



Trabajo Fin de Grado

Análisis comparativo de la línea 2 del tranvía en Zaragoza frente al uso de autobuses eléctricos

Comparative analysis of line 2 of the Zaragoza tramway versus the use of electric bus

Autor

Sergio Cabrera Abad

Director

José Francisco Sanz Osorio

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2019

RESUMEN

En la actualidad existe una preocupación por la contaminación en las ciudades cada vez más grande. La mayor parte de esta contaminación proviene de la circulación de vehículos. Es por ello que es necesario un cambio hacia un modelo eléctrico que la disminuya y se empiece desde el transporte urbano. En el presente proyecto se tiene como objetivo realizar un análisis comparativo técnico y económico de la línea 2 del tranvía planteada en Zaragoza frente a la sustitución de autobuses de combustión por autobuses eléctricos.

Para ello, se ha investigado sobre la historia del tranvía y su funcionamiento, el funcionamiento del autobús eléctrico, los métodos de carga disponibles, así como su normativa y el estado del arte de las baterías

Se han estudiado las fuerzas que necesita vencer un motor para su movimiento y con ello se ha realizado un modelo en Matlab/Simulink para simular un vehículo eléctrico. Con este modelo se han calculado las necesidades energéticas del tranvía y el autobús. Para ello se ha montado en el tranvía y en un autobús para tomar datos de velocidades, tiempos y alturas con una aplicación móvil que se han usado para el modelo.

Con los datos de energía de autobús y tranvía se ha hecho un cálculo económico para ambos sistemas. Para el autobús se han considerado tres casos diferenciados: la carga durante la noche en cocheras, una carga de oportunidad al final del trayecto y dos cargas de oportunidad al inicio y final del trayecto.

Por último, se han comparado los costes de cada uno y se ha estudiado su viabilidad.

Índice

1. Objetivo	1
2. Antecedentes.....	2
2.1. Introducción	2
2.2. Historia del tranvía	3
2.3. Funcionamiento de un tranvía	5
2.4. Funcionamiento del autobús eléctrico	6
2.5. Métodos de carga.....	8
2.5.1. Carga conductiva	9
2.5.2. Carga inductiva	13
2.5.3. Carga con pantógrafo.....	17
2.6. Estado del arte de las baterías de vehículos eléctricos	19
2.6.1. Parámetros.....	20
2.6.2. Tipos de baterías.....	21
3. Datos	28
3.1. Datos del tranvía de Zaragoza	28
3.2. Datos del autobús.....	31
4. Método de cálculo del consumo.....	33
5. Consumo y Perfiles de velocidad y elevación	37
5.1. Tranvía Línea 1	37
5.2. Autobús.....	42
5.3. Tranvía Línea 2	44
6. Estudio económico	46
6.1. Tranvía	47
6.2. Autobús.....	48
6.3. Comparación	53
7. Conclusiones	55
ANEXOS	57
A. Dossier del Tranvía	57
B. Resumen de costes de IDOM 2019.	59
C. Tarifa 3.0. A.....	63
D. Tarifa 3.1.A.....	64
Bibliografía	65

1. Objetivo

Este trabajo tiene como objetivo general el análisis comparativo técnico y económico de la línea 2 Este-Oeste (aún no implantada) del tranvía de la ciudad de Zaragoza frente al uso de un autobús eléctrico que cubra la misma línea. Para ello se obtendrán los consumos energéticos del tranvía y el autobús mediante un modelo de Matlab y se hará un análisis comparativo del coste de ambos sistemas. Para ello se hará lo siguiente:

- Primero se estudiará la historia del tranvía, el funcionamiento de un tranvía y un autobús eléctrico para conocer sus características básicas; los métodos de carga disponibles para vehículos eléctricos, así como su normativa y el estado del arte de las baterías.
- Para realizar el modelo en Matlab de la línea 2 se tendrá que montar en el tranvía y el autobús para conseguir los datos de sus velocidades y tiempos. Al no disponer de la línea 2 del tranvía debido a que no está construida se caracterizará la unidad tranviaria a partir de la línea 1 Norte-Sur debido a su similitud en cuanto a distancia de paradas, recorrido, material móvil y tiempos. Para caracterizar el autobús se montará en una línea existente y se tomarán los datos.
- A continuación, se adaptarán los datos conseguidos a los de la línea 2. Para ello se crearán dos perfiles de velocidades (uno para el tranvía y otro para el autobús) basándose en la distancia entre paradas de la línea 2 y datos semejantes en esas distancias del tranvía de la línea 1 y el autobús analizado previamente.
- Seguido a esto se estudiarán las fuerzas que necesita vencer el motor para su movimiento y con ello se elaborará un modelo en Matlab/Simulink que permita obtener los consumos a partir de los datos de los vehículos.
- Una vez conocidos los consumos se hará un cálculo económico de las necesidades de ambos sistemas. Para el caso del autobús se tendrán tres casos diferenciados a analizar.
 - Carga durante la noche al final de todo el servicio de trabajo.
 - Carga de oportunidad sólo al final del trayecto.
 - Carga de oportunidad al inicio y final del trayecto.
- Por último, se compararán los resultados obtenidos y se estudiará su viabilidad.

2. Antecedentes

2.1. Introducción

Ya desde sus orígenes el ser humano ha mostrado la necesidad de desplazarse continuamente. Desde los primeros pueblos nómadas en los que el ser humano necesitaba moverse para sobrevivir hasta la actualidad en la que necesitamos desplazarnos diariamente. El desarrollo de medios de transporte ha sido y es básico para nuestra calidad de vida. Por lo tanto, a lo largo de la historia se han desarrollado diversidad de medios de transporte y vehículos con distintos modos de funcionamiento, entre los que se incluyen el autobús y el tranvía, objetos de estudio en este trabajo.

Existe una preocupación por la contaminación en las ciudades cada vez más grande. La mayor parte de la contaminación proviene de la circulación de vehículos de combustión interna por la ciudad. Por ello las leyes cada vez están siendo más restrictivas obligando a cumplir ciertas emisiones. A pesar de restringir cada vez más la contaminación producida por el transporte, introduciendo vehículos híbridos y leyes restrictivas todavía existen sustancias nocivas para el ser humano en el ambiente. No hace falta irse muy lejos para ver la constante polución de ciudades como Madrid en la que frecuentemente deben regular la circulación de los coches.

Según la Agencia Europea de Medio Ambiente (AEMA) España es el sexto país con más muertes prematuras por contaminación en Europa en los que los más afectados son los niños. [1].

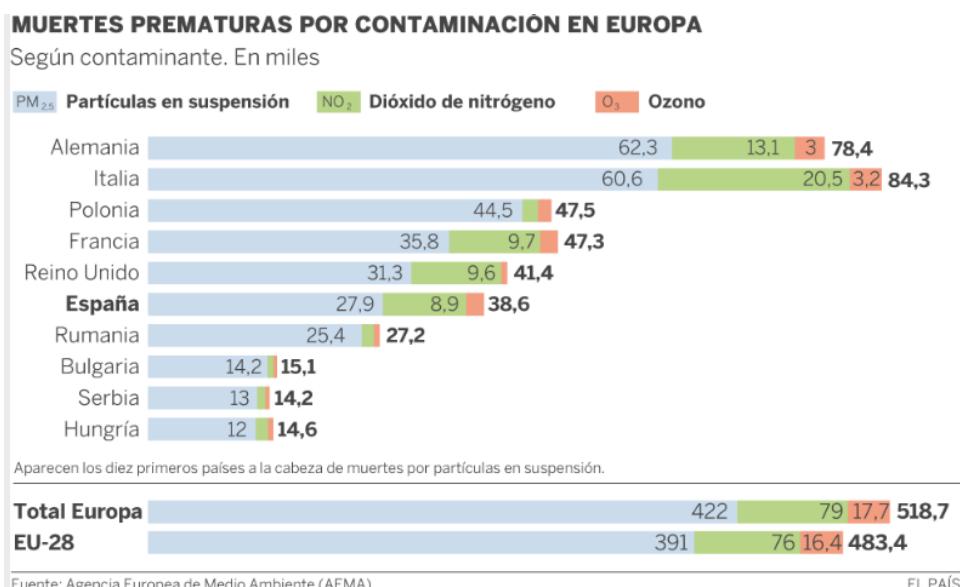


Ilustración 1: Muertes causadas por la contaminación en Europa . Fuente: El País.

Es necesario por lo tanto un cambio en el transporte de las ciudades para obtener una mejora en la calidad del aire. Para ello lo primero que se debería realizar es la electrificación del transporte público, introduciendo flotas de autobuses eléctricos o implantando nuevas líneas de tranvía. El uso de vehículos eléctricos además de reducir los niveles de contaminación reduciría también el consumo notablemente debido a la diferencia de precios entre la electricidad y la gasolina y la eficiencia del motor eléctrico. Este cambio en el transporte público conferiría a las ciudades de modernidad y conciencia ecológica frente al mundo.

Además, se podría contar con autobuses v2g (“vehicle to grid”) para poder transferir energía desde las flotas de autobuses eléctricos a la red y así ayudar a estabilizarla en momentos de necesidad. Así se podría incrementar el uso de energías renovables como la eólica que produce alta inestabilidad y evitar dependencias de las centrales térmicas.

2.2. Historia del tranvía

El tranvía (del inglés tramway, de tram, riel plano, y way, vía) es un vehículo que circula sobre raíles en el interior de una ciudad o sus cercanías y que se usa principalmente para transportar viajeros. En algunos casos la vía férrea del tranvía puede transitar por vías públicas exclusivas y hasta cubrirse de hierba, integrándola aún más al paisaje urbano [2].

El primer tranvía apareció en el sur de Gales en 1804 y hacía un trayecto desde Mumbles a Swansea. Era un vehículo propulsado por tracción animal que realizaba trabajos de minería transportando piedra caliza sobre carriles. En 1807 recibió el permiso para llevar pasajeros.

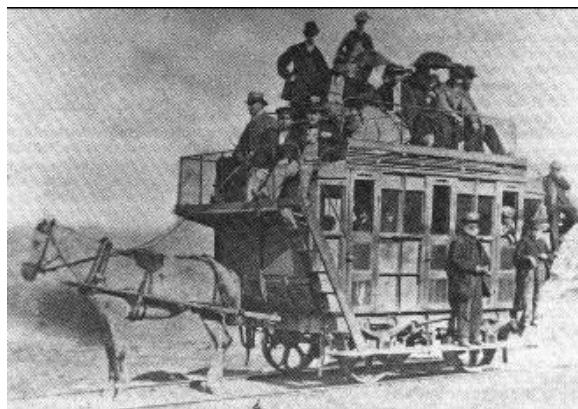


Ilustración 2: Tranvía Swansea

En 1832, se inauguró en Nueva York el primer tranvía de Estados Unidos como una evolución de los omnibuses. Estos tranvías utilizaban caballos o mulas para moverse, aunque raramente se usaban otros animales o humanos en situaciones de emergencia. En Francia (1839) se realizó una línea Montrison-Montrond que tenía permiso para la tracción a vapor, pero sólo se usó con tracción animal. En 1848 fueron apareciendo tranvías en Berlín, Budapest, Birmingham, Leningrado, Lisboa, Londres, Manchester y París. Inicialmente los raíles de estos medios de transporte iban sobre la calzada, pero a partir de 1852 debido a los accidentes que causaba a los peatones, fueron enterrados.

En España los tranvías de tracción animal llegaron primero a Madrid en 1871 y a Barcelona y Bilbao en 1872, siguiéndoles Valencia (1876), Valladolid (1881) y Cartagena (1882). En 1900 había un total de 20 ciudades que utilizaban tranvías de tracción animal.

Los primeros tranvías mecánicos funcionaban con vapor. Hubo dos tipos de tranvías a vapor. El más común tenía una pequeña locomotora al inicio similar a un tren pequeño. El segundo tenía el motor en el cuerpo del tranvía. Estos tranvías tenían modificaciones como partes protegidas por temas de seguridad. Los motores funcionaban con carbón, pero a veces se usaba coque para evitar emitir humos. Estos tranvías desaparecieron con la llegada del tranvía eléctrico a finales de los 1890s.

En España se introduce la tracción a vapor en 1877 y en 1879 empieza a funcionar la línea Madrid-Leganés con tracción a vapor.

Otro sistema fue el Cable car. El vagón es enganchado a un cable inserto en la calzada que se mueve a velocidad constante y es arrastrado por él. Este sistema fue probado por primera vez en San Francisco en 1873 y después se instalaron sistemas similares en Chicago, Melbourne, Sidney y Dresden. Los Cable Cars conllevaban un importante gasto en infraestructura y mantenimiento. Esto junto con roturas frecuentes del cable que conllevaba tener que cambiar todo el cable y cesar el servicio, hizo que los sistemas de Cable Car fueran reemplazados en la mayoría de las ciudades con la llegada de los tranvías de tracción eléctrica. Algun Cable Car sobrevive en la actualidad, como por ejemplo, el de San Francisco, utilizado como atracción turística.



Ilustración 3: Cable Car de San Francisco

A finales del siglo XIX y comienzos del siglo XX se utilizaron tranvías propulsados con gas, nafta o carbón. Estos tranvías necesitaban ser recargados una vez al día y no fueron muy utilizados.

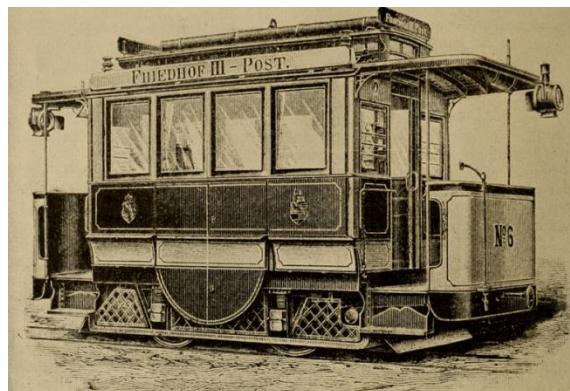


Ilustración 4: Tranvía propulsado a gas, Alemania.

En 1880 Fyodor Pirotsky modificó un tranvía de tracción animal para hacerlo funcionar con electricidad y en 1881 se inauguró la primera línea comercial con tracción eléctrica en Berlín a manos de Werner VonSiemens. A finales de siglo XIX y comienzos del siglo XX se instalaron tranvías eléctricos por ciudades de todo el mundo.

La primera ciudad en España en introducir el tranvía eléctrico fue en Bilbao en 1896. En 1899 se inauguraron las líneas de tranvía de Madrid y Barcelona, y en Zaragoza comenzó el tranvía eléctrico en el año 1902 con la línea de Torrero.

2.3. Funcionamiento de un tranvía

El sistema de distribución de media tensión (MT) de la ciudad proporciona la potencia necesaria para los tranvías a través de subestaciones rectificadoras que permiten alimentar el sistema de tracción con corriente continua (DC) a una tensión de entre 600 y 750 V. Para tranvías de zonas interurbanas se alimentan en corriente alterna (AC) con niveles de tensión de entre 15 y 25 kV [3].

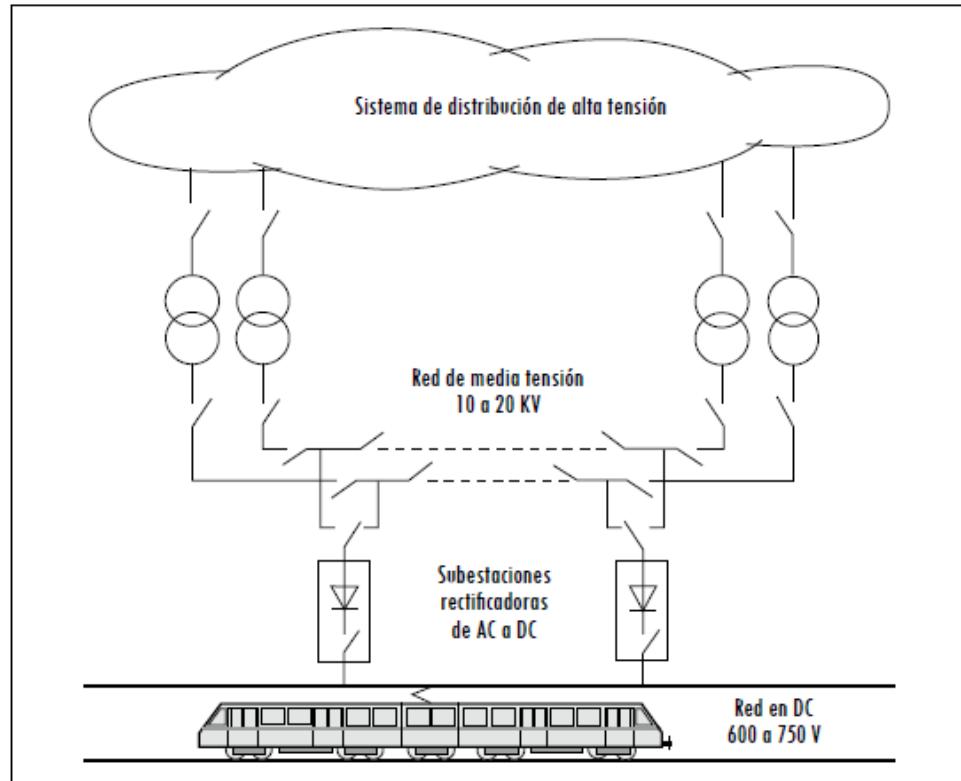


Ilustración 5: Sistema de alimentación en DC para un tranvía.

El tranvía recibe la energía a través del pantógrafo y al pasar por el sistema de tracción se ajusta la tensión, frecuencia y tipo de corriente a la necesaria para los motores para accionar las ruedas.

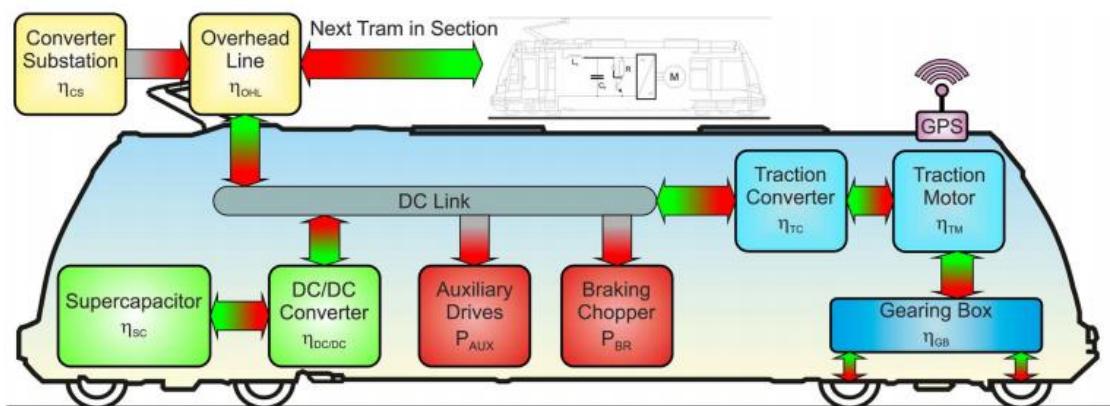


Ilustración 6: Esquema de un tranvía urbano [4]

Actualmente la mayoría de los tranvías llevan instalados supercondensadores además de las baterías para poder solventar tramos sin catenaria. Como es el ejemplo de los modelos Urbos de CAF. Este sistema de Acumulador de Carga Rápida (ACR) permite recuperar además energía durante el frenado. Los supercondensadores son recargados en las paradas, con el pantógrafo en marcha y a través del frenado.

Existen dos tipos de frenado para el tranvía: el frenado con reóstato y el frenado regenerativo. En el frenado con reóstato la energía generada al frenar se desaprovecha y se pierde en forma de calor. El frenado regenerativo es el más utilizado en sistemas de tranvía. Se utiliza un freno dinámico regenerativo que hace mover al motor produciendo electricidad que se utiliza para recargar los supercondensadores y baterías o devolver electricidad a la red de modo que la energía la pueda aprovechar otro tranvía. Cabe destacar que no se puede recuperar el 100% de la energía de frenado, si no entre un 40% y un 50% [5], [6] de la energía generada en el frenado. Normalmente se utiliza la combinación de ambos frenos, eliminando la energía que no se puede aprovechar a través del reóstato.

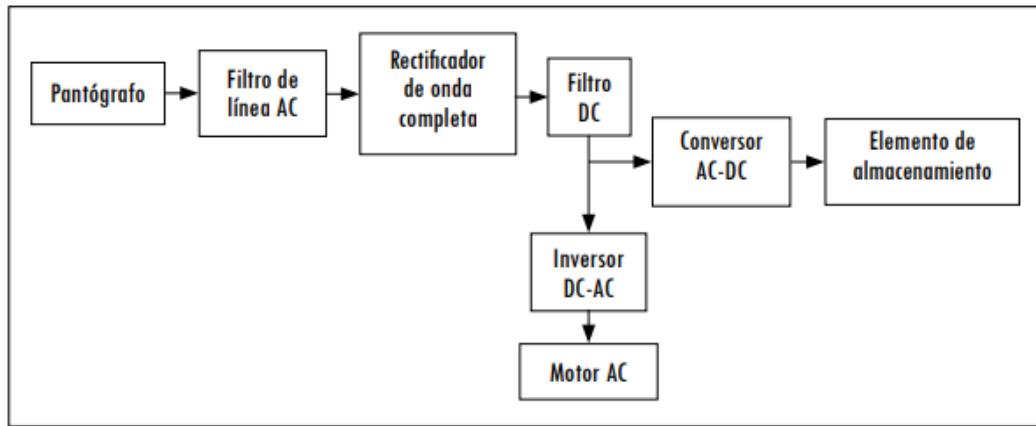


Ilustración 7: Diagrama de frenado regenerativo para un tranvía interurbano alimentado en AC

2.4. Funcionamiento del autobús eléctrico

Un autobús eléctrico es un autobús que utiliza un motor eléctrico para ser propulsado. Existen dos tipos principales de autobús eléctrico:

- Trolebús: Omnibus eléctrico alimentado por una catenaria de dos cables superiores desde donde obtiene la energía eléctrica mediante dos astas. No hace uso de vías especiales o carriles en la calzada.
- Autobús eléctrico de baterías y/o supercondensadores: Utilizan energía almacenada previamente a bordo en baterías o supercondensadores.



Ilustración 8: Trolebús y autobús eléctrico de baterías

En este trabajo vamos a centrarnos en el autobús con sistema de almacenamiento de baterías. Los componentes básicos de éste, así como de cualquier VE son los siguientes.

