Topologies. *Strategic Technologies, 2008. IFOST 2008. Third International Forum on*.
- [23] **Melo, G.A. ; Gonçalves, F.A.S. ; Oliveira, R.N. ; Muno, J.M. ; Santos, M. ; Canesin, C.A.(2010)**. Trolleybus Power System for Operation with AC or DC Distribution Networks. *SPEEDAM 2010 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*
- [24] **Dómine, V. (2009)**. El sistema de transporte en vía reservada de Castellón.  
Fuente: Web - <http://www.amtu.cat> (accedido – 19/06/13)
- [25] **Sustaeta Llombart, A. (2012)**. Línea 1 del tram de castellón-proyecto de servicio público de transporte. *Generalitat Valenciana, Conselleria d'infraestructures, territori i medi ambient.2012*
- [26] **Checkel, D. (2008)**. Hybrid Diesel-Electric Bus / Trolley Bus Demonstration Project: Technical Comparison of In-Use Performance - Appendix H. *University of Alberta.2008.*
- [27] **Pham, K.; Eacker, R.; Burnett, M.; Bardsley, M. (2000)**. A Step Forward or Backward? Sound Transit Opts for 1500 Vdc Traction Electrification. *Railroad Conference, 2000. Proceedings of the 2000 ASME/IEEE Joint*
- [28] **Riol Jurado, R. (2012)**. Ferrocarril y energía para todos los públicos - revisión crítica de datos sobre consumo de energía y emisiones de los medios públicos de transporte. *Fundación de los ferrocarriles españoles.*
- [29] **Biryukov, V.V.; Sopov, V.I.; Evdokimov, S.A.; Prokushev Y. A.; Spiridonov, E.A. (2007)**. T-bus power supply system optimization by the criterion of process energy loss minimization. *Strategic Technology, 2007. IFOST 2007. International Forum on*.
- [30] **Pineda, C. (2011)**. "Simulación a escala industrial de nuevo rectificador ca/cc aplicado a sistemas ferroviarios subterráneos". *Universidad de Chile.2011.*
- [31] **Visintini, R. (2004)**. Rectifiers. *CAS - CERN Accelerator School and CLRC Daresbury Laboratory: Specialised CAS Course on Power Converters, Warrington, UK, 12 - 18 May 2004, pp.133-184*
- [32] **Andersson, P.; Neergaard, K. (1999)**. World Wide Trolley Bus Technology Development. A Study for Hong Kong Environmental Protection Department. *Ecotrafic Reserch & Development AB.*  
Disponible en: [www.tbushk.org/hk%20tbus%20report.pdf](http://www.tbushk.org/hk%20tbus%20report.pdf) (accedido – 19/07/13)
- [33] **Providence Core Connector Study. (2011)**. Technical report f: streetcar traction power supply and distribution.  
Disponible en: <http://providencecoreconnector.com/wp-content/uploads/2010/09/Providence-Conceptual-Traction-Power-Supply-Distribution-FINAL-Tech-Rpt-F.pdf> (accedido – 19/07/13)
- [34] **Díez, A.; García, D.F.H.; Pérez, J.A.L.; Cortazar, A.B.; Biechl, H. (2008)**. Replanning application for massive public transportation in Colombia, based on electrical. *Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2008 IEEE/PES traction.*
- [35] **Avilés F.; Espinel S; Morales E. (2005)**. Diseño eléctrico de la extensión norte del sistema trolebús del distrito metropolitano de Quito. *XIX Jornadas de Ingeniería Eléctrica y Electrónica 2005.*

- [36] **Melfi, M.J. ; Evon, S. ; McElveen, R. (2009)**. Induction versus permanent magnet motors. Industry Applications Magazine, IEEE Volume:15, Issue:6.
- [37] **Sandberg, A. (2012)**. PM motors for railway applications. Bombardier.  
Disponibile en: [http://www.gronataget.se/templates/Page\\_618.aspx](http://www.gronataget.se/templates/Page_618.aspx) (accedido – 22/07/13)
- [38] **Hillmansén, S.; Schmid, F.; Schmid, T. (2011)**. “The Rise of the Permanent Magnet Traction Motor”, Railway Gazette International, pp30- , 34, February 2011.
- [39] **Maggetto, G.; Van Mierlo, J. (2000)**. Electric and electric hybrid vehicle technology: a survey. Electric, Hybrid and Fuel Cell Vehicles (Ref. No. 2000/050), IEE Seminar
- [40] **Zeraouia, M; Benbouzid, M.; Diallo, D. (2006)**. Electric Motor Drive Selection Issues for HEV Propulsion Systems: A Comparative Study (2005). Vehicle Power and Propulsion, 2005 IEEE Conference.