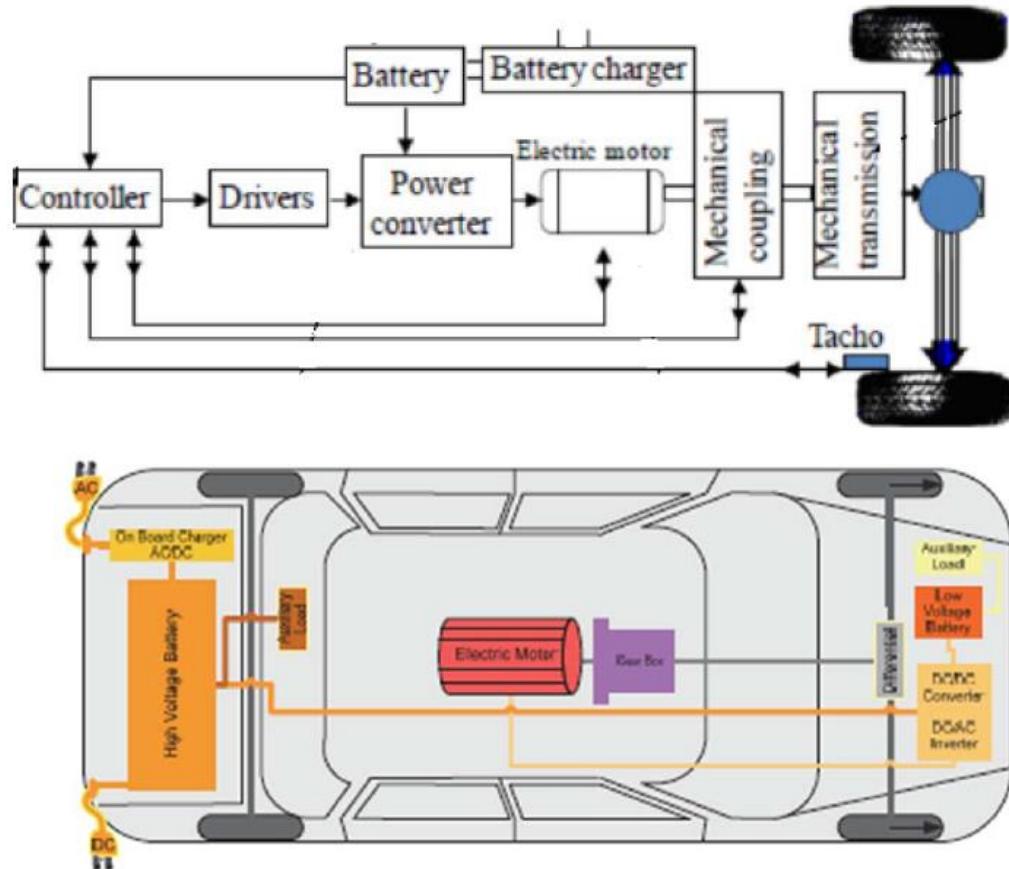


Ilustración 9: Esquema vehículo eléctrico

- **Transmisión:** Es la conexión entre el motor y las ruedas de tracción. Se utiliza normalmente una única relación de velocidades (single-speed) porque los motores eléctricos son capaces de generar su par máximo desde el arranque. Actualmente se están desarrollando cajas de transmisión de 2 a 3 velocidades para conseguir mejores eficiencias.
- **Motor eléctrico:** Se encarga de transformar la energía eléctrica en movimiento o generar energía a partir del movimiento (frenado regenerativo). Su principal

clasificación se basa en el tipo de corriente que los alimenta, continua (DC) o alterna (AC). Los motores que se utilizan en tracción eléctrica son el motor DC Brusshed, DC Brushless, el motor de corriente asíncrono, el motor síncrono de Imanes Permanentes y el motor de reluctancia.

- **Convertidor de potencia:** Es el encargado de adaptar la energía proveniente de la batería para su uso en el motor. Así pues, adapta las formas de onda y el valor de la tensión. En el vehículo eléctrico pueden ser DC/DC, DC/AC o AC/DC.
- **Baterías:** Son los elementos que almacenan la energía que necesita el motor. Son acumuladores eléctricos que constan de un ánodo y un cátodo para generar un flujo de electrones que produce la corriente. Las más utilizadas hoy en día son las baterías de ión litio.
- **Controladores:** Se encargan de controlar la velocidad del motor, manejar todos los aspectos del control de la potencia y la autonomía de la batería. Cargador de baterías: Elemento encargado de recargar las baterías con una toma de corriente. Puede estar incluido en el coche o ser externo al vehículo.

2.5. Métodos de carga

Los métodos de recarga de vehículos eléctricos están en constante evolución e investigación. Actualmente existe la posibilidad de cargar los vehículos eléctricos en tu propio hogar tardando de media entre 6 y 8 horas de carga, pero desgraciadamente en España no se dispone de un gran número de instalaciones adaptadas en las ciudades para una carga rápida del vehículo eléctrico. En función del tiempo de recarga de las baterías existen cinco tipos de recarga que se suelen resumir en dos, recarga lenta y recarga rápida [7].

- **Recarga super-lenta:** La intensidad de corriente es limitada a 10 A al no disponer de una instalación eléctrica adecuada. Esta recarga dura entre 10 y 12 horas.
- **Recarga lenta:** También llamada recarga convencional. Se realiza a 16 A a una potencia de unos 3,6 kW. Esta recarga puede durar entre 6 y 8 horas.
- **Recarga semi-rápida:** Se realiza a una potencia de unos 22 kW y la recarga puede llevar en torno a 1 hora o 1 hora y cuarto.
- **Recarga rápida:** Se necesitan potencias altas de entre 44 y 50 kW. No se realiza una carga del 100% sino que se carga alrededor del 80-90 %. Esto puede llevar una media hora.
- **Recarga ultra-rápida:** Es poco usada y está todavía en desarrollo. Se utiliza en vehículos eléctricos con supercondensadores (tranvías o algunos autobuses eléctricos). La potencia de recarga es muy elevada y se pueden recargar las baterías en tiempos de entre 5 y 10 minutos. Cabe destacar que algunas baterías, como las de ión litio, no soportan temperaturas tan elevadas y se produce un gran deterioro de su vida útil.

Dependiendo de la forma en que se cargan los vehículos eléctricos existen tres métodos de carga distintos que son por conducción, por inducción y por pantógrafo.

2.5.1. Carga conductiva

Es la tecnología más usada y que más se ha desarrollado por el momento. Se basa en el uso de cables para conectar el vehículo con una toma de corriente. Es una tecnología barata que presenta la ventaja de ser una tecnología madura y tener un elevado grado de libertad con respecto al posicionamiento del vehículo frente a las otras opciones. Esta tecnología tiene un gran impacto visual y puede provocar una incomodidad para los peatones. Además, es necesaria una intervención del usuario que puede provocar riesgos y está abierta a la posibilidad de actos vandálicos.

Existen muchos dispositivos de carga para los vehículos eléctricos. Éstos se diferencian principalmente unos de otros en diferentes aspectos:

- La potencia que pueden proporcionar, y por lo tanto el tiempo de recarga.
- La información que intercambian entre el vehículo y la toma de corriente.
- El conector físico que debe encajar en el vehículo.

2.5.1.1. Normativa

Para la recarga conductiva se han estandarizado 4 modos de carga diferenciados en características y uso. Los **modos de carga** dependen del nivel de comunicación entre el vehículo eléctrico y la infraestructura de recarga y el control que se puede tener de este proceso (ver el estado, parar la carga, reanudarla, o devolver electricidad a la red).

- **Modo 1:** No tiene comunicación con la red y la conexión se realiza con una toma normalizada. El dispositivo de regulación de la carga está incluido en el VE. La carga se realiza con una corriente de 16 A a una potencia de 3,7 kW si es monofásico y a 11 kW si es trifásico. Se utiliza un conector Schuko y es usado normalmente para cargar pequeñas motos, bicis y patinetes eléctricos.
- **Modo 2:** Tiene un grado de comunicación con la red bajo. Cuenta con un piloto de control para garantizar la correcta conexión del vehículo a la red de recarga. Se sigue usando un conector Schuko. Este modo corresponde a la carga lenta pensada para la recarga doméstica. Puede ser recarga monofásica a 7,4 kW o trifásica a 22kW de potencia.
- **Modo 3:** Es obligatoria una comunicación entre el vehículo y la toma de corriente. Existe una conexión directa del VE a la red alterna por toma de recarga y los dispositivos de control y protecciones se encuentran dentro de propio punto de recarga. Se utilizan conectores SAE J1772, Mennekes, Combo o Scame. La potencia máxima que se utiliza en monofásico es 7,4 kW y en trifásica 22kW.
- **Modo 4:** Existe una comunicación obligatoria entre el vehículo y la toma de corriente. El dispositivo de regulación de la carga, a diferencia de los otros modos, está incluida en la toma de recarga. Utiliza un cargador tipo C externo al vehículo. La recarga se realiza en corriente continua, a diferencia de los otros modos. La potencia máxima es de 240 kW, lo que da lugar a recargas rápidas. Estas instalaciones tienen un precio elevado y utilizan conectores CHAdeMO o Combo.

Según la norma UNE-EN 61851 existen tres **tipos de conexiones** posibles entre el vehículo y la toma de recarga.

- **Tipo A:** El cable de alimentación está incorporado en el vehículo para conectarse a la estación de carga.
- **Tipo B:** Es un cable portátil con conectores en ambos extremos.
- **Tipo C:** El cable de alimentación va unido a la instalación de recarga para conectarse al vehículo.

2.5.1.2. *Conectores*

Los tipos de conectores no están todavía estandarizados a nivel mundial, así que hay distintos tipos de conectores con diferentes tamaños y propiedades.

-**Conector Schuko:** Conector con dos bornes y toma de tierra que soporta corrientes de hasta 16 A, solo se usa para recarga lenta y no tiene comunicación integrada. Responde al estándar CEE 7/4 Tipo F y es compatible con las tomas de corriente europeas. Es válido para el Modo 1 y el lado de red del Modo 2. Es utilizado además en múltiples electrodomésticos.



Ilustración 10: Conectores Schuko

-**Conector SAE J1772:** También conocido como Yazaki. Es un estándar norteamericano. Conector tipo 1 que tiene cinco bornes; dos de corriente, el de tierra, uno de detección de la proximidad del vehículo y otro de control de las comunicaciones con la red. Mide 43 mm de diámetro y utiliza 32 A y 250 V en corriente alterna.



Ilustración 11: Conector SAE J1772

-Conector Mennekes: Conector alemán de tipo 2. Tiene 7 bornes, cuatro para la corriente (trifásica), el de tierra y dos para comunicaciones (piloto de control y detector de conexión). Este conector permite cargas monofásicas desde 230 V y 16 A hasta cargas trifásicas de 400 V y 63 A, lo que se traduce en potencias desde 3,7kW (monofásica) hasta 44kW (trifásica).



Ilustración 12: conector Mennekes

-Conector Scame: Creado por la EV Plug Alliance, formada por los fabricantes Scame (compañía italiana), Schneider Electric y Legrand y principalmente apoyado por los fabricantes franceses. Usa un conector tipo 3 que tiene 5 o 7 bornes, ya sea para corriente monofásica o trifásica, tierra y comunicación por red. Soporta 16 A en monofásica y 32 A en trifásica alcanzando potencias de hasta 22 kW.



Ilustración 13: Conector Scame

-Conector Combo: Es el cargador que se ha optado por usar en Europa para carga en continua. Este conector ofrece gran versatilidad, puesto que se trata de un conector compuesto por un conector AC tipo 2 y un conector DC con dos terminales. Puede trabajar tanto en modo 3 con corriente alterna trifásica como en modo 4 con corriente continua con una sola toma.



Ilustración 14: Conector Combo

En la ilustración 14 se puede ver la parte del conector AC (parte superior) y la parte del conector DC (parte inferior).

Existen 2 tipos de cargadores combo uno para Europa y otro para Estados Unidos. El utilizado en Europa es el Combo 2 que puede alcanzar potencias de 44 kW en alterna y de 170 kW en continua.

Conecotor	Carga	Modelo	Modo carga	Tensión (V)	Intensidad (A)	Potencia (kW)
Combo 1	AC	Tipo 1 (IEC 62196-2, SAE J1772)	Modo 4	250	32	13
	DC	Combo 1 (IEC 62196-3 Draft)	Modo 3	600	150	90
Combo 2	AC	Tipo 2 (IEC 62196-2)	Modo 4	480	63	44
	DC	Combo 2 (IEC 62196-3 Draft)	Modo 3	850	200	170

Tabla 1: Características del conector Combo 1 y 2

-Conector CHAdeMO: Conector desarrollado por la asociación japonesa formada por la Tokyo Electric Power Company (TEPCO), Nissan, Mitsubishi, Fuji Heavy Industries (Subaru) y Toyota con el fin de normalizar las cargas rápidas en corriente continua. Tiene 10 bornes, toma de tierra y comunicación con la red. También posee un gatillo para garantizar seguridad y un led que se ilumina indicando que se está cargando. Trabaja a 500 V y a 120 A alcanzando una potencia máxima de 60 kW.



Ilustración 15: Conector CHAdeMO

2.5.2. Carga inductiva

Los sistemas de transferencia de potencia inalámbricos (Wireless Power Transfer) han sido utilizados desde hace mucho en microondas, láseres, las ondas de las radios y ultrasonidos. En este caso para transmitir potencia a los vehículos eléctricos se usa la resonancia electromagnética o carga inductiva que puede transmitir potencia mediante campos magnéticos a una distancia de varios centímetros a través del aire. El desarrollo de sistemas de carga inductiva para vehículos eléctricos ha ganado impulso en la última década, ya que es un proceso de carga más seguro al evitar que se produzca contacto con los usuarios, tiene un menor impacto visual en las ciudades y no es afectado por inclemencias del tiempo, la suciedad y vandalmismos.

Estos sistemas de transferencia de potencia mediante acoplamiento inductivo están formados por dos bobinas eléctricamente aisladas y acopladas magnéticamente a través del aire. La bobina primaria se encuentra en el suelo y la bobina del secundario instalada en el vehículo para recargar las baterías. Este sistema de carga tiene actualmente eficiencias del 90%, lo que es aproximadamente igual a los sistemas de carga conductiva [8].

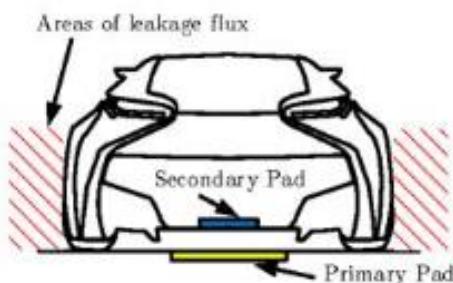


Ilustración 16: Carga inductiva de un vehículo eléctrico

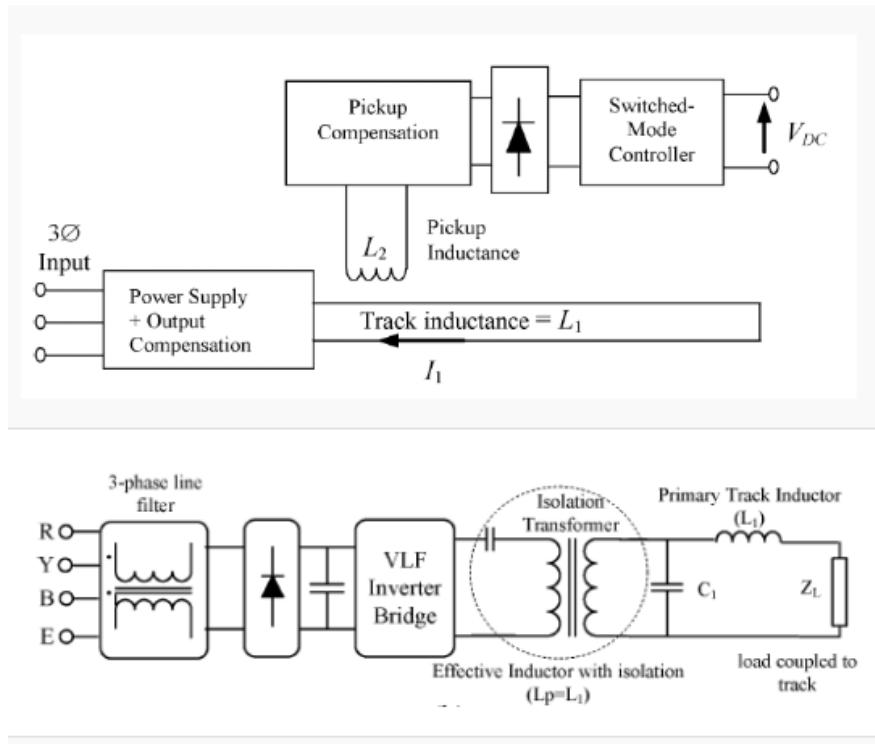


Ilustración 17: Ejemplo de sistema WPT

En la ilustración 17 se muestra un ejemplo típico de sistema WPT. El circuito toma la tensión AC de la red y es rectificada a DC con los circuitos necesarios de corrección del factor de potencia. La señal DC es transformada a una señal AC de alta frecuencia y conectada al secundario a través de transformador. Del secundario del transformador la señal es rectificada de nuevo para alimentar y cargar la batería [9].

Estos sistemas con una elevada separación de las bobinas son el caso conocido como bobinas débilmente acopladas. En estos casos debido a los elevados flujos dispersos y a un coeficiente de inducción mutua bajo, se necesita trabajar a elevadas frecuencias (varios kHz) para obtener una elevada eficiencia transfiriendo potencia. [10]

En los sistemas de acoplamiento inductivo es necesario realizar una compensación mediante un condensador en el secundario del transformador para incrementar la potencia transferida a la carga. También se utiliza la compensación en el devanado primario para reducir la corriente recibida de la fuente de alimentación. Estos condensadores se pueden colocar en paralelo y en serie y cada topología tiene sus ventajas e inconvenientes.

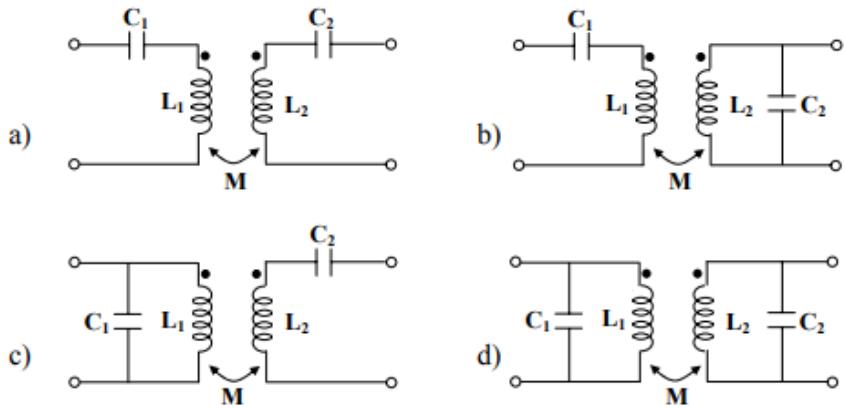


Ilustración 18: Tipos básicos de compensaciones: a) SS; b) SP; c) PS; d) PP

Dependiendo de la aplicación para la que se desee usar unas topologías pueden resultar mejores que otras, puesto que el comportamiento frente a variaciones de carga, frecuencia, posicionamiento o distancia cambia con cada sistema. Las topologías con compensación serie en secundario se comportan como una fuente de tensión y los sistemas con compensación paralelo en secundario como fuente de corriente. La compensación serie en el primario tiene un comportamiento inestable cuando se desalinean las bobinas aumentando la potencia y pudiendo dañar la fuente; mientras que la compensación en paralelo en el primario tiene un comportamiento estable, pero reduce bruscamente la potencia transferida cuando se produce desalineamiento.

Por lo tanto, para conseguir una compensación mejor frente a desalineamientos existe una mezcla de la SS y PS. Esta nueva topología SPS tiene un condensador en paralelo y otro en serie en el primario y un condensador serie en el secundario.

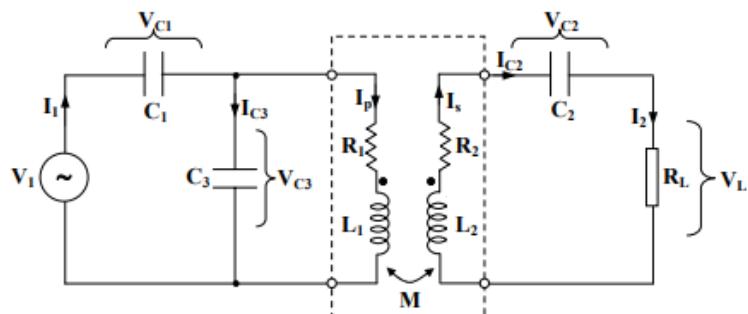


Ilustración 19: Compensación SPS

Este tipo de carga tiene el riesgo de que se realice cerca de personas exponiéndolos a radiación electromagnética. Por lo tanto, es necesario un apantallamiento adecuado para cumplir con la normativa (norma ICNIRP 2010) y que la radiación sea menor que los límites máximos permitidos ($27 \mu\text{T}$). Para el apantallamiento del campo magnético son usados principalmente dos materiales, ferrita y aluminio.

La presencia de aluminio reduce el coeficiente de inducción mutua (M) y el coeficiente de inducción (L) de las bobinas, reduciendo notablemente la capacidad de transferencia de potencia.

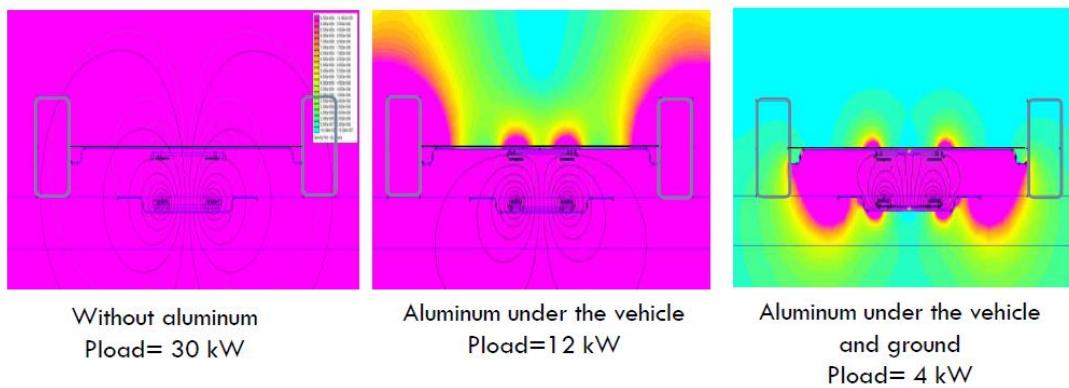


Ilustración 20: Distribución del campo magnético sin aluminio y con aluminio

En la ilustración 20 se observa como el campo magnético queda aislado entre el vehículo y el suelo debido al apantallamiento con aluminio y se reduce la potencia transferida. Para mantener la potencia nominal se utiliza a la vez un apantallamiento con ferrita entre las placas de aluminio, ya que la ferrita aumenta el coeficiente de inducción mutua (M) y el coeficiente de inducción (L).

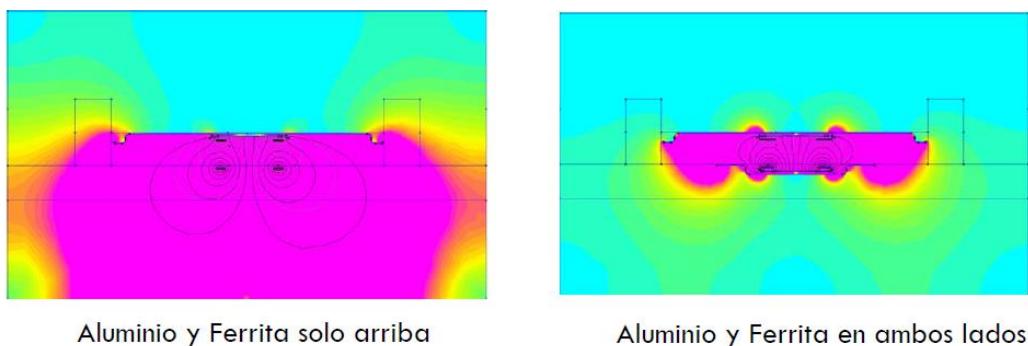


Ilustración 21: Apantallamiento con aluminio y ferrita

Este nuevo diseño mantiene la capacidad de transferencia de potencia aislando el campo magnético, pero tiene una eficiencia menor debido a las pérdidas en el aluminio y ferrita.

Este modo de carga puede realizarse de forma **estática** mediante sensores para garantizar el correcto posicionamiento o de forma **dinámica**, es decir mientras se conduce. En esta segunda opción no existe una única bobina primaria, sino que se instalan varias bobinas a lo largo de un tramo.

Recientemente la empresa alemana Magment ha desarrollado un hormigón magnetizable que mantiene las propiedades físicas necesarias y se puede utilizar para recargar un vehículo eléctrico tanto de forma estática como dinámica. Esta empresa ha recibido el premio German Innovation Award 2018 por esta invención.

La capa de hormigón magnetizable lleva en su interior partículas de ferrita recicladas de desechos. También contiene hierro, manganeso y zinc provenientes de la ferrita y aluminio. La ferrita se puede obtener de chatarra de fábricas y con una molienda ser reutilizado para este proceso, lo que trae la ventaja de ser un proceso low cost. Además, no hay trazas de CO₂ que

es uno de los inconvenientes del cemento, teniendo una baja huella de carbono alrededor de 90 kg de carbono por tonelada de cemento [11].

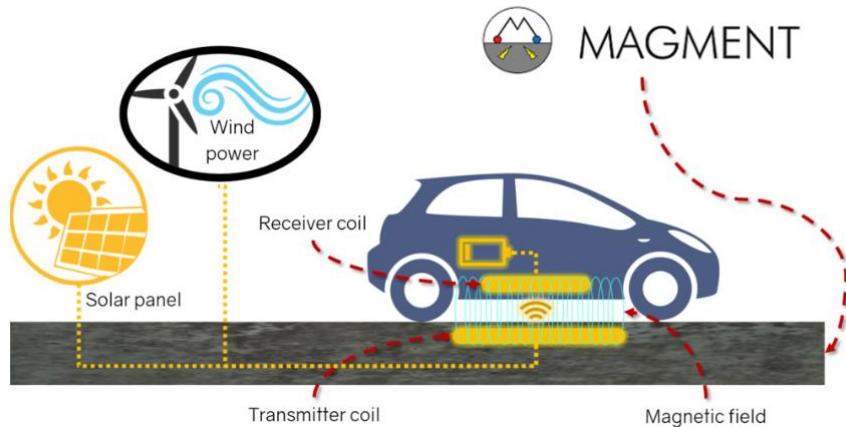


Ilustración 22: Sistema de recarga con hormigón magnetizable (Magment) [12]

La ventaja del hormigón magnetizable radica en la forma versátil del sustrato para maximizar la eficiencia de transmisión y que tiene las mismas propiedades mecánicas que el hormigón haciéndolo compatible con los materiales normalmente usados en las superficies de la carretera. Además, es económico, no necesita de mantenimiento y es inmune al vandalismo. El material también se puede usar en el receptor del vehículo debido a su baja densidad y por tanto peso. Con este material la empresa afirma que se pueden conseguir eficiencias de transmisión en coches de hasta 95%.

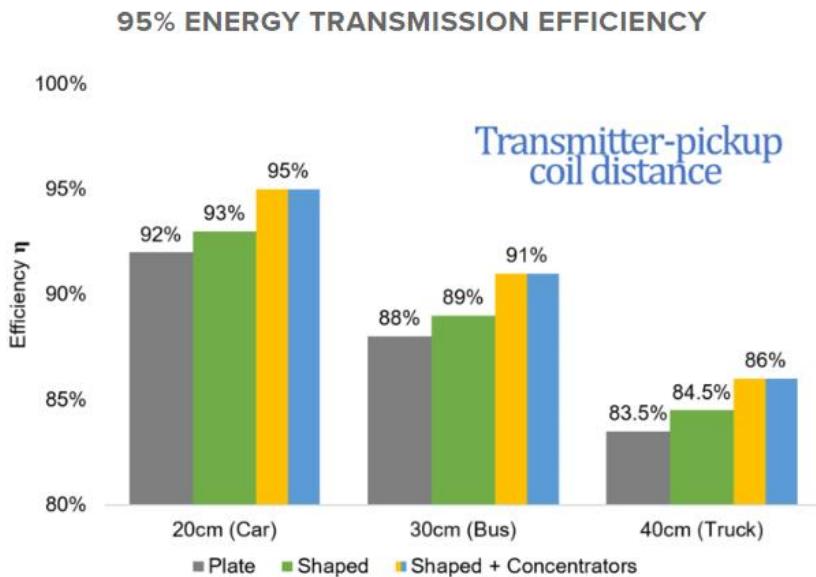


Ilustración 23: Eficiencia de transmisión Magment [12]

2.5.3. Carga con pantógrafo

La carga por pantógrafo ha sido muy utilizada en trolebuses, tranvías y locomotoras. Es utilizada recientemente para recargar los vehículos eléctricos como autobuses urbanos para

recargar sus baterías de forma estática. Este tipo de recarga no deja de ser un tipo de carga conductiva ya explicada anteriormente.

El pantógrafo es un sistema articulado de barras ubicado en el techo del vehículo para posibilitar la transmisión de energía eléctrica desde un conductor aéreo o catenaria. En el caso de los vehículos ferroviarios como los tranvías se recibe la energía eléctrica de la catenaria para su funcionamiento de forma dinámica y de forma estática en las paradas para recargar las baterías y supercondensadores.

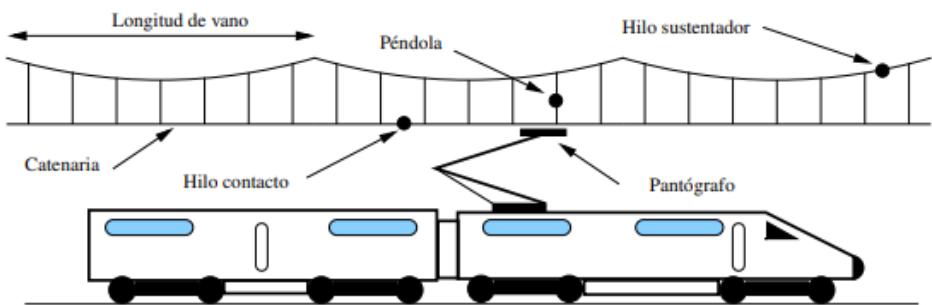


Ilustración 24: Esquema del sistema catenaria-pantógrafo

Este sistema de carga dinámica con pantógrafo ha sido utilizado en 2017 en una autopista en Suecia. Se ha realizado un tramo de catenaria de dos kilómetros en una autopista muy frecuentada por camiones para el transporte de mercancías. Estos camiones son vehículos híbridos dotados de un pantógrafo inteligente retráctil que se alimentan de energía eléctrica [13].

En el caso de la recarga por pantógrafo de forma estática en paradas de autobuses urbanos se utilizan unos postes o pilares parecidos a farolas y que dependiendo de cómo sean se pueden efectuar dos métodos para carga:

- **Método directo:** El pantógrafo o parte móvil se encuentra ubicada en el autobús y esta se extiende para conectarse al poste e iniciar la recarga.
- **Método inverso:** El pantógrafo o parte móvil está ubicada en el poste de recarga y se extiende para conectarse al autobús e iniciar la recarga.

En España se ha instalado un punto de recarga ultrarrápida por pantógrafo para autobuses eléctricos en Barcelona. Este punto se ha instaurado en la línea H16 a través de un proyecto de promoción de la movilidad eléctrica urbana ZeEUS (Zero Emission Urban Bus System). Esta iniciativa de Endesa en colaboración con TMB (Transports Metropolitans de Barcelona) permite una recarga de la batería del autobús de hasta el 80% en un tiempo de 5 a 8 minutos utilizando una potencia de 400 kW. En Zaragoza también se están probando varios autobuses eléctricos con pantógrafos instalados en cocheras que permiten cubrir con esa carga el 70% de la autonomía de una línea [14].

Este método de recarga tiene los **inconvenientes** de poder sufrir ante las inclemencias del tiempo y vandalismo al estar expuesto, averías y tener un impacto visual notable.

2.6. Estado del arte de las baterías de vehículos eléctricos

Una gran preocupación en la industria del automóvil es la contaminación que provocan los vehículos de combustión interna y de los efectos que la contaminación genera en el ambiente. Por ello hoy en día estamos viendo un gran desarrollo tecnológico de los vehículos eléctricos. Su principal inconveniente son las baterías que no logran alcanzar autonomías adecuadas para largos usos de los vehículos. Por ello se están desarrollando e investigando baterías nuevas y la tecnología va cambiando rápidamente. En este apartado vamos a abordar los distintos tipos de baterías que se han usado y se usan en vehículos eléctricos, así como la descripción de los parámetros más importantes de éstas.

Las baterías de los vehículos eléctricos son acumuladores eléctricos que contienen varias celdas electroquímicas que convierten la energía química almacenada en electricidad. Cada celda consta de un electrodo positivo, o cátodo, un electrodo negativo, o ánodo, y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, permitiendo que la corriente fluya fuera de la batería para alimentar el motor eléctrico del vehículo y el resto de componentes eléctricos. Se trata de un proceso reversible por lo que pueden recargarse.

En VEs la batería es la única fuente de energía, por lo que debe ser diseñada para trabajar de forma permanente. Debe tener la capacidad adecuada para la autonomía deseada con un margen de reserva de un 20 %, así la profundidad máxima de descarga (DOD) debe ser del 80%. Es necesario un margen de un 5% para el frenado regenerativo. Así la batería debe dar el 100 % de la capacidad requerida, tener un SOC del 95% y un DOD máximo del 80%. Se suelen optimizar para una capacidad de descarga de 1C aunque deben aceptar transitorios de 3 C a 5 C para frenado regenerativo y carga rápida (puede ser incluso mayor).

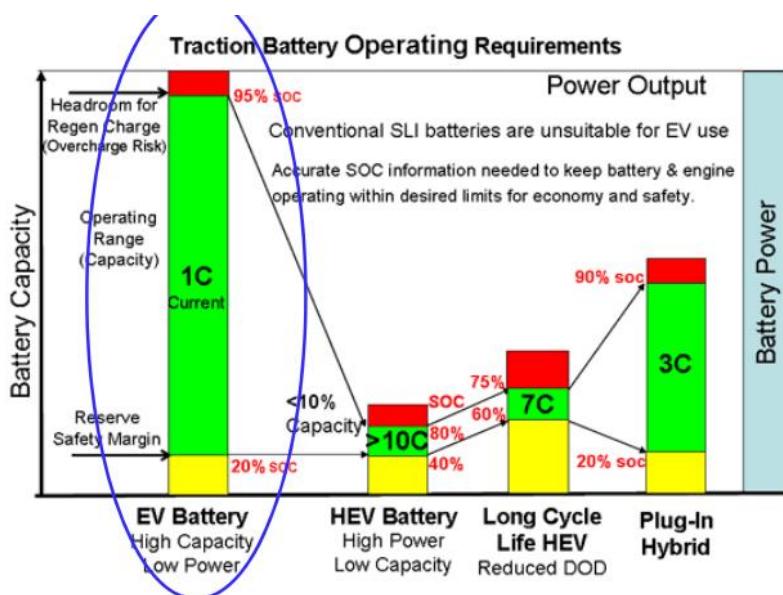


Ilustración 25: Criterios de diseño baterías VE

2.6.1. Parámetros

Los distintos parámetros y características de las baterías son:

- **Tensión o potencial (V):** Es un parámetro muy importante puesto que determina el número de celdas a utilizar en serie para alcanzar el nivel de tensión de aplicación. Viene fijado por el potencial de reducción del par redox y suele estar entre 1 V y 4 V por celda.
- **Intensidad nominal (A):** Es la corriente que puede circular por la batería en régimen permanente durante el tiempo establecido por la misma.
- **Capacidad nominal (Ah):** Capacidad que puede entregar una batería desde plena carga utilizando una razón de descarga específica a una temperatura ambiente fijada, hasta alcanzar una tensión en descarga determinada. Se mide en amperios-hora.
- **Resistencia interna:** Tiene un valor de miliohmios por celda. Depende de las condiciones de funcionamiento de la batería y aumenta con el tiempo. En caso de cortocircuito la resistencia interna limita la corriente al valor máximo permitido, lo que evita la destrucción de la batería.
- **Estado de carga (SOC):** Capacidad de la batería en función de su capacidad nominal, es decir, indica cuanto de cargada está una batería. Se expresa en porcentaje siendo 100% cuando está cargada al máximo. El SOC determina si se debe realizar un frenado regenerativo o no para evitar sobrecargas.
- **Profundidad de descarga (DOD):** Es la ratio de energía descargada en relación a la cantidad de energía que puede almacenar. Se expresa en porcentaje siendo 100% cuando está totalmente descargada. La vida de la batería está relacionada con la capacidad de descarga.
- **Estado de salud (SOH):** Indica el estado general de una batería y su capacidad máxima en relación con la capacidad nominal de una batería igual nueva.
Se utiliza para saber el rendimiento de una batería en su condición actual, su vida útil consumida y la que le queda antes de tener que reemplazarla. Esto es muy útil para la anticipación de posibles fallos y para programar planes de mantenimiento y reemplazos.
- **Densidad gravimétrica o energía específica (Wh/kg):** Es la energía que se puede almacenar por unidad de peso.
- **Densidad volumétrica o densidad de energía (Wh/l):** Es la energía que se puede almacenar por unidad de volumen.
- **Potencia específica (W/kg):** Potencia que se puede entregar por unidad de peso.
- **Densidad de potencia (W/l):** Potencia que se puede entregar por unidad de volumen.
- **Número de ciclos de carga/descarga:** Indica cuantas veces se puede cargar y descargar la batería a lo largo de su uso. Representa la vida útil de la batería.
- **Eficiencia:** Fracción de energía eléctrica que devuelve la batería en función de la energía que ha sido necesaria para cargarla.

2.6.2. Tipos de baterías

2.6.2.1. Batería de plomo-ácido

Utilizadas en vehículos convencionales. Es el tipo de batería más antigua y es la más utilizada en coches de motor de combustión.

Desde su invención hace más de 100 años ha cambiado poco. Su bajo coste y su gran capacidad de descarga en un breve periodo de tiempo las hace ideales para las funciones de arranque, iluminación o soporte eléctrico, siendo utilizadas como acumuladores en vehículos de pequeño tamaño.

La batería está formada por un depósito de ácido sulfúrico y dentro de él un conjunto de placas de plomo, paralelas entre sí y dispuestas alternadamente en cuanto a su polaridad (positiva (+) y negativa (-)). El electrodo positivo es de óxido de plomo (PbO_2) y el electrodo negativo o ánodo es de plomo (Pb).

En el proceso de descarga el óxido de plomo es reducido a sulfato de plomo mientras que el plomo elemental es oxidado para dar igualmente sulfato de plomo. En el proceso de carga el sulfato de plomo es reducido a plomo metal en las placas negativas, mientras que en las positivas se forma óxido de plomo (PbO_2).

A pesar de no ser baterías buenas para coches eléctricos, han sido utilizadas en los primeros coches que se comercializaron como el EV1 de GM en el año 1997.

Ventajas:

- Tecnología madura.
- Gran capacidad para suministrar picos de corriente altos.
- Tasa de autodescarga muy baja.
- Alta eficiencia.
- Facilidad de reciclado.

Desventajas:

- Elevado peso debido al plomo.
- Baja energía específica.
- Número de ciclos bajo.
- Baja resistencia ante sobrecargas.
- Necesidad de mantenimiento periódico.

Energía específica (Wh/kg)	33 - 45
Potencia específica (W/kg)	180
Ciclos de vida	500 - 800
Coste estimado (€/kWh)	50 - 125
Eficiencia de carga (%)	50 - 95

Tabla 2: Características de la batería plomo - ácido

2.6.2.2. *Batería Níquel - Cadmio*

Baterías recargables de uso doméstico e industrial. Utilizan un cátodo de hidróxido de níquel y un ánodo de un compuesto de cadmio. El electrolito es de hidróxido de potasio. Esta configuración de materiales permite recargar la batería una vez está agotada, para su reutilización. Sin embargo, su densidad de energía es de tan sólo 50 Wh/kg, lo que hace que tengan poca capacidad. Admiten sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga, aunque no la almacena. Admiten un gran rango de temperaturas de funcionamiento.

El alto coste de adquisición de sus elementos hace que no sean la soluciones elegida por los fabricantes, estando más orientadas a aviones, helicópteros o vehículos militares, dado su gran rendimiento a bajas temperaturas.

Poseen efecto memoria, por lo que su capacidad se ve reducida con cada recarga. El Cd se usa en forma de pequeños cristales que tienen una longitud de 1 micrón. Esta pequeña medida en los cristales le da la particularidad de que mayor cantidad de ellos tienen contacto directo con el electrodo proporcionando así mayor eficiencia o energía. Con un uso repetitivo, un porcentaje de los cristales aumentan considerablemente de tamaño, entre 10 y 100 micrones, implicando que menor cantidad de superficie tiene contacto directo con el electrodo, de esta forma los materiales activos cambian sus características físicas e incrementan su resistencia. El efecto memoria puede ser combatido fácilmente con tan solo descargar la batería hasta sus niveles mínimos.

Ventajas:

- Tecnología muy establecida.
- Buen comportamiento en un amplio margen de temperaturas (-40 °C a 60 °C).
- Resiste las sobrecargas, se pueden seguir cargando cuando ya no admiten más carga aunque no se almacene.
- Alta vida cíclica.
- Gran robustez ante abusos eléctricos y mecánicos.
- Gran fiabilidad al no fallar de forma repentina.

Desventajas:

- Elevado precio.
- El Cadmio es un elemento altamente contaminante.
- Autodescarga de un 10% mensual.
- Efecto memoria muy alto
- Envejecimiento prematuro con el calor.

Energía específica (Wh/kg)	40 - 70
Potencia específica (W/kg)	150
Ciclos de vida	2000
Coste estimado (€/kWh)	250 - 350
Eficiencia de carga (%)	70 - 90

Tabla 3: Características de la batería Níquel - Cadmio

2.6.2.3. *Batería Níquel – Metal hidruro*

Similares a las de níquel-cadmio, mejoran la capacidad de estas, y reducen el efecto memoria, además de ser menos agresivas con el medio ambiente. En contra tienen su constante mantenimiento y su deterioro frente a altas temperaturas, altas corrientes de descarga o sobrecargas. Estas baterías generan demasiado calor y se recargan lentamente.

Utilizan un ánodo de oxihidróxido de níquel (NiOOH) y el cátodo es de una aleación de hidruro metálico.

Son ampliamente utilizadas en electrónica portátil de consumo, almacenamiento de energía, estacionaria, HEV y EV, y en aplicaciones de transporte en general con inclusión de vehículos pesados y trenes.

China es el país que más baterías producen por consumidor en el mundo para aplicaciones automotrices de HEV, PHEV y EV.

Ventajas:

- Tienen mayor densidad energética que el NiCd.
- Menos contaminante al no llevar Cd.
- Se pueden cargar con un cargador convencional.
- Son seguras.
- Fácil manejo comparado con las de ión litio.

Desventajas:

- Alta autodescarga, entre 15% a 20%.
- Menor fiabilidad que Ni-Cd.
- No soportan fuertes descargas.
- Tiempos de carga superiores a Ni-Cd
- Tensión de celda bajo, 1.2V.

Energía específica (Wh/kg)	60 - 120
Potencia específica (W/kg)	250 - 1000
Ciclos de vida	180 - 2000
Coste estimado (€/kWh)	300 - 350
Eficiencia de carga (%)	66 - 92

Tabla 4: Características de la batería Níquel – Metal hidruro

2.6.2.4. *Batería ión – litio*

Baterías de reciente creación formada por un electrolito de sal de litio y electrodos de litio, cobalto y óxido. El uso de nuevos materiales como el litio ha permitido conseguir altas energías específicas, alta eficiencia, la eliminación del efecto memoria, ausencia de mantenimiento y facilidad a la hora de reciclar los desechos de ion-litio.

Disponen del doble de densidad energética que las baterías níquel-cadmio con un tamaño del orden de un tercio más pequeñas. Pero también tienen desventajas, el principal es su alto coste de producción, aunque poco a poco este se va reduciendo, son frágiles, pueden explotar por el sobrecalentamiento y deben ser almacenadas con

mucho cuidado, tanto por necesitar un ambiente frío como porque debe estar parcialmente cargada.

Utilizan un cátodo (electrodo positivo) a base de un óxido de metal, un ánodo (electrodo negativo) a base de carbono en poros o grafito y electrólito a base de Litio como conductor.

Las baterías de Ion-litio representan a día de hoy la mejor elección para montar en un VE. Al no ser una tecnología totalmente madura, y encontrarse en continuo desarrollo, los avances las hacen tener un gran margen de mejora.

La intensidad de descarga y carga para una batería de ion litio son procesos críticos para alargar su vida útil, al no controlar la temperatura en estos procesos se origina el efecto de hinchamiento en la batería, producido por la evaporación de los electrolitos que quedan atrapados dentro de la carcasa, reduciendo su vida útil; se debe evitar tener temperaturas superiores a 80 °C. Las baterías de ion litio se descargan con altas corrientes medidas en C-Rate, de forma continua en valores de 26C, y si poseen un electrolito de polímero en un rango de 20C a 45C; si la descarga fuese en picos, existen baterías que soportan descargas de 52C y con un electrolito de polímero entre 30C a 90C.

Las características de las baterías en cuanto a su rendimiento dependen de la combinación de los materiales utilizados en la construcción del cátodo y ánodo, en especial el voltaje nominal y el número de ciclos de carga, determinando la vida útil de la misma.

Ventajas:

- Alta densidad de energía.
- Alta energía específica.
- Alta capacidad de descarga.
- No presentan efecto memoria.
- Baja autodescarga.

Desventajas:

- Se necesita controlar los límites de tensión máximo y mínimo por celda (BMS).
- Precio superior a otras baterías.

Sus características varían dependiendo de cada tipo de batería, pero a rasgos generales se tiene:

Energía específica (Wh/kg)	100 - 265
Potencia específica (W/kg)	250 - 340
Ciclos de vida	400 - 1200
Coste estimado (€/kWh)	147 - 300
Eficiencia de carga (%)	80 - 90

Tabla 5: Características generales de la batería ión litio.

Las más usadas para VE son LFP (Litio hierro fosfato), NMC (Litio Níquel, Manganeso Cobalto) y NCA (Litio Níquel Cobalto Aluminio).

- **LFP (Litio Hierro Fosfato):** Los beneficios de esta batería son una larga vida útil, mayor potencia, buena estabilidad térmica y mayor seguridad de uso. Tiene baja densidad energética y alto coste.
- **NMC (Litio - Níquel - Manganeso – Cobalto):** Tienen mayor densidad de energía que las de Litio – Cobalto (LiCoO_2), menor costo y vida de ciclo más larga. Tienen tensiones ligeramente menores que las de LiCoO_2 .
- **NCA (Litio – Níquel – Cobalto – Aluminio):** Poseen alta energía específica, potencia específica considerablemente buena y una larga vida útil. Sus desventajas son la seguridad y el coste.