- [41] **Barrero, R.; Tackoen, X.; Van Mierlo, J. (2008)**. Improving energy efficiency in public transport: Stationary supercapacitor based Energy Storage Systems for a metro network. Vehicle Power and Propulsion Conference, 2008. VPPC '08. IEEE
- [42] **Falvo, M.C. ; Lamedica, R. ; Ruvio, A. (2012)**. Energy storage application in trolley-buses lines for a sustainable urban mobility. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS).
- [43] **Buzzoni, L; Pede, G.(2012)**. New prospects for public transport electrification. Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012
- [44] **Kuhn H., Sizmann A. (2012)**. Fundamental prerequisites for electric flying. Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2012
- [45] **Schädlich, Gunter. (2012)**, Entwicklungsstand innovativer Batteriesysteme und Ladetechnik für den Einsatz in Elektrobussen. Internationale Trolleybus Konferenz. Leipzig, 23. und 24. Oktober 2012.
- [46] **Vazquez, S. ; Lukic, S.M. ; Galvan, E. ; Franquelo, L.G. ;Carrasco, J.M. (2010)**. Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications. Industrial Electronics, IEEE Transactions on Volume:57, Issue: 12
- [47] **Meinert, M.; Rechenberg, K.; Hein, G.; Schmieder A. (2008)**. Energy efficient solutions for the complete railway system. 8th World Congress on Railway Research, 18-22 May,2008. Seoul, Korea.
- [48] **Cillero, A.; Martinelli, G.; Bouzada, P. (2008)**. Consumo de energía y emisiones asociadas al transporte por autobús y autocar. Monografías EnerTrans/13
- [49] **Zavada, J.; Blašković, J.; Miloš, K. (2010)**. Conditions for implementing trolleybuses in public urban transport. Promet – Traffic&Transportation, Vol. 22, 2010, No. 6, 467-47
- [50] **Mackinger, G. (2006)**. Trolleybuses – transport of the future. Eurobus Expo 2006 Conference
- [51] **Tica, S.; Filipović, S.; Živanović, P.; Bajčetić, S. (2011)**. Development of trolleybus passenger transport subsystems in terms of sustainable development and quality of life in cities. International Journal for Traffic and Transport Engineering, 2011, 1(4): 196 – 205.
- [52] **Ortego, A. (2012)**. Modelos sostenibles de transporte urbano. Trabajo fin de master – Universidad de Zaragoza.
- [53] **Condon, P.; Dow K. (2008)**. A Cost Comparison of Transportation Modes. Foundational research bulletin. No. 7. September 2008
- [54] **Rodríguez, A. (2006)**. Estudio de la contaminación atmosférica producida por la flota de autobuses urbanos de TUZSA en Zaragoza. Octavo Congreso nacional del Medio Ambiente (CONAMA 8).

- [55] **Secretaría de Estado de Transportes, Ministerio de Fomento (2010)**. El transporte urbano y metropolitano en España.
- [56] **Garrido, J. (1998)**. Análisis de la Movilidad en Zaragoza y su influencia en la construcción de los cinturones de circunvalación. *Geographicalia* (1998),36,33-45.
- [57] **Ayuntamiento de Zaragoza (2006)**. Análisis y diagnóstico de la movilidad de Zaragoza y su área de influencia. Plan de movilidad sostenible de Zaragoza. TOMO I: Memoria. Septiembre 2006.
- [58] **Promoción por Transport Public, CCOO, Ecología y Desarrollo.(2011)**. Diagnóstico de la red actual de transporte urbano de Zaragoza y propuestas de mejora.
- [59] **Ayuntamiento de Zaragoza (2013)**. Anejo nº 1: descripción del servicio. Pliego de prescripciones técnicas particulares del contrato de gestión del servicio público de transporte urbano de viajeros en la modalidad de concesión.
- [60] **Monzón, A.; Pérez P.; Di Ciommo, F. (2009)**. La eficiencia energética y ambiental de los modos de transporte en España. Cámaras de Comercio. Consejo Superior.
- [61] **Yepes, O.; Diez, A. (2012)**. Aplicativo para el dimensionamiento de un sistema de tracción eléctrica Universidad Pontificia Bolivariana, Cq. 1 #70-01, of. 11-259, Medellín, Colombia
- [62] **Ehsani, M. G.; Emadi, A.; Gao, Y. (2010)**. *Modern Electric, Hybrid Electric and fuel cell vehicles* (2do Ed.). USA: Taylor and Francis Group.