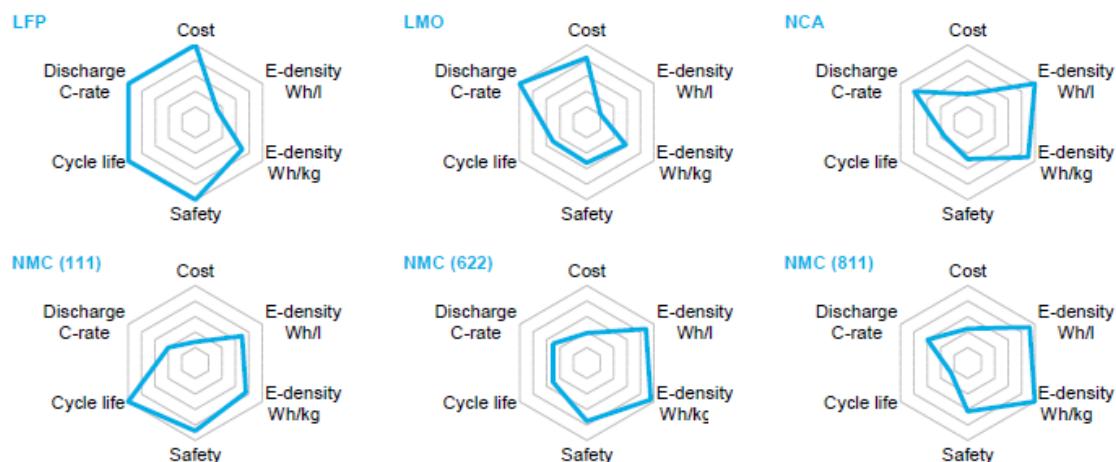


Ilustración 26: Características de los tipos de baterías de ión litio. Fuente: Bloomberg, 2018.

2.6.2.5. Batería de polímero de litio

Las baterías LiPo funcionan siguiendo el mismo principio que las baterías de iones de litio, el intercambio de electrones entre el material del electrodo negativo y el material del electrodo positivo mediante un medio conductor. Para evitar que los electrodos se toquen directamente, se coloca entre ellos un material con poros microscópicos que permite tan sólo los iones (y no las partículas de los electrodos) migren de un electrodo a otro.

Cuenta con algunas mejoras respecto a las baterías de ión-litio como una densidad energética mayor y una potencia más elevada. Son ligeras, eficientes y no tienen efecto memoria. En cambio, su alto coste y bajo ciclo de vida hacen de estas baterías, con aspecto “blando” debido a sus componentes litio y polímero, una opción no muy extendida en la actualidad. También pueden explotar si se perforan.

Energía específica (Wh/kg)	130- 200
Potencia específica (W/kg)	<10000
Ciclos de vida	>1000
Coste estimado (€/kWh)	360- 410
Eficiencia de carga (%)	99.8

Tabla 6: Características de la batería de polímero de litio

2.6.2.6. Baterías Metal – Aire

Este tipo de baterías se basan en el uso de un metal como electrodo negativo y un electrodo positivo formado por aire. En este tipo de baterías el proceso no es reversible y es necesario sustituir los electrodos gastados por otros nuevos. Las más comunes son las baterías de Aluminio -aire y las de Zinc – aire.

- **Aluminio – aire:** El aluminio se combina con oxígeno procedente del aire y con agua para formar hidróxido de aluminio. Para recargar la batería es necesario reemplazar el electrodo de aluminio. El electrolito también se reemplaza ya que queda contaminado con hidróxido de aluminio. Este tipo de batería no ha tenido una buena aceptación comercial debido a sus problemas de recarga y de fiabilidad.

Energía específica (Wh/kg)	350 - 500
Potencia específica (W/kg)	200
Ciclos de vida	-
Coste estimado (€/kWh)	-
Eficiencia de carga (%)	-

Tabla 7: Características de la batería Aluminio - aire

- **Zinc – aire:** Están formadas por un ánodo de zinc y un cátodo de un material poroso que capta oxígeno de la atmósfera. El electrolito está conformado por hidróxido de potasio (KOH) o hidróxido de sodio (NaOH). Tiene un alto potencial energético, fiabilidad y son capaces de almacenar el triple de energía que las de ion-litio en el mismo volumen y con la mitad del coste.

Energía específica (Wh/kg)	300 - 500
Potencia específica (W/kg)	100
Ciclos de vida	-
Coste estimado (€/kWh)	-
Eficiencia de carga (%)	-

Tabla 8: Características de la batería Zinc – aire

2.6.2.7. Batería ZEBRA ($NaAlCl_4$)

Estas baterías son una evolución de las baterías NaS y están en desuso. También llamadas de sal fundida, trabajan a una temperatura de en torno a los 250°C y tienen como electrolito cloroaluminato de sodio triturado.

Los electrodos se componen de sodio/cloruro de sodio y níquel/cloruro de níquel, con un electrolito en forma de barrera separadora capaz de conducir los iones Na^+ (compuesto del material cerámico β -alúmina). Durante la carga, el sodio se reduce de cloruro de sodio a sodio fundido y el níquel se oxida a cloruro de níquel. En la descarga ocurre la reacción inversa.

En desuso, el electrolito se solidifica, por lo que necesita un tiempo de fundición que puede llegar a ser de dos días para que alcance la temperatura optima y ofrezca plenamente su carga.

Sus aplicaciones son similares a las de las baterías NaS (gestión y soporte de red e integración de energías renovables), aunque en este caso no se encuentra en fase comercial, sino en proyectos de demostración tecnológica.

Es una batería compleja, de mayor contenido químico, pero que consigue unas características de energía y potencia interesantes.

Tienen el mejor ciclo de vida de todas las baterías, pero requieren ocupar mucho espacio y su potencia es baja.

Energía específica (Wh/kg)	90 - 120
Potencia específica (W/kg)	150 - 170
Ciclos de vida	1500 - 3000
Coste estimado (€/kWh)	200 - 350
Eficiencia de carga (%)	99.9

Tabla 9: Características de la batería ZEBRA

3. Datos

3.1. Datos del tranvía de Zaragoza

La línea 2 del tranvía de Zaragoza tendría una longitud total de 9,79 kilómetros de este a oeste de Zaragoza y una longitud de 9,88 kilómetros de oeste a este. Constaría de 21 paradas en total con distancias variables de entre 330 y 660 metros aproximadamente de las cuales 11 corresponden al tramo común (Los Enlaces-Miguel Servet), 3 al ramal de Valdefierro, 3 en el ramal de las Fuentes y 4 en el ramal de San José. Esta línea tendría incorporado un servicio tren-tram para un futuro enlace con Villanueva de Gállego y una compatibilidad de uso con la Línea 1 del tranvía. Además, constará de prioridad semafórica sobre el resto de la circulación respetando también la prioridad de la Línea 1, lo que le permite circular sin parar en los cruces.

La unidad básica de tranvía utiliza dos motores trifásicos asíncronos y es alimentado a 750 V en corriente continua por medio de un pantógrafo en el módulo central. Las unidades tranviarias utilizan bogies motores para desplazarse y también están provistos en ambos extremos de enganches automáticos que permiten una rápida conexión/desconexión mecánica y eléctrica entre tranvías para poder utilizarlos a modo de convoy en momentos de necesidad o permitir un remolque en caso de avería. Están provistos de un freno electrodinámico regenerativo que permite que la unidad recupere energía al frenar para alimentar en primer lugar el sistema de climatización, la recarga de baterías y otros equipamientos. La energía que no se pueda aprovechar se devuelve a la red. [15]



Ilustración 27: Recorrido tranvía Línea 2

Se han buscado los P.K. (Puntos Kilométricos) del punto medio de las distintas paradas para ambos sentidos y se han sacado las distancias entre paradas y las alturas de cada una de ellas. [15]. Como se observa en las tablas en la parada 14 hay una bifurcación de la línea hacia el ramal de San José, por lo tanto la distancia de la parada 18 está medida desde la 14. Estos datos serán necesarios para el análisis que se realizará posteriormente.

Nº parada	EJE ESTE	P.K. (m)	Distancia (m)	Altura (m)	
1	Valdefierro	72	0	238.85	
2	Anillo verde	719	647	230.49	
3	Martínez Ayuso -Los Enlaces	1261	542	223.06	
4	Av. Madrid -Los Enlaces	1657	396	215.63	
5	Av. Madrid -Rioja	2155	498	216.61	
6	Av. Navarra- Estación Delicias	2730	575	209.72	
7	Av. Navarra- Aljafería	3243	513	211.02	
8	El portillo -Escrivá Balaguer	3706	463	208.9	
9	Pº María Agustín - Pignatelli	4194	488	211.1	
10	Puerta del Carmen	4724	530	210.7	
11	Pº Constitución	5067	343	209.79	
12	Pº de La Mina	5633	566	202.64	
13	Pza. San Miguel	6035	402	203.23	
14	C/ Miguel Servet - Cº de Las Torres	6374	339	205.18	
15	Compromiso de Caspe - García Burriel	6974	600	198.77	
16	Compromiso de Caspe	7328	354	194.65	
17	San Adrián de Sasabe	7783	455	195.17	
14 a 18	Pza. Reina Sofía	6721	347	205.98	
19	Av. Cesáreo Alierta	7153	432	206.23	
RAMAL	20	Av. San José	7696	543	214.5
	21	Pº del Canal	8286	590	235.85

Tabla 10: Listado de paradas Eje Este

Nº parada	EJE OESTE	P.K. (m)	Distancia (m)	Altura (m)	
1	Valdefierro	72	0	238.85	
2	Anillo verde	715	643	230.49	
3	Martínez Ayuso -Los Enlaces	1258	543	222.98	
4	Av. Madrid -Los Enlaces	1657	399	215.62	
5	Av. Madrid -Rioja	2155	498	216.91	
6	Av. Navarra- Estación Delicias	2731	576	209.73	
7	Av. Navarra- Aljafería	3244	513	211.03	
8	El portillo -Escrivá Balaguer	3706	462	208.86	
9	Pº María Agustín - Pignatelli	4199	493	211.11	
10	Puerta del Carmen	4730	531	210.71	
11	Pº Constitución	5057	327	209.78	
12	Pº de La Mina	5631	574	202.75	
13	Pza. San Miguel	6040	409	203.22	
14	C/ Miguel Servet - Cº de Las Torres	6374	334	205.11	
15	Monasterio del Pueyo	6879	505	201.03	
16	Rodrigo Rebolledo	7474	595	195.19	
17	San Adrián de Sasabe	7869	395	195.16	
14 a 18	Pza. Reina Sofía	6727	353	205.98	
RAMAL	19	Av. Cesáreo Alierta	7160	433	206.22
	20	Av. San José	7705	545	214.5
	21	Pº del Canal	8298	593	235.78

Tabla 11: Listado de paradas Eje Oeste

Los datos de la unidad tranviaria se han obtenido en primer lugar de la información disponible de la empresa CAF. Se obtuvieron así del dossier del tranvía la masa en vacía de 45450 kg, la ocupación máxima 220 pasajeros a los que se les ha considerado de un peso medio de 75 kg, la superficie frontal 9.54 m² y el radio de rueda de 0.295 m (Ver Anexo). Al no obtener todos los datos necesarios se consultaron otras fuentes en Internet relacionadas con tranvías, encontrando un estudio de un modelo de simulación de un tranvía con sistema de almacenamiento de energía [16] y un artículo sobre ahorro de energía en transportes públicos [17] basado en el tranvía de Bruselas de la empresa “Bombardier”. Los datos del tranvía obtenidos para realizar la simulación se muestran en la siguiente tabla.

Parámetro	Valor
Masa [kg]	45450 + 220*75
Superficie frontal [m²]	9.54
Radio rueda [m]	0.295
Coef. Resistencia rodadura	0.006[17]
Coef. Aerodinámico	0.6 [17]
Eficiencia nominal tranvía	0.8 [16]
Eficiencia frenado regenerativo	0.55 [17]
Densidad aire [kg/m³]	1.25
Gravedad [m/s²]	9.81

Tabla 12: Datos del tranvía

Como se puede observar el dato utilizado para la masa corresponde al caso de carga más desfavorable para analizar el consumo del tranvía, es decir, suponiendo que va todo el trayecto al máximo de pasajeros.

Debido a no poder medir en cada momento la dirección del viento y su velocidad no se va a tener en cuenta esta variable. Esta aproximación es aceptable ya que el tranvía al tener una elevada masa la fuerza de aceleración y de resistencia a la rodadura son más notables. La influencia del viento actuaría en contra del vehículo o a favor de él dependiendo de la influencia de la dirección de éste, por lo tanto se iría compensando haciendo esta aproximación aceptable para el estudio.

Otros datos necesarios para realizar la simulación del tranvía son el perfil de velocidades y la pendiente. Esto se ha obtenido a través de la aplicación móvil “Runtastic” que permite obtener las velocidades, tiempos y elevación del trayecto recorrido por el tranvía. La principal razón por la que se ha usado esta aplicación es porque se probaron varias aplicaciones y ésta era la que menores pérdidas de GPS y mejor funcionamiento proporcionaba con el dispositivo móvil disponible.

Al no disponer de la línea 2 del tranvía debido a que no está construida, se ha hecho un análisis del perfil de velocidades sobre la línea 1 debido a su similitud en cuanto a distancia de paradas, recorrido, material móvil y tiempos. Después se creará una gráfica basándose en la distancia entre paradas de la línea 2 y datos semejantes de la línea 1 en esas distancias. Cabe destacar que esto sería una aproximación cercana al funcionamiento de la línea pero no sería el real, que se podría obtener con la línea ya creada.

3.2. Datos del autobús

La idea original del proyecto era comparar la línea 2 del tranvía, aún no construida, con los autobuses o la combinación de autobuses que cubren esa ruta actualmente. Tras investigar los trayectos de los distintos autobuses se dio cuenta de que la línea afectaba a la mayoría de los autobuses urbanos de Zaragoza, siendo bastante inviable realizar este objetivo. Con la implantación de la línea 2 se deberían reordenar y modificar parte de muchos trazados actuales y suprimir varias líneas de autobuses. Los autobuses más afectados serían las líneas 24, 21, 30, 33, 40 y 51 que coinciden en un 50% o superior de recorrido con la línea 2 del tranvía.

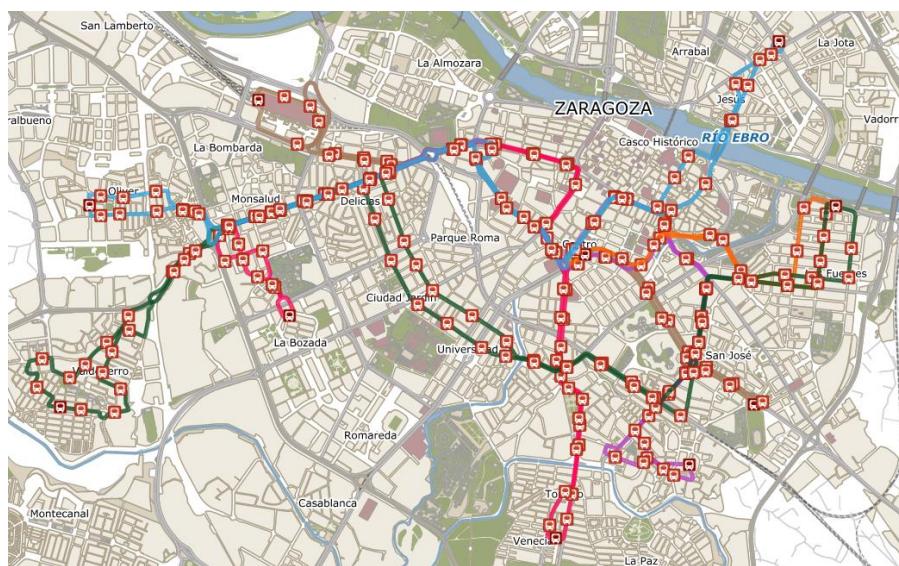


Ilustración 28: Recorrido líneas más afectadas por la línea 2 del tranvía



Ilustración 29: Recorrido línea 2 del tranvía

Por lo tanto, se decidió realizar el análisis comparativo con un autobús que no existe que hiciera el recorrido de la línea Este-Oeste del tranvía. Para ello se eligió un autobús urbano para tomar su ciclo de velocidades y paradas y adaptarlo al recorrido de la línea 2 del tranvía.

El autobús elegido para realizar este trayecto es el bus **BYD K9UB** que ya tiene dos unidades incorporadas en la flota de Zaragoza.

EL BYD K9 también llamado eBus Andino 12 se trata de un autobús fabricado en China cuya capacidad de pasajeros puede variar dependiendo de las necesidades del cliente. Dispone de una rampa para el acceso de personas en sillas de ruedas y una plataforma de piso bajo. Pesa alrededor de 13.5 toneladas y es capaz de subir pendientes de hasta el 15%.

Posee una batería de tipo litio-fosfato (LiFePO4) que puede estar distribuida de diversas formas en función de la carrocería y modelo, aunque la opción más habitual es que estén colocadas en la parte trasera del automóvil. Este autobús permite la recuperación de energía mediante el frenado regenerativo y además incluye paneles solares instalados en el techo que aportan energía adicional. La batería es de 324 kWh y se recarga completamente en 5.5 horas ofreciendo autonomías de en torno a 250 km.

Se hicieron unas pruebas de conducción en Holanda que dieron un consumo medio de 1.25 kWh/km.



Ilustración 30: Autobús BYD K9UB, Zaragoza

Las características obtenidas del modelo K9UB son las siguientes:

Parámetro	Valor
Masa [kg]	$13500 + 85*75$
Superficie frontal [m²]	8.39
Radio rueda [m]	0.521
Coef. Resistencia rodadura	0.015 [18]
Coef. Aerodinámico	0.7 [18]
Eficiencia nominal bus	0.9157
Eficiencia frenado regenerativo	0.55 [17]
Densidad aire [kg/m³]	1.25
Gravedad [m/s²]	9,81

Tabla 13: Datos BYD K9U9

Consideraciones:

- Se ha tenido en cuenta el caso de ocupación máxima de 85 pasajeros durante todo el trayecto, considerando un peso medio por pasajero de 75 kg.

- La superficie frontal es la anchura por la altura del vehículo, 2.55m x 3.29m. [19]
 - El radio de rueda se ha obtenido a partir del neumático 295/80 R 22.5 de las especificaciones del vehículo.
- $$r = \frac{1}{2} \left(22.5 \text{ pulgadas} * 25.4 \frac{\text{mm}}{\text{pulgadas}} + 2 * 0.8 * 295 \text{ mm} \right) * \frac{\text{m}}{1000\text{mm}} = 0.521 \text{ m}$$
- Se ha considerado el coeficiente de resistencia a la rodadura y el coeficiente aerodinámico como valores típicos de 0.015 y 0.7 respectivamente.[18]
 - Al no tener los datos necesarios del autobús para calcular su **eficiencia** se consultó diferentes bibliografías de rendimientos de vehículos eléctricos. Se obtuvo entonces un rendimiento de 98.80% [20] para las baterías de ión-litio, un rendimiento del motor AC brushless de 97% [21], un rendimiento del convertidor del 97% [20]. Para el rendimiento de la cadena de transmisión se encontraron diversos valores, entre 80% en [20] basada en el año 2009, un 90% en un estudio de la cadena de potencia de los VE de 2010 [22] y un 98.5% en una comparación de la transmisión en camiones eléctricos en 2015 [23]. Al ser este autobús un modelo nuevo y diseñado para ser eléctrico (no es un vehículo transformado a eléctrico) se supone que tiene una alta eficiencia, así que se ha cogido el dato de 98.5% [23]. Por lo que se obtiene una eficiencia nominal del bus del 91.57%.
 - Al no tener el dato de la eficiencia del frenado regenerativo del bus se ha considerado un 55%.

4. Método de cálculo del consumo

Para el análisis del consumo, autonomía y cálculo de las baterías es necesario saber la fuerza que debe aportar el motor para su desplazamiento. Estas fuerzas son las fuerzas de propulsión y resistencia al movimiento que son comunes para cualquier tipo de vehículo. Por lo tanto, la fuerza total necesaria a vencer por el motor será la siguiente.

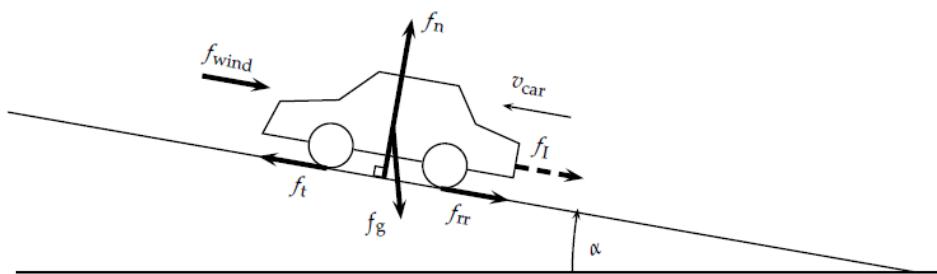


Ilustración 31: Diagrama de fuerzas de un vehículo

$$\begin{aligned}
 F_T &= F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{ascensión} + F_{acel.lineal} + F_{acel.angular} = \\
 &= F_{rr} + F_{ad} + F_{as} + F_{acl} + F_{aca} \quad (\text{Ec.1})
 \end{aligned}$$

- **Fuerza de resistencia a la rodadura (Frr):** Esta fuerza se presenta cuando un cuerpo rueda por una superficie. Esta fuerza depende de coeficientes que variarán en función del neumático, la superficie y el peso del vehículo.

$$F_{rr} = C_r * m * g \quad (\text{Ec.2})$$

C_r = Coeficiente de rodadura

m = masa del vehículo (kg)

g = aceleración de la gravedad

- **Fuerza aerodinámica (Fad):** Es la fuerza que sufre el vehículo al arrastrar una masa de fluido. Depende del tamaño de la sección frontal del vehículo y su forma, así como de la velocidad relativa entre el viento y el vehículo.

$$F_{ad} = 0.5 * \rho * A * C_d * (V_{veh} + V_{wind})^2 \quad (\text{Ec.3})$$

ρ =densidad del aire (kg/m²)

A = área frontal (m²)

C_d = coeficiente aerodinámico

V_{veh} = Velocidad del vehículo (m/s)

V_{wind} = Velocidad viento en m/s (+ si dirección contraria al vehículo; - si misma dirección)

- **Fuerza de ascensión (Fas):** Es la fuerza de la gravedad que actúa cuando el vehículo circula por pendientes inclinadas, porque se genera una componente longitudinal que influye en el movimiento del vehículo.

$$F_{as} = m * g * \operatorname{sen}\alpha \quad (\text{Ec.4})$$

α = Ángulo de la carretera en grados

- **Fuerza de aceleración lineal (Facl):** Es la fuerza de inercia para aumentar o disminuir la velocidad.

$$F_{acl} = m * a \quad (\text{Ec.5})$$

m = masa del vehículo (kg)

a =aceleración (m/s²)

- **Fuerza de aceleración angular (Faca):** Fuerza para acelerar las masas con movimiento de rotación como las ruedas, las masas unidas a ellas y todos los elementos de transmisión que giran.

$$F_{aca} = I * a * \frac{G^2}{r^2} \quad (\text{Ec. 6})$$

I = momento de inercia de las masas giratorias en movimiento

G = Relación de velocidades motor-rueda

r = radio de la rueda

Como es necesario conocer en profundidad los elementos de la mecánica del vehículo, se suele realizar la aproximación de considerar la fuerza de aceleración angular como el 5% de la fuerza de aceleración lineal [6] por lo tanto la ecuación queda:

$$F_{aca} = 0.05 * F_{acl} \quad (\text{Ec. 7})$$

A partir de las anteriores ecuaciones se ha realizado un modelado dinámico para cualquier vehículo mediante MATLAB/Simulink, de tal forma que se puede obtener el consumo al introducir los datos del correspondiente vehículo y su perfil de velocidades. Para obtener los datos de las velocidades se ha hecho uso de la aplicación RUNTASTIC.

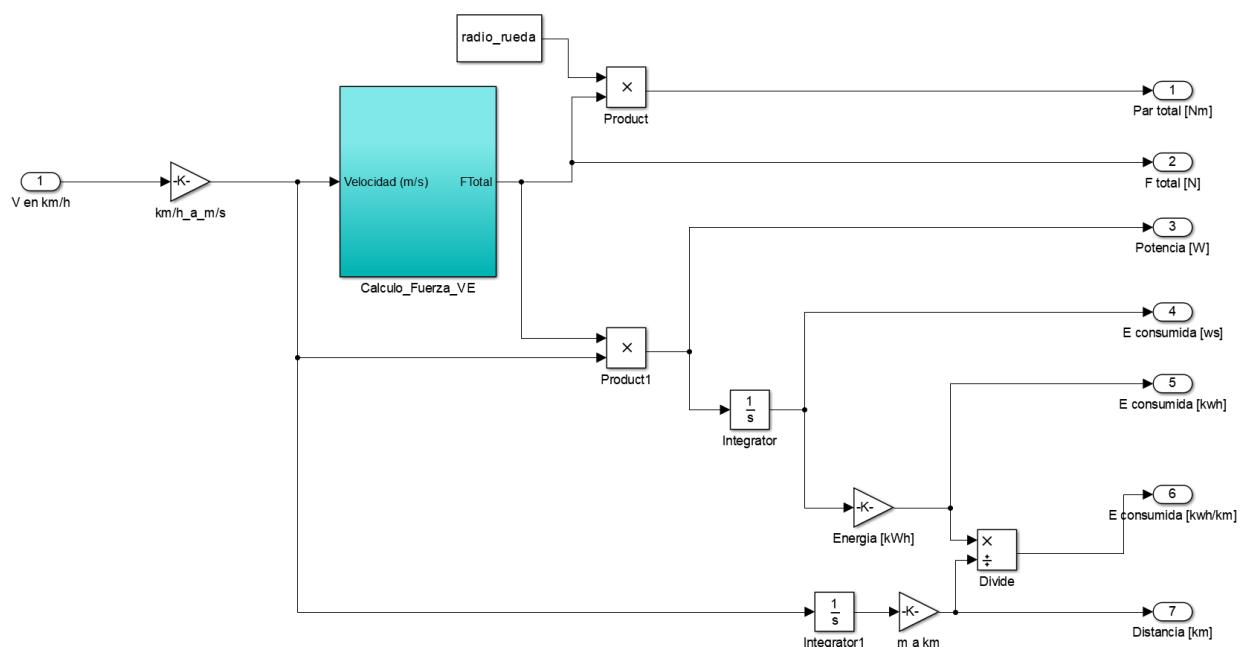


Ilustración 32: Modelo dinámico vehículo eléctrico

En este modelo se tiene como entrada el perfil de velocidades del vehículo en km/h que tras convertirse a m/s se introduce en el bloque “Cálculo_Fuerza_VE”, en el que se han introducido las ecuaciones anteriores, para hallar la fuerza total que realiza el vehículo. Una vez obtenida la fuerza total se multiplica por la velocidad para obtener la potencia en watos y ésta a su vez se integra y se transforman las unidades para obtener la energía consumida en kWh. El modelo también permite obtener el par total ejercido por el vehículo multiplicando la fuerza total por el radio de rueda, pero en este proyecto este dato no es relevante.

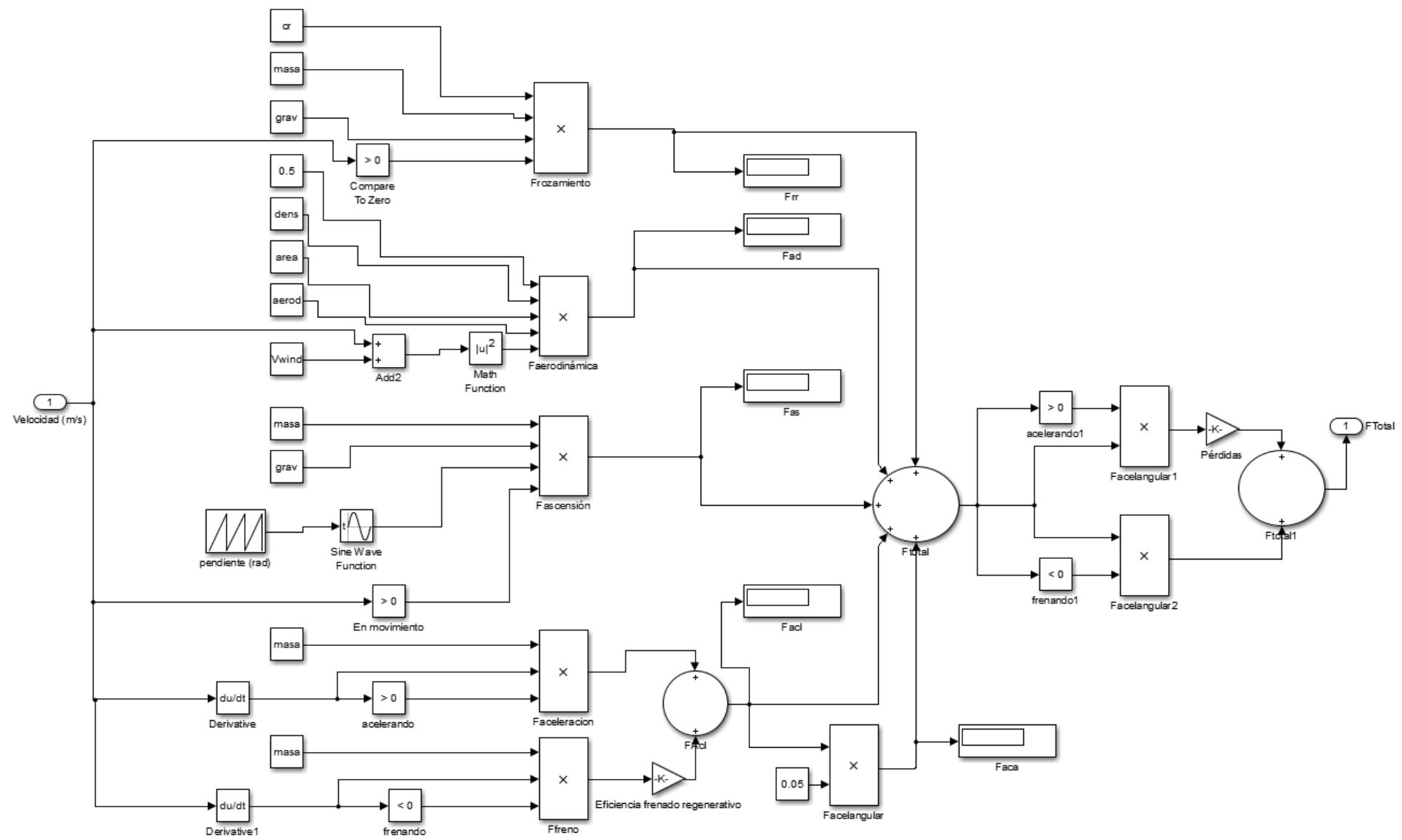


Ilustración 33: Cálculo_Fuerza_VE

En la ilustración 33 se muestran las ecuaciones utilizadas en el modelado dinámico del vehículo eléctrico aplicadas en MATLAB/Simulink. Como entradas al modelo tenemos el perfil de velocidades y de pendiente del recorrido.

Primero se tiene la implementación de la fuerza de rozamiento mediante la Ec.2., que a través de un booleano le indica al programa que cuando el vehículo está en marcha debe actuar y cuando el vehículo está parado la fuerza será nula. Esto también ocurre con la fuerza de ascensión (Ec.4) en la que se ha introducido el perfil de pendientes en radianes en vez de en grados debido a que la función seno trabaja con radianes en Matlab.

La fuerza aerodinámica (Ec.3) permite introducir la variable de la velocidad del viento que se suma o resta a la del vehículo y se realiza el cuadrado, multiplicándola por las demás constantes. Esta velocidad del viento en principio la consideraremos nula.

En cuanto a la fuerza de aceleración lineal se ha introducido el concepto de frenado regenerativo de modo que cuando la derivada de la velocidad, es decir la aceleración, es positiva su valor se suma directamente y cuando es negativa su valor se multiplica por la eficiencia del frenado regenerativo. Esta fuerza multiplicada por el coeficiente 0.05 es la fuerza de aceleración angular.

Todas estas fuerzas se suman para hallar la fuerza total, la cual si es positiva se divide por la eficiencia de toda la cadena de transmisión (convertidor, motor, engranajes). Pero esta operación no se realiza si la fuerza es negativa, puesto que las eficiencias de todo el sistema ya se han tenido en cuenta en el porcentaje de energía regenerada por el frenado.

5. Consumo y Perfiles de velocidad y elevación

5.1. Tranvía Línea 1

Para obtener el perfil de velocidades de la línea 2 del tranvía, se realizó el análisis sobre la línea 1. Debido a que la línea 1 tiene mayor número de paradas y por lo tanto mayor longitud (12,8 km) que la línea 2 (9,7 km), se ha seleccionado un tramo de 10 km de la línea 2 eliminando 2 km de los tramos inicial y final de la línea. De esta forma se analiza en el tramo en el que el consumo será mayor porque por el tramo central se realizan más paradas y por lo tanto más aceleraciones y deceleraciones y también la distancia entre paradas es menor.

Después de montar en el tranvía y tomar datos con la aplicación móvil y pasarlo a Excel directamente se tuvo el problema de que salían datos de tiempos duplicados y velocidades erróneas demasiado altas para un tranvía. Por lo tanto, se tuvo que depurar las gráficas para eliminar los datos erróneos. Así pues, las gráficas obtenidas inicialmente se correspondían con las siguientes.

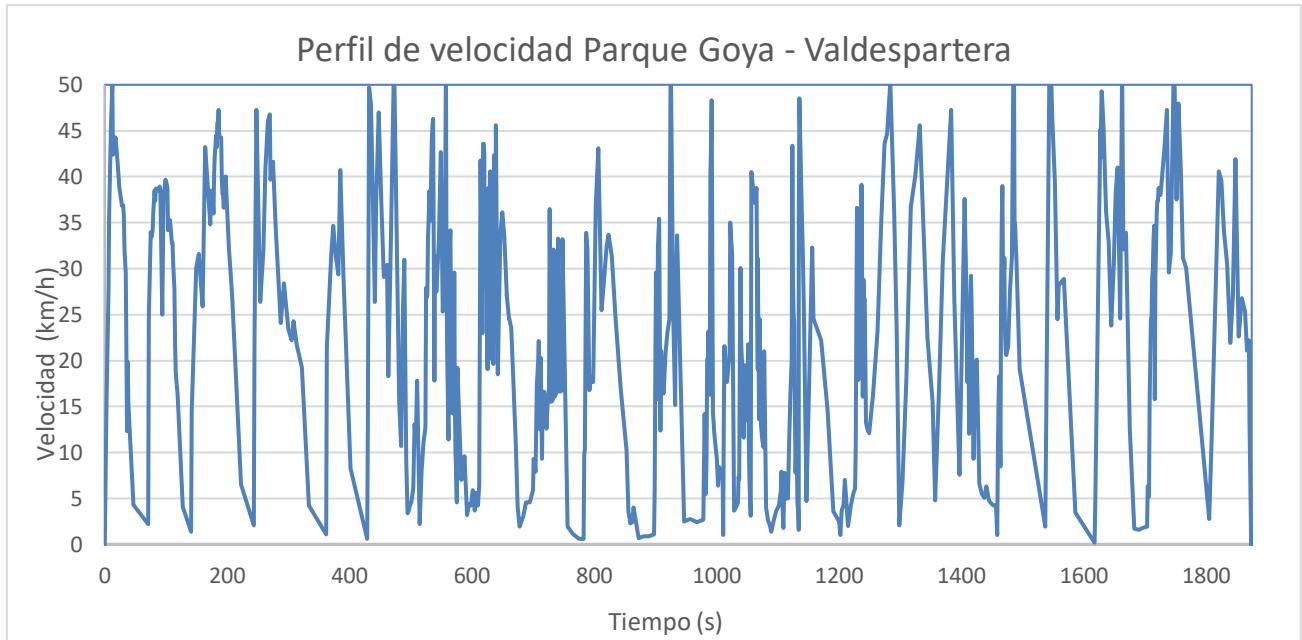


Ilustración 34: Perfil de velocidad Parque Goya-Valdespartera

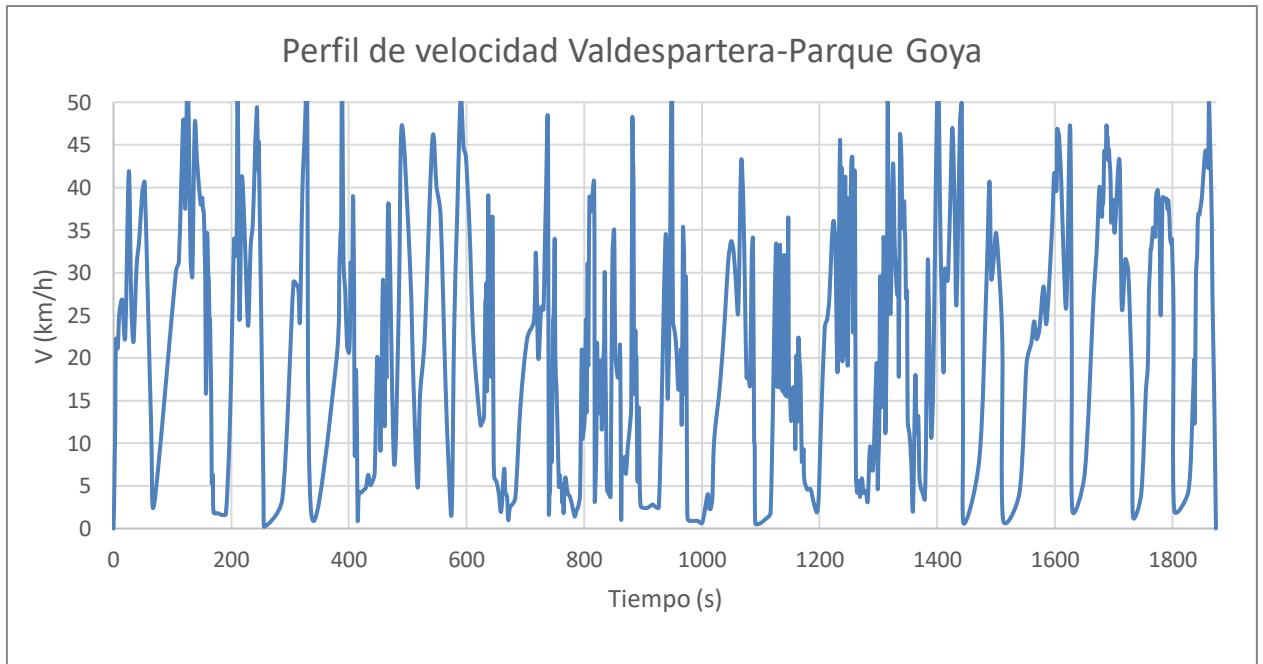


Ilustración 35: Perfil de velocidad Valdespartera – Parque Goya

En las curvas se puede ver que el recorrido analizado tiene una duración aproximada de 32 minutos, que se alcanzan velocidades máximas de 50 km/h. Como se puede observar el gps no detecta bien cuando el vehículo está parado, no llegando a 0 la velocidad en ningún momento de la gráfica. Además, estas gráficas presentan bastante ruido como se puede apreciar.

Tras analizar esta gráfica en Matlab/Simulink se obtuvieron aceleraciones demasiado grandes comparadas con la aceleración máxima del tranvía de 1.2 m/s^2 dando consumos exagerados.

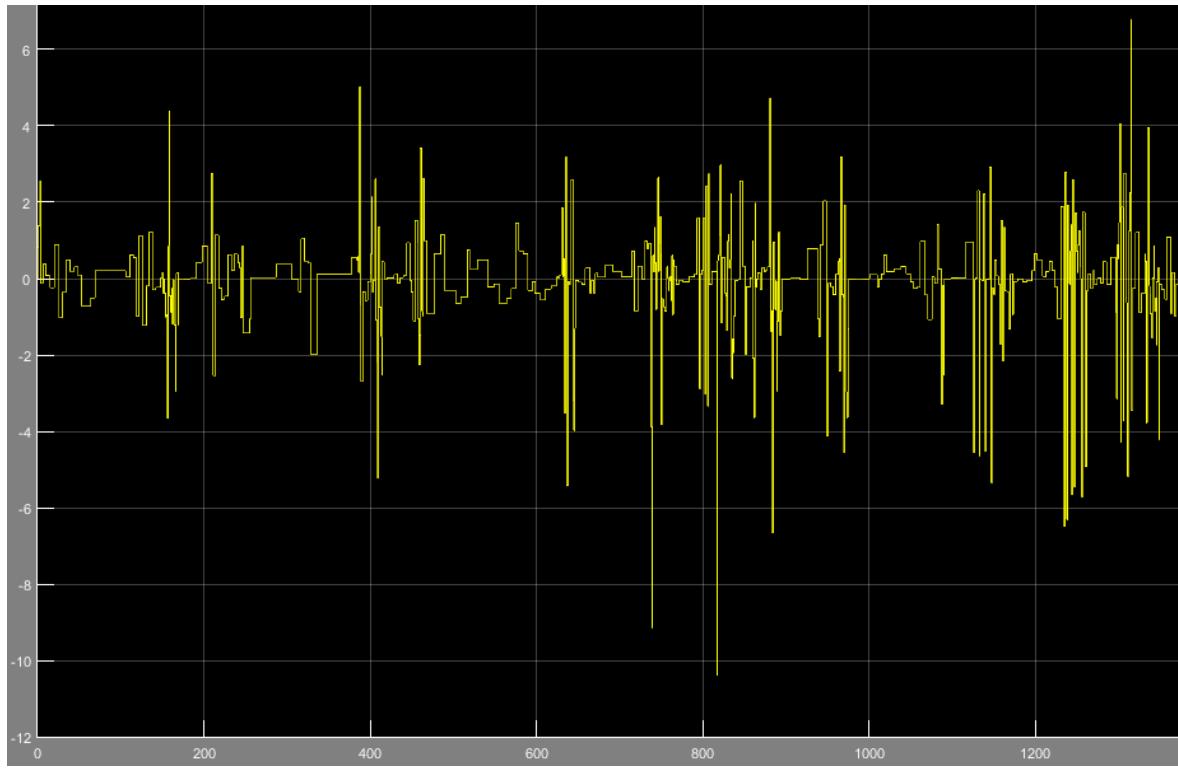


Ilustración 36: Perfil de aceleraciones erróneo tranvía

Por lo tanto, se tuvo que manipular el perfil de velocidades otra vez, depurando la tabla a mano para que las aceleraciones no fuesen mayores que 1.2 m/s^2 y haciendo que el vehículo se parase en las paradas para el correcto funcionamiento del modelado. El perfil de velocidades depurado es el siguiente.

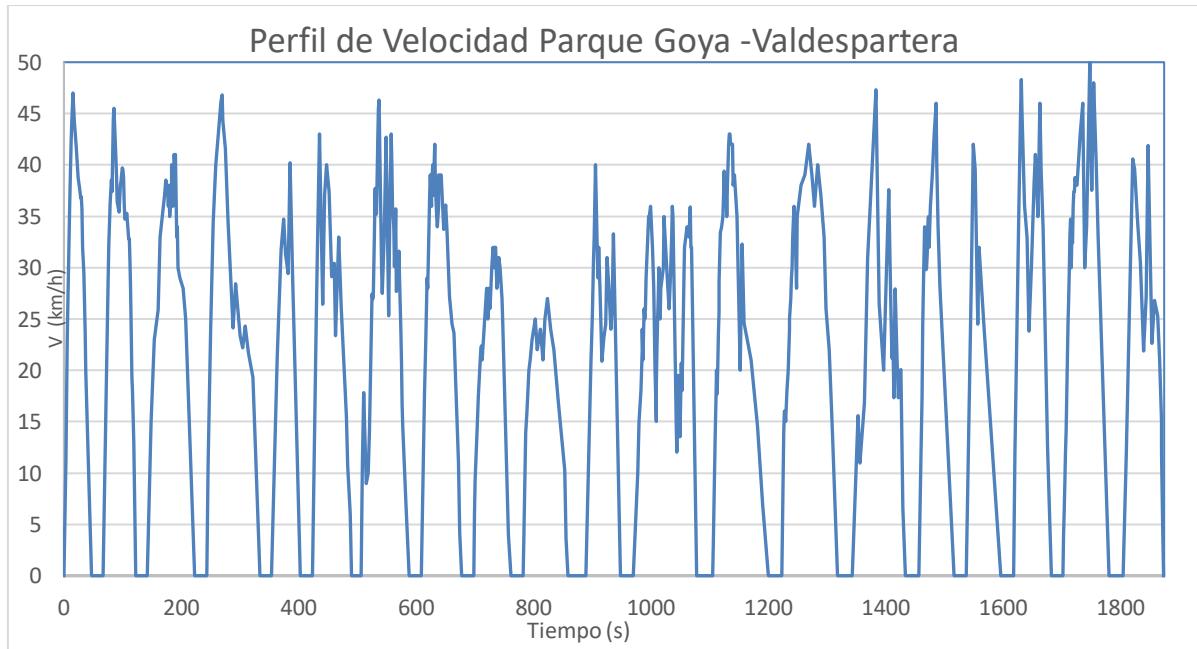


Ilustración 37: Perfil de velocidades tranvía Línea 1 depurado

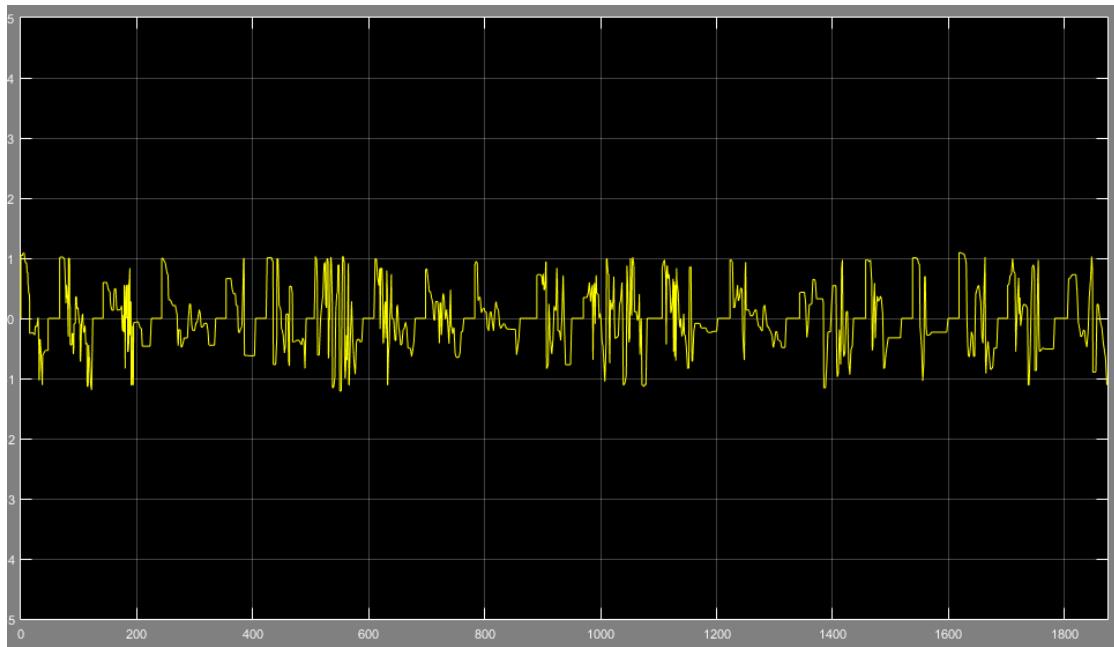


Ilustración 38: Perfil de aceleraciones tranvía

Como puede observarse en la ilustración 37 el tranvía realiza un total de 21 paradas en un trayecto de 10.3 km y las velocidades son menores en la zona media de la gráfica puesto que esas paradas corresponden a tramos concurridos con peatones y la circulación se realiza a menor velocidad. Y como puede verse en la ilustración 38 tras modificar los datos las aceleraciones ya se obtienen las propias de un tranvía. Además, también se tienen la gráfica de altitud del recorrido sobre el nivel del mar. Esta información se utiliza para poder hallar la pendiente en cada instante e introducirla en el modelo de Matlab/Simulink y calcular la fuerza de ascensión.

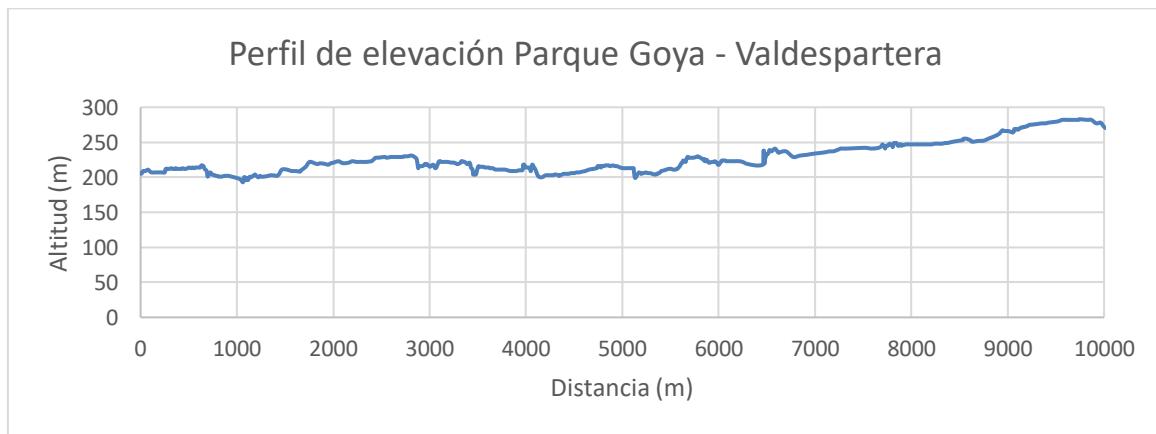


Ilustración 39: Perfil de altitud Parque Goya - Valdespartera

En la gráfica se puede ver como la máxima altitud que se alcanza es en torno a 280 metros sobre el nivel del mar, correspondiente al barrio de Valdespartera. Hay que destacar que la medición de la altura que hace un gps no es del todo exacta pudiendo dar lugar a errores de varios metros. Por lo tanto, la fuerza de ascensión puede ser ligeramente distinta a la real. En esta gráfica se muestra un desnivel máximo de unos 85 metros.

Consumo

Para verificar el correcto funcionamiento del modelo de Matlab se ha realizado una comparación con un estudio sobre movilidad urbana realizado por Circe basado en datos del ayuntamiento de Zaragoza. De este estudio se obtiene que el Índice de Pasajeros por Kilómetro (IPK) del tranvía de Zaragoza es de 21.93 y que el consumo de energía es de 3.93 kWh/km. [24]

Aplicando el modelo que se ha realizado en Matlab para una cifra de 21.93 pasajeros se obtiene un valor de 3.48 kWh/km. Esta diferencia es debida a que en el modelo no se ha tenido en cuenta el consumo de los elementos auxiliares (luces, accionamiento de puertas, sistema de climatización, pantallas...).

No se ha podido obtener información sobre los servicios auxiliares del tranvía de Zaragoza por lo que se buscó este dato en bibliografías. Se encontró un estudio sobre un análisis del consumo del aire acondicionado de un tranvía (que es el que más consumo genera de los elementos auxiliares) con supercondensadores en china [25]. En este análisis se simula el consumo del tranvía y del sistema de aire acondicionado para distintas temperaturas externas, así pues, para una temperatura diaria media de 31 °C el consumo del aire acondicionado representa entorno al 19% del consumo total.

Además, se encontró un estudio sobre trenes sin catenaria, en el que se comenta que el consumo de los elementos auxiliares del tranvía pueden variar entre el 10% y el 28% del consumo total [5].

Por lo tanto, siendo un poco restrictivos se ha considerado una cifra del 25% del consumo de los elementos auxiliares sobre el total. Por lo tanto, el consumo obtenido del tranvía con un IPK de 21.93 es de 4.35 kWh/km.

Consumo (kWh/km)	
Estudio Circe	3.93
Modelo Matlab	4.35

Tabla 14: Comparación resultados de consumo del tranvía para un IPK=21.93.

Encontramos pues que el consumo se aproxima bastante al del estudio, esta cifra puede ser diferente debido a diversas razones:

- Algunos de los datos utilizados no son exactamente los de este modelo de tranvía, pues se han obtenido de distintas bibliografías al no poder obtenerlos.
- No se sabe bajo qué condiciones se ha realizado el estudio de Circe, pudiendo ser en alguna estación del año en el que el consumo de auxiliares sea menor. Tampoco se sabe en qué sentido del recorrido se ha realizado el estudio, habiendo cogido en este caso el recorrido que tenía una mayor pendiente que salvar para que el consumo fuera el mayor.
- Es muy posible que el perfil de velocidades y de altura no sea exacto del todo, esto es debido a que la aplicación runtastic toma los datos cada cierto tiempo variable que la aplicación establece; pudiendo obtener velocidades mayores e inferiores a las reales

provocando mayores aceleraciones y pendientes más grandes aumentando el consumo.

Para la máxima capacidad de carga se obtiene un consumo de 4.55 kWh/km del modelo.

5.2. Autobús

Para obtener el perfil de velocidades de la línea de bus que debería recorrer el trayecto de la línea Este-Oeste del tranvía se ha montado en un autobús urbano cualquiera. Se ha escogido la línea 42 como un bus genérico para el estudio.

Tras montar en el autobús se obtuvieron los mismos problemas previamente mencionados para las gráficas del tranvía. Los perfiles de velocidad y altitud depurados que se obtuvieron son los siguientes.

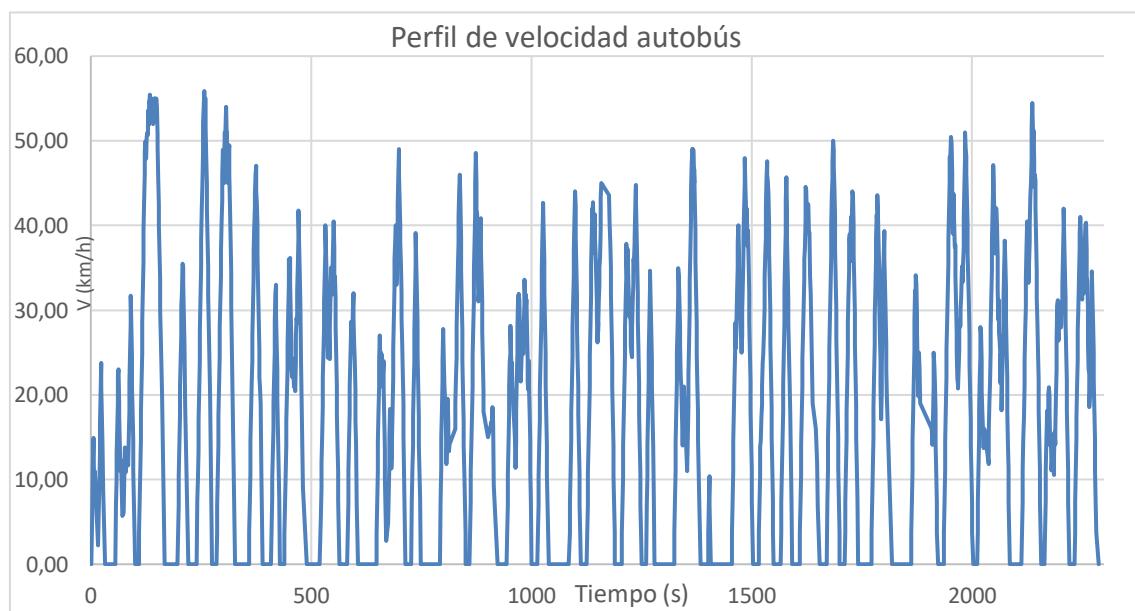


Ilustración 40: Perfil de velocidad autobús

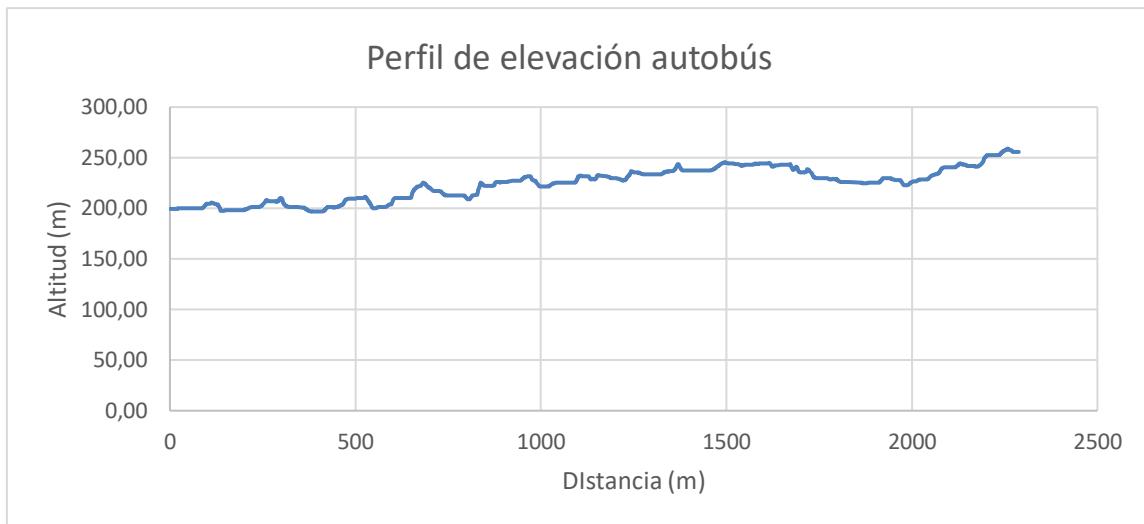


Ilustración 41: Perfil de elevación autobús

Como se puede observar en el perfil de velocidad se realizan mayor número de paradas que en el tranvía. Esto es debido a una menor distancia entre paradas y la influencia de los semáforos que aumentan la duración del recorrido.

Consumo

Tras introducir los datos del autobús en el modelo para un Índice de Pasajeros por km de 4.94 se obtiene un consumo de 1.62 kWh/km. Para comprobar si el valor era cercano al real se miró distintas bibliografías encontrando diversidad de consumos basados en pruebas. Se encontraron consumos medios de autobuses BYD K9 de 1.29 kWh/km en trayectos con poco tráfico variando de 1.15 a 1.41 kWh/km y consumos medios de 1.41 kWh/km en trayectos con mucho tráfico variando de 1.24 a 1.77 kWh/km [26].

Al no poder estimar el consumo de los elementos auxiliares del bus se consultó una bibliografía que indica que el consumo del aire acondicionado de un vehículo eléctrico propulsado con una batería de ión litio a una temperatura exterior de 40°C supone un 7.93% del consumo total del vehículo [27]. Por lo tanto, se obtiene un consumo de 1.75 kWh/km para un IPK de 4.94.

	Consumo (kWh/km)
BYD k9 de Copenhague	1.24 - 1.77
Modelo de Matlab	1.75

Tabla 15: Comparación resultados de consumo a un autobús BYD para un IPK=4.94.

De nuevo el cálculo del consumo no es exacto del todo y esto puede ser debido principalmente a varias razones:

- Un desconocimiento de la situación exacta en la que se han hecho las pruebas del consumo.

- Un perfil de velocidades y altitud inexactos que provocan que el autobús acelere más veces de las necesarias y se aumente notablemente el consumo.
- Un rendimiento del autobús mayor que el considerado, pues el rendimiento se ha aproximado tomando valores de distintas bibliografías.
- También se ha considerado una situación desfavorable aplicando el consumo de auxiliares durante todo el trayecto a una temperatura de 40 °C, aumentando considerablemente el consumo.

Para la máxima capacidad de carga del autobús durante todo el trayecto se ha obtenido un consumo en el modelo de 2.29 kWh/km.

5.3. Tranvía Línea 2

A partir de la distancia entre paradas obtenidas previamente para la línea Este-Oeste del tranvía se ha confeccionado el perfil de velocidades. Para ello se han ido comparando las distancias de paradas obtenidas para las gráficas anteriores de bus y tranvía con éstas y se ha ido ajustando el perfil en base a los resultados anteriores. Se ha tenido algo de cuidado en que las velocidades de mitad de la gráfica, es decir cuando el tranvía pasa por el centro de Zaragoza, sean más bajas que en los extremos. Para la realización de la gráfica se ha tenido en cuenta un tiempo de parada de 25 segundos para tranvía y bus. Al disponer de un ramal en San José y ser de mayor longitud que el otro recorrido, se han diseñado los perfiles en base al ramal porque el consumo sería mayor.

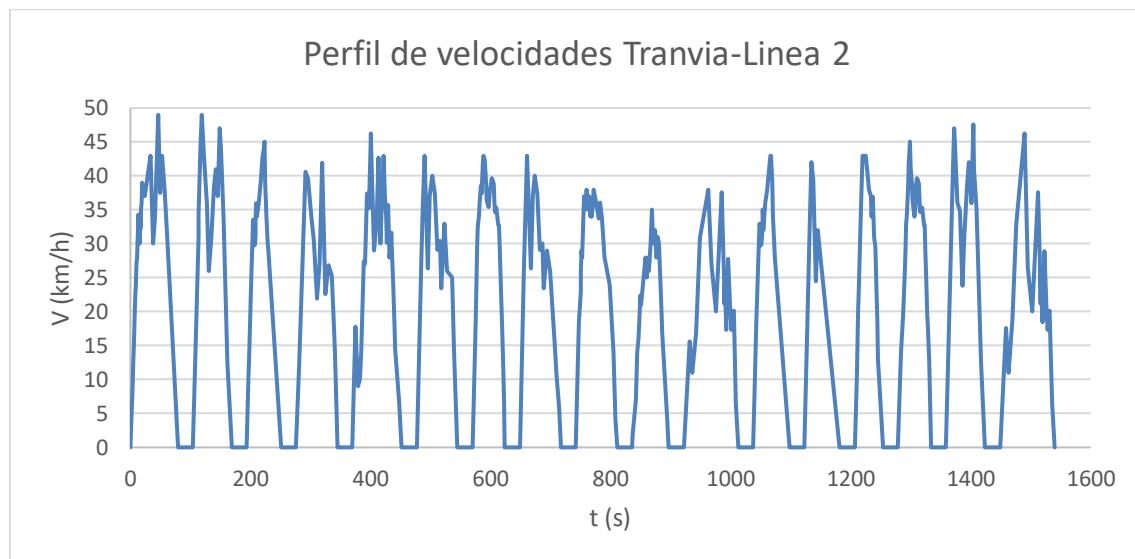


Ilustración 42: Perfil de velocidades Línea 2 obtenida a partir de la Línea 1

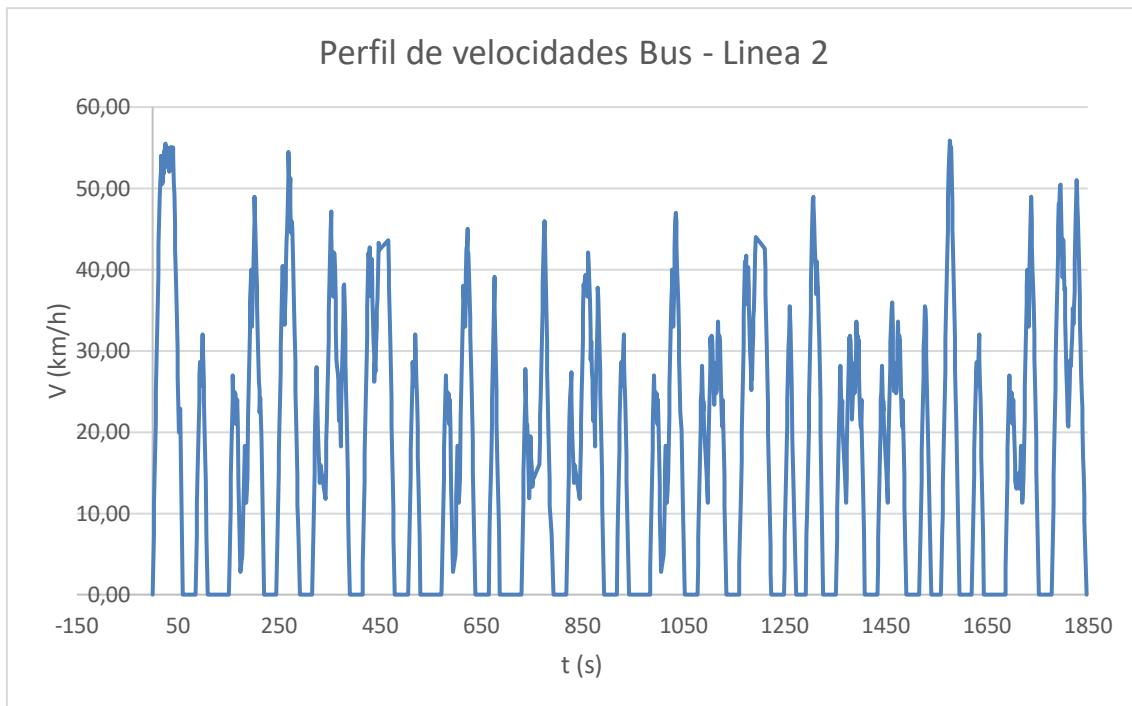


Ilustración 43: Perfil de velocidades Línea 2 obtenida a partir de un autobús

Como puede compararse entre las ilustraciones 42 y 43 el tranvía realiza menos paradas y tiene un tiempo menor debido a que tiene prioridad semafórica y no para en los semáforos. Se observa también que el autobús en algunas zonas alcanza velocidades mayores a 50 km/h. El t

Se ha creado también un perfil de velocidades ideal de la línea para una velocidad comercial del tranvía de 20 km/h para poder comparar los consumos con los anteriores casos. Para ello se ha considerado una velocidad máxima de 40 km/h, un tiempo de parada medio de 25 segundos y una aceleración y deceleración de 1 m/s^2 .

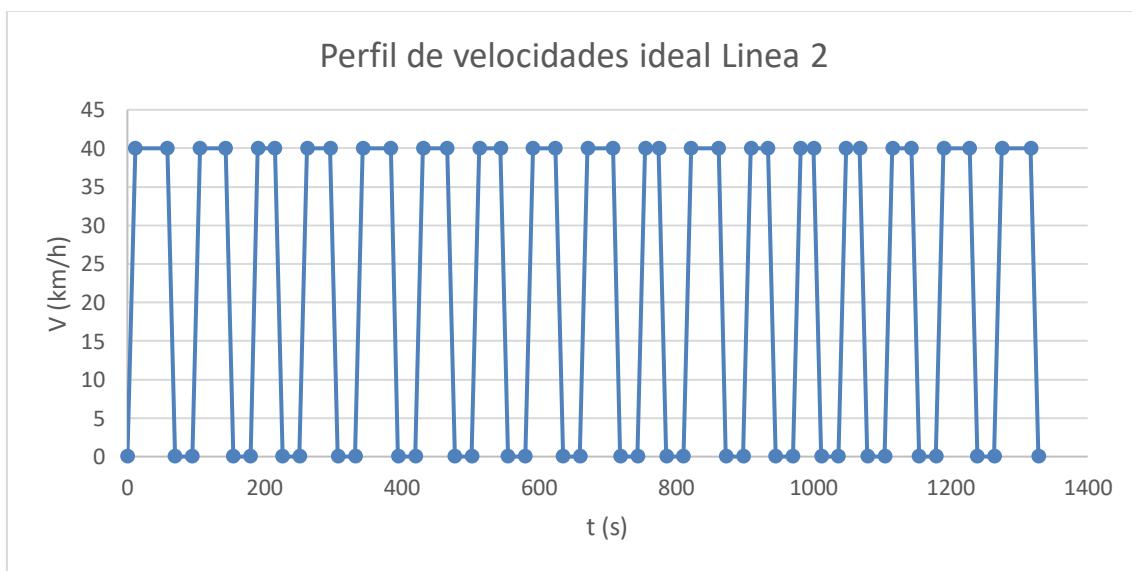


Ilustración 44: Perfil de velocidades Línea 2 ideal

Consumo

Una vez realizado los perfiles se procede a introducir todos los datos en el modelo de Matlab/Simulink. Tras realizar la simulación con la situación de carga más desfavorable en cada caso, se obtienen los siguientes resultados.

	Energía consumida (kWh)	Energía consumida (kWh/km)
Línea 2 ideal	28.43	3.453
Línea 1-Linea 2	35.89	4.40
Línea 2-Bus	19.25	2.10

Tabla 16: Comparación de energía consumida sin equipos auxiliares

Aplicando en cada caso el porcentaje estimado de los equipos auxiliares mencionados anteriormente, (25% para el tranvía y 7.93% para el autobús). se obtienen los consumos reales.

	Energía consumida (kWh)	Energía consumida (kWh/km)
Línea 2 ideal	35.53	4.31
Línea 1-Linea 2	44.86	5.5
Línea 2-Bus	21.17	2.27

Tabla 17: Comparación de energía consumida con equipos auxiliares

Y considerando 220 pasajeros para el caso del tranvía y 85 para el caso del autobús se obtienen la energía por pasajero de cada medio de transporte.

	Energía consumida (kWh/pasajero)	Energía consumida (kWh/(pasajero*km))
Línea 2 ideal	0.161	0.019
Línea 1-Linea 2	0.203	0.025
Línea 2-Bus	0.249	0.027

Tabla 18: Comparación energía consumida por pasajero

Como se puede observar el autobús tiene una mayor energía por pasajero, esto es normal debido a que el tranvía tiene una mayor capacidad para el transporte de personas.

6. Estudio económico

Para realizar el apartado económico se van a analizar los costes asociados al tranvía y al autobús. Para ello se van a obtener los costes fijos y costes variables anuales de cada uno y se van a comparar entre cada una de las opciones. Con respecto al autobús se pueden tener varias opciones dependiendo de la selección de la forma de cargarlos.

- **Carga durante la noche:** Los autobuses eléctricos son cargados de forma estática desde la red en una estación de carga usando equipamiento mecánico y eléctrico para carga lenta (40-120 kW), principalmente durante la noche. Estos autobuses tendrán grandes capacidades de baterías (típicamente > 200kWh) permitiendo la circulación durante todo el día pudiendo llegar a recorrer unos 250 km.

- **Carga de oportunidad:** Los autobuses eléctricos son recargados en las paradas de pasajeros o al final y al principio de la línea, de esta forma se consigue una reducción del peso de la batería y en consecuencia del autobús. Los autobuses tienen baterías de capacidad media (normalmente de 50 a 150 kWh) y se necesita una gran potencia de carga a través de pantógrafos o placas inductivas. Esto se puede realizar en las paradas del bus (hasta 600 kW de potencia) en unos 30 segundos mientras los pasajeros suben y bajan o al inicio y final de línea (normalmente entre 150 y 500 kW de potencia) cuando el autobús realiza una parada más larga.

Para el análisis de los costes del autobús se van a tener en cuenta la carga en cocheras suponiendo que ha estado todo el día haciendo su recorrido habitual, un caso de carga de oportunidad sólo al final de línea y un caso de carga de oportunidad al inicio y al final de la línea.

6.1. Tranvía

Los costes asociados al tranvía se han obtenido del Anteproyecto de la línea de tranvía Este – Oeste de Zaragoza de IDOM [15]. Se tienen en este estudio la inversión inicial del proyecto, así como el coste de la energía y de la potencia (Ver Anexo B). Los datos son los siguientes:

Concepto	Importe (€)
Construcción	189.766.135,00 €
Adquisición de material móvil	37.190.000,00 €
Dirección de las obras	5.692.984,05 €
Compensaciones y adquisiciones de terrenos	1.461.978,58 €
TOTAL	234.111.097,63 €

Tabla 19: Resumen de costes de inversión (antes de IVA). Fuente: IDOM.

La inversión inicial que habría que realizar serían 234.111.097,63 €. El material móvil corresponde a 13 tranvías, 11 para su uso y 2 como margen de reserva. Cada unidad tranviaria tiene un coste de 2.750.000 € y una vida útil de 25 años.

Se desconoce el término de potencia que maneja el sistema tranviario así que no es posible conocer el precio del kWh de la tarifa que usan. Se tiene como referencia la energía de tracción con un coste unitario de 0,55€/km.

ENERGÍA TRACCIÓN		
km anuales	precio unitario	importe anual
1.038.649	0,55 €	571.256,95 €

Tabla 20: Resumen de costes de energía. Fuente: IDOM.

Para verificar estos datos se va a calcular con los datos obtenidos en el estudio realizado en este trabajo.

Se tiene un trayecto obtenido del tranvía de una duración de en torno a 25 minutos y para 7 minutos al final de línea. Si se quiere mantener una frecuencia de 5 minutos en la línea, se tendrán 10 unidades tranviarias circulando. El tranvía está funcionando unas 17 horas durante un día, en este tiempo realiza un total de $\frac{17}{25+7} * 60 = 32 \text{ ciclos}$. El trayecto que recorre es de 8,3 km. Se tiene un total de $8,3 \text{ km} * 32 \text{ ciclos} * 10 \text{ tranvías} * 365 \text{ días} = 969.440 \text{ km}$ anuales. Con un precio unitario de 0,55 €/kWh se tiene un coste de la energía de tracción de 533.192 €.

Esta diferencia de km anuales y por tanto del coste de la energía radica en que en el estudio proporcionado por IDOM se ha considerado tanto la línea inicial como el ramal y en este estudio sólo se ha considerado el tramo más largo (ramal) para caracterizar el tranvía.

No se tiene datos de la energía consumida en un año por lo que se va a calcular según el estudio realizado.

$$8,3 \text{ km} * 32 \text{ ciclos} * 5,5 \frac{\text{kWh}}{\text{km}} * 10 \text{ tranvías} * 365 \text{ días} = 5.331.920 \text{ kWh/año} \quad (\text{Ec. 8})$$

El coste de mantenimiento del tranvía es de 1.557.973,50 € anuales (Ver anexo B).

6.2. Autobús

Para analizar los costes asociados al autobús se van a calcular en primer lugar la energía necesaria para las baterías y la potencia para recargarlas. Con estos datos se obtendrán los costes de la energía y de la potencia, así como se definirá la instalación del punto de carga y el coste que conlleva. Se calcularán también el coste de mantenimiento de los autobuses y el coste de reposición de baterías.

Capacidad de baterías

La batería del autobús debe ser diseñada con un margen de reserva del 20 % del SoC ya que si se pasan estos límites se podría dañar la batería reduciendo notablemente su vida útil o llegar a provocar la destrucción de la misma. Además, es necesario dejar otro 5% de margen para poder recuperar energía por medio del frenado regenerativo sin provocar sobrecargas. También se tiene que tener en cuenta la distancia del punto más alejado del autobús hasta cocheras para que pueda volver sin problemas.

Por lo tanto, para caracterizar las baterías en cada caso se tiene:

- **Carga en cocheras:** El autobús tiene que realizar todos sus viajes correspondientes a todo el día. Teniendo en cuenta que el trayecto que se ha simulado dura 31 minutos, el autobús tendrá una frecuencia media de paso de 7 minutos y una duración total de la jornada de 17 horas se tiene que el autobús realizará un total de 27 ciclos en una jornada. Como cada recorrido es de 8,3 km este autobús recorrerá 224,1 km. A esto se le añade la distancia del punto más alejado a cocheras que corresponde a 7,9 km. Por lo tanto, los kilómetros totales son 232 km.
- **Una carga de oportunidad:** Se colocará un punto de recarga al inicio de la línea. La batería del autobús tiene que soportar un recorrido de ida y vuelta y poder volver a cocheras. Por ello el autobús recorrerá 16,6 km más 3 km de la distancia del inicio de la línea más cerca de cocheras. Así que el autobús recorrerá 19,6 km.

- **Dos cargas de oportunidad:** Se colocarán dos puntos de recarga, uno al inicio y otro al final de la línea. La batería del autobús tendrá que soportar un recorrido de ida y poder volver a cocheras. El autobús recorrerá una distancia de 8,3 km más 7,9 km a cocheras. Por lo tanto, se recorrerán 16,2 km.

Consideraciones para el trayecto a cocheras:

Cuando el autobús sale de cocheras, sale totalmente cargado. De ahí irá al inicio del trayecto más cercano para cargar si lo necesita e iniciará desde ese punto el primer trayecto.

- En el caso de solamente cargar en cocheras se debe dejar un margen de seguridad de dos veces la distancia de cocheras al punto más alejado para los buses que empiecen el primer ciclo desde ahí y por lo tanto vuelvan desde ahí al acabar los ciclos. Al ser el recorrido de cocheras al punto más alejado menor que el recorrido del trayecto en sí y salir cargado ya desde cocheras este margen se reduce solamente al de vuelta del vehículo.
- En el caso de solamente una carga de oportunidad se ha considerado que ésta estará en el punto más cercano a cocheras (a 3 km). El autobús saldrá cargado totalmente desde cocheras y desde ahí podrá ir tanto como al punto de recarga como al extremo más alejado debido a que la distancia de cocheras al punto más alejado es menor que la del trayecto recorrido en la línea. Por lo tanto, habrá que dejar de margen de seguridad la distancia del punto más cercano a cocheras para que los buses que terminen el recorrido ahí puedan volver.
- En el caso de dos cargas de oportunidad se dejará un margen de seguridad adicional desde el punto más alejado (7,9 km) por si pudiera fallar un punto de carga.

Teniendo un consumo del autobús de 2,27 kWh/km, un SOC del 75% utilizable y considerando una energía específica de la batería de ión litio de 120 Wh/kg para batería las baterías LFP que incorpora el bus se tiene los siguientes.

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Kilómetros recorridos (km)	232	19.6	16,2
Energía consumida (kWh)	527	45	37
Capacidad baterías (kWh)	703	60	49
Peso baterías (kg)	5858,3	500	409

Tabla 21: Dimensionamiento de baterías autobús

Como se observa con el diseño de la batería con cargas de oportunidad se reduce considerablemente el peso de las baterías que el bus llevaría incluido. Esto es interesante porque puede reducir los consumos notablemente. Obteniendo el peso de las baterías se podría realizar un análisis más profundo y volver a calcular los consumos de cada autobús, pues ya no sería el mismo para cada uno. En este análisis económico se va a plantear cada caso con el mismo consumo calculado previamente en el estudio técnico.

Coste Instalación de recarga

Para la carga del autobús se ha elegido el método de carga por inducción debido a que produce un menor impacto visual y está protegido frente a agentes atmosféricos y actos

vandálicos al no estar en contacto con los usuarios. De esta forma se podrá cargar el bus de forma sencilla sin tener que accionar ningún mecanismo y con eficiencias de carga del 90%. Con la siguiente ecuación se obtendrán las potencias de carga para cada caso.

$$P_{carga} (kW) = \frac{E_{consumida}}{0,9 * t_{recarga}} \quad (\text{Ec. 9})$$

Para la carga en cocheras se ha considerado 7 horas y para los otros dos casos 7 minutos de tiempo de espera al final e inicio de línea. Para estimar el coste de la instalación de carga inductiva el tutor de este documento ha facilitado un estudio realizado por CIRCE.

Carga estática - Equipo de inducción de 50 kW - Primario + secundario	Unidades	Total 1 Unidad (IVA no incluido)		Unidades	Total 10 Unidad (IVA no incluido)		Total 1000 Unidad (IVA no incluido)
		TOTAL	114.124 €		TOTAL	706.810 €	TOTAL
						70.681 €	50.497 €
Carga estática - Equipo de inducción de 100 kW - Primario + secundario	Unidades	Total 1 Unidad (IVA no incluido)		Unidades	Total 10 Unidad (IVA no incluido)		Total 1000 Unidad (IVA no incluido)
		TOTAL	130.354 €		TOTAL	778.466 €	TOTAL
					Ud	77.847 €	57.197 €
Carga estática - Equipo de inducción de 150 kW - Primario + secundario	Unidades	Total 1 Unidad (IVA no incluido)		Unidades	Total 10 Unidad (IVA no incluido)		Total 1000 Unidad (IVA no incluido)
Material	1	65.187 €		10	545.552 €		49.420.000 €
Subcontratación, transporte	1	8.609 €		10	64.565 €		5.021.000 €
Personal	1	72.434 €		10	273.132 €		11.400.000 €
Viajes	1	- €		10	- €		- €
		TOTAL	146.230 €		TOTAL	883.249 €	TOTAL
					Ud	88.325 €	Ud
							65.841 €
Carga estática - Equipo de inducción de 200 kW - Primario + secundario	Unidades	Total 1 Unidad (IVA no incluido)		Unidades	Total 10 Unidad (IVA no incluido)		Total 1000 Unidad (IVA no incluido)
Material	1	78.459 €		10	658.780 €		60.100.000 €
Subcontratación, transporte	1	9.207 €		10	69.348 €		5.400.000 €
Personal	1	87.201 €		10	346.575 €		15.650.000 €
Viajes	1	- €		10	- €		- €
		TOTAL	174.867 €		TOTAL	1.074.704 €	TOTAL
					Ud	107.470 €	Ud
							81.150 €
Carga estática - Equipo de inducción de 500 kW - Primario + secundario	Unidades	Total 1 Unidad (IVA no incluido)		Unidades	Total 10 Unidad (IVA no incluido)		Total 1000 Unidad (IVA no incluido)
Material	1	107.154 €		10	902.693 €		82.950.000 €
Subcontratación, transporte	1	12.913 €		10	96.948 €		7.532.000 €
Personal	1	96.695 €		10	408.175 €		19.200.000 €
Viajes	1	- €		10	- €		- €
		TOTAL	216.762 €		TOTAL	1.407.717 €	TOTAL
					Ud	140.772 €	Ud
							109.682 €

Ilustración 45: Presupuesto de la instalación inductiva para distintas potencias

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Potencia de carga (kW)	83,65	428,57	352,38
Potencia de la Instalación de inducción (kW)	100	500	500
Número de instalaciones	1	1	2
Coste total instalación (€)	114.124	216.762	433.524

Tabla 22:Potencia y coste de las instalaciones de carga inductiva necesarias

Coste bus y batería

El coste de un autobús varía dependiendo de la batería que incorpore, en documentos como [15] se tiene que el coste de un autobús con carga de oportunidad es de 450.000 €. Gracias a un documento proporcionado por el tutor de este documento, por una fuente confidencial se

sabe que de un autobús de 450.000 €, 200.000€ corresponden a la batería; por lo tanto, el coste de un autobús sin la batería es de 250.000€ aproximadamente.

El número de autobuses que se necesitarán serán los necesarios para cubrir la demanda de 5 minutos de frecuencia en periodos de hora punta. Así que se tendrán 13 buses más otros 2 buses de recambio por si alguno fallara. El precio de sus baterías variará dependiendo del caso en el que nos encontremos. Se tomará como referencia un coste de 189 €/kW en 2017 [28] para el cálculo del precio de las baterías.

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Cbus (€)	250000	250000	250000
Cbatería (€)	132867	11340	9261
Ctotal (€)	5743005	3920100	3888915

Tabla 23: Coste de los autobuses

Nota: El coste total de la tabla es referido para un número de 15 autobuses.

Coste de energía y potencia

Para el cálculo del **coste de la energía (C_E)** y del **coste de potencia (C_p)** dependiendo de la potencia obtenida se va a tener una tarifa u otra. Para ello se ha consultado en Endesa las tarifas disponibles. Las que se necesitarán son la tarifa 3.0. A para baja tensión y potencias entre 50 – 100 kW y la 3.1. A para alta tensión y potencias menores de 450 kW. (Ver Anexo)

	Tarifa Preferente 3.0 A	Punta	Llano	Valle
50-100 kW	Término de Potencia (€/kW y mes)	3.495896	2.097537	1.398358
	Término de Energía (€/kWh)	0.122313	0.109247	0.080469
100 – 250 kW	Término de Potencia (€/kW y mes)	3.495896	2.097537	1.398358
	Término de Energía (€/kWh)	0.121369	0.108296	0.079524

Tabla 24: Tarifa preferente 3.0. A. Fuente: Endesa.

Tarifa óptima 3.1. A	Punta	Llano	Valle
Término de Potencia (€/kW y mes)	4.931122	3.040891	0.697311
Término de Energía (€/kWh)	0.10787	0.10131	0.07664

Tabla 25: Tarifa óptima 3.1.A. Fuente: Endesa.

Para ambas tarifas se tienen los periodos de discriminación horaria planteados en la siguiente tabla.

	Punta	Llano	Valle
Verano	11-15h	8-11h y 15-24h	0-8h
Invierno	18-22h	8-18h y 22-24h	0-8h

Tabla 26: Periodos de discriminación horaria. Fuente: Endesa

Para nuestro caso se va a hacer el cálculo con el periodo de verano. Teniendo en cuenta esto, para los casos de cargas de oportunidad de las 17 horas que estará funcionando el autobús, 4 horas estará en periodo punta y 13 horas en periodo llano y con la tarifa 3.1. A. Para el caso de

la carga en cocheras se utilizará el periodo valle y la tarifa 3.0. A. Por lo tanto, para cada caso se tiene para un autobús:

- **Carga en cocheras:** $C_E = consumo * distancia * T_{EValle} * n^o dias$ (Ec. 10)

- **Cargas de oportunidad:** $C_E = consumo * distancia * (T_{ELLano} * 0.76 + T_{EPunta} * 0.24) * n^o ciclos * n^o dias$ (Ec. 11)

Para la potencia se tiene en cada caso:

- **Carga en cocheras:** $C_P = Potencia * T_{PValle} * n^o meses$ (Ec. 12)

- **Cargas de oportunidad:** $C_P = Potencia * (T_{PLLano} * 0.76 + T_{PPunta} * 0.24) * n^o meses$ (Ec. 13)

El término distancia en el caso de carga en cocheras se corresponde con el recorrido de todo el día (232 km) y en el caso de cargas de oportunidad 1 ciclo (8,3 km).

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
C. Energía_{Bus} (€)	15.468	19.103	19.103
C. Energía_{Flota} (€)	201.085	248.344	248.344
C. Potencia (€)	1.404	12.746	10.480

Tabla 27: Coste de energía anual para un bus y toda la flota y coste de potencia

En el coste de energía para la flota se han contabilizado los 13 autobuses que recorren el trayecto.

Coste de mantenimiento

El coste de mantenimiento viene dado en función de la distancia recorrida por el autobús. Se encontró un recurso bibliográfico en el que se dice que el coste de un autobús eléctrico es de 0,12 €/km. [29]

$$C_M = Coste \left(\frac{\text{€}}{\text{km}} \right) * Distancia * n^o \text{días} \quad (\text{Ec. 14})$$

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
CM_{Bus} (€)	10161.6	9815.58	9815.58
CM_{Flota} (€)	132100.8	127602.54	127602.54

Tabla 28: Coste de mantenimiento anual para un bus y toda la flota

La distancia es la recorrida en una jornada de trabajo del autobús. Se han calculado los costes de mantenimiento para un autobús y para toda la flota en uso.

Coste de reposición de baterías

La batería de un vehículo eléctrico no tiene una duración ilimitada. Debido a las reacciones que ocurren en la batería con cada ciclo de carga y descarga se va degradando. El calendario de vida de una batería es el número de años que la batería puede mantener el 80% de su

capacidad inicial. Se estima que usadas regularmente pueden durar hasta 10 años o más [28] pero su vida útil puede reducirse considerablemente dependiendo de las condiciones en la que se utilice la batería. La mayoría de los fabricantes dan una vida de la batería de 8 años.

El coste de las baterías para un bus y para toda la flota calculados previamente serían:

	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Cbatería (€)	132.867	11.340	9.261
CbateríaFlota (€)	1.727.271	147.420	120.393

Tabla 29: Coste de reposición de baterías anual para un bus y para toda la flota

6.3. Comparación

Con los datos obtenido en los apartados anteriores se va a realizar una comparación de los costes fijos y los costes variables entre el tranvía y autobuses.

	Tranvía	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Infraestructura (€)	196.921.097	114.124	216.762	433.524
Material móvil (€)	35.750.000	5.743.005	3.920.100	3.888.915
Costes Fijos (€)	232.671.097	5.857.129	4.136.862	4.322.439

Tabla 30: Comparación costes fijos anuales

Como se puede observar la inversión inicial para el tranvía es mucho más grande que la de cualquier caso de los autobuses, esto tiene sentido pues el tranvía es una obra ingenieril de muy grandes dimensiones y los autobuses solo tienen la parte de infraestructura del puesto de recarga al ya tener cocheras construido.

Entre los autobuses se puede ver que para el caso de la carga en cocheras los costes fijos son bastante mayores a los otros dos casos. Esto es debido al precio de la batería del autobús que requiere grandes capacidades de almacenamiento. Por último, hay que destacar que el caso de una carga de oportunidad es el que menos costes fijos tiene, teniendo menos que el caso de dos cargas de oportunidad. Esto es debido a que a pesar de tener mayor precio del material móvil se requiere un punto menos de carga y la diferencia entre precios de las baterías no es tan notable.

	Tranvía	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Energía (kWh/año)	5.331.920	2.498.907	2.413.815	2.413.815
C. Energía (€/año)	571.257	201.085	248.344	248.344
C. Mantenimiento (€/año)	1.557.973	132.101	127.602,4	127.602,54
Costes Variables (€/año)	2.129.230	333.186	375.946,54	375.946,54

Tabla 31: Comparación costes variables anuales

En la comparación de los costes variables no se va a tener en cuenta el término de potencia, debido a que no se dispone el dato de potencia contratada en la catenaria del tranvía. Como se puede ver la energía que consume la línea de tranvía es del orden de dos veces la energía

consumida por los autobuses. La energía y el mantenimiento salen más caros para el caso del tranvía. Los costes variables por lo tanto salen mucho más altos en el caso del tranvía y entre los buses la carga en cocheras es el que menor, porque al cargar en cocheras en un periodo valle la energía sale más barata. La diferencia en la energía consumida es que para los casos de una carga de oportunidad y dos cargas de oportunidad no se tiene en cuenta la recarga de energía que haría en cocheras para el estudio y por tanto la distancia que recorre de cocheras al inicio de línea.

Para acabar con la comparación de todos los casos se va a realizar el Valor Actual Neto (VAN). El VAN nos indica la cantidad de dinero que se ha ganado con el proyecto actualizado a día de hoy, por lo tanto se considera que el proyecto es rentable cuando el VAN es mayor que cero.

$$VAN = -I_0 + \sum \sum_{t=1}^n \frac{F_t}{(1+i)^t} \quad (\text{Ec. 11})$$

- I_0 = inversión inicial.
- F_t = Flujo de caja (ingresos – gastos) en cada periodo t .
- i = tasa de actualización.
- n = número de periodos de tiempo.

Los beneficios que se van a obtener son los correspondientes al pago de billetes. La línea del tranvía tiene una previsión de la demanda de 19 millones [15] en el 4º año de explotación, siendo un 80% de esa cantidad el primer año. Lo que hace 15 millones de pasajeros el primer año. Para el autobús se va a aplicar una cifra menor basándonos en el mayor flujo de pasajeros en una línea de autobús en Zaragoza que es la línea 24 con 7.5 millones de viajeros en el año 2017.

Los gastos serán los correspondientes al coste de la energía, al coste de la potencia, al mantenimiento de los vehículos e instalaciones y a la reposición de baterías o vehículos. Para los tranvías se considera una vida útil de 25 años, para los autobuses 15 años y para sus baterías 8 años.

$$F_t = \text{pasajeros} * C_{\text{billete}} - C_E - C_p - C_M - C_R \quad (\text{Ec. 11})$$

El coste del billete en Zaragoza es de 0.74 €, pero según la política tarifaria actual de la red de transporte público de Zaragoza el ingreso medio por billete aportado por el usuario es de 0.50 €/trayecto. La tasa de actualización se ha considerado un 10%.

El dato del VAN de la línea del tranvía ya está calculado en el anteproyecto para unos periodos de tiempo 30 y 23 años.

	Estudio de Viabilidad 30 años	Actualización Anteproyecto 23 años
VAN	-72.279.084,50	-103.488.701,35
TIR	1,814%	0,228%

Ilustración 46: Rentabilidad económico-financiera del tranvía Línea

En este análisis del estudio de viabilidad del tranvía se ha considerado una tasa de actualización del 5% (recomendada para proyectos de inversión en ferrocarriles). Debido a los

grandes costes de la obra del tranvía, la inversión inicial no se recupera en un periodo de 30 años. Aunque se tiene una TIR positiva, el proyecto no es viable a corto plazo. Pero el proyecto cuenta con una rentabilidad económica suficiente como para que se estudie su ejecución.

Para una demanda de 7,5 millones se tiene los siguientes VAN para los distintos casos de autobuses,

	Carga en cocheras	Una carga oportunidad	Dos cargas oportunidad
VAN20	38,393,857.67 €	39,736,651.33 €	39,571,788.22 €
VAN15	33,689,870.25 €	35,055,314.26 €	34,887,942.36 €

Tabla 32: Valor Actual Neto para 20 y 15 años del autobús

Todos los proyectos de autobuses son viables a 20 y 15 pues permiten recuperar la inversión inicial y darle valor añadido. De entre ellos el autobús con una carga de oportunidad, aunque muy parejo con el de dos cargas de oportunidad es el que mejor VAN tiene y por tanto será el proyecto más rentable a realizar.

7. Conclusiones

En este trabajo se ha realizado una comparación técnica y económica de la línea Este – Oeste del tranvía frente al uso de autobuses urbanos eléctricos. De lo obtenido en el estudio técnico se puede destacar lo siguiente:

- El consumo de un tranvía a plena capacidad para la línea 2 es de 5,5 kWh/km frente a los 2,27 kWh/km de un autobús a plena carga recorriendo el mismo recorrido. Esto se traduce en una energía consumida por pasajero de 0,025 kWh/pasajero*km para el tranvía y 0,027 kWh/pasajero*km para el bus. El tranvía debido a su gran masa tiene un mayor consumo, pero proporciona una energía por pasajero menor que la que proporciona un autobús eléctrico debido a su gran capacidad, aunque esta diferencia no sea demasiado grande.

	Tranvía	Autobús
Energía consumida (kWh/km)	5,5	2,27
Energía consumida (kWh/pasajero*km)	0,025	0,027

Tabla 33: Resumen consumos obtenidos a máxima carga

- En un tranvía y un autobús la parte de tracción es la parte que más consume y los equipos auxiliares pueden representar entre un 10 y un 28% del consumo total para el tranvía y alrededor de un 10% del consumo total para el autobús.

Del estudio económico y de viabilidad se han calculado los costes asociados al caso del tranvía y al caso de los autobuses (carga en cocheras, un punto de carga de oportunidad y dos puntos de carga de oportunidad) y su rentabilidad. Se puede extraer lo siguiente:

- El tranvía es una obra de ingeniería civil de grandes características por lo que se necesita una inversión inicial muy grande. La diferencia entre los costes asociados al material móvil y a la inversión inicial son muy notorias entre el tranvía y el autobús.

Además, los costes variables asociados al coste de energía y de mantenimiento también son mayores.

	Tranvía	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
Costes Fijos (€/año)	232.671.097	5.857.129	4.136.862	4.322.439
Costes Variables (€/año)	2.129.230	333.186	375.947	375.947

Tabla 34: Resumen Costes

- El VAN del tranvía para 23 años de explotación sale negativo, indicando que la viabilidad del proyecto no es buena, pero tiene un TIR positivo así que se podría estudiar la ejecución de la obra. En el caso de los autobuses para un VAN de 20 años se tiene una muy buena rentabilidad del proyecto para los 3 casos y una tasa interna de retorno máxima de 125% para el caso de una carga de oportunidad.

	Tranvía	Carga en cocheras	Una carga de oportunidad	Dos cargas de oportunidad
VAN	-103.488.701,4	38.393.857,67 €	39.736.651,33 €	39.571.788,22 €
TIR	0.23%	89%	125%	119%

Tabla 35: Resumen Viabilidad económica

La línea 2 del tranvía es una obra que conllevaría modificar calles principales de Zaragoza y afectar notablemente al tráfico rodado. Tiene las ventajas de ser un medio de transporte de gran capacidad y tener consumos menores que el autobús. Como desventaja estaría el gran impacto visual que genera y la poca flexibilidad del trazado, pues se necesitarían enlaces de conexión para la línea y no puede modificar su trazado.

En cambio, con el auge del desarrollo de los vehículos eléctricos el autobús eléctrico ha logrado hacerse un hueco en nuestras ciudades con autonomías y precios competitivos frente a otros medios de transporte. A esto se le añade que es un medio de transporte que tiene cierta flexibilidad y puede cambiar el recorrido en momentos de necesidad a diferencia del tranvía.

Según el estudio realizado la opción más viable para realizar sería la elaboración de línea Este – Oeste con una flota de autobuses eléctricos. De entre las tres opciones planteadas la opción elegida para realizar esta línea debido a las condiciones expresadas anteriormente (menores costes y mayor viabilidad económica) es la de un punto de carga de oportunidad situado al inicio de la línea.

ANEXOS

A. Dossier del Tranvía



La línea 1 del tranvía de Zaragoza funciona desde el 26 de marzo en todo su recorrido, un trayecto de 12,8 kilómetros y veinticinco paradas por sentido, que culmina dos años después de la inauguración del primer tramo. Se estima que el trazado, que une el extremo norte de la ciudad con el extremo sur, atravesando el centro de la ciudad, el río Ebro y conectando centros hospitalarios, universitarios y deportivos, tendrá una demanda media que rondará los 100.000 viajeros diarios.

DATOS GENERALES LÍNEA 1

Longitud línea:	12,8 km.
Nº paradas:	25 por sentido
Distancia entre paradas:	500 metros
Alimentación:	Catenaria (excepto en el tramo entre las paradas Gran Vía y La Chimenea, de unos 2 km., donde el tranvía funciona sin catenaria con el sistema ACR).
Ancho de vía:	1435 mm.
Número de tranvías:	21 unidades Urbos III de CAF
Nº vagones:	5
Velocidad media:	21 km/h
Frecuencia de paso hora punta:	5 minutos
Tiempo total de recorrido norte-sur:	38 minutos
Intercambiadores:	3. Actur (bus), Fernando el Católico-Goya (Cercanías) y Emperador Carlos V (bus)
Aparcamientos intermodales:	2

DATOS DE INVERSIÓN LÍNEA 1 (MILLONES DE EUROS)

Obras de la plataforma:	202
Adquisición de material móvil:	82
Construcción de cocheras-talleres:	37
Urbanización complementaria de trazado:	55
Integración del sistema semafórico y otros gastos:	25
Total:	401 millones de euros

URBOS III. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Alimentación (Vcc. catenaria):	750
Longitud entre testeros (mm):	32366
Anchura exterior (mm):	2.650
Altura de piso (mm):	350
Altura del vehículo (mm):	3.600
Composición:	Cinco cajas articuladas sobre tres bogies (motor-portante-motor)
Distancia entre bogies (mm):	11.245
Diámetro de ruedas (mm):	590/510
Estructura de caja:	Aluminio
Paso libre puertas (mm):	1.300 (puertas dobles) / 800 (puertas simples)
Puertas por costado:	6
Peso del vehículo en vacío (kg):	45.450
Prestaciones	
Velocidad máxima de servicio:	50 km/h
Potencia nominal:	560 kW
Aceleración máxima:	1,2 m/s ²
Deceleración del freno de servicio:	1,2 m/s ²
Deceleración del freno de emergencia:	2,8 m/s ²
Radio mínimo de curva:	20 m
Plazas de pie por tranvía (6p/m ²):	142
Plazas sentadas por tranvía:	52 + 4 pmr

del norte de la ciudad, supone la culminación de un proyecto que se enmarca dentro del Plan de Movilidad Sostenible del Ayuntamiento de Zaragoza.

Último tramo

El tramo puesto en servicio el pasado 26 de marzo tiene una longitud de 5,4 kilómetros y cuenta con diez paradas por sentido - Plaza Aragón, Plaza España, César Augusto, Plaza del Pilar - Murallas, La Chimenea, María Montessori/Martínez Soria, León Feli-

pe/Rosalía de Castro, Pablo Neruda/Clara Campoamor, Adolfo Aznar/Legaz Lacambra, García Abril/- Margarita Xirgú, Campus Río Ebro, Juslibol, Parque Goya y Avenida de la Academia.

La inauguración de este tramo ha supuesto la conclusión de la línea 1 y el cruce del tranvía por la barrera natural del río Ebro, alcanzando la margen izquierda y uniendo las dos orillas.

El tranvía atraviesa el río por el Puente de Santiago, de 187 metros de longitud, una estructura de diseño limpio y estilizado, con



dos puentes gemelos unidos por una galería central, que se inauguró en marzo de 1967.

El puente, obra de Tomás Mur Vilaseca, fue profundamente renovado dentro de las obras asociadas a la celebración de la Expo 2008 y, con la llegada del tranvía, se ha dado un paso más en su reacondicionamiento, reordenando los servicios que discurren por la galería central. Dichas canalizaciones se

B. Resumen de costes de IDOM 2019.

Tabla 21. Resumen de costes de inversión (antes de IVA)

Concepto	Importe (€)
Construcción	189.766.135,00 €
Adquisición de material móvil	37.190.000,00 €
Dirección de las obras	5.692.984,05 €
Compensaciones y adquisiciones de terrenos	1.461.978,58 €
TOTAL	234.111.097,63 €

Tabla 19. Resumen de costes de construcción (antes de IVA)

Ref.	Capítulo	Importe (€)
EST	ESTRUCTURAS	10.438.948,77 €
SERV	SERVICIOS AFECTADOS	19.092.636,71 €
OCTR	OBRA CIVIL TRANVÍA	25.025.294,08 €
URB	URBANIZACION	32.410.655,89 €
PAR	PARADAS	3.372.323,81 €
COMP	OBRAS COMPLEMENTARIAS	12.972.028,12 €
ELEC	ENERGÍA, ELECTRIFICACIÓN Y ALUMBRADO	19.381.931,19 €
SEN	SEÑALIZACIÓN TRANVIARIA	8.039.090,72 €
COM	COMUNICACIONES Y CENTRO DE CONTROL	6.836.441,00 €
BIL	SISTEMA TARIFARIO	2.340.600,00 €
CYT	COCHERAS Y TALLERES	14.485.300,39 €
MAMB	MEDIDAS AMBIENTALES	617.000,00 €
GR	GESTIÓN DE RESIDUOS	2.073.300,00 €
SYS	SEGURIDAD Y SALUD	2.381.789,66 €
TOTAL PRESUPUESTO EJECUCIÓN MATERIAL		159.467.340,34 €
13% Gastos Generales		20.730.754,24 €
6% Beneficio Industrial		9.568.040,42 €
TOTAL PRESUPUESTO ANTES DE IVA		189.766.135,00 €

ELEC	ENERGÍA, ELECTRIFICACIÓN Y ALUMBRADO	19.381.931,19
ELEC.01	ELECTRIFICACIÓN DE LA LAT	7.546.654,40
ELEC.02	SUBESTACIONES Y LÍNEAS MT	8.975.001,79
ELEC.03	INSTALACIÓN BT EN PARADAS	872.250,00
ELEC.04	ALUMBRADO EXTERIOR	1.988.025,00

Tabla 20. Resumen de costes de adquisición de material móvil (antes de IVA)

Equipo	Ud	Precio Unit. (€)	Importe (€)	Vida útil (años)
Tranvía				
Material móvil tranvía 32 m	13	2.750.000,00 €	35.750.000,00 €	25
Subtotal tranvía				
Conexión con Estación Intermodal				
Bus eléctrico carga oportunidad	3		1.350.000,00 €	13
Bicicletas/triciclos eléctricos			90.000,00 €	5
Subtotal Conexión Estación Intermodal				
TOTAL			37.190.000,00 €	

Tabla 28. Resumen de costes de energía

ENERGÍA TRACCIÓN		
km anuales	precio unitario	importe anual
1.038.649	0,55 €	571.256,95 €

Tabla 27. Resumen de costes de mantenimiento-material

MANTENIMIENTO-MATERIALES			MANTENIMIENTO-MATERIAL MÓVIL		TOTAL MANTENIMIENTO
km anuales	precio unitario	importe anual	precio unitario	importe anual	importe anual
1.038.649	1,03 €	1.069.808,47 €	1,50 €	1.557.973,50 €	2.627.781,97 €

Tabla 26. Resumen de evaluación costes de mantenimiento-material por km recorrido

CONCEPTO	Cantidad	Precio Unitario	Importe total anual
Vía	1	400.000 €	400.000 €
Señalización	1	200.000 €	200.000 €
Comunicaciones	1	180.000 €	180.000 €
Energía	1	200.000 €	200.000 €
Auxiliar (limpieza,seguridad, etc.)	1	50.000 €	50.000 €
COSTE TOTAL			1.030.000 €
COSTE POR KM recorrido	1.000.000		1,03 €

Tabla 12. Demanda anual por modo

AÑO	TRAYECTOS					
	COCHES sin ocup.	COCHES (*)	BUS	TRANVÍA	TRANVÍA L1	TRANVÍA L2
Situación actual	226.013.982	271.216.778	89.231.924	26.848.118	26.848.118	
Alternativa 3A	219.525.662	263.430.794	73.468.226	49.730.481	30.120.169	19.610.312

Tabla 25. Inversiones. Año de inversión. % de realización. Vida útil

Partidas	Año de inversión y % de realización		Vida Útil (años)
	Año 1 de inversión	Año 2 de inversión	
Infraestructura/Construcción			
Obra civil	40%	60%	50
Cocheras no Edifi.	0%	100%	25
Edificaciones	40%	60%	50
Obra civil interconexión EIZD	0%	100%	50
Superestructura de la Vía			
Vía	20%	80%	25
Señalización	0%	100%	13
Obra eléctrica interconexión EIZD	0%	100%	13
Otros			
Dirección de obra	50%	50%	-
Material rodante tranvía	0%	100%	25
Material móvil bus eléctrico	0%	100%	15
Material móvil bicicletas	0%	100%	5
Afecciones a servicios	75%	25%	-
Compensac. y adquisic. terrenos	100%	0%	-

Tabla 29. Rentabilidad económico-financiera

	Estudio de Viabilidad 30 años	Actualización Anteproyecto 23 años
VAN	-72.279.084,50	-103.488.701,35
TIR	1,814%	0,228%

Tabla 2. Proyecciones de demanda. % sobre demanda calculada

AÑO	Tasa crecimiento interanual	% sobre demanda calculada
Año 1		80,0%
Año 2		87,0%
Año 3		94,0%
Año 4		100,0%
Año 5	1,0%	101,0%
Año 6	1,0%	102,0%
Año 7	1,0%	103,0%
Año 8	1,0%	104,1%
Año 9	1,0%	105,1%
Año 10	1,0%	106,2%
Año 11	1,0%	107,2%
Año 12	1,0%	108,3%
Año 13	1,0%	109,4%
Año 14	1,0%	110,5%
Año 15	0,5%	111,0%
Año 16	0,5%	111,6%
Año 17	0,5%	112,1%
Año 18	0,5%	112,7%
Año 19	0,5%	113,3%
Año 20	0,5%	113,8%
Año 21	0,5%	114,4%
Año 22	0,5%	115,0%
Año 23	0,5%	115,5%
Año 24	0,5%	116,1%
Año 25	0,5%	116,7%
Año 26	0,5%	117,3%
Año 27	0,5%	117,9%
Año 28	0,5%	118,5%

C. Tarifa 3.0. A



Tarifa Preferente

Muchas gracias por interesarte en nuestras ofertas. Contratando la **Tarifa Preferente** disfrutarás de un precio ajustado y estable para que ahorres y no tengas que preocuparte de las oscilaciones del precio de la energía.

30%

Descuento indefinido sobre
el término de energía.

4%

Descuento 1er año sobre el
término de energía.

Precios

Precios con descuentos incluidos

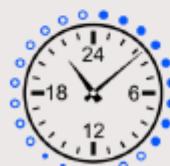
Término de Potencia
€/kW y mes

3,495896 Punta
2,097537 Llano
1,398358 Valle

Término de Energía €/kW y mes

	Punta	Llano	Valle
15-30 kW	0,127181	0,114117	0,085331
30-50 kW	0,124454	0,111380	0,082610
50-100 kW	0,122313	0,109247	0,080469
>100kW	0,121369	0,108296	0,079524

Periodos horarios



Horario de Verano

- Punta: 11-15h (4h)
- Llano: 8-11h y 15-24h (12h)
- Valle: 0-8h (8h)



Horario de Invierno
(Baleares todo el año)

- Punta: 18-22h (4h)
- Llano: 8-18h y 22-24h (12h)
- Valle: 0-8h (8h)



Tarifa Óptima

Muchas gracias por interesarte en nuestras ofertas. Contratando la Tarifa Óptima disfrutarás de un precio ajustado y estable para que ahorres y no tengas que preocuparte de las oscilaciones del precio de la energía.

Precio fijo 12 meses

Precios

Término de Potencia €/kW y mes

4,931122 Punta

3,040891 Llano

0,697311 Valle

Término de Energía €/kWh y mes

0,10787 Punta

0,10131 Llano

0,07664 Valle

+9% de descuento adicional

en el Término de Energía de forma indefinida

Horarios

Periodos horarios



- Punta: 11-15h (4h)
- Llano: 8-11h y 15-24h (12h)
- Valle: 0-8h (8h)



- Punta: 18-22h (4h)
- Llano: 8-18h y 22-24h (12h)
- Valle: 0-8h (8h)

Horario de Invierno
(Bajoestos todo el año)

Bibliografía

- [1] “La contaminación causó 38.600 muertes en España en 2015, una subida del 23% | Sociedad | EL PAÍS.” [Online]. Available: https://elpais.com/sociedad/2018/10/29/actualidad/1540813829_874914.html. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [2] “Real Academia Española. Diccionario Usual.” [Online]. Available: <http://lema.rae.es/drae2001/srv/search?id=PuE67KIUiDXX2fjyBvyQ>. [Accessed: 11-Nov-2019].
- [3] M. Ríos-Mesías, G. Ramos-López, and G. García-Mora, “Características de un sistema eléctrico de transporte masivo con tranvías,” *Ing. y Univ.*, vol. 15, no. 1, pp. 91–104, 2011.
- [4] J. Talla, L. Streit, Z. Peroutka, and P. Drabek, “Position-Based T-S Fuzzy Power Management for Tram With Energy Storage System,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 5, pp. 3061–3071, 2015.
- [5] L. Alfieri, D. Iannuzzi, F. Mottola, M. Pagano, and M. Roscia, “Battery-Based Energy Storage Systems for Catenary-Free Electric Trains,” *2018 IEEE International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Ve.* pp. 1–6, 2018.
- [6] Á. Lopez Lopez, R. Rodriguez Pecharroman, P. Cucala García, and A. Fernandez Cardador, “Aprovechamiento de la energía procedente del frenado regenerativo en ferrocarriles metropolitanos.,” *An. mecánica y Electr.*, no. 2004, p. 7, 2013.
- [7] D. Zhao, C. Fu, and L. Su, “Study on the network suppressing measures of the DC bias current in AC power system,” *Asia-Pacific Power Energy Eng. Conf. APPEEC*, vol. 2016-Decem, pp. 594–598, 2016.
- [8] “Wireless Charging for Electric Vehicles - IEEE Transportation Electrification Community.” [Online]. Available: <https://tec.ieee.org/newsletter/march-2018/wireless-charging-for-electric-vehicles>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [9] “Study Methods of Wireless Power Transfer Technology in Electric Vehicle Charging - IEEE Transportation Electrification Community.” [Online]. Available: <https://tec.ieee.org/newsletter/july-august-2014/study-methods-of-wireless-power-transfer-technology-in-electric-vehicle-charging>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [10] J. L. Villa, “Sistemas de Transferencia de Energía para Vehículos eléctricos mediante Acoplamiento Inductivo,” p. 261, 2009.
- [11] “Magnetizable Concrete Technology for Wireless Charging - Power Electronics.” [Online]. Available: <https://www.powerelectronicsnews.com/technology/magnetizable-concrete-technology-for-wireless-charging>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [12] “MAGMENT — Dynamic Wireless Charging.” [Online]. Available: <https://www.magment.de/en-dynamic-wireless-charging>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [13] “La primera autopista eléctrica del mundo está en Suecia, y es obra de Siemens y

- Scania.” [Online]. Available: <https://www.motorpasion.com/tecnologia/la-primer-autopista-electrica-del-mundo-ya-es-una-realidad-en-suecia-gracias-a-siemens-y-scania>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [14] “Carga ultrarrápida por pantógrafo para autobuses eléctricos.” [Online]. Available: <https://www.obrasurbanas.es/carga-ultrarrapida-pantografo/>. [Accessed: 18-Nov-2019].
- [15] C. Ortega Ortiz, “IDOM. Memoria Anteproyecto Línea de Tranvía Este - Oeste en Zaragoza,” Zaragoza, 2019.
- [16] L. Streit and P. Drabek, “Simulation model of tram with energy storage system,” *Int. Conf. Appl. Electron.*, pp. 1–4, 2013.
- [17] R. Barrero, J. Van Mierlo, and X. Tackoen, “Enhanced Energy Systems for improved On-Board Light Rail Vehicle Efficiency,” *IEEE Veh. Technol. Mag.*, 2008.
- [18] J. Larminie and J. Lowry, *Electric Vehicle Technology Explained: Second Edition*. 2012.
- [19] “Sitio web de BYD.” [Online]. Available: <https://bydelectrico.com/ec/wp-content/uploads/2018/05/BYD-Bus-K9-12m.pdf>. [Accessed: 22-Nov-2019].
- [20] R. Bargalló, J. Llaverías, and H. Martín, “El vehículo eléctrico y la eficiencia energética global,” *Euetib-C*, pp. 5–7, 2009.
- [21] S. Derammelaere, M. Haemers, J. De Viaene, F. Verbelen, and K. Stockman, “A quantitative comparison between BLDC, PMSM, brushed DC and stepping motor technologies,” *19th Int. Conf. Electr. Mach. Syst. ICEMS 2016*, 2017.
- [22] C. Chih-Ming and S. Jheng-Cin, “Performance analysis of EV powertrain system with/without transmission,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 4, no. 3, pp. 629–634, 2010.
- [23] P. J. Kollmeyer, J. D. McFarland, and T. M. Jahns, “Comparison of class 2a truck electric vehicle drivetrain losses for single- and two-speed gearbox systems with IPM traction machines,” *2015 IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf.*, pp. 1501–1507, 2016.
- [24] A. Ortego Bielsa, I. Zabalza Bribián, and A. Barrio Moreno, “Zaragoza 2020 Por La Movilidad Urbana Sostenible,” 2015.
- [25] L. Chen and D. P. Wang, “Energy Consumption Modeling and Energy Saving Analysis of Supercapacitor Tramcar,” *2018 IEEE Int. Conf. Intell. Robot. Control Eng. IRCE 2018*, pp. 193–197, 2018.
- [26] V. Hug, “Copenhagen trial with 12 m B.Y.D K9 electric buses Victor Hug Project Manager,” no. September, 2015.
- [27] B. Mebarki, B. Draoui, B. Allaou, L. Rahmani, and E. Benachour, “Impact of the air-conditioning system on the power consumption of an electric vehicle powered by lithium-ion battery,” *Model. Simul. Eng.*, vol. 2013, 2013.
- [28] Bloomberg, “Electric Buses in Cities,” 2018.
- [29] J. Guo, “Advanced Clean Transit Program Literature Review on Transit Bus Maintenance Cost,” 2016.

- [30] Lukic, S.M. Cao, J. Bansal, R. C. Rodriguez, F. y Emadi, A. Energy Storage systems for Automotive Applications. IEE TRANSACTIONS OF INDUSTRIAL ELECTRONICS. VOL 55. Junio 2008.
- [31] Tram - Wikipedia. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from https://en.wikipedia.org/wiki/Tram#cite_note-31
- [32] Autobús eléctrico - Wikipedia, la enciclopedia libre. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from https://es.wikipedia.org/wiki/Autob%C3%BDs_el%C3%A9ctrico
- [33] Callejero. Ayuntamiento de Zaragoza. (n.d.). Retrieved November 20, 2019, from <http://www.zaragoza.es/sede/portal/callejero/>
- [34] IEEE Smart Grid. (2018). *Battery Storage Systems*. (February), 1–64.
- [35] Cando Mera, D. A., & Suntaxi Caizaluisa, A. J. (2019). *Análisis de los procesos de carga y descarga de la batería de alta tensión y autonomía del bus 100% eléctrico marca BYD k9G cama alta en diferentes condiciones de operación*. Latacunga.
- [36] Peña Ordóñez, C. (2011). Estudio de baterías para vehículos eléctricos. *Universidad Carlos III Madrid*.
- [37] García, C. Mirasso, A Storti, M. Tornello, M. Análisis de las fuerzas que actúan en la interface neumático – carretera. Modelos de simulación de aceleración. 2013. Mendoza, Argentina.